



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
INGENIERÍA
INDUSTRIAL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA II

TESIS DOCTORAL

*"VALIDACIÓN DE ESCORIAS DE HORNO DE ARCO
ELÉCTRICO MEDIANTE SU USO COMO ADICIÓN EN
HORMIGÓN"*



DIRECTORES:
Dr. F.J. RUBIO HERNÁNDEZ
Dra. M.D. RUBIO CINTAS

AUTOR:
FRANCISCO CONTRERAS DE VILLAR

MÁLAGA, 2017



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



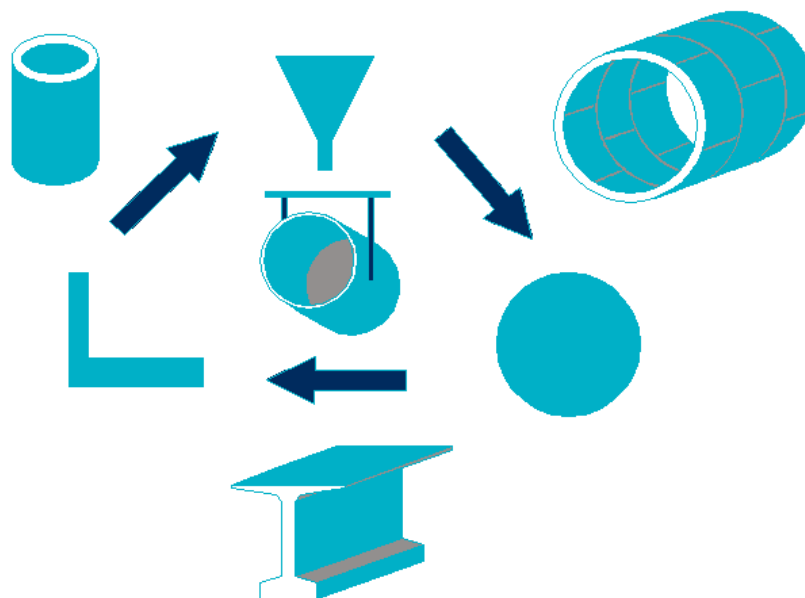
ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
INGENIERÍA
INDUSTRIAL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA II

TESIS DOCTORAL

*"VALIDACIÓN DE ESCORIAS DE HORNO DE ARCO
ELÉCTRICO MEDIANTE SU USO COMO ADICIÓN EN
HORMIGÓN "*




Francisco Contreras de Villar

Málaga, 2017



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Francisco Contreras de Villar

 <http://orcid.org/0000-0003-4720-6594>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

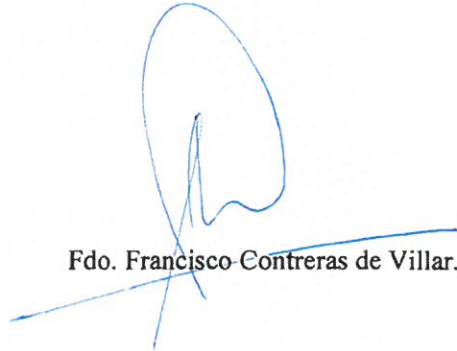
No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es




VALIDACIÓN DE ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO MEDIANTE SU USO COMO ADICIÓN EN HORMIGON

Memoria presentada para optar al Título de Doctor por la Universidad de Málaga.




Fdo. Francisco Contreras de Villar.

DIRECTORES:



Fdo. Dr. Francisco José Rubio Hernández
Catedrático de Universidad. Universidad de Málaga



Fdo: Dra. Maria Dolores Rubio Cintas
Profesora Titular Universidad. Universidad de Cádiz



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

FRANCISCO JOSE RUBIO HERNÁNDEZ, Catedrático de Universidad del Departamento de Física Aplicada II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad de Málaga,

MARIA DOLORES RUBIO CINTAS, Profesora Titular de Universidad del área de conocimiento de Mecánica de los medios continuos y Teoría de Estructuras del Departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Universidad de Cádiz,

CERTIFICAN:

Que el presente trabajo de investigación titulado “**VALIDACIÓN DE ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO MEDIANTE SU USO COMO ADICIÓN EN HORMIGÓN**”, constituye la Memoria de tesis Doctoral de D. Francisco Contreras de Villar, que ha sido realizada en el laboratorio de Reología y Electrocinética del Departamento de Física Aplicada II de la Universidad de Málaga y en laboratorio de Hormigones y Materiales del Departamento de Ingeniería Civil e Ingeniería Industrial de la Universidad de Cádiz, bajo nuestra dirección y cuya presentación autorizamos en Málaga, a 12 de enero de 2017.

Fdo. Dr. Francisco José Rubio Hernández

Fdo: Dra. Maria Dolores Rubio Cintas



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores de tesis Lola y Paco,

A tí Lola por haber aparecido hace ya unos años por la factoría y engancharme en la idea de la valorización de residuos. Me atrapó la ilusión y entrega que pones en tus proyectos que hacen fácil trabajar a tu lado. Me siento honrado porque hayas confiado en mí y orgulloso de que hayas sido mi tutora de tesis. No dejo de aprender a tu lado. No me olvido de ti, Miguel, siempre has estado ahí desde el principio y solo has tenido palabras de ánimo, sabiduría y comprensión conmigo.

Paco me faltan palabras para agradecer tu entrega y paciencia conmigo. Me siento honrado de haber trabajado bajo tu tutela y haber aprendido de este fascinante mundo de la reología que tanto sufría en la vida profesional y que gracias a ti me has ayudado a entender mejor.

Si hoy estoy en este punto no debo de olvidar a muchos compañeros, ahora amigos, que trabajamos juntos y con tanto cariño os recuerdo.

Enrique, mi jefe en la factoría de DRACE, eres una persona muy especial para mí y quiero aprovechar para demostrarte mi cariño y afecto. Confiaste en mí desde el principio, me distes la oportunidad de crecer en la profesión y en mi vida personal, quiero que sepas que hoy mi padre se sentirá orgulloso y feliz de transmitirte estas palabras. Aprender de ti ha sido una de las mayores riquezas que me ha dado la vida.

Gonzalo, Miguel, Francis, Rafael, Ismael, Andrés, Melgar, Curro, Serafín, Haro, Juan Carlos, Manolo, Ceferino, Jose Luis, Jose María... que equipo!!!! Sabéis que os guardo todo el cariño que puedo. Quiero que sepáis que habéis sido unos compañeros en DRACE excepcionales y que se me llena el corazón cuando recuerdo los momentos vividos. Muchas gracias por vuestra ayuda.

A mis nuevos compañeros de la Politécnica de Algeciras, ya son diez años juntos y me siento muy afortunado. Quiero destacar la ayuda siempre de Manolo y Maria José que siempre estáis ahí cuando hace falta. Sin vuestra ayuda no hubiera podido terminar los trabajos a tiempo. A Olegario, que siempre tienes disposición para ayudar en lo que sea: ordenador, normativa, da igual el problema que surja que tú lo solucionas. A Pedro que desde el principio me has dado siempre buenos consejos y madurez. A Inmaculada por su ayuda en la revisión final.

A Maria Eugenia, muchas gracias por ayudarme en esta parte final de la tesis, ahora te toca a tí, mucho ánimo.

A Manolo por ayudarme también en esta fase final.

A la empresa ACERINOX por suministrar las EAFSS utilizadas en la tesis.

A SERGEYCO por su profesionalidad. Paco, Daniel muchas gracias por vuestra colaboración.

A la empresa BASF y en particular a Pedro, por la profesionalidad que me has demostrado en todos los años que nos conocemos.

A mi amigo Vicente que siempre estás para ayudar.

Y como no a mi familia por su confianza y apoyo.

Quiero comenzar por recordar a mi Padre, fuente de mi inspiración como persona. Recuerdo con ternura el primer día que iba a trabajar a la factoría y estudiaba en el coche con el “Fernandez Cánovas”, me miró sorprendido y me preguntó para que estudiaba, que ya tendría tiempo de aprender. Fue una premonición, lo cierto es que no he dejado de estudiar y vivir por y para el hormigón. Te echo de menos papa y deseo que disfrutes este momento.

Mamá gracias por tu amor, siempre has estado en los momentos difíciles y ahora quiero que disfrutemos juntos. Por cierto otro motivo de satisfacción: presentar mi Doctorado en tu ciudad natal.

A mi “melli” que nunca te separas de mí y me ayudas siempre que puedes y a mi hermano Antonio que has sido un referente a seguir en mi vida, ¡ánimo, que ya estás en capilla! Estoy orgulloso de vosotros.

Quiero devolver a mis tíos Fernando y Margot el cariño y afecto que siempre me demostraron.

Mariete, que satisfacción haberte visto crecer y compartir hoy juntos este momento académico tan especial para los dos.

Quiero acordarme especialmente de Isabel, mi madre política, que con tanto cariño y dulzura se interesaba siempre por mis estudios.

Y como no, agradecer a mi familia más directa la paciencia que han tenido conmigo.

A mis hijos Paco y Sandra, quiero compartir con vosotros este momento tan especial. Me siento orgulloso de vosotros y afortunado de la familia que formamos.

Al germen de esta tesis. Ana, mi mujer, mi amor, mi vida. Todavía guardo la nota que me escribiste en la libreta animándome a avanzar en los estudios. Hoy afirmo que detrás de cada hoja escrita, de cada ensayo, de cada viaje realizado, tú has estado siempre para hacer el trabajo que no se ve. No te has lamentado y en cambio me has animado a seguir y seguir hasta conseguir los objetivos que me marcara. Hoy te quiero reconocer tu esfuerzo y pedirte que compartas conmigo este momento que tanto significa para nosotros. Muchas gracias amor.

Ya solo me queda emplazaros a todos a tomar una cerveza.

A todos mi cariño, respeto y agradecimiento sincero,

A mi familia,
A mis hijos Paco y Sandra,
A Ana, mi amor,
A mi padre in memoriam.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

REFLEXIÓN

“Lo único que necesita el mal para triunfar es que los hombres buenos no hagan nada (Edmun Burke)”

Puede parecer pretenciosa la frase, pero el que me conozca sabe que no va por ahí el mensaje.

Considero que la sociedad en la que vivimos muchas veces se actúa siguiendo la inercia de un sistema, que es difícil vencer.

Defino a los buenos como las personas que tenemos el privilegio y la suerte de poder aportar conocimiento a la sociedad. Investigar es un honor y un compromiso con la sociedad que nos ha encargado esta tarea.

No nos quedemos parados, vencamos las inercias y avancemos en pro de un mundo mejor.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

RESUMEN

La industria del acero está presente en nuestra sociedad y es una de las piezas necesarias para dar solución a la mejora de los estándares de vida mediante la construcción.

El acero es un material en todas las técnicas constructivas actuales, hacen posible que fabricantes y constructores puedan poner en práctica diseños ligeros y durables. Una característica destacable es su reciclaje ilimitado, es decir, tiene la propiedad de no perder resistencia, durabilidad o cualquiera de sus propiedades.

La producción del acero conlleva la producción de residuos inherentes a su proceso de fabricación. El objeto de la tesis trata de poner en valor uno de los residuos generados por la ella. El residuo a estudiar es la Escoria de Horno de Arco Eléctrico de Acero Inoxidable (EAFSS).

Se aportará una solución de valorización a las EAFSS consistente en sustituir el árido fino por ellas en la fabricación de dos tipos de hormigón.

Los estudios desarrollados se han basado en los siguientes puntos:

- Caracterización de las EAFSS.
- Partiendo de dosificaciones de referencia conocidas, se han planteado nuevas dosificaciones con sustitución de la totalidad del árido fino por las EAFSS.
- Se han realizado estudios reológicos de los morteros equivalentes, para posteriormente contrastar los resultados con el hormigón fresco.
- Se han realizado ensayos mecánicos resistentes de los dos tipos de hormigón planteados y se han contrastado con el hormigón de referencia.
- Para finalizar se han realizado los ensayos que garantizan el correcto comportamiento ambiental de la solución de valorización propuesta.

El estudio parte de utilizar las EAFSS en su estado a la salida de fábrica, es decir, que no precisa de ningún tratamiento posterior.

A través del estudio reológico se ha demostrado que se mejora la trabajabilidad y robustez del hormigón al que se le ha adicionado EAFSS. La densidad obtenida también es mayor que el hormigón convencional.

Atendiendo al porcentaje de sustitución se aumentan las prestaciones mecánico-resistentes del hormigón.

Se ha conseguido diseñar un hormigón autocompactante a partir de EAFSS.

Como resumen se ha conseguido proponer una solución de valorización a las EAFSS con unos resultados muy beneficiosos para un material tan versátil y necesario en nuestras técnicas constructivas actuales.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

CAPÍTULO 1

Introducción



INDICE

| | | |
|---------|--|------|
| 1.1 | ANTECEDENTES | 1.5 |
| 1.1.1 | <i>Experiencias previas</i> | 1.7 |
| 1.1.1.1 | Obras de tierra y terraplenes..... | 1.7 |
| 1.1.1.2 | Firmes de carreteras..... | 1.7 |
| 1.1.1.3 | Edificación y obra pública..... | 1.8 |
| 1.1.1.4 | Utilización en cementera. | 1.8 |
| 1.1.1.5 | Utilización como árido para mortero..... | 1.9 |
| 1.1.1.6 | Utilización como árido de hormigón..... | 1.9 |
| 1.1.1.7 | Utilización como sustitutivo del cemento. | 1.11 |
| 1.1.2 | <i>Experiencia investigadora de los grupos de investigación participantes en la tesis</i> | 1.12 |
| 1.1.2.1 | Experiencia investigadora del grupo FQM231“Reología de suspensiones”..... | 1.12 |
| 1.1.2.2 | Experiencia investigadora en la valoración de desechos siderúrgicos del grupo TEP 951 ARHENE | 1.16 |
| 1.1.3 | <i>Estado del conocimiento</i> | 1.18 |
| 1.2 | HIPÓTESIS | 1.19 |
| 1.3 | OBJETIVOS PRINCIPALES | 1.20 |
| 1.4 | OBJETIVOS SECUNDARIOS | 1.21 |
| 1.5 | ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL | 1.21 |
| 1.5.1 | <i>Capítulo 1. Introducción</i> | 1.21 |
| 1.5.2 | <i>Capítulo 2. Producción de acero. Generación de escorias de horno de arco eléctrico</i> | 1.22 |
| 1.5.3 | <i>Capítulo 3. Materiales, dosificación y elaboración de hormigones</i> | 1.22 |
| 1.5.4 | <i>Capítulo 4. Estudio reológico del hormigón en estado fresco</i> | 1.22 |
| 1.5.5 | <i>Capítulo 5. Estudio mecánico del hormigón endurecido</i> | 1.22 |
| 1.5.6 | <i>Capítulo 6. Comportamiento ambiental del hormigón estudiado</i> | 1.22 |
| 1.5.7 | <i>Capítulo 7. Análisis de resultados y correlaciones encontradas</i> | 1.22 |
| 1.5.8 | <i>Capítulo 8. Conclusiones</i> | 1.23 |
| 1.6 | BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO | 1.24 |

1.1 Antecedentes

La industria del acero genera una gran cantidad de residuos generalmente resultantes de los procesos de fundición y enfriamiento. Estos residuos generados, se deben separar y acopiar. Este hecho implica que, debido al gran volumen de los residuos generados, sean necesarias grandes extensiones de acopios, dando como resultado un sobre coste para la acería. El subproducto objeto del estudio de la presente tesis es la escoria siderúrgica procedente de los hornos de arco eléctrico de la industria del acero inoxidable, en adelante EAFSS (Electric Arc Furnace Slag Stainless).

Las naciones de todo el mundo tratan de mejorar los estándares de vida de sus poblaciones y de salir de la pobreza y es inevitable afirmar que la demanda de acero se incrementará como consecuencia. Este crecimiento responde también a las necesidades y retos de la coyuntura económica actual y futura. La sociedad cumpliendo con el compromiso de mejora continua y satisfacción de las necesidades venideras precisa desarrollar materiales con mejores prestaciones técnicas a la vez que han de cumplir siempre con las normas ambientales más estrictas.

Las nuevas generaciones de acero siguen desarrollando técnicas que hacen posible que los fabricantes y constructores puedan poner en práctica diseños ligeros y durables. Además, pueden ser reciclados sin fin, sin pérdida de resistencia, durabilidad o cualquiera de sus otras propiedades distintivas.

El acero es fundamental en las técnicas constructivas actuales, simplemente porque ningún otro material combina de forma tan eficiente. Los carriles, carreteras y vehículos que conforman nuestros sistemas de transporte, utilizan el acero. El acero proporciona un marco fuerte y conexiones en los edificios en los que trabajamos, aprendemos y vivimos. Protege y entrega nuestro suministro de agua y alimentos. Es un componente básico en tecnologías que generan y transmiten energía.

Lograr una protección del medio ambiente adecuada, mejora la economía nacional porque no se necesita ni el consumo de materias primas ni el de energía, además constituye una fuente de empleos e ingresos de gran beneficio, a la vez que contribuye el equilibrio ecológico (Ferrer Prada, 2011)

La incorporación de los residuos de la industria a la fabricación de hormigón, ya sea como adiciones a la formulación del cemento o la sustitución parcial o total de los áridos, permiten minimizar las actividades extractivas, las cuales afectan negativamente al medio ambiente y, en sentido contrario, da valor a estos subproductos industriales.

La utilización de dichos subproductos está avalada por la experiencia de uso y una amplia base científica, (Amaral, 1999; Frias Rojas y col., 2002; Luxán y col., 2000; Motz y Geiseler, 2001).

El compromiso con el medio ambiente hace que existan numerosas publicaciones relacionadas con el objeto de esta tesis, que iremos referenciando durante los capítulos siguientes aprovechando la relación de su contenido con el objeto de estudio en cada capítulo. Una de las evidencias más claras relativas al compromiso de la sociedad con la valoración de los residuos procedentes de la siderurgia es la redacción de la vigente Normativa de Hormigón Estructural (Ministerio Fomento, 2008) (EHE-08). Dicha instrucción introduce una serie de novedades, que se resumen a continuación:

- Ampliación del ámbito de la Instrucción EHE, incorporando el hormigón de resistencia hasta 100 N/mm^2 (100 Mpa).
- Profundización en la garantía de la durabilidad de las estructuras, permitiendo establecer en proyecto una vida útil específica en función del tipo de estructura.
- Incorporación de aspectos medioambientales en el proyecto y ejecución de las estructuras de hormigón, ampliando la casuística de reciclado y reutilización de residuos (áridos reciclados, adiciones minerales procedentes de subproductos industriales, etc.), previniendo la generación de impactos durante la ejecución y fomentando el empleo de las mejores prácticas medioambientales.
- Incorporación de nuevos materiales no incluidos hasta entonces en la Instrucción EHE (hormigón reciclado, hormigón autocompactante, hormigón con fibras, hormigón con árido ligero, etc.). En general, adaptación al avance en el estado del conocimiento.



En este estudio se evaluarán las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón en el que hemos sustituido árido por EAFSS procedente del proceso de fabricación de aceros inoxidables. A pesar de existir numerosas publicaciones que avalan el uso de este residuo, su valorización es prácticamente nula.

Los estudios realizados se centran en tres temáticas fundamentales:

- Obras de tierra y carreteras.
- Firms de Carreteras.
- Edificación y obra pública.
 - Utilización en cementera.
 - Como áridos para mortero.
 - Como árido para hormigón.
 - Como sustitutivo del cemento.

1.1.1 Experiencias previas

Las experiencias que a continuación se detallan están extraídas de la ficha técnica: “Ficha Técnica Escorias de horno de Arco Eléctrico” editada por el CEDEX en el año 2011, (Ministerio Fomento y otros, 2011), donde se cita al trabajo realizado por los miembros del grupo de investigación ARENHE: (Rubio-Cintas y col., 2011)

1.1.1.1 Obras de tierra y terraplenes

Las escorias blancas de acería pueden ser utilizadas en la estabilización de suelos y como material para construcción de terraplenes. Este tipo de aprovechamiento se encuentra en fase de investigación y desarrollo.

1.1.1.2 Firms de carreteras

Las escorias negras, adecuadamente tratadas, cumplen con creces, generalmente, las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas

granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras. Tienen latente el riesgo de expansión y de hinchamiento, por lo que es muy importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando sobrepase los valores establecidos. Debido a su porosidad, su angulosidad, y a la falta de finos, las escorias pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que suelen combinarse con otros áridos para mejorar estos aspectos.

No deben utilizarse nunca en capas estabilizadas con cemento o junto a obra de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones.

Se ha comprobado que un adecuado tratamiento, y una clasificación y selección de las escorias en la planta, pueden proporcionar sin problemas áridos de calidad para ser utilizados en mezclas bituminosas. Estos áridos poseen un buen coeficiente de Los Ángeles y un excelente coeficiente de pulimento acelerado, que los hace especialmente utilizables en capas de rodadura, ya que mejoran su comportamiento frente a la acción combinada de abrasión, impacto y machaqueo. La composición química y el carácter básico de las escorias garantizan una buena adhesividad con los betunes convencionales. El principal problema que se plantea en la fabricación de mezclas con estos áridos es la falta de finos en la fracción más pequeña. Una dosificación de áridos adecuada, desde un punto de vista técnico, es la que combina árido grueso escoria y árido fino calizo.

1.1.1.3 Edificación y obra pública

En el campo de la edificación y obra pública, las escorias negras podrían utilizarse en la industria del cemento (como aporte de hierro al clínker o como adición) y como árido para hormigón.

1.1.1.4 Utilización en cementera.

En España se ha realizado como experiencia piloto el reciclaje de las escorias negras introduciéndolas en cementeras como aporte de hierro, silicio y cal al horno rotativo en el proceso de fabricación del clínker. La conclusión del estudio es que esta aplicación parece no presentar ninguna limitación desde el punto de vista técnico ni medioambiental (Ihobe, 1999). El control de la calidad medioambiental de las escorias en esta aplicación se realiza mediante la determinación de metales presentes en el



clínker elaborado y en las partículas en suspensión emitidas por chimenea. En la composición química del clínker con escorias, los únicos elementos que sufren cambios son el cromo y el manganeso (que aumentan considerablemente su porcentaje). No obstante, y dado que la legislación española no recoge limitaciones para dichos elementos y que su presencia en el cemento no representa problemas para la calidad técnica de dicho material, no se precisa tenerlos en cuenta.

La dosificación adecuada del material, en base a la composición química, con objeto de obtener un producto final de características iguales al obtenido con la utilización de materia prima convencional, se estima aproximadamente en un 4%, sin aparecer problemas de calidad técnica del producto final (Ihobe, 1999).

1.1.1.5 Utilización como árido para mortero.

Algunos estudios han investigado la posibilidad de utilizar las escorias de acería en la fabricación de morteros (EGMASA, 2004). Para ello, el material necesita una molienda previa con el objeto de obtener una granulometría similar a la de un árido convencional. Con este tratamiento se puede conseguir un material con un huso granulométrico dentro del especificado en los límites que recoge la Norma Básica de la Edificación (Fomento, 1991) y que presenta un contenido de finos muy reducido, inferior al 3%. Según este estudio, los morteros estudiados (con distintos porcentajes de escorias), presentan una buena resistencia a compresión, siendo los porcentajes óptimos de escorias, los situados en el intervalo 30-40%.

1.1.1.6 Utilización como árido de hormigón.

De forma experimental se está estudiando la posibilidad de utilizar este tipo de residuo como árido grueso (Manso y Marquínez, 2006) o fino (Ozkul, 1996) para hormigón. En ambos casos, las escorias se deben triturar y tamizar, obteniendo una granulometría similar a la de los áridos naturales. Además, se debe proceder a la estabilización y envejecimiento de las escorias para evitar su expansión. En estas investigaciones se reemplazó la totalidad de la arena por escorias negras de horno eléctrico, se obtuvieron hormigones de mayor densidad (2.770 kg/m^3), con una resistencia a compresión y carga de roturas similares a las de un hormigón con arena

natural y de mayor fragilidad. Según estos estudios, el fenómeno de lixiviación en un hormigón normal y en un hormigón con escorias es similar para todos los metales, excepto para el cloro.

En el plano internacional se han desarrollado algunas recomendaciones de utilización de este tipo de áridos en hormigón estructural, como las recomendaciones japonesas (Engineers, 2004), en las que se recogen tanto los requisitos de los áridos como las propiedades de los hormigones y recomendaciones para su proyecto y puesta en obra.

En estas recomendaciones se especifica que el uso de escorias queda limitado a aquellas escorias procedentes de plantas con un certificado de calidad en las que se realice un procesamiento y control adecuado de las mismas. De acuerdo con estas recomendaciones, se puede utilizar hasta un 100% de árido grueso de escorias, en cuyo caso el porcentaje de árido fino de escorias se limita al 30% (relativo al volumen total de árido fino). Si el árido grueso es natural, el porcentaje de árido fino de escorias puede ascender al 50%. Para porcentajes mayores, se requiere la realización de estudios específicos. Quedan excluidas las aplicaciones en hormigones de resistencia superior a 60 N/mm^2 y hormigones pretensados. Las escorias deben cumplir los requisitos establecidos para los áridos convencionales.

El hormigón con escorias de acería presentan una mayor demanda de agua para obtener una determinada consistencia, tanto mayor cuanto mayor es el contenido de escorias utilizadas.

La densidad de los hormigones con sustitución total del árido fino y grueso puede alcanzar un valor de 3000 kg/m^3 .

La resistencia del hormigón con escorias suele ser inferior a la de un hormigón convencional a edades tempranas (hasta 3 días) aunque, posteriormente, se puede obtener una resistencia similar o, incluso, ligeramente superior a la del hormigón convencional. Este tipo de hormigones suele presentar además una menor retracción.

Se deben utilizar aditivos aireantes para obtener un adecuado comportamiento de durabilidad frente a los ciclos hielo-deshielo. Debido al bajo contenido de sílice que

presentan las escorias de acería, el riesgo de que se presenten fenómenos de reacción álcali-árido es muy reducido.

Según estas recomendaciones, el hormigón con escorias de acería presentan, además, un comportamiento adecuado durante su puesta en obra, compactado y acabado.

En el caso de utilizar exclusivamente árido fino de escorias en un porcentaje inferior al 30%, el comportamiento del hormigón se puede considerar similar al de un hormigón convencional. Para porcentajes superiores de árido fino (inferior al 50%) o para la utilización de áridos gruesos de acería, las recomendaciones establecen además, criterios específicos para determinar el diagrama tensión deformación, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, retracción y densidad, así como criterios de dosificación para garantizar la durabilidad de este tipo de hormigones en diferentes clases de exposición ambientales.

1.1.1.7 Utilización como sustitutivo del cemento.

En este sentido no hay referencias previas que hayan planteado este tipo de estudios. La primera publicación la realizan los integrantes del grupo de Investigación TEP 951-ARENHE (Aprovechamiento de Residuos Industriales, de construcción y/o demolición para la Fabricación de Hormigón Estructural y No Estructural), ubicado en la Escuela Politécnica Superior de Algeciras y adscrito al Departamento de Ingeniería Industrial y Civil de la Universidad de Cádiz del que el doctorando es miembro (Parrón-Vera y col., 2008a).

Se han alcanzado importantes logros y obtenido resultados de gran interés científico-técnico, destacando la patente internacional PCT_ES 2014_000128 sobre “Procedimiento para la fabricación de hormigón de escoria” (Rubio-Cintas y col., 2013), patentada por la Universidad de Cádiz a nombre de los inventores M^a Dolores Rubio Cintas; Miguel Á. Parrón Vera y Francisco Contreras de Villar.

Actualmente el grupo TEP 951-ARENHE ha sido beneficiario de los siguientes proyectos promovidos por el CDTI

- Proyecto 1. Valorización de escorias de acería procedentes de vertedero como sustituto del cemento en la fabricación de hormigones. Empresa contratante: DRACE (Construcciones Especiales y Dragados, S.A.).
- Proyecto 2. Valorización de escorias de acería procedentes de vertedero como sustituto del cemento en la fabricación de hormigones. Empresa contratante: GEOCISA (Geotecnia y Cimientos, S.A.).

1.1.2 Experiencia investigadora de los grupos de investigación participantes en la tesis.

Los estudios desarrollados se enmarcan dentro de un marco de colaboración existente entre el grupo FQM231 "Reología de suspensiones", liderado por el Dr. Francisco J. Rubio Hernández, adscrito al Departamento de Física Aplicada II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad de Málaga y los profesores Dres. María Dolores Rubio Cintas y Miguel Ángel Parrón Vera adscritos al Departamento de Ingeniería Civil e Industrial en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Algeciras, Universidad de Cádiz. El marco de colaboración define a cada estamento las áreas de estudio. El grupo FQM231 se centra en el estudio reológico de las pastas de cemento y morteros equivalentes y el grupo afinado en Algeciras se centra en el estudio del hormigón endurecido.

1.1.2.1 Experiencia investigadora del grupo FQM231 "Reología de suspensiones".

El grupo centra su trabajo en la Reología, su estudio es esencial en muchas industrias, ya que permite caracterizar el comportamiento mecánico del material, permitiendo reconocer así la influencia que la cantidad y el tipo de componentes ejercen en su respuesta viscoelástica.

Las líneas de investigación en las que trabajan son:

- Reología de suspensiones coloidales.
- Reología y caracterización de materiales cerámicos y cementosos.

- Propiedades reológicas y electrocinéticas de fluidos complejos (coloides y polímeros).

El grupo de investigación acredita numerosas publicaciones relativas al estudio de la reología de materiales cementosos. A continuación se citan las más relevantes:

- F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, F.J. Galindo-Rosales. Thixotropic characterization of fresh cement pastes. Annual Transactions of the Nordic Rheology Society 15 (2007) 65-71.
- F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, F.J. Galindo-Rosales. Comportamiento Reológico de Morteros Equivalentes Autocompactantes. Hormigón Autocompactante (2008) págs: 279-288. B.E. Barragán, A. Palacios y P. Serna, Editores. Barcelona (España). ISBN: 978-84-612-2373-2
- J.F. Velázquez-Navarro, F.J. Rubio-Hernández, F.J. Galindo-Rosales. Static and Dynamic Yield Stress of Self-Compacting Concrete Equivalent Mortars. Rheology in Product Design and Engineering (2008) págs: 141-144. Ed. GER. Sevilla (España). ISBN: 978-84-608-0779-7
- F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, F.J. Galindo-Rosales. The Influence of Some Additives on the Rheological Behaviour of a Fresh Cement Paste. Rheology in Product Design and Engineering (2008) págs: 271-274. Ed. GER. Sevilla (España). ISBN: 978-84-608-0779-7
- F.J. Rubio-Hernández, S. Moreno-Lechado, J.F. Velázquez-Navarro, F.J. Galindo-Rosales. Shear-thickening behaviour in Fresh Cement Pastes due to the presence of Superplasticizers. Rheology in Product Design and Engineering (2008) págs: 285-288. Ed. GER. Sevilla (España). ISBN: 978-84-608-0779-7
- F.J. Rubio-Hernández, I. Cerezo-Aizpún, J.F. Velázquez-Navarro. Solid Additives influence on the Viscoplastic Behaviour of Fresh Cement

Pastes. Rheology in Product Design and Engineering (2008) págs: 281-284. Ed. GER. Sevilla (España). ISBN: 978-84-608-0779-7

- F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, F.J. Galindo-Rosales. Rheological characterization of a time dependent fresh cement paste. *Mechanics of Time-Dependent Materials* 13 (2009) 199-206.
- F.J. Rubio-Hernández, I. Cerezo-Aizpún, J.F. Velázquez-Navarro. Mineral additives geometry influence in cement pastes flow. *Advances in Cement Research* 23 (2011) 55-60.
- F.J. Rubio-Hernández, S. Moreno-Lechado, J.F. Velázquez-Navarro. Experimental study on the influence of two different additives onto the flow behavior of a fresh cement paste. *Advances in Cement Research* 23 (2011) 255-263.
- F.J. Rubio-Hernández, J.F. Velázquez-Navarro, L.M. Ordóñez-Belloc. Rheology of concrete: a study case based upon the use of the equivalent mortar. *Materials and Structures* 46 (2013) 587-605
- F.J. Rubio-Hernández, J.M. Morales-Alcalde, A.I. Gómez-Merino. Limestone filler/cement ratio effect on the flow behavior of a SCC cement paste. *Advances in Cement Research* 25 (2013) 262-272.
- F. Contreras-de Villar, F.J. Rubio-Hernández, M.D. Rubio-Cintas. The rheological behaviour of concrete equivalent mortars when electric arc furnace slag is used as fine aggregated. *Perspectives in Fundamental and Applied Rheology*. 2013. Pags 221-226. ISBN 978-84-616-5245-7

Además de las publicaciones mencionadas el grupo ha sido beneficiario de los siguientes contratos de investigación:

- Referencia del proyecto: MAT2008-05501

Título: Reología de Morteros Equivalentes

Investigador principal: Francisco José Rubio Hernández

Entidad financiadora: CICYT

Duración: 01/01/2009-31/12/2011

- Referencia del contrato: 8.06/5.57.2711

Título: Correlación de la trabajabilidad del hormigón autocompactante con sus propiedades reológicas. Análisis y optimización de ensayos

Investigador responsable: Francisco José Rubio Hernández

Entidad financiadora: Hormigones y Minas, S.A. (Italcementi Group)

Duración: 01/08/2006-31/12/2009

- Referencia del contrato: 8.06/5.57.3203

Título: Diseño de Hormigón Autocompactante para Carril-Bus

Investigador responsable: Francisco José Rubio Hernández

Entidad financiadora: Hormigones y Minas, S.A. (Italcementi Group)

Duración: 01/01/2009-31/12/2009

Las tesis dirigidas en el ámbito de estudio han sido:

- José Francisco Velázquez Navarro. Reología de pastas de cemento y morteros equivalentes de hormigones autocompactantes. Universidad de Málaga, 2009.

Director: Dr. Francisco José Rubio Hernández

- María Dolores Rubio Cintas. Influencia de la Adición de Polvo de Humo Ferrítico en el Comportamiento Reológico y Resistente de Morteros y Hormigones. Universidad de Málaga, 2010

Director: Dr. Francisco José Rubio Hernández

- Manuel Cruz Carrasco. Estudio de la resistencia y reología de hormigones con adición de escorias de cobre como sustituto del árido fino. Universidad de Málaga, 2014

Directores: Dr. Francisco José Rubio Hernández y Dra. María Dolores Rubio Cintas

1.1.2.2 Experiencia investigadora en la valoración de desechos siderúrgicos del grupo TEP 951 ARHENE

Los estudios realizados en la presente tesis se ajustan a las líneas de investigación definidas por el grupo de Investigación TEP 951-ARHENE, ubicado en la Escuela Politécnica Superior de Algeciras. El grupo obtiene su evaluación específica en abril de 2014 escindiéndose del grupo FQM231 “Reología de suspensiones” de la Universidad de Málaga donde participaban desde 2003. En este periodo se desarrolló la tesis “Influencia de la Adición de Polvo de Humo Ferrítico en el Comportamiento Reológico y Resistente de Morteros y Hormigones” presentada en septiembre de 2009 por M^a Dolores Rubio y codirigida por Miguel Á. Parrón y Francisco Rubio y de la cual se obtuvo una producción científica de interés.(Contreras, Ferrer, & Ayuso, 2008; Contreras de Villar, Rubio Hernández, & Rubio-Cintas, 2013; Parron-Vera, Rubio-Cintas, & Contreras de Villar, 2007; Parron-Vera et al., 2008a; Parron-Vera, Rubio-Cintas, & Contreras de Villar, 2008b; Rubio-Cintas, 2009; Rubio-Cintas, Parron-Vera, & Contreras de Villar, 2008).(Cruz Carrasco, 2014).

La producción científica internacional relacionada con el objeto de la tesis ha sido la siguiente: (Contreras de Villar, Rubio-Cintas, & Parron-Vera, 2010; Rubio-Cintas, Parron-Vera, & Contreras de Villar, 2010)

Esta trayectoria científica iniciada con la tesis doctoral (1999) “Pirometalurgia con reductores no convencionales, aplicada a la recuperación de metales de los óxidos de acería” (Parron-Vera, 1999) y consolidada al amparo de 2 Proyectos de I+D+i del Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación a través de la agencia AECI suscritos con la Universidad de AbdellMallek Essaadi de Marruecos y la Universidad de Cádiz, “Erosión Interna del Suelo” 2007-2009 y “Análisis de fiabilidad y diseño sísmico de los edificios en hormigón armado”2010-2011. Investigadores y Coordinadores Principal y

director de dos Tesis Doctorales (2007/20013) de alumnos de doctorado incorporados a los Proyectos mediante Becas MAEC, lo que constata su capacidad de formación investigadora y de dirección de equipos. Como principal resultado: han liderado un grupo de investigación e impulsado líneas de investigación que ha generado la mayor producción científica sobre “Erosión Interna del Suelo” y “Tecnología del Hormigón “en revistas indexadas JCR a nivel mundial desde 2009 (año en que se publica su primer artículo indexado).

La misión principal del grupo de investigación es la promoción de la docencia, del conocimiento, de la investigación y de la innovación de la Ingeniería Civil en elementos y sistemas estructurales, y en especial, en técnicas de construcción, ensayo y análisis de modelos mecánicos a escala reducida con probetas de hormigón y mortero y la incorporación de residuos industriales procedentes de fábrica o vertedero, en unas condiciones de excelencia.

- Los objetivos principales investigadores y tecnológicos del grupo de investigación TEP 951-ARENHE son:
 - Innovaciones tecnológicas y modelos de calidad en ensayos a escala reducida.
 - Desarrollo de modelos probabilísticos para el diseño y verificación de estructuras.
 - Desarrollo de técnicas instrumentales de bajo coste para su análisis.
- Los objetivos específicos de sus líneas de investigación son:
 - Elaborar Nuevas Matrices Cementantes de Mortero y Hormigón.
 - Ensayos Reológicos, Mecánicos y de Lixiviado en Hormigón para su Aplicación en Contacto con el Terreno.
 - Diseño de Mortero y Hormigón No Convencionales en Adaptación a la Normativa Vigente.
 - Durabilidad del Hormigón.

- Propiedades Mecánico-resistente de Mortero y Hormigón.
- Comportamiento Reológico de la Matriz Cementante.
- Valoración de los Residuos Industriales y RCD como Adición Activa y/o Árido Reciclado en Mortero y Hormigón.

1.1.3 Estado del conocimiento.

Se ha realizado una revisión bibliográfica, relacionada con el objeto de la tesis, en las revistas con mayor impacto. Encontramos numerosas referencias que responden a la temática. Son muchas las publicaciones encontradas referentes al uso de Escorias siderúrgicas como sustitutivo del árido en hormigones destacando: ((Arribas y col., 2015; Luxán y col., 2000; Mauthoor y col., 2016; Monosi y col., 2016; Rondi y col., 2016; San-José y col., 2014). En dichas publicaciones los estudios plantean experimentaciones que demuestran el comportamiento de las escorias al ser tratados como sustitutos del árido en la fabricación de hormigón. Se ha filtrado la búsqueda a la producción de acero en hornos de arco eléctrico. La diferencia de estas referencias respecto a los trabajos desarrollados en la presente tesis radican en:

- No corresponder a la industria del acero inoxidable.
- Se refieren a la industria de acero al carbono.
- Existen variaciones considerables en la granulometría.

La actividad investigadora relativa a las escorias procedentes de la producción del acero inoxidable es muy inferior a la del acero al carbono debido principalmente a su composición mineralógica, en particular su contenido en metales pesados (Shen y col., 2004) que conllevaba su dificultad en el tratamiento de las mismas. Esta producción se ha incrementado considerablemente en los últimos años debido al interés en abordar la problemática ambiental que conlleva el tratamiento actual de las mismas (Adegoloye y col., 2016; Adegoloye y col., 2015; Sheen y col., 2014; Sheen y col., 2016; Sheen y col., 2013). Estas últimas referencias se diferencian principalmente por la granulometría de las escorias utilizadas. En el desarrollo de los capítulos iremos desglosando los resultados obtenidos y realizando las discusiones oportunas referidas a

los citados artículos a la vez que analizaremos los mismos respecto a la normativa vigente de hormigón estructural (EHE-08).

1.2 Hipótesis

Las hipótesis en las que se basa esta tesis doctoral, las cuales justifican el procedimiento experimental seguido son las siguientes:

- I. Existe una correlación entre la respuesta mecánica resistente del hormigón en estado fresco y endurecido.
- II. La respuesta mecánica del hormigón en estado fresco esta correlacionada con la del correspondiente mortero equivalente. El mortero equivalente de un hormigón, se define, como aquel material cementoso que se obtiene sustituyendo todos los áridos por un único árido fino con la misma área específica, manteniendo constantes el resto de parámetros.(Schwartzentruber y Catherine., 2000)
- III. Es posible obtener un material con comportamiento mecánico determinado a partir de los análisis experimentales efectuados en laboratorio.

Con relación a la primera de estas hipótesis de partida destacar que nos estamos refiriendo al mismo material, es decir, dicha correlación se refiere a hormigón en estado fresco y a hormigón en estado endurecido. La razón por la que se considera pertinente realizar esta aclaración es que somos conscientes de que la presencia de áridos gruesos (fase inerte de la mezcla) en la composición del hormigón, le dota de una respuesta mecánica en estado endurecido que únicamente es cuantificable cuando se estudia su comportamiento mecánico en estado fresco.

No obstante, al hilo de lo indicado en la segunda de las hipótesis, también justificado por otros estudios (Velázquez Navarro, 2009), es cierto que las respuestas en estado fresco del hormigón y del mortero equivalente están, a su vez, correlacionadas, por lo que solventaremos de esta forma, aunque sea asumiendo cierta incertidumbre, la imposibilidad de realizar con nuestros dispositivos de ensayos reológicos con el

hormigón, a cambio de contar con resultados precisos y de validez absoluta (independiente de la geometría y/o del reómetro utilizado).

Finalmente la tercera hipótesis recoge el hecho contrastado de que a partir de ensayos coincidentes de flujo estándar es posible inducir la respuesta del flujo del material en cualquier otra situación práctica.

Para comprobar la validez de las hipótesis planteadas y en última instancia obtener una respuesta útil del material objeto del estudio se realizan diferentes ensayos normalizados de hormigones en estado endurecido. Además se estudia el comportamiento reológico de los hormigones en estado fresco a través de la medida directa sobre morteros equivalentes (Rubio-Hernández y col., 2012).

1.3 Objetivos principales

El objetivo principal de esta tesis doctoral es buscar nuevas prestaciones al hormigón al que se le han incorporado EAFSS, como sustitución de árido fino, procedentes de los residuos de la fabricación del acero inoxidable.

Se han empleado dos hormigones de referencia:

- Hormigón convencional.
- Hormigón convencional Autocompactante.

La definición de estos dos tipos de hormigón de referencia parte de la experiencia acumulada por el autor en la industria del prefabricado de Hormigón. El diseño del hormigón con incorporación de EAFSS ha partido de la utilización de los mismos materiales base, es decir: árido grueso, cemento, aditivo y agua. Se ha pretendido reducir al máximo las variantes para optimizar el ajuste de las fórmulas.

Se han realizado ensayos para comprobar las características mecánicas en estado fresco y endurecido. También, y con el objeto de verificar el comportamiento de nuestra escoria con las otras aportadas en los estudios de referencia, se han realizado los siguientes ensayos: Reología, densidad, porosidad, absorción, penetración de agua bajo presión, resistencia a compresión, resistencia a la tracción, flexotracción, abrasión, desgaste, módulo de elasticidad, carbonatación, ensayos de lixiviación.

1.4 Objetivos secundarios

Con el objeto de dar respuesta a los objetivos principales estudiaremos los siguientes objetivos secundarios:

- I. Estudio de la docilidad de los hormigones propuestos desde su fase inicial hasta su consolidación final correlacionando los ensayos reológicos del mortero equivalente en estado fresco con los ensayos de docilidad establecidos en la Vigente Normativa de Hormigón Estructural (Fomento, 2008)
- II. Evaluar las características resistentes del nuevo hormigón propuesto, comparándolo con el hormigón convencional definido inicialmente.
- III. Correlacionar las respuestas del material en estado fresco y endurecido.
- IV. Establecer la posibilidad de obtener un material con un comportamiento mecánico resistente determinado a partir de los ensayos experimentales realizados en laboratorio.

1.5 Estructura de la tesis doctoral

Para alcanzar los objetivos propuestos se han definido distintos capítulos a lo largo de la tesis doctoral. A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de ellos.

1.5.1 Capítulo 1. Introducción.

Es el capítulo presente y se realiza una breve descripción de los antecedentes y objetivos, así como una descripción de los capítulos que conforman la tesis.

1.5.2 Capítulo 2. Producción de acero. Generación de escorias de horno de arco eléctrico.

Se realiza una descripción del proceso de fabricación de los aceros y la explicación de la producción de las EAFSS. Se realiza una clasificación y caracterización de las mismas.

1.5.3 Capítulo 3. Materiales, dosificación y elaboración de hormigones.

Se definen cada uno de los componentes utilizados en la fabricación del hormigón, así como la caracterización de cada uno de ellos. Se desarrolla la metodología utilizada para el diseño de los hormigones.

1.5.4 Capítulo 4. Estudio reológico del hormigón en estado fresco.

Se muestra el estudio reológico de los morteros equivalentes de cada uno de los tipos de hormigón planteados. Se realizan también los ensayos del hormigón en estado fresco.

1.5.5 Capítulo 5. Estudio mecánico del hormigón endurecido.

En este capítulo se desarrollan los distintos ensayos del hormigón en estado endurecido.

1.5.6 Capítulo 6. Comportamiento ambiental del hormigón estudiado.

Se estudia el comportamiento ambiental de las nuevas dosificaciones mediante ensayos de lixiviado.

1.5.7 Capítulo 7. Análisis de resultados y correlaciones encontradas.

Análisis de los resultados obtenidos en los capítulos 3,4 y 5, intentando buscar las correlaciones entre el estado fresco y endurecido de los tipos de hormigón estudiados.



1.5.8 Capítulo 8. Conclusiones.

Presentación de las conclusiones derivadas de los distintos ensayos realizados en la presente tesis. Se expondrán futuras líneas de investigación surgidas como desarrollo de esta tesis.

1.6 Bibliografía del capítulo

- Adegoloye, G., Beaucour, A.-L., Ortola, S., & Noumowe, A. (2016). Mineralogical composition of EAF slag and stabilised AOD slag aggregates and dimensional stability of slag aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 115, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.036>
- Adegoloye, G., Beaucour, A.-L., Ortola, S., & Noumowé, A. (2015). Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability. *Construction and Building Materials*, 76, 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.007>
- Amaral, L. (1999). *Hormigones con Escorias de Horno de Arco Eléctricoc como Áridos*. Tesis.Universidad Politécnica de Cataluña.
- Arribas, I., Santamaría, A., Ruiz, E., Ortega-López, V., & Manso, J. M. (2015). Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials*, 90, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003>
- Contreras, F., Ferrer, C., & Ayuso, M. (2008). Realizaciones HAC en prefabricación. In A. C.-T. del H. Estructural (Ed.), *I Congreso Nacional de Hormigones autocompactantes* (p. 10). Valencia(España).
- Contreras de Villar, F., Rubio-Cintas, M. D., & Parron-Vera, M. A. (2010). Realizaciones con hormigón autocompacto en prefabricación. In *15 Convención científica de ingeniería y arquitectura. La Habana(Cuba)*.
- Contreras de Villar, F., Rubio Hernández, F. J., & Rubio-Cintas, M. D. (2013). The reological behavior of concrete equivalent mortars when electric arc furnace slag is used as fine aggregated. In *Iberian meeting of rheology. IBEREO13.Málaga(España)* (pp. 221–226).
- Cruz Carrasco, M. (2014). *Estudio de la resistencia y reología de hormigones con adición de escorias de cobre como sustituto de arido fino*. Tesis Universidad de Málaga.
- Dunster, A. M. (2002). The use of blast furnece slag and steel slag aggregates, 257–260.

- EGMASA. (2004). Estudio de viabilidad de las escorias siderúrgicas como sustitutivos de los áridos en la fabricación de morteros.
- Engineers, J. (2004). Recommendations for design and construction of concrete structures using electric arc furnace oxidizing slag aggregate. *Japan Society of Civil Engineers*.
- Ferrer Prada, R. (2011). *Percepción social sobre la gestión de los residuos en Madrid*. (U. C. de Madrid, Ed.).
- Fomento, M. Norma Básica de la Edificación, Pub. L. No. NBE FL-90 (1991).
- Fomento, M. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), BOE N° 203 35176–35178 (2008). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fomento, M., Rural, M. medio ambiente y, & CEDEX. (2011). Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. *CEDEX*, 2.3, 1–19.
- Frias Rojas, M., Sanchez de Rojas, M., & Uría, A. (2002). Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry. *Materiales de Construcción*, 267, 79–83.
- Ihobe. (1999). *Libro Blanco de minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de acería*. Departamento de Ordenación de territorio, vivienda y M.A. del Gobierno Vasco.
- Luxán, M. P., Sotolongo, R., Dorrego, F., & Herrero, H. (2000). Characteristics of the slag produced in the fusion of scrap steel by EAF. *Cement and Concrete Research*, 30, 517–519.
- Manso, J., y Marquínez, J. (2006). Investigación de nuevos usos de las escorias de horno eléctrico de arco (EAF). La oportunidad de los hormigones. *Hormigón y Acero*, 241, 51–57.
- Mauthoor, S., Mohee, R., & Kowlessar, P. (2016). Characterisation of electric arc furnace slags as concrete aggregate in a small island developing state: A preliminary study. *Construction and Building Materials*, 105, 459–464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.169>

- Monosi, S., Ruello, M. L., & Sani, D. (2016). Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 66, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.004>
- Motz, H., & Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Mangement*, 21(3), 285–293.
- Ozkul, M. H. (1996). *Properties of slag aggregate concretes*. *Concrete for Environment Enhancement and Protection* (RK Dhir an). E&FN Spon.
- Parron-Vera, M. A. (1999). *Pirometalurgia con conductores no convencionales aplicada a la recuperación de metales de los óxidos de residuos de acerías*. Tesis Doctoral Universidad de Cádiz.
- Parron-Vera, M. A., Rubio-Cintas, M. D., & Contreras de Villar, F. (2007). Análisis resistente de hormigones con partículas cerámicas reforzadas o no mediante pelicularización con resinas epoxi. *Cemento y Hormigón*, 906, 62–72.
- Parron-Vera, M. A., Rubio-Cintas, M. D., & Contreras de Villar, F. (2008a). Análisis resistente de hormigones estructurales con añadidos de residuos siderúrgicos. In *IV Congreso de ACHE*. Valencia(España).
- Parron-Vera, M. A., Rubio-Cintas, M. D., & Contreras de Villar, F. (2008b). Estudio de la relación peso/resistencia en hormigones estructurales mezclados con escorias de horno de arco eléctrico. In A. C. T. de H. E. ACHE (Ed.), *IV Congreso de ACHE*. Valencia(España).
- Rondi, L., Bregoli, G., Sorlini, S., Cominoli, L., Collivignarelli, C., & Plizzari, G. (2016). Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation. *Composites Part B: Engineering*, 90, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.022>
- Rubio-Cintas, M. D. (2009). *Influencia de la adición de polvo de humo ferrítico en el comportamiento reológico y resistente de morteros y hormigones*. Tesis Doctoral Universidad de Málaga.
- Rubio-Cintas, M. D., Contreras de Villar, F., y Parron-Vera, M. A. (2011). Resistencia mecánica de hormigones con sustitución de un porcentaje de cemento por polvos

- de humo y escoria de horno de arco eléctrico. In *V Congreso de ACHE*. Barcelona(España).
- Rubio-Cintas, M. D., Parron-Vera, M. A., & Contreras de Villar, F. (2008). Nuevos usos de las escorias y polvos de humo provocados por la siderurgia. Gijón/España (Ed.), *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*.
- Rubio-Cintas, M. D., Parron-Vera, M. A., & Contreras de Villar, F. (2010). Análisis del efecto del polvo de humo ferrítico en la respuesta reológica de pastas y morteros. *15 Convención científica de ingeniería y arquitectura*. La Habana(Cuba).
- Rubio-Cintas, M. D., Parron-Vera, M. A., y Contreras de Villar, F. (2013). METHOD FOR PRODUCING CINDER CONCRETE. España. <https://doi.org/CO4B18/14>
- Rubio Hernández, F. J., Velazquez Navarro, J. F., & Ordoñez Belloc, L. M. (2013). Rheology of concrete: a study case based upon the use of the concrete. *Material and Structures*, *46*, 587–605.
- San-José, J. T. (2000). Reutilización y valoración en obra civil de escorias de horno eléctrico de arco producidas en la CAPV. *Arte Y Cemento*, 124–126.
- San-José, J. T., Vegas, I., Arribas, I., & Marcos, I. (2014). The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. *Materials and Design*, *60*, 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.030>
- Schwartzentruber, A., y Catherine, C. (2000). Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - A new tool to design concrete containing admixture. *Materials and Structures*, *33*(232), 475–482.
- Sheen, Y.-N., Wang, H.-Y., & Sun, T.-H. (2014). Properties of green concrete containing stainless steel oxidizing slag resource materials. *Construction and Building Materials*, *50*, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.017>
- Sheen, Y., Huang, L.-J., Sun, T.-H., & Le, D.-H. (2016). Engineering Properties of Self-compacting Concrete Containing Stainless Steel Slags. *Procedia Engineering*, *142*, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.016>
- Sheen, Y. N., Wang, H. Y., & Sun, T. H. (2013). A study of engineering properties of

cement mortar with stainless steel oxidizing slag and reducing slag resource materials. *Construction and Building Materials*, 40, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.078>

Shen, H., Forsberg, E., & Nordström, U. (2004). Physicochemical and mineralogical properties of stainless steel slags oriented to metal recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(3), 245–271. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00072-7)

Velázquez Navarro, J. (2009). *Reología de pastas y morteros equivalentes de hormigones autocompactantes*. Tesis Doctoral Universidad Málaga.

