

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE MATERIALES
AVANZADOS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***HORMIGÓN SIDERÚRGICO
AUTOCOMPACTANTE: DEL MATERIAL A LA
ESTRUCTURA***

Estudiante	<i>Martínez San Millán, Jorge</i>
Director	<i>San José Lombera, José Tomás</i>
Departamento	<i>Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.</i>
Curso académico	<i>2022-2023</i>

Bilbao, 17-07-2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, quienes han sido mi apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso. Su amor, comprensión y aliento han sido fundamentales en mi camino hacia la finalización de este trabajo de fin de máster. Agradezco de corazón su constante apoyo y sacrificio para que pudiera dedicar tiempo y esfuerzo a este proyecto.

También quisiera agradecer a mis amigos, quienes me han brindado su amistad, ánimo y motivación durante estos años. Su presencia en mi vida ha sido un impulso fundamental para enfrentar los desafíos y mantenerme enfocado en mis metas. Agradezco sinceramente su paciencia, comprensión y alegría compartida, que han sido un bálsamo en momentos de estrés y fatiga.

No puedo dejar de mencionar a mi tutor José Tomás, cuya guía y conocimientos han sido cruciales en el desarrollo de este trabajo de investigación. Aprecio enormemente su compromiso, dedicación y orientación profesional que me ha brindado durante todo el trabajo.

Quisiera mostrar mi agradecimiento por la aportación de fondos a las investigaciones y desarrollos aquí presentados, según las siguientes entidades: MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y ERDF A way of making Europe, la Unión Europea y Next Generation EU/PRTR [PID2021-124203OB-I00], así como al Gobierno Vasco [IT1619-22 Grupo de Investigación SAREN].

RESUMEN

La industria más importante en el norte de España, en concreto en el País Vasco, es la siderúrgica. En esta región es predominante la producción de acero mediante la vía eléctrica, con horno de arco eléctrico (EAF, Electric Arc Furnace), la producción de acero en la CAPV representa casi el 1% de la producción mundial de acero mediante esta vía. A pesar de su mayor eficiencia frente a la vía integral, la vía eléctrica genera grandes cantidades de residuos que se deben gestionar adecuadamente.

Debido a esta problemática, muchos investigadores han estado estudiando diferentes aplicaciones para estos residuos. Una de las aplicaciones más estudiada es la incorporación de las escorias de arco eléctrico como árido en mezclas hidráulicas (hormigón siderúrgico) utilizadas en la construcción. De esta forma no solo resuelve el problema de acumulación en los vertederos, sino también, el consumo de recursos naturales se reduce, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental.

Con este trabajo de fin de máster se pretende avanzar en la estandarización del uso de escorias EAF en hormigones utilizados en construcción. Para ello se fabricaron diferentes probetas con el fin de estudiar sus características en estado fresco y endurecido y, además, se fabricaron elementos estructurales a escala real para comprobar su viabilidad de fabricación y su comportamiento mecánico.

Al analizar las conclusiones generales extraídas de esta investigación, se puede afirmar que se ha logrado el objetivo principal de este trabajo de fin de máster.

Palabras clave: País Vasco, Horno de arco eléctrico (EAF), Escorias, Hormigón siderúrgico, Sostenibilidad, elementos estructurales

ABSTRACT

The most important industry in northern Spain, specifically in the Basque Country, is the steel industry. Steel production through the electric route, using an electric arc furnace (EAF), is predominant in this region. The steel production in the Basque Country represents nearly 1% of the global steel production through the electric route. Despite its higher efficiency compared to the integrated route, the electric route generates large amounts of waste that must be properly managed.

Due to this issue, many researchers have been studying different applications for these waste materials. One of the most studied applications is the incorporation of electric arc furnace slag as aggregate in hydraulic mixtures (steel-concrete) used in construction. This not only solves the problem of accumulation in landfills but also reduces the consumption of natural resources, contributing to environmental sustainability.

This master's thesis aims to advance the standardization of EAF slag use in concrete used in construction. For this purpose, different specimens were produced to study their properties in both the fresh and hardened states. Additionally, full-scale structural elements were manufactured to verify their feasibility of production and their mechanical behavior.

Upon analyzing the general conclusions drawn from this research, it can be affirmed that the main objective of this master's thesis has been achieved.

Keywords: Basque Country, Electric arc furnace (EAF), slag, steel-concrete, sustainability, structural elements.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
2. Objetivos del trabajo.....	1
3. Estado del arte:.....	2
3.1. Industria siderúrgica:	3
3.2. Marco global y nacional de la producción de acero:	4
3.3. Escorias siderúrgicas:	9
3.4. Inestabilidad volumétrica de las escorias de acerías:	10
3.5. Estudios y diferentes aplicaciones de las escorias negras EAFs:	13
3.6. Hormigón autocompactante:	17
4. Materiales y métodos	19
4.1. Escoria de horno de arco eléctrico:.....	19
4.2. Ensayos a probetas de Hormigón:	23
4.3. Ensayo de vigas a escala real:	29
5. Ensayos a probetas de hormigón.....	34
Materiales:.....	36
Caracterización en estado fresco y comportamiento reológico	41
Propiedades en estado endurecido.....	42
Ensayos de durabilidad.....	48
6. Fabricación y rendimiento de vigas a escala real.....	55
Materiales:.....	55
Detalles de las muestras y configuración de las pruebas:	58
Resultados Experimentales:.....	60
7. Conclusiones	73
8. Bibliografía	75

Índice de Figuras:

<i>Figura 1. Fabricación acero mediante la ruta eléctrica.</i>	3
<i>Figura 2. Producción global de acero de la última década. [6]</i>	5
<i>Figura 3. Producción global de acero en el año 2020 por países. [7]</i>	5
<i>Figura 4. Evolución de la producción de acero en España [9]</i>	6
<i>Figura 5. Producción de acero española mediante la ruta eléctrica e integral de la última década. [10]</i>	7
<i>Figura 6. Mapa de acerías en España. [11]</i>	7
<i>Figura 7. Clasificación de los principales residuos generados en la industria siderúrgica</i>	9
<i>Figura 9. Incremento de volumen del hierro según el estado de oxidación. [18]</i>	12
<i>Figura 10 Ensayo de flujo en U [28].</i>	18
<i>Figura 11. a) Ensayo de cono de asentamiento. b) Ensayo de embudo en V [28]</i>	19
<i>Figura 12. Escoria de horno de arco eléctrico (EAFS)</i>	20
<i>Figura 13. Medición de la dispersión de la mezcla</i>	24
<i>Figura 14. Dimensiones de ensayo de embudo en V mini.</i>	25
<i>Figura 15. Diseño de la caja en L.</i>	25
<i>Figura 16. Jaulas de las muestras en la zona de mareas.</i>	27
<i>Figura 17. Esquema interno de las muestras.</i>	28
<i>Figura 18. Imagen del ensayo de flexión de cuatro puntos.</i>	29
<i>Figura 19. Lay out del ensayo de flexión en cuatro puntos (dibujos cortesía de Bengo).</i>	30
<i>Figura 20. Posición de LVDT y relojes comparadores (cortesía de Bengo).</i>	31
<i>Figura 21. Posición de las galgas extensométricas (cortesía de Bengo).</i>	32
<i>Figura 22. Disposición de las vigas en el ensayo de deformación a largo plazo.</i>	33
<i>Figura 23. Diseño de la prueba de deformación a largo plazo (cortesía de Bengo).</i>	33
<i>Figura 24. Posición del transductor en la prueba de deformación a largo plazo (cortesía de Bengo).</i>	34
<i>Figura 25. Clasificación de áridos naturales.</i>	37
<i>Figura 26. Clasificación de las escorias.</i>	38
<i>Figura 27: Dosificación de las mezclas.</i>	41
<i>Figura 28: Cono de asentamiento de la muestra SC2.</i>	41
<i>Figuras 29a, 29b y 29c. Porosimetría MIP de diferentes mezclas.</i>	45
<i>Figuras 30a, 30b y 30c. Imágenes SEM de la muestra SC2</i>	46
<i>Figuras 31a, 31b, 31c y 31d. Imágenes SEM de la muestra P2</i>	47

<i>Figura 32: Cambio longitudinal por contracción.</i>	48
<i>Figura 33. Variaciones de rigidez durante el ensayo de congelación-deshielo.</i>	50
<i>Figura 34. Variaciones de rigidez de varias muestras después del ensayo de humectación-secado.</i>	51
<i>Figura 35. Penetración de cloro y azufre en mezclas.</i>	52
<i>Figura 36: Muestra P4 después del análisis de penetración de cloruro (a) y después de carbonatación (b).</i>	53
<i>Figura 37: Apariencia externa de las muestras y disposición interna de las barras de refuerzo.</i>	54
<i>Figura 38. Clasificación de los áridos naturales y EAFS.</i>	55
<i>Figura 39. Clasificación de las mezclas.</i>	57
<i>Figura 40. Detalles de la configuración de la viga de flexión</i>	59
<i>Figura 41. Configuración del ensayo de flexión.</i>	59
<i>Figura 42. Detalle de viga sometida a carga mantenida.</i>	59
<i>Figura 43. Configuración del ensayo de carga mantenida.</i>	60
<i>Figura 44. Evolución de la resistencia a la compresión con el tiempo.</i>	61
<i>Figura 45. Patrón de grietas de las vigas.</i>	63
<i>Figura 46. Deformación de la armadura de acero según la sección central de la viga. .</i>	64
<i>Figura 47. Relación carga vs flecha en la sección del central de la luz total de la viga. .</i>	66
<i>Figura 48. Flecha medida (LVDT) a lo largo de la longitud a diferentes cargas.</i>	67
<i>Figura 49. Distribución de la deformación, a diferentes cargas, según la sección transversal del centro de vano.</i>	69
<i>Figura 50. Distribución de la deformación (a diferentes cargas) según planos longitudinales en la sección transversal del centro de vano.</i>	71
<i>Figura 51. Evolución de la flecha en el centro de vano en el tiempo.</i>	71

Índice de Tablas:

<i>Tabla 1: Recomendaciones de la EFNARC que especifican valores de referencia para SCC. [36]</i>	35
<i>Tabla 2: Requisitos y características para la fabricación de un SCC por la EFNARC</i>	36
<i>Tabla 3: Composición química y características físicas de las escorias.</i>	38
<i>Tabla 4: Proporciones relativas en masa empleadas en las mezclas.</i>	39
<i>Tabla 5: Composiciones cualitativas relativas de las diferentes mezclas.</i>	40
<i>Tabla 6: Características de fluidez de las mezclas.</i>	41
<i>Tabla 7: Resistencia y MIP de las mezclas.</i>	43
<i>Tabla 8: Variaciones de rigidez, resistencia y masa después de la prueba de congelación-descongelación y mojado-secado.</i>	49
<i>Tabla 9: Efectos de la intensidad eléctrica en la corrosión del refuerzo de acero.</i>	54
<i>Tabla 10: Composición química y características físicas de las escorias.</i>	56
<i>Tabla 11: Proporciones de las mezclas.</i>	57
<i>Tabla 12: Detalles de las barras de refuerzo.</i>	58
<i>Tabla 13: Valores característicos de resistencia</i>	58
<i>Tabla 14: Propiedades frescas y endurecidas de los hormigones.</i>	60
<i>Tabla 15: Resultados experimentales y teóricos</i>	62
<i>Tabla 16: Resultados teóricos de la flecha de las vigas con $E_c=39$ GPa.</i>	72
<i>Tabla 17: Resultados teóricos de la flecha de las vigas con $E_c=31$ GPa.</i>	72

Lista de Acrónimos:

EAFS: Electric Arc Furnace Slag

EAF: Electric Arc Furnace

CAPV: Comunidad Autónoma del País Vasco

GEI: Gases de Efecto Invernadero

LFS: Ladle Furnace Slag

SCC: Self-Compacting Concrete

SEM: Scanning Electron Microscopy

EDX: Energy-dispersive X-ray spectroscopy

ITZ: Interfacial Transition Zone

PA: Passing Ability

MIP: Mercury Intrusion Porosimetry

BSE: Electrones Retrodispersados

EFNARC: European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete

LVDT: Transductor Diferencial de Variación Lineal

HA: Hormigón Armado

1. Introducción

Con la preocupación ambiental en aumento, la búsqueda de la sostenibilidad en todos los sectores también ha aumentado. Por ello, muchas investigaciones se han centrado en la reutilización de residuos de procesos industriales, de tal forma que se evita su acumulación en vertederos, consiguiendo así un enfoque hacia la economía circular.

El sector de la construcción no es diferente al resto. En este caso, una de las alternativas sostenibles más estudiada es la sustitución de los áridos naturales por residuos industriales como son las escorias procedentes de la fabricación del acero según la vía eléctrica. De esta forma se le da una vida útil a un residuo (que pasa a ser coproducto) y se disminuye a su vez el consumo de recursos naturales.

Actualmente, ya está demostrada la posibilidad de utilizar las escorias de horno arco eléctrico (EAFS) en hormigones convencionales. La novedad que presenta este trabajo reside en el estudio de la fabricación y comportamiento mecánico de hormigones siderúrgicos de alta trabajabilidad, como son el hormigón bombeable y autocompactante, utilizados comúnmente en la construcción. Con el objetivo de demostrar la viabilidad de utilizar estos residuos o coproductos en elementos estructurales.

La dificultad de desarrollar hormigones siderúrgicos de alta trabajabilidad está en las propias escorias EAF. La porosidad y geometría de estas escorias reducen considerablemente la trabajabilidad de las mezclas hidráulicas. Es por esto que la dosificación de las mezclas es de vital importancia para conseguir la trabajabilidad deseada.

2. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es continuar con la estandarización de la utilización de residuos de la industria siderúrgica como áridos para la fabricación de hormigones utilizados en la industria de la construcción.

Para lograr el objetivo final del trabajo, algunos objetivos parciales han de establecerse primero:

- Para poder estandarizar el uso de las escorias de horno de arco eléctrico, es necesario comprender la interacción de las EAFS con diferentes tipos de cementos Portland estandarizados por la UE.
- Demostrar la posibilidad de fabricar un hormigón con la trabajabilidad deseada utilizando escoria de arco eléctrico como árido. Para conseguirlo se debe lograr fabricar mezclas autocompactantes y bombeables con éxito. Para ello es necesario analizar y comprender el comportamiento reológico en estado fresco de las diferentes mezclas con EAFS.

- Asegurar que las mezclas fabricadas presentan por lo menos el mismo comportamiento mecánico y durabilidad en estado endurecido.
- Demostrar la posibilidad de fabricar elementos estructurales típicos de la construcción, tales como son las vigas, con escorias de EAF. A su vez, validar el comportamiento mecánico de estos elementos estructurales mediante pruebas de carga.

3. Estado del arte:

Con la problemática medioambiental existente, se están buscando alternativas en los procesos de fabricación que reduzcan los residuos, recursos naturales empleados y la energía necesaria para su fabricación. Esto es conocido como economía circular.

La economía circular consiste en reducir los residuos al mínimo, esto implica reciclar, reutilizar y reparar productos extendiendo su ciclo de vida y generando en estos un valor añadido. De esta forma se reduce notablemente el uso de recursos naturales, y lo que esto conlleva, alteración de paisajes y hábitats generando una pérdida en la biodiversidad. Además de la reducción en el uso recursos naturales, el modelo de economía circular disminuye también la energía necesaria para la fabricación del producto, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). [1]

En la industria siderúrgica se produce una gran cantidad de residuos que, en su mayoría, están ligados a los procesos de fundición y enfriamiento. El gran volumen de residuos generados obliga a las empresas a tener grandes extensiones donde acopiar todo este material, resultando en un coste adicional para la acería. Este subproducto, coproducto o residuo es más conocido como escoria siderúrgica. [2]

Dado el problema que existe para la gestión de las escorias, en los últimos años se han estudiado diferentes aplicaciones en las que estos residuos sean sustitutos útiles de recursos naturales. La aplicación más estudiada hasta la fecha es su uso como sustituto del material granular en el hormigón. Esto presenta un gran beneficio ambiental y económico, menor sobreexplotación de las canteras y menores acumulaciones de residuos en las acerías.

En este apartado se pretende exponer las razones por las que se ha decidido realizar este trabajo de fin de máster. Para ello se explicará la industria siderúrgica y, comparando su situación en el mundo con la situación en el País Vasco, lugar donde se realiza dicho trabajo, demostrar la importancia de este sector en la comunidad autónoma. A continuación, se explicará qué son y cómo se generan las escorias siderúrgicas, los problemas que estas presentan y algunas de las aplicaciones que tienen actualmente. Por último, se detalla como se debe fabricar un hormigón para conseguir una mezcla autocompactante.

3.1. Industria siderúrgica:

La industria siderúrgica es uno de los pilares de la economía global, con una producción anual que supera los 1.900 millones de toneladas según la Asociación Mundial de Acero [3]. Su principal objetivo es producir acero, que es utilizado como materia prima para la fabricación de diferentes productos. Actualmente, existen dos procesos principales.

El primer proceso, y más antiguo de los dos, es el horno alto y consiste en la producción de acero a partir de las materias primas necesarias, mineral de hierro, carbón coque y fundentes. El primer paso es cargar la materia prima en un horno alto y someterlas a elevadas temperaturas, presión y aire para completar la combustión, transformando estos materiales de estado sólido a líquido y el óxido de hierro en hierro metálico. El producto obtenido del proceso es hierro fundido con un contenido de hierro entorno al 95% y de carbono de 3,5-4%. Posteriormente, este hierro se procesa en un horno de oxígeno básico, cuya principal función es su afino, eliminando los excesos de carbono, fósforo y azufre. Por último, se realiza un ajuste en la composición química del acero para obtener el producto con las especificaciones requeridas. [4]

El segundo proceso utilizado para obtener acero es el conocido como arco eléctrico, siendo este el más utilizado en la actualidad, como se verá en el Apartado 3.2. *Marco Global y Nacional de la Producción de Acero*. La materia prima principal de este proceso es chatarra ferrosa, que es acero reciclado. La diferencia entre ambos radica en la forma de fundir la materia prima, en este caso se utiliza unos electrodos colocados en el horno, encargados de proporcionar la energía térmica necesaria. Gracias a esta tecnología, el proceso de fabricación es mucho más eficiente energéticamente, además de tener un impacto ambiental menor.

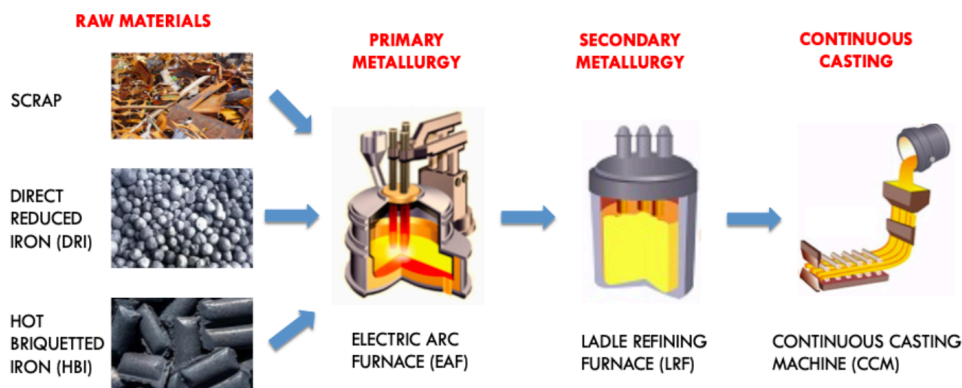


Figura 1. Fabricación de acero mediante la ruta eléctrica.

Los primeros usos de este tipo de horno, hace un siglo aproximadamente, fueron para la fabricación de aceros especiales. En la actualidad, gracias a todas las investigaciones realizadas, este proceso es altamente eficiente y se pueden fabricar cualquier tipo de acero. A diferencia del horno alto, la ruta eléctrica se divide en dos etapas.

El primer paso, al igual que en el horno alto, es la fusión del acero, con la diferencia que la materia prima introducida es chatarra junto con hierro reducido para equilibrar la composición química. El material se carga en el horno en cestas, donde se bajan unos electrodos por los que salta el arco eléctrico, generando así la energía térmica necesaria. Una vez fundido el material, se inyecta oxígeno en el metal líquido, para purificarlo, y se le añade cal y fluorita que, al combinarse con las impurezas, generan las escorias. Este afino puede ser ácido o básico, dependiendo del acero que se quiere producir. A su vez, en función del afino realizado, las escorias obtenidas serán diferentes, escorias negras para el afino ácido y blancas para el básico. [5]

Seguido al horno de arco eléctrico se encuentra la segunda etapa del proceso. El metal fundido y refinado se vierte en un horno cuchara donde se da el proceso de afino secundario o básico. Después del afino ácido, el acero aun contiene elementos que deben eliminarse. Por este motivo, se realiza una desoxidación, seguida de una desulfuración y, por último, el material se introduce a una cámara de vacío eliminando así los gases ocluidos en el acero. Finalmente, se realizan los cambios correspondientes en la composición química para conseguir las especificaciones del producto final deseado. [5]

En general el horno alto tiene un impacto significativo en el medio ambiente, ya que este emite gases de efecto invernadero y produce grandes cantidades de residuos, además de requerir grandes cantidades de energía. Este es el motivo, además de la mayor eficiencia del horno eléctrico, por el que el uso de los hornos altos está disminuyendo, manteniéndose en países donde el coste de la energía es muy barato, como puede ser China, mayor productor de acero mediante horno alto.

3.2. Marco global y nacional de la producción de acero:

El interés de este apartado es ubicar la producción de acero en el País Vasco con respecto a la producción mundial, demostrando la importancia de este sector en la región española y justificar los estudios realizados sobre la reutilización y valorización de las escorias negras en esta comunidad. Basta decir que la vía eléctrica llega a suponer en la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) casi el 1% de la producción mundial.

A mediados del siglo XX la producción mundial de acero rondaba los 200 millones de toneladas, cifra que se ha incrementado considerablemente a lo largo de los años, llegando a una producción mundial en el año 2021 de 1951 millones de toneladas. En la Figura 2 se puede observar la evolución de la producción a lo largo de los últimos años.

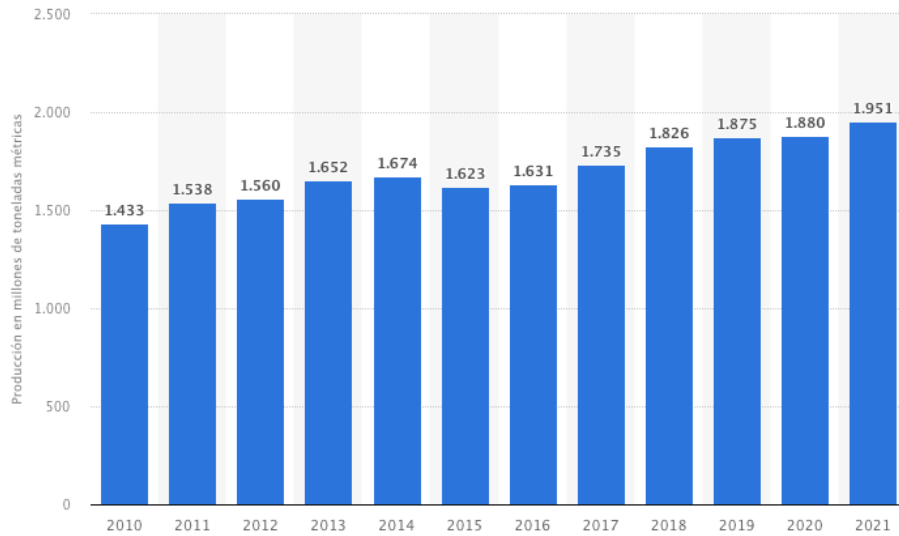


Figura 2. Producción global de acero de la última década. [6]

Si se para a analizar la evolución de los países con mayor producción mundial de acero, se observa que en 1996 China se convirtió en el mayor productor mundial de acero, superando a Japón, líder en la producción de acero durante varias décadas.

El incremento de la producción china de acero se debe a varios factores. El primero de todos y más notable es el crecimiento económico y el desarrollo industrial que ha experimentado en las últimas décadas. Esto provocó un aumento en la utilización de productos de acero para la construcción, ya sea para la construcción de nuevas viviendas como para la construcción de entornos industriales. Además, el gobierno chino ha tomado medidas políticas para impulsar este sector, proporcionando incentivos económicos e infraestructurales promoviendo así la producción y exportación de acero. Estos factores, entre muchos otros, han consolidado a China como el mayor productor mundial de acero, muy por encima del resto de países, como se puede observar en la Figura 3.

Crude steel production

World total: 1 878 million tonnes

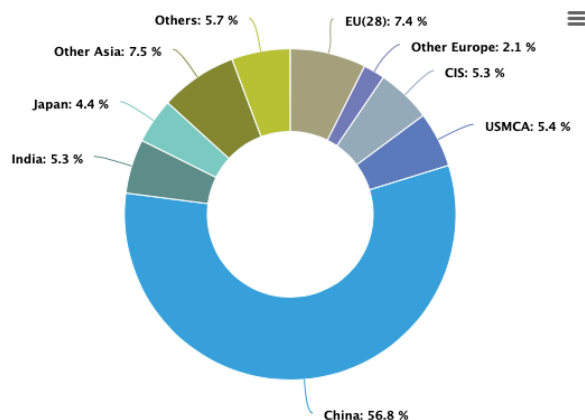


Figura 3. Producción global de acero en el año 2020 por países. [7]

Al igual que la producción mundial, la producción de acero en España también ha incrementado, llegando a su pico de producción en 2007 con 19 millones de toneladas. El descenso producido en el 2009, observable en la Figura 4, se debe a la crisis mundial que provocó una disminución de entorno al 20%. A partir de entonces la producción española de acero se ha mantenido a lo largo de los años en cifras alrededor de 14 millones de toneladas, siendo la producción actual (año 2022) de 14,2 millones de toneladas. [8]

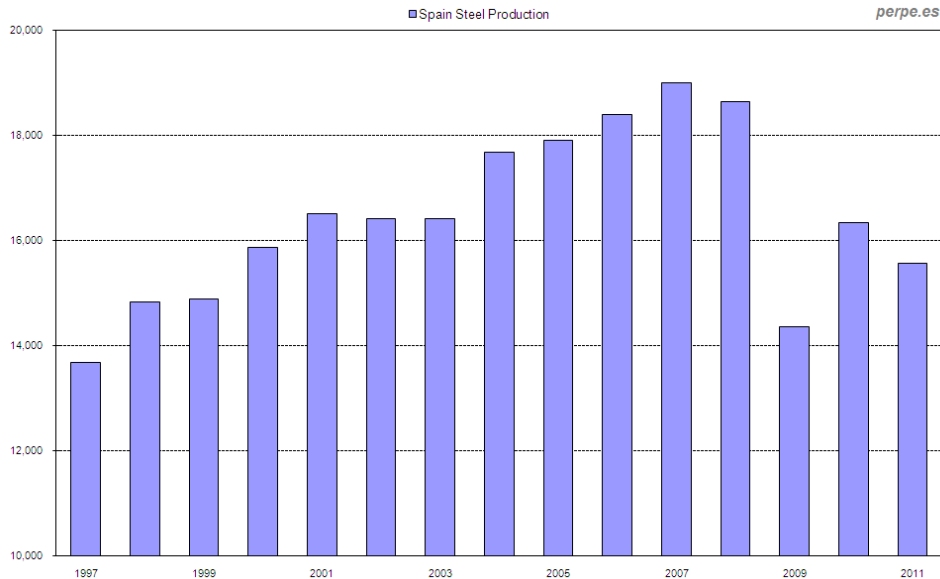


Figura 4. Evolución de la producción de acero en España [9]

Como es lógico, el aumento de la producción mundial ha provocado a su vez un incremento similar en la producción de escorias. Esto ha originado un mayor acopio de escorias en vertederos, disminuyendo el porcentaje que sigue procesos de reutilización y valorización.