CAPÍTULO 2

Producción del acero. Generación de escorias de horno de arco eléctrico

INDICE

| | | |
|---------|---|------|
| 2.1 | PRODUCCIÓN DEL ACERO | 2.5 |
| 2.1.1 | <i>Antecedentes</i> | 2.5 |
| 2.1.2 | <i>Proceso de fabricación de acero inoxidable</i> | 2.8 |
| 2.1.2.1 | Colada Continua | 2.11 |
| 2.1.2.2 | Esmerilado | 2.12 |
| 2.1.2.3 | Laminación en caliente | 2.12 |
| 2.1.2.4 | Laminación en frío | 2.14 |
| 2.2 | PRODUCCIÓN DE LAS ESCORIAS | 2.15 |
| 2.2.1 | <i>Definición de las escorias</i> | 2.15 |
| 2.2.2 | <i>Tipos de escorias</i> | 2.16 |
| 2.2.2.1 | Escorias metalúrgicas. | 2.17 |
| 2.2.2.2 | Escorias de acerías..... | 2.18 |
| 2.3 | ÍNDICE DE TABLAS..... | 2.23 |
| 2.4 | ÍNDICE DE FIGURAS. | 2.24 |
| 2.5 | BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO | 2.25 |

2.1 Producción del acero

2.1.1 Antecedentes

La industria siderúrgica española es uno de los grandes productores de acero de Europa y del mundo. La tabla 1-1, extraída de la (Worldsteel, 2016) (WS16), muestra el ranking mundial de producción de acero en el año 2015, evidenciando el decimosexto lugar de la siderurgia española en producción de acero bruto. Atendiendo a los países que conforman la Unión Europea España ocupa la cuarta posición prácticamente igualada a Francia.

| Posición | País | 2015 |
|-----------|---------------|------------------|
| 1 | China | 803.825,00 |
| 2 | Japan | 105.134,00 |
| 3 | India | 89.026,00 |
| 4 | United States | 78.845,00 |
| 5 | Russia | 70.898,00 |
| 6 | South Korea | 69.670,00 |
| 7 | Germany | 42.676,00 |
| 8 | Brazil | 33.256,00 |
| 9 | Turkey | 31.517,00 |
| 10 | Ukraine | 22.968,00 |
| 11 | Italy | 22.018,00 |
| 12 | Taiwan, China | 21.392,00 |
| 13 | Mexico | 18.225,00 |
| 14 | Iran | 16.146,00 |
| 15 | France | 14.984,00 |
| 16 | Spain | 14.845,00 |

Tabla -1-1. Producción de acero en 2015 de los 16 primeros países en Millones de toneladas. Fuente WS16

La tabla 1-2 muestra como la producción de acero bruto ha sufrido un ligero ascenso en España en 2015 con 14,9 millones de toneladas producidas, aumentando en 0,6 millones

de toneladas la cifra del año 2014. Analizando la producción desde el año 2012 se observa un ligero ritmo de crecimiento evolucionando desde 13,6 millones de toneladas hasta llegar a la cifra actual.

| 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 18.391 | 18.999 | 18.640 | 14.358 | 16.343 | 15.504 | 13.639 | 14.252 | 14.249 | 14.845 |

Tabla 1-2. Producción de acero en España en Millones de toneladas. Fuente WS16

La vía más usada para la producción de acero en España es la de arco eléctrico. El 70,5% del acero español se produjo en 2015 por este procedimiento, porcentaje que se mantiene con respecto al año anterior (WS16).

En España funcionan actualmente 24 acerías de horno eléctrico de arco de las que dos de ellas son de acero inoxidable. La producción de acero inoxidable fue la que mejor se comportó en el año 2015, creciendo un 2,7%. La de acero al carbono bajó cayendo un 11,2%. Los demás aceros aleados cayeron un 11,8% (UNESID, 2016).

Las ilustraciones siguientes (Ilustración 1-1, Ilustración 1-2) muestran las ubicaciones de las diferentes acerías clasificadas atendiendo al proceso de fabricación y tipo de acero obtenido.

Europa es uno de los mercados siderúrgicos más desarrollados del mundo con más de 500 productores en la región. En los últimos años Europa ha importado más de 30 millones de toneladas anuales de acero, pero este volumen se ha contraído recientemente a unos 10 millones de toneladas, razón por la que ha pasado a convertirse de nuevo en un exportador neto. Dada la rápida tasa de crecimiento de los países del Este y Centro europeo, el mapa y atlas resultan de gran interés para todos aquellos interesados en proveerse de material o que deseen comprender la estructura y localización geográfica de la industria.

El nuevo mapa de las acerías de Europa le permite abarcar de un vistazo la localización de las plantas de producción de acero más importantes de esta región, así como la información de los productos que fabrican y otros datos estadísticos claves.

La tabla 1-3 muestra la producción de acero en Europa situando a España la cuarta productora de la Unión Europea detrás de Alemania, Italia y Francia.



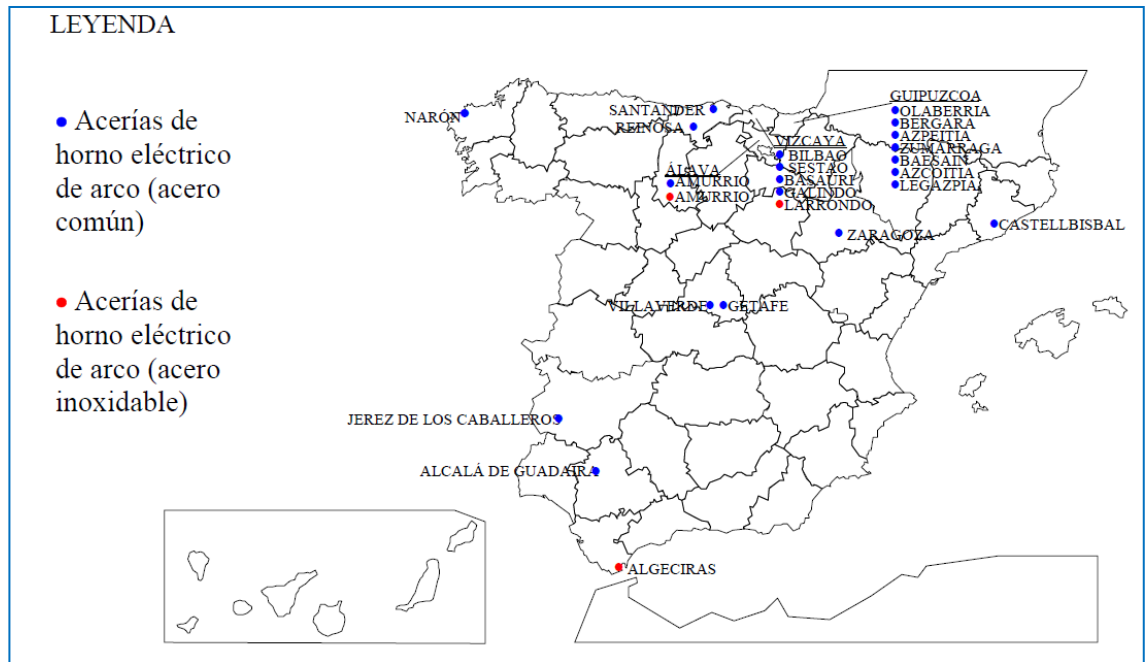


Figura 1-1. Ubicación de las acerías de horno de arco eléctrico de acero común y de acero inoxidable. Fuente (Fomento, Rural, & CEDEX, 2011)



Figura 1-2. Clasificación en función del tipo de proceso utilizado. Fuente (Fomento et al., 2011)

| País/año | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Total Unión Europea | 207.386 | 210.260 | 198.705 | 139.436 | 172.911 | 177.791 | 168.589 | 166.356 | 169.301 | 166.115 |
| Bélgica | 11.631 | 10.692 | 10.673 | 5.635 | 7.973 | 8.026 | 7.301 | 7.093 | 7.331 | 7.257 |
| Alemania | 47.224 | 48.550 | 45.833 | 32.670 | 43.830 | 44.284 | 42.661 | 42.645 | 42.943 | 42.676 |
| Francia | 19.852 | 19.250 | 17.879 | 12.840 | 15.414 | 15.780 | 15.609 | 15.685 | 16.143 | 14.984 |
| Italia | 31.624 | 31.553 | 30.590 | 19.848 | 25.750 | 28.735 | 27.252 | 24.093 | 23.714 | 22.018 |
| España | 18.391 | 18.999 | 18.640 | 14.358 | 16.343 | 15.504 | 13.639 | 14.252 | 14.249 | 14.845 |

Tabla 1-3. Producción de acero en Europa en Millones de toneladas (Fuente WS16)

El uso mundial de acero per cápita promedio ha aumentado de manera constante de 150 kg en 2001 a 217 kg en 2014, lo que evidencia la relación entre el incremento de la producción de acero y la mejora de la sociedad del bienestar.

La tabla 1-4 muestra la producción de acero mundial donde podemos deducir que la mayor producción se encuentra en el continente asiático seguidos de Europa y Norteamérica.

2.1.2 Proceso de fabricación de acero inoxidable

A continuación, se realiza una breve descripción del proceso de producción y fabricación del acero inoxidable y, por tanto, de la obtención de la escoria procedente de horno de arco eléctrico (Rubio-Cintas, 2009) (RC09).

En el proceso de obtención del acero inoxidable (Ilustración 1-3) lo primero que se realiza es la clasificación de las materias primas. Los materiales de partida que se emplean en la fabricación del acero inoxidable son chatarras, tanto férricas como inoxidables, además de distintas ferroaleaciones. Para la obtención de algunos tipos de aceros inoxidables se adicionan también molibdeno, titanio, niobio, etc. con el fin de conferir a los aceros determinadas. Es importante realizar un cuidadoso control y selección de las materias primas, ya que suelen llevar elementos contaminantes tales como azufre, plomo, arsénico, cobre, etc.



| País/año | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Total Unión Europea | 207.386 | 210.260 | 198.705 | 139.436 | 172.911 | 177.791 | 168.589 | 166.356 | 169.301 |
| *Bélgica | 11.631 | 10.692 | 10.673 | 5.635 | 7.973 | 8.026 | 7.301 | 7.093 | 7.331 |
| *Alemania | 47.224 | 48.550 | 45.833 | 32.670 | 43.830 | 44.284 | 42.661 | 42.645 | 42.943 |
| *Francia | 19.852 | 19.250 | 17.879 | 12.840 | 15.414 | 15.780 | 15.609 | 15.685 | 16.143 |
| *Italia | 31.624 | 31.553 | 30.590 | 19.848 | 25.750 | 28.735 | 27.252 | 24.093 | 23.714 |
| *España | 18.391 | 18.999 | 18.640 | 14.358 | 16.343 | 15.504 | 13.639 | 14.252 | 14.249 |
| Total Otra Europa | 28.124 | 30.533 | 31.621 | 29.034 | 33.650 | 39.079 | 39.917 | 38.627 | 38.374 |
| * Turquía | 23.315 | 25.754 | 2680+ | 25.304 | 29.143 | 347.107 | 35.885 | 34.654 | 34.035 |
| Total CEI | 119.908 | 124.169 | 114.345 | 97.691 | 108.200 | 112.663 | 110.739 | 108.408 | 106.079 |
| *Rusia | 70.830 | 72.387 | 68.510 | 60.011 | 66.942 | 68.852 | 70.209 | 69.008 | 71.461 |
| *Ucrania | 40.891 | 42.830 | 3.729 | 29.855 | 33.432 | 35.332 | 3.275 | 32.771 | 27.170 |
| Total Norte América | 131.421 | 132.618 | 125.138 | 83.772 | 111.562 | 118.675 | 121.586 | 118.978 | 121.159 |
| *Canadá | 15.493 | 15.572 | 14.945 | 9.292 | 13.009 | 12.891 | 13.507 | 12.417 | 12.730 |
| *Méjico | 16.447 | 17.573 | 17.209 | 14.132 | 16.870 | 18.110 | 18.073 | 18.242 | 18.995 |
| *Estados Unidos | 98.188 | 98.101 | 918.795 | 59.384 | 80.495 | 86.398 | 88.695 | 86.878 | 88.174 |
| Total Sudamérica | 45.269 | 48.232 | 47.490 | 37.776 | 43.888 | 48.165 | 46.379 | 45.822 | 45.043 |
| *Brasil | 30.901 | 33.782 | 33.716 | 26.506 | 32.948 | 35.220 | 34.524 | 34.163 | 33.897 |
| Total Asia | 675.226 | 758.385 | 784.090 | 811.866 | 918.449 | 995.457 | 1.026.801 | 1.123.646 | 1.139.714 |
| *China | 421.024 | 489.712 | 512.339 | 577.070 | 638.743 | 701.968 | 731.040 | 822.000 | 822.698 |
| *India | 49.450 | 53.468 | 57.791 | 63.527 | 68.976 | 73.471 | 77.264 | 81.299 | 87.292 |
| *Japón | 116.226 | 120.203 | 118.739 | 87.534 | 109.599 | 107.601 | 107.232 | 110.595 | 110.666 |
| *Corea del Sur | 48.455 | 51.517 | 53.625 | 48.572 | 58.914 | 68.519 | 69.073 | 66.061 | 71.543 |
| *Taiwán | 20.000 | 20.903 | 19.882 | 15.814 | 19.755 | 20.178 | 20.664 | 22.282 | 23.221 |

Tabla 1-4. Producción de acero mundial en Millones de toneladas. Fuente WS16

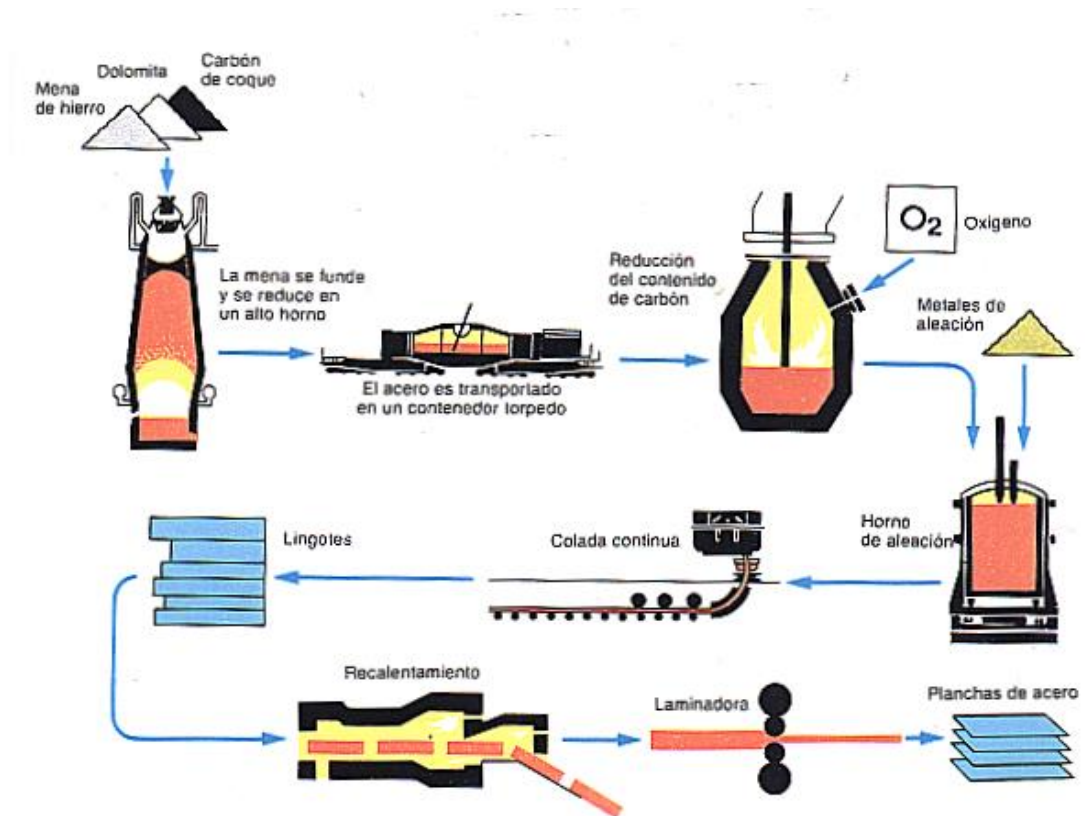


Figura 1-3. Diagrama de proceso de fabricación del acero Inoxidable. Fuente RC09

Una vez clasificadas, las materias primas se almacenan en parques de chatarra. Posteriormente se calcula la cesta de carga más económica y se vuelca en el horno eléctrico. La acería dispone de 2 ó 3 hornos de arco eléctrico donde se funden las materias primas, como se puede ver en la Imagen 1-1, una vez cargados los hornos, se cierra la bóveda, descienden los electrodos y, al entrar en contacto con la chatarra, se inicia el arco eléctrico. La temperatura alcanzada en la fusión es de alrededor de 1700 °C.

Una vez realizada la fusión se vuelca el acero líquido en un recipiente llamado cuchara de trasvase. De aquí se extrae una muestra para analizar la composición química del acero fundido. Trasvasado el acero al convertidor A.O.D. (Argón Oxygen Decarburation) tienen lugar las operaciones de descarburación y afinado del acero, como se puede ver en la Imagen 1-2.



Figura 1-4. Horno de arco eléctrico. Fuente RC09.



Figura 1-5. Convertidor de AOD. Fuente RC09

La temperatura a la que se somete el proceso es de 1500 °C. Durante el proceso se llevan a cabo diversos controles de composición y temperatura. Al final del proceso se realiza el soplado de argón para homogeneizar temperaturas y favorecer la flotación de inclusiones. Una vez realizado este proceso, se trasvasa a una cuchara y, posteriormente, a la colada continua, proceso que describiremos a continuación.

2.1.2.1 Colada Continua

Es el paso de acero líquido a desbastes o lingotes de acero. El acero líquido contenido en la cuchara de colada se vierte en un recipiente especial, con forma tubular llamado “tundish”, el cual gradúa el metal líquido que va a una lingotera de cobre muy refrigerada, con cuyo contacto el metal líquido se solidifica en su capa exterior. El acero

desciende por la acción de la gravedad y por la presión del metal situado por encima, guiado por unos cilindros y sometido a una cortina de agua que produce la solidificación de la parte inferior (Imagen 1-3).



Figura 1-6. Colada continua. Fuente RC09

Una vez solidificada esta línea continua, se corta mediante un proceso de oxicorte, siendo ésta una técnica que se utiliza para realizar el corte en chapas y barras de acero, utilizando una corriente de oxígeno y un gas combustible que corta el metal, obteniendo así el desbaste o lingote.

2.1.2.2 Esmerilado

El esmerilado es un proceso intermedio al que se someten los desbastes, consistente en la eliminación de grietas, poros y otros defectos, además de corregir el exceso de rugosidad o marcas de las lingoteras. Esta operación se efectúa en máquinas automáticas y solo se realiza a ciertos tipos de aceros y espesores como paso previo a la laminación en caliente.

2.1.2.3 Laminación en caliente

Los desbastes o lingotes, una vez esmerilados, se introducen en un horno de precalentamiento de vigas galopantes, siendo este tipo de horno de paso continuo indicado especialmente para el calentamiento, a altas temperaturas, de piezas largas (Imagen 1-4). El movimiento alternativo de elevación, avance, descenso y retorno de vigas de material

refractario dispuestas en ranuras de la solera del horno, hace avanzar las cargas a lo largo de su interior.



Figura 1-7. Horno de vigas galopantes. Fuente RC09

Los desbastes o lingotes se llevan a la temperatura de laminación de 1250 °C a 1280 °C. Una vez igualadas las temperaturas del corazón y la superficie del desbaste, se lleva, por medio de un camino de rodillos, al tren desbastador (Imagen 1-5).



Figura 1-8. Tren desbastador. Fuente RC2009

El tren desbastador es un cuarto reversible, es decir, un tren constituido por cilindros de trabajo que se apoyan respectivamente en otros dos cilindros de apoyo. Al final de esta operación el desbaste de 200 mm de espesor pasa a ser un chapón de 20 a 30 mm de espesor. A continuación, el chapón pasa al tren acabador o Steckel (Imagen 1-6).



Figura 1-9. Tren Steckel o laminador. Fuente RC09

El tren Steckel es un laminador sexto reversible provisto de una bobinadora a cada lado. Como la banda se enfría en cada pasada, este tren dispone de pequeños hornos envolviendo a cada bobinadora. Mediante varias pasadas, se consigue un espesor de banda entre 2 y 10 mm.

Una vez terminada la operación de laminación en el tren Steckel, la banda se enfría en la mesa de salida y, posteriormente, se bobina y se fleja. El resultado es la bobina negra (Imagen 1-7)



Figura 1-10. Bobina negra. Fuente RC09

2.1.2.4 Laminación en frío

En esta fase del proceso se recuece el material en el horno de atmósfera oxidante con el objeto de regenerar la estructura y recuperar las características mecánicas. La banda se somete a un enfriamiento rápido y un granallado posterior. A continuación se realiza el decapado del material. Se trata de un proceso mediante el cual se eliminan los óxidos y la cascarilla de la superficie del metal. Generalmente, en el decapado de acero inoxidable se emplea mezcla de ácido nítrico y fluorhídrico.

El proceso de laminación en frío se lleva a cabo en trenes de laminación Sendzimir. El objeto de esta línea es reducir el espesor uniforme en todo el ancho entre 0.25 y 6 mm. Después de la laminación en frío es necesario restablecer las condiciones mecánicas iniciales con una operación de recocido y decapado ya que el metal se encuentra muy endurecido.

Dentro del proceso de laminación en frío se encuentra el acabado blanquecino mate 2D, y brillante BA. El acabado blanquecino mate 2D realiza el proceso en una línea similar al recocido y decapado caliente, donde se sustituye el granallado por un baño de hidróxido sódico y un decapado electrolítico a base de ácido nítrico. El acabado blanco mate que sale de esta línea se llama internacionalmente 2D. El acabado brillante BA se realiza en hornos de atmósfera reductora, generalmente de amoníaco dissociado, por lo que no es necesario el decapado posterior. El acabado es de un aspecto brillante, prácticamente especular.

El taller de acabados hace uso del tren de temple o Skin-Pass. Se trata de un dúo en el que se consigue alcanzar el acabado final del material, así como mejorar la forma plana del mismo. Así se obtienen los acabados 2B (2d+SKP) y BA propiamente dichos.

Finalmente, el material es sometido al proceso de corte. Los cortes pueden ser de distintos tipos: corte longitudinal, corte transversal, discos o formatos. En la Imagen 1-8 se muestran, respectivamente, los esquemas de la laminación en frío y del proceso de obtención de los productos acabados.



Figura 1-11. Proceso de laminación en frío y producto acabado. Fuente RC09

2.2 Producción de las escorias

2.2.1 Definición de las escorias

Atendiendo a la definición que nos aporta UNESID (“UNESID,” n.d.), las escorias son las capas de óxidos complejos o "nata", que se forman sobre el baño del crisol del alto

horno, del convertidor al oxígeno y de la metalurgia secundaria para el proceso de obtención de acero a partir de mineral, o de la fusión de chatarra y posterior afino en el caso de acero en horno eléctrico por el reciclado de chatarras de acero junto a otras adiciones metálicas. El proceso de fabricación de la escoria se consigue mediante la adición de óxidos alcalinos y alcalinotérreos, silicatos, aluminatos, escorificantes, fluidificantes y fundentes. Sus funciones son proteger al metal frente a la oxidación a alta temperatura y aislar térmicamente por lo cual mejora la eficiencia energética, a su vez actúa de fase receptora para la captación de inclusiones/óxidos indeseables en la fase metálica, constituyendo un parámetro metalúrgico ajustable según necesidades y por último proteger el refractario contra ataques químicos. Su composición y características dependen del proceso de fabricación donde se produzcan, así existen escorias negras o de horno eléctrico (HEA), escorias blancas o de alto horno (BF), escorias de convertidor (BOF) y escorias de afino o de metalurgia secundaria.

Principalmente existen dos tipos de escorias según su procedencia: las escorias metalúrgicas y las escorias de acería.

Según (“World Steel Association,” n.d.), en la Unión Europea se produjeron 166.166 millones de toneladas de acero bruto en 2015. El proceso de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico genera aproximadamente entre un 10% y 15% de escorias por cada tonelada de acero (es decir, 150kg escoria/tonelada de acero producida, (Fomento et al., 2011)). Alrededor del 75% de los EAFS (Electric Arc Furnace slag) producidos en el proceso de fabricación del acero en hornos de arco eléctrico corresponde a escorias negras (el resto es la llamada *escoria blanca*, la cual no puede utilizarse como árido debido a su composición química). Consecuentemente, se puede concluir que la industria productora de acero en Europa generó alrededor de 16.6 y 24,9 millones de toneladas de escorias negras en 2015.

2.2.2 Tipos de escorias

Principalmente existen dos tipos de escorias según su procedencia: las escorias metalúrgicas y las escorias de acería.



2.2.2.1 Escorias metalúrgicas.

La función que tienen las escorias en la industria metalúrgica es la suma de los siguientes factores:

- Bajo punto de fusión
- Su actividad química
- Su baja densidad

La escoria tiene como objetivo principal recoger las impurezas y separarlas del metal. Estas pueden provenir de industrias diferentes como la del hierro, el níquel, el acero, el manganeso, el cobre, el cromo, etc. Los diferentes tipos de escoria tienen funciones metalúrgicas similares pero varían notablemente en sus propiedades físicas y químicas. Las escorias más usadas en el campo de la construcción son las de la fabricación del hierro y del acero.

El hierro y el acero son productos más demandados por la industria de la construcción y por ello son los que más cantidad de escorias producen. La fabricación del hierro, más concretamente, se realiza en los altos hornos y la materia prima usada es el mineral de hierro, el coque, la cal y la caliza o dolomía. Las escorias generadas de este modo son definidas como “producto no metálico que consiste esencialmente en silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, que se desarrolló en condiciones líquidas juntamente con el hierro en el alto horno”. En el otro gran producto de las industrias siderúrgicas, el acero, se utilizan tres tipos de procesos: horno básico a oxígeno, horno de arco eléctrico y horno *Siemens-Martin*. Para ello se usan las siguientes materias primas:

- Hierro y chatarras (en proporciones variables)
- Cal
- Caliza o dolomía

2.2.2.2 Escorias de acerías.

2.2.2.2.1 Escorias de Altos Hornos.

Dentro de una fábrica de siderúrgica integral, el alto horno es la instalación base para la obtención de arrabio, el cual a su vez, constituye la materia prima para la fabricación de acero. El alto horno es el horno de cuba en el que se introduce un gas reductor a presión y una carga de materia constituida por minerales de hierro, coque y fundentes por la parte superior, separándose dos productos: el hierro y las impurezas con los fundentes (escoria primaria), que van evolucionando en su composición hasta llegar a la parte baja del horno, formándose los dos materiales finales: arrabio y escoria. Los únicos altos hornos existentes en nuestro país se encuentran en Gijón (Asturias). El volumen total de escorias que se produjeron durante el año 2010 se muestra en la Tabla 1-5:

| Producción de escorias (año 2010) | Consumo de escorias | % utilizado |
|--|-------------------------------------|--------------------|
| 1.201.512 t | Escorias granuladas: 794.526t | 66% |
| | Escorias cristalizadas: 496.992t | 34% |

Tabla 1-5. Producción de escorias de horno alto

La composición química de la escoria fundida de alto horno depende de los minerales de hierro, las cenizas del coque utilizado como combustible y de los óxidos de los fundentes empleados. La homogeneidad de la carga, así como la regularidad en la marcha de los altos hornos, ha contribuido a que las variaciones de la composición de la escoria sean mínimas.

En la Tabla 1-6 podemos ver la composición y el porcentaje en el que se encuentra:

| Compuesto | Porcentaje (%) |
|--------------------------------|----------------|
| CaO | 38-42 |
| SiO ₂ | 32-3 |
| MgO | 7-9 |
| Al ₂ O ₃ | 10-14 |
| S | <1 |
| FeO | 0.4-0.8 |
| MnO | 0.2-0.6 |
| TiO ₂ | 0.3-0.5 |
| I _b | <1.2 |
| I _{bs} | <1.3 |

Tabla 1-6. Composición química de la escoria de horno alto

2.2.2.2.2 Escorias de acería de horno de arco eléctrico.

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

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

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

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

| Producción de acero (10³ t) | Generación de escoria Kg/t de acero | Producción de escoria (t) |
|---|--|----------------------------------|
| 13.704 | Escoria negra: 110-150 | 1.781.560 |
| | Escoria blanca: 20-30 | 342.608 |

Tabla 1-7. Producción anual de escorias de acería (UNESID)

Mediante el proceso de fusión en el horno de arco eléctrico se obtiene acero líquido y, nadando sobre su superficie, escoria negra, que se extrae por una de las puertas del horno.

La composición química de la escoria está condicionada por el tipo de chatarra utilizada, el control de las variables de operación, etc. Pueden considerarse como representativos los porcentajes recogidos en la tabla 1-8.

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

- La escoria se vierte directamente al suelo y se enfría con agua para que pueda ser recogida y transportada en camiones. La escoria presenta un aspecto muy poroso, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo.
- Se puede verter en un cono de fundición que se coloca debajo de la piquera del horno eléctrico. La escoria comienza a enfriarse en el cono y se vierte en una fosa donde se enfría. La escoria obtenida presenta un aspecto menos poroso que la anterior y es más cristalina.

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

| Compuesto | Porcentaje (%) |
|--------------------------------|----------------|
| CaO | 22-60 |
| SiO ₂ | 11-37 |
| FeO | 0.5-4 |
| Fe ₂ O ₃ | 38-4 |
| MgO | 4-12 |
| Cr ₂ O ₃ | 1-8 |
| TiO ₂ | 0.6-2 |
| MnO | 1-4 |
| Al ₂ O ₃ | 2-8 |
| P ₂ O ₆ | 0-0.02 |

Tabla 1-8 Composición química de la escoria de acería. Fuente (Fomento et al., 2011)

Los áridos procedentes de las escorias negras de acerías de hornos de arco eléctrico tienen una elevada densidad relativa, entre 3,1 y 3,70 (Fomento et al., 2011), muy por encima de la de los áridos naturales. Esta diferencia hay que tenerla en cuenta en las dosificaciones ya que afectará al coste del transporte negativamente y aumentará la densidad del hormigón acabado.

La absorción de agua de la escoria presenta en general valores entre 3,29% y 2,84 %. Esta absorción puede influir en la durabilidad si el árido va a estar sometido a ciclos de hielo-deshielo o humedad-sequedad. Las partículas son duras, con coeficientes de desgaste Los Ángeles varía entorno al 20%. (Faleschini y col., 2015; Ministerio Fomento., 2011; Manso y col., 2011; Pellegrino y col., 2013; Polanco y col., 2011).

El coeficiente de pulimento acelerado varía en general entre 60 y 70 (Gimenez Ribera y Clave, 2016), cumpliendo los valores exigidos para áridos de mezclas bituminosas en capas de rodadura.

Si se combinan áridos siderúrgicos con otro tipo de áridos, las especificaciones exigidas deberán cumplirse para cada uno de los áridos combinados. Además, la mezcla deberá realizarse en planta.

Su uso en el hormigón genera muchas ventajas según a la aplicación en que se va emplear, sobre todo muy empleada para pavimentos y firmes de carreteras debido a que la escoria siderúrgica posee una elevada resistencia al desgaste y al pulido.

2.3 Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2-1. Producción de acero en 2015 de los 16 primeros países en Millones de toneladas. Fuente WS16 | 5 |
| Tabla 2-2. Producción de acero en España en Millones de toneladas. Fuente WS16 ... | 6 |
| Tabla 2-3. Producción de acero en Europa en Millones de toneladas (Fuente WS16)... | 8 |
| Tabla 2-4. Producción de acero mundial en Millones de toneladas. Fuente WS16.... | 9 |
| Tabla 2-5. Producción de escorias de horno alto | 18 |
| Tabla 2-6. Composición química de la escoria de horno alto..... | 19 |
| Tabla 2-7. Producción anual de escorias de acería (UNESID) | 20 |
| Tabla 2-8 Composición química de la escoria de acería. Fuente (Fomento et al., 2011) .. | 21 |

2.4 Índice de figuras.

| | |
|--|------|
| Figura 2-1. Ubicación de las acerías de horno de arco eléctrico de acero común y de acero inoxidable. | 2.7 |
| Figura 2-2. Clasificación en función del tipo de proceso utilizado..... | 2.7 |
| Figura 2-3. Diagrama de proceso de fabricación del acero Inoxidable..... | 2.10 |
| Figura 2-4. Horno de arco eléctrico. | 2.11 |
| Figura 2-5. Convertidor de AOD. | 2.11 |
| Figura 2-6. Colada continua. | 2.12 |
| Figura 2-7. Horno de vigas galopantes. | 2.13 |
| Figura 2-8. Tren desbastador. | 2.13 |
| Figura 2-9. Tren Steckel o laminador. | 2.14 |
| Figura 2-10. Bobina negra. | 2.14 |
| Figura 2-11. Proceso de laminación en frío y producto acabado. | 2.15 |



2.5 Bibliografía del capítulo

- Faleschini, F., Alejandro Fernandez-Ruiz, M., Zanini, M. A., Brunelli, K., Pellegrino, C., & Hernandez-Montes, E. (2015). High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, *101*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.022>
- Fomento, M., Rural, M. medio ambiente y, & CEDEX. (2011). Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. *CEDEX*, *2.3*, 1–19.
- Gimenez Ribera, J. M., & Clave, P. (2016). Árido siderúrgico en mezclas bituminosas. Experiencia en la Autovía A-2 en la provincia de Barcelona Iron and steel slag aggregates used in bituminous mixtures. Experience in A-2 Highway in Barcelona. *Revista de Ingeniería Civil*, *182*, 95–99.
- Manso, J. M., Hernández, D., Losáñez, M. M., & González, J. J. (2011). Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags. *ACI Materials Journal*, *108*(6).
- Pellegrino, C., Cavagnis, P., Faleschini, F., & Brunelli, K. (2013). Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate. *Cement and Concrete Composites*, *37*(1), 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.09.001>
- Polanco, J., Manso, J., Setién, J., & JJ, G. (2011). Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag. *ACI Materials Journal*, *108*(2), 196–203.
- Rubio-Cintas, M. D. (2009). *Influencia de la adición de polvo de humo ferrítico en el comportamiento reológico y resistente de morteros y hormigones*. Tesis Doctoral Universidad de Málaga.
- UNESID. (n.d.). Retrieved from <http://www.unesid.org/>
- UNESID. (2016). Seguimiento mensual de indicadores de actividad. Retrieved from http://www.unesid.org/docs/201608_UNESID-indicadores.pdf
- World Steel Association. (n.d.). Retrieved from <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2016/October-2016-crude-steel-production0.html>

Worldsteel, A. (2016). Total Production of Crude Steel. Retrieved from <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2016/October-2016-crude-steel-production0.html>

CAPÍTULO 3

Materiales dosificación y elaboración del hormigón

INDICE

| | | |
|---------|---|------|
| 3.1 | INTRODUCCIÓN | 3.5 |
| 3.2 | GRANULOMETRÍA DE ÁRIDOS Y DE LAS EAFS. | 3.5 |
| 3.2.1 | <i>Granulometría y curva granulométrica de áridos naturales</i> | 3.8 |
| 3.2.2 | <i>Granulometría y curva granulométrica de las EAFSS</i> | 3.9 |
| 3.3 | DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE LOS ÁRIDOS Y LA EAFSS..... | 3.11 |
| 3.4 | OTROS ENSAYOS REALIZADOS A LAS EAFSS | 3.15 |
| 3.5 | DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN..... | 3.16 |
| 3.5.1 | <i>Criterios para la dosificación del hormigón de referencia</i> | 3.17 |
| 3.5.1.1 | Clases de exposición..... | 3.18 |
| 3.5.1.2 | Tipología del cemento utilizado | 3.18 |
| 3.5.1.3 | Mínimo contenido de cemento. Máxima relación agua/cemento. | 3.19 |
| 3.5.1.4 | Resistencia mínima..... | 3.19 |
| 3.5.1.5 | Docilidad del hormigón..... | 3.20 |
| 3.5.1.6 | Aditivo utilizado..... | 3.21 |
| 3.5.1.7 | Designación del hormigón de partida..... | 3.21 |
| 3.5.2 | <i>Determinación de la composición y proporciones de los materiales de los hormigones de referencia</i> | 3.22 |
| 3.5.2.1 | Metodología dosificación..... | 3.22 |
| 3.5.2.2 | Dosificación de los tipos de hormigón convencional (HC/HAC) de partida..... | 3.22 |
| 3.5.2.3 | Dosificación del hormigón con adición de EAFSS (HCE/HACE). | 3.24 |
| 3.6 | FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN..... | 3.28 |
| 3.7 | MOLDES Y PROBETAS | 3.29 |
| 3.8 | FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS. | 3.30 |
| 3.9 | DESMOLDADO Y CURADO DE LAS PROBETAS. | 3.31 |
| 3.10 | CONCLUSIONES. | 3.32 |
| 3.11 | NORMATIVA DEL CAPÍTULO | 3.33 |
| 3.12 | ÍNDICE DE TABLAS..... | 3.35 |
| 3.13 | ÍNDICE DE FIGURAS | 3.36 |
| 3.14 | BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO | 3.37 |

3.1 Introducción

En este capítulo se analizan los ensayos a los que han sido sometidos los áridos y escorias de horno de arco eléctrico de acero inoxidable (EAFSS-Electric Arc Furnace Slag Stainless), y que forman la base para la dosificación del hormigón y morteros equivalentes desarrollados en esta tesis doctoral. Además de dichos ensayos, se ha procedido al ajuste granulométrico de la composición del hormigón utilizando las EAFSS cuando es sustituido el árido fino por ellas.

A su vez se definen: el método de dosificación empleado, procedimientos de fabricación de las probetas, identificación así como el curado de las mismas.

Respecto a los áridos se estudian tres propiedades fundamentales; la granulometría, la densidad y la absorción.

La granulometría de los áridos es uno de los parámetros fundamentales en el proceso de dosificación del hormigón. Los métodos de dosificaciones conocidos: fuller, bolomey y de la peña (Fernández-Cánovas, 2007) se basan en granulometrías óptimas que debe tener el árido compuesto.

El árido es el material granular, generalmente inerte, resultante de la desintegración natural y/o desgaste de rocas, que se obtiene mediante la trituración de ellas o bien de otros materiales suficientemente duros, que permiten obtener partículas de forma y tamaño estables, destinados a ser empleadas en el hormigón (Fernández-Cánovas, 2007).

La importancia del uso del tipo y de la calidad correcta de árido no se puede subestimar. Los áridos finos y gruesos ocupan entre el 60% y el 75% del volumen del hormigón (70% al 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido; sobre todo, en la densidad, elasticidad, deformación, absorción, etc., en las proporciones de la mezcla y en la economía del hormigón.

En consecuencia se considera que los áridos no son elementos inertes en la masa del hormigón, sino que le confieren gran parte de sus propiedades.

De la misma forma la densidad y la absorción intervienen en el peso y en la cantidad de agua de amasada necesaria en la dosificación.

3.2 Granulometría de áridos y de las EAFS.

Previa a la dosificación del hormigón y morteros equivalentes utilizados en esta tesis doctoral se han de definir las características de los distintos tipos de áridos

utilizados incluyendo a las EAFSS como un árido más. Los áridos empleados han sido facilitados por la factoría de prefabricados que la empresa DRACE del grupo ACS tiene ubicada en Los Barrios, Cádiz (Figura 3-1).



Figura 3-1. Áridos procedentes de la factoría de prefabricados de DRACE

Las EAFSS han sido facilitadas por la empresa ACERINOX ubicada también en el término municipal de Los Barrios.

Se utilizarán tres tipos de áridos de naturaleza caliza y se sustituirá el árido fino por las EAFSS. Nos encontramos con dos granulometrías de las EAFSS y las definiremos como:

- Lodo escoria
- Arena escoria

La denominación de cada uno de los áridos y de la escoria se realiza en función de la granulometría. De igual forma se exponen los materiales en la tabla 3.1. En el caso de las EAFS quedarán pendientes de sus correspondientes estudios granulométricos.

| Nomenclatura | Tamaño (mm) | |
|---------------|-------------|------|
| | Mín. | Máx. |
| Árido 0/2 | 0 | 2 |
| Árido 0/4 | 0 | 4 |
| Árido 4/16 | 4 | 16 |
| Arena Escoria | 0 | 1 |
| Lodo Escoria | 0 | 0 |

Tabla 3.1 Nomenclatura y tamaños de áridos empleados

En los apartados siguientes se determinará la granulometría de los áridos y de las EAFSS según la serie UNE, mediante división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente, además de la curva granulométrica de cada uno de los áridos y de la escoria.

Para obtener la granulometría se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 933-1:2012. La masa de las muestras ensayadas se reduce conforme a la norma UNE-EN 932-2:1999.

Ha sido necesaria la utilización de una báscula de precisión, una tamizadora con tamices de ensayo con aberturas como se especifica en la norma UNE-EN 933-2:1996 y de acuerdo con los requisitos de las normas ISO 3310-1 e ISO 3310-2, así como una estufa ventilada que mantenga una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ de forma que obtengamos un adecuado secado de los áridos sin causar la rotura de ningún tamaño de partículas.

El ensayo granulométrico se efectúa por vía seca dado que los áridos empleados tienen perfectamente definidas sus partículas a diferencia de un suelo que se trataría de un conglomerado donde las partículas no están definidas y habría que proceder al lavado para disgregarlo.

Los pasos necesarios para la elaboración del ensayo granulométrico por vía seca han sido los siguientes:

- 1 Secado de las muestras de áridos en estufa ventilada durante 24 horas. La temperatura de secado ha sido $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- 2 Preparación de la columna granulométrica a colocar en la tamizadora. Se distribuyen los tamices de menor a mayor, colocando tras el tamiz mayor el siguiente superior en la serie. Con ello nos aseguramos que no existen tamaños de partículas superiores a las ensayadas.
- 3 Vertido del material secado en la columna de tamizado. La columna está formada por cierta cantidad de tamices ensamblados y dispuestos, de arriba a abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura, con el fondo y la tapa.
- 4 Agitamos mecánicamente la muestra mediante la tamizadora. El proceso de tamizado se considera finalizado cuando realizado un tamizado adicional el cambio de masa del material retenido en cualquier tamiz no conlleve un cambio de masa superior al 1%. En nuestro caso el tiempo de tamizado ha sido de 10 minutos.
- 5 Retiramos los tamices uno a uno, comenzando con el de mayor tamaño de abertura

- 6 Pesamos el material retenido en cada uno de los tamices de la columna granulométrica, registrando cada uno de ellos como peso retenido parcial de cada tamiz.
- 7 Confección de la curva granulométrica colocando en el eje de abscisas los tamices empleados y en el eje de ordenada el porcentaje acumulado de la masa de la porción de ensayo que pasa por cada uno de los tamices, redondeando al número decimal más próximo para el tamiz 0,063 mm y al número entero más próximo para el resto de tamices.

Del ensayo granulométrico también se obtiene el módulo granulométrico, definiendo este como la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie UNE hasta el de abertura máxima dividida por 100. Este módulo da una idea del tamaño medio del árido.

3.2.1 Granulometría y curva granulométrica de áridos naturales.

Se realizan los ensayos granulométricos de los áridos naturales con los que se han trabajado. En la tabla 3.2 se muestran los valores obtenidos. En la figura 3.2 se realiza una representación gráfica de dichos valores.

| TAMICES UNE EN 933-2 | 0/2 TARALPE | | | 0/4 MANILVA | | | 4/16 MANILVA | | |
|----------------------------|-----------------------|------|-------|-----------------------|------|-------|-----------------------|-------|-------|
| | RETENIDO ACUMULADO | | PASA | RETENIDO ACUMULADO | | PASA | RETENIDO ACUMULADO | | PASA |
| | (mm) | PESO | % | PESO | % | % | PESO | % | % |
| 25 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 |
| 20 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 |
| 16 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 | 36,0 | 1,5 | 98,5 |
| 10 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 | 1460,0 | 60,8 | 39,2 |
| 8 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 | 1802,0 | 75,1 | 24,9 |
| 4 | | 0,0 | 100,0 | 30,2 | 6,2 | 93,8 | 2388,0 | 99,5 | 0,5 |
| 2 | 12,0 | 2,2 | 97,8 | 144,4 | 29,7 | 70,3 | 2390,0 | 99,6 | 0,4 |
| 1 | 80,0 | 14,6 | 85,4 | 262,8 | 54,1 | 45,9 | 2392,0 | 99,7 | 0,3 |
| 0,5 | 173,0 | 31,6 | 68,4 | 350,2 | 72,0 | 28,0 | 2393,0 | 99,7 | 0,3 |
| 0,250 | 311,0 | 56,9 | 43,1 | 412,1 | 84,8 | 15,2 | 2393,0 | 99,7 | 0,3 |
| 0,125 | 411,0 | 75,1 | 24,9 | 440,8 | 90,7 | 9,3 | 2394,0 | 99,8 | 0,3 |
| 0,063 | 472,0 | 86,3 | 13,7 | 453,6 | 93,3 | 6,7 | 2398,0 | 99,9 | 0,1 |
| BANDEJA | 472,0 | 86,3 | 13,7 | 454,0 | 93,4 | 6,6 | 2400,0 | 100,0 | 0,0 |

Tabla 3.2 Granulometría áridos naturales.



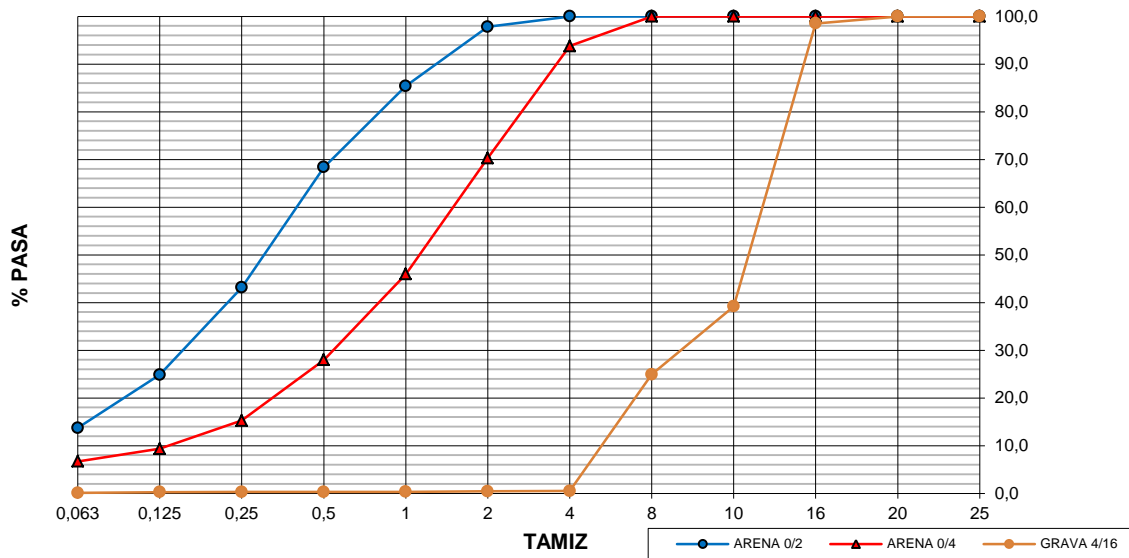


Figura 3.2. Curva granulométrica de los áridos naturales.



Figura 3-3. Equipo de tamizado utilizado

3.2.2 Granulometría y curva granulométrica de las EAFSS.

Se realizan los ensayos granulométricos de las EAFSS con las que se han trabajado. En la tabla 3.3 se muestran los valores obtenidos. En la figura 3-4 se realiza una representación gráfica de dichos valores.

| TAMICES UNE EN 933-2 (mm) | LODO ESCORIA | | | ARENA ESCORIA | | |
|--------------------------------------|-----------------------|------|-------|-----------------------|-------|-------|
| | RETENIDO ACUMULADO | | PASA | RETENIDO ACUMULADO | | PASA |
| | PESO | % | % | PESO | % | % |
| 25 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 |
| 20 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 |
| 16 | | 0,0 | 100,0 | | 0,0 | 100,0 |
| 10 | | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 8 | | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 4 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,7 | 0,2 | 99,8 |
| 2 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 2,3 | 0,5 | 99,5 |
| 1 | 1,0 | 0,1 | 99,9 | 5,4 | 1,2 | 98,8 |
| 0,5 | 261,0 | 21,5 | 78,5 | 30,7 | 6,8 | 93,2 |
| 0,250 | 594,0 | 48,8 | 51,2 | 172,3 | 38,3 | 61,7 |
| 0,125 | 833,0 | 68,5 | 31,5 | 351,1 | 78,0 | 22,0 |
| 0,063 | 1039,0 | 85,4 | 14,6 | 431,3 | 95,8 | 4,2 |
| BANDEJA | 1040,0 | 85,5 | 14,5 | 450,0 | 100,0 | 0,0 |

Tabla 3.3 Granulometría EAFSS.

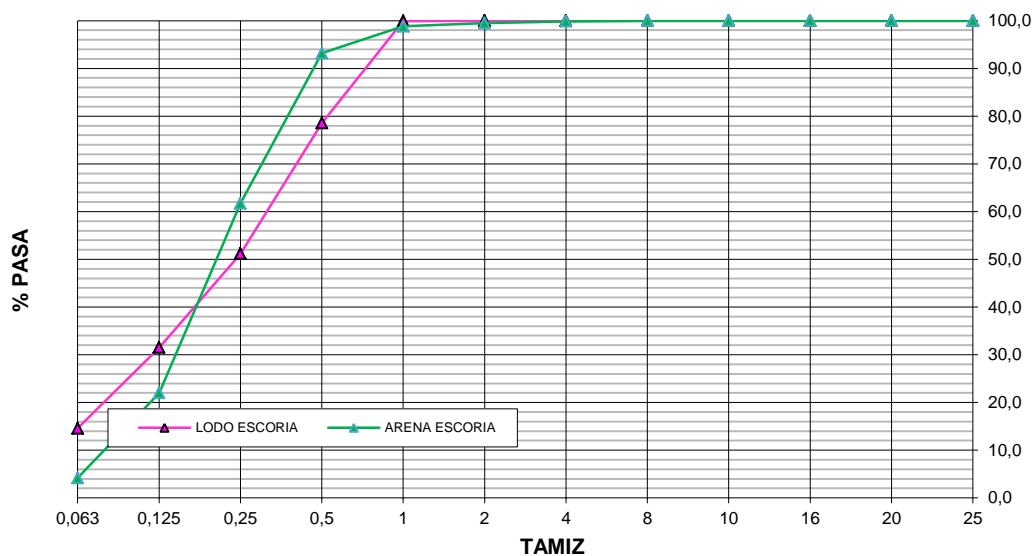


Figura 3.4. Curva granulométrica de las EAFSS.

Una vez definida la granulometría de los áridos determinaremos el tamaño máximo de cada uno de los áridos empleados en la fabricación del hormigón.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) en su artículo 28.3 denomina tamaño máximo D de un árido grueso o fino, la mínima abertura de tamiz UNE-EN 933-2 que cumple los requisitos generales en la tabla 28.3.a de dicho articulado, en función del tamaño máximo del árido.

En el caso de los áridos naturales los diámetros máximos y mínimos cumplen con la designación propuesta, cuestión que se verifica al ser áridos comercializados por una empresa que acredita certificación por organismo normalizador.

Para el caso de las EAFSS, nos encontramos con que los diámetros máximos y mínimos no son usuales. Resultan para la arena y el lodo de escoria unos tamaños d/D de 0/0.