Además de la cantidad total producida de acero, es importante conocer el proceso de fabricación que se ha seguido. El cuadro entre la producción global y la de España es muy diferente. A nivel global, la ruta integral supone un 70% aproximadamente de la producción total de acero. Sin embargo, en España la dinámica es la opuesta, como se puede observar en la Figura 5. [10]

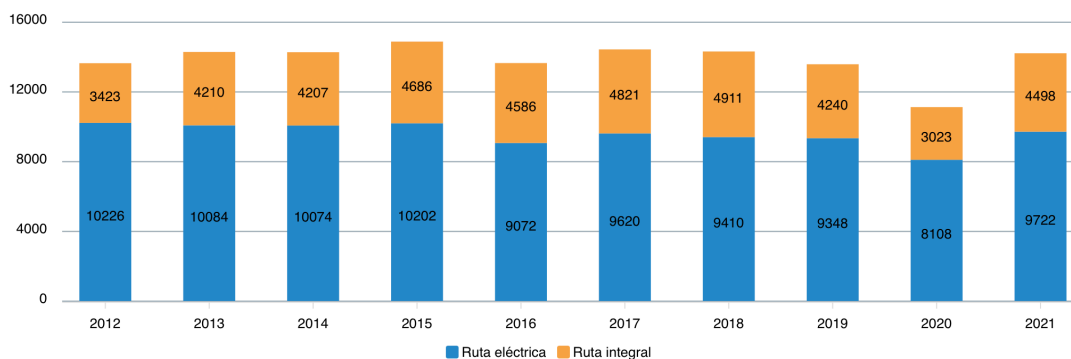


Figura 5. Producción de acero española mediante la ruta eléctrica e integral de la última década. [10]

La ruta eléctrica representa un 70% de la producción de acero, por lo que las escorias de acería eléctrica (EAF y LFS) tienen un volumen mucho mayor. Esto implica que la problemática derivada de la generación de ese tipo de escorias es mayor en nuestro país, siendo mayor aun en la cordillera cantábrica. De las 21 acerías de horno eléctrico, 11 se encuentran en el País Vasco. [11]



Figura 6. Mapa de acerías en España. [11]

Como se ha mencionado al principio del apartado, este trabajo de fin de máster ha sido realizado en el País Vasco, comunidad autónoma con gran tradición siderúrgica, principalmente en Vizcaya y Guipúzcoa. El desarrollo de este sector industrial frente al resto durante la revolución industrial se debió a los siguientes factores [12]:

- Recursos naturales: Uno de los principales motivos por lo que la industria siderúrgica tuvo un gran desarrollo es la abundancia en recursos naturales, especialmente mineral de hierro. Además, gracias a su ubicación y cercanía del

puerto de Bilbao facilitó el acceso a materias primas necesarias para la producción del acero, como son el carbón y el coque.

- Innovación tecnológica: La aplicación de nuevas tecnologías y procesos productivos hizo que la industria del País Vasco fuera pionera, reduciendo costes de fabricación y mejorando a su vez la calidad del producto. Un ejemplo de esto es la introducción del horno alto en Sestao a finales de los 1950s.
- Infraestructuras: Gracias a la red de transporte y comunicaciones con la que contaba el País Vasco durante la revolución industrial, se facilitó el comercio nacional e internacional.
- Mano de obra especializada: En ese momento el País Vasco contaba con una fuerza laboral muy capacitada y especializada en el sector siderúrgica. Esto les permitió a las empresas de la región ser más competitivas en comparación con otros sectores.

Todos estos factores sumados a su previa tradición siderúrgica hicieron que el País Vasco se convirtiera en la capital española en producción de acero durante más de dos siglos.

Con el objetivo de clarificar la importancia que tiene este sector en el País Vasco, se compara la producción mundial de acero por cada 1.000 habitantes y por cada 1.000 m² de superficie frente a la española y la vasca.

Según datos de la World Steel Association, la producción global de acero en el año 2020 fue de 233,7 Kg por habitante. Para el caso de España, la producción ese año fue de 273,8 Kg por habitante. Por último, en el País Vasco se produjeron 3,9 millones de toneladas con una población de 2,1 millones de habitantes [13], por lo que el ratio de producción de acero por habitante fue aproximadamente 1,9 toneladas.

Si comparamos los ratios de producción por metro cuadrado, según datos de la misma fuente, la producción mundial fue de 426,1 Kg por cada 1.000 m² de superficie. En España, el ratio de producción por m² fue de 25,3 toneladas. Para finalizar, con la producción mencionada en el País Vasco, 3,9 millones de toneladas, y con una superficie de 7.234 Km², la producción de acero por cada 1.000 m² fue de alrededor de 539 toneladas.

Cabe destacar que los ratios presentados no son un indicativo de mayor o menor eficiencia productiva, simplemente reflejan la cantidad de acero producido en relación con la población y la superficie de la comunidad autónoma. Sin embargo, son suficientes para demostrar la importancia del sector siderúrgico en el territorio donde tiene lugar el proyecto.

3.3. Escorias siderúrgicas:

Todo proceso de fabricación genera residuos que no se pueden reutilizar en el mismo proceso de fabricación o en distintos. Con la problemática ambiental y la atención puesta en reducir la huella de carbono se están buscando alternativas para reutilizar esos residuos consiguiendo productos finales útiles.

Los procesos presentes en la fabricación aceros y fundiciones, industria siderúrgica, no son diferentes al resto. En esta industria se pueden diferenciar claramente cinco tipos de residuos, como se muestra en la Figura 7. Cada uno presenta una problemática diferente a la hora de su aprovechamiento o reciclado.

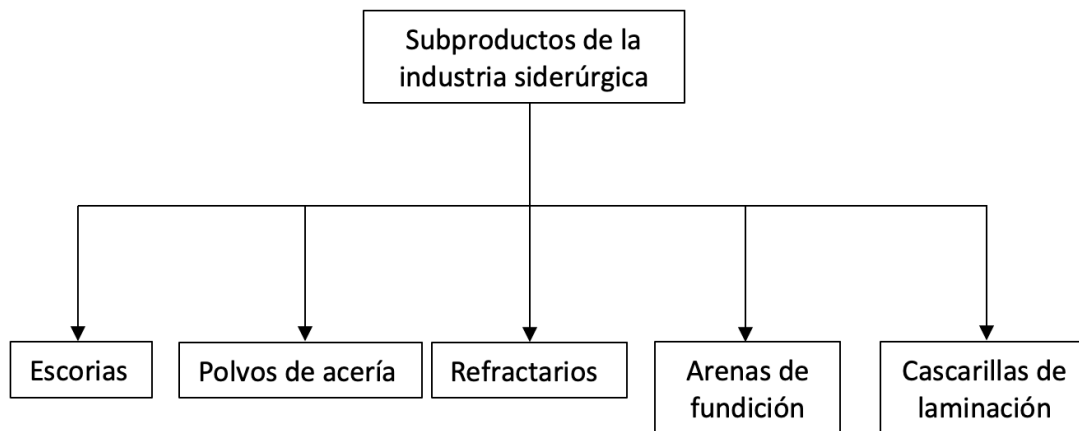


Figura 7. Clasificación de los principales residuos generados en la industria siderúrgica

El presente trabajo tiene como objeto el análisis de la viabilidad de sustituir los áridos gruesos por escorias negras. Es por eso que la explicación de los diferentes subproductos generados en la industria siderúrgica se centra en las escorias.

Las escorias de acerías son un subproducto generado en el proceso de producción del hierro y sus derivados cuando estos se enfrían y solidifican. Se trata de una mezcla de materiales más sencillos que permanecen flotando en la superficie del caldo líquido de las aleaciones férreas debido a su menor densidad. [14]

Las escorias siderúrgicas desempeñan un papel muy importante en los procesos de fabricación de materiales férreos, ya que su disposición en la superficie de los caldos de metal fundido hace de capa protectora en el propio caldo y la atmósfera, protegiéndolo de los gases existentes en el ambiente, además de aislarlo térmicamente con el ambiente, evitando que se produzcan gradientes de temperatura. Las escorias siderúrgicas propician las reacciones químicas que mejoran las características del metal participando así en el proceso de purificación y afino del metal.

Existen diversas técnicas y procesos de fabricación de hierro, aceros (aceros al carbono, aceros de baja y alta aleación, etc.) y fundiciones, que han evolucionado a lo largo de la historia mediante el progreso técnico. Asimismo, los diferentes procesos determinarán

también variaciones en los tratamientos y técnicas utilizadas, con la consecuente formación de escorias siderúrgicas de diferente composición y propiedades. La composición de la escoria siderúrgica es muy variada y depende de la procedencia mineral, pudiendo ser de la metalurgia del hierro, del acero, del níquel, del magnesio, del cobre, entre otros. [15-17]

En la Figura 8 se muestra la clasificación de las escorias en función de los diferentes procesos de fabricación de hierro y acero, sintetizando los procesos más representativos en cinco grupos: Horno Alto, Convertidor de oxígeno, **Horno de arco eléctrico (EAF)**, Horno Cuchara y Convertidor descarburación oxígeno Argón.

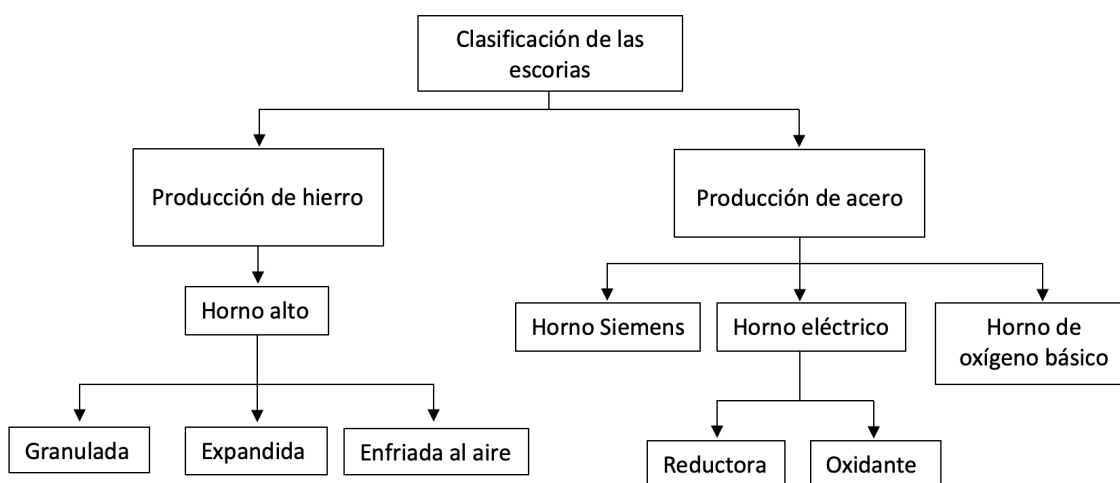


Figura 8. Clasificación de las escorias según la procedencia.

3.4. Inestabilidad volumétrica de las escorias de acerías:

El principal problema que presentan las escorias de acería en su uso en la construcción radica en su posible inestabilidad volumétrica o hinchamiento de piezas, fragmentos y partículas. Esto se debe a la presencia de compuestos no deseados. Cuatro reacciones son las principales de la inestabilidad volumétrica [15-19]:

Conversión de fases del silicato bicálcico

En el proceso de enfriamiento de las escorias, cuando se reduce la temperatura de 500°C a temperatura ambiente, la forma cristalina beta se transforma en gamma, incrementado su volumen un 10 o 12%. Este proceso del cambio alotrópico que se da en el silicato bicálcico, se traduce en una roca agrietada.

Hidratación y carbonatación de la cal libre

La presencia de cal en las escorias tiene su origen en la necesidad de fabricar aceros de alta calidad. En las escorias enfriadas, la cal está principalmente ligada en forma de silicatos (C_3S , C_2S), ferritos y aluminatos, pero dependiendo del proceso metalúrgico utilizado, pueden contener cantidades significativas de cal libre no ligada. La cal libre se

hidrata en presencia de humedad y dando como resultado un mayor volumen. La porosidad de la EAFS juega un papel importante ya que la hidratación es más factible cuanto mayor es la porosidad. Si se considera solo la hidratación, se puede representar mediante las siguientes reacciones:

1. Hidratación de la cal:



2. Carbonatación:



Como producto final de estas reacciones se obtiene carbonato de calcio, produciendo un incremento de volumen de más del doble, con 1 cm³ de cal libre se producen 2,19 cm³ de carbonato cálcico.

Hidratación del óxido de magnesia libre

Los óxidos de magnesio que no están químicamente unidos se conocen como magnesia libre. Estos óxidos pueden encontrarse en forma cristalina, llamada periclusa, en las wustitas (Fe₂Mg)O (que son menos reactivas que la periclusa) y también en la fase vítrea (teniendo una reactividad prácticamente nula).

A diferencia de la cal libre, la magnesia libre reacciona más lentamente cuando está expuesta a la humedad. La reacción de hidratación de la periclusa, que produce hidróxido de magnesio en forma de brucita, puede expresarse de la siguiente manera.



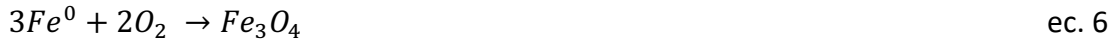
Al igual que en las reacciones de hidratación y carbonatación de la cal libre, en este caso partiendo de 1 cm³ de óxido de magnesio, también se producen 2,19 cm³ de hidróxido de magnesio.

Oxidación de Fe⁺² a Fe⁺³

La mayoría de las escorias contienen óxidos de hierro que son completamente estables. Sin embargo, cuando hay presencia de escamas finas o granulados, puede ocurrir una asociación mediante la oxidación de Fe⁺² a Fe⁺³. Cuando este fenómeno ocurre, el material ya no puede ser utilizado como material de construcción. El aumento de volumen se debe a una serie de reacciones que ocurren a partir del hierro metálico Fe⁰, que experimenta procesos de oxidación y corrosión. Las principales reacciones que se dan en estos procesos son las siguientes:

Reacciones de oxidación:





Reacciones de corrosión:



El incremento de volumen que se da a partir del hierro es diferente según la reacción que ha seguido. En la siguiente figura, se puede apreciar los diferentes incrementos que se dan según el producto final de la reacción.

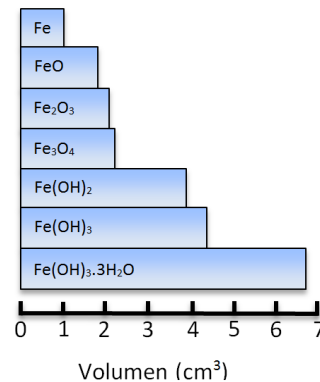


Figura 9. Incremento de volumen del hierro según el estado de oxidación. [18]

Con esta gráfica se observa que las reacciones que dan como producto óxidos de hierro, reacciones de oxidación, producen un incremento de volumen menor, llegando a duplicar el volumen en el peor de los casos. Por otra parte, las reacciones de corrosión, aquellas que producen hidróxidos de hierro, producen incrementos de 4 veces el volumen inicial (o muy superiores como caso límite degenerativo). En el peor de los casos se encuentra el hidróxido de hierro (III) trihidratado, produciendo 7 veces el volumen inicial de la reacción.

Además de las reacciones mencionadas, existen otros factores que influyen en la inestabilidad volumétrica, aunque son de menor importancia. Se pueden destacar el tamaño granulométrico de la escoria y su porosidad y tamaño de grano de la cal libre.

Otro factor importante a tener en cuenta desde el punto de vista mineralógico es el enfriamiento de las escorias. Según el enfriamiento, el material puede ser más o menos expansivo. Los elementos presentes en la escoria pueden estar en la matriz formando compuestos cristalinos o compuestos amorfos. [19]

Cuando el material se deja enfriar lentamente desde el estado líquido a temperatura ambiente, los elementos presentes en la escoria se agrupan formando estructuras cristalinas estables. Sin embargo, cuando el enfriamiento seguido es brusco, los elementos se agrupan en compuestos amorfos.

Es importante detectar tanto las estructuras cristalinas como las amorfas por diferentes motivos. Las estructuras amorfas tienden a reordenarse, confiriendo a las escorias mayores reactividades con el agua y con el hidróxido de calcio. En el caso de las estructuras cristalinas, la importancia está en que algunos compuestos pueden ser peligrosos para el hormigón ya que tienen una alta reactividad y sufren grandes aumentos de volumen, como, por ejemplo, el óxido de calcio (CaO) y la periclase (MgO).

Como ya se ha mencionado anteriormente, el objeto del presente proyecto es el estudio de la utilización de las escorias de arco eléctrico derivadas de la fabricación del acero como material granular inerte en la fabricación de hormigones. En este contexto, a continuación, se va a realizar un estudio bibliográfico sobre las posibles sus aplicaciones hasta la fecha.

3.5. Estudios y diferentes aplicaciones de las escorias negras EAFs:

En este apartado se presentan las diversas aplicaciones hasta la fecha de las escorias negras procedentes de horno de arco eléctrico, dándole mayor importancia a aquellas aplicaciones dedicadas al sector de la construcción y explicando brevemente las aplicaciones de estas escorias en otros sectores.

A pesar de los problemas que genera la inestabilidad volumétrica, estas escorias son un subproducto que puede ser aprovechado en diferentes sectores industriales, lo que contribuye a la reducción de residuos y a la sostenibilidad ambiental. Entre las diferentes aplicaciones caben destacar las siguientes:

1. Construcción de carreteras:

Las escorias negras, si se tratan adecuadamente, pueden cumplir con las especificaciones requeridas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este tipo de escorias tienen un riesgo latente de expansión e hinchamiento. Es por ello que es esencial realizar una evaluación de su potencial expansivo y limitar su uso cuando sobrepasan los valores establecidos.

Se ha comprobado que con el adecuado tratamiento, clasificación y selección de las escorias se pueden conseguir áridos de calidad para ser utilizados en mezclas hidráulicas. La principal problemática que se presenta en la fabricación de estas mezclas es la falta de finos en la fracción más pequeña. Desde el punto de vista técnico, la dosificación recomendada de áridos combina árido grueso y árido fino calizo. [20]

2. Utilización en cementera:

En la fabricación de cemento se pueden emplear las escorias negras como aporte de silicio, cal y hierro al proceso de fabricación del Clinker. Desde el punto de vista ambiental, la utilización de escorias en cementeras no presenta limitaciones. El control para asegurar la calidad medioambiental de las escorias se realiza determinando la cantidad de metales en el Clinker fabricado y las partículas expulsadas por la chimenea.

Los elementos que sufren mayor cambio en la fabricación de Clinker con escorias son el cromo y el manganeso. Sin embargo, estos dos elementos no presentan limitación en la legislación española y, además, su presencia no causa problemas de calidad técnica.

Para obtener un producto final de características idénticas al que se obtiene con materia prima convencional, la dosificación adecuada, con arreglo a la composición química de la escoria, se aproxima a un 4% de escorias. Sin embargo, en otros estudios se han obtenido cementos de categoría resistente 42,5 (42,5 MPa a compresión a 28 días) cumpliendo los requisitos necesarios con un contenido de entre 15-30%. [21]

3. Fabricación de hormigones siderúrgicos.

Dado que este es el objeto del presente trabajo de fin de máster se le presta mayor importancia a la aplicación de las escorias negras como árido para la fabricación de hormigones. En la actualidad, se han realizado numerosos estudios sobre la sustitución de los áridos naturales por escorias siderúrgicas. Las dosificaciones que se plantean en dichos estudios son muy variadas, desde la sustitución únicamente de la fracción fina hasta la sustitución de la fracción gruesa, además de la sustitución de ambas fracciones e, incluso, pequeñas aportaciones en los finos y cemento para el caso de las escorias de horno cuchara denominadas blancas (LFS)

En general, estos estudios muestran una mejora en las propiedades mecánicas de los hormigones siderúrgicos, siendo estas similares o superiores a las obtenidas en hormigones convencionales. A continuación, se detalla el efecto de la adición de escorias siderúrgicas en diferentes propiedades.

- Trabajabilidad:

El aumento de contenido de áridos siderúrgicos reduce notablemente la trabajabilidad del hormigón debido a la porosidad y geométrica de este tipo de áridos (gran angularidad con bordes afilados), sobre todo cuando se emplean como sustituto de los áridos finos. Es por esto que, cuando un hormigón es fabricado con exclusivamente áridos siderúrgicos, se obtiene un hormigón con un exceso de huecos.

Sin embargo, cuando se emplea la misma dosificación, pero sustituyendo el árido fino siderúrgico por natural, se obtiene un hormigón con parámetros correctos. De esta forma se encontró que el límite para la fabricación de hormigones siderúrgicos esta en el árido fino, siendo el límite un 65% de árido siderúrgico fino. (22-24)

Además del contenido de escorias siderúrgicas, el factor clave que afecta a la trabajabilidad de forma directa es el contenido en agua. Una buena dosificación de agua proporciona una buena docilidad, sin embargo, si se emplea un exceso de agua en la fabricación se perderán cualidades intrínsecas del hormigón (resistencias, durabilidad...)

- Densidad:

El peso específico tanto del árido siderúrgico fino como del grueso es mayor que el de los áridos naturales. Es por esto que los hormigones siderúrgicos presentan una densidad superior a los convencionales.

La sustitución de la fracción fina produce un aumento menor del 5% en la densidad del hormigón, mientras que la sustitución de ambas fracciones puede producir un aumento máximo del 25%. En ambos casos, con el aumento de densidad, no pueden clasificarse como hormigones pesados. [25]

- Resistencias mecánicas

La resistencia del hormigón, normalmente, es considerada como la propiedad clave del material, aunque dependiendo de la aplicación a la que va a ser dedicado, la durabilidad o permeabilidad pueden tener gran importancia. La importancia de esta propiedad está en la visión global de la calidad, ya que se relaciona directamente con la estructura de la pasta de cemento hidratada. Además, este material es comúnmente utilizado en elementos estructurales, donde la resistencia es un factor importante.

La composición química y las propiedades físicas del árido grueso pueden afectar en la resistencia del hormigón. La propagación de las grietas cuando, el hormigón está sometido a una carga, depende de las propiedades del árido grueso. Si el árido es una grava redondeada (cato de rodadura de gravera), esta conduce a las grietas por tensiones más bajas, sin embargo, si tenemos unas rocas trituradas, ásperas y angulosas como áridos, las tensiones serán mayores.

Existe una discrepancia entre diferentes autores que han estudiado los hormigones siderúrgicos cuando se trata de evaluar los efectos que tienen los áridos siderúrgicos en las propiedades mecánicas. Debido a esto, se evaluarán con los ensayos realizados en el *Apartado 6. Fabricación y rendimiento de vigas a escala real* el efecto que tiene en la resistencia mecánica la adición de escorias siderúrgicas en el hormigón.

- Durabilidad

Como se ha comentado en el apartado anterior, la durabilidad muchas veces puede ser una propiedad fundamental para su futura aplicación. Por este motivo, se han realizado diversos estudios en los que se ensayan diferentes factores que pueden afectar a esta propiedad.

Uno de estos ensayos fue la absorción de agua a 48 horas. Se observó que las probetas fabricadas a partir de áridos siderúrgicos tenían una menor absorción que las fabricadas con un hormigón convencional. Los valores de absorción de agua del hormigón siderúrgico estaban entorno al 4% mientras que los del hormigón convencional llegaban hasta el 5,5%. [26]

En cuanto a los ciclos de mojado-secado, existen diferencias entre estudios realizados relacionados con las resistencias del material después de los ensayos. En la mayoría de los casos, los investigadores concuerdan que la reducción en la resistencia es alta tanto para el hormigón siderúrgico como para el convencional, sin embargo, en los estudios de Polanco, 2011, [27], se apreció un aumento de la resistencia de casi el 7%. Además, en los primeros estudios mencionados se observó un deterioro generalizado en el aspecto superficial.

Respecto a los ciclos de hielo-deshielo, gracias a los numerosos ensayos que se han realizado durante las últimas dos décadas, se ha conseguido reducir el efecto de este fenómeno en la resistencia a compresión. Al inicio, se observaba una clara reducción de la resistencia en ambos hormigones, siendo esta mayor en los hormigones siderúrgicos. [14]

En el año 2011, Arribas, [25], obtuvo una mejoría de entre el 7% y el 19% en la resistencia de hormigones con áridos siderúrgicos. Se concluyó que la justificación de este hecho estaba en la mayor densificación de la interfase árido-matriz de cemento del hormigón siderúrgico frente al convencional, además de la menor penetración del agua en estos primeros.

Otro de los ensayos realizados para estudiar la durabilidad de este tipo de hormigones fue la corrosión de armaduras. Los resultados mostraron que en ambientes marinos ambos hormigones (en el caso del siderúrgico con sustitución de los áridos en las fracciones finas y gruesas) tenían un comportamiento a la corrosión similar. Sin embargo, en ambientes acelerados anódicos, los hormigones siderúrgicos presentaron una resistencia a la corrosión mayor, en términos de propagación grietas y de tiempo hasta el fallo. [25-26]

Como conclusión, la mayoría de los autores acuerdan que los hormigones siderúrgicos tienen una durabilidad similar a los hormigones convenciones, pudiéndose utilizar de igual forma en aplicaciones a la intemperie. Además, se realizaron estudios de lixiviación donde se concluyó que el uso de los áridos siderúrgicos no tiene ningún impacto negativo en el medio ambiente.

4. Otras aplicaciones

Como se ha mencionado con anterioridad, las escorias negras de horno de arco eléctrico son un subproducto industrial que tiene múltiples aplicaciones. Como usos alejados del mundo de la construcción, las escorias negras se pueden encontrar en la fabricación de fertilizantes, donde se utilizan como fuente de nutrientes para las plantas. Las escorias contienen calcio, magnesio, hierro y otros elementos beneficiosos para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que las escorias de aceros muy especiales pueden contener metales pesados y otros contaminantes, lo que puede ser dañino si no se manejan adecuadamente.

Otra aplicación importante de las escorias negras es en la eliminación de metales pesados que se pueden encontrar en aguas residuales y otros residuos industriales. Las escorias son capaces de adsorber y remover metales pesados debido a su alta capacidad de adsorción y gran superficie específica. Es importante tener en cuenta que la eficiencia de la adsorción puede variar según las condiciones ambientales, y que la gestión y disposición final de las escorias utilizadas en la eliminación de metales pesados debe ser cuidadosamente considerada para evitar la contaminación ambiental.

En conclusión, las escorias negras de horno de arco eléctrico son un recurso valioso y aprovechable en diferentes industrias. Sin embargo, es importante asegurarse de que

las escorias cumplan con los estándares de seguridad y calidad y que se manejen y dispongan adecuadamente para evitar la contaminación ambiental.