En los estudios que se desarrollan en esta tesis no se ajustan los tamaños de ninguna de las fracciones de áridos o escorias. Las muestras ensayadas no se han visto alteradas, es decir, ni se han tamizado ni se le han adicionado nuevos tamaños. Uno de los objetivos de esta tesis es intentar buscar una valorización lo más eficiente posible, por ello las escorias que se han empleado en las dosificaciones parten de su situación real a la salida de la acería.

3.3 Densidad y absorción de los áridos y la EAFSS

En este apartado se determinan la densidad aparente y la absorción de agua tanto de los áridos como de la EAFSS empleados en la fabricación de los distintos hormigones de esta tesis. Para la obtención de dichos parámetros hemos seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 1097-6.

Según la norma UNE citada anteriormente y dado que tenemos dos conjuntos de áridos con tamaños de partículas bien diferenciados, aplicaremos el método del picnómetro para partículas de árido comprendidas entre 0,063 mm y 4 mm en el caso del árido fino 0/2, árido intermedio 0/4 y la EAFSS. Para el árido grueso 4/16 utilizaremos el método de la balanza hidrostática como método alternativo al método del picnómetro para partículas de árido comprendidas entre 4 mm y 16 mm.

Todas las muestras ensayadas se han realizado de conformidad con la norma UNE-EN 932-1, reduciéndose las muestras según lo dispuesto en la norma EN 932-2.

La densidad de las partículas se obtiene a partir de la relación entre la masa y el volumen. La masa se determina pesando la muestra de ensayo en condiciones de saturación, y pesándola de nuevo tras el proceso de sacado en estufa. La determinación del volumen se realiza a partir del desplazamiento de la masa de agua desplazada por pesadas según el método del picnómetro.

El valor de la absorción de agua se calculará una vez obtenida la masa del árido saturado con superficie seca y la masa de muestra de ensayo secada en estufa.

Los equipos de uso general que necesitaremos para realizar el ensayo por el método del picnómetro y por el método de la balanza hidrostática, son los que se indican a continuación:

- 1 Estufa ventilada que alcance y mantenga una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- 2 Balanza con precisión de 0,1% de la masa de la muestra de ensayo.
- 3 Baño María, con control termostático de temperatura.
- 4 Tamices de ensayo de 0,063 mm, 4 mm y 31,5 mm.
- 5 Termómetro, bandejas de acero inoxidable y paños absorbentes.

Los equipos especiales usados para el método del picnómetro para partículas de árido comprendidas entre 0,063 mm y 4 mm son los siguientes:

- 1 Picnómetro de 1000 ml de capacidad.
- 2 Secador de mano.
- 3 Molde troncocónico metálico y pisón metálico.

Los equipos especiales utilizados para el método de la balanza hidrostática son los siguientes:

- 1 Cesta perforada con sistema que permita la suspensión de la balanza
- 2 Depósito que permita albergar agua a una temperatura de $22^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$, además de suspender libre y holgadamente la cesta perforada.

Para el desarrollo de cada uno de los métodos de ensayo es necesario definir un procedimiento operatorio, el cual nos vaya guiando para la obtención de los parámetros buscados. Seguidamente se indicarán los procedimientos operatorios para el método del picnómetro y para el método de la balanza hidrostática.

Ejecución del método del picnómetro:

1. Se lava la muestra en el tamiz 0,063 mm y de 4 mm. Con ello por un lado eliminamos las partículas más finas y por otro se rechazan las partículas que se han quedado retenidas en el tamiz 4 mm.
2. Se sumerge la muestra preparada en el picnómetro, extrayendo las posibles burbujas de aire.

3. Se coloca el picnómetro al baño María y mantenemos la muestra a $22^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Tras las 24 horas se extrae el picnómetro del baño.
4. Se enrasa el picnómetro.
5. Se seca exteriormente el picnómetro y lo pesamos, obteniendo la masa M2. Anotamos la temperatura del agua en el picnómetro.
6. Se vacía el contenido del picnómetro sobre una bandeja, enjuagando éste y vertiendo el contenido del enjuague sobre la misma bandeja.
7. Se llena el picnómetro de agua, se enrasa, se seca exteriormente y pesamos el conjunto, obteniendo la masa M3. Volvemos a anotar la temperatura del agua en el picnómetro.
8. Dado que la muestra depositada en la bandeja tiene gran cantidad de agua, se inclina la bandeja sobre el tamiz 0,063 mm con el fin de eliminar el exceso de agua y retener las posibles partículas en suspensión que fácilmente se pueden reincorporar a la bandeja al quedar retenidas en el tamiz.
9. Se extiende en una sola capa la muestra sin exceso de agua en la bandeja.
10. Se seca la muestra con un secador de mano, moviendo ésta para que el secado se realice de forma uniforme hasta la película superficial de agua que recubre las partículas desaparezca.
11. Se valora la eliminación de la película superficial de agua sobre las partículas mediante el molde troncocónico y el pisón metálico. Para ello llenamos el molde con la muestra y compactamos ésta mediante 25 golpes de pisón, retirando a continuación el molde y observando la tipología de la figura obtenida.
12. Se retira el molde troncocónico y observamos la tipología de la figura obtenida. Dependiendo del tipo de figura tendremos:
 - a. Forma del molde: árido húmedo
 - b. Desmoronamiento apreciable: árido ligeramente húmedo.
 - c. Desmoronamiento casi completo pero con pico y pendientes regulares: árido saturado con superficie seca.
 - d. Formas suaves y curvilíneas, no se forma pico: árido seco.

13. Se busca la figura representativa de desmoronamiento total pero con pico y pendientes regulares. Así de esta forma pesamos el árido saturado superficie seca y obtenemos la masa M1.
14. Se introduce la muestra en estufa a una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta la obtención de masa constante. Una vez obtenida masa constante tendremos M4.

Ejecución del método de la balanza hidrostática:

1. Se Lava la muestra en el tamiz 4mm y de 31,5 mm. Con ello por un lado eliminamos las partículas más finas y por otro rechazamos las partículas que se han quedado retenidas en el tamiz 31,5 mm.
2. Se sumerge la muestra preparada en el depósito de agua durante 24 horas. La temperatura del agua será de $22^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$.
3. Se sumerge la cesta metálica en el agua y determinamos el peso de la cesta sumergida, obteniéndose M3.
4. Se introduce el árido ya saturado en el paso 1 en la cesta, con la precaución de eliminar las posibles burbujas de aire. Para ello dejamos caer la cesta 25 veces.
5. Se determina el peso sumergido de la cesta con el árido saturado, obteniendo M2. Anotamos la temperatura del agua.
6. Se extrae la cesta con el árido saturado dejando escurrir el conjunto durante unos minutos.
7. Se deposita el árido saturado sobre los paños absorbentes, procediendo al secado superficial del árido para posteriormente extenderlo al aire hasta que se hayan eliminado todas las películas de agua visibles. De esta forma pesamos el árido obteniendo M1.
8. Se introduce la muestra en estufa a una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta la obtención de masa constante. Una vez obtenida masa constante tendremos M4.

El procedimiento de cálculo para la determinación de la densidad aparente de las partículas y de la absorción de agua (como porcentaje de masa seca) tras inmersión de

24 horas se obtiene de la misma forma tanto para el método del picnómetro como para el método de la balanza hidrostática. La formulación empleada es la siguiente:

Densidad aparente de las partículas (t/m^3):

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad [3.3]$$

Absorción de agua (%):

$$A = \frac{100(M_1 - M_4)}{M_4} \quad [3.4]$$

Donde:

M1: masa del árido saturado con superficie seca, en gramos.

M2: masa del conjunto cesta y los áridos saturados, pesada sumergida, en gramos.

M3: masa de la cesta vacía, pesada sumergida, en gramos.

M4: masa del árido seco en estufa, pesada al aire, en gramos.

ρ_w : densidad del agua a la temperatura anotada en el momento de determinar M2, en toneladas por metro cúbico.

Siguiendo los procedimientos expuestos anteriormente, en la tabla 3.4 se indican los valores de absorción y densidad para cada uno de los áridos y EAFSS utilizados.

| Tipo de árido | Densidad (kg/m^3) | Absorción (%) |
|---------------|-----------------------|---------------|
| Árido 0/2 | 2,72 | 0,05 |
| Árido 0/4 | 2,68 | 0,10 |
| Árido 4/16 | 2,7 | 0,40 |
| Arena Escoria | 3,02 | 0,58 |
| Lodo Escoria | 3,01 | 3,97 |

Tabla 3.4 Densidad y absorción de los áridos y las EAFSS

3.4 Otros ensayos realizados a las EAFSS

Los siguientes ensayos no se han realizado a los áridos naturales ya que estos materiales están certificados y no se ha considerado su realización. Al no disponer de la Escuela Politécnica Superior de Algeciras la infraestructura necesaria para realizar los siguientes ensayos, se ha solicitado al laboratorio de control de control acreditado SERGEYCO, la elaboración de los mismos.

Los ensayos realizados en SERGEYCO han sido:

- Compuestos totales de azufre.
- Contenido en sulfatos solubles en ácido.
- Contenido en materia orgánica.
- Contenido de cloruros solubles en agua.

A continuación se muestran en la tabla 3.5 el resultado de los mismos:

| ENSAYOS | Resultado | |
|---|---------------|--------------|
| | Arena Escoria | Lodo Escoria |
| Sulfatos solubles (UNE EN 1744-1) | 0,19% | 6,05% |
| Azufre total (UNE EN 1744-1) | 0,89% | 0,25% |
| Cloruros solubles en agua (UNE EN 1744-1) | 0,008% | 0,012% |
| Materia orgánica (UNE EN 1744-1) | + claro | + claro |

Tabla 3.5 Ensayos químicos realizados en SERGEYCO

3.5 Dosificación del hormigón

3.5.1 Introducción

El hormigón es una mezcla heterogénea formada por un conglomerante hidráulico (cemento), agua, una estructura granular (áridos) y aditivos; dichos materiales deben ser dosificados de forma que se logre un hormigón con el cual construir estructuras adecuadas para los fines de diseño, es decir, que cumplan con las condiciones de carácter resistente, funcional, de durabilidad, estético, etc.; dentro de un margen de economía y de sostenibilidad.

Así pues, la tipología de los materiales que intervienen, las proporciones en las cuales deben introducirse en la mezcla, el proceso de mezclado y amasado, junto con las condiciones de colocación de dicha mezcla y las posteriores condiciones de explotación y mantenimiento, determinarán las características de diseño de las estructuras de hormigón.

En lo referente a la elaboración del hormigón, una vez definida en proyecto la tipología del mismo que se requiere, el paso siguiente sería establecer en qué proporción deben mezclarse los materiales para conseguir dicho material. En nuestro caso nos diferenciamos un poco de la metodología tradicional ya que la solución buscada es valorizar un residuo de la industria metalúrgica que no está todavía normalizado en hormigón, es por ello que partiremos de unas premisas básicas referentes a: clase de exposición prevista, tipología y tipo de cemento, máxima relación agua cemento, resistencia mínima a compresión y consistencia.

Debemos destacar que el proceso de diseño de un hormigón no es tan sencillo como la aplicación de un método, cualquiera que sea éste. Cuando desarrollemos un método de dosificación hay que considerar la interrelación entre los distintos factores que influyen en las propiedades y características de la mezcla.

El cálculo de las proporciones de los materiales, no es un proceso automático, pues son varios los factores que pueden condicionar las mismas. La dosificación debe hacerse partiendo de unos datos iniciales establecidos bien en el proyecto o bien en la experiencia previa. Posteriormente se complementará con una revisión de las condiciones de ejecución de la obra, como son: lugar y condiciones de elaboración de la mezcla, condiciones de transporte, ubicación de la obra, forma de aplicación de la mezcla, forma de vibrado, forma de curado, plazos de ejecución, etc.

Una vez definidos y contemplados estos aspectos, el estudio de las proporciones en las que deben combinarse los materiales que componen el hormigón, se realizará mediante un modelo teórico, más concretamente el método de Fuller, apoyado en todo momento por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 y la experiencia que el autor posee.

3.5.1 Criterios para la dosificación del hormigón de referencia

Previo a la determinación de las proporciones utilizadas en los distintos materiales que conforman el hormigón, hemos de marcar unas hipótesis de partida mínimas, todas ellas fijadas por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 en función del tipo de ambiente al que será sometido el hormigón. Estas hipótesis previas serían:

- Clase de exposición: general y específica.
- Tipología y contenido mínimo de cemento.
- Máxima relación agua/cemento.
- Resistencia mínima a compresión.
- Consistencia.

Una vez fijadas las condiciones mínimas de partida utilizaremos un método de dosificación, en nuestro caso Fuller, para obtener las proporciones de cada uno de los componentes que conforman el hormigón de partida.

Los parámetros que se desarrollan en este apartado son susceptibles de variar durante el proceso de dosificación, pero siempre manteniendo un límite inferior que son los marcados por la instrucción de hormigón estructural EHE-08. En el caso de que algún parámetro no cumpliera con la normativa se hará constar en el análisis de los resultados.

3.5.1.1 Clases de exposición

El hormigón a utilizar en esta tesis doctoral se dosificará para un ambiente inicial, y se determina la exposición general y específica de partida. En nuestro caso definimos:

- Exposiciones generales:

Son las relativas a la corrosión de las armaduras. Se utiliza un ambiente marino en zona aérea. Este ambiente genera corrosión por cloruros debiendo proporcionar al hormigón una defensa adecuada frente a este tipo de ataque. Haciendo uso de la tabla 8.2.2 de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 y vista la clase de exposición general prevista, la designación del ambiente será: IIIa.

3.5.1.2 Tipología del cemento utilizado

Se ha optado por un cemento Portland sin adiciones de forma que éstas no interfieran o produzcan resultados erróneos en los valores obtenidos en cada uno de los ensayos. Dicho de otro modo; eliminamos del sistema la variable “adiciones del cemento”. Además de esta razón, la propuesta de las nuevas dosificaciones la hemos basado en los hormigones de referencia HC y HAC que poseen un cemento tipo I. De esta forma podremos acotar y relativizar mejor las conclusiones a las que podamos llegar.

De la misma forma y dado que estudiaremos el comportamiento de los diferentes tipo de hormigón en ambientes marinos, se ha rehusado de utilizar cementos resistentes al agua de mar ni a los sulfatos, dado que si introducimos cementos del tipo MR o SR se podría alterar el funcionamiento de la mezcla y enmascarar el comportamiento de las EAFSS. En otras palabras, nos surgiría la duda frente a un buen resultado de quién ha sido el autor; el cemento, la EAFSS o ambos.



Según se indica en el artículo 26 de la instrucción de hormigón estructural EHE-08, el cemento tipo CEM I es compatible para todas las tipologías de hormigón existentes: masa, armado y pretensado.

3.5.1.3 Mínimo contenido de cemento. Máxima relación agua/cemento.

Una vez definido el tipo de ambiente y el tipo de cemento se exponen las limitaciones impuestas por la EHE-08 relativas a la cantidad mínima de cemento y la máxima relación agua/cemento. En la tabla 3.6 podemos observar las siguientes limitaciones:

| Parámetro dosificación | Tipo de hormigón | Clase de exposición III _a |
|--|------------------|--------------------------------------|
| Máxima Relación a/c | Masa | - |
| | Armado | 0,50 |
| | Pretensado | 0,45 |
| Mínimo contenido de cemento (kg/m ³) | Masa | - |
| | Armado | 300 |
| | Pretensado | 300 |

Tabla 3.6. Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento. [EHE-08 tabla 37.3.2.a]

Como datos de partida hemos tomado relación máxima a/c un valor de 0,50 y un mínimo contenido de cemento de 325 kg/m³. Comprobamos que las dosificaciones de partida cumplen con la norma.

3.5.1.4 Resistencia mínima

La resistencia mínima inicial exigible nos viene marcada en la tabla 3.7. En ella la resistencia mínima para el ambiente IIIa, será de 30 N/mm².

| Parámetro dosificación | Tipo de hormigón | Clase de exposición |
|---|------------------|---------------------|
| | | III _a |
| Resistencia mínima (N/mm ²) | Masa | - |
| | Armado | 30 |
| | Pretensado | 30 |

Tabla 3.7. Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad. [EHE-08 tabla 37.3.2.b]

3.5.1.5 Docilidad del hormigón

La docilidad del hormigón se calcula mediante las dosificaciones de áridos, cemento y agua que posteriormente se transforman en hormigón, siendo, manejado, transportado, colocado y compactado en los moldes o encofrados con la mínima pérdida de homogeneidad y sin que se produzca segregación ni exudación.

A su vez, la docilidad, se valora por la determinación de la consistencia, siendo ésta la oposición que presenta un hormigón fresco a experimentar deformaciones, y por tanto, una propiedad física inherente del hormigón (Fernández-Cánovas, 2007).

Para la determinación de las consistencias aplicadas en la tesis, debemos distinguir entre:

- Docilidad aplicable a los hormigones convencionales, según UNE-EN 12350-2.
- Docilidad aplicable a los hormigones autocompactantes, según UNE 83361, UNE 83364, UNE 83363

Dado que el estudio de la docilidad corresponde al estado fresco, en el capítulo 4 se realiza un análisis detallado de los métodos descritos, así como de los resultados obtenidos.

Como continuación a la definición del hormigón de partida seguimos los siguientes criterios de docilidad, atendiendo a la experiencia del autor en el prefabricado del hormigón y buscando similitudes con los hormigones ejecutados en la vida profesional:

- Para hormigones convencionales, atendiendo al artículo 31.5 de la EHE, se opta por una consistencia plástica (P) comprendiendo un cono entre 2 y 5 centímetros.

- Para los hormigones autocompactantes, atendiendo a las recomendaciones dadas en el anejo nº 17 de la EHE (artículo 39.2) definimos:
 - Ecurrimiento según UNE 83361, ACE-E2
 - Viscosidad según UNE 83364, AC-V1
 - Resistencia al bloqueo UNE 83363, AC-RB2

3.5.1.6 Aditivo utilizado.

El aditivo utilizado en todos los hormigones ha sido el Glenium ACE-324, de la marca comercial BASF (empresa certificada conforme a la EN ISO 9001).

Las características principales del aditivo son:

- Función principal: reductor de agua de alta actividad superplastificante.
- Función secundaria: acelerador del endurecimiento.
- Dosificación recomendada: de 0,5% a 2,5 % sobre peso de cemento.

El aditivo cumple con la declaración de conformidad UNE EN 934-2. Se ha realizado una revisión documental del certificado de calidad aportado por el fabricante y es conforme a la EHE-08.

3.5.1.7 Designación del hormigón de partida.

Atendiendo a los apartados anteriores se tipifican cuatro hormigones como base de partida para el desarrollo de la tesis:

- HC (Hormigón Convencional): HA-30/P/16/IIIa
- HAC (Hormigón Autocompactante convencional):
 - HA-30/(AC-E2+AC-V1+AC-RB2)/16/IIIa
- HCE (Hormigón Convencional con Escorias (EAFSS)): HA-30/P/16/IIIa
- HAC (Hormigón Autocompactante con adición de Escorias (EAFSS)):
 - HA-30/(AC-E2+AC-V1+AC-RB2)/16/IIIa

3.5.2 Determinación de la composición y proporciones de los materiales de los hormigones de referencia.

3.5.2.1 Metodología dosificación.

Para diseñar un hormigón, existen distintos métodos que se pueden agrupar en dos conjuntos. Por un lado están los que tienen una determinada resistencia final, y a partir de ahí, se buscan las cantidades de los componentes para alcanzar tal resistencia y, por otro lado, encontramos aquellos que empiezan por una determinada composición estándar y se va corrigiendo hasta alcanzar el nivel de trabajabilidad adecuada para la aplicación deseada (Aïtcin, 1998; Jiménez y col., 2000). En nuestro caso se ha optado por la segunda opción ya que los parámetros básicos como contenido de cemento, relación agua cemento y resistencia previsible ya se conocen debido a la experiencia del autor en los materiales y dosificaciones de referencia. El método de dosificación utilizado ha sido el de Fuller.

Los áridos (arenas y gravas) suponen entre el 60 y el 90% del volumen del hormigón. La selección apropiada del tipo de agregado y su distribución de tamaños afecta directamente a las propiedades del hormigón (trabajabilidad en estado fresco, resistencia mecánica, permeabilidad, durabilidad y coste total), por lo que se trata, sin duda, de una tarea esencial a la hora de diseñar u optimizar la mezcla. Por consiguiente, sea cual sea el método escogido, a la hora de diseñar tanto un hormigón convencional (HC) como un hormigón autocompactante (HAC) la dosificación de los áridos debe realizarse de manera adecuada para obtener la mayor compacidad posible, o lo que es lo mismo, lograr que el esqueleto granular resultante tenga el mínimo volumen de huecos, lo que garantiza que la resistencia final será lo más alta posible (Jiménez y col., 2000; Newman, 2002).

3.5.2.2 Dosificación de los tipos de hormigón convencional (HC/HAC) de partida.

El cálculo de la dosificación se ha planteado a partir de las características granulométricas de los distintos áridos disponibles, incluidas las EAFSS. Se han combinado las distintas fracciones de lodo (EAFSS), Arena (EAFSS) y grava natural para ajustar la composición final a la curva compuesta en el hormigón conocido HC y HAC. En la tabla 3.8 se visualizan los valores de las composiciones correspondientes al hormigón convencional.

| TAMICES UNE EN 933-2 (mm) | COMPOSICION. | |
|--------------------------------------|--------------|--------|
| | HC | HAC |
| | % PASA | % PASA |
| 25 | 100,0 | 100,0 |
| 20 | 100,0 | 100,0 |
| 16 | 99,3 | 99,5 |
| 10 | 69,6 | 78,1 |
| 8 | 62,5 | 73,0 |
| 4 | 48,1 | 62,3 |
| 2 | 39,5 | 54,2 |
| 1 | 29,1 | 42,5 |
| 0,500 | 20,2 | 31,3 |
| 0,250 | 12,0 | 19,1 |
| 0,125 | 7,1 | 11,2 |
| 0,063 | 4,4 | 6,6 |

Tabla 3.8. Valores correspondientes a la composición de los áridos en los hormigones HC y HAC.

Del resultado de aplicar estos valores se obtienen las dos curvas correspondientes (figura 3-5 y figura 3-6).

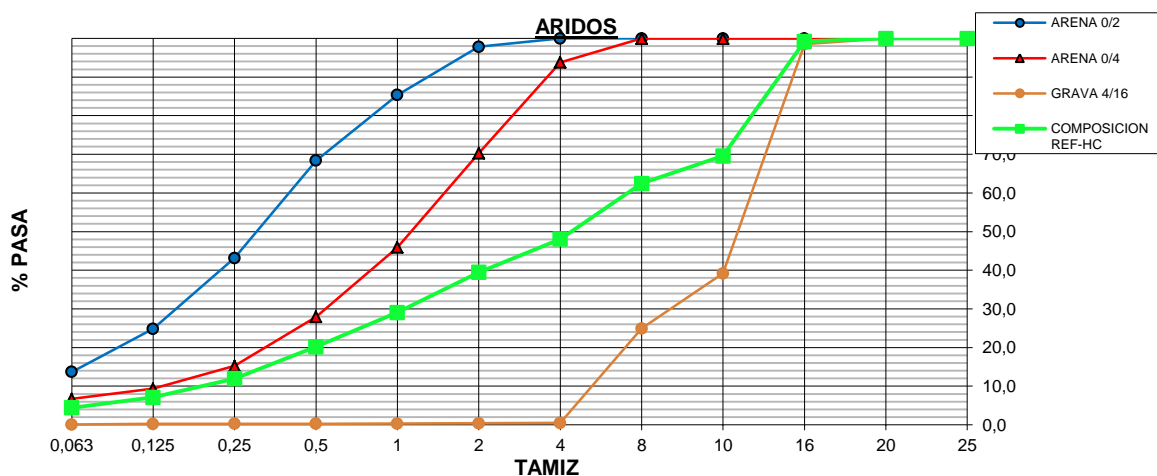


Figura 3-5. Curva compuesta de los áridos de un hormigón HC.

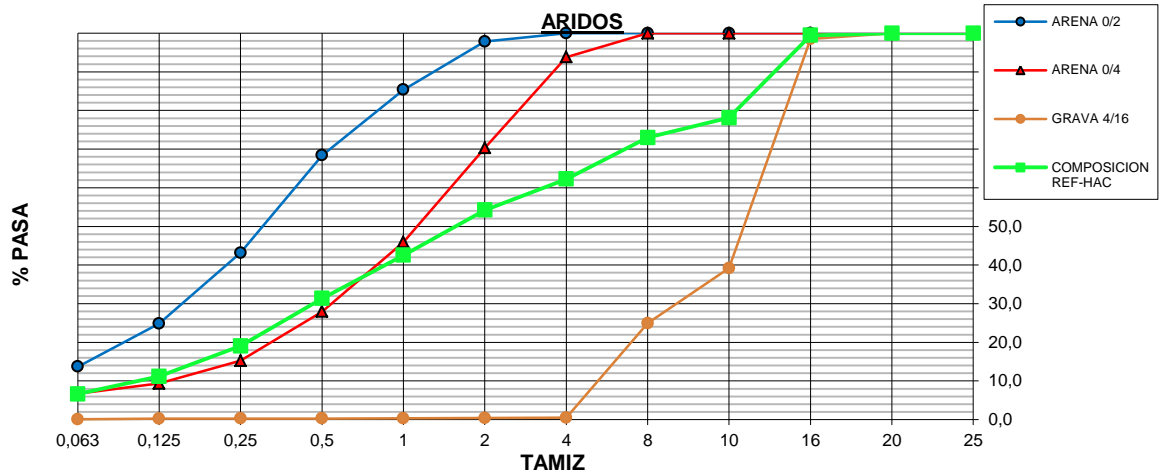


Figura 3-6. Curva compuesta de los áridos de un hormigón HAC.

Los porcentajes de combinación del hormigón HC y HACE se han definido conforme al método de Fuller.

Las dosificaciones correspondientes a los HC y HAC se definen en la tabla 3.9

| Material | HC | HAC |
|-----------------------|------|------|
| Cemento | 325 | 350 |
| a/c | 0,50 | 0,55 |
| Aditivo (% s.p.c) | 1,1 | 2,2 |
| Arena 0/2 (%) | 15 | 33 |
| Arena 0/4 (%) | 35 | 31 |
| Árido grueso 4/16 (%) | 50 | 36 |

Tabla 3.9. Parámetros de dosificación de los HC y HAC.

3.5.2.3 Dosificación del hormigón con adición de EAFSS (HCE/HACE).

Una vez que se ha definido el hormigón convencional procedemos a dosificar el nuevo hormigón utilizando como sustitutivo del árido fino las EAFSS. Para los dos tipos de hormigón HCE y HACE seguimos basándonos en la metodología de Fuller, si bien para el caso de los HACE tendremos que tener en cuenta las especificaciones relativas a un hormigón autocompactante que más adelante definiremos.

Los materiales que vamos a utilizar para la composición son:

- EAFSS lodo.
- EAFSS arena.
- Árido 4/16.
- Cemento.
- Agua.



- Aditivo.

Presentamos en primer lugar la obtención de la dosificación HCE (tabla 3.10). Las granulometrías de los materiales se pueden visualizar en las tablas 3.2 y 3.3. En la tabla 3.11 se muestran los valores de las curvas de composición correspondientes al:

- HC.
- Fuller para D=16 y D=12.
- Propuesta de combinación para HCE.

Esta propuesta de combinación HCE responde a la siguiente dosificación:

| Material | HCE |
|-----------------------|------|
| Cemento | 325 |
| a/c | 0,50 |
| Aditivo (% s.p.c) | 3,4 |
| EAFSS lodo (%) | 10 |
| EAFSS arena (%) | 25 |
| Árido grueso 4/16 (%) | 65 |

Tabla 3.10. Dosificación HCE

| TAMICES UNE EN 933-2 (mm) | COMPOSICION. | | | |
|-----------------------------------|--------------|-------|-----------|-----------|
| | HC | HCE | Fuller-12 | Fuller-16 |
| | % PASA | | | |
| 25 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 20 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 16 | 99,3 | 99,3 | 100,0 | 100,0 |
| 10 | 69,6 | 69,6 | 91,3 | 79,1 |
| 8 | 62,5 | 62,5 | 81,6 | 70,7 |
| 4 | 48,1 | 48,1 | 57,7 | 50,0 |
| 2 | 39,5 | 39,5 | 40,8 | 35,4 |
| 1 | 29,1 | 29,1 | 28,9 | 25,0 |
| 0,500 | 20,2 | 20,2 | 20,4 | 17,7 |
| 0,250 | 12,0 | 12,0 | 14,4 | 12,5 |
| 0,125 | 7,1 | 7,1 | 10,2 | 8,8 |
| 0,063 | 4,4 | 4,4 | 7,2 | 6,3 |

Tabla 3.11. Composición HCE y relación con las otras composiciones de referencia

La figura 3-7 representa los valores expuestos en la tabla 3.11.

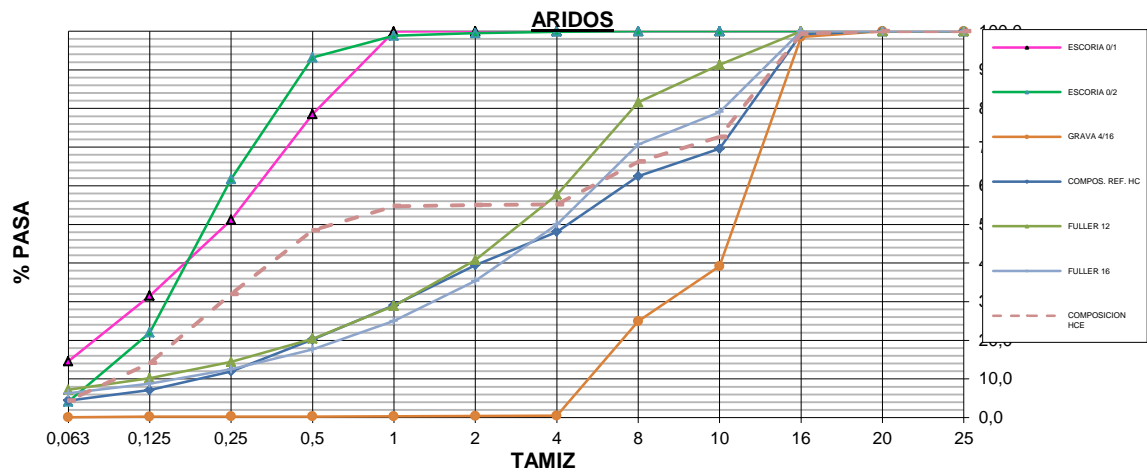


Figura 3.7. Composición granulométrica del hormigón HCE.

Presentamos en segundo lugar la obtención de la dosificación HACE (tabla 3.12). Las granulometrías de los materiales se pueden visualizar en las tablas 3.2 y 3.3. En la tabla 3.13 se muestran los valores de las curvas de composición correspondientes al:

- HAC.
- Fuller para D=16 y D=12.
- Propuesta de combinación para HACE.

Esta propuesta de combinación HCE responde a la siguiente dosificación:

| Material | HACE |
|-----------------------|------|
| Cemento | 350 |
| a/c | 0,55 |
| Aditivo (% s.p.c) | 4,5 |
| EAFSS lodo (%) | 20 |
| EAFSS arena (%) | 35 |
| Árido grueso 4/16 (%) | 45 |

Tabla 3.12. Dosificación HACE



| TAMICES UNE EN 933-2 (mm) | COMPOSICION. | | | |
|-----------------------------------|--------------|-------|-----------|-----------|
| | HAC | HACE | Fuller-12 | Fuller-16 |
| | % PASA | | | |
| 25 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 20 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 16 | 99,5 | 99,3 | 100,0 | 100,0 |
| 10 | 78,1 | 72,6 | 91,3 | 79,1 |
| 8 | 73,0 | 66,2 | 81,6 | 70,7 |
| 4 | 62,3 | 55,2 | 57,7 | 50,0 |
| 2 | 54,2 | 55,0 | 40,8 | 35,4 |
| 1 | 42,5 | 54,7 | 28,9 | 25,0 |
| 0,500 | 31,3 | 48,5 | 20,4 | 17,7 |
| 0,250 | 19,1 | 32,0 | 14,4 | 12,5 |
| 0,125 | 11,2 | 14,1 | 10,2 | 8,8 |
| 0,063 | 6,6 | 4,4 | 7,2 | 6,3 |

Tabla 3.13. Composición HACE y relación con las otras composiciones de referencia

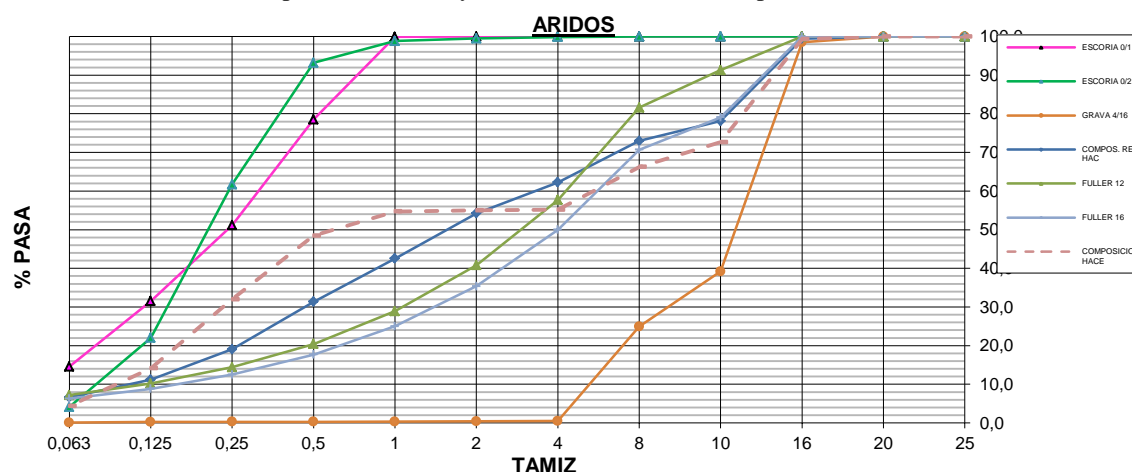


Figura 3-8. Composición granulométrica del hormigón HACE.

La figura 3-8 representa los valores expuestos en la tabla 3-13.

Adicionalmente para el ajuste de la dosificación del hormigón HACE se han variado los porcentajes de áridos para intentar aproximarnos en la medida de lo posible a las curvas de referencia y también siguiendo las especificaciones marcadas tanto por el anejo 17 de la EHE y la guía (EFNARC, 2002), donde se indican las siguientes recomendaciones (tabla 3.14):

| Especificaciones | Mín | Máx. |
|----------------------------------|------|------|
| Relación volumétrica agua/finos | 0,8 | 1,1 |
| Contenido mástico total en finos | 400 | 600 |
| Contenido vol. en grava | 0,28 | 0,35 |
| Contenido en agua | | 200 |
| Volumen grava sobre áridos | 0,5 | 0,6 |
| Volumen arena sobre mortero | 0,4 | 0,5 |

Tabla 3.14. Recomendaciones aplicables a hormigones autocompactantes (EFNARC, 2002)

3.6 Fabricación del hormigón

La fabricación del hormigón es una etapa determinante del trabajo, debido a su influencia en el comportamiento del material tanto en estado fresco como en el estado endurecido. De hecho la calidad final de un hormigón se ve mermada si el amasado no se realiza de la forma que la mezcla obtenida sea homogénea y se logre en ella la adecuada dispersión de las partículas de cemento y de todos los componentes participantes de la mezcla.

Para la fabricación se utilizó una mezcladora de eje vertical. Con el fin de minimizar los errores en el proceso de fabricación y para conseguir una mezcla lo más homogénea posible, siguiendo un estricto protocolo de elaboración en todas las amasadas efectuadas. Este proceso es el siguiente:

1. Se humedece ligeramente el interior de la hormigonera procurando que no queden acumulaciones que puedan alterar la relación agua/cemento de la dosificación.
2. En la fase de toma de muestras de áridos en el acopio cobra especial importancia que las muestras a extraer sean representativas del conjunto. Se evitará tomar material tanto de la parte superior como de la inferior y de esta forma se conseguirá que las muestras estén lo menos alterada posible.
3. Se preparan las cantidades conforme a las dosificaciones teóricas. Es recomendable que los áridos se encuentren secos y evitar de esta forma las tediosas correcciones de humedad. En el caso que los áridos tuvieran humedad, se calculará su contenido y se corregirán las pesadas conforme

a las mismas. Se posicionan cerca de la amasadora sin perjudicar la seguridad de los trabajos.

4. Para el caso del agua y del aditivo se procede como sigue:
 - Se divide en 2 la cantidad de agua a amasar.
 - El primer 50 % está compuesto solo por agua.
 - El segundo 50% se le adiciona el peso dosificado de aditivo.
5. Se introducen las fracciones de árido más gruesas. Para el caso de los HC y HAC las fracciones 4/16 y 0/4. En el caso de los HCE y HACE el 4/16. Se amasa durante 1 minuto para homogeneizar la muestra, posteriormente se para la amasadora.
6. Se vierten las fracciones finas de áridos y escorias tanto en todos los casos y se vuelve a amasar durante 1 minuto.
7. Con la hormigonera en marcha se añade el 50% del agua de amasado. Tiempo de mezcla 1 minuto. Se para la amasadora.
8. Se adiciona el cemento y se amasa nuevamente 1 minuto. Se para la amasadora.
9. Se vuelve a accionar la amasadora y se comienza a distribuir uniformemente y a baja velocidad el 50% restante de agua junto con el aditivo. Se amasa durante 3 minutos.

Finalizada cada amasada se observa si se producen fenómenos de segregación de la mezcla, así como la valoración visual de la amasada. Si no se observan anomalías visuales se procederá a llenado de las probetas.

3.7 Moldes y probetas

A lo largo del desarrollo de este trabajo se fabricaron tres tipos de probetas. La forma, medidas y otras características de las probetas se ajustan a lo indicado en la norma UNE-EN 12390-1:2013. Los distintos tipos de moldes para la confección de las probetas son los siguientes:

- Molde cilíndrico de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. (metálicos)
- Cúbicos de 10 cm de arista. (polipropileno)
- Prismáticos de 160 x 40 x 40 mm. (metálicos)

La ventaja de las probetas cúbicas de polipropileno frente a las cilíndricas son las siguientes:

- No requieren de refrentado de la cara que se ha fratasado para realizar el ensayo de compresión.
- Se requiere de menor material para realizar los ensayos.
- Se elimina la emisión de gases tóxicos a la atmósfera.
- Mejora de la ergonomía del trabajador que precisa de manipular menor carga.
- Aumento de las productividades en el capítulo de ensayos.
- Reducción del material de desecho resultante de la rotura de probetas.

Los inconvenientes que presentan estos moldes son:

- Deben de manipularse por personal cualificado ya que los moldes son menos resistentes y sin el cuidado de los mismos es fácil su deterioro.
- Se precisa de instalación adecuada para su conservación y de una instalación de aire comprimido que garantice las tareas de desencofrado.

A pesar de los inconvenientes destacados el laboratorio de control de la Factoría de Prefabricados cuenta con los medios necesarios, tanto humanos como instalaciones, para la correcta ejecución y desarrollo de los ensayos.

3.8 Fabricación de las probetas.

Para la fabricación y curado de las probetas se ha seguido el proceso establecido en la norma UNE-EN 12390-2:2009.

Previamente al llenado de los moldes se impregna el interior de estos con una película de desencofrante no reactivo para evitar que el hormigón se adhiera al molde y se facilite el desencofrado posterior. El llenado de los moldes se realizó en tres capas de forma que se garantice la correcta compactación.

Para la compactación del hormigón HC y HCE se utilizó una mesa vibrante.

Una vez vertido la primera capa de material se acciona la mesa vibrante hasta comprobar que se ha compactado la capa, es cuando se vierte la segunda capa verificando también la compactación. Finalmente procedemos de la misma forma con la tercera capa. En todos los casos se observará que se han distribuido los áridos uniformemente y no que no hay un ascenso de la lechada significativo.

Una vez llenado los moldes se retira el exceso de hormigón, ayudados de una llana y nivelando cuidadosamente el exceso de hormigón.

3.9 Desmoldado y curado de las probetas.

Las probetas se mantienen en el molde durante 24 horas en las mismas condiciones de humedad y temperatura hasta el momento del proceso de desmoldado. En todo momento estarán protegidas de impactos, vibraciones y deshidratación.

Cuando se desmolden se identificarán las probetas atendiendo a la siguiente codificación:

- E-nn + XX/MM.
- Letra E (En el momento de las pruebas no había ninguna obra con esa referencia).
- XX, día de fabricación de la probeta.
- MM, mes de fabricación de la probeta.

Se realizará un control documental de las dosificaciones empleadas garantizando de esta forma la trazabilidad de las amasadas realizadas. El control documental de las amasadas realizadas debe contener:

- Código de la probeta.
- Referencia al tipo de dosificación empleada (HC, HAC, HCE, HACE).
- Fecha de fabricación.

Una vez identificadas las probetas se llevan hasta la cámara de curado donde se quedarán hasta inmediatamente antes del ensayo. La cámara de curado garantiza una humedad superior al 95 % y una temperatura de $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

3.10 Conclusiones.

El objeto principal de la tesis es estudiar la posibilidad de sustituir EAFSS por áridos finos en la fabricación del hormigón. Es por ello que se han realizado los ensayos y prescripciones aplicables a los áridos naturales conforme a la vigente normativa de hormigón estructural (EHE-08). Se han encontrado las siguientes discrepancias respecto a la normativa.

Tenemos que distinguir dos EAFSS:

- Arena
- Lodo

Analizando la granulometría del material nos encontramos que el lodo registra un 14,5% de finos, incumpliendo de esta forma la restricción para el ambiente definido (10 % para ambiente IIIa). Destacamos que la curva granulométrica de las dos EAFSS aportan tamaños comprendidos entre 1 y 0,063 mm, circunstancia requerida para el diseño de hormigón autocompactante. La EHE-08, en su anejo 17 artículo 28, contempla la utilización de árido (denominado Filler) cuya mayor parte pasa por el tamiz 0,063 y que se obtienen por tratamiento de los materiales de los que provienen. En base a ello validamos las características granulométricas de las EAFSS como sustitutivo de árido conforme a lo especificado para los Fillers.

La composición de la curva granulométrica definida para el hormigón HC y HACE evidencia una falta de tamaños comprendida entre 1 y 4 mm.

La densidad obtenida para la arena y el lodo son respectivamente 3,02 y 3,01 t/m³. La absorción de la arena es de 0,58% y de un 3,97 % del lodo valores admitidos por la norma (EHE-08) pero destacables por el valor analizado para el lodo. Este resultado se contrasta con otros estudios (Monosi y col., 2016; San-José y col., 2014).

El contenido de sulfatos solubles para la arena EAFSS es de 0,19 %, admitido por la EHE-08. El resultado aportado para el lodo es de 6,05%, incumpliendo el valor de 0,8% limitado para los áridos. El artículo 28.7.2 de la EHE aumenta esta limitación para escorias de alto horno hasta el 1%.

3.11 Normativa del capítulo

UNE-EN 933-1:2012: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2012.

UNE-EN 932-2:1999: Ensayos para la determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de las muestras de laboratorio. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1999.

UNE-EN 933-2: 1996: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1996.

ISO 3310-1:2000: Test sieves. Technical requirements and testing. Par 1: Test sieves of metal wire cloth. ISO, 2000

ISO 3310-2:2013: Test sieves. Technical requirements and testing. Par 2: Test sieves of perforated metal plate. ISO, 2013.

EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, febrero 2009.

UNE-EN 1097-6:2001: Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2001.

UNE-EN 932-1:1997: Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1997

UNE-EN 12350-2:2006: Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2006.

UNE 83361, Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo de escurrimiento. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2007.

UNE-EN 12350-9:2011. Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.

UNE-EN 12350-10:2011. Ensayos de hormigón fresco. Parte 10: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.

UNE EN 934-2. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, ISBN 0 9539733 4 4, 2002

UNE-EN 12390-1:2013. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.

3.12 Índice de tablas

| | |
|--|------|
| Tabla 3-1 Nomenclatura y tamaños de áridos empleados | 3.6 |
| Tabla 3-2 Granulometría áridos naturales..... | 3.8 |
| Tabla 3-3 Granulometría EAFSS..... | 3.10 |
| Tabla 3-4 Densidad y absorción de los áridos y las EAFSS..... | 3.15 |
| Tabla 3-5 Ensayos químicos realizados en SERGEYCO..... | 3.16 |
| Tabla 3-6. Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento..... | 3.19 |
| Tabla 3-7. Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad..... | 3.20 |
| Tabla 3-8. Valores correspondientes a la composición de los áridos en los hormigones HC y HAC..... | 3.23 |
| Tabla 3-9. Parámetros de dosificación de los HC y HAC..... | 3.24 |
| Tabla 3-10. Dosificación HCE..... | 3.25 |
| Tabla 3-11. Composición HCE y relación con las otras composiciones de referencia..... | 3.25 |
| Tabla 3-12. Dosificación HACE..... | 3.26 |
| Tabla 3-13. Composición HACE y relación con las otras composiciones de referencia..... | 3.27 |
| Tabla 3-14. Recomendaciones aplicables a hormigones autocompactantes..... | 3.28 |

3.13 Índice de figuras

| | |
|---|------|
| Figura 3-1 Áridos procedentes de la factoría de prefabricados de DRACE..... | 3.6 |
| Figura 3-2. Curva granulométrica de los áridos naturales..... | 3.9 |
| Figura 3-3 Equipo de tamizado utilizado..... | 3.9 |
| Figura 3-4. Curva granulométrica de las EAFSS..... | 3.10 |
| Figura 3-5. Curva compuesta de los áridos de un hormigón HC..... | 3.23 |
| Figura 3-6. Curva compuesta de los áridos de un hormigón HAC..... | 3.24 |
| Figura 3-7. Composición granulométrica del hormigón HCE..... | 3.26 |
| Figura 3-8. Composición granulométrica del hormigón HACE..... | 3.27 |



3.14 Bibliografía del capítulo

Fernández-Cánovas, M. (2007). *Hormigón*. (C. de I. de C. C. y Puertos, Ed.) (10^a).

Monosi, S., Ruello, M. L., & Sani, D. (2016). Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 66, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.004>

San-José, J. T., Vegas, I., Arribas, I., & Marcos, I. (2014). The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. *Materials and Design*, 60, 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.030>

CAPÍTULO 4

Estudio reológico del hormigón fresco

INDICE

| | | |
|------|---|------|
| 4.1 | INTRODUCCIÓN | 4.5 |
| 4.2 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 4.6 |
| | 4.2.1 <i>Reología</i> | 4.6 |
| | 4.2.2 <i>Reometría</i> | 4.12 |
| 4.3 | MODELOS REOLÓGICOS | 4.14 |
| | 4.3.1 <i>Modelo de Bingham</i> | 4.14 |
| | 4.3.2 <i>Modelo de Bingham modificado</i> | 4.15 |
| | 4.3.3 <i>Modelo de Herschel-Bulkley</i> | 4.16 |
| 4.4 | CONDICIONES DE CONTORNO Y FUENTES DE INCERTIDUMBRE | 4.17 |
| 4.5 | INSTRUMENTOS Y MÉTODOS DE MEDIDA | 4.20 |
| | 4.5.1 <i>Reómetro rotacional</i> | 4.20 |
| | 4.5.1.1 Geometría de vanos | 4.23 |
| | 4.5.1.2 Rango de velocidad de cizalla | 4.27 |
| | 4.5.2 <i>Medidas Reológicas</i> | 4.29 |
| | 4.5.3 <i>Medida escurrimiento</i> | 4.29 |
| 4.6 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 4.30 |
| | 4.6.1 <i>Diseño del mortero equivalente</i> | 4.30 |
| | 4.6.1.1 Fundamentos | 4.30 |
| | 4.6.1.2 Diseño de los morteros equivalentes | 4.31 |
| | 4.6.1.3 Protocolo experimental y descripción del sistema | 4.32 |
| | 4.6.2 <i>Ensayos de docilidad</i> | 4.34 |
| | 4.6.2.1 Control de la docilidad del hormigón convencional | 4.35 |
| | 4.6.2.2 Control de la docilidad del hormigón autocompactante | 4.35 |
| | 4.6.3 <i>Curvas de flujo</i> | 4.36 |
| | 4.6.4 <i>Ensayo de mini-cono aplicado a morteros equivalentes</i> | 4.39 |
| | 4.6.5 <i>Ensayos de docilidad</i> | 4.40 |
| 4.7 | CONCLUSIONES | 4.44 |
| 4.8 | ÍNDICE DE TABLAS | 4.47 |
| 4.9 | ÍNDICE DE FIGURAS | 4.48 |
| 4.10 | BIBLIOGRAFÍA | 4.49 |

4.1 Introducción

La Reología, término empleado por primera vez por Eugene Cook Bingham en 1929, es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia (Barnes y col., 1989)

Dicho vocablo “Reología” procede del griego “rheos”, que significa fluir. En los escritos de Heráclito podemos encontrar la expresión “panta rei” (todo fluye), que ilustra la idea central que subyace en todo estudio reológico. Dicho de otro modo, la Reología es la ciencia que estudia cómo responden los cuerpos cuando se les somete a un cierto esfuerzo o una cierta deformación. Todos los materiales tienen comportamientos reológicos, que van desde, en un extremo, el sólido elástico de Hooke, hasta el otro extremo, que sería el comportamiento del fluido ideal de Pascal (Barnes y col. 1989). Esto hace que los principios fundamentales de esta ciencia sean aplicables al estudio de todo tipo de materiales: alimentos, polímeros, composites, etc. Hoy en día la Reología se ha convertido en una herramienta imprescindible en la industria a la hora de optimizar la formulación de nuevos materiales, mejorar los procesos de manufactura de los mismos y calidad final de los productos (Chhabra y Richardson 1999; Newman 2002).

Específicamente, desde hace tiempo se sabe que la Reología aplicada a los materiales cementosos es una herramienta fundamental para comprender su comportamiento en estado fresco (Tattersall y Banfill 1983). El estudio reológico de los materiales cementosos conlleva una serie de dificultades inherentes a la propia naturaleza del material. Este hecho es debido a que se trata de suspensiones muy concentradas y consistentes, que pueden contener áridos y que, además, se están hidratando de forma permanente, por lo que la estructura química del sistema experimenta cambios mientras perdura su estado fresco. En nuestro caso es importante determinar el periodo de tiempo durante el cual los cambios resultantes de la hidratación del cemento no dominan sobre las interacciones de origen coloidal, brownianas e hidrodinámicas, que determinarán la respuesta reológica del sistema.

En este capítulo estudiamos el comportamiento de flujo en estado fresco de los morteros equivalentes de cada uno de los hormigones objeto del estudio. La metodología ya ha sido contrastada por estudios previos realizados en la Universidad de Málaga (Velázquez Navarro 2009; Rubio-Hernandez y col. 2013)

4.2 Fundamentos teóricos

4.2.1 Reología

La Reología tiene como objetivo el estudio del comportamiento mecánico de la materia cuando fluye y/o se deforma. Debe destacarse que los materiales que son tratados por esta disciplina científica muestran comportamientos no-Newtonianos y no-Hookeanos, siendo los materiales viscoelásticos, es decir, los que son capaces de responder como sólidos y/o como líquidos, dependiendo de la intensidad o duración del esfuerzo que se les aplica, los que manifiestan los fenómenos físicos más sorprendentes que, de hecho, provocaron un vertiginoso desarrollo de la Reología en la década de 1940. En su faceta teórica, la Reología plantea encontrar relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones para cada tipo de materiales, es decir, obtener ecuaciones constitutivas con la validez más general posible.

Para entender el origen de esta nueva ciencia, debemos remontarnos a 1678, cuando Robert Hooke desarrolló su “Teoría de la Elasticidad. Puede resumirse con la sentencia *“ut tensio, sic vis”*, es decir, “como es la extensión, así es la fuerza”,

$$\tau = E \cdot \gamma \quad [4.1]$$

Es decir, al duplicar el esfuerzo (τ) se duplica la deformación (γ) o para mantener el doble de deformación se precisa el doble de esfuerzo, estando ambas magnitudes relacionadas mediante una constante de proporcionalidad denominada módulo de elasticidad (E) que depende del material. Debe añadirse que el sólido recupera su forma original, de forma reversible, cuando cesa el esfuerzo aplicado sobre él.

En 1687, Newton definiría el líquido viscoso (que más tarde denominaríamos Newtoniano). Este fluido se caracteriza porque al fluir la resistencia que se produce como consecuencia de la falta de deslizamiento entre las partes del líquido, es proporcional a la velocidad con la cual dichas partes se separan las unas de las otras. La energía suministrada al material se disipa en forma de calor, no recuperando, ni siquiera parcialmente, su forma original. En este caso, cuando cesa el esfuerzo aplicado, al duplicar el esfuerzo se duplica el gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$), estando ambas magnitudes relacionadas por una constante (para una temperatura y presión dada) denominada

viscosidad (η) que está relacionada con la fricción interna del material. La expresión matemática de este comportamiento de flujo es,

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [4.2]$$

Posteriormente, en 1835, Weber observó un comportamiento intermedio entre los descritos cuando sometió a esfuerzos fibras de seda. La respuesta de las fibras de seda no podía ser descrita ni por la ley de Hooke [Ecuación 4.1] ni por la de Newton [Ecuación 4.2]. El material parecía almacenar solo parte de la energía mecánica que se le suministraba y, al mismo tiempo, mostraba cierto retraso al adoptar la deformación final cuando se le aplicaba un esfuerzo y, también, al tender a recuperar su forma primitiva cuando éste cesaba. En 1867, Maxwell propuso un modelo matemático capaz de describir el comportamiento de fluidos con propiedades elásticas. Se empezó a utilizar el término “viscoelasticidad” para describir los comportamientos observados en materiales que como la seda, podríamos encajar entre los extremos ideales del sólido de Hooke y el líquido de Newton.

En este estudio nos vamos a limitar a considerar la respuesta viscosa de los materiales cementosos. Por lo tanto, es la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación o gradiente de velocidad la que se verá únicamente analizada en nuestro caso. La representación gráfica del esfuerzo frente a la velocidad de deformación recibe el nombre de curva de flujo. Los fluidos que no cumplen la anteriormente descrita Ley de Newton, y por tanto, presentan una curva de flujo que, o bien, es no lineal, o bien no pasa por el origen de coordenadas, dicho de otra forma, el cociente entre el esfuerzo y la velocidad de deformación, no es constante para una temperatura y presión dadas, se dice que tienen un comportamiento viscoso No Newtoniano. Los comportamientos viscosos No Newtonianos conocidos son:

- Fluidificación por cizalla (shear-thinning): Materiales puramente viscosos que fluyen de acuerdo con una ley no lineal. Su viscosidad aparente decrece al aumentar la velocidad de cizalla. ($\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$)
- Espesamiento por cizalla (shear-thickening): Materiales puramente viscosos que fluyen de acuerdo con una ley no lineal. Su viscosidad aparente aumenta al aumentar la velocidad de cizalla.

- Comportamiento viscoplástico: Este es el comportamiento típico de los sistemas cementosos (Tattersall y Banfill 1983). En este caso se precisa alcanzar un cierto valor mínimo de esfuerzo para que el sistema empiece a fluir. A este valor de esfuerzo crítico se le denomina límite de fluencia. Por debajo de este valor, el material se comporta como un sólido elástico y, una vez superado, empieza a fluir, pudiéndolo hacer siguiendo una ley lineal, caso que se denomina plástico de Bingham, o no, por lo que habría que ajustar la curva a un modelo que tenga en cuenta la evolución no lineal del sistema, como por ejemplo el modelo de Bingham Modificado o el modelo de Herschel-Bulkey (Nehdi y Rahman 2004).

Los cuatro comportamientos descritos se muestran en la figura 4-1. Se ha incluido por comparación, la respuesta newtoniana, caracterizada por la proporcionalidad directa entre el esfuerzo y velocidad de deformación, y por el hecho de cortar el sistema de ejes por el origen, es decir, un material newtoniano fluirá por pequeño que sea el esfuerzo ejercido sobre él.

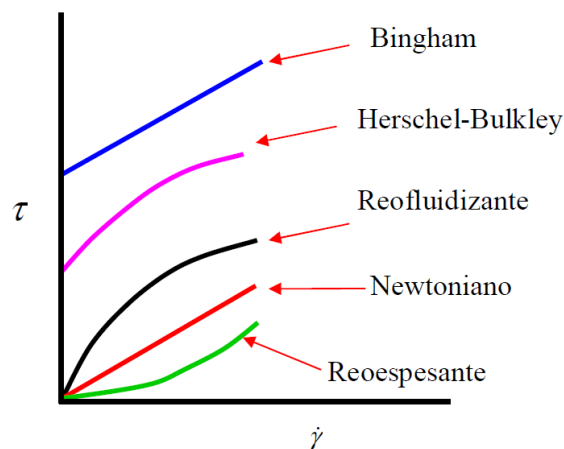


Figura 4-1. Flujos no newtonianos. Se incluye el comportamiento newtoniano por comparación

En la figura 4.2 se representa gráficamente la deformación experimentada por un elemento de un material sometido a la componente tangencial de una fuerza. En el caso de que dicho elemento fuera un sólido elástico ideal, la relación entre el esfuerzo de cizalla τ y la deformación de cizalla γ viene dada, como se ha indicado anteriormente, por la expresión:

$$\frac{F}{A} = \tau = E \frac{dy}{dx} = E\gamma \quad [4.3]$$

Por otro lado, si se trata de un fluido viscoso ideal la expresión sería:

$$\frac{F}{A} = \tau = \eta \left(\frac{dv_x}{dy} \right) = \eta \dot{\gamma} = \eta \left(\frac{dx}{dy dt} \right) = \eta \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \eta \dot{\gamma} \quad [4.4]$$

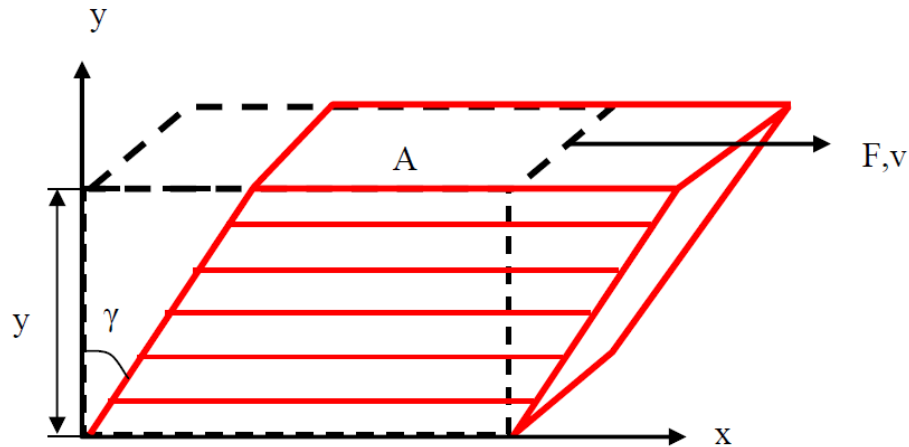


Figura 4-2. Deformación experimental por un elemento de un material sometido a la componente tangencial de una fuerza.

Previo al análisis reológico de los morteros equivalentes, se describirán las magnitudes que intervienen cuando sometemos a los materiales a un flujo de cizalla. En este tipo de flujos únicamente una componente extra-diagonal de las magnitudes tensoriales (esfuerzo, velocidad de deformación) es no nula, por lo que las ecuaciones constitutivas tensoriales se convierten en expresiones escalares. Para la definición de las magnitudes se sigue el esquema representado en la figura 4-2:

- El esfuerzo de cizalla, τ_{xy} :

Es la componente tangencial del tensor de esfuerzos que se aplica al material o con el que este se opone a ser deformado, coincide con la fuerza aplicada (F_x) por unidad de área (A_y), en dirección tangencial a la superficie sobre la que actúa,

$$\tau_{xy} = \frac{F_x}{A_y} \quad [4.5]$$

Se mide en Pa (N/m^2). En los ensayos, en modo de velocidad controlada, realizados con un reómetro de esfuerzo controlado, representa la fuerza que la muestra ejerce sobre la geometría utilizada dividida por la superficie lateral de dicha geometría, oponiéndose a la velocidad de deformación a la que es sometida.

- Límite de fluencia, τ_0 :

Es el valor del esfuerzo que delimita el comportamiento elástico y el comportamiento viscoso de la pasta de cemento. Es el esfuerzo tangencial mínimo que hay que aplicar a un material para que comience a fluir. También se mide, evidentemente, en Pa.

- Velocidad de cizalla, $\dot{\gamma}$:

Es la velocidad con la que el material se deforma cuando fluye,

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad [4.6]$$

Se mide en s^{-1} . El hormigón, durante su transporte y vertido, se ve sometido a velocidades de cizalla comprendidas entre 10 y 50 s^{-1} que, convertidas a la velocidad de cizalla equivalente sobre las pastas de cemento, supone un valor entre 20 y 100 s^{-1} .

- Viscosidad aparente η : Es la magnitud física que representa la propiedad que tienen los fluidos para oponerse a la deformación tangencial,

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\dot{\gamma}} \quad [4.7]$$

Se mide en $\text{Pa} \cdot \text{s}$. En nuestro trabajo la velocidad de cizalla y la temperatura han sido controladas. La presión ha sido siempre la atmosférica y, por lo tanto, se ha considerado constante, siendo así su influencia despreciable. La influencia del tiempo sobre la respuesta reológica del material no ha sido considerada en este estudio. Para evitar la influencia del instante en el que se toma una medida de una magnitud, se han considerado únicamente resultados obtenidos cuando el sistema ha alcanzado el estado estacionario.

El límite de fluencia es uno de los parámetros reológicos (Barnes y col. 1989) que son utilizados para caracterizar el comportamiento en estado fresco de los materiales cementosos. El valor de esta magnitud está relacionado con la estructura en reposo de la suspensión de partículas de cemento. La interacción entre las partículas, gobernada fundamentalmente por el balance entre fuerzas repulsivas (potencial zeta e interacción estérica) y fuerzas atractivas tipo van der Waals, además de su forma, tamaño e interacción química con otros aditivos, influyen de forma decisiva en los valores del límite de fluencia al provocar la formación de diferentes tipos de estructuras. Para poder determinar fielmente el límite de fluencia (Yoshioka 1997), debemos contar con el concurso de un dispositivo experimental adecuado.

El funcionamiento del reómetro que se ha utilizado en este trabajo se basa en la acción de un motor eléctrico que transmite un movimiento rotacional a un eje, al cual se acoplan elementos con distinta geometría, tales como cilindros, platos o conos. El reómetro mide el par y la velocidad de giro del motor eléctrico. Posteriormente traduce estos datos de entrada en magnitudes de interés desde el punto de vista reológico, de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Nicolas Roussel 2006):

$$\tau = C_1 \cdot M_d \quad [4.8]$$

$$\dot{\gamma} = C_2 \cdot \Omega \quad [4.9]$$

Donde C1 y C2 son constantes que dependen de la geometría elegida.

De las curvas de flujo se puede obtener una gran variedad de información útil para comprender la respuesta de flujo de los materiales cementosos en estado fresco. Al variar la velocidad de cizalla, manteniéndola constante durante el tiempo suficiente, es posible determinar adecuadamente su relación con el esfuerzo de corte estacionario, obteniendo así curvas de flujo que caracterizan adecuadamente el comportamiento de flujo en estado

estacionario de las pastas de cemento, morteros y hormigones, como fluidos no newtonianos.

Cuando el hormigón fresco se pone en obra experimenta un comportamiento de flujo, dos granos de arena que estén cercanos entre si al principio de la operación, probablemente seguirán estando próximos al final del proceso. La pasta de cemento que está entre los granos de arena estará sujeta, a su vez, a velocidades de corte muy pequeñas durante la puesta en obra del hormigón. Por lo tanto, para simular las condiciones de cizalla de la pasta de cemento durante la puesta en obra del hormigón, las medidas reológicas de viscosidad deben ser realizadas a velocidades muy bajas.

Estamos interesados en determinar la influencia de la adición de EAFS en el comportamiento de flujo de la pasta de cemento y del mortero para optimizar así la composición del material en cuanto a su respuesta en la puesta en obra.

4.2.2 Reometría

La Reometría es el conjunto de todas las técnicas y tecnologías empleadas por la Reología para obtener datos reológicos de un sistema material. Por lo tanto, la Reometría se centra en los tipos de dispositivos existentes así como en los distintos tipos de ensayos que se pueden utilizar para obtener las funciones del material (Mezguer 2002).

En este estudio, para determinar el comportamiento reológico de las pastas de cemento y de los morteros, se hace uso de curvas de flujo, que consisten, como ya se ha indicado anteriormente, en la representación de la respuesta en esfuerzo (τ) de la muestra frente a la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) que se le aplica. Las funciones del material que se obtienen a partir de este ensayo reológico son la viscosidad y el límite de fluencia. Con la primera podremos cuantificar la capacidad de flujo del material cementoso, con la segunda determinamos el esfuerzo mínimo que es necesario aplicar a dicho material para que empiece a fluir.

Considerando que los materiales cementosos, en general, muestran respuesta dependiente del tiempo (viscoelasticidad y tixotropía) como consecuencia del desarrollo de cierto nivel estructural (Rubio Hernández, Velazquez Navarro, and Galindo-Rosales 2009), resulta necesario aplicarles una precizalla antes de comenzar con la obtención de la curva de flujo propiamente dicha. De esta forma podremos eliminar los efectos

aleatorios que resultan del vertido de la muestra en el sensor de medida. Adicionalmente, la aplicación de la fase de precizalla nos permite unificar el estado inicial de las diferentes muestras de una misma formulación, lo que nos permitirá asegurar que estamos trabajando siempre con el mismo sistema físico. Posteriormente, se procede a realizar la medida de la respuesta del material en un intervalo de velocidades de cizalla suficientemente amplio. Para evitar efectos transitorios que falseen la medida, el reómetro está programado para que cuando alcance una determinada velocidad, espere el tiempo necesario para que la respuesta del material sea estacionaria (Malvern 2005). Una vez alcanzado este valor estacionario, salta a la siguiente velocidad y así sucesivamente. La Figura 4-3 muestra el diseño de la curva de flujo que se ha seguido en este estudio.

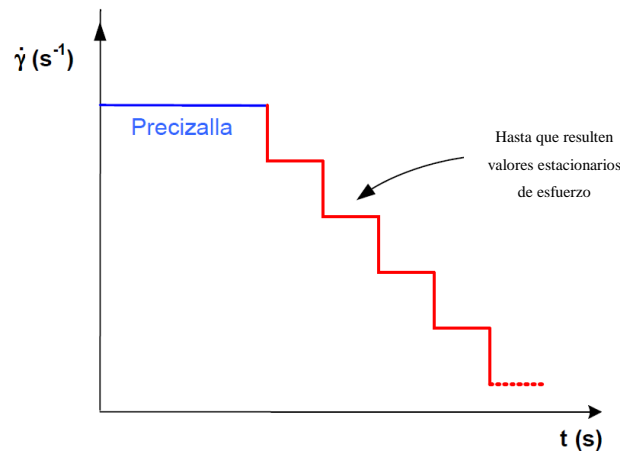


Figura 4-3 Protocolo de ensayo empleado para obtener la curva de flujo.

4.3 Modelos reológicos

Considerando que hemos limitado nuestro estudio a la respuesta puramente viscosa de los morteros equivalentes, la ecuación constitutiva que resulta apropiada es la del Fluido Newtoniano Generalizado:

$$\tilde{\tau} = \eta(\dot{\gamma}) \tilde{\gamma} \quad [4.10]$$

En dicha expresión se relaciona el tensor de esfuerzos ($\tilde{\tau}$) con el tensor de velocidad de deformación ($\tilde{\gamma}$) mediante la función viscosidad, que lo es de la velocidad de cizalla (segundo invariante del tensor $\tilde{\gamma}$). Existen muchas propuestas en la literatura reológica para la función $\eta(\dot{\gamma})$. En nuestro caso, dado el comportamiento observado en los materiales cementosos, la elección adecuada debe asumir comportamiento viscoplástico.

Una vez obtenida la curva de flujo, se deben ajustar los resultados experimentales al modelo reológico que proporcione el mejor ajuste y que permita una interpretación física de los parámetros del modelo. Si la respuesta es lineal el modelo de Bingham es adecuado. Sin embargo, cuando la respuesta es no lineal, una vez superado el límite de fluencia, este modelo no tiene la capacidad de caracterizar al fluido y, en consecuencia, debe extenderse el análisis a otros modelos reológicos. Para el desarrollo de esta tesis doctoral se ha considerado los modelos de Bingham modificado y de Herschel-Bulkley.

4.3.1 Modelo de Bingham

El modelo de Bingham, viene definido por la siguiente expresión (Barnes y col,1989; Barnes 2000):

$$\tau = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_B \\ \tau_B + \eta_p \dot{\gamma}, & \tau \geq \tau_B \end{cases} \quad [4.11]$$

De donde se obtiene que, cuando el sistema fluye, la viscosidad aparente del sistema será:

$$\eta = \eta_p + \frac{\tau_B}{\dot{\gamma}} \quad [4.12]$$

En estas expresiones:

τ_B límite de fluencia, en Pa

η_p viscosidad plástica, en Pa·s

Como se deduce de la ecuación anterior, un fluido Bingham no comienza a fluir hasta que el esfuerzo de corte aplicado exceda del valor mínimo τ_B . A partir de este punto el cambio en el esfuerzo de corte es proporcional a la velocidad de cizalla y la constante de proporcionalidad es la viscosidad plástica η_p .

4.3.2 Modelo de Bingham modificado

En la actualidad, debido a que muchas formulaciones de hormigones de última generación presentan un comportamiento viscoplástico no lineal (Feys y col. 2008), el modelo de Bingham resulta inapropiado para describirlas. El problema se resuelve introduciendo un término de segundo orden. Obtenemos así un modelo de Bingham Modificado,

$$\tau = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_{BM} \\ \tau_{BM} + \eta_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2, & \tau \geq \tau_{BM} \end{cases} \quad [4.13]$$

ó:

$$\eta = c \dot{\gamma} + \eta_p + \frac{\tau_{BM}}{\dot{\gamma}} \quad [4.14]$$

Se observa que el límite a altas velocidades de cizalla es,

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta = c \dot{\gamma} \quad [4.15]$$

Luego $c > 0$ implica un comportamiento shear-thickening en dicha región, mientras que $c < 0$ representa un comportamiento shear-thinning.

En las expresiones anteriores:

τ_{BM} es el límite de fluencia, en Pa

4.3.3 Modelo de Herschel-Bulkley

Es uno de los más utilizados para fluidos no newtonianos. El modelo viene definido matemáticamente por la siguiente expresión (Barnes y col. 1989):

$$\tau = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_{HB} \\ \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n, & \tau \geq \tau_{HB} \end{cases} \quad [4.16]$$

ó:

$$\eta = \frac{\tau_{HB}}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} \quad [4.17]$$

En las expresiones anteriores:

K se denomina consistencia, τ_{BM} es el límite de fluencia, n es el índice de flujo. Según su valor:

- $n < 1$ implica que una vez superado el límite de fluencia el material fluirá con un comportamiento shear-thinning.
- $n = 1$ En este caso sería igual al modelo plástico de Bingham.
- $n > 1$ implica que el material fluirá con un comportamiento Shear-thickening.

El modelo de Herschel –Bulkley predice, en el caso $n < 1$, que la viscosidad aparente tiende a cero en el límite de altas velocidades de cizalla, lo cual es físicamente irreal,

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{si} \quad n \geq 1 \quad \begin{cases} \text{Bingham (n = 1)} \\ \text{Reo – espesante (n > 1)} \end{cases} \quad [4.18]$$

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta = 0 \quad \text{si} \quad n < 1 \quad \text{¡ Absurdo !} \quad [4.19]$$

Otro defecto del modelo de Herschel-Bulkley radica en las extrañas unidades del índice de consistencia ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$) que, por depender del valor del índice del flujo del material (n) imposibilita su comparación entre materiales diferentes.

Por lo tanto se hará uso del modelo de Bingham Modificado que cumple con los requisitos exigidos para ajustar el comportamiento viscoplástico de materiales cementosos, es decir, todos los parámetros tienen significado físico y, además, permite el ajuste del comportamiento viscoplástico lineal y no lineal.

4.4 Condiciones de contorno y fuentes de incertidumbre.

Las medidas de parámetros reológicos requieren el cumplimiento de las siguientes condiciones experimentales, con el objetivo final de obtener unos resultados precisos y reproducibles (Arnoud y Dierkens 2007; Schram 2000).

- Flujo Laminar:

La cizalla aplicada sobre la muestra solo debe de hacer fluir al material en este régimen de flujo. La imposición del régimen laminar previene el intercambio de elementos de volumen entre capas, por lo que las muestras deben de ser totalmente homogéneas al empezar el experimento. Por otro lado, este requisito impide usar agitadores y mezcladores como sensores de medida de viscosidad absoluta. Las mezcladoras y demás dispositivos de procesado con sus respectivos rotores y estatores, están diseñados para crear la máxima turbulencia posible, con el fin de entremezclar íntimamente todos los elementos fluidos componentes de la muestra. Se requiere mucha más energía para mantener el régimen turbulento que, simplemente, el laminar, por lo que el torque medido no es en absoluto proporcional a la viscosidad verdadera de la muestra. Permitiendo el flujo turbulento en las medidas de viscosidad se introducirían errores del 50 al 100% o, incluso, más (Tattersall y Banfill 1983). Esto explica por qué los primeros reómetros de hormigón, y la mayoría de los existentes, solo pueden obtener resultados relativos referidos al torque o velocidad de giro del sensor y no a valores absolutos de esfuerzo y viscosidad de la muestra, ya que muchos de ellos toman como base de diseño a mezcladoras industriales (Nehdi y Rahman 2004).

- No Deslizamiento:

El esfuerzo de cizalla aplicado debe de ser transmitido desde el elemento móvil de la geometría de medición, a través de la capa límite de líquido, a todo el volumen de la muestra. En el caso en el que esa adherencia sea insuficiente para transmitir dicho esfuerzo (la parte móvil de la geometría, normalmente el sensor, desliza o patina sobre la

parte no móvil de la muestra) los resultados obtenidos no serán significativos/representativos.

- Muestras Homogéneas:

Con este requisito se impone que toda la muestra deba reaccionar uniformemente a la cizalla aplicada. Si la muestra es una pasta de cemento o un mortero equivalente, todos los ingredientes, incluido el árido, deben de ser, relativamente hablando, mucho más pequeños que el espesor de material que es cizallado (gap) y deben de estar perfecta y homogéneamente distribuidos.

En reometría es extraño encontrarse con muestras que sean totalmente homogéneas. Aunque la dispersión, pasta o mortero, sea considerada homogénea porque en cada pequeño elemento de volumen de muestra todos sus ingredientes se encuentran sometidos a la misma velocidad de deformación, pueden surgir problemas cuando se incrementa la velocidad de cizalla y se induce algún fenómeno de separación de fases. En tales casos, la muestra se separa en una delgada capa de líquido en las inmediaciones del rotor y el resto de la muestra se convierte en un sólido estancado.

Bajo esas condiciones el flujo viscoso solo existe en esa pequeña capa de espesor desconocido y el resultado no estará abierto a ningún tipo de interpretación reológica cuando esta separación de fases haya ocurrido.

Simplemente, esperando a que el rotor alcance una velocidad nula, no se reconstruirá el estado inicial de la muestra. Se debe de programar pues un nuevo ensayo con una nueva muestra para parar justo antes de que la velocidad de cizalla alcance ese valor crítico para el que se produce esa separación de fases.

- Sin cambios Físicos y Químicos durante los Ensayos:

Los cambios debidos a procesos químicos tales como el endurecimiento, curado o degradación de la muestra deben de ser evitados en los ensayos reológicos, ya que estos fenómenos tienen una influencia directa sobre la viscosidad de la muestra, aparte de que supone una evolución temporal de la estructura de la misma, por lo que no tendría sentido el análisis posterior de los resultados. Esto debe de ser evitado en los ensayos reológicos, salvo en aquellos casos en los que justo esos cambios son el objetivo principal del estudio. Esto supone una de las grandes dificultades en el estudio reológico de materiales

cementosos, ya que el cemento, inmediatamente después de ponerse en contacto con el agua comienza a reaccionar, dando lugar a productos de hidratación que, con el paso del tiempo, le darán al material su aspecto y resistencia final característica.

Obviamente, cualquier circunstancia que aleje ligeramente las condiciones de experimentación de los requisitos anteriormente enumerados, supondrá una fuente de error o incertidumbre que habrá que trata de eliminar o minimizar lo máximo posible.

Otras fuentes de error que pueden aparecer durante la medida de las propiedades reológicas de materiales cementosos, aparte de las mencionadas anteriormente, son (Shaughnessy y Clark 1988):

- Errores en la preparación de la muestra, ya sea, o bien pesando mal los constituyentes de la mezcla, o bien no respetando los tiempos establecidos por el protocolo de amasado de cada formulación.
- Sedimentación de las muestras.

El primer factor que se comenta, no tiene nada de especial y entra dentro de los errores habituales cuando se manipula cualquier tipo de muestra en un laboratorio. Estableciendo un protocolo fijo para todas las muestras y siendo escrupulosos en su seguimiento, estos problemas pueden ser fácilmente minimizados.

La aparición de la sedimentación de partículas sólidas durante el ensayo reológico es función de la viscosidad del líquido, tamaño de partícula, así como de la densidad, forma y fracción en volumen de las mismas. Se constata experimentalmente que los problemas de sedimentación son mayores en geometrías de plato-plato que en las de cilindros concéntricos. La consecuencia de este efecto suele ser un torque menor del esperado, por lo que se obtienen resultados inferiores respecto a los reales. En el caso de la geometría de vanos que será utilizada en este estudio se recomienda que la relación agua/cemento no sea nunca superior a 0,4 para evitar un gradiente de partículas en sentido vertical (Tattersall y Banfill 1983).

Por último hemos de insistir en que, en el caso de materiales cementosos, una fuente de error importante y que hay que controlar muy bien es el cambio de estructura irreversible que experimentan las muestras debido a las reacciones de hidratación del cemento. Si se aplica una velocidad de cizalla constante a una muestra y se observa como

varía la respuesta en esfuerzo con el tiempo, se puede observar la influencia de cada etapa de la hidratación en la respuesta del material y cómo éste va aumentando progresivamente, tal y como se muestra en la figura 4-5 (Petit y col. 2007).

Se observa que durante la etapa inicial, donde las velocidades de las reacciones incipientes son muy altas haciendo que la muestra se endurezca hasta un cierto nivel en un intervalo muy pequeño de tiempo, el esfuerzo crece rápidamente con el paso del tiempo. Sin embargo, al alcanzar la etapa de latencia o inducción, las velocidades de reacción disminuyen drásticamente, aunque no se hacen nulas, por lo que la variación en la respuesta en esfuerzo del material es muy pequeña. Esto hace que esta etapa sea la ideal para medir propiedades reológicas de los materiales cementosos. Además se procura que la duración de los experimentos reológicos sea muy inferior a la duración total de esta etapa (típicamente de unas 4 horas)(Jarny y col. 2008; Rubio-Hernandez y col. 2013)

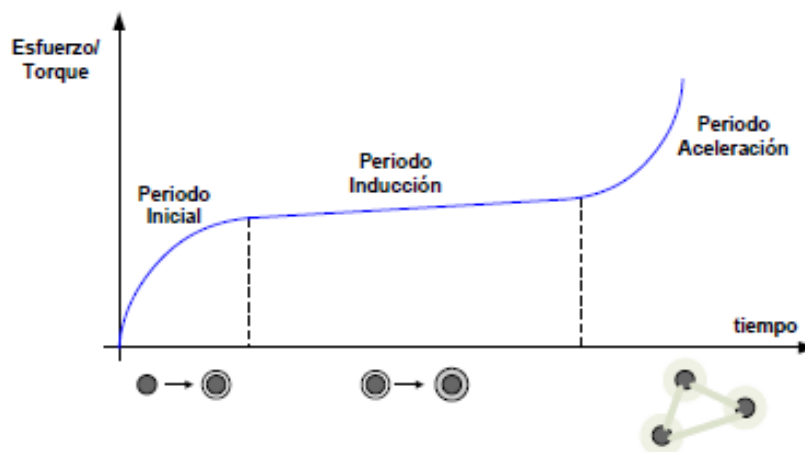


Figura 4-4. Evolución del torque y de la estructura de la muestra con el tiempo. Fuente: (Velázquez Navarro 2009).

4.5 Instrumentos y métodos de medida

4.5.1 Reómetro rotacional.

Las medidas reológicas sobre pastas de cemento y morteros equivalentes fueron realizadas en un reómetro rotacional Gemini 150 de Malvern Instruments. La ventaja principal de este reómetro, a diferencia de otros, es que el momento de inercia del motor es muy bajo, ya que su eje está suspendido sobre un cojinete de aire comprimido, por lo que la fricción por transmisión de momento a la muestra es prácticamente nula. Esto

permite que sea capaz de medir con precisión tanto a velocidades de deformación muy pequeñas como a velocidades muy altas. De hecho su rango efectivo de torque aplicado va desde los 0,05 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ hasta los 200 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$. (Malvern 2005). Sus especificaciones se resumen en la tabla 4-1:

| <i>Parámetros</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> |
|---|----------------------|---------------|
| <i>Resolución angular (μ rad)</i> | 0.05 | - |
| <i>Velocidad angular en modo CR (rpm)</i> | $9.55 \cdot 10^{-5}$ | 5729.58 |
| <i>Velocidad angular en modo CS (rpm)</i> | $9.55 \cdot 10^{-8}$ | 5729.58 |
| <i>Par en el eje ($\text{N}\cdot\text{m}$)</i> | $5 \cdot 10^{-8}$ | 0.15 |
| <i>Frecuencia de oscilación(Hz)</i> | 10^{-6} | 150 |

Tabla 4-1. Especificaciones del reómetro Malvern Gemini 150.

Este dispositivo dispone de tres modos de medida:

- CR: (control rate) que permite controlar la velocidad de giro, o lo que es lo mismo, la velocidad de cizalla aplicada a la muestra.
- CD: (control strain) que permite controlar el ángulo de rotación, es decir, la deformación aplicada.
- CS: (control stress) que controla el momento o torque, es decir el esfuerzo de cizalla aplicado.

Por consiguiente, los ensayos que se pueden realizar con el reómetro son múltiples, entre ellos: curvas de relajación, “creep”, rampas, lazos, curvas de flujo, saltos múltiples, ensayos oscilantes con barridos de frecuencia o amplitud, etc., proporcionando datos con una alta precisión. Además, permite controlar la temperatura con gran rapidez y exactitud gracias a un sistema Peltier, cuyo rango efectivo de trabajo es de -20°C a 180°C .

El reómetro posee, básicamente, tres elementos funcionales, como se puede observar en la Figura 4-5:

- Rotor ajustable en altura con eje de acople de rosca con presilla (1).
- Copa de medición, donde se deposita la muestra (2).
- Soporte de medición, que es donde se sitúa la unidad de control de la temperatura (3).



Figura 4-5. Reómetro Gemini 150

Los pasos a seguir para llevar a cabo el proceso de medición de una muestra en el reómetro son:

1. Hacer el cero. Una vez colocada la geometría elegida sobre los soportes correspondientes, el reómetro baja el rotor de vanos (que es el que actúa en nuestro caso como sensor de medida) hasta que toque el fondo de la copa de muestra (que sirve como soporte de la muestra) para determinar así el punto de distancia cero entre ambos elementos. Este punto le sirve de referencia al reómetro para controlar el “gap” en todo momento. Este paso debe de hacerse con la presilla de seguridad puesta.

2. Se separan ambos elementos hasta una distancia suficiente que permita colocar la muestra en la copa de medición con comodidad.

3. Una vez colocada la muestra, el aparato es llevado a la posición de medición, acercando el rotor a la copa. Al principio baja con una cierta velocidad, pero cuando llega a 8 mm de distancia respecto al fondo de la copa disminuye su velocidad hasta 0,1mm/s y continua hasta alcanzar el “gap” siempre y cuando el sistema de control de esfuerzo

normal, que mide las tensiones que se producen en dirección perpendicular al plano de medida, no alcance un valor demasiado alto. Entonces espera para medir hasta que dicho esfuerzo normal sea nulo. Esto evita que se destruya la estructura interna del material.

4. Una vez que ha terminado el paso anterior, el reómetro muestra una señal de OK mediante un “led” verde en la consola de mando. Entonces se debe retirar la presilla de seguridad para que el sensor pueda girar libremente.

5. Se procede entonces a ejecutar el protocolo de medida que se haya programado. El software que acompaña al reómetro permite el control del mismo desde un ordenador.

6. Finalmente, se procede al análisis de los resultados obtenidos. Previamente al desarrollo de la experimentación, el dispositivo fue calibrado utilizando un aceite patrón (muestra número 190104 de viscosidad 1.01Pa s a 25°C), para los experimentos de cizalla continua, y un PDMS patrón (cuyos valores de módulos viscoelásticos a 0.1Hz y 25°C son $G' = 5118$ Pa y $G'' = 9530$ Pa), para los experimentos de cizalla oscilante, ambos proporcionados por el fabricante. El error admitido en la calibración debe ser inferior al 5%.

4.5.1.1 Geometría de vanos

La geometría utilizada para realizar los ensayos reológicos sobre pastas y morteros equivalentes fue la de vanos, cuyas principales características geométricas se muestran en la figura 4-6.

Dicha geometría consta de un eje central al que se le han soldado una serie de vanos. Dichos vanos poseen un acabado superficial especial, para mejorar las propiedades de adherencia del material del que están contruidos, minimizando así los problemas de deslizamiento que pudieran surgir.

Aunque el reómetro empleado es un reómetro absoluto, no mide directamente ni la velocidad de cizalla ni el esfuerzo. Lo que mide realmente es el torque y la velocidad angular aplicados y, a partir de las siguientes expresiones, obtiene los valores de los parámetros reológicos absolutos:

$$\tau = C_1 \cdot \text{Torque} \quad [4.20]$$

$$\dot{\gamma} = C_2 \cdot \frac{\text{Velocidad angular}}{C_3} \quad [4.21]$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [4.22]$$

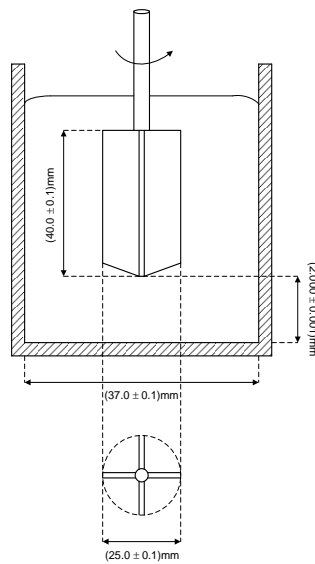


Figura 4-6. Dimensiones de la geometría de vanos empleada

Los valores de las constantes C_1 , C_2 y C_3 que se denominan constantes características de la geometría, se obtienen a través de la calibración de la misma utilizando, para ello, una muestra patrón adecuada suministrada por el fabricante. Sus valores para la geometría de vanos utilizada en este estudio se recogen en la tabla 4-2

| <i>Parámetros</i> | <i>Valores</i> |
|-------------------|----------------|
| C_1 (Pa/Nm) | 88224 |
| C_2 (1/rad) | 10,452 |
| C_3 (mm) | 2 |

Tabla 4-2. Constantes características de la geometría de vanos empleada.

- C_1 : Es el factor de conversión entre el torque y el esfuerzo de cizalla, cuyas unidades son Pa/N · m o $1/m^3$.
- C_2 : Es el factor de conversión entre la velocidad angular y la velocidad de cizalla. Se mide en 1/rad.
- C_3 : Representa el valor del “gap” en mm.

El uso de la geometría de vanos (Figura 4-7) para el estudio de las propiedades de materiales cuyo comportamiento se aleja mucho del newtoniano, ha visto incrementada su popularidad en los últimos años (Krulis y Ronm 2004; Bauer y col. 2007). Originalmente, este tipo de geometrías eran usadas para determinar el límite de fluencia aparente de suspensiones coloidales inorgánicas pero, actualmente, se utilizan también para medir otros parámetros reológicos. Entre estos, se incluyen los módulos de almacenamiento y pérdida del material, y las curvas de flujo estacionarias de fluidos estructurados. Las ventajas particulares de esta geometría son su facilidad de fabricación, facilidad de limpieza y, sobre todo, la posibilidad de eliminar los indeseables efectos de deslizamiento con la pared. De ahí su éxito y su amplitud de aplicaciones: alimentos, dispersiones coloidales concentradas, materiales cementosos, productos biotecnológicos, etc. (Barnes y Nguyen 2001).



Figura 4-7 .Geometría utilizada en este estudio.

Finalmente comentaremos que, entre sus principales ventajas, cabe destacar:

- 1) Además de su capacidad para evitar los efectos de deslizamiento, permite medir con muestras que, en geometrías convencionales con paredes lisas, no podrían ser adecuadamente caracterizadas. También ofrece una manera de introducir un sensor de medida (un vano metálico muy delgado) dentro de un líquido estructurado con la mínima cantidad de perturbación de la muestra, haciéndola muy adecuada para materiales como geles, pastas y similares. Con la introducción de una pared exterior, a veces rugosa, o adecuadamente modificadas, la geometría de vanos es también muy útil como una manera general de realizar medidas de viscosidad en líquidos muy difíciles, especialmente combinada con reómetros de esfuerzo controlado de última generación.
- 2) Permite medir dispersiones con tamaños de partículas relativamente grandes, así como muestras con estructuras tridimensionales, como por ejemplo, polímeros fundidos, pastas de cemento, elastómeros, geles, etc.
- 3) Fácil de limpiar después de cada test.
- 4) Requiere de una cantidad muy pequeña de muestra.

Por otra parte, sus principales inconvenientes son:

- 1) Debido a que el extremo superior de la muestra se encuentra expuesto a la atmosfera, se puede formar costra exterior endurecida de muestra, creando así una resistencia adicional que puede falsear los resultados obtenidos.
- 2) Si se agranda el “gap” demasiado puede ocurrir que aparezca un gradiente de temperatura, por lo que no sería constante en todo el volumen de muestra.
- 3) Utilizar este tipo de geometrías a altas velocidades conlleva el riesgo de que parte de la muestra no sea cizallada entre los vanos debido a su comportamiento viscoplástico. Este material solamente rotara en la forma de un cilindro indeformable encerrado entre los huecos entre vanos. En este caso no se pueden obtener valores exactos de la velocidad de cizalla y solo se pueden dar magnitudes relativas.

4.5.1.2 Rango de velocidad de cizalla.

Es importante conocer las velocidades de cizalla representativas de los procesos que intervienen en este tipo de materiales a la hora de diseñar los ensayos que permitan determinar las propiedades reológicas del material. Hay variabilidad en los valores de velocidad de cizalla de interés para el estudio de los diferentes tipos de hormigones. Por ejemplo si se considera un hormigón fluyendo por un canal desde un camión hormigonera una operación sencilla y cotidiana a pie de obra, tomando el espesor del hormigón de aproximadamente, de 0,1m y la velocidad en la superficie es, normalmente, de alrededor de 1m/s., la velocidad de cizalla máxima a la que se verá sometido el material será de alrededor de 10s^{-1} (Nicolas Roussel 2006). Pero el material no fluye por el canal con la misma velocidad y por tanto, con la misma velocidad de cizalla, en toda la sección. Esta será mínima cerca de la superficie inferior de metal del canal y máxima en la superficie libre de hormigón.

También hay que tener en cuenta que la velocidad de cizalla a la que se ve sometida la matriz (pasta de cemento) es mucho mayor que la del hormigón fluyendo, ya que esta se encuentra doblemente cizallada, por un lado, por la propia deformación de flujo y por otro, por la acción de los áridos suspendidos por la matriz. Se estima que la

velocidad de cizalla máxima a la que se ve sometida la pasta de cemento en el hormigón es del orden de $70\sim 80\text{ s}^{-1}$ durante el mezclado y su colocación (Ferraris 1999).

De igual manera, a velocidades de cizalla muy altas (superiores a los 100s^{-1}) se producen inestabilidades de flujo, alejándose el comportamiento del material del régimen laminar dentro de la geometría. Además, esto generaría una estructura interna diferente en el material a la que se tiene cuando este es colocado, que tiene como consecuencia capas con una alta concentración de partículas y entre ellas, capas que contendrán en mayor parte fase líquida (Tattersall and Banfill 1983).

Todos los fenómenos interesantes que afectan a la preparación y puesta en obra del hormigón ocurren a pequeñas velocidades de cizalla. De hecho, la velocidad de deformación estimada que ocurre durante la colocación del hormigón es del orden de 3 a 20 s^{-1} . La figura 4-8 recoge las velocidades de cizalla máximas a las que se ve sometido el hormigón durante su vida útil en estado fresco.

A la vista de esto, la velocidad máxima a la que van a ser sometidas las muestras, tanto de pasta de cemento como de mortero y mortero equivalente, se fijara en 100 s^{-1} , abarcando así todas las situaciones de flujo a las que se puede ver sometido el material.

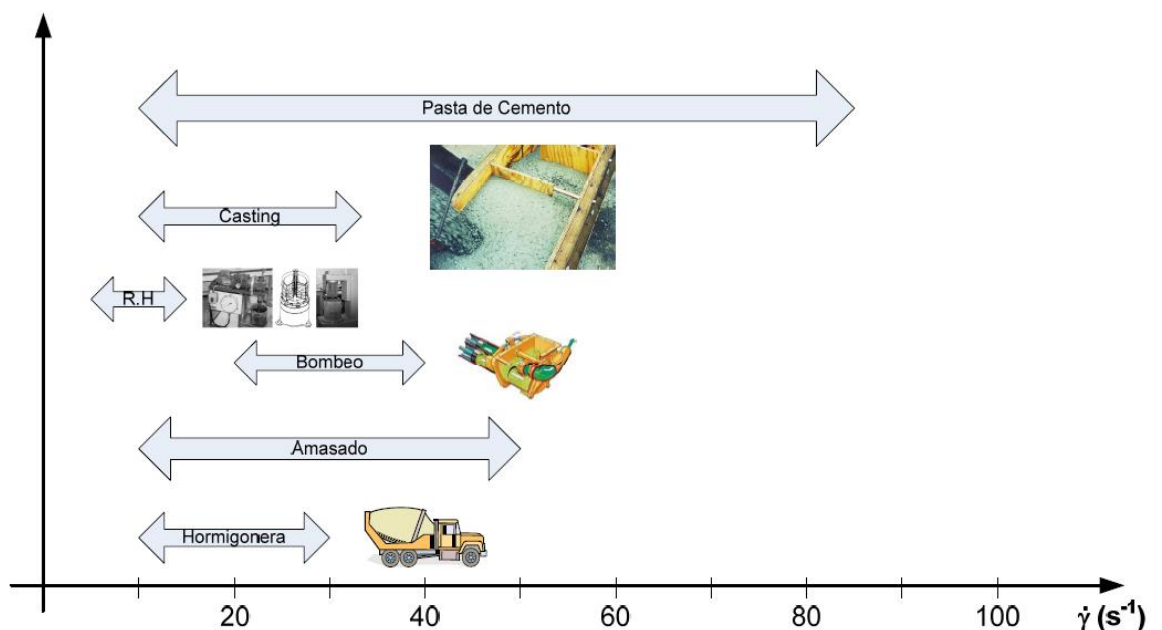


Figura 4.8. Rango de velocidades de cizalla a las que se ve sometido el hormigón.

4.5.2 Medidas Reológicas

Como se indicó en el apartado 4.2.2 , la muestra se somete a una precizalla de 100 s-1 durante 15 s con el fin de eliminar los efectos aleatorios que resultan, tanto de la colocación del material en la geometría de medida, como del aplastamiento al que se ve sometido cuando la parte móvil del reómetro alcanza la posición de medición.

A continuación, se le aplica una velocidad de cizalla (γ) decreciente, desde 100 s-1 hasta 1 s-1. El software que acompaña al reómetro permite imponer que el salto a la siguiente velocidad de cizalla se produzca solo después de que el dispositivo registre el valor del esfuerzo (τ) estacionario correspondiente al valor previo de velocidad. De esta forma, podemos asegurar que estamos registrando una curva de flujo estacionaria.

4.5.3 Medida escurrimiento.

La medida del escurrimiento se ha realizado usando un Mini-Cono. Sus dimensiones están dadas en la figura 4-9.

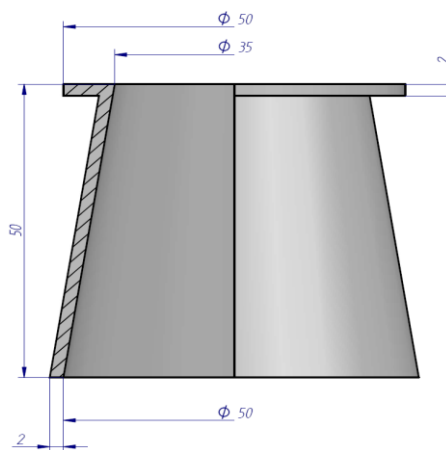


Figura 4-9. Geometría mini-cono.

Es una pequeña versión del cono de abrams para pastas de cemento y morteros. El volumen de muestra necesario es de 0,287 l. El resultado final es la media de los dos diámetros perpendiculares medidos 1 minuto después de haber vertido la muestra.

4.6 Resultados y discusión.

4.6.1 Diseño del mortero equivalente

4.6.1.1 Fundamentos

El procedimiento para el diseño de un mortero equivalente, a partir de una determinada composición de hormigón, se fundamenta en obtener un mortero cuyas propiedades reológicas tengan correlación directa con el hormigón de referencia. La metodología seguida en esta tesis corresponde con la desarrollada previamente en la Universidad de Málaga (Velázquez-Navarro 2009; Rubio-Hernandez y col. 2012). El diseño del mortero equivalente se ha basado en las siguientes hipótesis (Schwartzentruber y Catherine. 2000):

1. Se supone que los productos de hidratación se forman principalmente en la interfase pasta de cemento/áridos.

2. Todos los fenómenos de fricción tienen lugar en dicha interfase por lo que, desde el punto de vista reológico, el área específica total de los áridos es la variable fundamental para comprender el nivel de docilidad del hormigón.

Para obtener el mortero equivalente, el árido grueso del hormigón es sustituido por arena granulométrica 0/1, en cantidad suficiente como para desarrollar el mismo área específica que en el caso de referencia. La curva granulométrica resultante se reduce, pero la distancia intergranular media aumenta. Como el tamaño de la partícula de la arena es menor que el de las gravas y demás áridos gruesos, la cantidad total de árido necesaria es menor. Consecuencia de esto: la inercia química del mortero equivalente suele ser menor que la del hormigón correspondiente, lo que supone otra ventaja de este método, dado que de esta forma el periodo de inducción será más largo y, por consiguiente, la vida útil de las muestras mayor (Wallevik 2009).

La relación directa entre las propiedades reológicas y mecánicas del mortero equivalente y las del hormigón de referencia, se consiguen manteniendo unas condiciones específicas determinadas. Los condicionantes que se han de cumplir en todo momento son los siguientes (Rubio-Hernandez y col. 2012):

1. Se mantendrán los orígenes y las proporciones del cemento y áridos.

2. La relación efectiva agua/cemento será idéntica.

3. Igual proporción de aditivos y métodos de mezcla.

4. Se utilizará la cantidad necesaria de áridos finos para obtener una superficie específica igual a la superficie total de árido grueso y así de esta forma poder sustituir este último en base a la proporción en el hormigón de referencia.

De acuerdo con las condiciones anteriores existen dos puntos críticos en el diseño. El primero de ellos es el cálculo de las superficies específicas de los áridos presentes en el hormigón de referencia. La segunda correspondería a determinar la cantidad de agua en base a la relación agua/cemento.

Desde el punto de vista reológico, este método arroja unos resultados excelentes con una gran precisión y reproducibilidad, con la ventaja de que al contener solo arena, se pueden utilizar, al igual que con las pastas de cemento, reómetros convencionales con geometrías especialmente adaptadas, con lo que también se le pueden aplicar todo tipo de ensayos reológicos, ya sean en cizalla continua u oscilante. A pesar de ello, a día de hoy, ninguno de los ensayos reológicos propuestos para esta técnica está normalizado ni recogido en ningún tipo de reglamento técnico.

Debido al tipo de reómetro utilizado en los ensayos, la granulometría de los morteros equivalentes será 0/1, es decir, ninguno de los áridos empleados en su fabricación debe tener una granulometría superior a 1 mm. Esto conlleva el tamizado de los áridos, desechando todas las partículas que queden retenidas en el tamiz de 1 mm.

En los hormigones de referencia utilizados en el presente estudio se han utilizado tres fracciones granulométricas: Una gruesa (4/16), y dos finas (0/4 y 0/2). Los áridos 4/16 y 0/4 proceden de la misma cantera y el tamaño 0/2 de otra cantera. Esta tesis aborda el diseño de nuevos hormigones desde la sustitución de árido fino por EAFS.

4.6.1.2 Diseño de los morteros equivalentes.

Los morteros equivalentes fueron preparados de acuerdo con el siguiente protocolo: se ha sustituido el árido fino y el grueso por arena manteniendo la misma proporción del resto de componentes que se utilizan para formular la pasta de cemento. Sabiendo que los radios del árido grueso y de la grava son inferiores a 8 mm y 16 mm,

respectivamente, y que el radio medio del árido fino es inferior a 2 mm, a partir de estos valores se calcula la cantidad de árido fino que debe utilizarse en la formulación del mortero equivalente, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Masa\ arido\ fino\ a\ añadir = \frac{radio\ \textit{árido\ fino}}{radio\ \textit{arido\ grueso\ sustituido}} \cdot Masa\ arido\ grueso\ sustituido$$

Una vez obtenido el valor equivalente de árido fino a añadir tanto de la sustitución de grava como de la sustitución de árido intermedio, se obtendrán las proporciones correspondientes para la adición de la arena. En base a lo anteriormente expuesto se preparan las muestras para la realización de los ensayos.

Para el diseño de la pasta de cemento y del mortero equivalente se ha hecho uso de las siguientes premisas de partida definidas en el capítulo 3 (tabla 4-3):

| Especificaciones | HC | HAC | HCE | HACE |
|------------------------------|------|------|------|------|
| Cemento (kg/m ³) | 325 | 350 | 325 | 350 |
| Rel a/c | 0.50 | 0.55 | 0.50 | 0.55 |

Tabla 4-3. Parámetros básicos de dosificación

- Tipo de cemento CEM I 52,5R
- Los componentes utilizados fueron áridos calizos: la arena procede de plantas de fabricación comerciales situadas en el Campo de Gibraltar.

4.6.1.3 Protocolo experimental y descripción del sistema.

La pasta de cemento y el mortero fueron preparadas de acuerdo con el protocolo siguiente:

1. Añadimos el porcentaje de aditivo correspondiente a la cantidad de agua deseada.
2. Mezclamos el cemento y áridos y escoria, en su caso, con parte del agua (aproximadamente un 30% del total de la cantidad empleada).

3. A continuación se vertimos la totalidad del agua y se mezclan los componentes.

Los materiales se dosificaron en peso para reducir al máximo las incertidumbres de medida.

Las diferentes mezclas fueron obtenidas con una mezcladora RZR1 de Heidolph Instruments (Alemania) con paletas de agitación tipo hélice (SE6002895), con una velocidad de giro de 95 rpm, durante el tiempo suficiente como para observar homogeneidad del material. Los ensayos reológicos que a continuación se describirán, permitieron concluir que la homogeneidad mortero equivalente se alcanzaba con un tiempo mínimo de agitación de 3 min.

Se han realizado 3 ensayos de flujo por cada tipo de dosificación propuesta, así que cada resultado mostrado en la correspondiente curva es el promedio de 3 ensayos.

Como ya se ha descrito en el capítulo 3 se ha estudiado el comportamiento de dos hormigones convencionales de referencia. Se han definido los siguientes morteros:

- HCM. Hormigón Convencional Mortero.
- HACM. Hormigón Autocompactante Convencional Mortero.

En segundo lugar se han estudiado las mezclas a las que se ha sustituido el árido fino por la Escoria de horno de arco eléctrico.

Hemos definido los siguientes morteros:

- HCEM. Hormigón Convencional con incorporación de Escorias Mortero.
- HACEM. Hormigón Autocompactante Convencional con incorporación de Escorias Mortero.

El objetivo del estudio reológico es comparar el comportamiento de muestras de hormigón convencionales con muestras a las que se le ha incorporado EAFS como sustitución del árido fino. Se ha intentado mantener constantes la composición de las curvas granulométricas, respecto a los tamaños. La cantidad de agua añadida a los hormigones con las adiciones de escoria ha sido mayor debido a que los coeficientes de absorción de las escorias son mayores que los áridos convencionales, a pesar de ello las

relaciones a/c efectivas se han mantenido constantes. Se prepararon muestras variando el porcentaje de aditivo y la relación agua/cemento, hasta llegar a las siguientes dosificaciones indicadas en la tabla 4-4:

| Material | HC | HAC | HCE | HACE |
|------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|
| Cemento | 325 | 350 | 325 | 350 |
| a/c | 0,50 | 0,55 | 0,50 | 0,55 |
| Aditivo (% s.p.c) | 1,1 | 2,2 | 3,4 | 4,5 |
| Arena 0/2 (%) | 15 | 33 | --- | --- |
| Arena 0/4 (%) | 35 | 31 | --- | --- |
| Árido grueso 4/16 (%) | 50 | 36 | 65 | 45 |
| EAFS lodo (%) | --- | --- | 10 | 20 |
| EAFS arena (%) | --- | --- | 25 | 35 |

Tabla 4-4. Dosificaciones de referencia de los hormigones.