3.6. Hormigón autocompactante:

El hormigón autocompactante (SCC, siglas en inglés, self-compacting concrete) es un tipo de hormigón con el que, gracias a su dosificación y el uso de superplastificantes, no necesita de ningún sistema mecánico para su compactación. Este tipo de hormigón se compacta por gravedad fluyendo por los encofrados sin perder su homogeneidad y estabilidad (se “autocoloca”). [28-29]

Las tres características que definen un hormigón como autocompactante son:

- Capacidad de fluir: la capacidad de rellenar todas las áreas y esquinas del encofrado donde se coloca el hormigón.
- Capacidad de paso: la capacidad de pasar a través de zonas congestionadas con refuerzos sin que se produzca una separación de los componentes o bloqueo.
- Resistencia a la segregación: capacidad de retención de los componentes gruesos de la mezcla en suspensión para mantener un material homogéneo.

La necesidad de crear un hormigón que no necesite una compactación con vibración y que no se separen los áridos en diferentes fases nació en Japón en los años 80, dada la actividad sísmica de la región. En 1988 se desarrolló por primera vez un SCC para lograr estructuras de hormigón más duraderas al mejorar el proceso de construcción y colocación del material.

La eliminación de la necesidad de compactar el hormigón redujo sustancialmente los defectos de durabilidad debidos a una inadecuada compactación. Además, también se encontró que el uso de este tipo de hormigón ofrecía beneficios económicos, sociales y ambientales sobre hormigón tradicional. Entre estos beneficios estaban la reducción de los tiempos de construcción, así como la eliminación de ruido por vibración durante la misma y la consiguiente reducción del coste horario por trabajo peligroso.

A pesar de estos beneficios, el motor que realmente impulsó el desarrollo de esta tecnología fue la reducción en el número de trabajadores cualificados que experimentó la industria de la construcción japonesa en la década de los 1980. La utilización de este hormigón requería de mano de obra menos cualificada y experimentada para la colocación del hormigón.

Esta necesidad fue planteada por el profesor Hajime Okamura en 1986, resolviéndose esta problemática en 1988 por Ozawa y Maekawa en la universidad de Tokio con sus estudios en el desarrollo y trabajabilidad de los hormigones auto-compactantes.

El procedimiento que propuso el profesor Okamura para conseguir este tipo de hormigón es lo que se conoce hoy en día como la forma tradicional o convencional de hacer hormigones autocompactantes. La mezcla consiste en disminuir el árido grueso al 50% del volumen sólido, aumentando el volumen de áridos finos al 40%, tomando como

valor de la relación agua-cemento en volumen un 0,9-1,0, y determinando la dosificación de superplastificante y la relación de polvo-agua asegurando la autocompactabilidad.

Para comprobar si el hormigón es o no autocompactante para la estructura se recomienda el ensayo de flujo en U. Con este ensayo, la compactibilidad de la mezcla puede indicarse por la altura que alcanza el hormigón después de fluir a través de un obstáculo (Figura 10). Los hormigones que alcanzan una altura por encima de los 300mm se pueden considerar como autocompactantes.

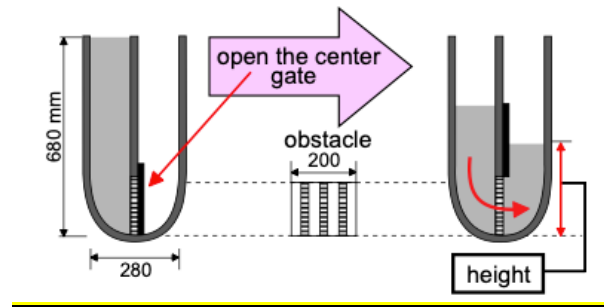


Figura 10 Ensayo de flujo en U [28]

Un SCC debe tener la suficiente fluidez y deformabilidad para poder compactarse por gravedad y, además, ser altamente viscoso para que no se produzca una segregación de los áridos gruesos. Para validar si la mezcla creada cumple dichos requisitos se emplean normalmente dos ensayos: cono de asentamiento y embudo en V. En la especificación EFNARC (federación europea dedicada a sistemas específicos de hormigón y productos químicos especializados para la construcción) los valores recomendados para la pasta de mortero para conseguir un hormigón autocompactante son de 240-260 mm para el ensayo de asentamiento y 7-11s para el embudo en V

Se han adaptado diferentes enfoques a la hora de relacionar los resultados obtenidos de los ensayos mencionados con las propiedades finales del hormigón. Se definieron los índices de deformabilidad y viscosidad como I_m y R_m respetivamente. Las ecuaciones para el cálculo de ambos índices se encuentran en la Figura 11, siendo d_1 y d_2 los diámetros medidos del asentamiento y d_0 el diámetro del cono. Un valor alto de I_m representa gran deformabilidad y un valor bajo de R_m alta viscosidad.

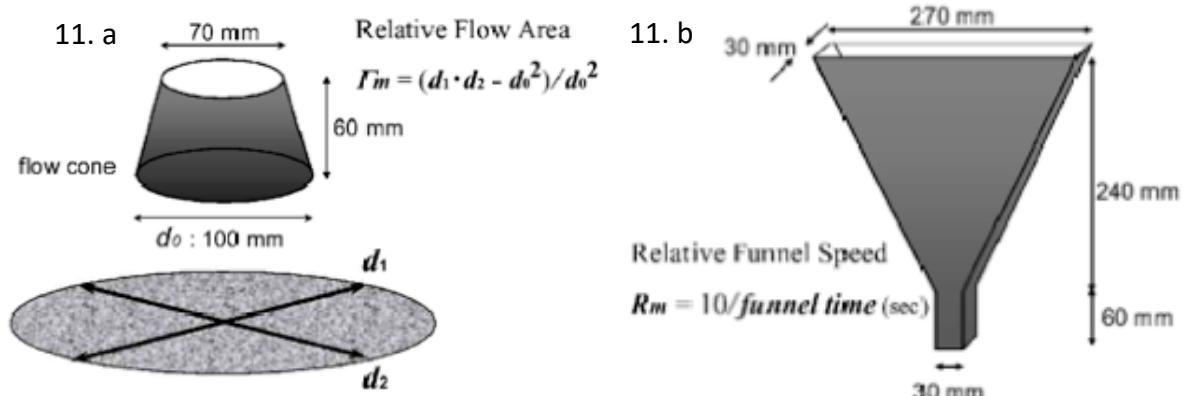


Figura 11. a) Ensayo de cono de asentamiento. b) Ensayo de embudo en V [28]

Hoy en día el método para conseguir hormigón autocompactante se conoce muy bien, sin embargo, numerosas investigaciones siguen centrándose en este tipo de hormigón. Entre ellas podemos encontrar estudios de hormigones ligeros autocompactantes, reforzados con fibras u hormigones que utilizan como áridos gruesos subproductos pesados de procesos industriales, en los que podemos incluir las escorias de arco eléctrico.

Conseguir un SCC con escorias de arco eléctrico es un reto, dada la tendencia a la segregación de los áridos por su elevado peso y, además, debido a sus formas, afiladas y rugosas, se reduce su trabajabilidad. A pesar de las dificultades existentes, gracias a la necesidad de reducir el volumen de desechos industriales que se acumulan en vertederos se han conseguido grandes avances en estos temas.

4. Materiales y métodos

Si se tiene en cuenta el objetivo principal de este trabajo de fin de máster, donde se pretende avanzar en la reutilización de este tipo de residuos, es importante incluir un análisis de la composición, propiedades y características de estos materiales.

A su vez, y a modo explicativo para los siguientes apartados, se presenta una descripción general de los diferentes ensayos realizados a las mezclas de hormigón fabricadas.

4.1. Escoria de horno de arco eléctrico:

El origen de las escorias negras de horno de arco eléctrico (EAFS, Electric Arc Furnace Slag) está en el proceso de fundición y en el afino ácido primario del acero. Aproximadamente, por cada tonelada de acero fabricado mediante este proceso, se generan entre 120 y 180 Kg de escoria. Cuando las escorias se enfrían desde los 1560°C, se convierten en materiales sólidos, cohesivos, pesados, duros, resistentes y con una ligera porosidad. La apariencia que tienen las escorias EAF después del enfriamiento es de color negro debido a los óxidos de hierro, sin embargo, a medida que estas pasan

tiempo en el exterior, al aire libre, el color se torna hacia gris, dado que la cal que contiene migra hacia la superficie reaccionando con el entorno.



Figura 12. Escoria de horno de arco eléctrico (EAFS)

El primer inconveniente que se presenta con estas escorias para su uso en la industria de la construcción es su mayor densidad frente a los áridos naturales. En ocasiones, se requiere de una densidad mayor que el hormigón convencional, por ejemplo, para bloques marinos costeros, cimientos o losas de sótanos grandes. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones no es una propiedad deseada. Los valores de densidad (δ) de la escoria EAF están en el rango de 3 a 4 Mg/m³. Los factores de los que depende la densidad de la escoria son principalmente el contenido de hierro metálico, óxidos de hierro y manganeso y la porosidad interna.

La escoria EAF generalmente contiene entre un 20% y un 30% de hierro, que equivale a un contenido de óxido de hierro de en torno al 30 y 45% en peso. Para utilizarla en el sector de la construcción, como hormigón estructural, se puede conseguir una densidad de alrededor de 3,2 y 3,4 Mg/m³ sin comprometer la calidad del acero ni de la escoria. Para lograrlo es necesario reducir el contenido de hierro a un rango de 15% a 20%, reduciendo así el contenido de óxidos de hierro a 22-30% y aumentando la porosidad de la escoria en un 5%.

La porosidad depende en gran medida al método de enfriamiento utilizado. El enfriamiento consiste en reducir la temperatura de la escoria desde la del horno hasta la temperatura ambiente, y se pueden seguir dos métodos diferentes. El primero de ellos es el enfriamiento continuo que consiste en rociar agua en un flujo de escoria. El segundo, y menos interesante si se busca un aumento en la porosidad, consiste en verter la escoria líquida sobre una fosa, donde ya hay una capa de escoria solidificada, y rociar la superficie superior con agua. De esta forma, la velocidad de enfriamiento es menor que con el primer método, consiguiendo así que los gases retenidos escapen y reduzcan su porosidad. Es por esto que, si el objetivo es reducir la densidad de la escoria aumentando la porosidad, se recomienda seguir el primer método de enfriamiento.

A su vez, la velocidad de enfriamiento afecta también en la clasificación de las escorias, debido a las contracciones térmicas y espontaneas. Con el primer método de

enfriamiento las escorias obtenidas son partículas con un tamaño menor de 40 mm, que pueden ser utilizadas como grava con una previa separación del hierro metálico. En cambio, con el segundo método las partículas obtenidas tienen un tamaño superior a 40 mm, necesitando un triturado, además de la separación del hierro metálico, para su uso como árido.

Además del enfriamiento, procesos como la espumación o vertido también pueden afectar a la calidad final de las escorias EAF y su posible reutilización en diferentes sectores. En general, todas las etapas del proceso de fabricación de acero mediante la ruta eléctrica tienen una gran influencia en la calidad de las escorias generadas. Por este motivo es esencial que exista comunicación y colaboración entre los productores y consumidores de las escorias.

La composición de las escorias negras EAF se basa en óxidos de hierro, calcio y silicio, representando un 80%. A su vez, también se pueden encontrar óxidos de aluminio, manganeso, magnesio y fósforo. Dependiendo del acero fabricado y los materiales refractarios de los hornos, las proporciones de estos óxidos pueden variar. Como es de esperar, en los hornos eléctricos de arco oxidante estándar, las escorias generadas tienen una mayor proporción de óxidos ácidos (hierro, sílice, alúmina, etc.) que óxidos básicos (álcalis, cal y magnesia).

Aunque el carácter de la escoria EAF sea oxidante, donde los óxidos ácidos disuelven el resto de los óxidos básicos, se pueden encontrar tipos de escorias EAF donde existen partículas de cal libre sin disolver. Esto puede ocurrir por ejemplo cuando se realiza una adición parcial de cal en el final del proceso de afino ácido y los componentes de la escoria ácida no tienen tiempo suficiente para disolver la cal.

Existen dos morfologías en las que se puede encontrar cal libre en las escorias, "primaria" y "secundaria". La cal libre "primaria" procede de la cal añadida al inicio del proceso de calentamiento y que al final del proceso no se ha disuelto. Este tipo de cal libre se encuentra en fase sólida granulada suspendida en la escoria líquida. Se pueden encontrar tamaños de partículas entre 4 y 20 μm en el análisis SEM y EDX.

Por otra parte, la escoria "secundaria", conocida como cal libre precipitada, se encuentra en límites de grano de compuestos basados en óxido de hierro como puede ser la ferrita dicálcica. Este tipo de cal libre, como norma general, no llegan a la micra de metro de tamaño y no se pueden detectar con los análisis SEM y EDX.

Como se ha comentado anteriormente en el Apartado 3.4. *Inestabilidad volumétrica de las escorias de acerías*, el mayor problema para el uso de este tipo de escorias está en la inestabilidad volumétrica que presentan, siendo las siguientes reacciones las encargadas del aumento de volumen:

- Conversión de fases del silicato bicálcico.
- Oxidación de hierro +2 a hierro +3.
- Hidroxilación y carbonatación de la cal libre.
- Hidroxilación del óxido de magnesia.

A pesar de la inestabilidad química que genera la cal libre, su presencia en la escoria es beneficiosa para la interacción química de la pasta de cemento con la escoria. Se ha observado una migración del óxido de calcio desde el núcleo hasta la parte exterior del árido. Además, mediante inspecciones visuales a las escorias, se observó una transición del color del material de gris-negro a gris-blanco, siendo la sustancia de la periferia carbonato de calcio.

Cuando se utiliza escoria de EAF como árido en mezclas hidráulicas, se produce un fenómeno de difusión lenta de CaO en presencia de humedad que afecta directamente a una zona específica del material, ya sea mortero u hormigón. Esta zona se conoce como Interfaz de Transición (ITZ, por sus siglas en inglés) o zona de transición, y se considera la parte más vulnerable del hormigón. En la ITZ, diversos factores como la calidad y tamaño del árido, la relación agua-cemento, el aglomerante y la edad de la mezcla, influyen en la formación de microsangrados alrededor de las partículas del árido, la porosidad y otras características microestructurales. A medida que se desarrollan las reacciones hidráulicas del cemento Portland, la morfología y las propiedades de la ITZ evolucionan simultáneamente [30-35].

La zona de transición (ITZ) ha sido descrita como una capa que rodea las partículas del árido, con un espesor promedio que oscila entre 15 y 40 μm [32]. En el hormigón endurecido, se han identificado varias características clave en esta zona, como la presencia de porosidad, altos niveles de portlandita, la existencia de ettringita y la ausencia de silicatos de calcio hidratados (gel S-C-H). Incluso se ha analizado la orientación de los cristales de portlandita y ettringita, así como el tamaño de los granos de cemento vecinos antes del fraguado. De hecho, se reconoce que, las condiciones del hormigón fresco, el proceso de fraguado y el posterior endurecimiento, tienen una fuerte influencia en la morfología resultante y el estado de la ITZ. Es evidente que la hidratación a largo plazo de todas las partículas de cemento (durante semanas o meses), junto con la presencia de portlandita, promoverá cambios graduales y progresivos en la morfología de la ITZ.

Según la literatura existente [30, 33, 35], se reconoce que la morfología de la ITZ desempeña un papel crucial en la permeabilidad y, por ende, en la durabilidad de las mezclas, morteros y hormigones hidráulicos. Sin embargo, todavía no se ha establecido claramente su influencia en propiedades mecánicas como la resistencia (a tracción y compresión), rigidez y tenacidad.

Por lo tanto, en las mezclas que contienen escoria de EAF al final del período de fraguado (siempre que sean mezclas bien elaboradas y tengan bajas relaciones agua-cemento efectivas), las zonas de transición interfacial (ITZ) difieren de las presentes en el hormigón con áridos convencionales. Esta "nueva" ITZ es más compacta y menos porosa en comparación con el uso de áridos naturales. La migración lenta de CaO desde el núcleo de las partículas de escoria de EAF hacia la superficie, seguida de su transformación química en carbonato de calcio, también afecta la morfología de la ITZ. Por lo tanto, es de esperar que haya variaciones en la morfología y una evolución con el tiempo alrededor de las partículas de escoria de EAF, lo cual se reflejará en cambios en las propiedades generales del concreto, como la permeabilidad, durabilidad y características mecánicas (resistencia a tracción y compresión, y rigidez).

La presencia de superficies de fractura en muestras de hormigón después de pruebas mecánicas, donde las partículas de áridos más grandes se separan de la matriz, generalmente se considera indeseable. Sin embargo, cuando la fractura ocurre de manera visible, dividiendo las partículas gruesas de árido, pero mostrando una buena adherencia y cohesión entre la matriz y el árido, se vislumbra una situación prometedora. Algunos autores [30, 33] han observado que, en general, el hormigón tiene una resistencia inferior en comparación con sus componentes individuales, es decir, los áridos (ya sean calizos o silíceos) y la matriz cementicia. Han atribuido esta observación a una baja resistencia específica en la zona de transición. Por lo tanto, se puede afirmar que cuanto mejor sea la calidad de la unión en la ITZ, mayor será la resistencia mecánica (tanto a tracción como a compresión) del hormigón.

En el caso de un hormigón bien elaborado que utiliza escoria de EAF y presenta una resistencia a la compresión superior a 45 MPa, se observan superficies de fractura con una división clara de las partículas gruesas de los áridos. Este fenómeno podría explicar la mayor resistencia que generalmente se obtiene en los hormigones que utilizan áridos de escoria de EAF en lugar de árido natural.

4.2. Ensayos a probetas de Hormigón:

Los diferentes ensayos realizados para evaluar las diferentes propiedades de los hormigones fabricados se presentan en este apartado. La mayoría de los ensayos están de acuerdo con una norma ASTM o EN. En algunos, sin embargo, se han utilizado para su desarrollo metodologías especiales que cumplen diferentes especificaciones.

Mini slump cone:

Al igual que el cono Abrams, este ensayo se utiliza para medir la consistencia del hormigón, con la diferencia de que este ensayo, mini slump cone, tiene menores dimensiones. El uso de este ensayo está propuesto en las pautas europeas para conseguir un SCC [36]. Además, este ensayo permite obtener diferentes índices de los resultados como son el flujo relativo de asentamiento e índice de deformabilidad.

Índice de flujo relativo:
$$\Gamma_{p/m} = \left(\frac{d_1 \cdot d_2}{2d_0} \right)^2 \quad \text{ec. 9}$$

Índice de deformabilidad:
$$\Gamma_m = \frac{d_1 \cdot d_2 - d_0^2}{d_0^2} \quad \text{ec. 10}$$

Siendo d_1 y d_2 los diámetros medidos del asentamiento y d_0 el diámetro del cono de 80 mm



Figura 13. Medición de la dispersión de la mezcla

Diferentes autores han utilizado diferentes dimensiones de conos para la realización de este ensayo. En esta investigación, las dimensiones del cono utilizado fueron 40 mm de altura con diámetros superior e inferior de 70 y 80 mm respectivamente. Como bien se ha mencionado anteriormente, esta prueba se utilizó para obtener valores de consistencia de las diferentes mezclas y compararlas, y comparar los índices mencionados con los que se obtuvieron en otras investigaciones.

El modo de realizar el ensayo es el siguiente, se coloca el cono en el centro de una placa de acero o vidrio y se llena con la mezcla de hormigón. Cuando se completa el llenado, se levanta el cono y se deja expandir la mezcla sobre la superficie de la placa. Una vez el hormigón deja de expandirse, se mide el diámetro en dos direcciones perpendiculares que representan los valores d_1 y d_2 de las ecuaciones presentadas anteriormente. Para comparar las diferentes mezclas se utiliza el valor promedio de estos diámetros, d . Por último, se realiza una inspección visual en busca de alguna posible segregación o sangrado.

Mini V-funnel:

El ensayo del mini embudo en V es similar al utilizado en el ensayo de embudo en V, pero a una escala reducida. A diferencia del ensayo mini slump cone, para este ensayo sí que hay unas medidas estandarizadas, propuestas por EFNARC [36], por lo que no existe diferencia en el ensayo realizado entre distintos autores. Las medidas del embudo se encuentran en la Figura 14.

Este ensayo permite obtener el valor de la viscosidad del hormigón o pasta de cemento y compararlo con diferentes mezclas. Para ello, se llena el embudo con hormigón en posición vertical. Después, se abre la compuerta y se registra el tiempo (t) que tarda el material en fluir hasta que se ve la luz.

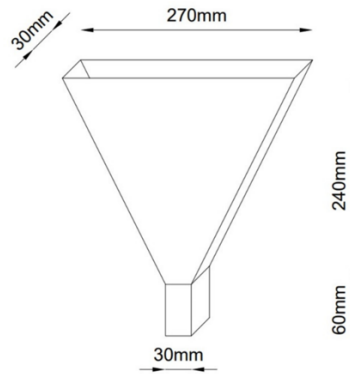


Figura 14. Dimensiones de ensayo de embudo en V mini.

Con los resultados de este ensayo, Okamura definió el índice de viscosidad:

$$R_m = \frac{10}{t} \quad \text{ec. 11}$$

El uso individual de los ensayos mencionados no es suficiente para realizar una caracterización reológica en los hormigones autocompactantes. Sin embargo, el uso de ambos índices permite realizar una descripción más adecuada de su comportamiento.

Ensayo L box:

Este ensayo se utiliza para medir la capacidad de fluir del hormigón. Se desarrolló de acuerdo con las especificaciones establecidas en la EFNARC [36], donde vienen determinadas las medidas del L-box, y que se pueden observar en la Figura 15.

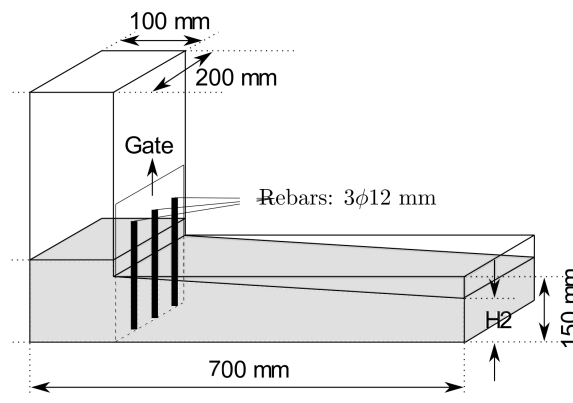


Figura 15. Diseño de la caja en L

El método que se sigue para la realización de este ensayo es el siguiente. Primero se coloca la caja en forma de L en horizontal, tal y como se observa en la Figura 15, y se llena la tolva con el hormigón a ensayar. Una vez el hormigón ha reposado durante 60 segundos se abre la compuerta, dejando así fluir el hormigón sobre la superficie horizontal del recipiente.

La capacidad de fluir (PA, passing ability) se mide cuando el movimiento del hormigón ha cesado. Se mide, en tres posiciones a lo ancho de la caja, la altura de la parte trasera

de la compuerta y en la pared del final de la superficie horizontal y se obtiene el valor promedio de las tres mediciones. La capacidad de fluir se calcula con la siguiente ecuación:

$$PA = \frac{H_1}{H_2} \quad \text{ec. 12}$$

Densidad:

Para el cálculo del valor de la densidad aparente del hormigón, se utilizó la norma UNE-EN 1015-10, donde viene indicado los pasos a seguir. Primero se realiza un secado de las muestras. Para ello, estas se colocan en un horno a 70°C, y se dejan secar hasta que la masa de las muestras permanece constante, lo que indica que se ha eliminado toda la humedad. Una vez eliminada la humedad se pesan en una balanza (m_d). Después, las muestras se sumergen en agua y se mantienen hasta que la masa permanece constante, lo que significa que han absorbido toda la humedad posible, y es en ese momento cuando se sacan del recipiente con agua y se pesan en una balanza (m_{sat}). Por último, para determinar el volumen de las muestras se utiliza una balanza hidrostática. Las muestras se pesan mientras se encuentran sumergidas en agua y se registra este peso (m_i)

Volumen específico:
$$V_S = \frac{m_{sat} \cdot m_i}{\rho_w} \quad \text{ec. 13}$$

Densidad aparente:
$$\rho_w = \frac{m_d}{V_S} \quad \text{ec. 14}$$

MIP:

La porosimetría por intrusión de mercurio se ha desarrollado de acuerdo con la norma ASTM D4404 y es una técnica de adsorción que utiliza mercurio como adsorbente. Consiste en aplicar presión para forzar al mercurio a entrar en los poros del hormigón. Con el volumen de mercurio que ha penetrado en los poros se calcula el área, la distribución de tamaños de poro y el porcentaje de porosidad de la escoria.

El equipo utilizado fue un Micromeritics AutoPore IV 9510 de intrusión-extrusión de mercurio. Su resolución de tamaño de poro va desde 7 nm hasta 360 μm ($3.6 \cdot 10^5$ nm).

Water aging:

Este ensayo consiste en evaluar la expansión potencial de los áridos debido su hidratación. Para ello, las muestras se mantuvieron en agua durante 270 días y luego fueron sumergidas en un baño a 70°C, de forma similar a lo propuesto en la norma ASTM D-4792, donde se mantuvieron durante otros 60 días.

SEM:

La técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) se basa en la observación de imágenes de electrones retrodispersados (BSE) en un entorno de bajo vacío, en el cual las muestras no fueron cargadas eléctricamente (ni recubiertas con

oro ni carbono). Se complementó con análisis de rayos X por dispersión de energía (EDX, por sus siglas en inglés).

Ciclos de mojado-secado:

Someter al hormigón endurecido a ciclos sucesivos de absorción de agua y evaporación forzada en un horno proporciona una valiosa información sobre diferentes efectos perjudiciales en el material. Principalmente se pueden diferenciar dos problemas, donde cada uno tiene un efecto perjudicial en las propiedades del material.

Las variaciones en la humedad, además de las contracciones y expansiones lineales que pueden deberse a variaciones térmicas, influyen directamente en la contracción del hormigón.

La carbonatación de la portlandita y otros álcalis sódicos o potásicos, que ocurren de forma rápida o espontánea, generan reacciones químicas que inhiben la hidratación y causan deterioro en la resistencia del material debido a su expansión.

Los pasos que se siguieron para la realización del ensayo son los siguientes:

- Inmersión de las probetas en agua durante 16 horas.
- Evaporación forzada en un horno a 60°C durante 8 horas.
- Repetición de los ciclos durante 90 ciclos (90 días).

Exposición a ambiente marino:

Para realizar este ensayo se ubicaron las muestras de hormigón en una posición de tal forma que cuando había marea alta, las probetas estaban totalmente sumergidas, y cuando la marea era baja, estas estaban expuestas al aire. Estas condiciones son las peores que puede soportar una estructura. En la Figura 16 se puede observar la colocación de las muestras.



Figura 16. Jaulas de las muestras en la zona de mareas

Se realizaron dos estudios diferentes en las muestras expuestas al ambiente marino. Uno en muestras expuestas durante un año y otro en muestras expuestas durante cinco años.

En el ensayo de exposición a corto plazo, se utilizaron muestras cúbicas de 100 mm. Después de la exposición, las muestras se cortaron adecuadamente en dos piezas para evaluar la penetración de iones en la masa del hormigón. Se utilizaron técnicas de microscopía electrónica de barrido y análisis de energía dispersiva de rayos X. Las muestras se sometieron a una presión de vacío bajo en una atmósfera de nitrógeno, obteniendo la imagen mediante los electrones retrodispersados.