Atendiendo a la metodología explicada obtenemos los morteros equivalentes detallados en la tabla 4-5

| Material | HCM | HACM | HCEM | HACEM |
|-------------------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| Cemento (g) | 130 | 140 | 130 | 140 |
| a/c | 0,50 | 0,55 | 0,50 | 0,55 |
| Aditivo (%)* | 1,1 | 2,2 | 3,4 | 4,5 |
| Arena 0/2 (g) | 92,48 | 195,20 | --- | --- |
| Arena 0/4 (g) | 94,22 | 80,22 | --- | --- |
| Árido G 4/16 (g) | 22,02 | 22,22 | 8,58 | 10,25 |
| EAFS 0/1 (g) | --- | --- | 72,38 | 141,29 |
| EAFS 0/2 (g) | --- | --- | 198,74 | 270,94 |

Tabla 4-5. Dosificaciones de referencia de los morteros equivalentes. ()Calculado respecto al peso de cemento.*

4.6.2 Ensayos de docilidad

El estudio de la docilidad ha sido históricamente el método de control de ejecución en obra. De esta forma se garantizaba que el hormigón a colocar cumplía con los parámetros de dosificación marcados por la dirección facultativa. El correcto diseño de la dosificación implicaba conocer los métodos de puesta en obra para garantizar que el

hormigón rodeara la armadura y, de esta forma, conseguir la correcta transmisión de esfuerzos por adherencia al acero. También se obtiene el relleno completo de los encofrados garantizando los recubrimientos y evitando coqueras.

En el análisis de la docilidad, dado que las características de los hormigones convencionales son muy diferentes a los hormigones autocompactantes, se han diferenciado los ensayos dependiendo del tipo de hormigón. De esta forma seguimos las directrices de la vigente normativa de hormigón estructural (EHE-08).

4.6.2.1 Control de la docilidad del hormigón convencional.

El control de la docilidad de este hormigón consiste en determinar la consistencia de un hormigón fresco (mediante el cono de Abrams). La EHE-08, en su artículo 31.5, define las distintas consistencias y valores límite del asentamiento para este ensayo. Esta medida nos da información acerca de la trabajabilidad del hormigón en estado fresco. La consistencia inicial corresponde al HC conocido. Se ha establecido su consistencia blanda definida por su asentamiento en el intervalo [6-9] cm. Hemos realizado el ensayo a tres dosificaciones obteniendo el valor medio.

La normativa seguida ha sido la UNE-EN 12350-2:2009.

4.6.2.2 Control de la docilidad del hormigón autocompactante.

La docilidad del hormigón autocompactante no puede ser caracterizada mediante el ensayo del cono de Abrams. La caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del hormigón en términos:

- de fluidez, mediante ensayos de escurrimiento según UNE 83.361 o de ensayos de escurrimiento en embudo en V, según UNE 83.364.
- de resistencia al bloqueo, mediante ensayos del escurrimiento con anillo J, según UNE 83.362 y mediante ensayos de la caja en L, según UNE 83.363.
- y de resistencia a la segregación.

Si bien no existen ensayos normalizados para evaluar la resistencia a la segregación, la misma se puede apreciar a partir del comportamiento del material en los ensayos de escurrimiento y embudo en V. En el ensayo de escurrimiento debe observarse una distribución uniforme del árido grueso y ningún tipo de segregación o exudación en el perímetro de la “torta” final del ensayo.

La Tabla 4-6 muestra los rangos admisibles de los parámetros de autocompactabilidad que deben cumplirse, en cualquier caso, según los diferentes métodos de ensayo. Estos requisitos deberán cumplirse simultáneamente para todos los ensayos especificados.

| Ensayo | Parámetro medido | Rango admisible |
|------------------------------|------------------|--|
| Escurrecimiento | T_{50} | $T_{50} \leq 8 \text{ s.}$ |
| | d_f | $550 \text{ mm} \leq T_{50} \leq 850 \text{ mm}$ |
| Embudo en V | T_v | $4 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$ |
| Caja en L | C_{bl} | $0,75 \leq C_{bl} \leq 1,00$ |
| Escurrecimiento con anillo J | d_{jf} | $\geq d_f - 50 \text{ mm}$ |

Tabla 4-6. Requisitos generales para la autocompactabilidad. (EHE-08)

En nuestro caso se ha definido un grado de autocompactabilidad inicial, mediante las categorías definidas en el apartado 39.2 del Anejo 7 de la EHE. Los parámetros de docilidad inicial del HAC son:

- AC-E2 ($650 \text{ mm} \leq T_{50} \leq 750 \text{ mm}$)
- AC-V1 ($2,5 \text{ s.} < T_{50} \leq 8 \text{ s.}$)
- AC-RB2 ($\geq 0,80$ con 3 barras)

4.6.3 Curvas de flujo.

Los ajustes de los resultados experimentales al modelo de Bingham Modificado se han realizado con el software Origin Pro, que hace uso del método de iteración de Levenberg-Marquardt. Tal como se indicó anteriormente, las curvas de flujo reflejan el promedio de 3 ensayos por cada tipo de hormigón. En caso de haber observado una alta dispersión de los resultados, se ha realizado un mayor número de ensayos (múltiplos de 3). En todos los casos se han eliminado aquellos que quedaban fuera de una tolerancia del

20% alrededor de la media. Los resultados que se exponen en el presente capítulo han sido publicados en el Congreso Internacional Ibero, 2013 (Contreras de Villar y col. 2013).

Una curva de flujo estacionaria es la representación del esfuerzo (τ) estacionario frente a la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$), independientemente de que, por el modo de funcionamiento del reómetro, se aplique a la muestra una velocidad de cizalla y se mida el esfuerzo con el que responde, o que se le aplique un esfuerzo y se mida la velocidad de cizalla resultante.

La curva de flujo permite caracterizar el comportamiento de flujo en estado fresco de una formulación y compararlo con el de otras, permitiéndonos distinguir entre comportamientos Newtoniano o no. En cierto sentido, se puede considerar que una curva de flujo estacionaria es parte de la huella digital de un material (Björstrom y Chandra 2003). En nuestro caso, considerando el significado físico de los valores de velocidad de cizalla, se han obtenido las curvas de flujo estacionarias en el rango de 1 a 100 s⁻¹ tal como se indicó en el apartado anterior.

Se ha realizado el ajuste siguiendo el modelo de Bingham modificado, que responde a la siguiente expresión:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2; \quad \tau \geq \tau_0 \quad [4.21]$$

La tabla 4-7 muestra los parámetros reológicos correspondientes las curvas de flujo de los morteros equivalentes:

| Mortero equivalente | Parámetros reológicos | | | |
|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| | Límite de fluencia τ_0 (Pa) | Viscosidad plástica η_p (Pa*s) | Coefficiente de segundo orden c (pa*s ²) | Coefficiente R ² |
| HCM | 144,3±1,7 | 3,7±0,09 | -0,003±0,0008 | 0,99968 |
| HACM | 19,2±1,9 | 7,3±0,21 | 0,007±0,002 | 0,99800 |
| HCEM | 16,2±0,7 | 4,4±0,07 | 0,010±0,0008 | 0,99942 |
| HACEM | 6±2 | 12,8±0,22 | 0,025±0,003 | 0,99935 |

Tabla 4-7. Parámetros reológicos de los morteros equivalentes.

A continuación se representan en la figura 4-10 las curvas de flujo resultantes de los ensayos realizados:



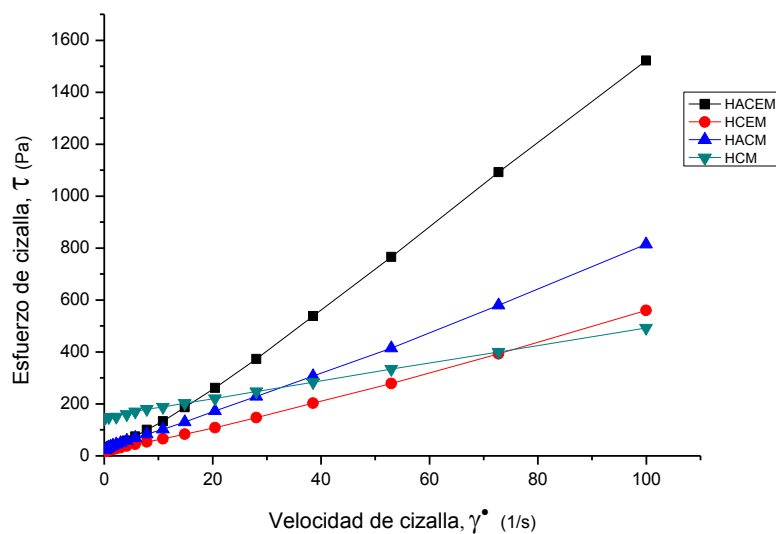


Figura 4-10. Curva de flujo de los morteros equivalentes

El límite de fluencia es relativamente alto para el HCM ($\tau_0 = 144,29 \pm 1,72$) Pa y que en el resto de los casos el límite de fluencia disminuye de forma considerable. Es un resultado interesante la adición de EAFS a un hormigón convencional reduzca el valor del límite de fluencia, hasta hacerlo semejante al del hormigón autocompactante sin EAFS. La adición de EAFS al hormigón autocompactante hace disminuir aún más su límite de fluencia (6 Pa). Se aprecia que el hecho de adicionar las EAFSS a un hormigón convencional asemeja su valor al propio de un autocompactante.

El hormigón convencional presenta una viscosidad plástica relativamente baja $\eta_p = (3,7 \text{ Pa}\cdot\text{s})$ siendo menor, como cabe esperar, que la presentada por el hormigón autocompactante ($7,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Nuevamente se observa que la adición de EAFS hace que este parámetro reológico adquiera un valor semejante del hormigón autocompactante sin EAFS ($4,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). El mayor valor de viscosidad plástica lo representa el hormigón autocompactante con EAFSS. Cuando adicionamos EAFSS conseguimos aumentar la η_p un 26% para el hormigón convencional y un 76% para el autocompactante. Este resultado indica que el hormigón al que se le ha adicionado EAFSS mostrará mejor resistencia a la segregación.

Un valor positivo del coeficiente de segundo orden evidencia comportamiento reoespesante, lo cual es característico del hormigón autocompactante (Feys y col. 2008). Se observa que el parámetro c es negativo en el caso del hormigón convencional ($-0,003$

$\text{Pa}\cdot\text{s}^2$) y que pasa a ser positivo cuanto más autocompactante es el hormigón resultante de la adición de EAFSS.

4.6.4 Ensayo de mini-cono aplicado a morteros equivalentes.

El objetivo de este ensayo es evaluar la capacidad de fluir que tiene el mortero equivalente. También se puede valorar cualitativamente, en términos visuales, la presencia de segregación y exudación que se presenta, por la presencia de una aureola de agua alrededor del perímetro de la extensión de flujo (Bouvet y col., 2010).

El mini-cono utilizado en este estudio tiene las dimensiones mostradas en la figura 4-8. Las medidas del mini-cono un diámetro inferior de 50 mm, un diámetro superior de 35 mm y una altura de 50 mm. Este dispositivo no deja de ser una versión reducida del cono de Abrams (Roussel y col., 2005).

La fluidez del mortero se determina a partir del promedio de dos diámetros de escurrimiento, perpendiculares entre sí, medidos sobre un plano horizontal.

Para la determinación del diámetro de escurrimiento se han ensayado 3 muestras por cada uno de los morteros equivalentes dosificados.

El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

1. Se coloca el mini-cono sobre una superficie lisa y nivelada, previamente humedecida, que en nuestro caso ha sido una placa de plástico pulida no absorbente.
2. Se llena el mini-cono con el mortero y lo enrasamos, sin ningún tipo de compactación.
3. Se levanta el cono dejando que fluya el mortero sobre la superficie.
4. Cuando el mortero ya no presente movimiento, se efectúan dos mediciones diametrales perpendiculares entre sí.
5. Se calcula el promedio de los dos diámetros, obteniendo el escurrimiento medio.
6. Visualmente se determina si se han producido segregación y exudación.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4-8.

| Material | HC | HAC | HCE | HACE |
|------------|-----|-----|-----|------|
| Slump (mm) | 120 | 180 | 173 | 183 |

Tabla 4-8. Valores de fluidez según los ensayos de escurrimiento de los mini-conos

Los valores de fluidez (slump) atendiendo al escurrimiento confirman que mejoran la trabajabilidad de los morteros al aumentar los diámetros obtenidos cuando hemos incorporado las EAFSS.

En ningún caso se observaron efectos de sangrado.

En la figura 4-11 se representa el límite de fluencia obtenido a partir de la curva de flujo estacionario, frente a los resultados de escurrimiento. Se observa que existe cierta correlación entre ambos parámetros.

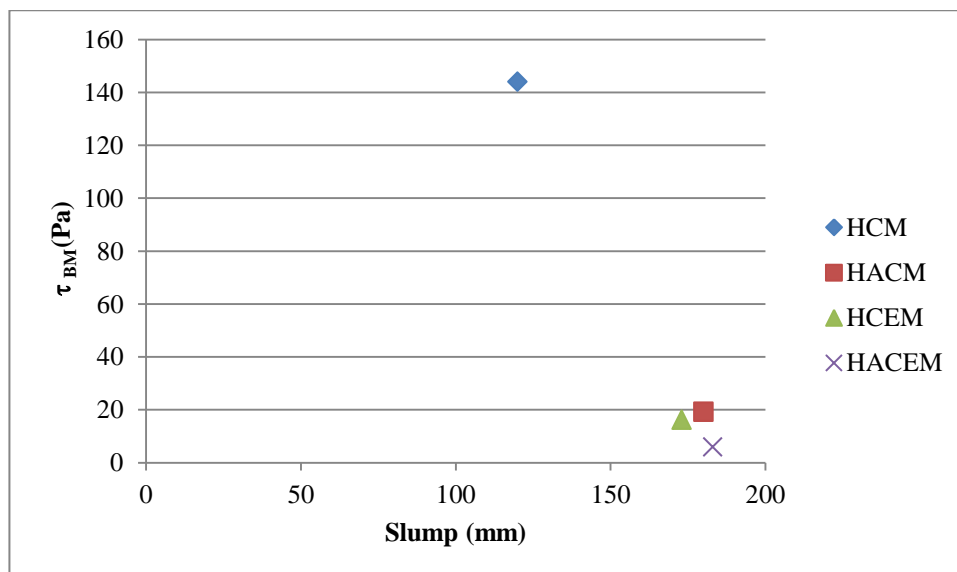


Figura 4-11. Representación de los valores del límite de fluencia frente a los resultados de escurrimiento.

4.6.5 Ensayos de docilidad

A continuación se reflejan los resultados atendiendo a lo definido en el apartado 4.6.2. Los valores que se muestran representan el valor medio de 3 ensayos, cada uno de ellos, realizados a amasadas diferentes del mismo tipo de hormigón. En ninguno de los ensayos analizados se observaron efectos de sangrado.

En primer lugar reflejamos (tabla 4-9) los resultados del hormigón convencional sin escorias (HC) y con escorias (HCE).

| Tipo hormigón | Cono de abrams (cm) |
|---------------|---------------------|
| HC | 3 |
| HCE | 5 |

Tabla 4-9. Valores del cono de Abrams HC y HCE

En la figura 4-12 se muestra el ensayo correspondiente al hormigón HCE.



Figura 4-12. Cono de Abrams del hormigón HCE

Los resultados de los ensayos al hormigón autocompactante se reflejan en la tabla 4-10.

| Tipo hormigón | Ensayos docilidad (Anejo 7 EHE-08) | | | |
|---------------|------------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| | Escurrimiento | | Embudo | Caja en L |
| | T ₅₀ (s) | d _f (mm) | T _v (s) | C _{bl} |
| HAC | 3 | 740 | 8 | 0,90 |
| HACE | 8 | 695 | 11 | 0,87 |

Tabla 4-10. Valores de docilidad de los hormigones HAC y HACE

En las figuras 4-13, 4-14 y 4-15 se muestran los ensayos correspondientes al hormigón HACE.



Figura 4-13. Ensayo de escurrimiento del hormigón HACE, según UNE 83361

Respecto al HACE, verificamos que podemos catalogarlo como material autocompactante conforme a la vigente normativa de hormigón estructural (Anejo 7, art. 39.2). La clasificación que se propone para el HACE es: ACE-E2/ ACE-V1/ AC-RB2.



Figura 4-14. Ensayo de escurrimiento del hormigón HACE, según UNE 83364



Figura 4-15. Ensayo de resistencia al bloqueo del hormigón HACE, según UNE 83363

4.7 Conclusiones

A continuación se muestra la tabla 4-11 que resume los valores obtenidos del estudio reológico y los de fluidez.

| Ensayo | Hormigón | | | |
|---|----------|------|------|------|
| | HC | HAC | HCE | HACE |
| Límite de fluencia t_0 (Pa) | 144,3 | 19,2 | 16,2 | 6 |
| Viscosidad plástica η_p (Pa·s) | 3,7 | 7,3 | 4,4 | 12,8 |
| Escurecimiento (Mini slump) | 120 | 180 | 173 | 183 |
| Cono de abrams (cm) | 3 | N/A | 5 | N/A |
| Escurecimiento T_{50} (s) | N/A | 3 | N/A | 8 |
| Escurecimiento d_f (mm) | N/A | 740 | N/A | 695 |
| Embudo T_v (s) | N/A | 8 | N/A | 11 |
| Caja en L C_{bl} | N/A | 0,9 | N/A | 0,87 |

Tabla 4-11. Correlación valores de fluidez y parámetros reológicos.

Analizando en primer lugar los resultados correspondientes a los hormigones convencionales podemos afirmar que al adicionar EAFSS (HCE) aumenta el cono de Abrams mejorando de esta forma su trabajabilidad, verificamos también que el escurecimiento aumenta con la adición de EAFS. Este hecho se ve refrendado por la bajada en el límite de fluencia que pasa de $\tau_0 = 144$ Pa a $\tau_0 = 16$ Pa y el aumento de la viscosidad plástica que pasa de $\eta_p = 3,7$ Pa·s a $\eta_p = 4,4$ Pa·s. Este aumento de la viscosidad plástica aporta además de mayor robustez al hormigón (Rubio Hernández, Velazquez Navarro, and Galindo-Rosales 2009). Con estos valores concluimos inicialmente que la

sustitución de árido fino por EAFS en el hormigón aporta mayor trabajabilidad y mayor robustez en los hormigones convencionales.

Respecto al comportamiento del hormigón autocompactante los resultados evidencian que adicionar EAFS (HACE), como sustitutivo del árido fino, mejora los parámetros reológicos de la mezcla. Se observa una bajada del límite de fluencia que pasa de $\tau_0 = 19$ Pa a $\tau_0 = 5,7$ Pa y un aumento de la viscosidad plástica que pasa de $\eta_p = 7,3$ Pa·s a $\eta_p = 12,8$ Pa·s. Este aumento de la viscosidad plástica aportará además mayor robustez al hormigón. Respecto a los ensayos de docilidad indicados en el anejo 7 (art. 39.2), de la vigente normativa de hormigón estructural, los valores obtenidos no aportan mejoría respecto a las características propias de autocompactabilidad, pero hay que destacar que el objetivo de la tesis era encontrar nuevas prestaciones a la sustitución de áridos por EAFS. Estos resultados deben aportar nuevas líneas de investigación que se centren en la optimización de la nueva mezcla planteada centrando el estudio en el planteamiento de nuevas dosificaciones variando relaciones agua cemento, porcentajes de aditivos y tipos de aditivos.

Los morteros estudiados responden al modelo de Bingham modificado:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2$$

Como se puede observar para el caso del hormigón HC el coeficiente de segundo orden (c) es prácticamente nulo lo que evidencia un comportamiento asimilable a un fluido Bingham.

Para el caso del hormigón HAC y HACE el coeficiente (c) aporta unos valores positivos lo que evidencia un comportamiento reo-espesante propio del hormigón autocompactante (Feys y col., 2008; Feys y col., 2009).

A pesar de las diferencias granulométricas de las escorias respecto al árido utilizado comúnmente, la sustitución de arenas por EAFS, dota a los morteros de comportamientos autocompactantes y en el caso de hormigones autocompactantes, cuando son sustituidos por escorias, garantizan el cumplimiento normativo respecto a las prestaciones autocompactantes. Analizando los resultados obtenidos tras la sustitución de árido fino por EAFS en el hormigón autocompactante, demostramos que el nuevo

material HACE podemos clasificarlo conforme a su docilidad, atendiendo a la EHE-08 como sigue: ACE-E2/ ACE-V1/ AC-RB2.



4.8 Índice de tablas

| | |
|---|------|
| Tabla 4-1. Especificaciones del reómetro Malvern Gemini 150..... | 4.21 |
| Tabla 4-2. Constantes características de la geometría de vanos empleada..... | 4.25 |
| Tabla 4-3. Parámetros básicos de dosificación..... | 4.32 |
| Tabla 4-4. Dosificaciones de referencia de los hormigones..... | 4.34 |
| Tabla 4-5. Dosificaciones de referencia de los morteros equivalentes..... | 4.34 |
| Tabla 4-6. Requisitos generales para la autocompactabilidad..... | 4.36 |
| Tabla 4-7. Parámetros reológicos de los morteros equivalentes..... | 4.37 |
| Tabla 4-8. Valores de fluidez según los ensayos de escurrimiento miniconos... | 4.40 |
| Tabla 4-9. Valores del cono de abrams HC y HCE..... | 4.41 |
| Tabla 4-10. Valores de docilidad de los hormigones HC y HCE..... | 4.41 |
| Tabla 4-11. Correlación valores de fluidez y parámetros reológicos..... | 4.44 |

4.9 Índice de figuras

| | |
|---|------|
| Figura 4-1. Flujos no newtonianos. Se incluye el comportamiento newtoniano por comparación..... | 4.8 |
| Figura 4-2. Deformación experimentada por un elemento de un material sometido a la componente tangencial de una fuerza..... | 4.9 |
| Figura 4-3 Protocolo de ensayo empleado para obtener la curva de flujo..... | 4.13 |
| Figura 4-4. Evolución del torque y de la estructura de la muestra con el tiempo.... | 4.20 |
| Figura 4-5. Reómetro Gemini 150..... | 4.22 |
| Figura 4-6. Dimensiones de la geometría de vanos empleada..... | 4.24 |
| Figura 4-7. Geometría utilizada en este estudio..... | 4.26 |
| Figura 4-8. Rango de velocidades de cizalla a las que se ve sometido el hormigón. | 4.28 |
| Figura 4.9 Geometría mini-cono. | 4.29 |
| Figura 4-10. Curva de flujo de los morteros equivalentes..... | 4.38 |
| Figura 4-11. Representación de los valores del límite de fluencia frente a los resultados de escurrimiento..... | 4.40 |
| Figura 4-12. Cono de abrams del hormigón HCE..... | 4.41 |
| Figura 4-13. Ensayo de escurrimiento del hormigón HACE..... | 4.42 |
| Figura 4-14. Ensayo de escurrimiento del hormigón HACE..... | 4.42 |
| Figura 4-15. Ensayo de resistencia al bloqueo del hormigón..... | 4.43 |



4.10 Bibliografía

- Arnoud, L, and M Dierkens. 2007. “Setting and Hardening of Cement Based Materials: Wich Differences between Mortars and Concrete.” In *Advances in Construction Materials*, edited by SpringerBerlin Heidelberg, Capítulo IV.
- Barnes, HA. 2000. *A Handbook of Elementary Rheology*. The University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Department of Mathematics, University of Wales Aberystwyth, Penglais, Aberystwyth, Dyfed, Wales, SY23 3BZ. doi:10.1126/science.1201543.
- Barnes, HA., and nguyen Q.D. 2001. “Rotating Vane Geometry. A Review.” *Non-Newtonan Fluid Mechanier*, 1–14.
- Barnes, HA, JF Hutton, and K Walkers. 1989. *An Introduction to Rheology*. Ed. Elsevier.
- Bauer, El, JGG Sousa, EA Guimarães, and FGS Silva. 2007. “Study of the Laboratory Vane Test on Mortars.” *Building and Environment* 42 (1): 86–92. doi:10.1016/j.buildenv.2005.08.016.
- Björstrom, J, and S Chandra. 2003. “Effect of Superplasticizers on the Rheological Properties of Cements.” *Material and Structures* 36: 685–92.
- Bouvet, A, E Ghorbel, and R Bennancer. 2010. “The Mini-Conical Slump Flow Test.” *Cement and Concrete Research* 40 (1517–1523).
- Chhabra, RO., and JF. Richardson. 1999. *Non-Newtonian Flow in the Process Industries*. Edited by Butterworth-Heinemann.
- Contreras de Villar, F., F.J. Rubio Hernández, and M.D. Rubio-Cintas. 2013. “The Reological Behavior of Concrete Equivalent Mortars When Electric Arc Furnace Slag Is Used as Fine Aggregated.” In *Iberian Meeting of Rheology. IBEREO13.Málaga(España)*, 221–26.
- Ferraris, C F. 1999. “Measurement of the Rheological Properties of Cement Paste: A New Approach.” *International RILEM Conference on the Role of*.
- Feys, D, R Verhoeven, and G De Schutter. 2008. “Fresh Self Compacting Concrete, a Shear Thickening Material.” *Cement and Concrete Research* 38 (7): 920–29.

- doi:10.1016/j.cemconres.2008.02.008.
- . 2009. “Why Is Fresh Self-Compacting Concrete Shear Thickening?” *Cement and Concrete Research* 39 (6): 510–23. doi:10.1016/j.cemconres.2009.03.004.
- Jarny, S., N. Roussel, R. Le Roy, and P. Coussot. 2008. “Modelling Thixotropic Behavior of Fresh Cement Pastes from MRI Measurements.” *Cement and Concrete Research* 38 (5): 616–23. doi:10.1016/j.cemconres.2008.01.001.
- Krulis, M, and H Ronm. 2004. “Adaptation of a Vane Tool for the Viscosity Determination of Lavoured Yoghourt.”
- Malvern, I. 2005. “Geminini 150/200/HR. Malvern Manuals.”
- Mezguer, T.G. 2002. *The Rheology Handbook. For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers*. Edited by Ukrich Zorll.
- Nehdi, M., and M.-A. Rahman. 2004. “Estimating Rheological Properties of Cement Pastes Using Various Rheological Models for Different Test Geometry, Gap and Surface Friction.” *Cement and Concrete Research* 34 (11): 1993–2007. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.020.
- Newman, J. 2002. *Advanced Concrete Technology*. Edited by Elsevier.
- Petit, JY, E Wirquin, Y Vanhove, and K Khayat. 2007. “Yield Stress and Viscosity Equations for Mortars and Self-Consolidating Concrete.” *Cement and Concrete Research* 37 (5): 655–70. doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.009.
- Roussel, N., R. Stefani, and R. Leroy. 2005. “From Mini-Cone Test to Abrams Cone Test: Measurement of Cement-Based Materials Yield Stress Using Slump Tests.” *Cement and Concrete Research* 35 (5): 817–22.
- Roussel, Nicolas. 2006. “A Thixotropy Model for Fresh Fluid Concretes: Theory, Validation and Applications.” *Cement and Concrete Research* 36 (10): 1797–1806. doi:10.1016/j.cemconres.2006.05.025.
- Rubio-Hernández, FJ, JM Morales-Alcalde, and AI Gomez-Merino. 2013. “Limestone Filler/cement Ratio Effect on the Flow Behaviour of a SCC Cement Paste.” *Advances in Cement Research* 25: 262–72.

- Rubio Hernández, F.J., J.F. Velazquez Navarro, and F.J. Galindo-Rosales. 2009. “Rheological Characterization of a Time Dependent Fresh Cement Paste.” *Mechanics of Time Dependent Materials* 13: 199–206.
- Rubio Hernández, F.J., J.F. Velazquez Navarro, and L.M. Ordoñez Belloc. 2013. “Rheology of Concrete: A Study Case Based upon the Use of the Concrete.” *Material and Structures* 46: 587–605.
- Schram, G. 2000. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. Edited by Haake.
- Schwartzentruber, A, and C Catherine. 2000. “Method of the Concrete Equivalent Mortar (CEM) - A New Tool to Design Concrete Containing Admixture.” *Materials and Structures* 33 (232): 475–82.
- Shaughnessy, R, and PE Clark. 1988. “The Rheological Behavior of Fresh Cement Pastes.” *Cement and Concrete Research* 18 (3): 327–41. doi:10.1016/0008-8846(88)90067-1.
- Tattersall, GH, and PFG Banfill. 1983. *The Reology of Fresh Concrete*. Edited by Pitman Publishing.
- Velázquez Navarro, JF. 2009. “Reología de Pastas Y Morteros Equivalentes de Hormigones Autocompactantes.” Tesis Doctoral, Universidad de Málaga.
- Wallevik, Jon Elvar. 2009. “Rheological Properties of Cement Paste: Thixotropic Behavior and Structural Breakdown.” *Cement and Concrete Research* 39 (1): 14–29. doi:10.1016/j.cemconres.2008.10.001.
- Yoshioka, K. 1997. “Role of Steric Hindrance in the Performance of Superplasticizers for Concrete.” *J. Am.Ceram* 80: 2667–71.

CAPÍTULO 5

Estudio mecánico del hormigón endurecido

INDICE

| | | |
|---------|--|------|
| 5.1 | INTRODUCCIÓN | 5.5 |
| 5.2 | ENSAYO DE DENSIDAD, POROSIDAD Y ABSORCIÓN | 5.6 |
| 5.2.1 | <i>Introducción</i> | 5.6 |
| 5.2.1.1 | Densidad | 5.6 |
| 5.2.1.2 | Porosidad | 5.7 |
| 5.2.1.3 | Absorción | 5.11 |
| 5.2.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo de densidad, porosidad y absorción.</i> | 5.12 |
| 5.2.3 | <i>Resultados y discusión.</i> | 5.13 |
| 5.2.4 | <i>Conclusiones.</i> | 5.14 |
| 5.3 | ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN | 5.15 |
| 5.3.1 | <i>Introducción</i> | 5.15 |
| 5.3.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.16 |
| 5.3.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.20 |
| 5.3.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.23 |
| 5.4 | ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL AGUA BAJO PRESIÓN | 5.23 |
| 5.4.1 | <i>Introducción</i> | 5.23 |
| 5.4.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.25 |
| 5.4.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.27 |
| 5.4.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.28 |
| 5.5 | RESISTENCIA A COMPRESIÓN..... | 5.28 |
| 5.5.1 | <i>Introducción</i> | 5.28 |
| 5.5.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.32 |
| 5.5.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.35 |
| 5.5.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.36 |
| 5.6 | RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA. ENSAYO BRASILEÑO..... | 5.37 |
| 5.6.1 | <i>Introducción</i> | 5.37 |
| 5.6.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.39 |
| 5.6.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.41 |
| 5.6.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.42 |
| 5.7 | RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN..... | 5.42 |
| 5.7.1 | <i>Introducción</i> | 5.42 |
| 5.7.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.46 |

| | | |
|--------|--|------|
| 5.7.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.48 |
| 5.7.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.48 |
| 5.8 | MÓDULO DE ELASTICIDAD EN COMPRESIÓN | 5.49 |
| 5.8.1 | <i>Introducción</i> | 5.49 |
| 5.8.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.52 |
| 5.8.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.56 |
| 5.8.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.57 |
| 5.9 | ENSAYO DE ABRASIÓN SUPERFICIAL..... | 5.57 |
| 5.9.1 | <i>Introducción</i> | 5.57 |
| 5.9.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.60 |
| 5.9.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.65 |
| 5.9.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.65 |
| 5.10 | ENSAYO CÁNTABRO MODIFICADO..... | 5.66 |
| 5.10.1 | <i>Introducción</i> | 5.66 |
| 5.10.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.66 |
| 5.10.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.68 |
| 5.10.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.68 |
| 5.11 | CARBONATACIÓN..... | 5.69 |
| 5.11.1 | <i>Introducción</i> | 5.69 |
| 5.11.2 | <i>Proceso de elaboración del ensayo</i> | 5.71 |
| 5.11.3 | <i>Resultados y discusión</i> | 5.74 |
| 5.11.4 | <i>Conclusiones</i> | 5.75 |
| 5.12 | CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO..... | 5.76 |
| 5.12.1 | <i>Conclusiones hormigón HCE</i> | 5.76 |
| 5.13 | ÍNDICE DE TABLAS..... | 5.78 |
| 5.14 | ÍNDICE DE FIGURAS | 5.79 |
| 5.15 | BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO | 5.81 |

5.1 Introducción

En este capítulo se desarrollan los ensayos a los que se someten los diferentes hormigones en estado endurecido. Se ha seguido una metodología que abarca un abanico de ensayos suficientes para validar conforme a la normativa de hormigón estructural vigente (EHE-08), un total de diez ensayos, que se indican a continuación:

1. Densidad, absorción y porosidad.
2. Succión.
3. Permeabilidad.
4. Resistencia a compresión.
5. Tracción indirecta (ensayo brasileño).
6. Flexo-tracción.
7. Módulo de elasticidad.
8. Abrasión.
9. Cántabro modificado.
10. Carbonatación.

El esquema básico de cada uno de los ensayos realizados es el siguiente, si bien éste puede variar sensiblemente dependiendo del ensayo que se describa:

- **Introducción.** Se realiza una descripción general del ensayo indicando el fundamento y las bases teóricas del mismo.
- **Proceso de elaboración** Descripción de los pasos seguidos en la realización del ensayo, indicando normas utilizadas, dimensiones y número de probetas, maquinaria empleada, etc.
- **Resultados y discusión.** Se presentan los resultados obtenidos en el ensayo para proceder seguidamente a realizar una interpretación de los mismos.
- **Conclusiones del ensayo.** Se obtienen las correspondientes conclusiones una vez conocidos los resultados y discusión de los valores obtenidos.

5.2 Ensayo de densidad, porosidad y absorción

5.2.1 Introducción

5.2.1.1 Densidad

La densidad de un hormigón en estado endurecido es la relación que existe entre la masa de éste y el volumen conocido del recipiente que lo contiene.

La densidad depende de muchos factores, destacando principalmente la naturaleza de los áridos, la proporción de cada uno de los diferentes materiales que conforman el hormigón y el método de compactación empleado. Cuanto mayor sea la densidad de los áridos utilizados y mayor sea la cantidad de árido grueso, bien clasificado, mayor será la densidad del hormigón. De la misma forma cuanto mejor se haya compactado el hormigón mayor será la densidad (Pellicer llopis, 2014).

Según el Código Técnico de la Edificación (Edificación, 2009), las variaciones de densidad del hormigón son pequeñas, tomándose en los cálculos el valor 2.400 kg/m^3 para los hormigones en masa y 2.500 kg/m^3 para los armados.

Es fácil encontrar valores de densidades comprendidos entre 1300 kg/m^3 y 3500 kg/m^3 , dependiendo el tipo de hormigón. Para los hormigones convencionales formados por materiales granulares provenientes de rocas no mineralizadas de la corteza terrestre su valor oscila entre $2,35$ y $2,55 \text{ kg/dm}^3$ (Valcárcel Pérez, 2008).

La densidad del hormigón está relacionada con otras propiedades, en particular con su resistencia, con el aislamiento térmico y acústico, así como con la capacidad de contribuir a impedir el paso de radiaciones. Por lo anterior, es posible variar la densidad del hormigón artificialmente, ya sea por encima o por debajo de los valores de un hormigón convencional, constituyendo los denominados hormigones pesados o livianos, respectivamente.

Los hormigones pesados fabricados con áridos de barita o metálicos, tienen densidades de 3.000 a 3.500 kg/m^3 , incluso más, empleándose en protecciones contra radiaciones. Los hormigones ligeros, fabricados con piedra pómez, áridos a base de arcillas o escorias expandidas u otros áridos de pequeña masa específica, tienen

densidades del orden de 1.300 kg/m^3 e incluso inferiores a mil (Herrea Toledo, 2008; Pellicer Ilopis, 2014; Valcárcel Pérez, 2008).

Según (Schmitt y Heene, 2009), es posible clasificar los hormigones según las densidades que posean. Esta clasificación se especifica a continuación:

- Hormigón ligero, con una densidad máxima de 2 t/m^3 . Además de áridos ligeros como piedra pómez, las arcillas expandidas y las escorias, también se emplean granulados productores de poros o materiales espumantes.
- Hormigón normal, con una densidad comprendida entre 2 t/m^3 y $2,8 \text{ t/m}^3$ con arena y grava como áridos.
- Hormigón pesado o de alta densidad, con una densidad superior a $2,8 \text{ t/m}^3$. Los áridos normalmente empleados son áridos de barita, magnetita o metálicos.

5.2.1.2 Porosidad

En los materiales se distingue entre la porosidad absoluta o real y la porosidad relativa o aparente, que es también la porosidad referida a los poros accesibles o abiertos al exterior. La porosidad absoluta es el valor de la relación entre el volumen de huecos en un material y el volumen total del mismo. Esta porosidad es muy difícil de medir directamente, ya que al no ser todos los huecos o poros accesibles desde el exterior, para determinar su volumen, hay que triturar completamente el material o realizar complejas observaciones, empleando métodos de adsorción con gas, porosímetros de mercurio, y mediciones a escala microscópica. La porosidad abierta es de fácil determinación y se suele medir directamente mediante ensayos de absorción de agua (Olivares y col., 2003).

La porosidad del hormigón es uno de los parámetros que más importantes en el mecanismo del transporte de los agentes agresivos hacia el interior de la estructura. La porosidad efectiva, es decir, la porosidad interconectada y conectada a su vez con el medio exterior, tiene una influencia decisiva en el intercambio de humedad con el entorno y por lo tanto en los mecanismos de transporte de los agentes agresivos del

medio hacia el interior del núcleo de (Howland Albear y Martín Acosta, 2012). La medida de la porosidad efectiva del hormigón es una medida del grado de durabilidad de las estructuras de hormigón frente a los agentes agresivos del medio en el cual se encuentran expuestas.

La porosidad constituye una de las principales causas del deterioro del hormigón. Esto es debido a que un alto porcentaje del agua que se utiliza para la fabricación del hormigón, por razones de fluidez, no se requiere en el proceso de hidratación del cemento y acaba dejando una red de poros que pueden estar interconectados, o no. Esta red de poros será determinante en la permeabilidad del hormigón.

En el hormigón no puede esperarse una compacidad total, debido a que está formado por materiales granulares y pulverulentos que, estos a su vez, ya poseen una porosidad propia. Consecuencia de ello, puede afirmarse que no existen hormigones sin poros.

A pesar de que se haya cuidado enormemente el proceso de compactación y posterior curado del hormigón, siempre es posible encontrar poros en la masa del hormigón. Estos poros generalmente tienen forma esférica y pueden estar ocupados en mayor o menor medida por agua o aire. En el caso de los poros de aire, éstos se han podido producir de forma accidental o intencionada. De forma accidental porque se ha impedido que salga el aire de la mezcla durante la operación de amasado y puesta en obra. En el caso que sea de forma intencionada será debido a la adición de aditivos aireantes que atrapan y distribuyen el aire en pequeñas burbujas.

A la hora de medir los poros en el hormigón deben contarse con los áridos, dado que éstos tienen una porosidad propia. Este aspecto es sumamente importante dado que los áridos representan el 75% del volumen del hormigón. Cuanto más poroso es un árido, lo que se caracteriza por una elevada absorción de agua, mayor es la porosidad y permeabilidad del hormigón del cual forma parte.

No solamente se debe de contar con la aportación de la porosidad de los áridos, dado que la pasta de cemento del hormigón incluye una red de poros. Esta porosidad de la pasta de cemento disminuye con el tiempo debido a los procesos de hidratación. Sin

embargo, el volumen de vacíos sigue existiendo en el material, y la distribución de tamaño y la conectividad van a influir en la transferencia de materia en el medio poroso.

Según el modelo (Powers, 1960) los poros de la pasta de cemento endurecida se clasifican en dos grupos distintos que se diferencian según el tamaño de los poros:

- **Poros de gel (CSH).** En el modelo de Powers los espacios interlaminares se denominan poros de gel y constituyen una porosidad intrínseca del gel que representa del orden del 28% del volumen. Además, al ser los poros de gel intrínsecos a la estructura de la pasta, su volumen absoluto aumenta a medida que crece el de los productos de hidratación, es decir, el grado de hidratación contrariamente a lo que sucede con los poros capilares (Haynes, 1980; Neville, 2012).
- **Poros capilares.** Los poros capilares se corresponden con la fracción del espacio total (volumen de cemento y agua) no ocupada por la suma del volumen de los productos de hidratación y del volumen de cemento que permanezcan es el estado anhidro. Por ello, el volumen y tamaño de los poros capilares dependerá de la relación agua cemento y del grado de hidratación del cemento.

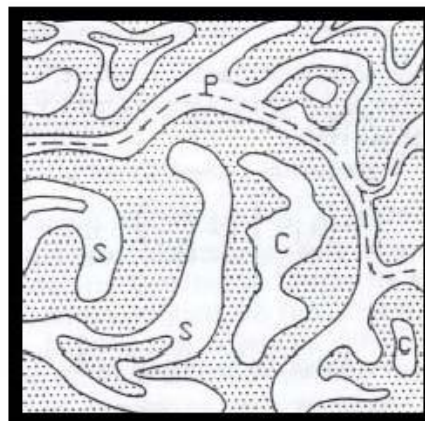
Los poros capilares son los más importantes desde el punto de vista de la durabilidad ya que controlan el transporte de materia en el interior del hormigón debido a las fuerzas capilares y a la tensión superficial de estos huecos y también porque penetran y difunden los agresivos externos. Existen, además, los poros de aire y, eventualmente, los macroporos atribuibles a defectos de compactación (Larbi, 1993).

Cuando el hormigón fragua se forma una estructura de poros que definirá el comportamiento de ese hormigón con la agresividad del medio. Dicha porosidad es sumamente importante no solo por el tamaño y distribución de los poros, sino por la conexión que exista entre ellos. Según la distribución y la conexión que exista entre los poros, es posible clasificar la porosidad en (Gomez Cano, 2008):

- **Porosidad total.** Es la relación entre el volumen de poros y el volumen total de la muestra.

- Porosidad abierta. Es la porosidad que se refiere a los poros conectados con el exterior.
- Porosidad permeable. Parte de la porosidad abierta que corresponde a los poros intercomunicados entre sí, permitiendo el paso de un fluido al interior del hormigón.
- Porosidad superficial en fondo de saco. Corresponde a una parte de la porosidad abierta, cuyos poros no están comunicados entre sí.
- Porosidad cerrada. Incluye los poros no conectados con el exterior.

En la figura 5.1 se muestran los tipos de porosidad que existen en una matriz cementante en relación a sus conexiones con el medio exterior.



P = Porosidad permeable

C = Porosidad cerrada

S = Porosidad superficial de fondo de saco


 Pasta de cemento

Figura 5-1. Tipos de poros en una matriz cementante (Gomez Cano, 2008)

Los diferentes poros que se forman dentro de la masa de hormigón son debido a diferentes factores. A continuación se citan algunos de los parámetros principales (Peng y col., 2012):

- La estructura interna de los granos de cemento.

- El aire que se incorpore a la mezcla debido al efecto de los aireantes.
- La tipología y estructura interna de los áridos.
- Evaporación del agua que no interviene en la hidratación del cemento.
- Capilares que se forman entre los diferentes componentes.

En los trabajos de (Torres Agredo, 2001) se establecen unos criterios de evaluación de la calidad del hormigón en función de la porosidad total. Dicha evaluación se indica en la tabla 5.1.

| Porosidad Total % | Evaluación |
|--------------------------|----------------------------|
| $\leq 10\%$ | Buena calidad y compacidad |
| 10%-15% | Moderada compacidad |
| $>15\%$ | Durabilidad inadecuada |

Tabla 5.1 Calidad del hormigón según su porosidad (Torres Agredo, 2001)

5.2.1.3 Absorción

La absorción se define como el volumen del espacio ocupado por los poros en el hormigón. Normalmente la medida de la absorción se realiza secando una muestra hasta masa constante, sumergiéndola en agua y midiendo el aumento de masa como un porcentaje de masa seca.

La absorción es un indicador de la porosidad, por lo que la relación existente entre la absorción del hormigón y su porosidad no cabe discutirla, aunque pueda variar en función de los métodos utilizados para establecer los valores de ambas.

Es necesario distinguir entre permeabilidad y absorción del hormigón dado que normalmente es objeto de confusión. Mientras que la absorción generalmente está representada por la capacidad máxima del hormigón de contener agua en relación con una condición de sequedad predeterminada, la permeabilidad está relacionada con la circulación del agua a través de la masa, es decir, la facilidad con la cual un fluido penetraría en dicha masa.

Al igual que ocurría con la porosidad, la absorción del hormigón está íntimamente relacionada con la durabilidad, de ahí que sea un factor clave en la consideración de los criterios de durabilidad.

Algunos factores que influyen en los valores de la absorción del hormigón serían:

- Curado.
- Absorción de los áridos.
- Proceso de fabricación.
- Contenido de cemento.

5.2.2 Proceso de elaboración del ensayo de densidad, porosidad y absorción.

Para la determinación de la densidad, absorción de agua y porosidad, se ensayaron 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. Cada una de las probetas han sido curadas bajo agua a $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ garantizando de esa forma la saturación. La determinación de los parámetros indicados se ha realizado a 28 días de edad.

Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-7:2009.

Ha sido necesaria la utilización de una balanza hidrostática a la que se le acopla un cesto donde se introduce la probeta a ensayar. De esta forma obtenemos el peso de la muestra sumergida. La obtención de los parámetros se realiza procediendo a la medición de 3 pesos distintos para cada una de las probetas.

Los pasos necesarios para la obtención de cada una de las mediciones han sido:

1. Obtención del peso mediante la balanza hidrostática, colocándose la muestra totalmente sumergida. Antes de proceder a realizar la medición hemos de garantizar que las probetas deben de haber alcanzado la saturación, hecho que tenemos garantizado debido a que el curado de las probetas se ha realizado sumergiendo éstas en agua durante 28 días. De esta forma obtenemos el peso sumergido.

2. Se procede al secado superficial de las caras de las probetas del paso primero con un trapo húmedo, de forma que retiremos el agua superficial. De esta forma obtenemos el peso saturado superficie seca.

3. Obtención del peso seco de las muestras. Para ello se procede al secado en estufa durante al menos durante 24 horas a una temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$. Una vez que no se observen variaciones en la medida, es decir, obtengamos peso constante, habrá concluido el proceso de secado. El peso que obtenemos es el peso seco.

A partir de los datos de pesadas anteriores, se determinan los parámetros de densidad, absorción y porosidad en función de las siguientes relaciones [5.1], [5.2], [5.3]:

$$\text{Densidad} \quad D = \frac{P_s}{P_{SSS} - P_{sum}} \quad [5.1]$$

$$\text{Absorción} \quad A = \frac{P_{SSS} - P_s}{P_s} \times 100 \quad [5.2]$$

$$\text{Porosidad} \quad P = \frac{P_{SSS} - P_s}{P_{SSS} - P_{sum}} \times 100 \quad [5.3]$$

5.2.3 Resultados y discusión.

Una vez efectuados los ensayos, los valores obtenidos de densidad, porosidad y absorción según los diferentes tipos de hormigones estudiados se indican en la tabla 5.2:

| TIPO HORMIGÓN | DENSIDAD Kg/dm³ | ABSORCIÓN (%) | POROSIDAD (%) |
|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| HC | 2,46 | 1,05 | 2,58 |
| HAC | 2,44 | 0,98 | 2,38 |
| HCE | 2,53 | 1,11 | 2,83 |
| HACE | 2,52 | 1,37 | 3,44 |

Tabla 5-2 Valores medios de densidad, porosidad y absorción

En la tabla 5.2 se observa como la densidad se incrementa con la adición de Escorias de horno de arco eléctrico en un 5%. Este resultado era esperable ya que la densidad de la escoria es superior a la del árido calizo sustituido (0/2 y 0/4) en los hormigones HC.

Respecto a la absorción se observa un incremento del 35% de los HACE respecto al hormigón convencional (HC y HAC). El HACE aumenta en un 10% los valores de absorción. La porosidad también se ha visto afectada tras la sustitución de las EAFSS ya que en el caso de los HCE se ha incrementado su porosidad en un 10% y en el caso de los HACE es de un 45%.

Los cambios de absorción y porosidad del hormigón estudiado se debe a los cambios de geometría encontrados en las partículas. Se demuestra que al sustituir una geometría del tipo prismática/cúbica como son las partículas del árido fino por una geometría esférica como son las EAFSS tanto la porosidad como la absorción aumenta.

5.2.4 Conclusiones.

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los distintos ensayos de laboratorio realizados:

- La sustitución de árido fino por escorias de horno de arco eléctrico aumenta la densidad del hormigón.
- Para el hormigón HCE los valores de porosidad y absorción son ligeramente superiores a los de HC.
- Para el hormigón HACE los valores de porosidad y absorción aumentan considerablemente, 45% y 35% respectivamente.

5.3 Ensayo para la determinación de la succión

5.3.1 Introducción

La succión capilar es un caso especial de transporte cuya fuerza impulsora la constituye la tensión superficial del agua actuante sobre la red de capilares del hormigón. Se trata de un fenómeno que se produce en las estructuras parcialmente saturadas sometidas a ciclos de humedecimiento y secado, como por ejemplo estructuras expuestas al agua de lluvia, carreras de marea o en contacto frecuente con agua. Este mecanismo de transporte está directamente vinculado con la estructura porosa del hormigón, más específicamente con la distribución y conexión de los poros capilares (Zega y col., 2006).

La capacidad y la velocidad de succión del hormigón y en particular la del hormigón que recubre las armaduras, es decir, el llamado recubrimiento, es un parámetro asociado estrechamente a la durabilidad del hormigón.

Al poner una muestra de hormigón seco en contacto con el agua se produce un gradiente de presión entre el exterior y el interior, induciendo una succión capilar que conduce el líquido desde las partes más húmedas hacia las más secas. Este movimiento se ve influenciado por las características del líquido: viscosidad, densidad y tensión superficial, y por las características del sólido poroso: permeabilidad, estructura de poros y energía superficial (Bizzoto y col., 2006).

El coeficiente de succión se determina según su definición, mediante la relación entre el volumen de agua absorbido por unidad de área y la raíz cuadrada del tiempo (Sanchez Rodríguez, 2011):

$$\frac{1}{\theta} \int F dt = S\sqrt{t}$$

[5.4]

Siendo (S) el coeficiente de succión capilar.

Si suponemos que el área de la probeta es constante y el volumen de agua absorbida por la misma es constante en un tiempo t , la ecuación [5.4] se expresará como:

$$\frac{W}{A} = S \times \sqrt{t}$$

[5.5]

Donde:

W: peso del agua succionada

A: superficie en contacto con el agua

t: tiempo

S coeficiente de succión

La suposición efectuada es totalmente válida dado que en todo momento se conoce la superficie de la probeta expuesta al agua, la cual es constante, y el volumen en un instante t de medida, que igualmente también será constante.

5.3.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo determinar dos parámetros característicos del hormigón, la capacidad de succión capilar (C) y el coeficiente de succión (S). El primer parámetro (C), representa la cantidad de agua por unidad de área que es capaz de absorber la muestra del ensayo hasta llegar a una masa constante, y el segundo parámetro (S), nos indica la rapidez a la cual el agua penetra en la estructura porosa del hormigón. Al parámetro (S) también se le conoce por velocidad de succión.

El valor del coeficiente de succión indicará el orden de magnitud de la porosidad del hormigón objeto del ensayo.

Dado que no existe una normativa española para la determinación de la capacidad de succión y el coeficiente de succión, el ensayo se fundamenta en la norma Argentina (IRAM 1871) adaptándola a los criterios propios del laboratorio de Hormigones y Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Algeciras. Para ello se modifica la geometría de las probetas. La norma indica que las probetas serán de 100 mm de diámetro para un hormigón donde el tamaño máximo del árido pase en su totalidad por el tamiz 26,5 mm, y una altura de 50 mm.