En el ensayo a largo plazo, se utilizaron muestras cilíndricas de 150x300 mm para la exposición marina durante cinco años. El análisis se realizó utilizando porciones de las muestras cilíndricas mencionadas de $\phi 150 \times 200$ mm de largo, obtenidas después de un corte transversal inicial que elimina 100 mm de longitud, y posteriormente rompiendo la pieza más. Las superficies recién fracturadas de las muestras se rociaron con nitrato de plata en una y con fenolftaleína en la otra, para evaluar la penetración de cloruros y carbonatación, respectivamente.

Corrosión del refuerzo:

Se sometieron muestras de 150 mm de lado, en las cuales se incrustó una pequeña estructura de acero formada por barras de 10 mm de diámetro (ver Figura 17), a pruebas de durabilidad (ciclos de humedad-sequedad con agua de mar y exposición en cámara de niebla salina), controlando periódicamente sus variables de corrosión electroquímica.

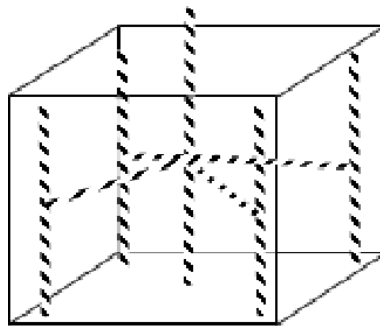


Figura 17. Esquema interno de las muestras.

Para evaluar el riesgo de corrosión mediante la medición del potencial de corrosión del acero incrustado en un material cementicio, se han utilizado los criterios propuestos en la norma ASTM C-879.

4.3. Ensayo de vigas a escala real:

Los ensayos realizados para las vigas a escala real fueron los siguientes:

1. Ensayo a flexión en cuatro puntos.
2. Ensayo con carga mantenida.

Ensayo a flexión en cuatro puntos.

La finalidad de este ensayo es obtener los valores de carga de fallo y los patrones de grietas para vigas a escala real de hormigón siderúrgico. Con el objetivo de controlar el aumento de flexión de la viga y poder realizar una inspección de las grietas más segura, el método que se utilizó para realizar el ensayo permitía aplicar la carga mientras se controlaba el desplazamiento recorrido.

Para realizar las mediciones oportunas y almacenamiento de resultados, se utilizaron equipos electrónicos independientes conectados a transductores donde se miden y almacenan valores de carga, deformaciones en banda y desplazamientos de LVDT.

Para entender el ensayo realizado, en las Figuras 18 y 19 se muestra una imagen real durante el ensayo y un esquema y disposición del equipo utilizado, respectivamente. Como se puede observar en la Figura 19, se dibujó una cuadrícula de 100x100 mm en las vigas. Esto se hizo para detectar mejor la propagación de las grietas.

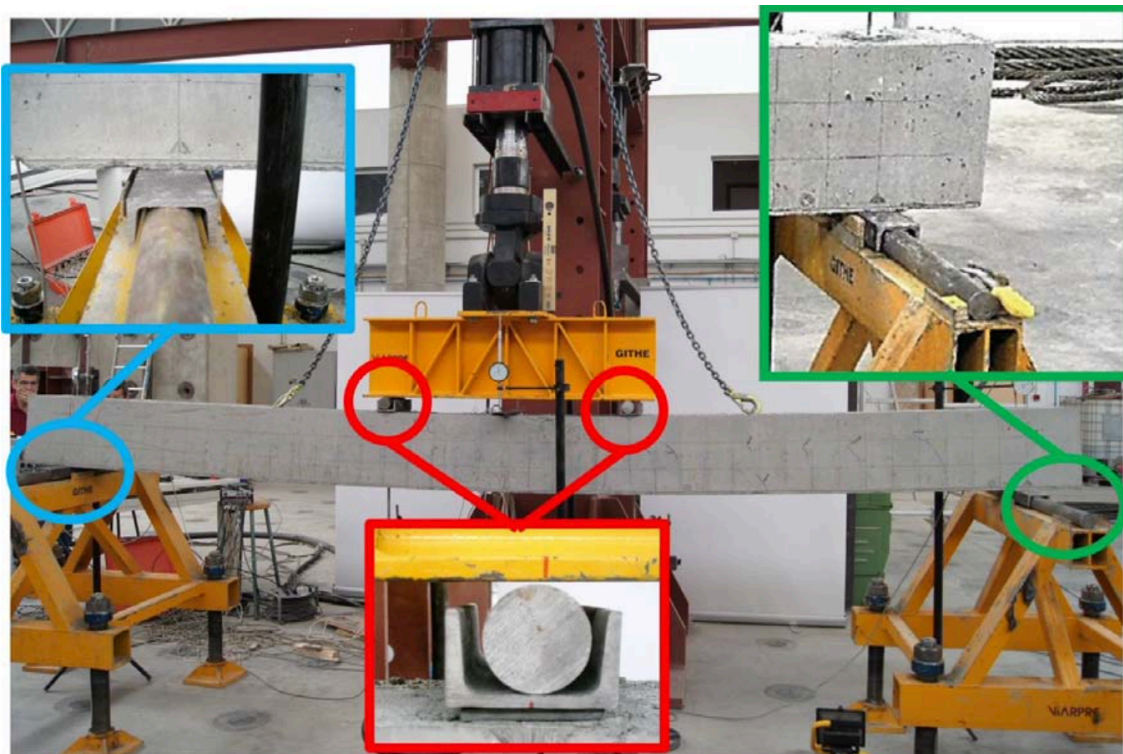


Figura 18. Imagen del ensayo de flexión de cuatro puntos

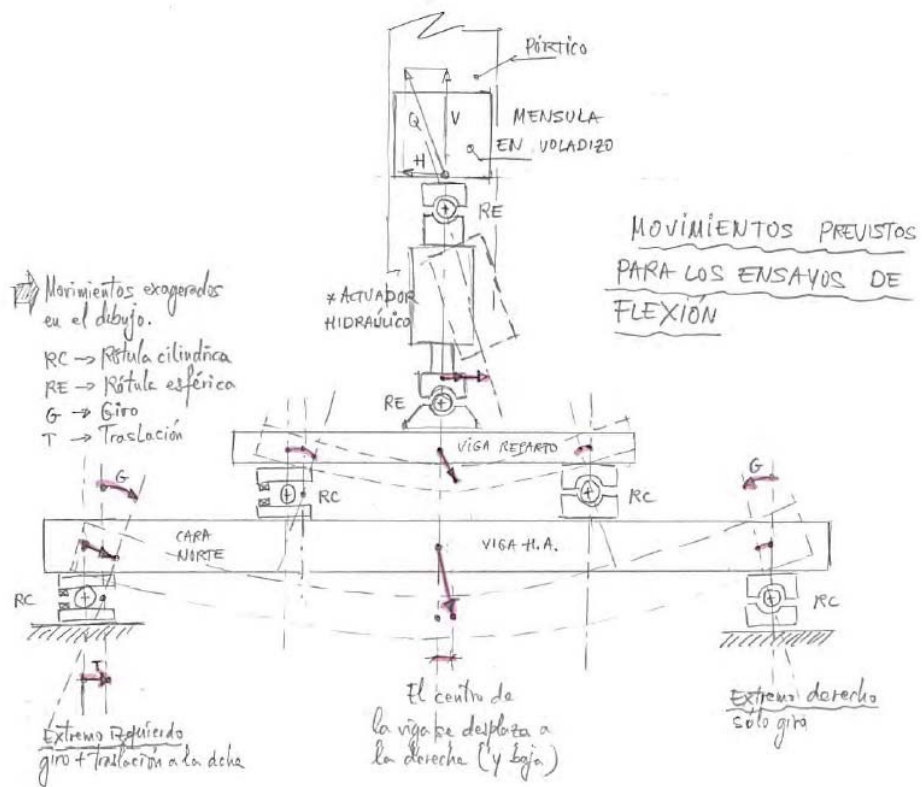
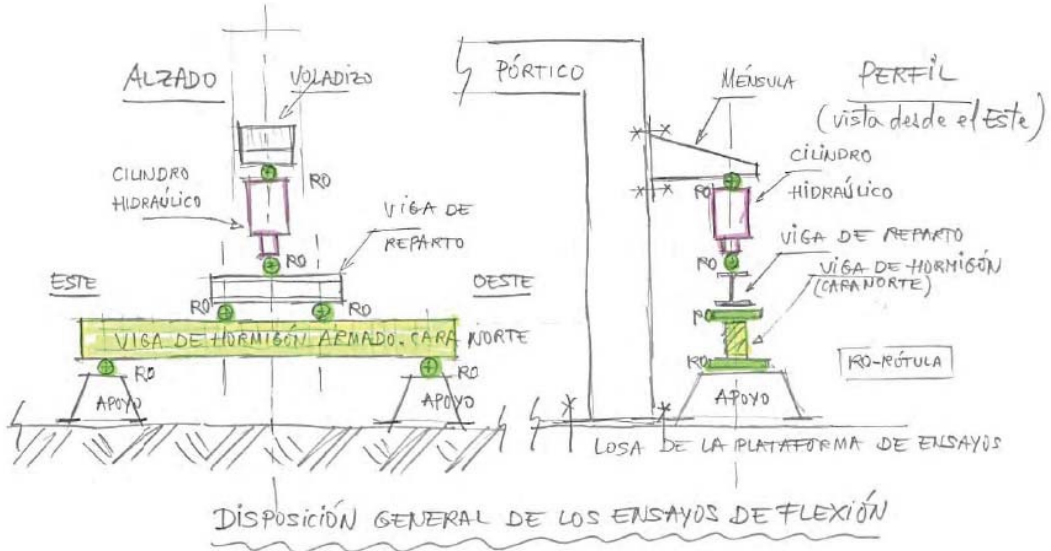


Figura 19. Lay out del ensayo de flexión en cuatro puntos (dibujos cortesía de Bengo).

El equipo electrónico utilizado tenía 20 transductores conectados, utilizados para medir y almacenar las diferentes variables críticas o de interés en el estudio. Se utilizaron de la siguiente manera:

- 6 transductores lineales de desplazamiento diferencial (LVDT).
- 3 galgas extensométricas en la cara lateral del hormigón en el medio de la viga.
- 2 galgas extensométricas en la cara superior del hormigón en el medio de la viga.
- 2 galgas extensométricas en la cara inferior del hormigón en el medio de la viga.
- 3 galgas extensométricas en las barras de refuerzo inferiores en el medio de la viga.
- 1 sensor para medir la temperatura atmosférica.
- 1 sensor para medir la temperatura de la viga.
- 1 sensor de carga para medir la fuerza aplicada por el cilindro hidráulico.
- 1 transductor para medir el desplazamiento del cilindro hidráulico.

Además de los transductores conectados, se instalaron cuatro relojes comparadores verticales en la cara superior de la viga para duplicar los datos sobre las deformaciones verticales. En las figuras 20 y 21 se muestran la posición de los transductores LVDT y relojes y la posición de las galgas extensométricas respectivamente.

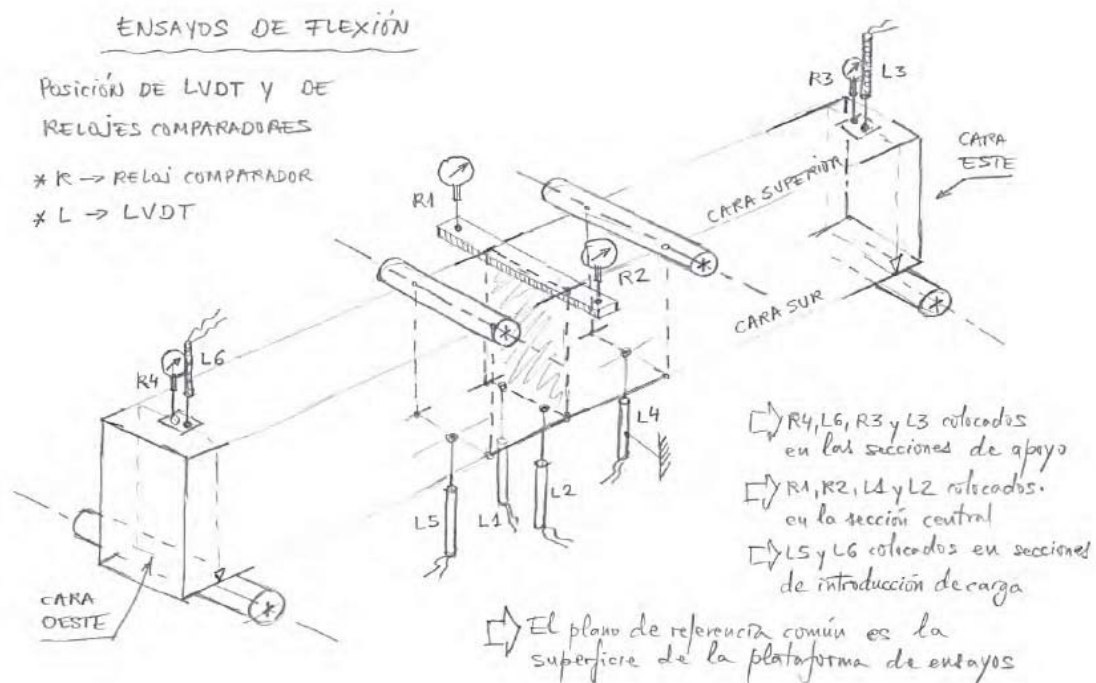


Figura 20. Posición de LVDT y relojes comparadores (cortesía de Bengo).

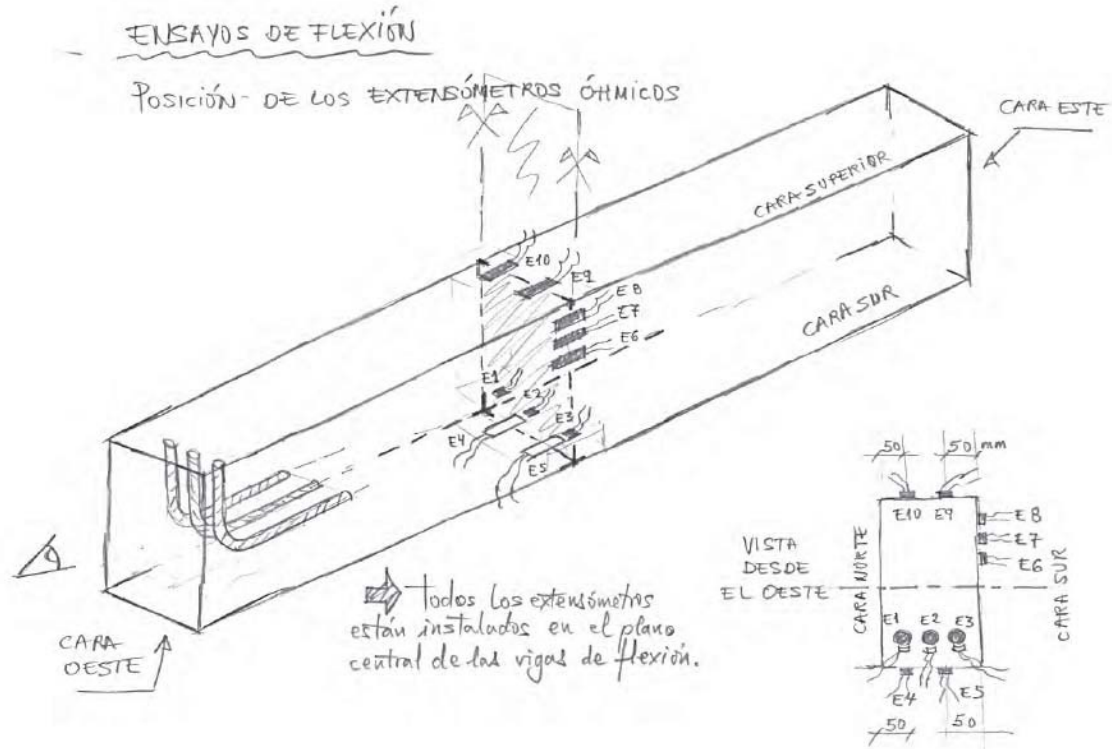


Figura 21. Posición de las galgas extensométricas (cortesía de Bengo).

Se tomaron unas medidas iniciales únicamente con la viga apoyada para ver la influencia de su peso en la flexión de la viga. Se utilizaron tres velocidades diferentes para la aplicación de la carga. Primero se utilizó una velocidad de carga de 0,5 mm/min, en el momento que las grietas comenzaron a aparecer se aumentó la velocidad a 1 mm/min, y, por último, antes de la fractura de las vigas, se utilizó una velocidad de 2 mm/min.

Ensayo de carga mantenida:

En el ensayo con carga mantenida se utilizaron 4 vigas para analizar la fluencia del material a temperatura ambiente. Estas vigas fueron sometidas durante 6 meses a una carga constante de 40 KN. En la Figura 22 se muestra la disposición de las vigas durante el periodo de duración del ensayo y en la Figura 23 un esquema del diseño de la prueba.



Figura 22. Disposición de las vigas en el ensayo de deformación a largo plazo.

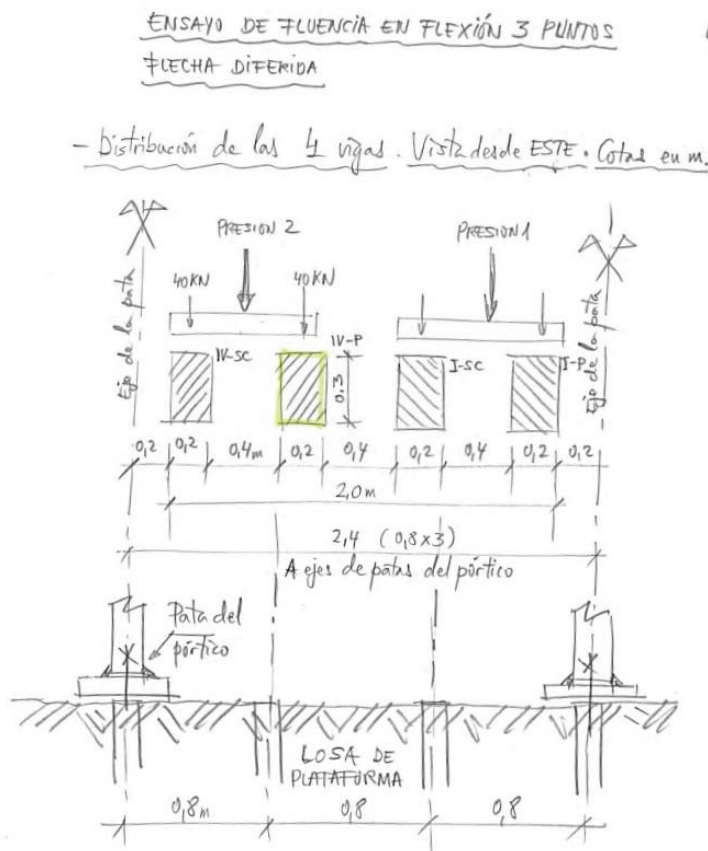


Figura 23. Diseño de la prueba de deformación a largo plazo (cortesía de Bengo).

Al igual que para el anterior ensayo, se utilizó un equipo electrónico para monitorizar las diferentes variables. En este caso se utilizó un transductor en la cara superior de la viga, en el punto donde se aplicaba la fuerza, monitorizando así la carga en el tiempo. Un transductor LVDT se colocó en la cara inferior de la viga para medir la deformación. A su vez, en el mismo punto de la cara opuesta, se colocó un calibre de cuadrante, además de colocar otros dos calibres iguales en los extremos de las vigas, para medir los posibles desplazamientos. Por último, se colocó un medidor de deformación en la mitad de las vigas para medir las grietas. En la Figura 24 se observa un diagrama con la posición de la instrumentación utilizada.

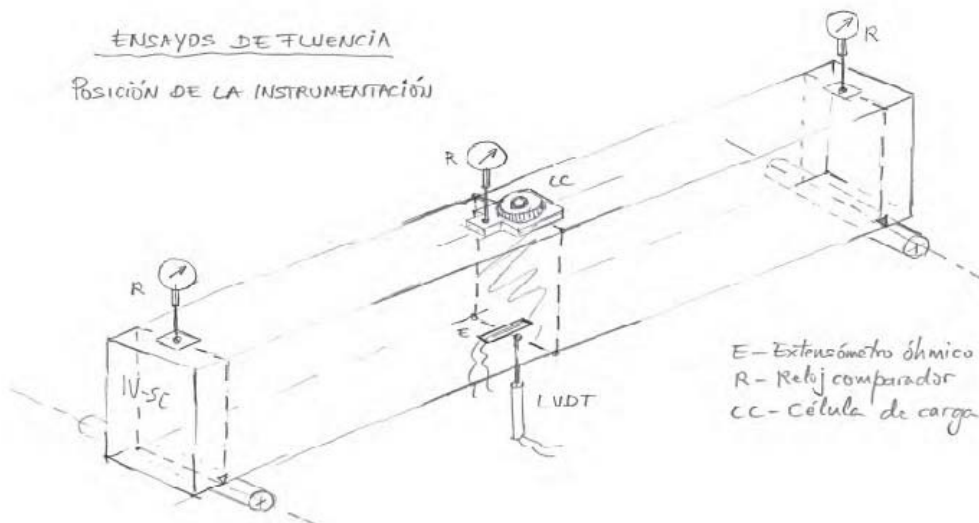


Figura 24. Posición del transductor en la prueba de deformación a largo plazo (cortesía de Bengo).

La primera medida tomada, al igual que en ensayo de flexión, fue con la viga apoyada para ver la influencia únicamente asociada a su peso en la deformación de la viga.

La toma de datos se realizó cada segundo durante el primer mes y después de ese periodo, se registró una medición por minuto. Además, la temperatura también fue registrada durante el periodo de tiempo que duró la prueba, ya que, pueden darse pequeñas deformaciones debido a cambios en la temperatura, aunque podrían considerarse despreciables en condiciones normales de laboratorio, muchas de las veces, distintas de la realidad.

5. Ensayos a probetas de hormigón

Con la introducción del concepto de sostenibilidad, muchos sectores de la sociedad han empezado a buscar métodos para reducir el volumen de residuos, sea reutilizándolos o fabricando productos con una mayor vida útil. El sector de la construcción se ha convertido en uno de los principales consumidores de productos industriales, utilizando desde materiales desechados de su propia industria hasta los producidos en otros

procesos industriales como las cenizas volantes, el humo de sílice o las escorias de acero, entre muchos otros.

En este apartado y en el siguiente, *6. Fabricación y rendimiento de vigas a escala real*, se presentan los componentes utilizados para la fabricación de probetas y vigas, con las dosificaciones correspondientes y los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados, así como una explicación adicional al *Apartado 3.6. Hormigón Autocompactante*, donde se muestran los valores a partir de los cuales una mezcla se puede considerar como autocompactante.

Hormigón Autocompactante:

Como se ha mencionado en el *Apartado 3.6. Hormigón autocompactante*, las bases para diseñar un hormigón autocompactante (SCC, self-compacting concrete) se conocen desde hace más de dos décadas. Esta metodología sienta las bases para mezclas autocompactantes con áridos naturales, recogidas en la EFNARC, donde se muestra una orientación para preparar diferentes tipos de SCC, según los requerimientos del uso final al que se vaya a aplicar. Además, se especifica las proporciones típicas para la preparación de este tipo de hormigón con áridos convencionales. Estas proporciones se muestran en la Tabla 1, y son de utilidad para comparar con las cantidades necesarias para fabricar un SCC con escorias de EAF como árido.

Componente	Rango típico en peso (Kg/m ³)	Rango típico en volumen (L/m ³)
Cemento	380-600	
Pasta		300-380
Agua	150-210	150-210
Árido grueso	750-1000	270-360
Árido fino (arena)	El contenido equilibra el volumen de los otros constituyentes, normalmente entre el 48 y el 55 % del peso total del árido.	
Ratio Agua/Cemento		0,85-1,10

Tabla 1: Recomendaciones de la EFNARC que especifican valores de referencia para SCC. [36]

La reología del hormigón fresco, según la EFNARC, se puede caracterizar por su viscosidad plástica y su punto de fluencia en un modelo viscoso de Bingham. El punto de fluencia es el esfuerzo de corte necesario para que el hormigón comience a moverse, ensayo de asentamiento (slump test), y la viscosidad plástica describe la resistencia al flujo bajo estrés del hormigón.

La clave para obtener una reología adecuada es el equilibrio entre estas dos características del material. A menudo se utilizan tanto aditivos plastificantes, disminuyen el punto de fluencia, como modificadores de viscosidad, aumentan la viscosidad, para optimizar las propiedades reológicas del material.

En la Tabla 2 se muestran los requisitos y características que marca la EFNARC para fabricar un SCC. En el caso de las mezclas creadas con EAFS, los requisitos iniciales para

este trabajo son mínimos: un asentamiento SF1, clase de viscosidad VF2, caja en L PA1 y resistencia a la segregación SR1.

Characteristic	Preferred test metho(s)	Specification	Classes	Values
Flowability	Slump-flow test	Slump-flow in mm	SF1	550 to 650 mm
			SF2	660 to 750 mm
			SF3	760 to 850 mm
Viscosity (rate of flow)	T ₅₀₀ slump-flow test, or V-funnel test	T ₅₀₀ , in s, or V-funnel time in s	VS1/ VF1	≤ 2 / ≤ 8 s
			VS2/ VF2	> 2 / 9 to 25 s
Passing ability	L-box test	Passing ability	PA1	≥ 0,80 with 2 rebars
			PA2	≥ 0,80 with 3 rebars
Segregation	Segregation resistance (sieve) test	Segregation resistance in %	SR1	≤ 20 %
			SR2	≤ 15 %

Tabla 2: Requisitos y características para la fabricación de un SCC por la EFNARC

Materiales:

Cemento, agua y áridos naturales:

Para esta investigación se usaron dos tipos de cemento. Principalmente se usó un cemento portland tipo I 52,5R, a excepción de una de las probetas que se realizó con un cemento Portland tipo IV/B-v 32,5N, ambos casos siguiendo la normativa UNE-EN 197-1. La composición del cemento tipo I incluye un 90% de Clinker Portland, 5% de finos de polvo de carbonato de calcio y un 5% de yeso. En el caso del cemento tipo IV, está compuesto de 50% de Clinker de Portland, 40% de ceniza volante tipo I, 5% de finos de polvo de carbonato de calcio y 4% de yeso. En ambos casos el agua que se utilizó se obtuvo de la red de suministro de Bilbao.

Como árido fino se utilizó una piedra caliza triturada comercial de calidad, con un tamaño máximo de 4,75 mm, un módulo de finura de 2,9 unidades y una densidad aparente de 2,6 Mg/m³. Además, se utilizó un árido de tamaño mediano, con entre 5 y 12 mm de tamaño y un módulo de finura de 6 unidades. Todos estos áridos están compuestos principalmente por calcita, en un 95% aproximadamente, y se pueden considerar como áridos convencionales del hormigón. También se emplearon áridos tamizados en rangos de 0-0,6 mm y 0-1,18 mm. Las diferentes granulometrías de todas las fracciones se muestran en la siguiente Figura.