Se utilizaron probetas cúbicas de 10 cm de arista, dado que en el laboratorio no dispone de probetas de diámetro 100 mm ni de maquinaria necesaria para aserrar éstas. Entendemos que el cambio de geometría no influirá en el procedimiento dado que la formulación necesaria para el ensayo permite introducir el valor de la superficie en contacto con el agua. De la misma forma, la altura de la probeta no forma parte de la formulación, influyendo únicamente en un aumento del tiempo necesario para establecer el equilibrio entre la cara de la probeta en contacto con el agua y la opuesta. Este hecho se traduce en que las curvas de capacidad de succión estarán formadas por una pequeña zona parabólica al inicio del ensayo debido a que la succión es elevada, para luego convertirse en una línea recta a medida que la succión disminuye. Dada la altura de la probeta utilizada no se observan tendencias asintóticas de la capacidad de succión para los tiempos de ensayo utilizados (Cruz Carrasco, 2014).

Para la determinación del ensayo, se utilizan 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. Cada una de las probetas han sido curadas bajo agua a $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. La determinación de los parámetros indicados se realiza a 28 días de edad.

El ensayo consiste en sumergir cada una de las probetas en agua de manera que ésta solo pueda ser absorbida por la parte inferior de la misma. Para ello se impermeabiliza 2 cm de la parte inferior de las caras laterales. El nivel de agua debe ser de 5 mm superior a la superficie de hormigón en contacto con el agua, tal y como queda ilustrado en la figura 5.2.

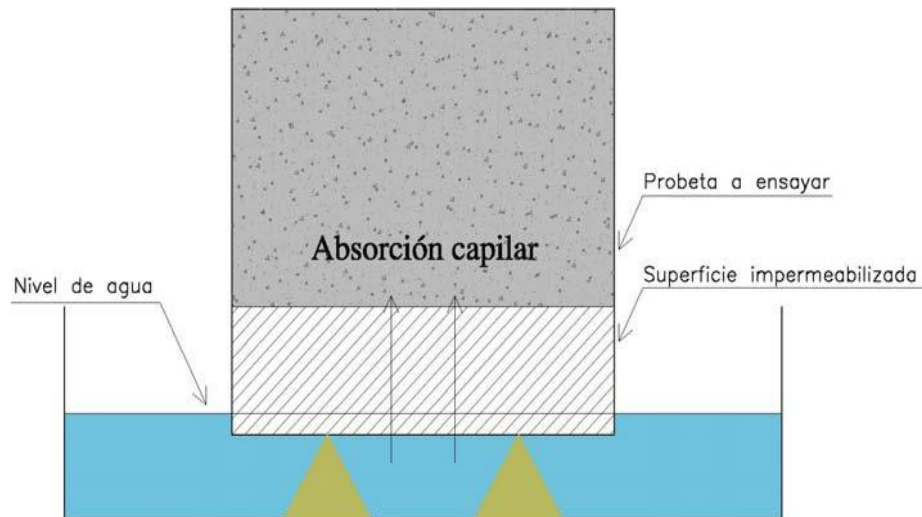


Figura 5-2. Esquema del ensayo de succión capilar (Cruz Carrasco, 2014)

Para la superficie de absorción se utilizaron una de las caras de la probeta en contacto con el encofrado liso de modo que en todo momento se han evitado coqueas, exfoliaciones, textura rugosa o alta porosidad.

Inicialmente y dado que las probetas se curan durante 28 días sumergidas en agua, se procede a secarlas completamente. Para ello se introducen en una estufa a $50^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, en nuestro caso 4 días. De esta forma el proceso de secado es lento y no produce fisuras que podrían arrojar resultados erróneos en el ensayo.

Una vez acabado el proceso de secado se introducen las probetas en una doble bolsa de polietileno, dejándolas enfriar hasta temperatura ambiente durante 24 horas.

Realizada esta operación se procede al pesado de las probetas, obteniendo el peso seco de la muestra, M_s .

Seguidamente se introducen las probetas en el recipiente con agua, de forma inclinada para facilitar la humectación de la superficie, y con el objeto de evitar formación de burbujas de aire. El recipiente del ensayo se tapa para procurar alcanzar una humedad de equilibrio del aire mayor al 95% y para reducir la evaporación por las bases de las probetas.

En los tiempos de 0 (inicio del ensayo), 5, 10, 30, 60, 90 min, 2, 3, 12, 24, 48 y 72 horas (final del ensayo), se retiraron cuidadosamente cada una de las probetas del

recipiente y se procedió al secado con un paño escurrido y húmedo de la base de absorción y las superficies laterales impermeabilizadas. Seguidamente se pesaron para determinar la masa húmeda M_{ht} . Se realizaron más medidas que las estrictamente indicadas por la norma de forma que hemos aumentado el número de puntos para calcular los parámetros del ensayo.

Para cada una de las probetas en el instante de lectura t , se determina el incremento de masa por unidad de superficie C_t , mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{M_{ht} - M_s}{A} \quad [5.6]$$

Siendo:

C_t : incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta en el instante de lectura t , en gramos/cm².

M_{ht} : masa húmeda de la probeta en el instante de lectura t , en gramos.

M_s : masa seca de la probeta, en gramos.

A : superficie de la sección transversal de la probeta en contacto con el agua, en cm².

La capacidad de succión capilar de cada probeta, es el valor del incremento de masa por unidad de superficie de la sección transversal dicha probeta, en el instante de medida t , determinado según la ecuación [5.6].

La velocidad de succión capilar vendrá determinada por la pendiente de la recta obtenida mediante el ajuste por mínimos cuadrados de los valores de la capacidad de succión capilar relativa a los datos obtenidos durante las 72 horas que dura el ensayo. En la figura 5-3, se muestran las probetas ensayadas y el detalle de la impermeabilización realizada.



Figura 5-3. Probetas en contacto con agua durante el ensayo de succión

5.3.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.3 se indican los valores obtenidos de la capacidad de succión capilar para cada tipo de hormigón.

| Tiempo | Tipo de hormigón | | | |
|--------|------------------|--------|--------|--------|
| | HC | HAC | HCE | HACE |
| 0' | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5' | 0,0007 | 0,0002 | 0,0004 | 0,0005 |
| 10' | 0,0007 | 0,0003 | 0,0005 | 0,0007 |
| 30' | 0,0008 | 0,0004 | 0,0008 | 0,0009 |
| 60' | 0,0010 | 0,0005 | 0,0010 | 0,0011 |
| 90' | 0,0010 | 0,0006 | 0,0012 | 0,0012 |
| 2 h | 0,0011 | 0,0006 | 0,0013 | 0,0014 |
| 3 h | 0,0012 | 0,0007 | 0,0015 | 0,0016 |
| 12 h | 0,0017 | 0,0011 | 0,0019 | 0,0023 |
| 24 h | 0,0023 | 0,0016 | 0,0024 | 0,0031 |
| 48 h | 0,0025 | 0,0017 | 0,0027 | 0,0037 |
| 72 h | 0,0028 | 0,0019 | 0,0029 | 0,0041 |

Tabla 5.3 Valores medios de la capacidad de succión capilar

En la figura 5-4 se representan las curvas de capacidad de succión capilar en función del tiempo, para cada uno de los hormigones. En todos los casos estudiados, los hormigones presentan una evolución de la capacidad de succión muy similar, siendo las curvas de succión-tiempo crecientes. Las curvas de succión deberían de estar formadas por una línea recta para tiempos inferiores a 120 minutos, para posteriormente tender a formas parabólicas a medida que avanza el ensayo, debido al equilibrio con la cara opuesta en contacto con el agua. En nuestro caso se verifica dicha geometría.

El coeficiente de succión para cada tipo de hormigón vendrá determinado por la pendiente de la recta de regresión relativa a los datos obtenidos durante las 72 horas que dura el ensayo. Para ello en la figura 5-5 se representa gráficamente los valores de la capacidad de succión con su recta de regresión para los hormigones estudiados.

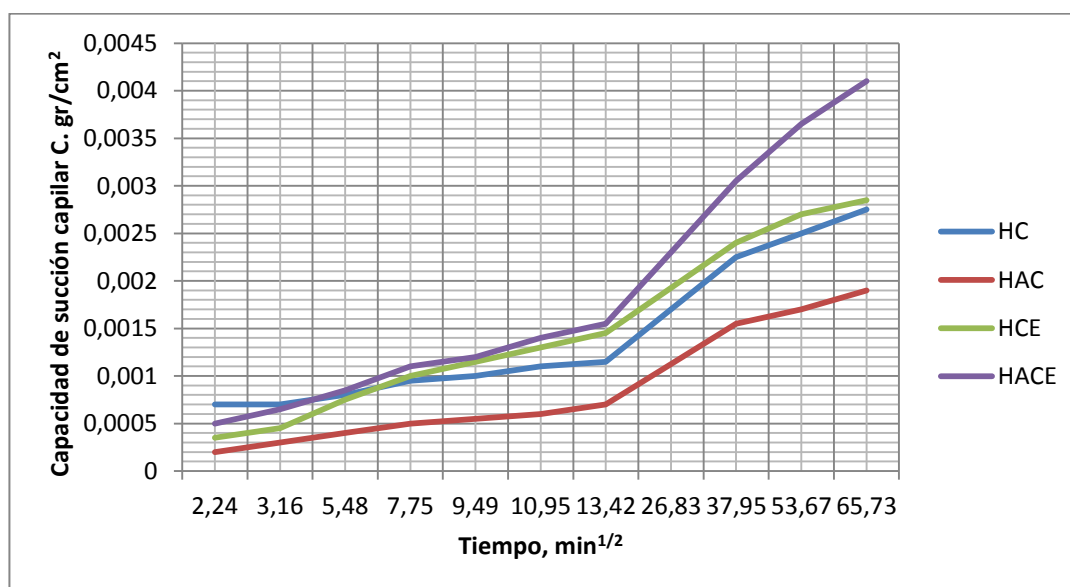


Figura 5-4. Curvas de capacidad de succión de los hormigones estudiados.

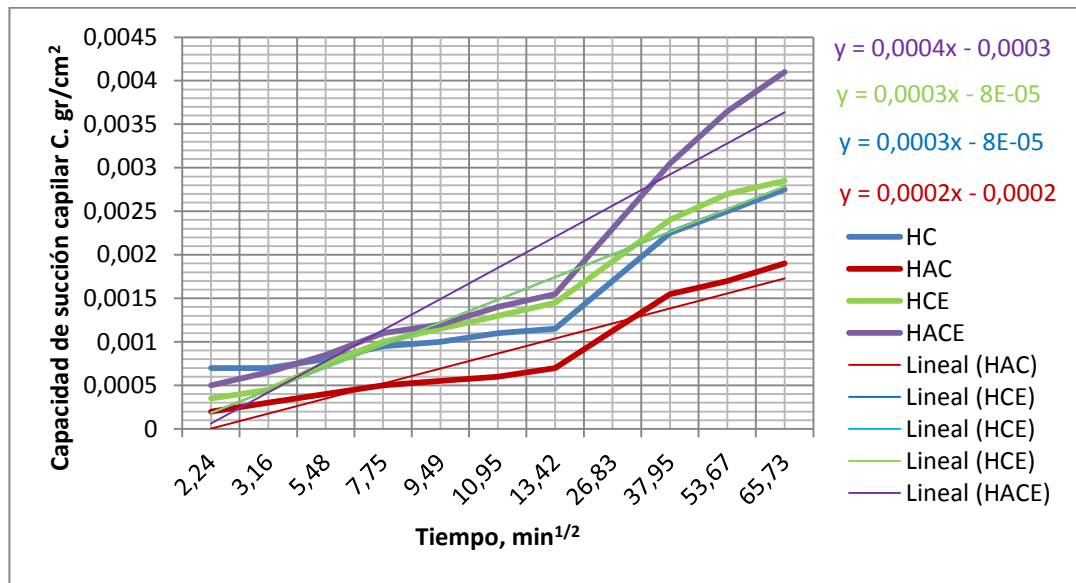


Figura 5-5. Rectas de regresión de los hormigones ajustada a los valores de capacidad de succión para un periodo de 72 horas.

Realizando el proceso de ajuste de los datos experimentales obtenidos durante el tiempo de ensayo para cada uno de los hormigones, se obtienen los valores del coeficiente de succión para cada tipo de hormigón definidos en la tabla 5.4.

| Tipo Hormigón | Coefficiente de succión, S (mm/min ^{1/2}) |
|---------------|---|
| HC | 3,00E-04 |
| HAC | 2,00E-04 |
| HCE | 3,00E-04 |
| HACE | 4,00E-04 |

Tabla 5-4 Coeficientes de succión de los tipos de hormigón estudiados

El hormigón HC y HCE (convencionales) resultan con un coeficiente de succión similar pudiendo afirmar que la capacidad de succión, para el rango de sustitución realizado, no influye cuando incorporamos las escorias de horno de arco eléctrico.

Respecto al hormigón HACE y al HAC (autocompactables) se observa que se han duplicado los valores del coeficiente de succión del HACE respecto del HAC. Los HACE aumentan un 33% los valores de succión de los HC.

5.3.4 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo de succión de agua:

- El hormigón HCE se comporta de forma similar a los HC respecto a los valores de succión.
- El hormigón HACE aumenta un 33% los valores de succión de los HC.

5.4 Ensayo de permeabilidad al agua bajo presión

5.4.1 Introducción

El ensayo se fundamenta en introducir agua en la masa de hormigón induciendo una gradiente de presión. Este gradiente de presión es perfectamente conocido al ser un valor fijado por el usuario.

Para la determinación de la penetración del agua se ha realizado el ensayo definido en la norma UNE-EN 12390-8:2009.

La impermeabilidad al agua del hormigón es una condición necesaria, aunque no suficiente, para lograr un comportamiento adecuado frente a los ataques agresivos. Por otro lado, la permeabilidad no es el único mecanismo que interviene en los procesos de degradación del hormigón, ya que existen otros ligados al fenómeno de absorción de agua y de difusión de gases e iones (Fomento, 2008).

Una forma de garantizar la durabilidad del hormigón, así como su colaboración a la protección de las armaduras frente a la corrosión, consiste en obtener un hormigón con una permeabilidad reducida. Para obtenerla son decisivas la elección de una relación agua/cemento suficientemente baja, la compactación idónea del hormigón, un contenido adecuado de cemento y la hidratación suficiente de éste, conseguida con un cuidadoso curado.

En el caso de ensayos realizados con valores de presión superiores a 2,75 MPa existe la posibilidad de que se produzcan alteraciones en la microestructura del hormigón (Neville, 2012). Estas alteraciones producirían el bloqueo de los poros por sedimentación y/o la hidratación de partículas de cemento que se encuentren deshidratadas. Dichas alteraciones en la microestructura se denomina autosellado y produce una disminución de la permeabilidad con el tiempo. Diferentes estudios realizados por la Universidad de Toronto (Hearn y col., 1994) demuestran que a pesar de que no existan partículas de cemento por rehidratar se produce el fenómeno de autosellado, fundamentando este fenómeno en las disoluciones o redistribuciones del hidróxido de calcio.

Existen una serie de factores que influyen en los valores de penetración del agua en la masa de hormigón. Algunos de estos factores los indicamos a continuación:

- Relación agua/cemento
- Curado
- Compactación
- Fisuración
- Heterogeneidades

La forma más adecuada de reducir los ataques al hormigón es conseguir que sus poros ocupen el menor volumen posible y formen una red capilar poco intercomunicada. Este es el objetivo que se pretende conseguir cuidando cada uno de los factores anteriormente indicados.

La durabilidad del hormigón está íntimamente ligada, entre otros factores, al grado de impermeabilidad que posea para hacer frente a la protección de las armaduras. Debido a ello se debe estudiar la permeabilidad de un hormigón sobre todo en el caso donde el medio sea de una agresividad especial. La instrucción de hormigón estructural EHE-08 en su artículo 37.3.3 establece las dos condiciones simultáneas que debe cumplir un hormigón para considerarlo suficientemente impermeable. Estas condiciones en función de la clase de exposición ambiental serían:



| Clase de exposición ambiental | Profundidad máxima | Profundidad media |
|---|-------------------------------|------------------------------|
| IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados) | 50 mm | 30 mm |

Tabla 5-5 Profundidad de penetración máxima y media según la exposición ambiental según EHE-08

El hormigón estudiado en la tesis plantea su uso en estructuras sometidas a las clases de exposición IIIa. Las profundidades máximas y medias de penetración atendiendo a la tabla 5.5 serían:

Profundidad máxima de penetración 50 mm.

Profundidad media de penetración 30 mm.

5.4.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en la masa de hormigón endurecido. Para ello se ha realizado la medición sobre 3 probetas diferentes para los distintos tipos de hormigón endurecido, pero siempre fabricadas en la misma amasada.

Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría cilíndrica $\phi 15 \times 30$ cm. Cada una de las probetas han sido curadas bajo agua a $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a 28 días de edad.

Inicialmente y dado que las probetas se han curado durante 28 días sumergidas en agua, se procede a secar las muestras completamente. Para ello se introducen en una estufa a $50^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ hasta masa constante, que en nuestro caso han sido 4 días. De esta forma el proceso de secado es lento y no produce fisuras que podrían arrojar resultados erróneos en el ensayo.

Para la realización del ensayo se colocan las probetas a ensayar en el equipo (Figura 5-6), de forma que no se aplique el agua a presión sobre la cara fratasada de éstas. Una vez colocada de forma correcta aplicamos agua a una presión de 500 ± 50 kPa durante un tiempo de 72 ± 2 h. Periódicamente se observan las superficies de la probeta

no expuestas al agua a presión para identificar la posible presencia de agua. En todos los casos no se observó presencia de agua por lo que los ensayos fueron válidos.

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado se retira la probeta del equipo de ensayo, se limpia la cara a la que se aplicó la presión de agua y se rompe en dos mitades perpendicularmente a la cara en la que se aplica la presión de agua.



Figura 5.6. Detalle de probeta montada en equipo durante el ensayo de permeabilidad al agua bajo presión

Una vez rota la probeta en dos mitades se marca en una de ellas el frente de penetración. Una vez marcado dicho frente, se calca a papel milimetrado y se realizan las mediciones de la profundidad de penetración máxima y media redondeada al milímetro más próximo (Figura 5-7).



Figura 5-7. Frente de penetración de agua de una amasada HACE

5.4.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.5 se detallan los valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al agua bajo presión para cada tipo de hormigón.

| Tipo Hormigón | Penetración (mm) | |
|---------------|------------------|-------|
| | Máxima | Media |
| HC | 12 | 4 |
| HAC | 17 | 5 |
| HCE | 19 | 7 |
| HACE | 48 | 27 |

Tabla 5-6 Valores medios de permeabilidad al agua bajo presión

Los resultados obtenidos en el ensayo cumplen con los requisitos exigidos por la EHE-08 para el tipo de exposición IIIa donde se limita la profundidad máxima de penetración a 50 mm y la profundidad media a 30 mm según se indicó en la tabla 5.5.

Analizando los resultados obtenidos se afirma que la incorporación de escorias de horno de arco eléctrico aporta valores más desfavorables en cuanto al requisito de

impermeabilidad del hormigón, si bien los resultados se encuentran dentro de la normativa aplicable.

5.4.4 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo de penetración de agua bajo presión:

- En los dos casos los resultados del ensayo se encuentran dentro de los valores permitidos por la EHE.
- En el caso de los hormigones HCE no genera ningún tipo de duda su aplicación en el ambiente de exposición planteado.
- Para el caso de los HACE, dado que los valores se encuentran en el límite normativo, deberemos de verificar mediante del ensayo de carbonatación el comportamiento del hormigón respecto a su estado de pasivación.

5.5 Resistencia a compresión

5.5.1 Introducción

La resistencia a compresión es la característica mecánica principal del hormigón y se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área. De entre todas las sollicitaciones a las que el hormigón hace frente, la resistencia que presenta frente a los esfuerzos de compresión es la más elevada de todas. Debido a ello es ésta característica la que presenta un mayor interés en su determinación dado que, la mayor parte de las aplicaciones del hormigón, hace uso de esa capacidad resistente, además de ser un índice de magnitud de otras propiedades del mismo (Fernández-Cánovas, 2007).

Determinar ésta propiedad del hormigón es el objeto principal en la mayoría de los estudios, debido a que en la mayor parte de las aplicaciones se hace uso y se relaciona de alguna forma la capacidad resistente frente a esfuerzos de compresión con cualquier otra propiedad objeto de investigación.

Las resistencias mecánicas del hormigón están influenciadas por un gran conjunto de factores, pero fundamentalmente depende de (Fernández-Cánovas, 2007; Neville, 2012):

- **Materiales.** El tipo y la categoría del cemento deber ser los adecuados. Los áridos se elegirán sabiendo que el hormigón no pueden tener una resistencia mayor a los que poseen éstos, dado que rompería antes el árido que el hormigón.
- **Cantidad de cemento.** A mayor cantidad de cemento, mayor será la cantidad de pasta, y en consecuencia la docilidad también lo será dando lugar a menos huecos y por tanto a una mayor resistencia.
- **Relación agua/cemento.** La relación agua/cemento es posiblemente el factor que más influencia tiene en la resistencia de un hormigón. Aquellos hormigones en los que la relación agua/cemento es baja, la ganancia de resistencia crece más rápidamente que en el caso de altos valores de esa relación. Este fenómeno es consecuencia de que cuanto más baja es la relación agua/cemento, más próximos se encuentran los granos de cemento y al hidratarse, el gel formado puede crear con mayor rapidez un sistema estable. Por otro lado, relaciones agua/cemento altas, darán lugar a resistencias menores, pero si esa relación es demasiado baja, posiblemente se tendrá dificultad para compactar adecuadamente el hormigón por ser éste demasiado seco, quedando en su masa un gran volumen de huecos, reduciendo la resistencia a compresión. A igualdad de relación agua/cemento y contenido de éste último, las resistencias dependen del grado de hidratación del cemento, de sus propiedades químicas y físicas, de su temperatura de hidratación e incluso, de las posibles fisuras que se hayan formado por efecto de la exudación.
- **Influencia del tamaño máximo del árido.** En un principio parece lógico pensar que cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido menor será la superficie específica que presente y menor la cantidad de agua necesaria para su mojado y, por consiguiente, mayor la resistencia obtenida en el hormigón. Según se desprende de la experiencia eso no ocurre de esa

forma sino que, dependiendo de la relación agua/cemento, existe una influencia más o menos negativa del tamaño del árido en el sentido de que cuanto mayor sea éste menor será la resistencia del hormigón. Este efecto es debido a que a mayor tamaño de árido menor superficie adherente existirá entre la pasta y él, y por otra parte, a que la pasta poseerá menos libertad para experimentar deformaciones sin que sufra una microfisuración que debilite la resistencia. El módulo granulométrico del árido compuesto tiene por otra parte una gran influencia en las resistencias, tal y como se observa en la figura 5-8.



Figura 5-8. Influencia del módulo granulométrico del árido en la resistencia relativa a compresión (Fernández-Cánovas, 2007)

- Influencia de la forma, dimensiones de las probetas y la ejecución del ensayo. La resistencia a compresión de un hormigón determinada por medio de la rotura de una probeta sometida a una carga axial sufriría alteraciones como consecuencia de diferentes factores, como son: la dureza de los platos, el efecto probeta-plato, velocidad de aplicación de las cargas, tamaño y esbeltez de las probetas e incluso el propio diseño de la máquina. Aparte de estos factores hay que tener en cuenta otros que son comunes para todos los ensayos, como: falta de paralelismo entre las caras de la probeta sobre las que se realiza el ensayo, descentrado de la probeta, deficiente acabado de las caras sobre las que se ejerce la carga,

el que las probetas estén húmedas o secas, etc. Las dimensiones de las probetas también influyen en la resistencia a compresión. Si bien todos los métodos de cálculo y las especificaciones de la instrucción de hormigón estructural (EHE-08) se refieren a características del hormigón endurecido obtenidos mediante ensayos en probetas cilíndricas $\phi 15 \times 30$ cm es posible realizar conversiones a probetas cúbicas de 15 cm de arista según el artículo 86.3.2 de la citada instrucción. La expresión utilizada para realizar la conversión es la siguiente:

$$f_c = \lambda_{cil, cub 15} \cdot f_{c, cúbica} \quad [5.7]$$

Donde:

f_c : Resistencia a compresión, en N/mm^2 , referida a probeta cilíndrica de $\phi 15 \times 30$ cm.

$f_{c, cúbica}$: Resistencia a compresión, en N/mm^2 , obtenida a partir de ensayos realizados en probetas cúbicas de 15 cm de arista.

$\lambda_{cil, cub15}$: Coeficiente de conversión, según la tabla 5.7.

| Resistencias probeta cúbica f_c (N/mm^2) | $\lambda_{cil, cub 15}$ |
|--|---|
| $f_c < 60$ | 0,90 |
| $60 \leq f_c < 80$ | 0,95 |
| $f_c \geq 80$ | 1,00 |

Tabla 5-7 Coeficientes de conversión probetas cúbicas. [Fuente: [5.24] EHE-08 artículo 86.3.2]

En nuestro caso hemos aplicado los coeficientes un coeficiente de corrección de 0,82, extraídos de la publicación (Parron-Vera y col., 2008).

- La temperatura. Atendiendo a investigaciones realizadas (Carino, 1983) el curado a temperaturas más altas presenta resistencias a compresión menores para tiempos de curado superiores a 3 días, sin embargo las probetas curadas a temperaturas bajas tienen un comportamiento

contrario, con bajas resistencias de compresión edades tempranas, que aumentan de manera exponencial hasta obtener mayores valores a tiempo de curados más largos.

- La influencia de la edad del hormigón. El hormigón experimenta una ganancia de resistencias con el tiempo dependiendo del tipo y categoría de cemento empleado, de la relación agua/cemento con que se haya fabricado aquel y de la temperatura a que esté sometido. El conocimiento de la evolución de las resistencias de un hormigón con el tiempo es de suma utilidad puesto que permite predecir la resistencia que tendría un hormigón a 28 días en función de la que posea a 7 días e incluso a menor edad. No es posible fijar una regla fija de la evolución de las resistencias con la edad, debido a las muchas variables que intervienen en ella.

5.5.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo evaluar la resistencia a compresión del hormigón endurecido a diferentes edades. Para ello se han realizado 3 amasadas por cada tipo de dosificación planteada. Para cada dosificación se han roto a: 1, 7, 28 y 90 días. Para cada rotura se han ensayado 3 probetas obteniendo el valor medio de las tres. En todos los casos las probetas estudiadas han sido fabricadas en la misma amasada de forma que se disminuyan los posibles errores.

La geometría de las probetas utilizada han sido cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm. Los motivos para utilizar esta geometría en lugar de cilíndricas $\phi 15 \times 30$ cm han sido:

- No requieren de refrentado de la cara que se ha fratasado para realizar el ensayo de compresión.
- Se requiere de menor material para realizar los ensayos.
- Se elimina la emisión de gases tóxicos a la atmósfera.
- Mejora de la ergonomía del trabajador que precisa de manipular menor carga.

- Aumento de las productividades en el capítulo de ensayos.
- Reducción del material de desecho resultante de la rotura de probetas.

Cada una de las probetas han sido curadas bajo agua a $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a las edades de 7, 28 y 90 días de edad. En todos los casos las probetas han permanecido bajo agua hasta su rotura.

Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-3:2009/AC: 2011. Este ensayo requiere de maquinaria provista de un sistema de regulación de cargas tal que éstas puedan aumentarse de forma continua y sin saltos bruscos. La máquina ha de disponer de dos platos de acero con caras planas. El espesor de los platos debe asegurar la indeformabilidad los mismos durante el tiempo del ensayo. La maquinaria utilizada cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN 12390-4:2001. En la Figura 5-9 se ilustra la prensa de rotura utilizada.



Figura 5-9. Prensa de rotura utilizada en el ensayo

Las probetas se comprimen hasta la rotura en la máquina de ensayos, registrando la máxima carga alcanzada por la probeta y calculando la resistencia a compresión del hormigón.

El procedimiento seguido para la determinación de los valores de ensayo han sido los siguientes:

1. Preparación y posicionamiento de las probetas.

Se limpian los platos de carga de la máquina, eliminando cualquier resto de material en las superficies de la probeta que han de estar en contacto con dichos platos. Se seca el exceso de humedad de la superficie de la probeta antes de ponerla en la máquina de ensayos. Posteriormente se coloca la probeta cúbica de forma que la carga se aplique perpendicularmente a la dirección de hormigonado.

2. Carga

Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Se aplica la carga inicial, que aproximadamente es el 30% de la carga de rotura. Después de esto, se aplica la carga a la probeta suavemente y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada $\pm 10\%$, hasta que no soporte más. A continuación se registra la carga máxima indicada en kN.

3. Valoración del tipo de rotura.

En la figura 5-10 se dan ejemplos de tipos de rotura satisfactorios durante el ensayo de resistencia a compresión.

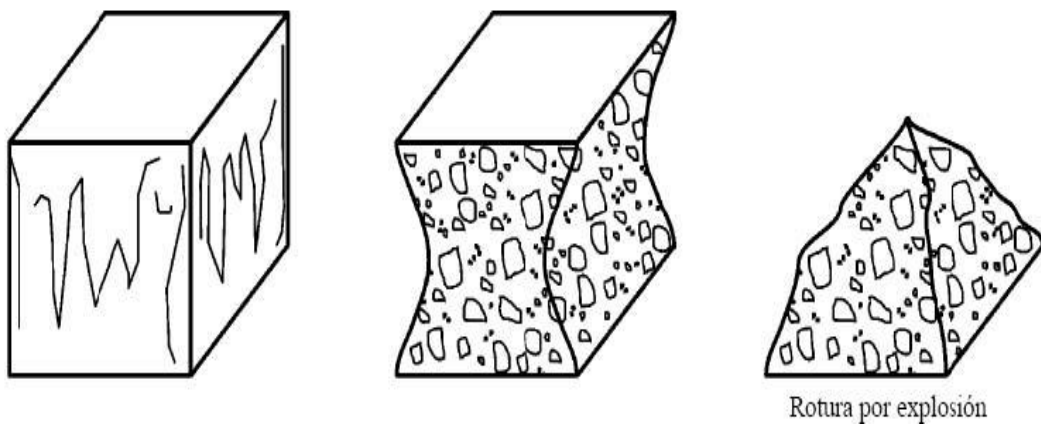


Figura 5 -10. Roturas satisfactorias en probetas cúbicas (UNE 12390-3:2009/AC: 2011)

4. Expresión de los resultados.

La resistencia a compresión vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

[5.8]

Donde:

f_c : resistencia a compresión, en MPa (N/mm^2)

F: carga máxima de rotura, en N

Ac: área transversal de la probeta sobre la actúa la fuerza de compresión, calculada a partir de las dimensiones normalizadas de la probeta.

5.5.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.8 se indican para cada tipo de hormigón estudiado las cargas máximas de rotura y las resistencias medias a compresión obtenidas en probetas 10x10x10 cm para las edades de 7, 28 y 90. En la figura 5-11 se representan los valores de resistencia media a compresión.

| Tipo Hormigón | Resistencia a Compresión (N/mm^2) | | | |
|---------------|---------------------------------------|--------|---------|---------|
| | 1 día | 7 días | 28 días | 90 días |
| HC | 24,8 | 45,5 | 52,1 | 62,2 |
| HAC | 27,3 | 47,9 | 56,0 | 65,8 |
| HCE | 26,7 | 53,0 | 60,1 | 73,2 |
| HACE | 19,6 | 28,6 | 34,6 | 42,1 |

Tabla 5.8. Resistencia media a compresión (N/mm^2) en probetas cúbicas 10x10x10 cm

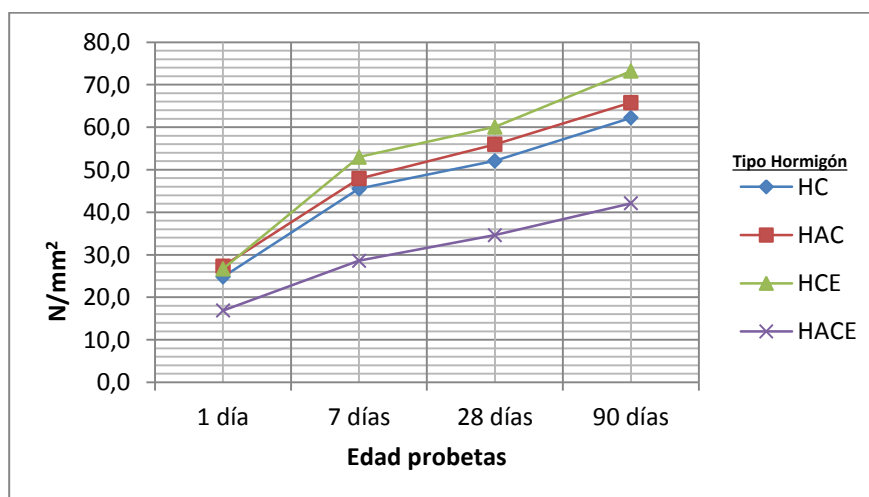


Figura 5-11. Resistencia a compresión para diferentes edades

Analizando los resultados expuestos en la figura 5-11 se aprecia una diferencia considerable del HACE respecto al resto de tipos de hormigón propuestos. Las resistencias del HACE respecto al HAC son inferiores en un 38%. A pesar de este descenso en las resistencias el HACE cumpliría con los requisitos mínimos de durabilidad relativos a la clase de exposición IIIa que es 30 MPa para hormigón armado y pretensado.

En otro orden, las resistencias obtenidas a 24 horas indican unos valores satisfactorios en los cuatro casos.

Respecto a la evolución de resistencias a los 90 días el incremento de resistencias es similar en los cuatro casos.

Es de destacar el comportamiento de los HCE que mejoran los resultados de resistencias de los otros tres tipos de hormigón llegando a resistencias de 60 MPa a 28 días y de 70 MPa a los 90 días. Hay que recordar que la dosificación para este tipo de hormigones contempla 325 kg de cemento por m³ de hormigón.

Los valores de resistencia y la evolución a temprana edad de los hormigones HCE y HACE anticipan un correcto comportamiento para su empleo en la industria de prefabricado. Para avanzar el estudio relativo a la aplicabilidad de estos tipos de hormigón en el prefabricado sería necesario estudiar la evolución de resistencias aplicándoles los tratamientos térmicos utilizados en la prefabricación como es el curado acelerado con vapor de agua y determinar las resistencias en las primeras 12 horas, se distinguirían dos procesos:

- Estudio de las resistencias en las 5 horas primeras de endurecimiento.
- Estudio de las resistencias en las 12 horas primeras de endurecimiento.

5.5.4 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos en el ensayo de compresión:

- El hormigón HCE mejora las resistencias a compresión respecto a los HC a igualdad de dosificación de cemento y relación a/c.

- La resistencia a compresión de los HCE y HACE a 1 día vaticinan un correcto comportamiento en el prefabricado de hormigón.
- El hormigón HACE disminuye en un 38% respecto a los HAC la resistencia a compresión a igualdad de dosificación de cemento y relación a/c.
- El hormigón HCE y HACE cumplen con los requisitos de durabilidad relativos a clase resistente para un ambiente IIIa de 30 MPa.

5.6 Resistencia a tracción indirecta. Ensayo Brasileño

5.6.1 Introducción

El hormigón es un material que se comporta de forma adecuada frente a los esfuerzos de compresión pero no tiene un buen comportamiento frente a los esfuerzos de tracción, siendo su resistencia a tracción alrededor del 10% de su resistencia a compresión.

La determinación de la resistencia a tracción pura de un hormigón es muy difícil de determinar debido a las tensiones secundarias que suelen introducirse al realizar los ensayos y aunque con el empleo de elementos de anclaje formados por cabezas unidas con resina epoxi al hormigón y dotadas de barras articuladas pueden conseguirse valores bastantes fiables, el sistema es lento y costoso. A fin de evitar estos inconvenientes se emplean otros ensayos que permitirán la determinación del valor de la resistencia a la tracción. Uno de los ensayos alternativos comúnmente utilizados es el llamado ensayo de tracción indirecta o ensayo brasileño, en honor al ingeniero brasileño autor del ensayo, Lobo Carneiro.

En la resistencia a la tracción tienen una gran influencia la naturaleza, procedencia y tamaño máximo del árido, de forma que áridos procedentes de machaqueo y de menor tamaño dan valores más altos de resistencia a tracción. También influyen el contenido de cemento y la edad del hormigón (Fernández-Cánovas, 2007).

Este método consiste en la rotura de la probeta, generalmente cilíndrica, mediante la aplicación de una carga de compresión en dos generatrices diametralmente

opuestas. Debido a este estado tensional la rotura se produce por tracción cuando las tensiones que aparecen en el plano de aplicación de la carga alcanzan el valor de la resistencia a tracción del hormigón, comenzando su fractura y propagándose ésta por el plano diametral. El estado tensional de la probeta no es uniaxial tal y como se indica en las figuras 5-12 y 5-13, soportando el hormigón tensiones de compresión que son perpendiculares a las tensiones de tracción. En el momento de la fractura se alcanzan en valores absolutos, tensiones hasta tres veces superiores a la resistencia a la tracción (Fernández-Cánovas, 2007).

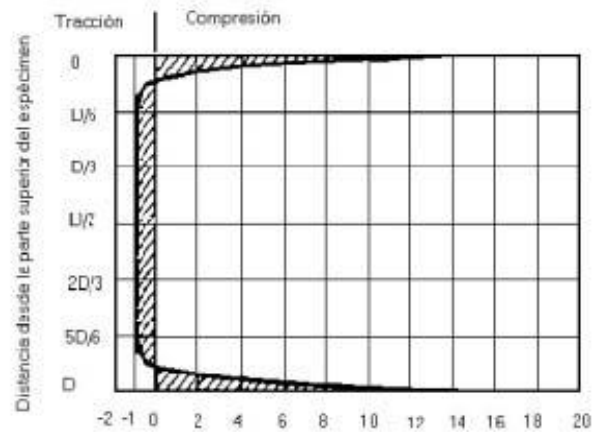
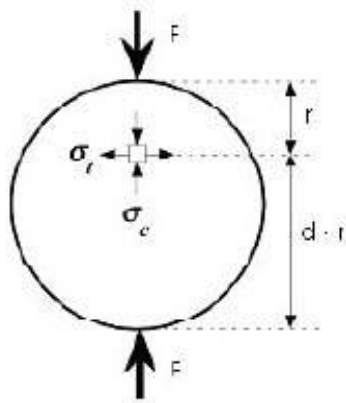


Figura 5-12. Tensiones aplicadas en el brasileño ensayo brasileño

Figura 5.13. Distribución de tensiones en el ensayo (Fernández-Cánovas, 2007)

Debido a que el hormigón posee una relación de resistencias a compresión/tracción alta, la fractura que se produce en las probetas durante el ensayo es debida a las tensiones de tracción. Para la determinación del valor de la resistencia a la tracción indirecta se emplea la siguiente formulación:

$$f_{ti} = \frac{2P}{\pi L \phi}$$

[5.9]

Siendo:

f_{ti} : resistencia a tracción indirecta, en N/mm^2

P: carga de rotura de la probeta en el ensayo, en N

L: longitud de la línea de contacto con la probeta, en mm

\emptyset : dimensión de la sección transversal de la probeta, en mm

Tanto el Eurocódigo 2, el Código Modelo CEB-FIP-90 y la EHE-08, establecen la relación existente entre la tracción pura del hormigón, conocido el valor de la tracción indirecta. Esta relación se refleja en la siguiente expresión:

$$f_{ct} = 0,90 \cdot f_{ci} \quad [5.10]$$

Siendo:

f_{ct} : resistencia a tracción pura, en N/mm^2

f_{ci} : resistencia a tracción indirecta, en N/mm^2

5.6.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a la tracción indirecta. Para ello se utiliza la medición sobre 3 probetas diferentes para los distintos tipos de hormigón endurecido, pero siempre fabricadas en la misma amasada.

Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría cilíndrica $\emptyset 15 \times 30$ cm para cada tipo de hormigón. Cada una de las probetas han sido curadas bajo agua a $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a 28 y 90 días de edad.

Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-6:2010.

Previamente a la colocación de las probetas en la máquina de ensayo se elimina el exceso de humedad dado éstas han sido curadas bajo agua. Para la realización del ensayo colocamos las probetas a ensayar en el equipo mostrado en la figura 5-14 de forma que éstas se colocan centradas en la prensa, utilizando para ello soportes temporales. Se vigiló en todo momento que durante la carga el plato superior fuese paralelo al inferior.

Una vez colocada la probeta aplicamos un incremento de tensión comprendido entre 0,04 MPa/s y 0,06 MPa/s, que en nuestro caso tomamos 0,05 MPa/s. La carga fue aplicada de forma suave, sin brusquedades, incrementándose a la velocidad de carga

seleccionada $\pm 10\%$, hasta que la probeta no soporte más carga y rompa por su plano diametral.

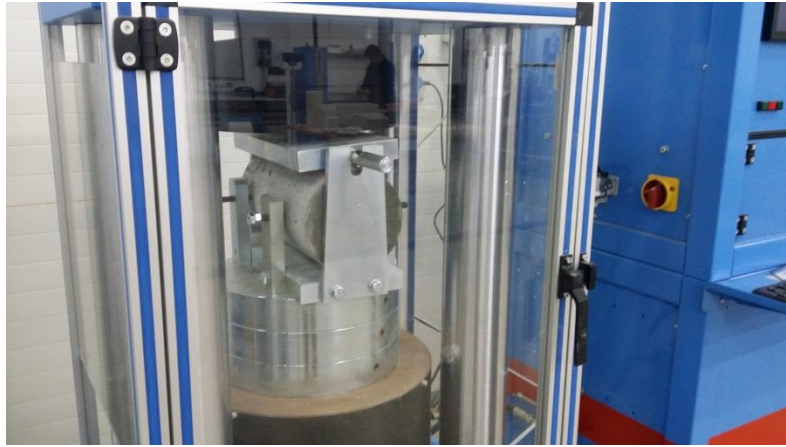


Figura 5-14. Equipo utilizado en el ensayo de tracción indirecta.

La velocidad de carga requerida viene dada por la expresión:

$$R = \frac{s \cdot \pi \cdot L \cdot d}{2}$$

[5.11]

Siendo:

R velocidad de carga requerida en N/s.

L longitud de la probeta en mm.

d dimensión de la sección transversal en mm

s incremento de la tensión en MPa/s

Introduciendo en la ecuación [5.9] los valores de la longitud y diámetro (300 mm y 150 mm respectivamente), se obtiene la expresión que determina la resistencia a la tracción indirecta conocida la carga de rotura:

$$f_{ti} = \frac{2P}{\pi \cdot 300 \cdot 150} = 0,01415P$$

Donde:

f_{ti} : resistencia a tracción indirecta, en N/mm^2

P: carga de rotura, en kN

Una vez realizado el ensayo y obtenidas las dos secciones de la probeta es posible observar la distribución de los áridos y analizar si ha existido segregación del hormigón aplicando un simple criterio visual o el propuesto por Sedran y De Larrand (Sedran y Larrard, 1999). En las roturas efectuadas no se observaron segregaciones del material.

5.6.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.9 se indica para cada tipo de hormigón estudiado la resistencia a tracción indirecta obtenidos en el laboratorio tras la elaboración del ensayo Brasileño. El valor de la resistencia a la tracción indirecta se determina según la ecuación 5.9. Igualmente se indican los valores de la tracción pura obtenidos mediante la ecuación 5.10, que relaciona la tracción indirecta y la tracción pura.

| Tipo Hormigón | Carga rotura KN | Tracción (N/mm ²) | |
|---------------|-----------------|-------------------------------|-------|
| | | Indirecta | Pura |
| HC | 321 | 4,541 | 4,087 |
| HAC | 352 | 4,980 | 4,482 |
| HCE | 374 | 5,291 | 4,762 |
| HACE | 211 | 2,985 | 2,687 |

Tabla 5.9. Valores de carga de rotura en el ensayo Brasileño. Valores de tracción indirecta y pura.

Los valores obtenidos del ensayo brasileño reflejan un comportamiento similar al experimentado en los resultados a compresión. Los hormigones HC, HAC y HCE tienen comportamientos similares y resultan valores próximos a los 5 N/mm². El HCE sufre un descenso considerable y aportando un valor próximo a los 3 N/mm².

Respecto a la expresión definida en [5.10] y atendiendo a los resultados obtenidos se demuestra que la incorporación de escorias de horno de arco eléctrico no afecta a la relación entre la resistencia a compresión de un hormigón y su resistencia a tracción. En nuestro caso las relaciones encontradas oscilan entre un 8 y un 9 % cercanos al 10% definido en la EHE.

5.6.4 Conclusiones

Se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos del ensayo brasileño:

- La incorporación de escorias de horno de arco eléctrico no mejora ni perjudica las resistencias a flexión atendiendo al ensayo brasileño.
- La resistencia a flexión de un hormigón HCE es de 5 N/mm^2 .
- La resistencia a flexión de un hormigón HACE es de 3 N/mm^2 .

5.7 Resistencia a flexotracción

5.7.1 Introducción

Para evaluar la resistencia a flexotracción se dispone de dos configuraciones de montaje de la probeta. En ambas configuraciones la probeta prismática se apoya sobre rodillos separados tres veces la arista de ésta. La diferencia entre las dos configuraciones consiste en que en el primer caso la carga se ejerce sobre un rodillo centrado entre los apoyos (figura 5-15) y en el segundo caso (figura 5-16) la carga se ejerce sobre dos rodillos situados a un tercio de la luz. UNE-EN 12390-5:2009.

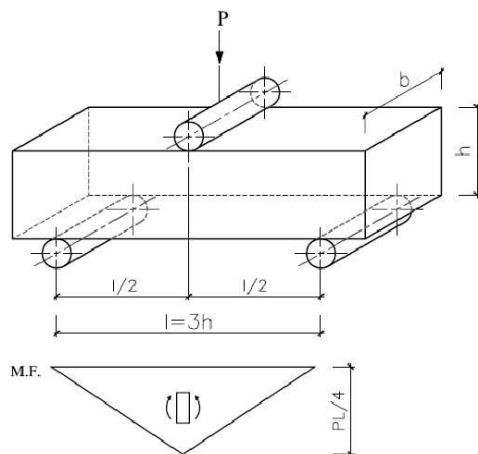


Fig. 5-15. Ensayo con carga centrada

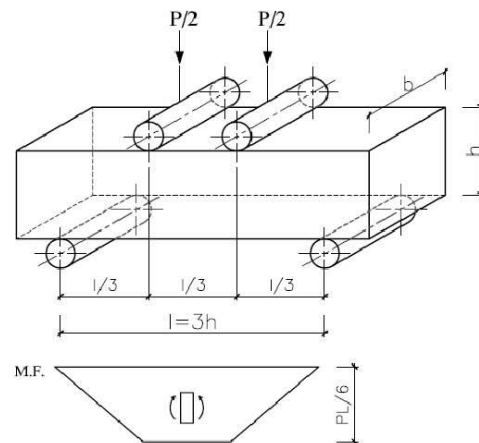


Fig. 5-16. Ensayo con carga a un tercio

En la primera configuración (figura 5-15) la ley de momentos flectores indica que el momento flector máximo se corresponde con la vertical que pasa por el punto de aplicación de la carga, afectando solo al hormigón situado en esa vertical.

En la segunda configuración la ley de momentos flectores es constante entre las líneas verticales que pasan por el punto de aplicación de las cargas, por consiguiente la rotura se producirá por el hormigón más débil de dicha zona.

A la vista de las dos posibles configuraciones, para un mismo hormigón, generalmente se obtienen valores de resistencia inferiores cuando el ensayo lo realizamos con la configuración de cargas situadas a un tercio (Fernández-Cánovas, 2007).

La resistencia a flexotracción de las probetas prismáticas se calcula mediante la expresión:

$$f_{cf} = \frac{M_r}{W} = \frac{M_r}{\frac{1}{6}bh^2}$$

[5.12]

Donde:

M_r : Momento de rotura

W : módulo resistente de la sección

b : base de la sección transversal

h : canto de la sección transversal

Para un mismo tipo de probeta, el momento resistente de la sección vendrá dado por la ley de momento flectores de la configuración del ensayo se utilice, tal y como se indica en las figuras 5-15 y 5-16.

La tensión teórica a flexotracción del hormigón viene dada por la fibra más alejada de la fibra neutra. Utilizando probetas con secciones transversales cuadradas ($b=h$) y en el caso de configuraciones con rodillo centrado, la resistencia a flexotracción se obtiene por:

$$f_{cf} = \frac{9P}{2a^2}$$

[5.13]

Por otro lado, si la configuración obedece a rodillos situados a un tercio de la luz la resistencia a flexotracción se obtiene por:

$$f_{cf} = \frac{3P}{a^2}$$

[5.14]

En ambos casos:

f_{cf} : resistencia a la flexotracción, en N/mm^2

P: carga aplicada, en N

a: arista de la probeta, en mm

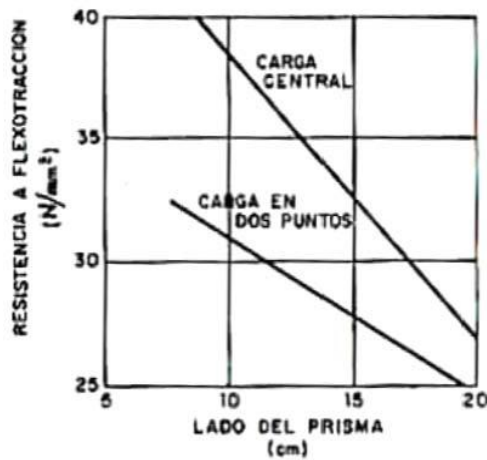


Figura 5-17. Diferencia entre los resultados obtenidos en flexotracción con carga centrada y a un tercio de la luz (Fernández-Cánovas, 2007)

La influencia de las dimensiones de las probetas es significativa y a mayor tamaño de éstas menos resistencia se obtiene como se aprecia en el gráfico de la figura 5-17.

Comparando el valor obtenido en el ensayo a tracción indirecta (ensayo brasileño) con el determinado a flexotracción, los de tracción indirecta son aproximadamente un 40% menores que los de flexotracción. Esto es debido a que, en la

aplicación de la fórmula se considera una distribución de tensiones lineal con la fibra neutra en el centro de la probeta (figura 5-18); sin embargo, cuando se va alcanzando la rotura, el diagrama de tensiones cambia de la recta AA' a la curva AA₁ de forma que $O'A_1 \approx 0,6 O'A'$; aunque el coeficiente multiplicador de $O'A'$ varía en función de las dimensiones de la probeta.

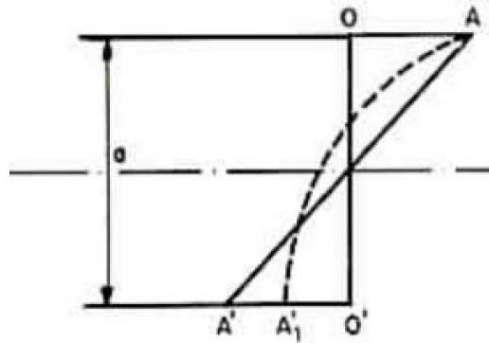


Figura 5-18. Distribución de tensiones en el ensayo de flexotracción (Fernández-Cánovas, 2007)

La relación entre resistencias a flexotracción y tracción se indica en la figura 5-19:

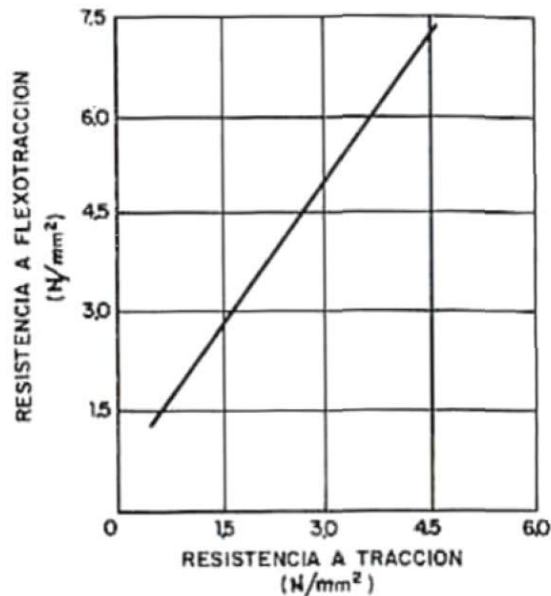


Figura 5.19. Relación entre resistencias a flexotracción y tracción pura (Fernández-Cánovas, 2007)

El Eurocódigo 2 relaciona la resistencia a tracción pura con la resistencia a flexotracción mediante la expresión:

$$f_{cf} = 0,50 \cdot f_{ctf}$$

[5.15]

Siendo:

f_{ct} : resistencia a tracción pura

f_{ctf} : resistencia a flexotracción

5.7.2 Proceso de elaboración del ensayo

Para evaluar la resistencia a flexotracción se realiza la medición sobre 3 probetas diferentes para cada tipo de hormigón endurecido, siempre fabricadas en la misma amasada. Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría prismática de dimensiones 160x40x40 mm. Cada una de ellas han sido curadas bajo agua a $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a 28 días de edad.

Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-5: 2009. De las dos configuraciones posibles para la evaluación del ensayo se utiliza aquella donde la carga se ejerce sobre en centro de la probeta. La distancia entre apoyos será la correspondiente a tres veces el canto de la probeta. El esquema del ensayo se corresponde con la figura 5-15 donde:

$$h=40 \text{ mm}$$

$$b=40 \text{ mm}$$

$$l=160 \text{ mm}$$

El ensayo ha consistido en aplicar carga a la probeta hasta la rotura, utilizando el equipo indicado en la Figura 5-20.



Figura 5-20. Equipo utilizado en el ensayo de flexotracción

Previamente a la colocación de las probetas en la máquina de ensayo se elimina el exceso de humedad dado que éstas han sido curadas bajo agua. No fue necesario proceder al refrentado o pulimentado de las probetas ya que el contacto de la prensa con la probeta se hizo eligiendo dos caras opuestas perfectamente planas, quedando la única cara rugosa en uno de los laterales.

Para la realización del ensayo se coloca la probeta a ensayar en el equipo de forma que ésta se sitúe centrada en la prensa, utilizando para ello soportes temporales. Se vigiló en todo momento que durante la carga el plato superior fuese paralelo al inferior.

Una vez colocada la probeta se aplica un incremento de tensión comprendido entre 0,04 MPa/s y 0,06 MPa/s, que en nuestro caso 0,05 MPa/s. La carga fue aplicada de forma suave, sin brusquedades, incrementándose a la velocidad de carga seleccionada $\pm 10\%$, hasta que la probeta no soporte más carga y rompa por su plano diametral.



Figura 5-21. Rotura de la probeta a flexotracción.

5.7.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.10 se detallan los valores obtenidos del ensayo de flexotracción para cada tipo de hormigón ensayado.

| Tipo Hormigón | Flexotracción | |
|---------------|--------------------|----------------------|
| | Carga rotura (kgf) | (N/mm ²) |
| HC | 426 | 11,76 |
| HAC | 408 | 11,26 |
| HCE | 498 | 13,75 |
| HACE | 387 | 10,68 |

Tabla 5.10 Valores de carga de rotura y resistencia a flexotracción

Al igual que en el ensayo brasileño las resistencias a flexotracción se han comportado de forma análoga a los hormigones tradicionales. Los resultados obtenidos entran dentro de la normalidad.

5.7.4 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos en el ensayo de flexotracción:

- La incorporación de escorias de horno de arco eléctrico no mejora ni perjudica las resistencias a flexión atendiendo al ensayo de flexotracción.
- La resistencia a flexotracción de un hormigón HCE es de $13,75 \text{ N/mm}^2$.
- La resistencia a flexión de un hormigón HACE es de $10,68 \text{ N/mm}^2$.

5.8 Módulo de elasticidad en compresión

5.8.1 Introducción

El módulo de elasticidad o módulo de Young de un material es un parámetro fundamental para determinar las relaciones tensión deformación. Conocido este valor se conocerá la forma de trabajar, que el material de estudio, tiene en las estructuras de las que va a formar parte.

Para un material sometido a compresión, el módulo de elasticidad viene determinado por la pendiente de la curva tensión (σ)-deformación (ϵ), en el campo uniaxial de tensiones (Ortiz Berrocal, 1990). Al no ser el hormigón un cuerpo elástico es necesario definir el módulo de elasticidad como módulo de deformación longitudinal no teniendo un valor constante en el diagrama tensión-deformación dada la curvatura del mismo, tal y como se observa en la figura 5.41. No obstante, debido a que esta gráfica es no lineal, existen varios métodos para cálculo de este módulo.

Como se indica en la figura 5-22, el módulo de Young E , así determinado y conocido como módulo de elasticidad estático, no tiene por tanto un valor único sino que depende de las consideraciones que se hagan en su determinación y así sucede para considerar un módulo tangente en el origen E_0 , un módulo tangente en un punto cualquiera de la curva correspondiente a una tensión f_{CA} , y válido cuando las oscilaciones de carga $\pm \Delta f_{CA}$ sean muy pequeñas y un módulo secante E_s definida por la recta que une el origen con el punto correspondiente a una fracción de la tensión de rotura; este último es el más empleado y variará con la fracción de carga de rotura que se haya considerado, aunque generalmente se toma del 40 al 50 por ciento de ésta (Fernández-Cánovas, 2007).

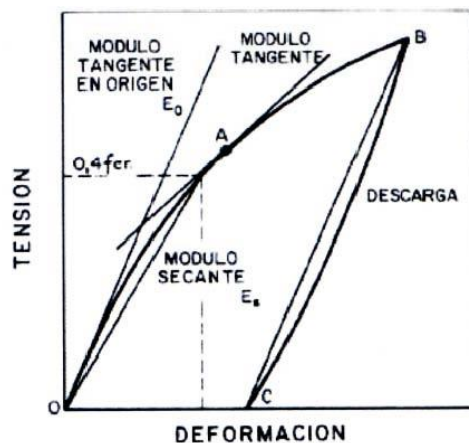


Figura 5.22. Módulos de elasticidad de un hormigón (Fernández-Cánovas, 2007)

Mediante la realización de ensayos muy lentos en el laboratorio a deformación constante es posible determinar la curva tensión deformación hasta rotura del hormigón. La velocidad con que se realice la determinación de la curva tensión-deformación tiene una gran repercusión en la forma de la misma y en el valor del módulo determinado. Si la aplicación de la carga es muy rápida las deformaciones son muy reducidas y en consecuencia el módulo de elasticidad es muy elevado; si, por el contrario, la duración con que se hace el ensayo es más lenta y superior a dos minutos, la deformaciones son más elevadas y en consecuencia los módulos determinados más bajos. Estas diferencias encuentran su explicación en el fenómeno de la fluencia que acompaña a la deformación elástica que se obtiene con una carga muy rápida. Los componentes del hormigón, considerados aisladamente, tienen módulos de elasticidad muy diferentes, así el de los áridos es más elevado que del hormigón dependiendo de la naturaleza de éstos, mientras que el de la pasta de cemento es más bajo que éste como se indica en la figura 5-23.

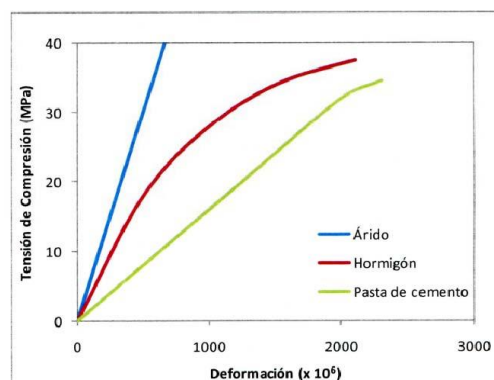


Figura 5.23. Módulo de elasticidad de la pasta, áridos y hormigón (Rebolledo Ramos, 2010)

El comportamiento del conjunto está muy influenciado por las microfisuras que aparecen en las interfases pasta-árido al cargar el hormigón y hacen que la curva deje de ser lineal, dando lugar a que el hormigón se comporte como un material pseudo-sólido (Fernández-Cánovas, 2007; Rebolledo Ramos, 2010).

El valor del módulo de deformación utilizado en el cálculo de estructuras de hormigón en general, es estimado a partir de relaciones empíricas en las que se asume dependencia directa entre el módulo de deformación, la resistencia a compresión y la densidad del hormigón. Esto sucede porque todos vienen influidos por la porosidad de las fases constituyentes aunque no en el mismo grado.

Entre los factores que determinan la evolución de las propiedades elásticas cabe destacar:

- Edad del hormigón: El módulo de elasticidad es tanto mayor cuanto mayor es la edad del hormigón, aumentando más rápidamente con la edad que la resistencia a compresión.
- Forma y textura superficial del árido grueso: A mayores tamaños del árido grueso, mayor será el módulo de elasticidad.
- Módulo de elasticidad de los áridos: Cuanto mayor es el módulo de elasticidad de los áridos y mayor la proporción en que entran en el hormigón, mayor es el módulo de elasticidad de éste.
- Grado de saturación: Los valores del módulo de elasticidad obtenidos en ensayos de probetas de un mismo hormigón en estado húmedo y en seco, dan valores inferiores para el caso del estado húmedo.
- Condiciones de carga: Para aplicaciones de carga muy rápidas se obtienen módulos de elasticidad muy elevados en comparación con aplicaciones de carga lenta, donde los módulos son más bajos.
- Módulo de elasticidad de la matriz cementicia: Cuanto mayor es el módulo de elasticidad de la matriz cementicia, mayor es el módulo de elasticidad del hormigón.

- Porosidad y composición de la zona interfacial de la transición: Cuanto mayor es la porosidad de la zona interfacial, menor será el módulo de elasticidad.

Diferentes autores han relacionado el módulo de elasticidad con otras propiedades del hormigón, siendo la resistencia a compresión la más utilizada. Cabe destacar los estudios realizados por Takizaki (Takizaki, 1988), donde se relaciona el módulo de elasticidad con la densidad y resistencia a compresión del hormigón según la expresión:

$$E_c = 2,1 \cdot \left(\frac{d_s}{2,3}\right)^{1,5} \left(\frac{f_c}{200}\right)^{0,5} \quad [5.16]$$

Siendo:

E_c Módulo de elasticidad estimado del hormigón, MPa

d_s densidad del hormigón, en kg/m^3

f_c =resistencia a compresión del hormigón, en MPa.

5.8.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo determinar el módulo de elasticidad estático de los distintos hormigones planteados en este trabajo. Para ello se ha realizado la medición sobre 3 probetas diferentes en cada tipo de hormigón endurecido, pero siempre fabricadas en la misma amasada.

Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría prismática 40x40x40 mm y todas ellas han sido curadas bajo agua a $20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a 28 días de edad.

Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390:13.

Inicialmente y dado que las probetas se han curado durante 28 días sumergidas en agua, se procede a secar las muestras completamente. Para ello se introducen en una

estufa a $50^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, que en nuestro caso han sido 4 días. De esta forma el proceso de secado es lento y no produce fisuras en la masa de hormigón.

El procedimiento seguido para la elaboración del ensayo ha sido el siguiente:

1. Se determina la resistencia a compresión sobre tres probetas, iguales en forma y tamaño a aquellas utilizadas para la determinación del módulo de elasticidad estático, fabricadas y curadas en condiciones iguales. El valor medio de la resistencia a compresión, f_c , determinará el esfuerzo a aplicar en la determinación del módulo de elasticidad estático.
2. Se coloca la probeta en la máquina de ensayo y se centra con el instrumento de medida colocado en posición axial.
3. Se aplica la tensión inicial, σ_b , es decir $0,5 \text{ N/mm}^2$ y se registra la deformación leída en cada línea de medición.
4. Se incrementa uniformemente la tensión a una velocidad de $0,6\pm 0,2 \text{ N/mm}^2$ por segundo hasta que la tensión alcance el valor de un tercio de la resistencia a compresión del hormigón ($\sigma_a=f_c/3$). Para la medida de las deformaciones y partiendo del valor medio de rotura de las probetas estudiadas anteriormente, se ha comprimido la probeta hasta un 10%, 20% y 30% de la resistencia a compresión estimada y se han registrado las deformaciones correspondientes. Se han aplicado tres ciclos sucesivos manteniendo la carga durante 60 s y se registra la deformación medida, tomando lecturas de cada línea de medida con intervalos de 30 s. Si estas lecturas difieren en más del 20% del valor medio, se vuelve a centrar de ensayo y se repite el mismo.
5. Una vez comprobado que el centrado ha producido medidas correctas, se reduce la carga con la misma velocidad que se aplicó durante el proceso de carga, hasta alcanzar el nivel de la tensión inicial ($0,5 \text{ N/mm}^2$). Se realizaron dos ciclos adicionales de carga y descarga, utilizando las mismas velocidades, y manteniendo las tensiones (σ_a y σ_b) constantes durante un periodo de 60 s. Después de terminar el último ciclo y de esperar durante 60 s manteniendo la tensión $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$, se

registraron las lecturas de las deformaciones ε_b , tomadas al cabo de 30 s. Se volvió a cargar la probeta hasta la tensión σ_a , a la velocidad especificada, y se registraron las lecturas de las deformaciones relativas ε_a , tomadas a los 30 s. Una vez realizadas las medidas se llevó la probeta a la rotura, registrando el valor de la carga necesaria hasta conseguir dicho estado final.

Los módulos de elasticidad han sido obtenidos con galgas extensiométricas, de acuerdo con la norma UNE EN-12390-13. El dispositivo experimental utilizado (galgas extensiométricas unidas a un medidor digital de tensiones conectado a prensa y a un ordenador) se muestra en la Figura 5-24.

El procedimiento utilizado fue el siguiente: se pega la galga extensiométrica en la superficie de la probeta, limpiando cuidadosamente la superficie del material para que no contenga ningún tipo de impureza; una vez adherida, se conectan los cables al indicador digital de tensiones. En todas las probetas se coloca una galga horizontal y otra vertical.



Figura 5-24. Equipo de medida digital.

Los valores del módulo secante de elasticidad estabilizado se obtienen mediante los valores de deformación registrados a través del conmutador de medidas y aplicando la expresión que a continuación se detalla:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}}$$

[5.17]

Donde:

σ_a : tensión superior $f_c/3$.

σ_p : Tensión de precarga $0,5Mpa \leq \sigma_p$

$\varepsilon_{a,3}$: deformación media para para la tensión superior durante el tercer ciclo de carga.

$\varepsilon_{p,2}$: deformación media para para la tensión de precarga durante el segundo ciclo de carga.

$E_{c,s}$: módulo secante de elasticidad estabilizado



Figura 5-25. Detalle probeta utilizada para el módulo de elasticidad.

5.8.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.11 se detallan los valores obtenidos del módulo de elasticidad estabilizado a 28 días, para cada tipo de hormigón ensayado.

Utilizando la expresión de Takizaki [5.16] es posible obtener los valores teóricos del módulo de elasticidad conocida la densidad del hormigón y la tensión de rotura de las probetas. En la tabla 5.11 se indica comparan los obtenidos experimentalmente y los teóricos.

| Tipo Hormigón | f_{cm} | d (kg/m ³) | (TAKIZAQUI) | UNE 12390 | $E_{c,s} / E_T$ |
|---------------|----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------|
| | | | $E_{c,s}$ | $E_{c,s}$ | |
| HC | 52,1 | 2.460 | 37.492 | 45.455 | 1,21 |
| HAC | 56 | 2.440 | 38.396 | 50.088 | 1,30 |
| HCE | 60,1 | 2.530 | 41.998 | 50.125 | 1,19 |
| HACE | 34,6 | 2.520 | 31.678 | 33.060 | 1,04 |

Tabla 5.11. Resultados del módulo de elasticidad a 28 días, según UNE 12390 y según Takizaki

La relación E_{28}/E_T representada en la tabla 5.11 indica que los valores experimentales son superiores a los obtenidos por el modelo de Takizaki. En base a ello, sería posible determinar una expresión donde conocida la densidad y la resistencia a compresión del hormigón, obtuviera el módulo de elasticidad teórico. Encontramos dos relaciones dependiendo si se le ha añadido EAFSS o no.

Para los tres primeros casos (HC, HAC y HCE) el modelo de Takizaki modificado respondería a:

$$E_c = 2,597 \cdot \left(\frac{d_s}{2,3}\right)^{1,5} \left(\frac{f_c}{200}\right)^{0,5} \quad [5.18]$$

Para el caso del hormigón HAC el modelo de Takizaki modificado respondería a:

$$E_c = 2,192 \cdot \left(\frac{d_s}{2,3}\right)^{1,5} \left(\frac{f_c}{200}\right)^{0,5} \quad [5.19]$$

Siendo:

E_c = Módulo de elasticidad estimado del hormigón, MPa

ρ_s = densidad del hormigón, en kg/m^3

f_c = resistencia a compresión del hormigón, en MPa.

5.8.4 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos en el ensayo del módulo de elasticidad en compresión:

- El módulo de elasticidad mantiene la misma relación obtenida tras los ensayos experimentales respecto a los valores propuestos por Takizaki para los hormigones HC, HAC y HCE. Se ven incrementados en un 23%.
- La relación obtenida en los ensayos experimentales respecto a la fórmula de Takizaki para el hormigón HACE se ve incrementados en un 4%.

5.9 Ensayo de abrasión superficial

5.9.1 Introducción

La resistencia a la abrasión superficial del hormigón se define como la capacidad de una superficie para resistir el desgaste por frotamiento o fricción. Esta abrasión del hormigón en su superficie se produce cuando sobre ella roza un cuerpo o cuando sufre percusión (Fernández-Cánovas, 2007).

La abrasión de las superficies del hormigón puede ser debida a acciones de tipo mecánico provocadas por el aire, por el agua con partículas sólidas en suspensión, o por la acción de elementos granulares deslizando sobre las superficies de hormigón.

De los ensayos realizados por diferentes autores como (Gesoğlu y col., 2014; Scripture y col., 1953; Wite y Backstrom, 1951) la resistencia a la abrasión del hormigón es proporcional a su resistencia a compresión. Debido a que la abrasión ocurre en la superficie, es fundamental maximizar la resistencia superficial.

La resistencia a la abrasión del hormigón es un fenómeno progresivo. Inicialmente la resistencia está muy relacionada con la resistencia a la compresión en la superficie de desgaste, y la mejor forma de estimar el desgaste es en base a esta

resistencia. A medida que la pasta se desgasta los agregados finos y gruesos quedan expuestos; la abrasión y los impactos provocarán una degradación adicional relacionada con la resistencia de la adherencia entre la pasta y los áridos y la dureza de estos (201.2R-01: *Guía durabilidad hormigón*).

La influencia de la resistencia abrasiva de los componentes del hormigón, como son los áridos y el cemento, determinará la resistencia a la abrasión del hormigón. Generalmente los hormigones fabricados con áridos muy resistentes presentan una resistencia a la abrasión mayor que hormigones fabricados con áridos menos resistentes. Así mismo se debe considerar la adherencia de los áridos con la pasta de cemento, ya que hormigones con fabricados con áridos muy resistentes, pero con escasa adherencia presentan menores resistencias a la abrasión que hormigones fabricados con áridos menos resistentes pero con buena adherencia.

Cuando se trata de desgaste por rozamiento, la resistencia al desgaste de los áridos tiene una influencia superior a la propia resistencia a compresión del hormigón que queda relegada a un segundo término. Sin embargo cuando se trata de acciones de percusión de pequeños objetos o partículas sólidas, la resistencia de la unión de la pasta de cemento al árido juega el papel más importante.

Para un hormigón determinado, la resistencia a la compresión de la superficie la podríamos mejorar en función de los siguientes puntos:

- Evitando la segregación de los componentes.
- Eliminando la exudación.
- Estableciendo un adecuado cronograma para el acabado.
- Minimizando la relación agua/cemento, es decir, prohibiendo agregar agua a la superficie para facilitar el acabado.
- Trabajando la superficie con un fratasado duro.
- Utilizando procedimientos de curado adecuados.

(Payne & Dransfield, 1985) concluyeron que la resistencia a la abrasión es inversamente proporcional a la relación agua/cemento, y es afectada por los procedimientos de curado. Consecuentemente se concluye que el uso de aditivos reductores de agua incrementaría la resistencia a la abrasión debido a que disminuiría la relación agua cemento. Así de este modo se reduce igualmente la de influencia de las condiciones de curado.

Como recomendaciones para obtener superficies de hormigón resistentes a la abrasión la norma ACI 302.1R-04 en su tabla 6.2.1 indica una serie de medidas que permiten lograr una resistencia a la compresión adecuada, con lo que se obtendrían superficies de hormigón resistentes a la abrasión:

- Baja relación agua/cemento en la superficie: Utilizar aditivos reductores de agua.
- Correcta graduación del árido fino y el árido grueso: El tamaño máximo del árido grueso se debería seleccionar de manera que se optimice la trabajabilidad y minimice el contenido de agua.
- Dosificar la mezcla de acuerdo con la consistencia deseada y la resistencia requerida.
- El contenido de aire debería de estar acorde con las condiciones de exposición. Para exposiciones donde no esté previsto la acción del hielo/deshielo es preferible que el contenido de aire sea menor o igual al 3%.

La norma ASTM C 779:2012 describe tres procedimientos operativos para evaluar la resistencia a la abrasión de un hormigón. Estos procedimientos serían:

- Procedimiento A: Discos giratorios
- Procedimiento B: Ruedas abrasivas
- Procedimiento C: Rodamiento de bolas

Cada uno de estos métodos se ha utilizado durante años para desarrollar información sobre la resistencia al desgaste. A raíz de las investigaciones realizadas por (Prior, 1966) sobre los procedimientos de abrasión, el método más fiable es el que utiliza discos giratorios, si bien no se ha encontrado ningún método de ensayo adecuado que englobe todas y cada una de las condiciones posibles de exposición a la abrasión del hormigón.

En cualquiera de los procedimientos indicados anteriormente la abrasión se interpreta como el promedio de la pérdida en gramos de las probetas ensayadas.

De cara al estudio de la resistencia a la abrasión del hormigón se deberían de considerar cuatro áreas generales de estudio:

- Pisos y losas: La norma ACI 302.1R-04 en su tabla 2.1 define tipos de desgaste y exige consideraciones especiales para lograr una buena resistencia al desgaste.
- Superficies de viales: El desgaste del hormigón se debe a la circulación de camiones pesados y automóviles con neumáticos con clavos o cadenas.
- Erosión de las estructuras hidráulicas, tales como las presas, vertederos, túneles, pilas y estribos de puentes, se debe a la acción de los materiales abrasivos transportados por el flujo del agua.
- Acción de la cavitación sobre el hormigón de las presas, vertederos, túneles y otros sistemas que transportan agua provocan erosión si las velocidades son elevadas y hay presiones negativas.

5.9.2 Proceso de elaboración del ensayo

Para la determinación de la resistencia a la abrasión se han ensayado 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. La determinación del parámetro se ha realizado a 28 días de edad. El ensayo se ha realizado siguiendo las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12808-2.

La resistencia a la abrasión se determina midiendo el desgaste producido en la cara vista de una probeta que se somete a rozamiento mediante un disco de acero y material abrasivo bajo condiciones normalizadas.

Como material abrasivo se empleó corindón blanco de tamaño de grano 80, según la norma FEPA 42 F-84.

El equipo utilizado consiste en una máquina de desgaste compuesta esencialmente de un disco de abrasión, una tolva para almacenar el abrasivo, una válvula de control para regular su salida, un conducto de salida desde la tolva, un carro porta probeta móvil y un contrapeso (Figura 5-26 y Figura 5-27).

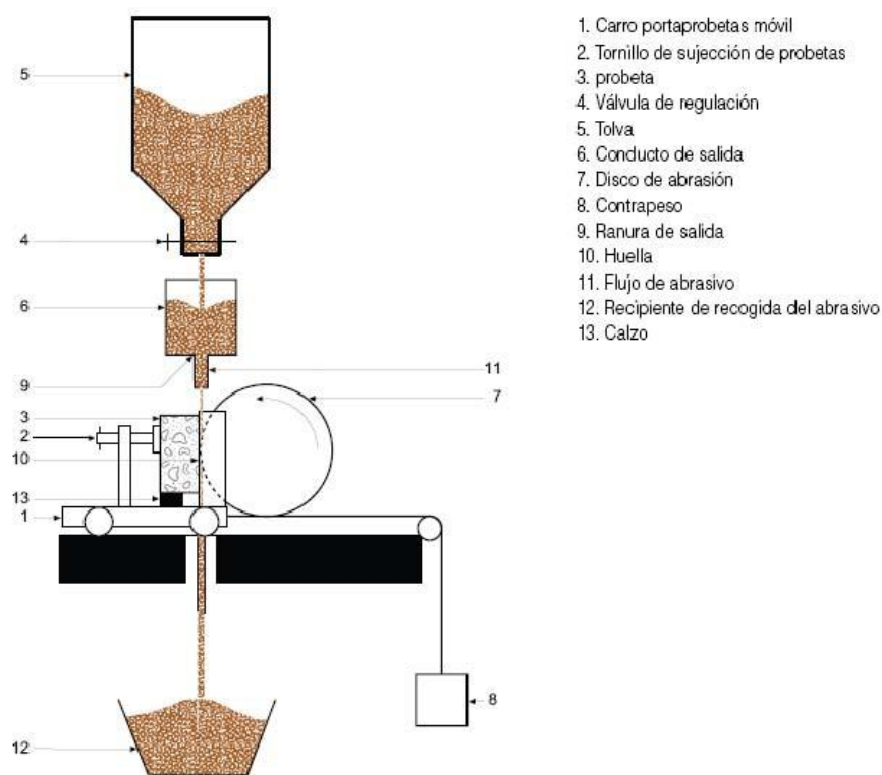


Figura 5-26. Esquema máquina de ensayo de resistencia a la abrasión [Fuente: <http://www.infoterrazo.com>]

Para el ajuste del equipo se emplea una probeta de referencia de mármol Boulonnaise ajustando el contrapeso de forma que se consiga una huella de $20,0 \pm 0,5$ mm. La cuantía del contrapeso se incrementaría si la anchura de la huella es inferior al valor citado y se reduciría en caso contrario. En nuestro caso la comprobación realizada

refleja que el aparato de medida está perfectamente ajustado, arrojando un valor de la huella dentro de los límites anteriormente indicado.

Una vez que se ha comprobado la calibración del equipo se comprueba la ortogonalidad entre el carro porta probetas y el eje del disco.

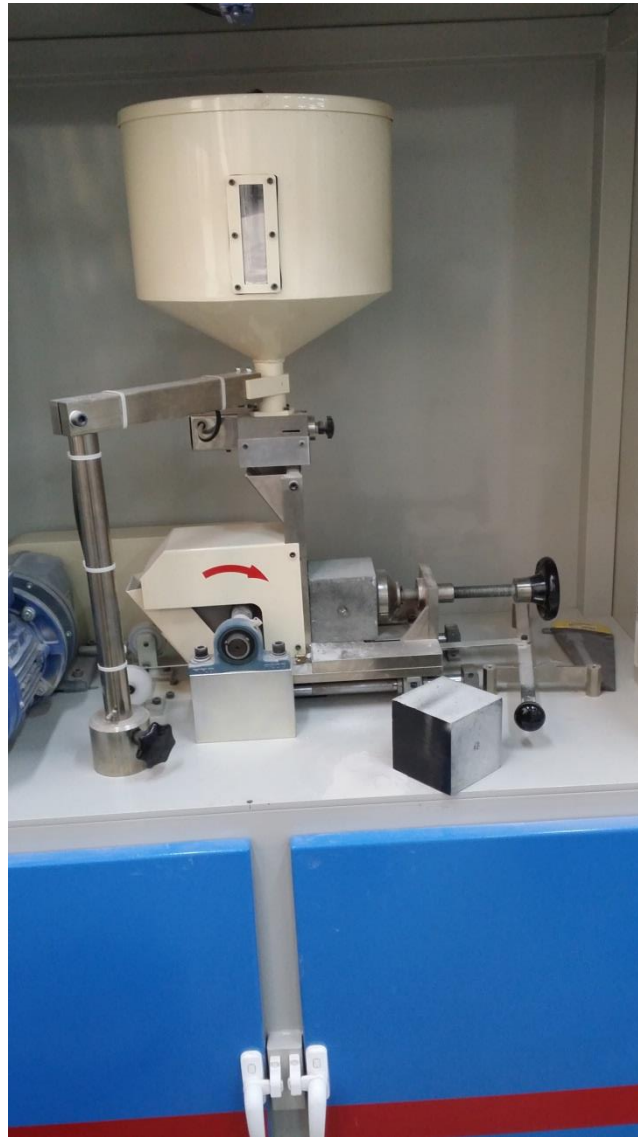


Figura 5-27. Equipo utilizado en el ensayo de abrasión

Para la realización del ensayo se ha utilizado una de las caras de la probeta en contacto con el encofrado liso de modo que en todo momento se han evitado coqueas, exfoliaciones, textura rugosa o alta porosidad.

Debido a que las probetas han sido sometidas a un proceso de secado en estufa a 50°C durante cuatro días, queda garantizada la eliminación de presencia de agua sobre la superficie del hormigón. Antes de someter a las probetas al ensayo de abrasión se procedió a la limpieza de la cara a ensayar con un cepillo y posteriormente se roció la cara con pintura negra mediante vaporizador, a fin de facilitar la lectura de la huella.

A continuación se coloca la probeta en contacto con el disco de abrasión. A continuación se abre la válvula de control y simultáneamente se arranca el motor de accionamiento, de manera que el disco de abrasión consiga girar a 75 r.p.m. en 60 segundos.

Para la medida de la huella (figura 5-28) se marcan los límites longitudinales exteriores de la huella **I**. Se dibuja una línea **AB** en el centro de la huella y perpendicular a su línea central. Igualmente se dibujan las líneas **CD** situadas a 10 ± 1 mm de los bordes. Se mide con un calibre las tres longitudes de la cuerda de la huella, una medida central sobre la línea **AB** y dos medidas extremas sobre cada una de las líneas **CD**. La media de estas tres longitudes de huella determina el valor de la cuerda **L** necesario para determinar el valor del ensayo. En el caso de que la diferencia entre las dos medidas extremas (medidas sobre las líneas **CCD**) fuera superior a 0,5 mm el ensayo no será válido. En nuestro caso no hubo que desechar ningún ensayo.

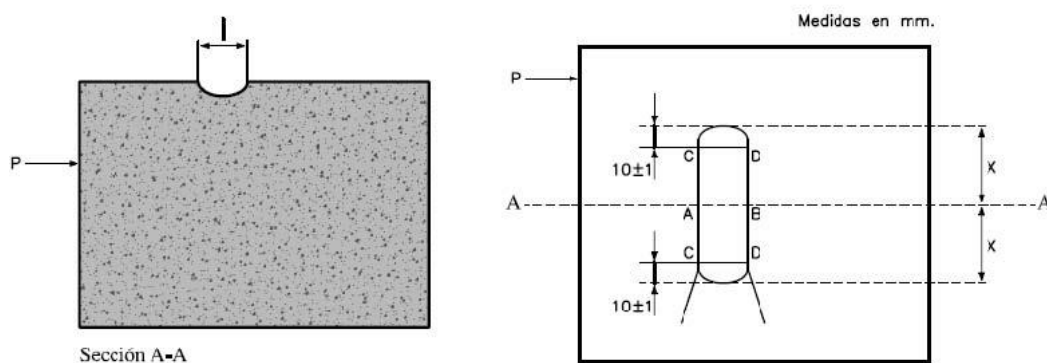


Figura 5-28. Situación de las líneas de medida en la huella del ensayo (UNE-EN 112808-2:2009)



Figura 5-29. Medida del ancho central en la huella de abrasión

Una vez obtenido el valor de la cuerda L (Figura 5-29) se calcula la resistencia a la abrasión que se expresa como el volumen VV , en mm^3 , de materia eliminada, según tabla 5.11.

| L mm | V mm^3 | L mm | V mm^3 | L mm | V mm^3 | L mm | V mm^3 | L mm | V mm^3 |
|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|
| 20,0 | 67 | 30,0 | 227 | 40,0 | 540 | 50,0 | 1 062 | 60,0 | 1 851 |
| 20,5 | 72 | 30,5 | 238 | 40,5 | 561 | 50,5 | 1 094 | 60,5 | 1 899 |
| 21,0 | 77 | 31,0 | 250 | 41,0 | 582 | 51,0 | 1 128 | 61,0 | 1 947 |
| 21,5 | 83 | 31,5 | 262 | 41,5 | 603 | 51,5 | 1 162 | 61,5 | 1 996 |
| 22,0 | 89 | 32,0 | 275 | 42,0 | 626 | 52,0 | 1 196 | 62,0 | 2 046 |
| 22,5 | 95 | 32,5 | 288 | 42,5 | 649 | 52,5 | 1 232 | 62,5 | 2 097 |
| 23,0 | 102 | 33,0 | 302 | 43,0 | 672 | 53,0 | 1 268 | 63,0 | 2 149 |
| 23,5 | 109 | 33,5 | 316 | 43,5 | 696 | 53,5 | 1 305 | 63,5 | 2 202 |
| 24,0 | 116 | 34,0 | 330 | 44,0 | 720 | 54,0 | 1 342 | 64,0 | 2 256 |
| 24,5 | 123 | 34,5 | 345 | 44,5 | 746 | 54,5 | 1 380 | 64,5 | 2 310 |
| 25,0 | 131 | 35,0 | 361 | 45,0 | 771 | 55,0 | 1 419 | 65,0 | 2 365 |
| 25,5 | 139 | 35,5 | 376 | 45,5 | 798 | 55,5 | 1 459 | 65,5 | 2 422 |
| 26,0 | 147 | 36,0 | 393 | 46,0 | 824 | 56,0 | 1 499 | 66,0 | 2 479 |
| 26,5 | 156 | 36,5 | 409 | 46,5 | 852 | 56,5 | 1 541 | 66,5 | 2 537 |
| 27,0 | 165 | 37,0 | 427 | 47,0 | 880 | 57,0 | 1 583 | 67,0 | 2 596 |
| 27,5 | 174 | 37,5 | 444 | 47,5 | 909 | 57,5 | 1 625 | 67,5 | 2 656 |
| 28,0 | 184 | 38,0 | 462 | 48,0 | 938 | 58,0 | 1 669 | 68,0 | 2 717 |
| 28,5 | 194 | 38,5 | 481 | 48,5 | 968 | 58,5 | 1 713 | 68,5 | 2 779 |
| 29,0 | 205 | 39,0 | 500 | 49,0 | 999 | 59,0 | 1 758 | 69,0 | 2 842 |
| 29,5 | 215 | 39,5 | 520 | 49,5 | 1 030 | 59,5 | 1 804 | 69,5 | 2 906 |

Tabla 5.12. Relación entre valores de la cuerda L y el volumen de materia eliminada V (UNE-EN 12808-2:2009)

5.9.3 Resultados y discusión

A partir de los valores medios de la cuerda **L** y del volumen **V** se determina el volumen de material perdido por abrasión atendiendo a la tabla 5.12, A continuación se indican en la tabla 5.13 los resultados obtenidos.

| Tipo Hormigón | Resistencia abrasión | |
|---------------|----------------------|------------------------------|
| | Cuerda L (mm) | Volumen V (mm ³) |
| HC | 24,8 | 128 |
| HAC | 25,4 | 137 |
| HCE | 20,3 | 70 |
| HACE | 22,2 | 91,4 |

Tabla 5.13 Valores medios de cuerda *L* y resistencia a la abrasión medida como *V*

Analizando los resultados se observa que en términos de desgaste por abrasión el hormigón HCE mejora en un 45% el resultado obtenido por su homólogo HC y que el HACE mejora un 33% el resultado obtenido por su homólogo HAC.

En cualquier caso la adición de escorias de horno de arco eléctrico mejora la resistencia a la abrasión en los dos casos estudiados.

5.9.4 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo de resistencia al desgaste:

- La sustitución de EAFSS por árido fino mejora de forma considerable la resistencia a la abrasión de los hormigones.
- Respecto al ambiente de exposición para el que se estima puedan estar sometidas las estructuras fabricadas con estos hormigones, los resultados de la abrasión han sido mucho más satisfactorios que los hormigones convencionales conocidos. Las estructuras previstas estarán sometidas a la erosión del agua, acción del oleaje y cavitación y este aspecto cobra una especial importancia.

5.10 Ensayo Cántabro modificado

5.10.1 Introducción

Además de los ensayos anteriormente descritos y con el fin de completar el conocimiento sobre el comportamiento de los hormigones diseñados frente al fenómeno de la abrasión, se ha previsto realizar el ensayo Cántabro modificado sobre las probetas fabricadas. Este ensayo normalmente se realiza a probetas de materiales bituminosos (ensayo Cántabro), pero en este caso resulta cuanto menos interesante aplicarlo a las probetas de hormigón.

El ensayo Cántabro fue propuesto en 1979 por Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer y consiste en la determinación de la pérdida de desgaste empleando la máquina de Los Ángeles pero sin la carga abrasiva de las bolas y haciendo girar el tambor de la misma a una velocidad de 30 a 33 r.p.m., durante 300 vueltas.

Con el ensayo se obtiene un índice numérico de la pérdida de masa, expresado como porcentaje de la masa original de la probeta.

5.10.2 Proceso de elaboración del ensayo

La ejecución del ensayo se realiza adaptando la norma (UNE-EN 12697-17:2006+A1: 2007) y se sustituyen las probetas bituminosas por probetas de hormigón de dimensiones 10x10x10 cm. El proceso seguido para el desarrollo del ensayo es el siguiente:

1. Se procede al secado de las probetas hasta masa constante, a una temperatura no superior a 50°C.
2. Se determina el peso P1 de cada probeta con una aproximación de 0,1 gramos.
3. Se introduce una probeta en el tambor de la máquina de Los Ángeles sin la carga abrasiva de las bolas y se hace girar el tambor a una velocidad de 30 a 33 r.p.m., durante 300 vueltas.

- Al final del ensayo, se saca la probeta y se pesa de nuevo con la misma aproximación de 0,1 gramos, obteniendo el peso P2.

El resultado del ensayo de pérdida por desgaste según el ensayo Cántabro modificado, para cada probeta ensayada viene dado mediante la expresión:

$$P.D(\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

[5.20]

Siendo:

P.D: valor de la pérdida por desgaste, en %

P1: peso de la probeta inicial en, en gramos

P2: peso de la probeta final en, en gramos

Se utiliza una máquina de Los Ángeles (Figura 5-30) sin carga abrasiva, así como una balanza para obtener los pesos de la probeta inicial y tras el proceso de abrasión a la que es sometida (Figura 5-31).



Figura 5-30. Máquina de Los Ángeles utilizada en el ensayo Cántabro



Figura 5.31. Estado de la probeta tras el ensayo Cántabro

5.10.3 Resultados y discusión

Los valores medios obtenidos por la ecuación 5.20 para cada una de las formulaciones del hormigón estudiado se indican en la tabla 5.14.

| Tipo Hormigón | Resistencia abrasión | | |
|---------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Peso Inicial probetas (g) | Peso final probetas (g) | Pérdida por desgaste (%) |
| HC | 2.440,3 | 2.128,0 | 13,0 |
| HAC | 2.401,7 | 2.123,7 | 11,6 |
| HCE | 2.533,3 | 2.252,0 | 11,1 |
| HACE | 2.469,0 | 2.105,0 | 14,6 |

Tabla 5.14. Pérdidas por desgaste según el ensayo Cántabro modificado

El mayor desgaste se produce en el hormigón HACE, si bien solo supera al HC en 1,6%. El hormigón que mejor se comporta es el HCE.

5.10.4 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo Cántabro modificado:

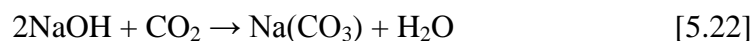
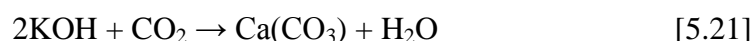
- La resistencia al desgaste no se perjudica por la adición de escorias de horno de arco eléctrico.
- El mejor comportamiento frente al desgaste ha sido en HCE
- Para el HACE el desgaste es similar a los hormigones convencionales.

5.11 Carbonatación

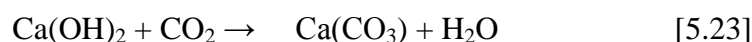
5.11.1 Introducción

La carbonatación es una reducción del pH en el hormigón. El acero embebido está protegido contra la corrosión por pasivación. La razón de esta pasivación es la alcalinidad del hormigón ya que el agua de los poros alcanza valores de $\text{pH} > 12,5$. En tales condiciones, se forma sobre la superficie del acero una capa microscópica de óxido de hierro que impide la disolución del hierro, impidiendo así la corrosión de las armaduras (Calavera Ruiz, 2002).

La acción principal del dióxido de carbono (CO_2) en relación a la corrosión de las armaduras, es la disminución de pH a valores inferiores a 9 como consecuencia de su reacción con los componentes alcalinos del hormigón (Tutti, 1988). El hormigón es un material poroso y, por lo tanto, el CO_2 y el aire penetran a través de los poros hacia su interior. Allí éste se disuelve, en presencia del agua, y reacciona inicialmente con los hidróxidos de sodio y de potasio de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



La solución del hidróxido cálcico depende de la concentración de OH^- en la solución intersticial, y ésta va disminuyendo con el progreso de las reacciones citadas anteriormente [5.52 y 5.53] hasta que los cristales de hidróxido cálcico se solubilizan y pasan a la solución siendo, entonces, carbonatados también según la siguiente ecuación:



Cuando la concentración de OH^- es baja, las fases de silicatos y aluminatos hidratados también pueden descomponerse y ser atacados por CO_2 .

La profundidad de penetración se denomina “frente de carbonatación”. Este frente comporta una serie de reacciones complejas intermedias, pero la reacción principal se produce con el hidróxido cálcico, siendo el carbonato cálcico el producto predominante al final de proceso.

Las reacciones se producen en las superficies libres del hormigón y van progresando en profundidad según una ley que aproximadamente es función de la raíz cuadrada del tiempo y en la que intervienen unos parámetros relacionados con la permeabilidad del hormigón (Fernández-Cánovas, 2007).

La carbonatación está controlada por la difusión del CO_2 , ésta, a su vez, depende de las condiciones ambientales y de las propiedades del hormigón.

Las condiciones ambientales más importantes son la temperatura, la concentración de dióxido de carbono y la humedad relativa. La carbonatación es directamente proporcional a la temperatura y a la concentración de CO_2 . La humedad relativa afecta a la carbonatación ya que, en condiciones extremas de sequedad, será muy pequeña porque no habrá agua para disolver el CO_2 y, en condiciones de saturación de agua en los poros, la carbonatación será baja porque la difusión del CO_2 será muy pequeña. La carbonatación es máxima para humedades relativas comprendidas entre un 50% y un 70% (Silva, 1988).

El efecto de la carbonatación es totalmente desfavorable en relación a la corrosión de las armaduras, mientras que para la impermeabilidad del hormigón el efecto será favorable debido a la sustitución de productos algo solubles por otros poco solubles (Tutti, 1988). Otro factor favorable de la carbonatación en el hormigón es la disminución de la porosidad al rellenarse los poros por el depósito de CaCO_3 , incluso produciendo un aumento de la resistencia mecánica. Sin embargo, las consecuencias positivas en relación al hormigón no son relevantes cuando se compara con los efectos negativos generados por la corrosión de armaduras.

5.11.2 Proceso de elaboración del ensayo

Para la determinación de la profundidad y velocidad de la carbonatación se han ensayado 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. El ensayo se ha realizado siguiendo las especificaciones indicadas en la norma UNE 83993-1:2013.

Las probetas siguieron el mismo proceso de fabricación y curado que las utilizadas para los diferentes ensayos mecánicos descritos en este capítulo y, posteriormente, se expusieron ambiente natural según el Método Alternativo indicada en la norma UNE 83993-1:2013.

El Método alternativo se corresponde con el existente en un recinto expuesto al ambiente natural y protegido de la acción directa de la lluvia. En nuestro caso se han mantenido a la intemperie durante 90 y 210 días.

Para realizar el ensayo se requiere un recinto con un tejado con una pequeña inclinación, para evitar la acción directa de la lluvia sobre las probetas y permitir la evacuación del agua, y no tendrá paredes laterales, para permitir libremente el acceso de aire de la atmósfera. Se recomienda que el tejado tenga, al menos, una altura de 1,5 m (figura 5-32)

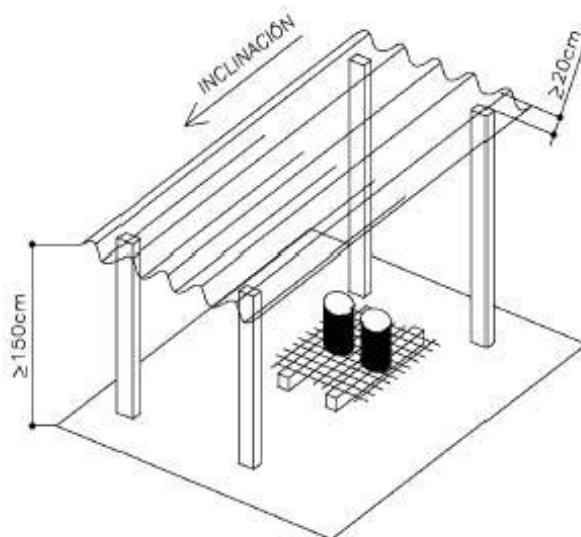


Figura 5-32. Esquema del recinto para el ensayo de carbonatación en el ambiente B (UNE 83993-1:2013)

Antes del comienzo del ensayo se deben mantener las probetas al aire en el ambiente de laboratorio durante una semana. A continuación, se colocan las probetas en el recinto de ensayo, de tal forma que, al menos, el 90% de la superficie de apoyo esté expuesta a la acción del aire. Las probetas estarán separadas entre sí al menos 10 cm.

La medida de la profundidad de la capa carbonatada se estudia mediante la norma UNE 112011:2011, según se representa en la figura 5-33.

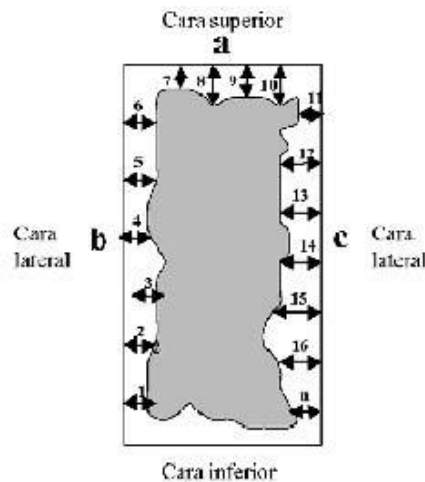


Figura 5.33. Medida de la profundidad de carbonatación (UNE 112011:2011)

La medida de la profundidad de la capa carbonatada en los hormigones se basa en la determinación de la reducción de la alcalinidad que supone la carbonatación, la cual se pone de manifiesto mediante un indicador de pH, que la hace visible por cambios de coloración.

Como indicador del pH se usó una disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%. De este modo para obtener 100 cm³ de indicador se disuelve 1 g de fenolftaleína en 70 cm³ de alcohol etílico del 96% de pureza y se adicionan después 30 cm³ de agua destilada.

Atendiendo a la UNE 112011-94, la fenolftaleína toma color rojo-púrpura para valores de pH superiores a 9.5 (hormigón no carbonatado) y se vuelve incolora para valores inferiores a 8 (hormigón carbonatado). Para valores entre 8 y 9.5 toma tonalidades entre rosa y rojo-púrpura.

Para la aplicación del indicador se utilizó un pulverizador, que permite extender una capa relativamente fina y uniforme sobre la superficie en cuestión. No debe aplicarse en cantidades excesivas o sobre la superficie mojada, puesto que la disolución con el indicador se escurriría de unas zonas a otras y, en caso de que hubiera adquirido coloración, daría resultados erróneos.

La medida de la profundidad de carbonatación se realizó pasados 20 minutos desde la aplicación del producto (Figura 5-34).



Figura 5.34. Medición de la profundidad de penetración

En las determinaciones de la profundidad de carbonatación debe tenerse en cuenta la forma del frente; si este se presenta de forma homogénea, la profundidad se expresa como d_k ; si el frente se presenta de forma irregular la medida se dará indicando una penetración media d_k , la penetración máxima d_{kmax} y la penetración mínima d_{kmin} . Por otro lado, deberá medirse preferentemente en zonas donde exista árido pequeño tamaño, evitando las zonas de árido grueso. Para la obtención de estos resultados se ha utilizado un calibre o pie de rey. La Figura 5-35 muestra las probetas de los distintos tipos de hormigón ensayados.

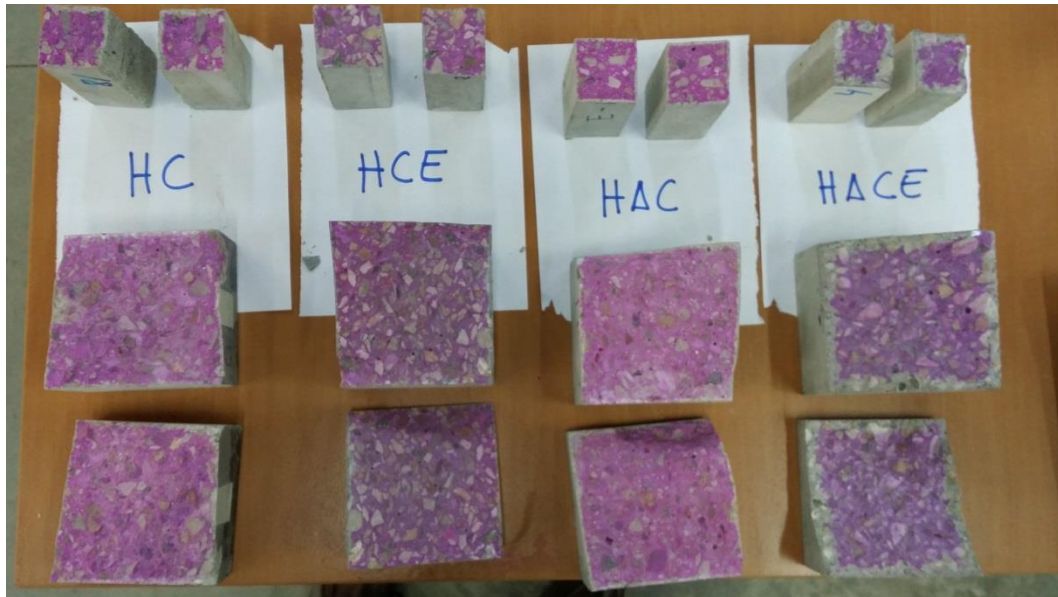


Figura 5.35. Probetas rociadas con fenolftaleína. Tipos de hormigón HC, HCE, HAC, HACE

Una vez determinada la profundidad de carbonatación es posible calcular la velocidad de avance de la carbonatación en el interior del hormigón mediante la expresión aportada en la norma UNE 83993-1:2013:

$$V_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}}$$

[5.24]

Donde:

V_{CO_2} velocidad de carbonatación, en mm/año^{1/2}

X_{CO_2} profundidad media de carbonatación, en mm

t tiempo de ensayo, en años

5.11.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.15 se indican las profundidades mínima, máxima y media del frente de carbonatación para los diferentes tipos de hormigones estudiados.

| Tipo Hormigón | 90 días | | | 210 días | | |
|---------------|------------|------------|-------|------------|------------|-------|
| | d_{kmax} | d_{kmin} | d_k | d_{kmax} | d_{kmin} | d_k |
| HC | 2 | 1 | 1,5 | 3 | 1 | 1,9 |
| HAC | 3 | 1,5 | 3,5 | 4 | 1 | 1,6 |
| HCE | 2 | 0 | 1 | 4 | 0 | 1,4 |
| HACE | 8 | 4 | 5,5 | 11 | 6 | 8,0 |

Tabla 5.15 Profundidad del frente de carbonatación a 90 y 210 días. Las medias están expresadas en milímetros (mm)

Igualmente en la tabla 5.16 y utilizando la expresión 5.55 se indica la velocidad del frente de carbonatación de los diferentes hormigones.

| Tipo Hormigón | V_{CO_2} (mm/año ^{1/2}) | |
|---------------|--|------------|
| | a 90 días | a 210 días |
| HC | 5,23 | 2,53 |
| HAC | 12,21 | 2,09 |
| HCE | 3,49 | 1,87 |
| HACE | 19,18 | 10,55 |

Tabla 5.16 Velocidad de carbonatación a 90 y 210 días.

La penetración máxima la ha sufrido el HACE llegando a 11 milímetros de máxima y a 6 de mínima aportando una velocidad de propagación mucho más elevada que el resto de tipologías de hormigón estudiadas. El HCE presenta valores similares a los HC y HAC y desataca su bajada en la velocidad de carbonatación.

5.11.4 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del estudio de la carbonatación:

- La adición de EAFSS mejora levemente los resultados de carbonatación del hormigón convencional.
- El hormigón que más carbonatación ha sufrido es el HACE

5.12 Conclusiones del capítulo

Tras el análisis y discusión de los ensayos se exponen las conclusiones del capítulo diferenciando el hormigón HCE y por otro lado el HACE.

5.12.1 Conclusiones hormigón HCE

- La sustitución total del árido fino por EAFSS aumentan la densidad del hormigón en un 5%
- Las resistencias a compresión aumentan en un 15% respecto a los HC
- Obtenemos resistencias a compresión de 60 MPa con una dosificación de 325 kg/m³. Este resultado cumple con la limitación de la clase resistente para el ambiente IIIa propuesto inicialmente.
- Las resistencias a flexotracción y tracción indirecta responden a las relaciones establecidas en la EHE, sin encontrar diferencias significativas de reseñar.
- Los valores de porosidad, absorción, succión, y permeabilidad frente a la penetración del agua bajo presión son algo más elevados que para el hormigón convencional, estando los valores de permeabilidad (penetración máxima 19 mm y penetración máxima 7 mm) dentro de los límites especificados por la EHE-08.
- El hormigón HCE es el que mejor resultados frente al desgaste presenta reduciendo en un 45% respecto al HC el desgaste por abrasión y en un 2% el ensayo cántabro.
- El estado de carbonatación del HCE es similar a los HC en cuanto a profundidades de penetración y reducen la velocidad de propagación.