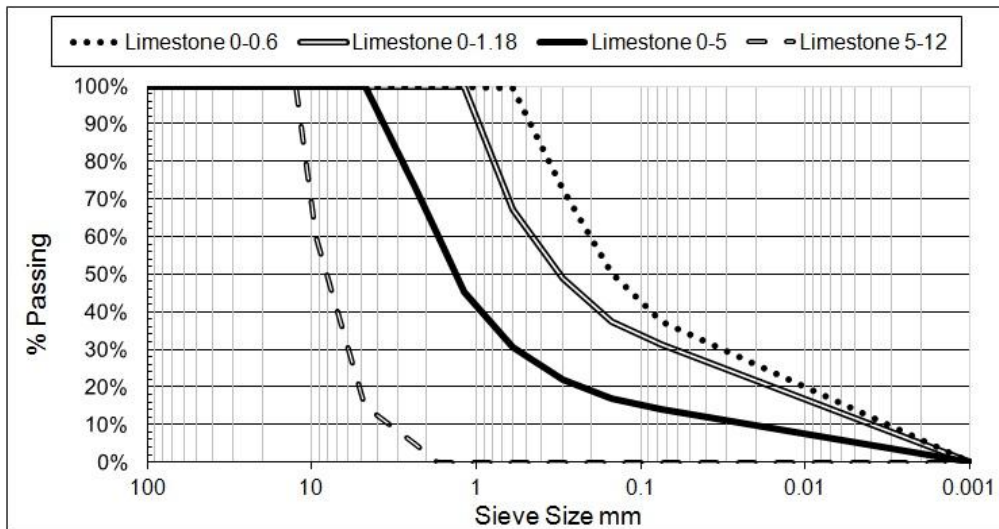


Figura 25. Clasificación de áridos naturales.

Escorias:

Para la realización de los ensayos a probetas de hormigón se utilizó escoria de horno de arco eléctrico (EAFS) triturada en tres fracciones tamaño diferentes: fina, inferior a 4,75 mm, mediana, inferior a 12,5 mm, y gruesa, inferior a 20 mm, con una densidad específica de 3,42 Mg/m³. Además de las EAFS, también se utilizó escoria de horno de cuchara (LFS) para fabricar una de las probetas. Esto está fuera del alcance del presente trabajo de fin de máster y no se tendrá en cuenta en el estudio de los resultados.

En la Figura 26 se muestra la granulometría para los diferentes tamaños de EAFS, además de la granulometría de la LFS. Además, en la Tabla 3 se muestra la composición de las escorias utilizadas, proporcionadas por la empresa Hormor-Zestoa, y alguna de sus propiedades físicas.

Componentes	EAFS (0-5mm)	LFS
Fe ₂ O ₃ (%)	22,3	1,0
CaO (%)	32,9	59,2
SiO ₂ (%)	20,3	21,3
Al ₂ O ₃ (%)	12,2	8,3
MgO (%)	3	7,9
MnO (%)	5,1	0,26
SO ₃ (%)	0,42	1,39
Cr ₂ O ₃	2	-
P ₂ O ₅	0,5	-
TiO ₂	0,8	0,17
Pérdida por ignición (%)	Ganancia	0,5
Absorción de agua (%)	1,12	-
Densidad específica (%)	3,42	3,03
Principales componentes por difracción de rayos X	Wustita-Ghelenita Kirsteinita	Periclasa-Olivino-Mayenita

Tabla 3: Composición química y características físicas de las escorias.

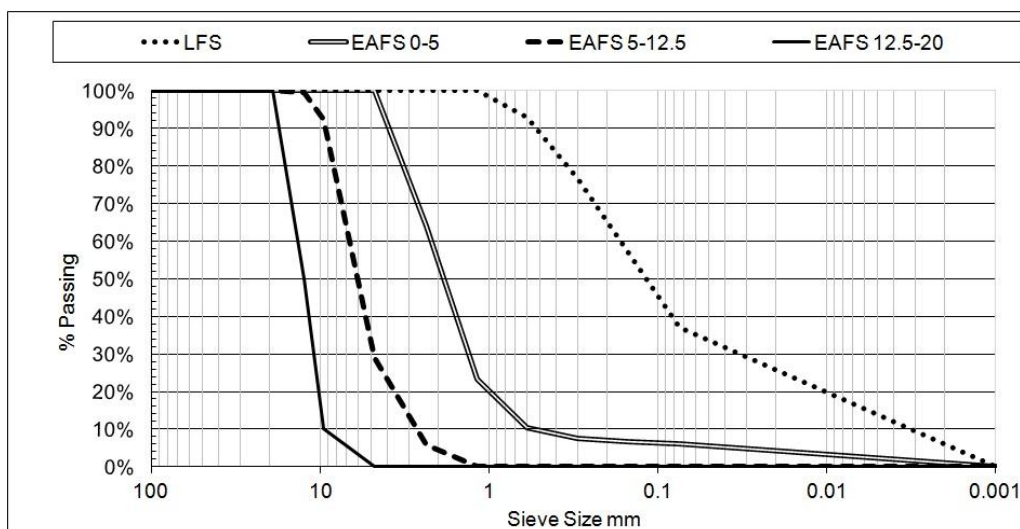


Figura 26. Clasificación de las escorias.

Diseño y preparación de las mezclas:

Para el diseño de hormigones autocompactantes sus características en fresco son prioritarias, a diferencia del hormigón convencional, donde sus propiedades en estado endurecido son las prioritarias. Por esto, se fabricaron diferentes mezclas de SCC con EAFS como árido para alcanzar los estándares de autocompactación. Además, se fabricaron mezclas de hormigón bombeable con EAFS para comparar ambos tipos de hormigón. El hormigón bombeable utilizando EAFS como árido no es una novedad, existen estudios donde se verifica su viabilidad, además de ser el tipo de hormigón, con

árido natural, que se utiliza habitualmente en la construcción. Es por esto que se utiliza este tipo de mezclas como base para comparar el rendimiento estructural de las mezclas autocompactantes.

Uno de los objetivos de este estudio es establecer una dosificación para la fabricación de SCC incluyendo la máxima cantidad de EAFS, ya que, a mayor cantidad, mayor dificultad para conseguir una mezcla autocompactante.

Como se menciona en el apartado anterior, tres tamaños de EAFS se usaron como áridos. La fracción fina de las escorias, de 0 a 5 mm de tamaño, dada su baja proporción de finos inferiores a 1,18 mm, se incrementó la fracción fina añadiendo piedra caliza triturada con tamaño inferior a 1,18. La fracción gruesa de las mezclas, consistió exclusivamente de EAFS, salvo para la muestra SC1, que solo contiene áridos naturales. Las diferentes mezclas se diseñaron para alcanzar una resistencia compresión de 40 MPa a los 28 días y de 50 MPa a los 90 días. Las muestras que se fabricaron fueron de dos geometrías diferentes, unas cúbicas de 100x100x100 mm y otras prismáticas de 70x70x280 mm. Se realizaron pruebas en las mezclas frescas y una vez endurecido el material, para estudiar su trabajabilidad, sus propiedades mecánicas y su durabilidad.

Las diferentes mezclas se hicieron en grandes amasadas, por lo que es difícil saber con exactitud la composición de las mismas. Es por esto que, en la Tabla 4 se presenta los rangos de los diferentes componentes de las mezclas, y en la Tabla 5 se muestra de forma cualitativa las composiciones de las diferentes mezclas, representando con “X” los diferentes compuestos del hormigón, pudiendo ser “X, XX o XXX” en función de la cantidad.

	Bombeable	Autocompactante
Cemento tipo I	300-350	350
Cemento tipo IV	-	200
Cenizas volantes	-	140
Arena Caliza	450-750	680-900
Fracción fina Caliza	1050	550
Fracción fina EAFS	550-800	450-550
Fracción gruesa caliza	-	700
Fracción gruesa EAFS	750-1050	420-800
Ratio agua-cemento	0,5-0,6	0,5-0,55
Superplastificante	1,5-2,5	2,5-2

Tabla 4: Proporciones relativas en masa empleadas en las mezclas.

	P1	P2	P3	P4	P5		SC1	SC2	SC3	SC4
Cemento tipo I	X	X	XXX	XXX	XXX		X	X		X
Cemento tipo IV									X	
Cenizas volantes									X	
Arena Caliza		XXX	XXX	X	XX		X	XXX	XXX	XXX
Fracción fina Caliza	X						X			
Fracción fina EAFS		X	XX	XXX	XX			XXX	XXX	X
Fracción gruesa Caliza							X			
Fracción gruesa EAFS	XXX	X	X	XXX	XX			XX	XX	XXX
Ratio agua-cemento	X	XXX	X	X	X		X	XXX	XXX	X
Superplastificante	XX	XX	X	XXX	X		XXX	X	X	X

Tabla 5: Composiciones cualitativas relativas de las diferentes mezclas.

Todos los hormigones bombeables (P1 a P5) tienen EAFS de tamaño medio como árido grueso. En la Figura 27 se observa que la mezcla P1 tiene una baja proporción de partículas inferiores a 1 mm, aun así, es útil como mezcla de referencia para hormigones bombeables. Utilizando una mayor cantidad de árido fino natural se podría obtener una mejor graduación, pero el objetivo del estudio es conseguir mezclas de hormigón con la mayor cantidad de EAFS.

El resto de las mezclas, de P2 a P5, además de utilizar árido fino de caliza, también contiene EAFS en la fracción fina en diferentes cantidades buscando la proporción ideal. De las mezclas creadas con la que mejor trabajabilidad se obtuvo fue la P5, llegando hasta un 50% en volumen de EAFS, con una densidad de 3,4 Kg/m³.

En cuanto a las mezclas de SCC, la primera de ellas, SC1, solo contenía áridos naturales por lo que se alcanzaba con facilidad las condiciones necesarias para considerar a una mezcla como autocompactante. Con la mezcla SC2 se obtuvo una autocompactación excelente, y aunque la mezcla SC3, que se fabricó de forma similar, pero utilizando cemento de tipo IV que contenía cenizas volantes, la trabajabilidad obtenida no fue igual. Sin duda, y como se verá en el siguiente apartado, la muestra con peor trabajabilidad es la SC4, aunque se puede considerar como mezcla autocompactante.

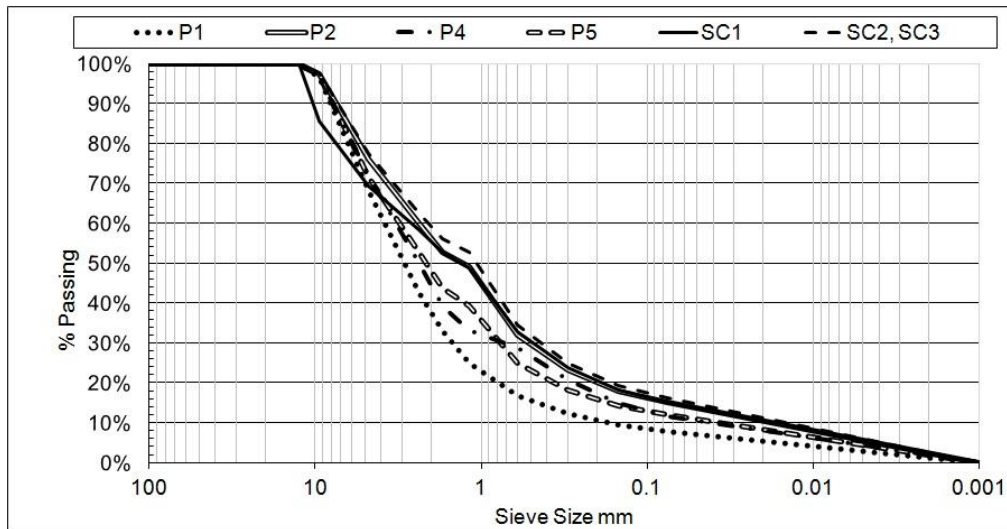


Figura 27: Dosificación de las mezclas.

Caracterización en estado fresco y comportamiento reológico

Como se explica al comienzo del apartado anterior, para conseguir mezclas autocompactantes, es necesario obtener buenas propiedades en estado fresco y reología. En la Tabla 6 se muestran algunas de sus características reológicas en estado fresco. Las mezclas con EAFS como árido, todas menos la primera, no mostraron segregación ni bloqueo.

Mezcla	Slump-flow (mm)	Capacidad de fluir L-box
SC1	580 (SF1)	0,85 (PA2)
SC2	680 (SF2)	0,90 (PA2)
SC3	560 (SF1)	0,80 (PA2)
SC4	520 (SF1)	0,35 (2 barras de refuerzo)

Tabla 6: Características de fluidez de las mezclas.



Figura 28: Cono de asentamiento de la muestra SC2.

Si se compara la muestra de referencia, SC1, con la SC2, el aumento de la fracción fina caliza proporcionó una estabilidad mayor, mejorando la fluidez, gracias a la lubricación por los finos calizos, y contrarresto la posible pérdida de trabajabilidad por el uso de EAFS como áridos.

Aunque la mezcla SC3 se diseñó de forma similar a la SC2, el cambio en el cemento utilizado, tipo I para SC2 y tipo IV para SC3, tuvo un efecto negativo en el comportamiento. Esto probablemente se deba a la presencia de cenizas volantes, que provocaron que la lubricación no fuera tan efectiva, resultando en un esfuerzo de cedencia mayor.

Por último, la mezcla SC4 incluía una fracción más gruesa de EAFS, tamaños entre 12-20 mm, y hasta un 30% de EAFS. El resultado fue el esperado, una notable reducción en la fluidez y trabajabilidad de la mezcla.

Propiedades en estado endurecido

Densidad:

La densidad en seco de las diferentes muestras se presenta en la Tabla 7. Para obtener las muestras endurecidas, se secaron en un horno durante una semana a 60°C, después de un periodo de curado por inmersión de 28 días desde el momento de su fabricación.

Si se comparan las densidades de las diferentes mezclas, se observa un aumento de entorno al 15% de esta propiedad en las mezclas que usan EAFS como árido. Este aumento en la densidad es una desventaja derivada del uso de EAFS, aunque generalmente se compensa con el aumento en la resistencia y rigidez de los hormigones con este tipo de escorias. La mayor densidad de los hormigones bombeables frente a los SCC se debe a la menor cantidad de finos de piedra caliza y mayor cantidad de EAFS.

Resistencia:

Se estudió la resistencia a compresión de las muestras cúbicas de 100x100x100 mm después de 7, 28, 90 y 180 días de curado bajo agua. Los resultados se muestran en la Tabla 7, y para todos los casos, a excepción de la mezcla SC3, se logró el objetivo de preparar hormigones estructurales con una resistencia a compresión superior a 40 MPa a los 28 días.

Propiedad	P1	P2	P3	P4	P5	SC1	SC2	SC3	SC4
Resistencia Comp. 7 días (MPa)	61	46	53	61	39	44	47	19	47
Resistencia Comp. 28 días (MPa)	67	54	61	69	46	51	53	31	58
Resistencia Comp. 90 días (MPa)	68	56	67	71	54	56	55	36	64
Resistencia Comp. 180 días (MPa)	73	60	71	74	62	64	61	41,5	67
Módulo de Rigidez 28 días (GPa)	57,5	45,6	55	55,3	38	46,4	46,5	29	48
Densidad en seco (Mg/m³)	2,51	2,50	2,70	2,63	2,59	2,35	2,53	2,67	2,79
Densidad aparente MIP (Mg/m³)	2,53	2,50	2,68	2,62	2,57	2,34	2,53	2,63	2,80
Densidad APP MIP (Mg/m³)	2,89	2,97	3,05	3,09	2,96	2,59	3,03	3,19	3,21
Porosidad MIP (%vol.)	12,3	15,5	12,2	15,2	13,5	9,9	16,6	17,5	12,8

Tabla 7: Resistencia y MIP de las mezclas.

Los valores resistencia en las muestras bombeables fueron bastante similares a excepción de las muestras P2 y P5. La mezcla P2 contenía LFS, y debido a la reacción hidráulica de este tipo de escoria con la pasta, la resistencia de esta mezcla a corto plazo era inferior. El motivo de la baja resistencia de la P5 se debe al exceso de la fracción fina. Al tener mayor cantidad de finos en la composición, se sacrificó la resistencia por una mejor trabajabilidad, obteniendo valores en la prueba de asentamiento del cono Abrams casi tan altos como las mezclas autocompactantes. Esta última mezcla fue el paso previo para obtener las mezclas autocompactantes.

En cuanto a las mezclas autocompactantes, los valores de resistencia fueron más bajos que los hormigones bombeables P1, P3 y P4. Como se ha mencionado anteriormente, para conseguir la trabajabilidad adecuada en una mezcla autocompactante, hay que utilizar gran cantidad de fracción fina y agua, cosa que reduce la resistencia del hormigón fabricado. La muestra SC3 se observa que tiene unos valores de resistencia mucho menores que el resto de las mezclas autocompactantes debido a la presencia de cenizas volantes.

Con la mezcla SC2 se obtuvieron resultados excelentes, presentando mejores características reológicas que el hormigón autocompactante con árido natural SC1. Además, las características mecánicas entre ambos fueron similares. Aun así, el aumento en las características mecánicas no se puede decir que compense con el mayor peso de las mezclas. De todas formas, cabe destacar que la densidad es una propiedad de menor relevancia en la gran mayoría de los casos, solo en construcciones en las que se requiere bajo peso cobra especial interés, como por ejemplo grandes cubiertas o puentes.

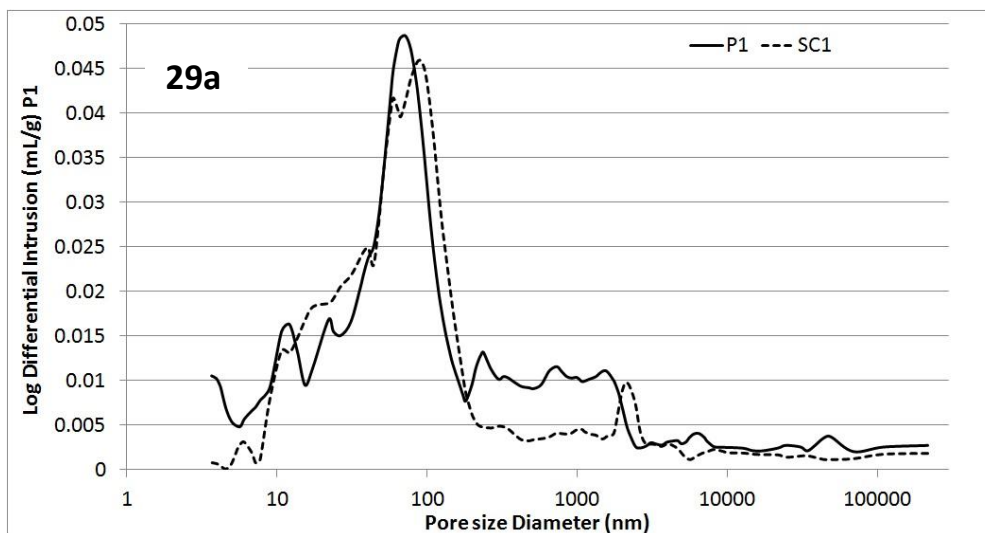
El módulo de rigidez también se midió mediante la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días del curado. Con estos resultados se observó una ligera reducción en la rigidez en las mezclas hidráulicas. Sin embargo, estos valores son orientativos y esta propiedad debe ser probada mediante diferentes ensayos para obtener los valores reales de la misma.

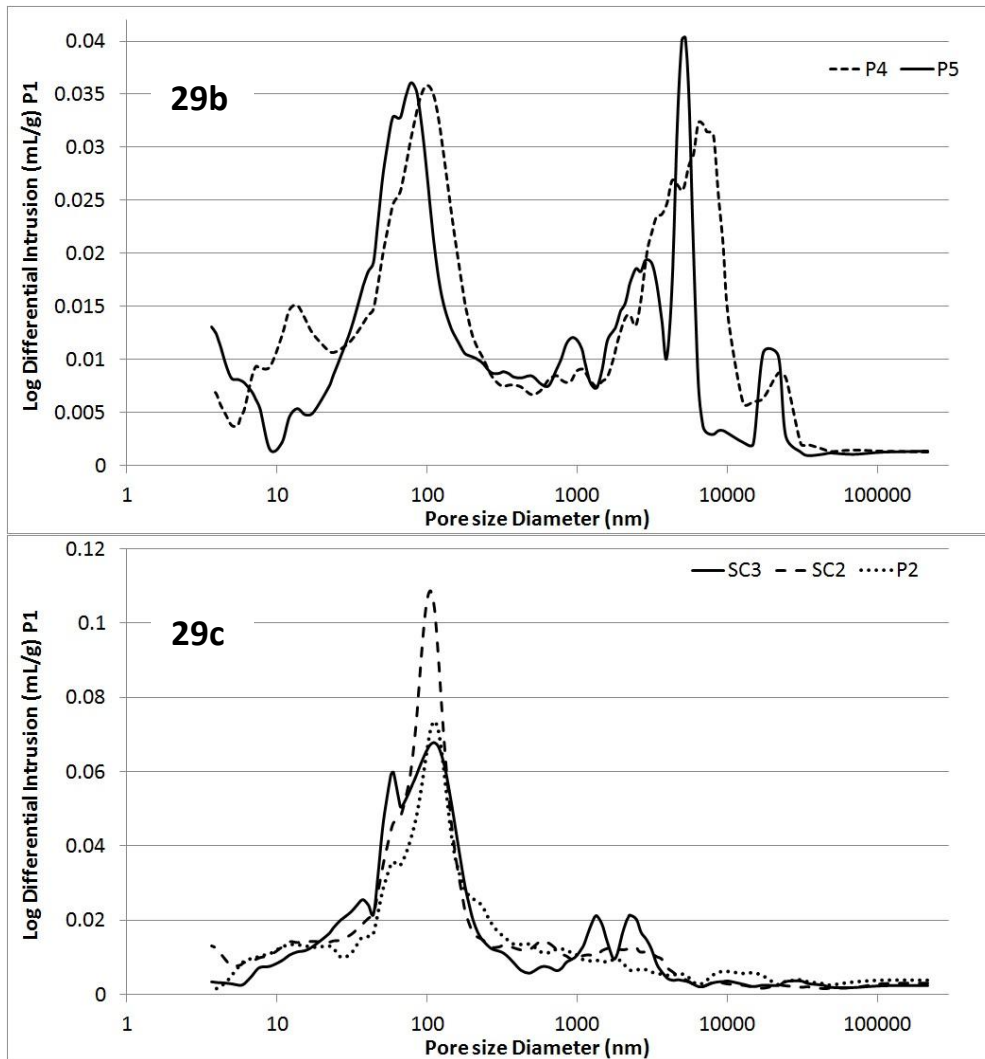
MIP

Se utilizó la porosimetría por intrusión de mercurio (MIP por sus siglas en inglés, Mercury Intrusion Porosimetry) para estudiar estructura de los poros de las mezclas fabricadas. Es fundamental realizar este ensayo para poder evaluar la resistencia de las muestras de hormigón a la deterioración. La porosidad de las muestras depende de la proporción de agua utilizada, teniendo en cuenta el agua absorbida por la EAFS.

La porosidad total medida proviene de la suma de la porosidad del agua capilar de la matriz más la proveniente de la EAFS, que representa un valor del 50% del volumen total aproximadamente. Para las diferentes mezclas, este valor se mantuvo dentro del rango del 12% al 16%. La mezcla autocompactante con árido natural, SC1, fue una excepción. Los valores obtenidos de porosidad MIP para SC1 fueron menores a los obtenidos para las muestras con árido siderúrgico. Esto se debe a que la absorción de agua de las escorias de EAF es mayor que la de los áridos naturales.

En las gráficas a continuación, figuras 29a, 29b y 29c, se muestran la distribución de frecuencia de tamaño de los poros. En todos los casos se observa un pico entorno a los 100nm, poros de entre 40nm y 150nm de tamaño, debido a la porosidad capilar de la matriz. La porosidad MIP de las mezclas, excluyendo la porosidad proporcionada por la EAFS, es bastante similar, por lo que las propiedades que dependen de la porosidad también han de ser similares.





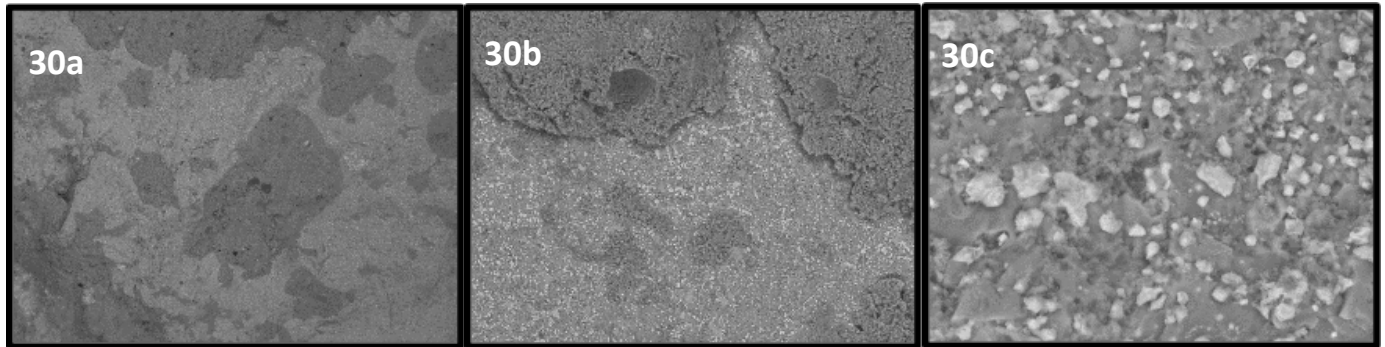
Figuras 29a, 29b y 29c. Porosimetría MIP de diferentes mezclas.

SEM

Se estudiaron fragmentos de las muestras de las mezclas P2 y SC2, una vez se habían fracturado después de los ensayos a compresión, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido. No se observó ninguna diferencia notable entre las características ambas muestras.

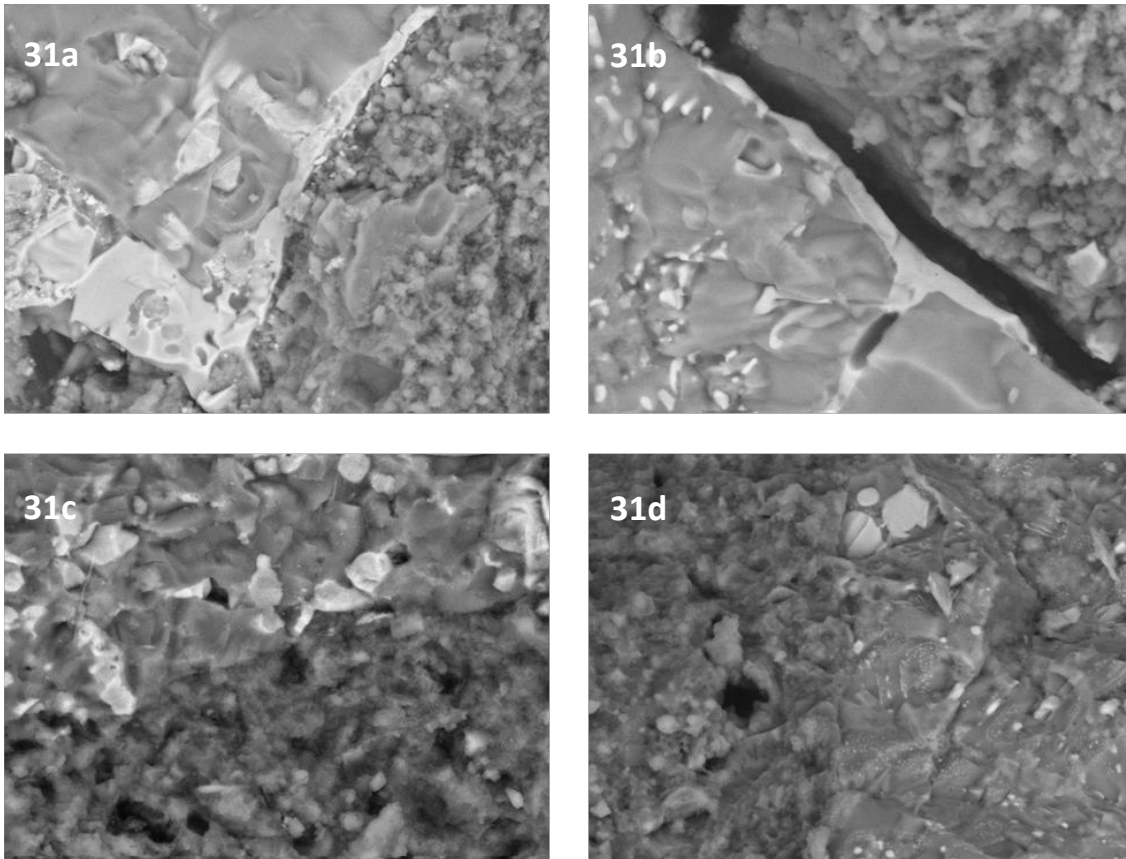
En las figuras a continuación se presentan imágenes obtenidas del SEM para la muestra SC2. En la primera de ellas, Figura 30a, se muestra el contorno de una partícula de la escoria de EAF, donde se observa una buena adherencia de la pasta de cemento, región oscura, y regiones con peor adherencia donde la pasta de cemento se ha separado del guijarro de EAFS por la fractura del material. En la Figura 30b se muestra la superficie de la escoria de horno eléctrico.

Por último, en la Figura 30c se observa la presencia de óxido de hierro, partículas blancas, en una matriz de silicatos de color gris. Además, también se puede distinguir algunas zonas de pasta de cemento, zonas arrugadas, adheridas en la matriz de silicatos. Con esto se puede afirmar que la adherencia de la pasta de cemento depende de la hidrofobicidad del compuesto, siendo buena con compuestos hidrofílicos de la escoria, como el olivino o la calcita, y, por el contrario, mala en compuestos hidrofóbicos como los óxidos de hierro.



Figuras 30a, 30b y 30c. Imágenes SEM de la muestra SC2

En la Figura 31, se pueden observar partículas fracturadas de escoria de horno eléctrico y pasta cementicia rota en las cercanías de su contorno, incluyendo la Zona de Transición Interfacial (ITZ). Esto muestra ejemplos de adherencia tanto buena como agrietada y debilitada. En la Figura 31a, se muestra una región de ITZ poco densificada (con agujero y fisura) junto con un recubrimiento de óxido de hierro en una partícula del árido. En la Figura 31b, se puede observar que la ITZ se ha abierto debido a los efectos de tensión de corte durante la prueba. En las Figuras 31c y 31d, se presenta una ITZ "casi perfecta" en la que el árido tiene una pequeña proporción de partículas "blancas" de óxido de hierro en los contornos de la superficie. Estas aparentes partículas blancas corresponden al interior de las partículas de escoria de horno eléctrico rotas. En las Figuras 31a y 31b, se puede observar una "rotura" limpia de los silicatos en el interior de las partículas de escoria de horno eléctrico.



Figuras 31a, 31b, 31c y 31d. Imágenes SEM de la muestra P2

Estabilidad dimensional

Para evaluar la contracción por el secado a largo plazo de las mezclas se utilizó las muestras prismáticas fabricadas (70x70x280 mm). Para ello se mantuvieron las muestras al aire, a temperatura ambiente, durante largos periodos de tiempo en unos moldes donde el cambio dimensional se podía medir.

En la Figura 32 se muestra la evolución del cambio de longitud por contracción frente al tiempo para las muestras ensayadas. A partir de un periodo de 90 días los valores obtenidos eran prácticamente constantes. Lo primero que se observa en la Figura es la mayor contracción de las mezclas bombeables frente a las autocompactantes. Además, como se ha afirmado en estudios previos, la adición de EAFS como árido en hormigones provoca una contracción por secado mayor que los hormigones fabricados con áridos naturales. Esto se debe al menor módulo elástico de la escoria de EAF y a la mayor rigidez de los áridos convencionales. Los resultados obtenidos confirman estas afirmaciones, si se compara la mezcla SC1, fabricada a con áridos naturales, con el resto de las mezclas autocompactantes, se ve como esta muestra presenta menor contracción. Por otro lado, la muestra P4, mezcla con mayor cantidad de EAFS, muestra unos valores de contracción mayores frente al resto de muestras.

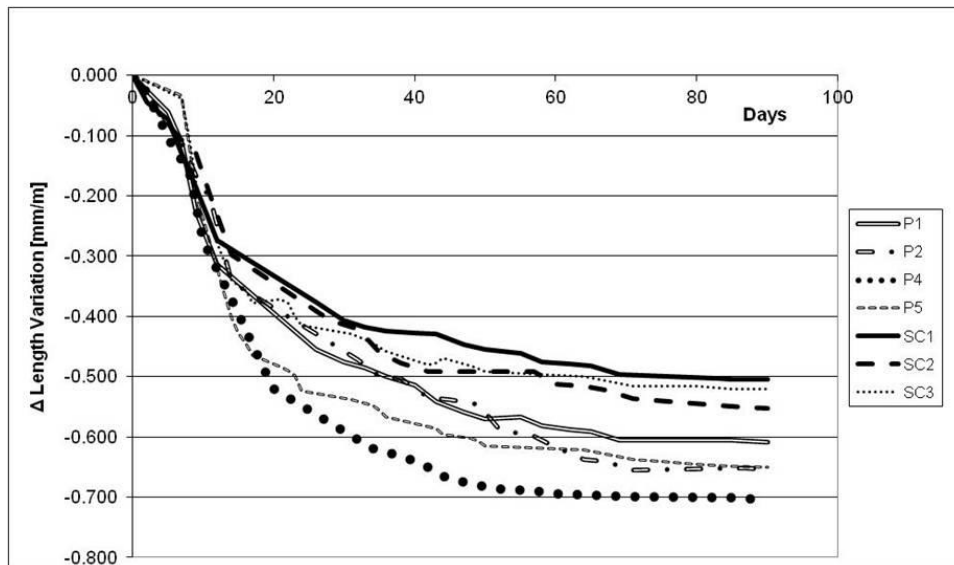


Figura 32: Cambio longitudinal por contracción.

Ensayos de durabilidad

Ciclos de congelación-deshielo

El primer ensayo de durabilidad realizado fueron ciclos consecutivos de hielo y deshielo de las muestras después de un tiempo de curado de 90 días sumergidas bajo agua. Para este ensayo se usaron las probetas cúbicas (100x100x100 mm), dos por mezcla. Se realizaron un total de 122 ciclos de un día de duración cada uno. Se finalizó la prueba en el momento que el agrietamiento era considerable en la superficie de la muestra.

La prueba consistía en almacenar las muestras en un congelador a -15°C durante 24 horas, seguido de una inmersión en agua durante otras 24 horas. Periódicamente se controlaba el estrado superficial de las muestras y se medía la velocidad de pulso ultrasónico, como estimación de la rigidez del hormigón. Cuando el deterioro era visible, se ensayaron las probetas a compresión y se midió su masa final. Los resultados obtenidos se presentan la Tabla 8.

*Resistencia después de 180 días de curado. La hidratación de la puzolana no se detiene durante las pruebas.

Mezcla	Resistencia 90 días (MPa)	Rigidez (GPa)	Resistencia Cong. (MPa)	Rigidez Cong. (GPa)	Pérdida de masa Cong. (g)/2500	Resistencia Moj. (MPa)	Rigidez Moj. (GPa)	Pérdida de masa Hum. (g)/2500
P1	68	57,5	45,7 (-33%)	36,1 (-37%)	39,5	40,2 (-41%)	31 (-46%)	127
P2	56	45,6	37,8 (-32%)	29,8 (-35%)	23,8	53,5 (-4,5%)	38,8 (-15%)	140,5
P4	71	59,5	41,6 (-41%)	31,6 (-47%)	60	68,9 (-3%)	50,7 (-15%)	162,6
P5	54	50,6	48,3 (-11%)	42,8 (-15%)	54,4	52,9 (-2%)	47,2 (-6,7%)	116
SC1	56	46,4	44,5 (-21%)	45,1 (-2,8%)	37,5	54,8 (-2,1%)	46,4 (0%)	131
SC2	55	47,5	41,1 (-25%)	45,1 (-5,1%)	55,9	55 (0%)	47 (-1,1%)	158,5
SC3	41,5 (*)	42,6	44,2 (+6,5%)	46,6 (+9,4%)	24	44,6 (+7,5%)	37 (-13%)	201,9

Tabla 8: Variaciones de rigidez, resistencia y masa después de la prueba de congelación-descongelación y mojado-secado.

En la Figura 33 se muestran la evolución de la rigidez medida por la velocidad de pulso ultrasónico a lo largo del tiempo. Si se tiene en cuenta que una pérdida superior al 20% de los valores iniciales de rigidez y resistencia indica que el hormigón está dañado, son pocas las mezclas las que pasaron esta prueba, tal y como se observa tanto en la Tabla 8 como en la Figura 33. A pesar de esto, los valores de resistencia se mantuvieron en un rango en el que no implicó un grave deterioro para su uso estructural.

Las mezclas P5, SC1, SC2 y SC3 mostraron un mejor comportamiento, teniendo en cuenta la resistencia y la rigidez. Esto se explica por la alta proporción de finos de piedra caliza. Como caso particular, la mezcla SC3, que tiene entre sus componentes cenizas volantes, y una notable proporción de aire ocluido. Las reacciones puzolánicas retardadas de la ceniza volante tienen una función reconstructiva, obteniendo un buen valor de resistencia después de la prueba.

La baja pérdida de rigidez de la muestra SC1 se puede explicar por el diferente tipo de porosidad. Las mezclas que contienen EAFS tienen dos tipos de poros, poros en la matriz y en la escoria, por lo que la absorción de agua será mayor en estas últimas. Por esto se puede concluir que la porosidad adicional que proporciona la EAFS, no favorece este tipo de durabilidad.

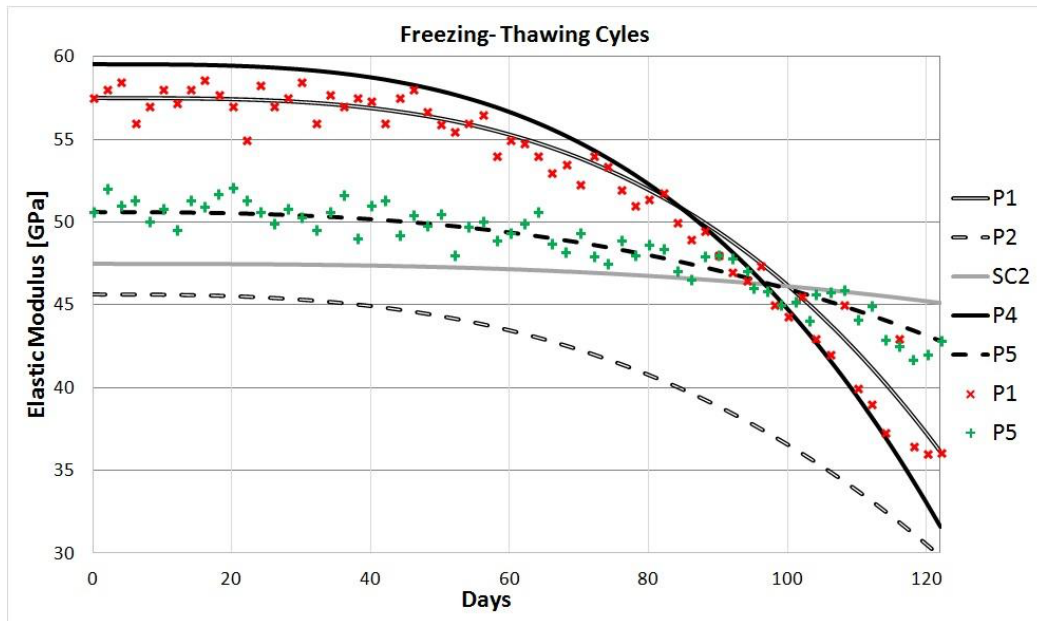


Figura 33. Variaciones de rigidez durante el ensayo de congelación-deshielo.

Ciclos de mojado-secado

Al igual que para el ensayo anterior, para los ciclos consecutivos de mojado y secado se realizaron a las probetas cúbicas, dos por mezcla. Después de 90 días de curado bajo agua, se realizaron 148 ciclos, de una duración de 24 horas por ciclo. El ciclo completo consistía en sumergir las probetas 16 horas en agua a temperatura ambiente para después introducir las probetas en un horno de secado a 60°C durante 6 horas. Por último, se dejaban enfriar a T^a ambiente durante 2 horas para evitar el choque térmico. De igual forma que en los ciclos de hielo-deshielo, se controló periódicamente el estado superficial de las muestras, además de medirse la rigidez por velocidad de pulso ultrasónico y ensayar las probetas a compresión una vez la prueba terminó. Los resultados de las medidas se encuentran en la Tabla 8.

La pérdida de resistencia y rigidez de las muestras ensayadas fue tolerable en todos los casos. Es por esto por lo que se puede afirmar que la presencia de escorias de horno de arco eléctrico no influye negativamente en este tipo de durabilidad. Al igual que antes, el mejor comportamiento en términos de rigidez lo mostraron aquellas mezclas con mayor contenido de finos. El peor resultado se obtuvo con la mezcla P1. Este resultado fue inesperado, ya que no parece haber razones de fundamento que expliquen este comportamiento. Una posibilidad de este deterioro podría ser las diferentes propiedades físicas que presentan los dos tipos de áridos en tamaños mayores de 1-2 mm.

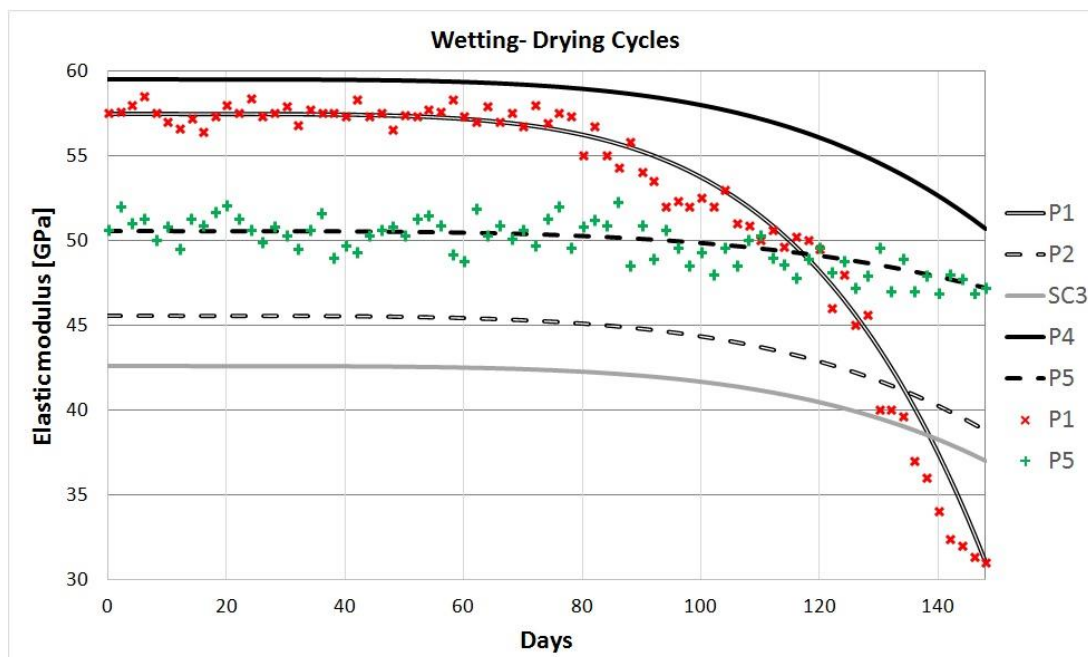


Figura 34. Variaciones de rigidez de varias muestras después del ensayo de humectación-secado.

Exposición a ambientes marinos

Para este ensayo, como bien se ha explicado en el Apartado 4.2. *Ensayos a probetas de hormigón*, consta de dos pruebas, una corta duración, 1 año, y otra de larga duración, cinco años. El ambiente marino está impregnado de iones cloro y sulfato, que son potencialmente peligrosos y deben de ser monitoreados.

Para el ensayo de corta duración se usaron todas las mezclas descritas anteriormente, sin embargo, para la de larga duración se utilizó la mezcla P4, la mezcla con mayor contenido de EAFS, y una mezcla similar en volumen, pero con áridos naturales, que se denominó P4CA. Además, estas muestras también se utilizaron en el siguiente ensayo de durabilidad, corrosión de las barras de refuerzo.

Se usaron las probetas cúbicas, 100x100x100 mm, para el ensayo de corta duración. Una vez se terminó el tiempo de la prueba, las probetas se cortaron con el objetivo de evaluar la presencia de iones desde la superficie hasta el interior de la muestra, a lo largo de una fractura de 50 mm.

En la Figura 35 se muestra la evolución de las concentraciones de iones de cloro y sulfato de las diferentes muestras desde la periferia hasta el centro. El estudio se realizó en las zonas de la superficie de reciente fractura, aumentando la distancia desde la periferia hacia el centro de las probetas, evitando los áridos visibles, tanto siderúrgicos como convencionales. En algunos casos solo se representó la curva ajustada para evitar saturar el gráfico con puntos.

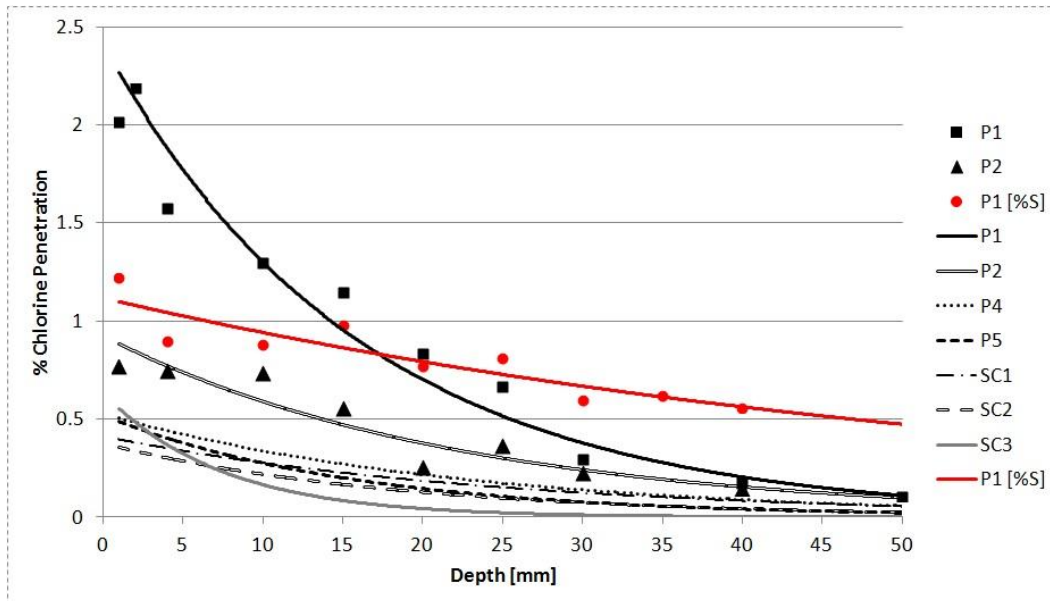


Figura 35. Penetración de cloro y azufre en mezclas.

Si se considera como valor umbral un contenido de cloro de 0,1% en matriz del hormigón, se observa que algunas de las mezclas bombeables, P1 y P2, alcanzaron una penetración más profunda de cloro, del orden de los 50 mm. Para el resto de las muestras los valores de penetración estuvieron en el rango de 25 mm a 35 mm, a excepción de la muestra SC3, que presentó una penetración de 15 mm. Si se tiene en cuenta que la cobertura de 40 a 60 mm establecida para las estructuras de hormigón marino se alcanza al año de exposición, los resultados no son alentadores. Si se compara las muestras con árido siderúrgico con las de árido convencional, se observa que las EAFS tienen poco efecto en la penetración de iones cloro, y, por tanto, la mejora de la durabilidad del hormigón estructural con EAFS en ambiente marino fue muy leve.

La proporción de cloro más alta en la matriz de cemento de la periferia de las muestras fue en la muestra P1, con valores entorno al 2%. En cuanto a la penetración de azufre, la única muestra que mostró valores superiores a los presentados por hormigones convencionales fue la P1, cerca del 1% en contra del 0,6% de los hormigones convencionales. Por esto se afirma que el riesgo de la aparición de ettringita secundaria o taumasita es muy bajo. Al igual que en el ensayo anterior, el mal comportamiento de la mezcla P1 no responde ante una razón clara. En general las mezclas autocompactantes respondieron mejor en los ensayos a corto plazo en ambiente marino.

Las probetas usadas para el ensayo de larga exposición fueron muestras cilíndricas de 150x300 mm. Se realizaron para las mezclas P4 y P4CA. La Figura 36 muestra el resultado de la mezcla P4, donde se aprecia un cambio de color en presencia o ausencia de iones.

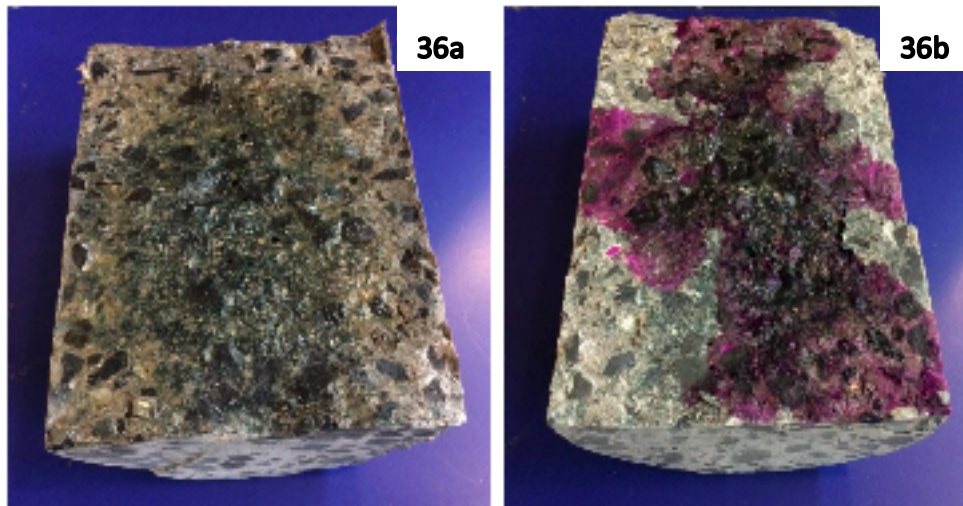


Figura 36: Muestra P4 después del análisis de penetración de cloruro (a) y después de carbonatación (b).

Con el fin de detectar la penetración de iones cloruro en las muestras, se roció una solución de nitrato de plata sobre la superficie. Si los iones cloro están en una proporción superior al umbral, el color de la superficie no sufrirá ningún cambio, sin embargo, si la proporción es inferior, la superficie se oscurecerá. Este ensayo permite determinar de manera general el estado de las muestras. El reactivo químico se preparó para cambiar el color con la concentración umbral en España, equivalente al 0,06%-0,08% de las mezclas fabricadas.

Los resultados obtenidos revelaron que en la muestra fabricada con árido natural la penetración fue total, es decir de 75 mm. Sin embargo, en la muestra de árido siderúrgico, la penetración promedio fue de 30 mm. De esto se puede concluir que la presencia de árido siderúrgico en las mezclas es positiva.

De forma similar, pero con otro reactivo químico, se estudió la carbonatación en ambas muestras. Los resultados que se obtuvieron probaron que en ninguna de las mezclas existía carbonatación. El pH fue superior a 9,5 en la superficie fracturada de ambas muestras. Esto revela la abundante presencia de portlandita en la masa del hormigón, colaborando en la protección de las barras de refuerzo.

Corrosión de las barras de refuerzo

El hormigón protege contra la corrosión ambiental al acero de refuerzo en dos niveles, el primero como barrera física, y el segundo como un protector electroquímico que proporciona pH básico en las áreas próximas al acero. Se ensayaron probetas con EAFS y con árido convencional para estudiar la influencia que tiene el árido siderúrgico. Las probetas se sometieron a las pruebas de la siguiente manera:

- Se realizaron pruebas de durabilidad en muestras de hormigón armado (HA)
- Se controlaron variables de corrosión electroquímica en el refuerzo.

Las probetas usadas para estos ensayos consistían en cubos de 150x150 mm, en los que había incrustado unas barras de acero de 10 mm de diámetro, Figura 37. Para reflejar la evolución electroquímica de los refuerzos de acero se usó la barra central que emerge para realizar las mediciones pertinentes. Como se mencionó en el ensayo anterior, las mezclas utilizadas son la P4 y la P4CA.



Figura 37: Apariencia externa de las muestras y disposición interna de las barras de refuerzo.

La medida utilizada para la velocidad de corrosión de las barras de acero es la intensidad eléctrica. A mayores valores de intensidad eléctrica, mayor será la velocidad de corrosión. En la tabla a continuación se muestra los efectos de la intensidad eléctrica en la corrosión.

Intensidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosión
<0,1	Baja
0,1-0,5	Moderada
0,5-1	Alta
>1	Severa

Tabla 9: Efectos de la intensidad eléctrica en la corrosión del refuerzo de acero.

De los resultados tomados durante los ensayos de durabilidad, ciclos de mojado-secado y exposición a cámara de niebla salina, se concluye que las tasas de corrosión electroquímica de las barras de acero en el hormigón convencional P4CA con respecto de la mezcla con EAFS, P4, muestra una evolución más perjudicial. Una de las hipótesis de este comportamiento es que la EAFS es capaz de mantener el pH más alto que el hormigón convencional. Esto se debe probablemente a la lixiviación de la cal libre en presencia de agua. Otra hipótesis que cabe destacar es que la escasa presencia de partículas de hierro y la abundante presencia de óxidos de hierro puede influir favorablemente.

6. Fabricación y rendimiento de vigas a escala real

En esta investigación se estudia la resistencia a flexión y las deformaciones a largo plazo de vigas de HA con escoria de EAF. Se utilizaron ensayos de flexión a cuatro puntos para estudiar el comportamiento a flexión de 4 vigas, cada una de longitud de 4400 mm, una sección transversal de 200x300 mm y una luz libre de 4000 mm, dos de las cuales se fabricaron con un hormigón bombeable y las otras dos con un hormigón autocompactante. Se utilizaron diferentes tipos de cemento en cada viga (Cemento tipo I, Cemento tipo IV) para cada clase de trabajabilidad. Las mismas vigas de hormigón se estudiaron bajo un ensayo de carga a largo plazo (fluencia). Se muestran comparaciones entre los resultados experimentales y los resultados analíticos de acuerdo con los códigos modelo europeos.