5.12.1 Conclusiones hormigón HACE

- La sustitución total del árido fino por EAFSS aumentan la densidad del hormigón en un 5%

- Las resistencias a compresión se disminuyen en un 35% respecto a los HC
- Obtenemos resistencias a compresión de 34,6 MPa con una dosificación de 350 kg/m³. Este resultado cumple con la limitación de la clase resistente para el ambiente IIIa propuesto inicialmente.
- Las resistencias a flexotracción y tracción indirecta responden a las relaciones establecidas en la EHE, sin encontrar diferencias significativas de reseñar.
- La absorción aumenta un 30% y la porosidad aumenta un 33%.
- Los valores de permeabilidad (penetración máxima 48 mm y penetración media 27 mm) quedan dentro de los límites especificados por la EHE-08.
- El desgaste se reduce en un 32% respecto al HA, por el contrario el desgaste mediante el ensayo cántabro se ve aumentado en un 2%.
- El estado de carbonatación del HACE ha aumentado considerablemente respecto a los HC y HAC.

5.13 Índice de tablas

| | |
|---|------|
| Tabla 5.1 Calidad del hormigón según su porosidad..... | 5.11 |
| Tabla 5.2 Valores medios de densidad, porosidad y absorción..... | 5.14 |
| Tabla 5.3 Valores medios de la capacidad de succión capilar..... | 5.20 |
| Tabla 5.4 Coeficientes de succión de los tipos de hormigón estudiados..... | 5.22 |
| Tabla 5.5 Profundidad de penetración máxima y media según la exposición ambiental..... | 5.25 |
| Tabla 5.6 Valores medios de permeabilidad al agua bajo presión..... | 5.27 |
| Tabla 5.7 Coeficientes de conversión probetas cúbicas..... | 5.31 |
| Tabla 5.8. Resistencia media a compresión (N/mm ²) en probetas cúbicas 10x10x10 cm..... | 5.35 |
| Tabla 5.9. Valores de carga de rotura en el ensayo Brasileño. Valores de tracción indirecta y pura..... | 5.41 |
| Tabla 5.10 Valores de carga de rotura y resistencia a flexotracción..... | 5.48 |
| Tabla 5.11 Módulo de elasticidad a 28 días..... | 5.56 |
| Tabla 5.12. Relación entre valores de la cuerda L y el volumen de materia eliminada V..... | 5.64 |
| Tabla 5.13 Valores medios de cuerda L y resistencia a la abrasión medida como V..... | 5.65 |
| Tabla 5.14. Pérdidas por desgaste según el ensayo Cántabro modificado..... | 5.68 |
| Tabla 5.15 Profundidad del frente de carbonatación a 90 y 210 días..... | 5.75 |
| Tabla 5.16 Velocidad de carbonatación a 90 y 210 días..... | 5.75 |

5.14 Índice de figuras

| | |
|---|------|
| Figura 5-1. Tipos de poros en una matriz cementante..... | 5.10 |
| Figura 5-2. Esquema del ensayo de succión capilar | 5.18 |
| Figura 5-3. Probetas en contacto con agua durante el ensayo de succión..... | 5.20 |
| Figura 5-4. Curvas de capacidad de succión de los hormigones estudiados..... | 5.21 |
| Figura 5-5. Rectas de regresión de los hormigones ajustada a los valores de capacidad de succión para un periodo de 72 horas..... | 5.22 |
| Figura 5-6. Detalle de probeta montada en equipo durante el ensayo de permeabilidad al agua bajo presión..... | 5.26 |
| Figura 5-7. Frente de penetración de agua y calca sobre papel milimetrado para determinar la penetración máxima y media del hormigón..... | 5.27 |
| Figura 5-8. Influencia del módulo granulométrico del árido en la resistencia relativa a compresión..... | 5.30 |
| Figura 5-9. Prensa de rotura utilizada en el ensayo..... | 5.33 |
| Figura 5-10. Roturas satisfactorias en probetas..... | 5.34 |
| Figura 5-11. Resistencia a compresión para diferentes edades..... | 5.35 |
| Figura 5-12. Tensiones aplicadas en el brasileño ensayo brasileño..... | 5.38 |
| Figura 5-13. Distribución de tensiones en el ensayo..... | 5.38 |
| Figura 5-14. Equipo utilizado en el ensayo brasileño..... | 5.40 |
| Figura. 5-15. Ensayo con carga centrada..... | 5.42 |
| Figura. 5-16. Ensayo con carga a un tercio..... | 5.42 |
| Figura 5-17. Diferencia entre los resultados obtenidos en flexotracción con carga centrada y a un tercio de la luz..... | 5.44 |
| Figura 5-18. Distribución de tensiones en el ensayo de flexotracción..... | 5.45 |
| Figura 5-19. Relación entre resistencias a flexotracción y tracción pura..... | 5.45 |
| Figura 5-20. Equipo utilizado en el ensayo de flexotracción..... | 5.47 |
| Figura 5-21. Rotura de probeta finalizado el ensayo de flexotracción..... | 5.48 |

| | |
|--|------|
| Figura 5-22. Módulos de elasticidad de un hormigón..... | 5.50 |
| Figura 5-23. Módulo de elasticidad de la pasta, áridos y hormigón..... | 5.50 |
| Figura 5-24. Equipo de medida digital..... | 5.54 |
| Figura 5-25 Detalle de probeta utilizada en el módulo de elasticidad..... | 5.55 |
| Figura 5-26. Esquema máquina de ensayo de resistencia a la abrasión..... | 5.61 |
| Figura 5-27. Equipo utilizado en el ensayo de abrasión..... | 5.62 |
| Figura 5-28. Situación de las líneas de medida en la huella del ensayo..... | 5.63 |
| Figura 5-29. Medida del ancho central en la huella de abrasión..... | 5.64 |
| Figura 5-30. Máquina de Los Ángeles utilizada en el ensayo Cántabro..... | 5.67 |
| Figura 5-31. Estado de la probeta tras el ensayo Cántabro..... | 5.68 |
| Figura 5-32. Esquema del recinto para el ensayo de carbonatación en el ambiente B..... | 5.71 |
| Figura 5-33. Medida de la profundidad de carbonatación..... | 5.72 |
| Figura 5-34. Medición de la profundidad de penetración..... | 5.73 |
| Figura 5-35. Probetas rociadas con fenolftaleína. Tipos de hormigón HC, HCE, HAC, HACE | 5.74 |

5.15 Bibliografía del capítulo

- Bizzoto, M., Astori, R., & Sanguinetti, B. (2006). Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con materiales de la región NEA. *Universidad Nacional Del Nordeste de Argentina*.
- Calavera Ruiz, J. (2002). *Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación: unidireccional y sin vigas – hormigón, metálicos y mixtos*. (I. T. de M. y Construcción, Ed.) (5^a). INTEMAC.
- Carino, N. (1983). Temperature effects on strength maturity relations of mortar. *ACI Materials Journal*, 80, 177–182.
- Cruz Carrasco, M. (2014). *Estudio de la resistencia y reología de hormigones con adición de escorias de cobre como sustituto de arido fino*. Tesis Universidad de Málaga.
- Edificación, C. T. (2009). *Documento básico SE-AE. Seguridad Estructural. Acciones en la edificación. Anejo C: Prontuario de pesos y coeficientes de rozamiento interno*.
- Fernández-Cánovas, M. (2007). *Hormigón*. (C. de I. de C. C. y Puertos, Ed.) (10^a).
- Fomento, M. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), BOE N° 203 35176–35178 (2008). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S. (2014). Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, 73, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.047>
- Gomez Cano, J. (2008). Identificación y cuantificación de algunos factores en la permeabilidad de hormigones y morteros. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Haynes, H. (1980). Permeability of concrete in sea water. Performance of concrete in marine environment. *ACI Publication*, 65, 21–38.
- Hearn, N., Detwiler, R., & Sframeli, C. (1994). Water permeability and microstructure

- of three old concretes. *Cement and Concrete Research*, 24(633–640).
- Herrea Toledo, Y. (2008). *Tesis Hormigón de muy alta resistencia*. Politécnica de Cataluña.
- Howland Albear, J., & Martín Acosta, A. (2012). Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos. *Revista Cubana de Ingeniería*, 3, 17–24.
- Larbi, L. (1993). Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete. *Heron*, 38, 1–69.
- Neville, A. (2012). *Properties of concrete*. (P. Hall, Ed.) (5^a).
- Olivares, M., Laffarga, J., Galán, C., & Nadal, P. (2003). *Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad* (Materiales).
- Ortiz Berrocal, L. (1990). Elasticidad y resistencia de materiales. *Universidad Politécnica de Madrid*.
- Parron-Vera, M. A., Rubio-Cintas, M. D., & Contreras de Villar, F. (2008). Estudio de la relación peso/resistencia en hormigones estructurales mezclados con escorias de horno de arco eléctrico. In A. C. T. de H. E. ACHE (Ed.), *IV Congreso de ACHE*. Valencia(España).
- Payne, J., & Dransfield, J. (1985). The influence of admixtures and curing on permeability. *Conference on Permeability of Concrete and Its Control*, 89–105.
- Pellicer llopis, V. (2014). *Ensayos no destructivos en hormigón. Georadar y ultrasonidos*. (U. P. de Valencia, Ed.).
- Peng, S., Wang, E., Wang, H., & Chou, Y. (2012). Quality assessment of high performance concrete using digitized image elements. *Computers and Concrete*, 10(4), 409–417.
- Powers, T. (1960). Physical properties of cement paste. *Proceedings of the Chemical Cement*, 2, 577–613.
- Prior, M. (1966). Abrasion Resistance: Significate of Tests and Properties of Concrete

- and Concrete-Making Materials. *ASTM STP-169A*, 246–260.
- Rebolledo Ramos, N. (2010). *Aplicación de técnicas no destructivas al estudio del hormigón fresco. Trabajo fin de master*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sanchez Rodríguez, A. (2011). *Tesis Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Schmitt, H., & Heene, A. (2009). *Tratado de construcción*. (G. Gili, Ed.) (8^a).
- Scripture, E., Benedict, S., & Bryant, D. (1953). Floor aggregates. *ACI Proceedings*, 50(305–316).
- Sedran, T., & Larrard, F. (1999). Optimization of self compacting concrete thanks to packing model. *Self-Compacting Concrete-Proceedings of the First International RILEM Symposium, Sweeden*, 321–332.
- Silva, T. (1988). Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro. *Tesis Doctoral Unviversidad Politécnica de Cataluña*.
- Takizaki, M. (1988). Strength and elastic modulus of recycles aggregate concrete. *The Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, 557–564.
- Torres Agredo, J. (2001). Durabilidad de hormigones y morteros. *Tesis Universidad Del Valle.Cali, Colombia*.
- Tutti, K. (1988). Corrosion of stell in concrete. *Cement and Concrete Research*1, 4–82.
- Valcárcel Pérez, J. (2008). Instrucción para el hormigón estructural. Programa de formación permanente. *Departamento de Tecnología de La Construcción. ETS Arquitectura de La Coruña*.
- Wite, L., & Backstrom, J. (1951). Some properties affecting the abrasion resistance of air-entrained concrete. *ASTM Proceedings*, 51, 1141–1155.
- Zega, C., Taus, V., & Di Maio, A. (2006). Comportamiento físico químico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado. *Boletín Técnico IMME*

Venezuela, 44(17-26).

5.15 Normativa del capítulo

UNE-EN 12390-7:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

IRAM 1871:2004: *Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), 2004.

UNE-EN 12390-8:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

EHE-08: *Instrucción de Hormigón Estructural*. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, febrero 2009.

UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión en probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.

UNE-EN 12390-4:2001: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Características de las máquinas de ensayo*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2001.

Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación (ENV 1992-1-1:1991). Comité Europeo de Normalización (CEN).

CEB-FIP (1991): *Código Modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. GEHO-CEB y ATEP, Madrid.

UNE-EN 12390-6:2010: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2010.

UNE-EN 12390-5:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a flexión de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009

UNE EN-13412: *Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2008.

201.2R-01: *Guía durabilidad hormigón*. American Concrete Institute (ACI), 2001.

ACI 302.1R-04: *Guide for concrete floor and slab construction*. American Concrete Institute (ACI), 2004.

ASTM C 779:2012: *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2012.

UNE-EN 12808-2:2009: *Materiales de rejuntado para baldosas cerámicas. Parte 2: Determinación de la resistencia a la abrasión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

Norma FEPA-42-F-84. Federación Europea de Fabricantes de Productos Abrasivos, 1984.

UNE-EN 12697-17:2006+A1:2007: *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas en caliente. Parte 17: Pérdidas de partículas de una probeta de mezcla bituminosa drenante*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2007.

UNE 83993-1:2013: *Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.

UNE 112011:2011: *Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.

CAPÍTULO 6

Comportamiento ambiental de los hormigones

INDICE

| | | |
|-------|---|------|
| 6.1 | COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DE LOS HORMIGONES..... | 6.5 |
| 6.1.1 | <i>Introducción</i> | 6.5 |
| 6.1.2 | <i>Marco legal</i> | 6.6 |
| 6.1.3 | <i>Generalidades sobre la lixiviación</i> | 6.7 |
| 6.2 | METODOLOGÍA EMPLEADA EN LOS ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN..... | 6.10 |
| 6.3 | INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA LIXIVIACIÓN..... | 6.18 |
| 6.4 | CONCLUSIONES..... | 6.19 |
| 6.5 | BIBLIOGRAFÍA..... | 6.20 |

6.1 Comportamiento ambiental de los hormigones.

6.1.1 Introducción

La posibilidad de utilización de un residuo se evalúa, no solamente desde el punto de vista de las características técnicas necesarias para la aplicación que se plantea, sino, también, desde la perspectiva del posible impacto ambiental que pueda causar.

Cuando los materiales sólidos entran en contacto con un líquido, algunos de sus componentes pueden disolverse en menor o mayor extensión, siendo de interés el grado de disolución para cada constituyente individual. La lixiviación de los materiales puede ocurrir en el lugar en que está aplicado, por infiltración natural de aguas, por lluvias, exposición a agua de mar, etc.

El problema de la contaminación del medio ambiente se puede establecer en varias ramas, las aguas residuales y el manejo de los residuos suelen resolverse mediante la solidificación-estabilización (Tchobanoglus y col, 2003). Este proceso se viene realizando desde los años 80 aproximadamente para retener contaminantes, evitando que éstos se puedan mover y, a su vez, disminuir su ataque al medio ambiente.

Existen varias técnicas de solidificación-estabilización, como son: la absorción de materiales, que comúnmente se coagulan y precipitan para, posteriormente, pasar las fases sólidas o usar cemento para generar bloques de hormigón que contengan estos residuos orgánicos (Paria y Yuet, 2006). Existen autores que han utilizado este procedimiento con residuos tóxicos provenientes de los metales (Altabbaa y Prose, 1996), o residuos de la industria siderúrgica (Silveira y col., 2003).

La estabilización, solución propuesta en esta tesis, presenta grandes ventajas para el tratamiento de residuos peligrosos con metales como: un bajo requerimiento técnico en el personal, bajo costo de producción, estabilidad estructural del hormigón a largo plazo, alta resistencia a la biodegradación, baja permeabilidad del hormigón.

Las escorias tratadas de horno de arco eléctrico estudiadas son residuos de la fabricación de acero inoxidable en la factoría de Los Barrios, corresponden con el código LER 10 02 02 'residuos del tratamiento de escorias' según la lista europea de

residuos publicada por decisión de la Comisión 2010/955/UE, de 18 de diciembre de 2014 (UE, 2010).

Actualmente el tratamiento obligatorio que están recibiendo las escorias estudiadas son:

- Recuperación de metales y compuestos metálicos.
- Recuperación de otras materias inorgánicas.

Una vez realizados los tratamientos obligatorios las escorias son llevadas al vertedero.

La composición de metales pesado en las escorias se reducen a nivel de trazas permitidas por la legislación vigente, a pesar de ello se han realizado ensayos de lixiviado para verificar el correcto comportamiento ambiental de los hormigones estudiados.

En este capítulo, se comprobarán las especies lixiviadas cuando se adicionan escorias de horno de arco eléctrico como sustitutos de árido fino en la fabricación de hormigones.

El proceso de cementación involucra varios fenómenos que permiten la retención de metales en estado sólido, entre ellos, la precipitación química en un ambiente alcalino del hormigón, la fijación por reacción química de los metales, así como la encapsulación física de metales por la fase sólida del hormigón (Glasser, 1997).

Los ensayos de lixiviación son empleados para simular los escenarios del campo, para evaluar las propiedades específicas de los materiales, tales como la salida de un determinado constituyente que es relevante para la fertilización de un suelo (disponibilidad del nutriente), o la salida de un elemento como resultado de contaminación (impacto ambiental).

6.1.2 Marco legal

Actualmente la normativa que regula los residuos es la ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados (Jefatura de Estado, 2011), da respuesta a la Directiva

2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 noviembre de 2008, sobre los residuos por la que derogan determinadas Directivas integrándolas en una única norma («Directiva marco de residuos»).

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

Los trabajos desarrollados en la presente tesis están alineados con los principios que postulan la vigente Directiva marco de residuos.

6.1.3 Generalidades sobre la lixiviación

En este apartado, realizaremos un resumen de los principios generales de la lixiviación, las diferentes normativas utilizadas en los ensayos realizados en las probetas, así como los resultados obtenidos y el análisis de los mismos.

Existe un gran número de factores que influyen en la relación en que los constituyentes de un material son disueltos del material matriz. Según el profesor Van der Sloot (Van der Sloot y col., 1996), estos factores pueden ser divididos en físicos y químicos.

- Los factores físicos que influyen en la lixiviación son:
 - Tamaño de partícula, que está, en parte, relacionada con la superficie expuesta a lixiviación.

- Homogeneidad o heterogeneidad de la matriz sólida en términos de fases minerales.
 - Tiempo de exposición.
 - Flujo del lixiviante.
 - Temperatura.
 - Porosidad de la matriz.
 - Forma geométrica y tamaño del material, cuando la lixiviación es controlada predominantemente por difusión.
 - Permeabilidad de la matriz.
 - Condiciones hidrogeológicas.
- Los factores químicos que influyen en la lixiviación contienen:
 - Equilibrio o control de la velocidad de salida del elemento.
 - Potencial de lixiviación de los constituyentes.
 - El pH, del material o impuesto por el ambiente.
 - Condiciones redox, del material o impuesto por el ambiente.
 - Procesos de adsorción.
 - Factores biológicos capaces de afectar al pH o al redox.

Diversas normativas proponen ensayos de lixiviación para clasificar el residuo o la matriz que contiene el residuo, en cuanto a la peligrosidad ambiental. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación, se desarrolla la investigación de las posibilidades de utilización del mismo. Así, cuando el residuo presenta contenidos elevados de iones en la extracción de una sustancia absorbida desde el lecho poroso, la investigación se debe centrar en estabilizar o solidificar el residuo, que son procesos que pueden ser descritos como tecnologías que consisten en inmovilizar, aislar o confinar un



contaminante, generalmente inorgánico, en una matriz rígida y compacta. Por el contrario, cuando el residuo no presenta un alto contenido de iones de lixiviado de la muestra, el estudio se puede dirigir directamente al desarrollo del producto mercantil.

Una de las opciones para reducir la solubilidad de los metales pesados presentes en los polvos de humo es la realización de algún tipo de tratamiento antes de depositarlo en vertederos o de su reutilización.

Estos tratamientos se pueden clasificar en (La Greca y col., 1996):

- **Estabilización:** Tratamiento del residuo con agentes químicos para reducir la movilidad de los componentes, tales como, cal o fosfórico. La cal actúa manteniendo el pH del posible “extractante” (agua de lluvia) dentro de un rango donde la solubilidad del plomo y el cadmio son mínimas. La ventaja que presenta es la capacidad de formar precipitados insolubles con muchos metales multivalentes. La adición de ácido fosfórico da lugar a la precipitación del plomo en forma de fosfato.
- **Solidificación.** Consiste en confinar en una matriz de baja permeabilidad. En este caso se pretenden mejorar las propiedades mecánicas y disminuir la superficie de contacto de los residuos con el posible agente “lixivante”. Este proceso no implica una interacción química, sino una unión de tipo mecánico a la matriz.
- **Vitrificación:** Tratamiento a elevada temperatura que tiene por objeto fundir las cenizas y generar vidrio. Las temperaturas que se deben alcanzar son de unos 1500°C, lo que hace que sea un tratamiento muy caro.
- **Extracción química.** Tratamiento que consiste en lavar los metales contenidos en las cenizas con diferentes extractos líquidos.

Los tratamientos generalmente utilizados son de estabilización/solidificación, que combinan la interacción química y mejoran las propiedades del residuo. Los objetivos de estos procesos son mejorar las propiedades físicas del material, aumentar el

tamaño de las partículas para reducir la interacción con el agua, obtener sólidos sin agua libre, mejorar las características de manejo y reducir la movilidad de contaminantes.

Este tipo de tratamientos está enfocado a la inmovilización de metales, ya que las moléculas orgánicas no se incorporan fácilmente a estructuras cristalinas y es más difícil que formen precipitados insolubles. Los procesos de estabilización y solidificación son muy utilizados en la gestión de residuos peligrosos.

Los diferentes sistemas de estabilización/solidificación se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos según los reactivos utilizados en el proceso. Los más utilizados son los inorgánicos basados en la utilización de cemento, silicatos, arcilla, cal, etc.

Cuando se ha tratado el residuo se debe evaluar la eficiencia del proceso de inertización, analizando el residuo sin tratar y tratado mediante análisis químicos, o los llamados test de lixiviado, que consisten en poner en contacto la muestra con un agente “lixivante” durante un determinado periodo de tiempo. De esta forma se puede comparar el contenido total del residuo con el de la matriz “inertizada” y lo que realmente se libera en contacto con el agente “extractante”.

El test de lixiviación se utiliza para simular situaciones de campo, aunque los resultados obtenidos no sean extrapolables directamente, si permiten identificar los elementos “lixiviables”, verificar la eficiencia de un determinado tratamiento y estimar el posible impacto del residuo a depositar.

En base a estos datos, nos centraremos en el estudio del residuo en hormigones, para asegurar la estabilización de los metales pesados en la matriz de cemento e identificar la migración de los elementos a largo plazo.

6.2 Metodología empleada en los ensayos de lixiviación.

La metodología empleada se ha realizado conforme a la UNE EN 12920. Dicha norma (AENOR, 2015) es específica para determinar un comportamiento de lixiviado de un residuo bajo condiciones específicas, ya que se utiliza la estabilización/solidificación del material, por tanto, se considerarán las condiciones externas que tienen una influencia en la liberación de componentes del residuo en cuestión, en nuestro caso la estabilización responde a un marco temporal de 100 años.

La metodología que se ha seguido, si bien responde a los criterios establecidos en la norma descrita, tiene particularidades como el tamaño de las partículas. En estos trabajos se ha planteado que la muestra sea una probeta de hormigón, ya que lo queremos demostrar es que el encapsulamiento de cualquier metal pesado quede inmóvil en el tiempo. Las últimas referencias encontradas (Bestgen y col., 2016; Hayes y col., 2015; Jang y col., 2015) vienen a demostrar la necesidad de armonizar alguna metodología que aborde el estudio del lixiviado en este tipo de tratamientos.

La descripción de las etapas y la metodología aplicada ha sido:

a) Definición del problema y solución buscada:

Aunque la clasificación del residuo afirma que la composición de materiales pesados es mínima, es decir a nivel de trazas y siempre dentro de los límites legales, comprobaremos que el uso que se busca no perjudica la situación actual en el medio ambiente, al contrario validaremos el uso de dicho residuo para su empleo en hormigones y lo emplearemos como sustitución del árido. Daremos respuesta a dos problemáticas ambientales:

- Reducción de la extracción de árido de las canteras.
- No incrementar la superficie destinada a vertederos

b) Liberación:

Mediante el estudio del lixiviado del material se pretende ver si la nueva matriz de hormigón formulada es capaz de retener las trazas de metales pesados dentro del mismo sin que se produzca deterioro alguno en el material, mediante un envejecimiento acelerado del mismo.

c) Determinación del comportamiento en la lixiviación dentro del marco de tiempo especificado.

Para determinar el comportamiento en el material se siguió la siguiente metodología,

- La primera fue estudiar una probeta cúbica de 100 mm de lado, estudiándose la dosificación correspondiente al hormigón HACE, ya que era la que más cantidad de escoria contenía. Curada durante 28 días en cara húmeda para ver las proporciones de materiales pesados que desprendía en esta primera lixiviación. La probeta ha sido sumergida en 5 l de agua destilada durante 24 horas (Figura 6-1). Transcurrido el periodo de ensayo, se ha procedido a la extracción de la disolución por lixiviado de la muestra y se han realizado las determinaciones de los elementos contenidos en la muestra.
 - Posteriormente, se envejecieron las probetas aceleradamente. Este proceso transcurre tras 28 días de curado en cámara húmeda, se sometió a un secado en estufa a 60°C durante 48 horas para después sumergirlas en un baño de agua a 70°C durante otros 32 días. Luego se depositaron en la calle expuestas a la intemperie. Una vez envejecida se procedió a desarrollar la misma técnica descrita en el párrafo anterior para el ensayo de lixiviación.
 - Se ha realizado el mismo procedimiento para un hormigón HC.
- d) Ensayo específico de un parámetro.

En las tablas 6-1 y 6-2 se muestran los resultados de los parámetros ensayados a cuatro muestras, correspondientes al contenido total de metales pesados y no pesados de las cuatro muestras ensayadas. Estos ensayos de referencia se han extraído de la patente: (Rubio-Cintas y col, 2013) y se corresponden con:

- Hormigón Convencional a 28 días (1)
- Hormigón Convencional con envejecido rápido.(2)
- Hormigón con adición de escorias (sustitución de un 25% de cemento por escoria) 28 días.(3)
- Hormigón con adición de escorias sustitución de un 25% de cemento por escoria) con envejecido acelerado.(4)

Los ensayos descritos en la tabla 6-1, se realizaron en los laboratorios de ACERINOX. Los resultados se muestran en partes por millón (ppm). En las diferentes tablas se realiza una comparativa entre las probetas curadas simplemente y las envejecidas. Los resultados de la tabla 6-1 se expresan en mg/l y los resultados de la tabla 6-2 se expresan en mg/kg de materia seca.

Los ensayos mostrados en la tabla 6-3 se han realizado con un espectrómetro ICP-AES modelo Iris Intrepid de Thermo Elemental (Figura 6-2) ubicado en los servicios centrales de Investigación científica y tecnológica de la Universidad de Cádiz. Se ha elegido esta técnica ya que garantiza, atendiendo a los límites de detección, la comprobación respecto a los límites legales exigibles las especies lixiviadas y de esta forma se ajusta el presupuesto de la investigación.

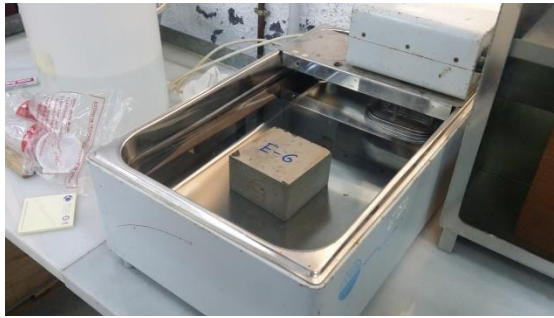


Figura 6-1. Probeta inmersa en agua destilada.

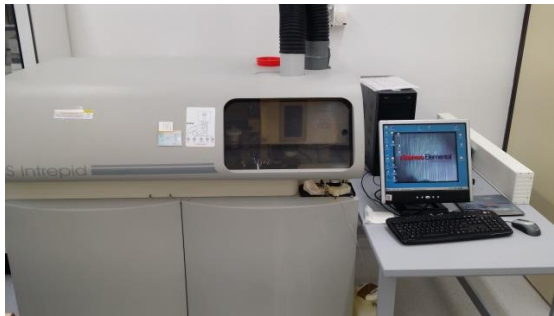


Figura 6-2. Equipo utilizado. ICP-AES modelo Iris Intrepid de Thermo

| Elementos | | Lixiviado hormigón convencional 1 ^a (1) | Lixiviado hormigón convencional 2 ^a (2) | Lixiviado hormigón escoria 1 ^a (3) | Lixiviado hormigón escoria 2 ^a (4) |
|-----------|------|---|---|--|--|
| [Ca] | mg/l | 1,56 ± 0,1 | 1,76 ± 0,1 | 1,88 ± 0,1 | 1,48 ± 0,1 |
| [Na] | mg/l | 16,81 ± 1,9 | 7,15 ± 1,9 | 13,52 ± 1,9 | 6,29 ± 1,9 |
| [K] | mg/l | 28,15 ± 0,056 | 17,87 ± 0,056 | 23,6 ± 0,056 | 14,59 ± 0,056 |
| [Si] | mg/l | 2,75 ± 0,025 | 1,9 ± 0,025 | 2,88 ± 0,025 | 2,09 ± 0,025 |
| [Al] | mg/l | 0,071 ± 0,014 | 0,0042 ± 0,014 | 0,11 | 0,048 |
| [As] | mg/l | <0,034 | <0,034 | <0,034 | <0,034 |
| [Cd] | mg/l | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 |
| [Cr] | mg/l | 0,007 | 0,023 | 0,006 | 0,0013 |
| [Cu] | mg/l | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 |
| [Fe] | mg/l | <0,042 | <0,042 | <0,042 | <0,042 |
| [Mg] | mg/l | <0,053 | <0,053 | <0,053 | <0,053 |
| [Mn] | mg/l | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| [Ni] | mg/l | <0,010 | <0,010 | <0,010 | <0,010 |
| [Pb] | mg/l | <0,021 | <0,021 | <0,021 | <0,021 |
| [Sn] | mg/l | <0,021 | <0,021 | <0,021 | <0,021 |
| [Ti] | mg/l | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 |
| [Zn] | mg/l | 0,014 ± 0,002 | <0,002 | 0,01 ± 0,002 | 0,003 ± 0,002 |
| pH | | 8,990 | 8,160 | 9,960 | 8,220 |

Tabla 6-1. Resultado lixiviados HC en ppm (mg/l)



| Elementos | Lixiviado hormigón convencional 1 ^a (1) | Lixiviado hormigón convencional 2 ^a (2) | Lixiviado hormigón escoria 1 ^a (3) | Lixiviado hormigón escoria 2 ^a (4) |
|-------------------------|---|---|--|--|
| PESO MUESTRA (g) | 353,26 | | 360,15 | |
| [Ca] mg/Kg | 4,416 ± 0,28 | 4,9822 ± 0,28 | 5,22 ± 0,28 | 4,1094 ± 0,28 |
| [Na] mg/Kg | 47,585 ± 5,28 | 20,24 ± 5,28 | 38,272 ± 5,28 | 17,806 ± 5,28 |
| [K] mg/Kg | 79,686 ± 1,56 | 50,586 ± 1,56 | 66,806 ± 1,56 | 41,301 ± 1,56 |
| [Si] mg/Kg | 7,7846 ± 0,07 | 5,3785 ± 0,07 | 8,1526 ± 0,07 | 5,9163 ± 0,07 |
| [Al] mg/Kg | 0,201 ± 0,039 | 0,0119 ± 0,039 | 0,3114 ± 0,039 | 0,1359 ± 0,039 |
| [As] mg/Kg | <0,093 | <0,093 | <0,093 | <0,093 |
| [Cd] mg/Kg | <0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 |
| [Cr] mg/Kg | 0,02 | 0,065 | 0,017 | 0,0036 |
| [Cu] mg/Kg | <0,009 | <0,009 | <0,009 | <0,009 |
| [Fe] mg/Kg | <0,117 | <0,117 | <0,117 | <0,117 |
| [Mg] mg/Kg | <0,146 | <0,146 | <0,146 | <0,146 |
| [Mn] mg/Kg | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 |
| [Ni] mg/Kg | <0,029 | <0,029 | <0,029 | <0,029 |
| [Pb] mg/Kg | <0,058 | <0,058 | <0,058 | <0,058 |
| [Sn] mg/Kg | <0,058 | <0,058 | <0,058 | <0,058 |
| [Ti] mg/Kg | <0,009 | <0,009 | <0,009 | <0,009 |
| [Zn] mg/Kg | 0,039 ± 0,006 | <0,006 | 0,026 ± 0,006 | 0,007 ± 0,006 |
| pH | 8,990 | 8,160 | 9,960 | 8,220 |

Tabla 6-2. Resultado lixiviados en mg/kg de Hormigón con reducción s.p.c 25% escorias

A continuación en las tablas 6-3 y 6-4 se relacionan los valores obtenidos al ensayar, conforme a la normativa descrita, el lixiviado del hormigón HACE. Se ha realizado el ensayo de lixiviado del HACE al ser el que más cantidad de escoria incorpora a la amasada.

| Elementos | | Lixivado hormigón Autocompactante Escorias 1 ^a | | | Lixivado hormigón Autocompactante Escorias 2 ^a | | |
|-----------|------|---|---|-------|---|---|-------|
| [Ca] | mg/l | 4,223 | ± | 0,02 | 3,84 | ± | 0,02 |
| [Na] | mg/l | 13,855 | ± | 0,02 | 6,54 | ± | 0,02 |
| [K] | mg/l | 15,2 | ± | 0,02 | 7,74 | ± | 0,02 |
| [Si] | mg/l | 2,75 | ± | 0,02 | 2,21 | ± | 0,02 |
| [Al] | mg/l | <0,100 | | | <0,100 | | |
| [As] | mg/l | <0,100 | | | <0,100 | | |
| [Cd] | mg/l | <0,005 | | | <0,005 | | |
| [Cr] | mg/l | <0,020 | | | <0,020 | | |
| [Cu] | mg/l | <0,020 | | | <0,020 | | |
| [Fe] | mg/l | <0,010 | | | <0,010 | | |
| [Mg] | mg/l | 0,53 | ± | 0,001 | 0,47 | ± | 0,001 |
| [Mn] | mg/l | <0,001 | | | <0,001 | | |
| [Ni] | mg/l | <0,010 | | | <0,010 | | |
| [Pb] | mg/l | <0,100 | | | <0,100 | | |
| [Sn] | mg/l | <0,100 | | | <0,100 | | |
| [Ti] | mg/l | <0,010 | | | <0,010 | | |
| [Zn] | mg/l | 0,018 | ± | 0,002 | 0,011 | ± | 0,002 |

Tabla 6-3. Resultado lixiviados HACE en ppm (mg/l)

| Elementos | Lixivado hormigón Autocompactante Escorias 1 ^a | Lixivado hormigón Autocompactante Escorias 2 ^a |
|---------------------------------|---|---|
| PESO MUESTRA (g) | 2492 | |
| [Ca] mg/Kg | 8,4731 ± 0,0401 | 7,7047 ± 0,0401 |
| [Na] mg/Kg | 27,799 ± 0,0401 | 13,122 ± 0,0401 |
| [K] mg/Kg | 30,498 ± 0,0401 | 15,53 ± 0,0401 |
| [Si] mg/Kg | 5,5177 ± 0,0401 | 4,4342 ± 0,0401 |
| [Al] mg/Kg | <0,201 | <0,201 |
| [As] mg/Kg | <0,201 | <0,201 |
| [Cd] mg/Kg | <0,01 | <0,01 |
| [Cr] mg/Kg | <0,04 | <0,04 |
| [Cu] mg/Kg | <0,04 | <0,04 |
| [Fe] mg/Kg | <0,02 | <0,02 |
| [Mg] mg/Kg | 1,0634 ± 0,001 | 0,943 ± 0,001 |
| [Mn] mg/Kg | <0,002 | <0,003 |
| [Ni] mg/Kg | <0,02 | <0,029 |
| [Pb] mg/Kg | <0,201 | <0,058 |
| [Sn] mg/Kg | <0,201 | <0,058 |
| [Ti] mg/Kg | <0,02 | <0,009 |
| [Zn] mg/Kg | 0,0361 ± 0,006 | <0,006 |

Tabla 6-4. Resultado lixiviados en mg/kg de HACE

6.3 Interpretación de los resultados de la lixiviación

Las tablas 6-2 y 6-4 se han obtenido de aplicar el balance en mg/Kg de materia seca aplicando una proporción sencilla. Por ejemplo analizando el Zn de la tabla 6-3 resulta un valor de 0,018 mg/l si aplicamos la expresión siguiente:

$$(L_{zn} \times V) / P = Y \quad [6.1]$$

Donde:

L_{zn} es el resultado de la especie lixiviada (mg/l)

V es el volumen de agua empleada para el ensayo (l)

P es el peso de la muestra (g),

Se considera la densidad del agua: $d_{H_2O} = 1 \text{ g/ml}$

Obtenemos:

$$\frac{0,018 \times 5}{2,492} = 0,0361 \text{ mg/Kg}$$

El valor de Zn lixiviado expresado en materia seca es de 0,0361 mg/Kg, muy inferior a 50 mg/Kg (referido a una relación L/S= 10 l/Kg) valor que establece la normativa aplicable. En la tabla 6-5 se analiza el cumplimiento respecto a los límites legales establecidos y refiriéndolos a una relación L/S de 2 l/Kg que es la relación con la que se han realizado las determinaciones.

En los resultados expuestos en las tablas 6-1 y 6-2, se observa en la segunda lixiviación una disminución de la concentración de las especies lixiviadas. El hecho de que algunos elementos como el Cr_{total} presente valores ligeramente superiores al volver al lixiviar, se debe a la disminución del pH y la consiguiente disolución parcial. El valor más alto que presenta el cromo total es de 0,0036 muy por debajo de los límites legales 2 mg/l.

Con los resultados de las tablas 6.3 y 6.4 no podemos evidenciar comportamientos análogos a los anteriores ya que los límites de detección,

correspondientes a los equipos donde se han realizado los ensayos (UCA) son superiores a los primeros ensayos realizado en un laboratorio con mayor límites de detección. En cualquier caso, el objeto principal de esta tesis es verificar el correcto comportamiento ambiental de los hormigones planteados y con la experimentación realizada se asegura que las especies lixiviadas presentan valores que cumplen con la normativa vigente en materia medioambiental.

| Elementos | | Comprobación s/g límites Orden AAA/661/2013 de 27 de diciembre | | |
|-----------|-------|--|-----------------------------|-----------------|
| | | Valores máximos L/S= 10 l/Kg | Valores máximos L/S= 2 l/Kg | Resultado mg/Kg |
| [As] | mg/Kg | 2 | 0,4 | <0,201 |
| [Cd] | mg/Kg | 1 | 0,2 | <0,01 |
| [Cr] | mg/Kg | 10 | 2 | <0,04 |
| [Cu] | mg/Kg | 50 | 10 | <0,04 |
| [Ni] | mg/Kg | 10 | 2 | <0,02 |
| [Pb] | mg/Kg | 10 | 2 | <0,201 |
| [Zn] | mg/Kg | 50 | 10 | 0,036 |

Tabla 6-5. Comprobación resultados de lixiviación HACE.

6.4 Conclusiones

La incorporación al hormigón de Escorias siderúrgicas de horno de arco eléctrico, procedentes de la fabricación de acero inoxidable, responde a la técnica de estabilización/solidificación. Se ha verificado la premisa de partida que planteaba que la técnica utilizada garantizaría que las especies lixiviadas quedarían dentro de los límites impuestos por la normativa aplicable en materia ambiental. Este hecho queda constatado en numerosas publicaciones (Monosi y col., 2016; Rondi y col., 2016; Sheen y col., 2014; Sheen y col., 2013).

Concluimos que las escorias de horno de arco eléctrico cuando son incorporadas al hormigón como sustitución del árido fino cumplen con los requisitos ambientales exigibles según la normativa vigente.

6.5 Índice de figuras

| | |
|--|------|
| Figura 6-1. Probeta inmersa en agua destilada..... | 6.11 |
| Figura 6-2. Equipo utilizado. ICP-AES modelo Irish Intrepid de Thermo... | 6.11 |

6.6 Índice de tablas

| | |
|--|------|
| Tabla 6-1. Resultado lixiviados HC en ppm (mg/l)..... | 6.14 |
| Tabla 6-2. Resultado lixiviados en mg/Kg de Hormigón con reducción s.p.c 25% escorias | 6.15 |
| Tabla 6-3. Resultado lixiviados HACE en ppm (mg/l) | 6.16 |
| Tabla 6-4. Resultado lixiviados en mg/Kg de HACE | 6.17 |
| Tabla 6-5. Comprobación resultados de lixiviación HACE..... | 6.19 |

6.7 Bibliografía

AENOR. (2015). Caracterización de residuos, Lixiviación, 2–4.

Altabbaa, A., & Prose, S. (1996). Treatability study of in-situ stabilisation solidification of soil contaminated with methylene blue. *Environmental Technology*, 17(2), 191–197.

Bestgen, J. O., Cetin, B., & Tanyu, B. F. (2016). Effects of extraction methods and factors on leaching of metals from recycled concrete aggregates. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13), 12983–13002. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6456-0>

Glasser, F. P. (1997). Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. *Journal of Hazardous Materials*, 52(2), 151–170. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(96\)01805-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(96)01805-5)

Hayes, J. B., Wang, J., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., Wu, C.-Y., Deford, D., & Townsend, T. G. (2015). Evaluation of leaching of trace metals from concrete amended with cement kiln baghouse filter dust. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.012>

Jang, J. G., Ahn, Y. B., Souri, H., & Lee, H. K. (2015). A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder: Heavy metal leaching characteristics and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 79, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.058>

Jefatura de Estado. (2011). Ley 22/11 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *Boletín Oficial Del Estado (BOE-A-2011-13046)*, 1–52.

La Greca, M., Buckungam, P., & Evans, J. (1996). *Gestión de residuos tóxicos*. (Mc Graw Hill, Ed.).

Monosi, S., Ruello, M. L., & Sani, D. (2016). Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 66, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.004>

Paria, S., & Yuet, P. (2006). Solidification-stabilization of organic and inorganic

- contaminants using portland cement: a literature review. *Environmental Reviews*, 14(1), 217–255.
- Rondi, L., Bregoli, G., Sorlini, S., Cominoli, L., Collivignarelli, C., & Plizzari, G. (2016). Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation. *Composites Part B: Engineering*, 90, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.022>
- Rubio-Cintas, M. D., Parron-Vera, M. A., & Contreras de Villar, F. (2013). METHOD FOR PRODUCING CINDER CONCRETE. España. <https://doi.org/CO4B18/14>
- Sheen, Y.-N., Wang, H.-Y., & Sun, T.-H. (2014). Properties of green concrete containing stainless steel oxidizing slag resource materials. *Construction and Building Materials*, 50, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.017>
- Sheen, Y. N., Wang, H. Y., & Sun, T. H. (2013). A study of engineering properties of cement mortar with stainless steel oxidizing slag and reducing slag resource materials. *Construction and Building Materials*, 40, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.078>
- Silveira, B. I., Dantas, A. E. M., Blasques, J. E. M., & Santos, R. K. P. (2003). Effectiveness of cement-based systems for stabilization and solidification of spent pot liner inorganic fraction. *Journal of Hazardous Materials*, 98(1), 183–190. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00317-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00317-5)
- Tchobanoglous, G., Theisen, Y., & Vigil, S. (2003). *Integrated solid Waste management: Engineering principles and management*. (M. G. Hill, Ed.).
- UE. (2010). Lista europea de residuos. *Comision 2010/955/UE*.
- Van der Sloot, H., Heasman, L., & Quevauviller, P. (1996). Harmonization of leaching/extraction tests for environmental risk assessment. *Science of The Total Environment*, 178(1–3), 133–139.

CAPÍTULO 7

Análisis de los resultados y correlaciones encontradas

INDICE

7.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS. 7.5

7.2. BIBLIOGRAFÍA. 7.7

7.1. Análisis de resultados.

El análisis de los resultados debe hacerse conjugando distintos puntos de vista. Por un lado desde el cumplimiento con la vigente normativa de hormigón estructural (EHE-08), por otro lado desde el prisma de la obligación del investigador en avanzar en el estado del conocimiento y plantear nuevos estudios que propongan la valorización de residuos y de esta forma trabajar por el compromiso con la sociedad de conseguir reducir, en lo posible, los impactos ambientales que la acción del hombre provoca.

En esta investigación se han detectado puntos fuertes y débiles al hecho de sustituir árido fino por Escorias de horno de arco eléctrico de acero inoxidable en la fabricación del hormigón.

El planteamiento de la tesis nos ha llevado a encontrar dos tipos de hormigón que mejoran las prestaciones tanto del hormigón convencional como la del hormigón autocompactante convencional. Las conclusiones capitulares cuantifican dichas mejoras. En términos generales los tipos de hormigón desarrollados mejoran:

- La trabajabilidad de la mezcla.
- Mejoran su robustez.
- Mejoran su resistencia mecánica a compresión para el hormigón HCE.
Afirmación compartida con:
- Mejoran su comportamiento frente al desgaste.
- La solución de valorización propuesta garantiza la no lixiviación de los metales pesados que pudieran contener.

Estas afirmaciones son compartidas con diversas publicaciones de carácter internacional. (Adegoloye y col., 2016; Sheen y col, 2014; Sheen y col., 2016)

Estas mejoras aplicables al nuevo material se ven favorecidas por otras acciones colaterales como son:

- La mejora ambiental que supone valorizar un residuo

- Ahorro para la empresa productora de residuos ya que puede transformar éstos en un subproducto con el posible beneficio añadido, es decir transformar gastos en ingresos. Hecho también referido por (Sheen y col., 2016)

Siendo rigurosos con la investigación es preciso destacar los puntos débiles o dicho desde un punto de vista optimista: mejorables. Éstos son:

- Bajada de la resistencia a compresión para hormigones autocompactantes. Esta situación se debe principalmente a la alta cantidad de finos aportada a la mezcla y debido a su alto % de absorción de agua, tanto en el lodo como el propio hormigón. También influye de manera importante la alta relación agua/cemento de 0,55.
- El incremento de la absorción y porosidad del hormigón HACE perjudica al ensayo de penetración de agua bajo presión a la vez que empeoran los resultados de carbonatación, concluyendo limitaciones constructivas en función del tipo de ambiente donde se vaya a colocar el hormigón. En este sentido esta tesis coincide con los estudios.

El incremento en los porcentajes de absorción y la necesidad de trabajar con relaciones agua/cemento más altas está constatado también por otros autores: (Manso y col., 2011; Manso y col., 2004; Pellegrino y Gaddo, 2009; San-José y col., 2014).

El balance final de la tesis es muy positivo, a pesar de los puntos de mejora a seguir trabajando, concluyen la creación de dos tipos de hormigón, fabricados en gran medida con desechos siderúrgicos, que mejoran las prestaciones del hormigón convencional y dan respuesta al compromiso social por la mejora del medio ambiente.

7.2. Bibliografía.

- Adegoloye, G., Beaucour, A.-L., Ortola, S., & Noumowe, A. (2016). Mineralogical composition of EAF slag and stabilised AOD slag aggregates and dimensional stability of slag aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, *115*, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.036>
- Manso, J. M., González, J. J., & Polanco, J. (2004). Electric arc furnace slag in concrete. *Journal of Material in Civil Engineering*, *16*(6), 639–645.
- Manso, J. M., Hernández, D., Losáñez, M. M., & González, J. J. (2011). Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags. *ACI Materials Journal*, *108*(6).
- Pellegrino, C., & Gaddo, V. (2009). Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, *31*, 663–671. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.006>
- San-José, J. T., Vegas, I., Arribas, I., & Marcos, I. (2014). The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. *Materials and Design*, *60*, 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.030>
- Sheen, Y.-N., Wang, H.-Y., & Sun, T.-H. (2014). Properties of green concrete containing stainless steel oxidizing slag resource materials. *Construction and Building Materials*, *50*, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.017>
- Sheen, Y., Huang, L.-J., Sun, T.-H., & Le, D.-H. (2016). Engineering Properties of Self-compacting Concrete Containing Stainless Steel Slags. *Procedia Engineering*, *142*, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.016>

CAPÍTULO 8

Conclusiones

INDICE

| | | |
|-----|---------------------------------------|------|
| 8.1 | CONCLUSIONES PARCIALES | 8.7 |
| 8.2 | CONCLUSIONES FINALES | 8.8 |
| 8.3 | FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 8.10 |

8.1 Conclusiones parciales

Respecto al material de partida, las EAFSS, podemos afirmar:

- Atendiendo a su composición granulométrica podemos validar su uso en el hormigón considerándolo Filler Calizo.
- Aportan el contenido de finos necesario para poder diseñar hormigón autocompactante.
- La utilización de EAFSS en lugar de Filler calizo evitará la extracción de árido y la consecuente reducción de la huella de carbono en la producción del hormigón.
- Se debe prestar especial atención al estudio a los valores de absorción del material ya que en el caso del lodo aumenta considerablemente.
- Debido al alto contenido de sulfatos solubles en el lodo, deberán realizarse estudios que garanticen los porcentajes máximos a sustituir en función del ambiente de exposición definido.

En cuanto al comportamiento en estado fresco de las dosificaciones HCE y HACE, afirmamos:

- La incorporación de EAFSS aumenta la trabajabilidad del hormigón.
- La incorporación de EAFSS mejora la robustez del hormigón.
- Cumple con los parámetros reológicos de los morteros equivalentes de hormigón autocompactante, es decir evidencian un comportamiento reo-espesante.
- Existe correlación directa entre los parámetros reológicos de los morteros equivalentes con el hormigón fabricado.

Respecto al estado endurecido concluimos:

- La sustitución total del árido fino por EAFS aumentan la densidad del hormigón en un 5%

- El hormigón HCE aumenta un 15%, la resistencia a compresión respecto a los HC
- El hormigón HACE disminuye la resistencia a compresión un 35 respecto al HC.
- Se obtienen dos tipos de hormigón, HCE y HACE que cumplen con los criterios resistentes para el ambiente IIIa.
- Las resistencias a flexión y a flexotracción cumplen con las relaciones establecidas en la normativa.
- Los valores de absorción y permeabilidad se ven perjudicados por la adición de EAFSS.
- El hormigón HC y el HACE son más resistentes al desgaste que el hormigón convencional.
- El estado de carbonatación del HCE es similar al HC.
- Los valores de penetración de agua a presión aumentan con la adición de EAFSS, si bien están dentro de la normativa aplicable.
- El estado de carbonatación del HACE respecto al HC aumenta de forma que hay que definir correctamente el tipo de ambiente, para garantizar la durabilidad de la estructura.

En cuanto al comportamiento ambiental del hormigón HCE y HACE, afirmamos:

- La incorporación de EAFSS como sustitutivo en el hormigón no producen lixiviado de las especies pesadas que pudiera contener.

8.2 Conclusiones finales

Los estudios realizados en esta tesis dan respuesta a los objetivos planteados en los siguientes términos.

En términos generales la sustitución de áridos por EAFSS aporta las siguientes ventajas comunes a los dos tipos de hormigón estudiados:

- Se aporta una vía de valorización a la escoria siderúrgica que actualmente tiene nula tasa de recuperación.
- En el caso de utilizarlo se reduciría la producción extractiva de áridos.

- Los hormigones HCE y HACE mejoran su trabajabilidad respecto a los HC y HAC.
- Los hormigones HCE y HACE mejoran su robustez respecto a los HC y HAC.
- Se incrementa la densidad del producto y puede ser beneficioso para la producción de elementos donde el peso del elemento favorezca la solución técnica a aportar.
- No es necesario reprocesar el producto para su uso incorporación en el hormigón.

En el caso de los HCE, se obtiene:

- Aumento de la resistencia a compresión.

En el caso de los HACE, se consigue:

- Un hormigón con prestaciones autocompactantes.

8.3 Futuras líneas de investigación

Debido a los resultados obtenidos y dando continuidad a las líneas de investigación definidas por los grupos de investigación se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Avanzar en los estudios reológicos de los morteros equivalentes con el objeto de ampliar el conocimiento en los rangos de sustitución de las EAFSS por árido fino.
- Manteniendo la estructura de la metodología seguida en esta tesis, plantear nuevas dosificaciones con modificaciones de la relación a/c e introduciendo nuevos aditivos adaptados al nuevo material incorporado (EAFSS).
- A partir de los resultados de la línea anterior proponer mejoras para la solución autocompactante (HACE) relativas a clase resistente y durabilidad.
- Realizar estudios que demuestren que la solución de valorización de EAFSS propuesta, reduce la huella de carbono del hormigón que actualmente es comercializado.
- Estudiar nuevas metodologías para los ensayos de lixiviado adaptados a la propuesta de valorización defendida en esta tesis.