Materiales:

Aqua, cemento y áridos naturales:

Para esta investigación se usaron dos tipos de cemento. El primero, un cemento portland tipo I 52,5R, y el segundo, un cemento Portland tipo IV/B-v 32,5N, ambos casos siguiendo la normativa UNE-EN 197-1. La composición del cemento tipo I incluye un 90% de Clinker Portland, 5% de finos de polvo de carbonato de calcio y un 5% de yeso. En el caso del cemento tipo IV, está compuesto de 50% de Clinker de Portland, 40% de ceniza volante tipo I, 5% de finos de polvo de carbonato de calcio y 4% de yeso. En ambos casos el agua que se utilizó se obtuvo de la red de agua de la ciudad de Burgos.

Como finos se utilizó piedra caliza natural comercial de tamaño máximo de árido 1,18 mm, módulo de finura de 1,5 unidades y una gradación mostrada en la Figura 38. Las partículas con un tamaño inferior a 1 mm son esenciales para mejorar la trabajabilidad del hormigón, previniendo la segregación de los áridos gruesos y compensando la falta de finos en las escorias EAF.

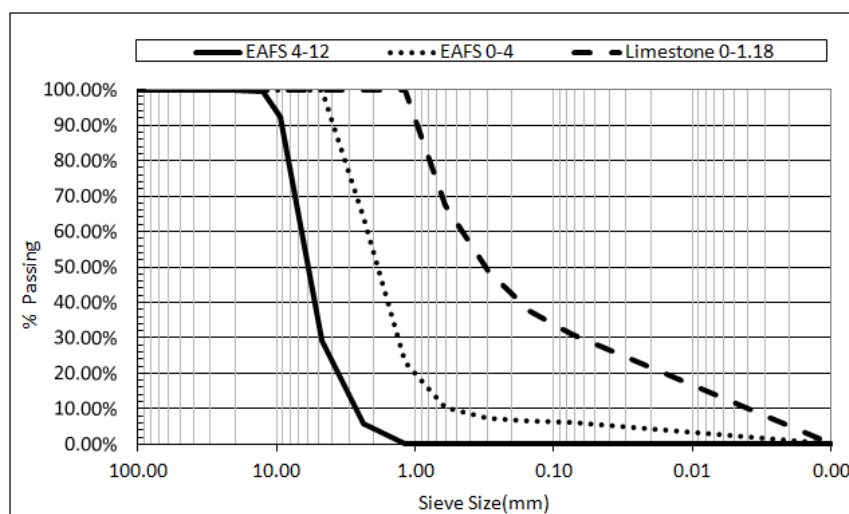


Figura 38. Clasificación de los áridos naturales y EAFS.

Escorias EAF:

Para realizar los diferentes ensayos se utilizó escoria negra triturada de horno de arco eléctrico (EAFS) en dos fracciones, una de tamaño fino, inferior a 4,75 mm, y una mediana, inferior a 12,5 mm, cuya gradación se puede observar en la Figura 38, ambas suministradas por la empresa Hormor-Zestoa. La composición química de las EAFS, además de algunas de sus propiedades, están detalladas en la Tabla 10.

Componentes	EAFS (0-5mm)
Fe ₂ O ₃ (%)	22,3
CaO (%)	32,9
SiO ₂ (%)	20,3
Al ₂ O ₃ (%)	12,2
MgO (%)	3,0
MnO (%)	5,1
SO ₃ (%)	0,42
Cr ₂ O ₃	2,0
P ₂ O ₅	0,5
TiO ₂	0,8
Pérdida por ignición (%)	ganancia
Absorción de agua (%)	1,12
Densidad específica (%)	3,42
Principales componentes por difracción de rayos X	Wustita-Ghelenita Kirsteinita

Tabla 10: Composición química y características físicas de las escorias.

Diseño de las mezclas:

Para analizar el comportamiento estructural del hormigón siderúrgico se diseñaron cuatro mezclas de hormigón diferentes, conteniendo todas ellas escorias de horno de arco eléctrico (EAFS) en diferentes proporciones. Como se detalla en el Apartado 2. *Objetivos del trabajo*, uno de los objetivos de estos ensayos es demostrar la viabilidad de fabricar un hormigón siderúrgico de uso estructural en elementos a flexión. Actualmente, ya está demostrada la posibilidad de fabricar un hormigón siderúrgico bombeable, y el siguiente paso en las investigaciones es conseguir diseñar una mezcla de hormigón autocompactante. Es por esto que para el análisis de los resultados se toma el hormigón siderúrgico bombeable como referencia, ya que simula la colocación habitual en la construcción.

De este modo se introdujeron dos variables, la primera la trabajabilidad de las mezclas (hormigones bombeables y autocompactantes) y la segunda, los diferentes tipos de cementos utilizados para su fabricación. Esta última variable se seleccionó para estudiar

su influencia en la trabajabilidad de los hormigones, además de estudiar la influencia de la interacción entre los minerales del cemento y la EAFS en la respuesta estructural del hormigón reforzado.

El objetivo de obtener mezclas autocompactantes presentó varios problemas y los pasos tomados en esa dirección se pueden encontrar en un artículo previamente publicado por los autores de este grupo de investigación [37]. Después de varios intentos, algunos de los cuales se informaron en el mencionado artículo, se seleccionaron dos diseños de mezcla diferentes para fabricar el concreto de las vigas de concreto reforzado. Su granulometría se muestra en la Figura 39 y las proporciones de los materiales en la Tabla 11

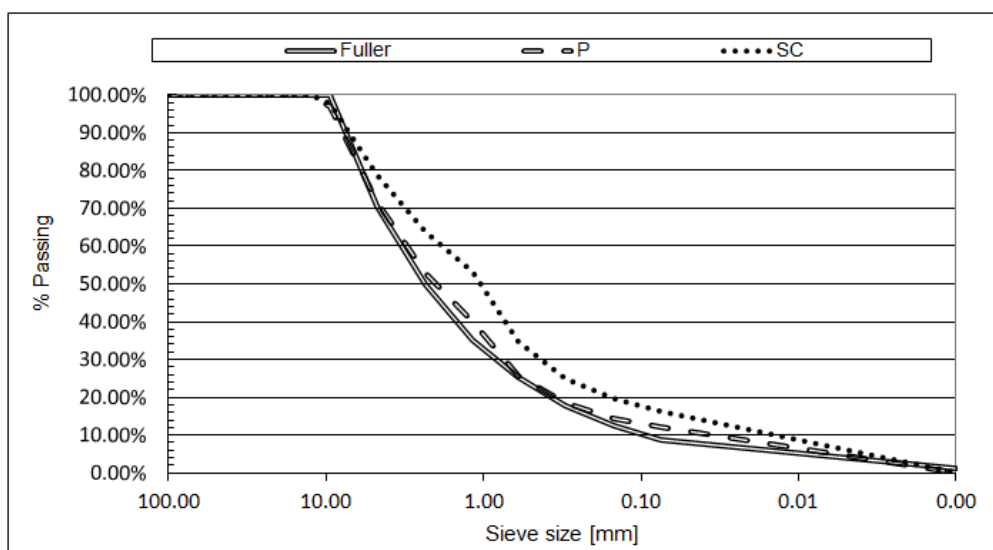


Figura 39. Clasificación de las mezclas.

	IP	IVP	ISC	IVSC
Cemento tipo I	330		330	
Cemento tipo IV		330		330
Agua	160	160	165	165
EAFS grueso	950	950	760	760
EAFS fino	690	690	550	550
Arena caliza	650	950	900	900
Plastificante (% del peso de cemento)	1,50%	1,50%	2,00%	2,00%

Tabla 11: Proporciones de las mezclas.

Barras de Refuerzo:

Como refuerzo a tracción se usaron barras de acero corrugado de 25 mm diámetro y barras de 8 mm como refuerzo a compresión y corte en el caso de las vigas diseñadas para el ensayo a flexión.

Para el ensayo de carga mantenida se usaron barras de acero corrugado de diámetros 25mm, 8mm y 6mm como refuerzos a tracción, compresión y corte, respectivamente.

Todos los refuerzos utilizados fueron de clase AP 500 S, fabricadas con acero B 500 SD, de acuerdo con las especificaciones de la norma UNE 36068.

Detalles de las muestras y configuración de las pruebas:

Para cada una de las mezclas se fabricaron dos vigas de hormigón armado (HA), fabricando un total de 8 vigas. Todas ellas con la misma geometría, una sección transversal de 300x200 mm y 4400 mm de longitud.

Una viga de cada tipo de mezcla se diseñó para el fallo a flexión y la otra para el fallo por corte. Esta última se utilizó en primer lugar para el ensayo a flexión con carga mantenida, ensayo que se llevó a cabo durante un año. Después de este ensayo, las vigas se utilizaron para evaluar su respuesta estructural bajo cargas de corte. En la Tabla 12 se detallan los refuerzos de ambas vigas y sus configuraciones geométricas están mostradas en las Figuras 40 y 42.

Vigas	Refuerzo		
	Superior	Inferior	Estribos
Fallo a flexión	2 Ø8	3 Ø25	Ø8/100mm
Fallo por corte	3 Ø8	4 Ø25	Ø6/100mm

Tabla 12: Detalles de las barras de refuerzo.

Con fin de evaluar el desarrollo de su resistencia a compresión a los 7, 28, 90 y 180 días, se fabricaron doce especímenes cúbicos de hormigón de 100 mm de lado. Sus resistencias a la compresión se redujeron utilizando los valores mostrados en la Tabla 13, tomados del Código Modelo Fib para Estructuras de Hormigón 2010.

Concrete grade	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60
Concrete grade	C55	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120	
f_{ck} [MPa]	55	60	70	80	90	100	110	120	
$f_{ck,cube}$ [MPa]	67	75	85	95	105	115	130	140	

Tabla 13: Valores característicos de resistencia

La medición de las propiedades en estado fresco de los hormigones bombeables se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C143, donde se describe el modo de ensayo de flujo de asentamiento. Para evaluar la trabajabilidad de los hormigones autocompactantes se ensayó el flujo de asentamiento descrito en la norma ASTM C1611 y el ensayo de caja en L descrito en el EFNARC. Las propiedades mecánicas se ensayaron siguiendo la norma europea, EN 12390-3, para la resistencia a compresión, y EN 12390-13, para el módulo elástico secante.

El objetivo del ensayo de flexión a cuatro puntos es evaluar el comportamiento a flexión de las vigas. La configuración geométrica de este ensayo y la posición de los diferentes equipos colocados en la viga, están mostradas en las Figuras 40 y 41 respectivamente. Las vigas se diseñaron de tal forma que los apoyos donde se posicionan las vigas se encontraran a 4000 mm. La distancia entre los dos puntos de carga de la viga fue de 1000 mm. En el *Apartado 4.3. Ensayo a vigas de escala real* se detalla el equipo utilizado para realizar las mediciones además de su ubicación en la viga.

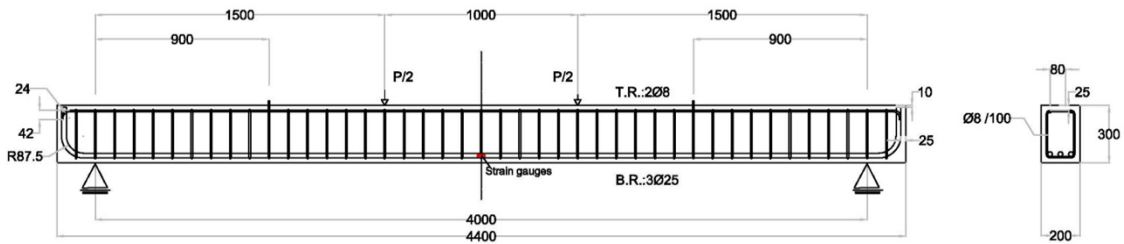


Figura 40. Detalles de la configuración de la viga de flexión

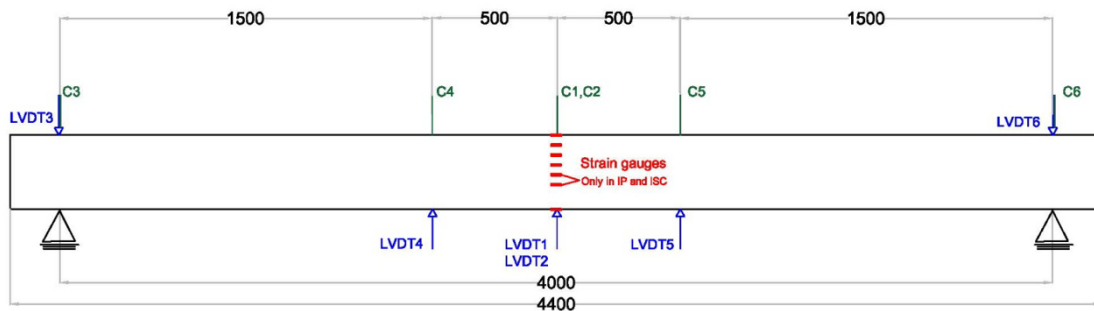


Figura 41. Configuración del ensayo de flexión

Por otro lado, el objetivo del ensayo de carga mantenida en tres puntos es evaluar la deformación retardada de las vigas. Al igual que para el ensayo anterior, la luz libre entre las vigas se diseñó para ser de 4000 mm. En el punto medio de esta luz se aplicó una carga de 40 KN. En las Figuras 42 y 43 se muestra la configuración geométrica del ensayo y la posición de los equipos electrónicos empleados para la recogida de datos.

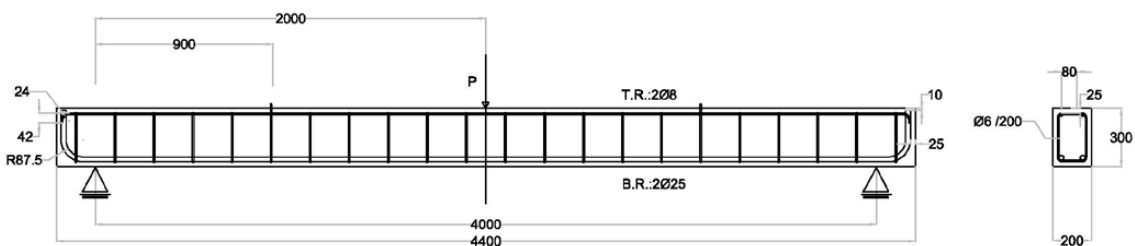


Figura 42. Detalle de viga sometida a carga mantenida.

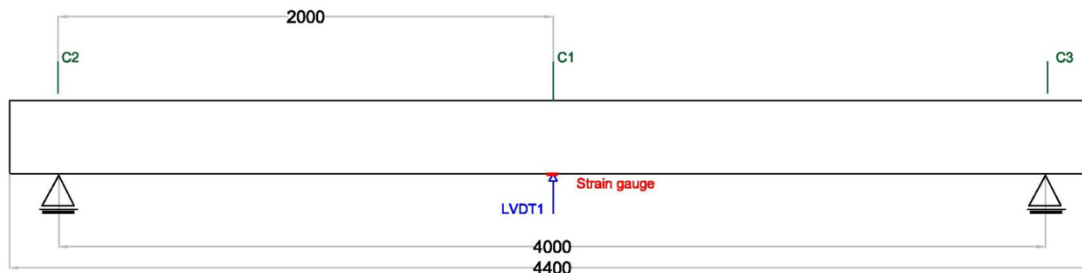


Figura 43. Configuración del ensayo de carga mantenida.

Resultados Experimentales:

Propiedades en estado fresco:

Para los hormigones bombeables, IP e IVP, se consiguió una clase de baja consistencia S3. En la Tabla 14, se presentan los valores obtenidos para el ensayo del cono Abrams, que para los dos tipos de cemento se obtuvo el mismo valor. Para este caso, los diferentes tipos de cemento no tiene influencia en la trabajabilidad del hormigón. Para la fabricación de las vigas, durante el colado, el hormigón mostró una buena fluidez, pudiéndose verter con facilidad, utilizando después la vibración necesaria y obligatoria por la norma.

	Slump	Caja en L	Densidad (Mg/m ³)	E (GPa)	fc 28 días (MPa)
IP	115 mm	-	2,75	38,58	49,5
IVP	115 mm	-	2,63	30,78	28,3
ISC	680 mm	1	2,69	39,9	50,2
IVSC	700 mm	1	2,55	31,15	31,5

Tabla 14: Propiedades frescas y endurecidas de los hormigones.

En la Tabla 14 también se muestran los resultados de los ensayos de asentamiento y de caja en L para los hormigones autocompactantes. En ambos casos se consiguieron, de acuerdo con la norma EFNARC, hormigones de clase SF2 para el ensayo de asentamiento y una clase de PA2 para el ensayo de caja en L. Para los dos tipos de hormigones autocompactantes fabricados no fue necesario realizar una vibración mecánica y se consiguieron buenos resultados para ambos casos. Sin embargo, el hormigón fabricado con el cemento de tipo IV tuvo una reducción de la trabajabilidad durante el colado de las vigas, que puede explicarse por la interacción del cemento con los superplastificantes.

Propiedades Mecánicas:

En la Tabla 14, mostrada anteriormente, se presentan las principales propiedades mecánicas de los hormigones utilizados para la fabricación de las vigas. Se observa que las densidades de los hormigones autocompactantes son más ligeros que los

bombeables. Esto se debe al mayor contenido de EAFS que presentan los segundos. Además, el tipo de cemento utilizado también influye en la densidad puesto que el cemento de tipo I es más pesado que el tipo IV. Sin embargo, teniendo en cuenta la magnitud de la carga, esta variable no influirá en su comportamiento estructural. En la misma tabla también se pueden comparar las propiedades elásticas de los hormigones. Los fabricados con el tipo I tenían un módulo elástico de 39 GPa mientras que los fabricados con el tipo IV de 31 GPa.

En la Figura 44 se muestra la evolución de la resistencia a compresión del hormigón. Se pueden diferenciar claramente dos grupos, los fabricados con cemento de tipo I y los fabricados con tipo IV. A edades tempranas los hormigones fabricados con el primero de ellos alcanzan valores de resistencia de alrededor 50 MPa, en cambio, los fabricados con el tipo IV alcanzaron valores alrededor de 30 MPa a los 28 días. Estos valores son los esperados, ya que el cemento de tipo I es de 52,5R y el cemento de tipo IV es 32,5R. Para ambos casos, a los 180 días los valores de resistencia en los hormigones autocompactantes fueron superiores a los bombeables, hecho que puede explicarse por el mayor contenido de finos de piedra caliza en los primeros.

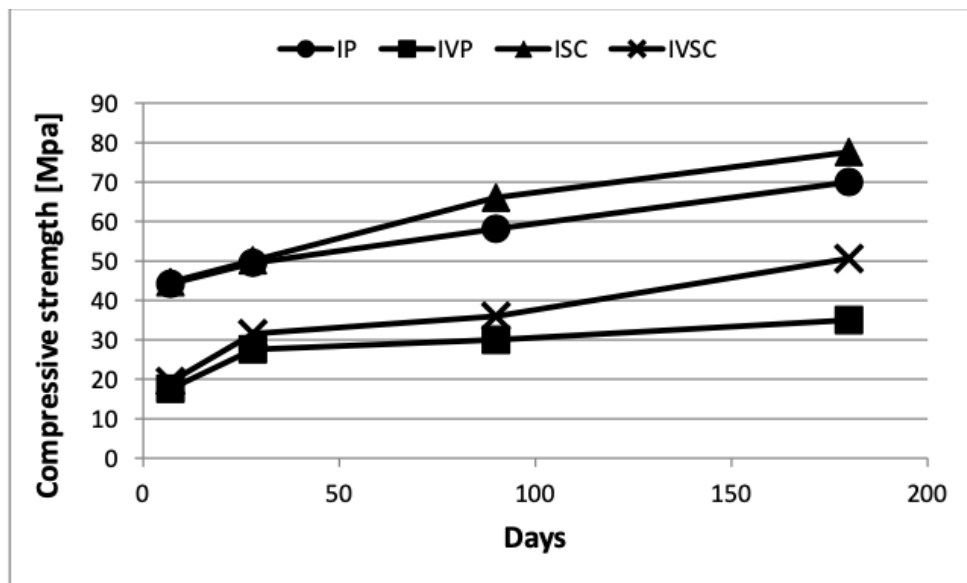


Figura 44. Evolución de la resistencia a la compresión con el tiempo.

Comportamiento a flexión:

Para el ensayo a flexión, todas las vigas se diseñaron para el colapso por fallo a flexión cuando el hormigón alcanzara su máxima resistencia a compresión y los refuerzos cedieran. De esta forma se estudió el comportamiento del hormigón y su influencia en el fallo, y así evaluar la respuesta estructural del hormigón armado con EAFS.

En la Tabla 15 se muestran tanto los valores experimentales como los resultados teóricos esperados de las pruebas. Para obtener los resultados teóricos se asumieron las características mecánicas a los 28 días y los coeficientes de seguridad unitarios, y se utilizaron las ecuaciones de equilibrio, propuesto en la EHE-08. Estos valores teóricos se basaron en el diseño de vigas y falla predicha en el tercer dominio.

Para las vigas fabricadas con el cemento de tipo I, tanto los valores teóricos como los experimentales de la posición del eje neutro (X_u) en la sección de la mitad de las vigas es muy similar, es en la carga última (P_u) donde se observa un aumento en el valor experimental frente al teórico.

	Pu Teórico (KN)	Xu Teórico (mm)	Pu Exp. (KN)	Xu Exp. (mm)	Deformación Exp. (mm)
IP	212	99	231	97	44,99
ISC	212	100	233	100	45,36
IVP	178	176	175	168	42,28
IVSC	186	158	195	147	44,38

Tabla 15: Resultados experimentales y teóricos

Si se analiza las vigas fabricadas con cemento del tipo IV, los valores teóricos para X_u fueron superiores que los valores experimentales. Sin embargo, en el caso de la viga IVSC, la capacidad última a flexión fue superior en los resultados experimentales que en los valores teóricos, a diferencia de la viga IVP que mostró una ligera disminución.

En cuanto a las vigas fabricadas con el cemento del tipo I, tanto en la viga IP como en la ISC, se observa un aumento en la capacidad última a flexión con respecto a los valores teóricos. En cambio, para X_u no se observa apenas diferencia entre los valores teóricos y los experimentales.

La diferencia de entre los valores teóricos y experimentales para las vigas de fabricadas con cemento de tipo IV puede deberse a que, para el cálculo teórico se ha supuesto la falla en el tercer dominio. Experimentalmente se ha comprobado que el tipo de fallo de las vigas fabricadas con tipo IV ocurrió en el cuarto dominio.

En la Figura 45 se muestra los patrones de grietas en las vigas ensayadas. En todas ellas se puede apreciar el fallo del hormigón en el centro de la zona superior de la viga, tal y como se ha especificado en el diseño, demostrando que se ha superado la resistencia máxima a compresión.

El patrón de grietas está diferenciado por colores para mostrar la formación de las grietas bajo diferentes cargas:

- Azul para 15 KN
- Verde para 26 KN
- Rojo para 95 KN
- Rosa para 138 KN
- Amarillo para 170 KN para cemento tipo IV y 200 para cemento tipo I

El patrón de grietas refleja el comportamiento normal de los HA ordinarios. Las grietas aparecieron cada 100 mm aproximadamente, reflejando la distancia entre los estribos. Las primeras grietas de flexión aparecieron en el centro de las vigas, propagándose hacia arriba en dirección de los apoyos.

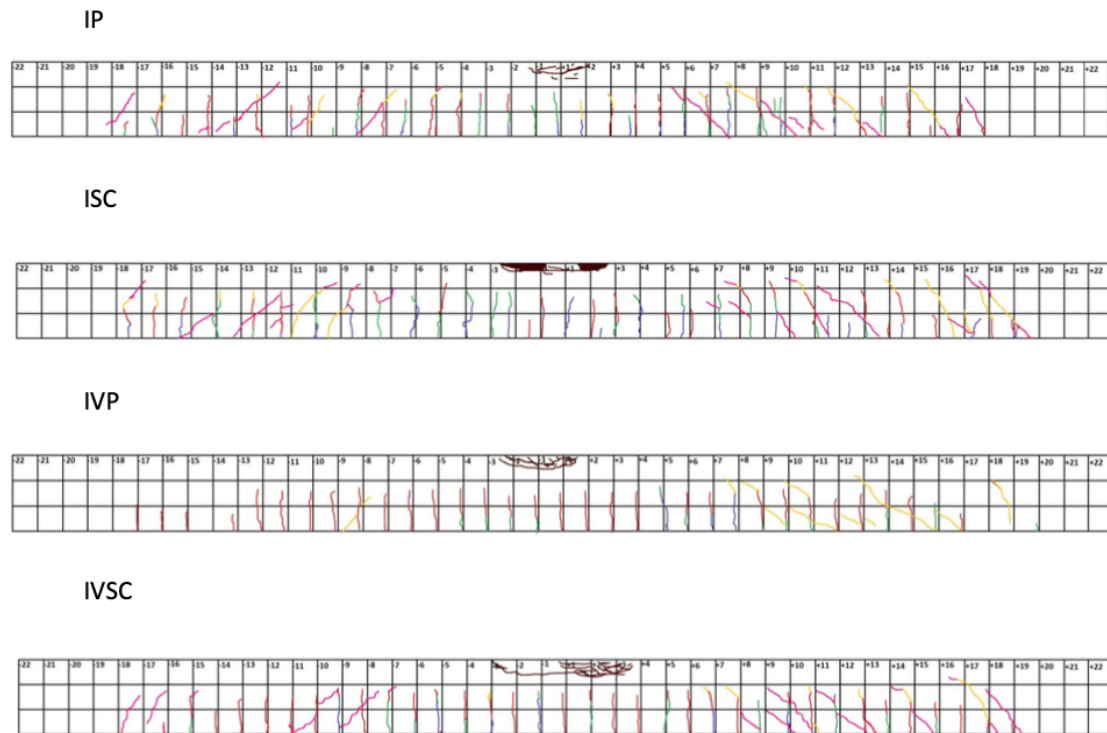
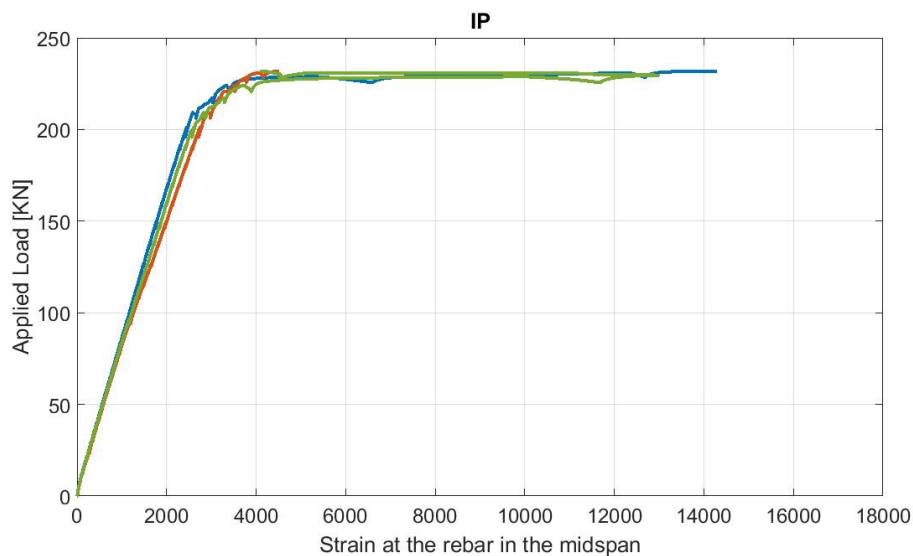


Figura 45. Patrón de grietas de las vigas.

Las vigas fabricadas con cemento de tipo I lograron resistencias más altas, soportando cargas más altas y alcanzando en la última etapa el límite de elasticidad del acero, trabajando de esta forma en la zona plástica, tal y como se habían diseñado. En el caso de las vigas fabricadas con cemento de tipo IV, no se llegó a superar en ningún momento el límite elástico del acero, trabajando durante todo el ensayo en la zona elástica. En la Figura 46 se muestran los gráficos de tensión deformación de las barras de refuerzo en el centro de la viga.



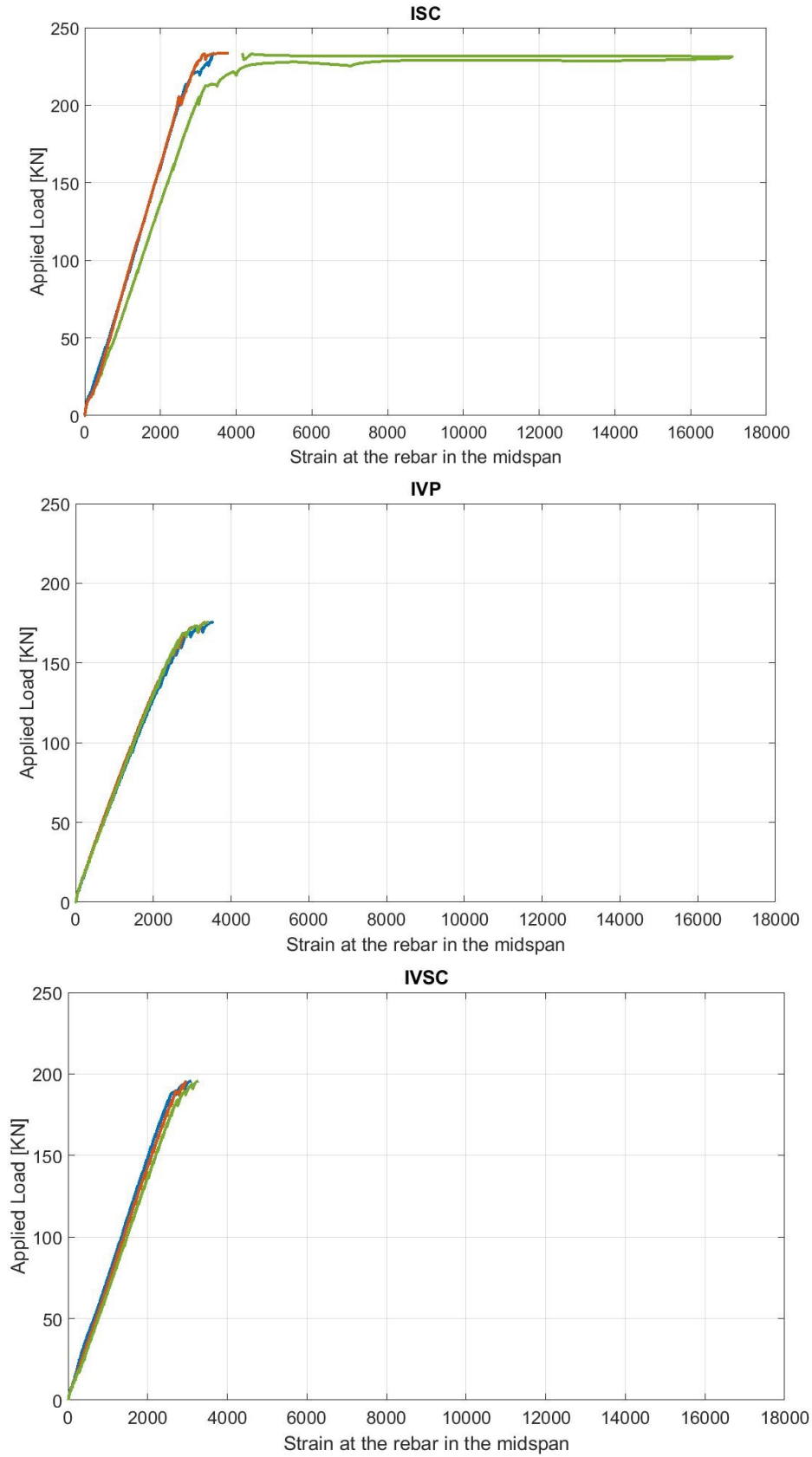
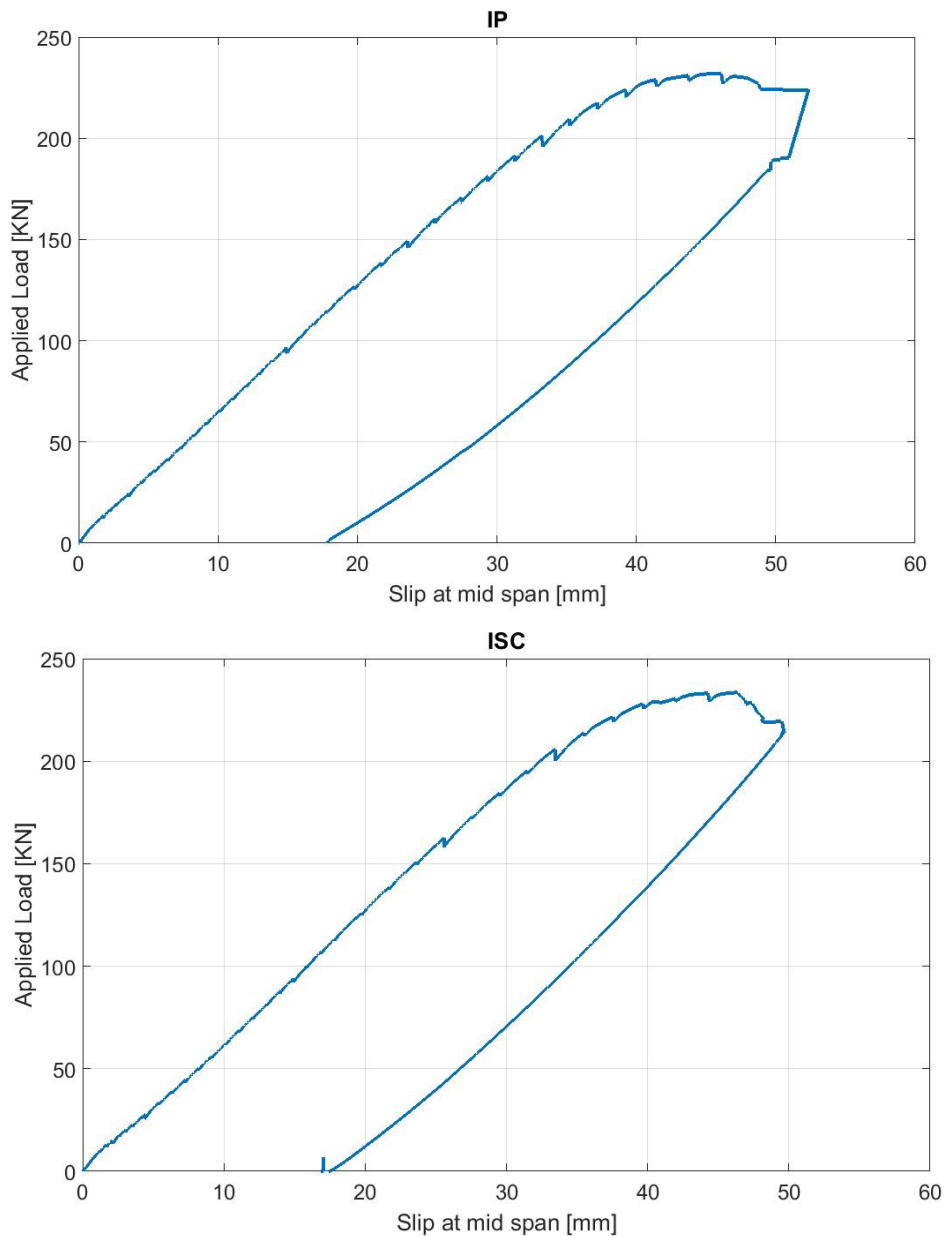


Figura 46. Deformación de la armadura de acero según la sección central de la viga.

La Figura 47 ilustra las relaciones entre la carga y el desplazamiento de las vigas. En ambas vigas se mantuvo la instrumentación durante la fase de descarga, para poder registrar la recuperación del desplazamiento de las vigas.

El comportamiento de las vigas IP e ISC es muy similar. Se muestra un primer comportamiento lineal mientras está trabajando en el rango elástico, seguido de un comportamiento dúctil a flexión después de que el refuerzo comienza a ceder, y por último lugar, el hormigón comienza a ceder. Durante el proceso de descarga, las vigas recuperan la deformación elástica, mostrando una línea perfecta casi paralela a la fase de carga.

Las vigas IVSC e IVP también mostraron un comportamiento elástico lineal, en este caso, el comportamiento dúctil a flexión ocurrió después de alcanzar la carga máxima, cuando el hormigón comenzó a ceder.



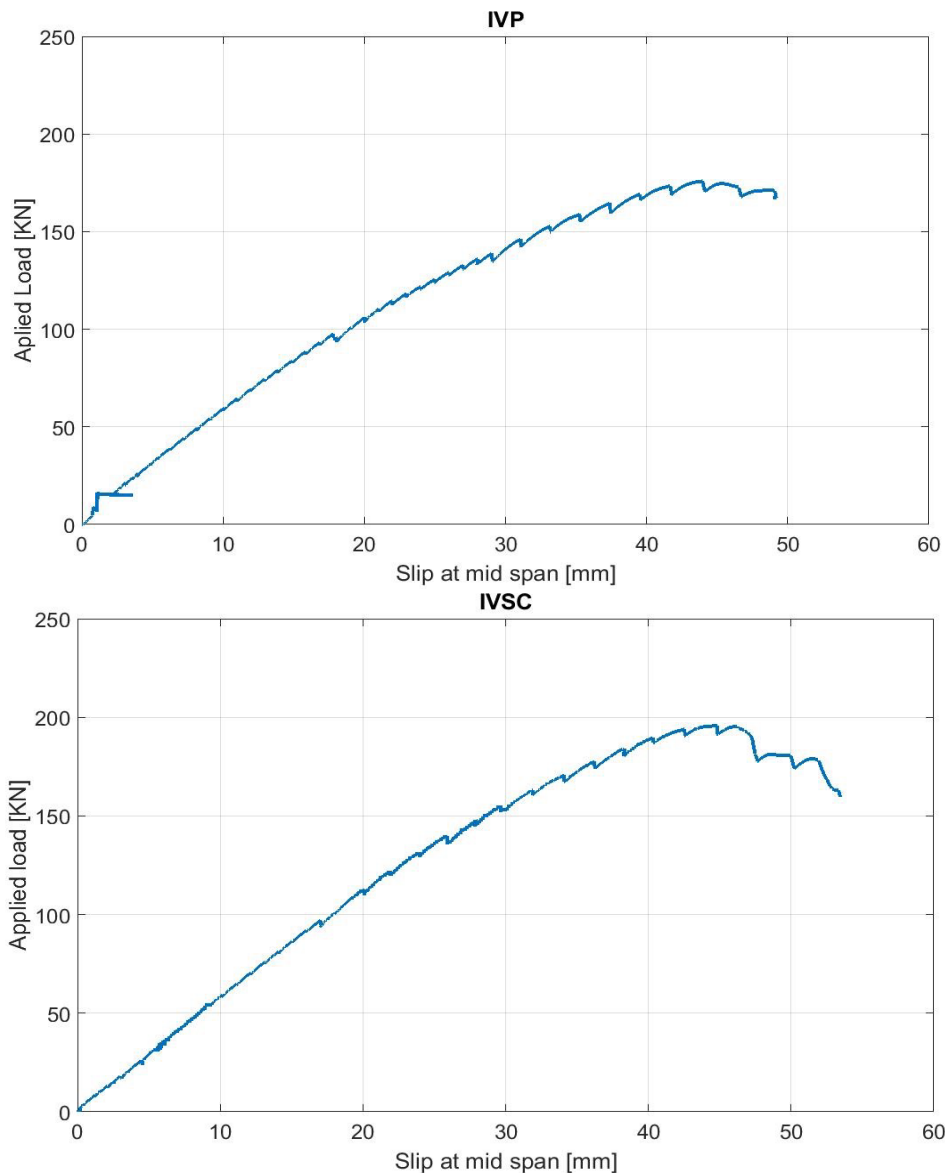


Figura 47. Relación carga vs flecha en la sección del central de la luz total de la viga.

La Figura 48 muestra cómo afecta las diferentes cargas en el desplazamiento de las vigas, mostrando las diferencias entre los distintos módulos de elasticidad entre las vigas fabricadas.

Si se toma como valor de referencia el desplazamiento de las vigas a 150 kN, se observa que las vigas fabricadas con el cemento I son las que menos desplazamiento han mostrado, siendo este de alrededor de 23 mm, lo que confirma lo visto en la Tabla 14, donde se muestra que los valores de los módulos de elasticidad de los hormigones fabricados con este tipo de cemento son mayores. Del mismo modo, la viga IVP, como se había visto en la Tabla 14, es la que menor módulo de elasticidad tiene y a su vez la que más se ha deformado, llegando a los 30 mm de desplazamiento.

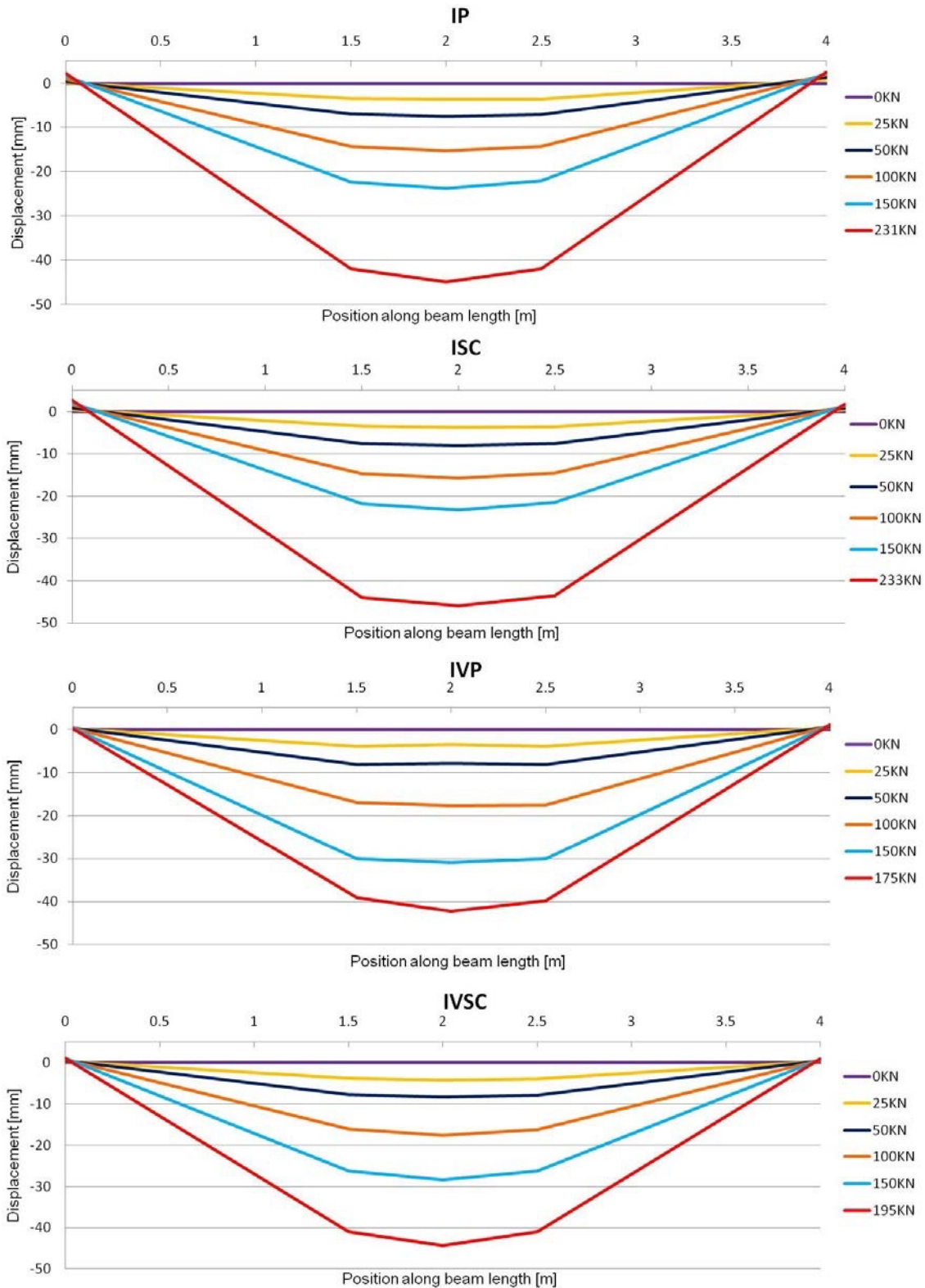
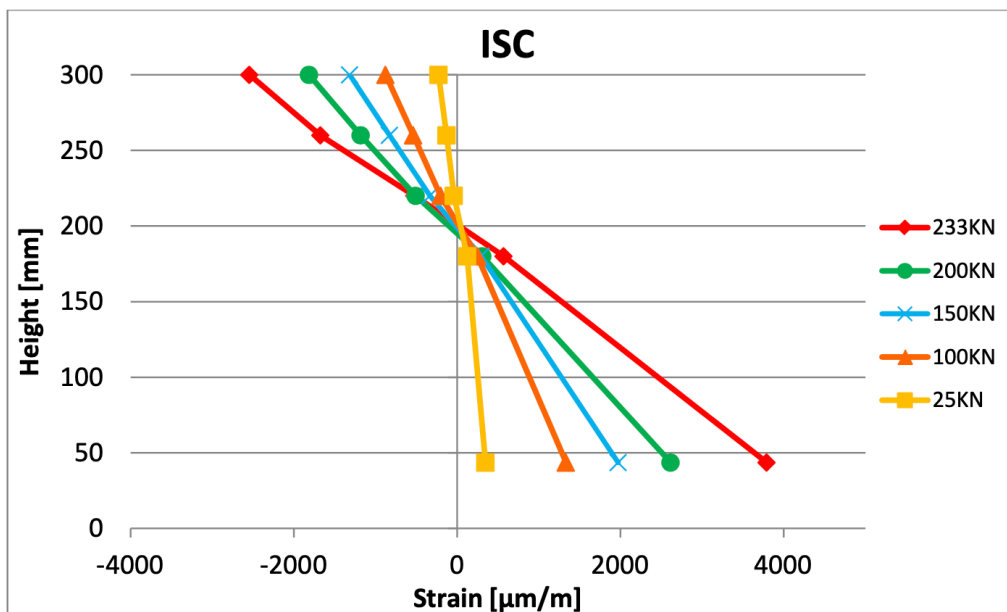
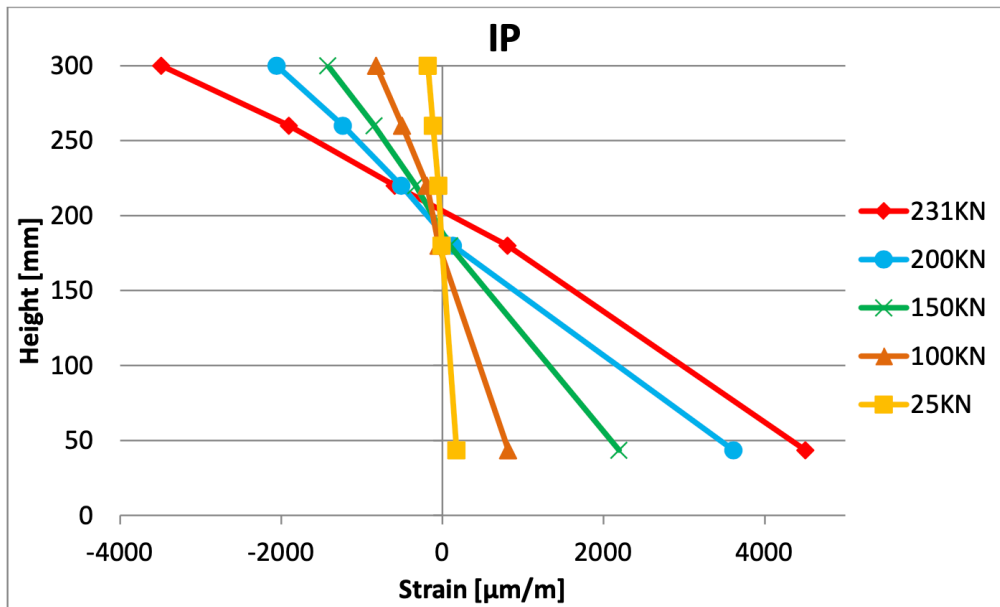


Figura 48. Flecha medida (LVDT) a lo largo de la longitud a diferentes cargas.

En la Figura 49, se puede observar la evolución de la distribución de deformaciones en la sección del punto medio a diferentes cargas en todas las vigas, lo que también muestra la posición del eje neutro en cada carga.

Dos respuestas estructurales diferentes del eje neutro son apreciables. En primer lugar, en las vigas fabricadas con cemento tipo I, el eje neutro permanece prácticamente constante hasta la aplicación de la carga ultima, donde ya se fractura el material. Por otro lado, en las fabricadas con cemento tipo IV el eje neutro desciende durante el ensayo.

Estos comportamientos son los esperados en un hormigón armado convencional, fabricado con áridos naturales, ya que, como se muestra en la Figura 46, únicamente las vigas fabricadas con cemento tipo I superan el límite elástico, mostrando una deformación plástica.



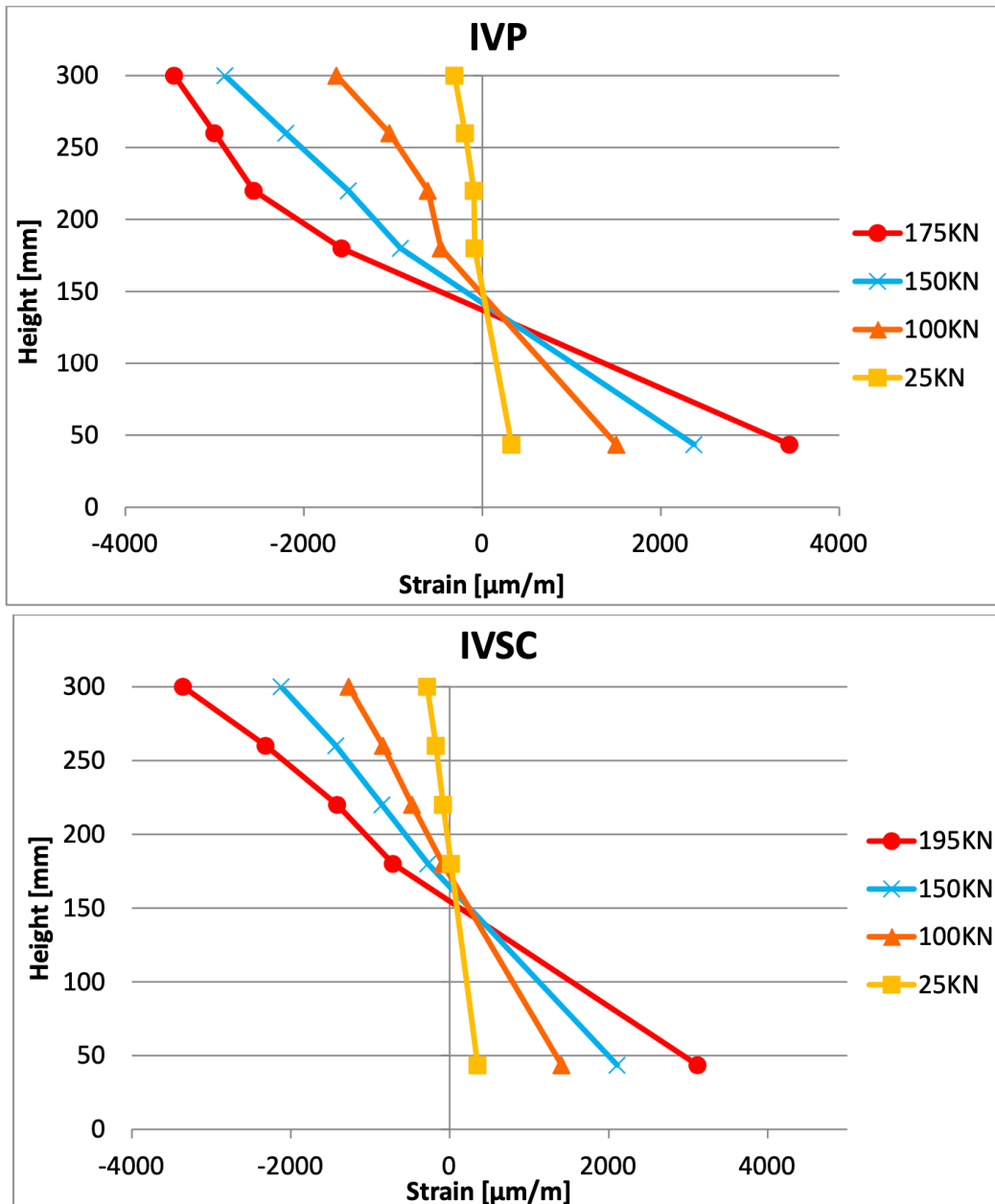
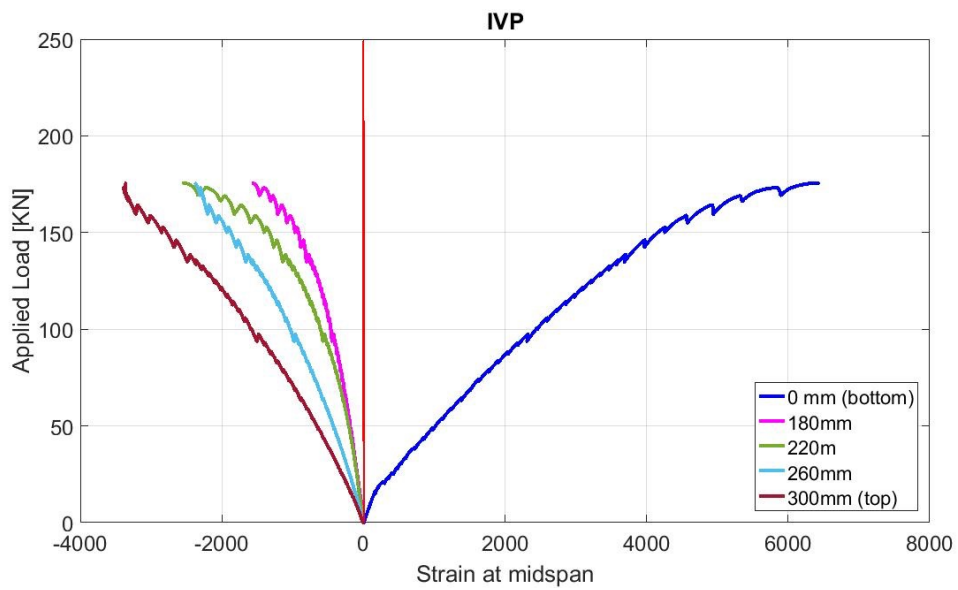
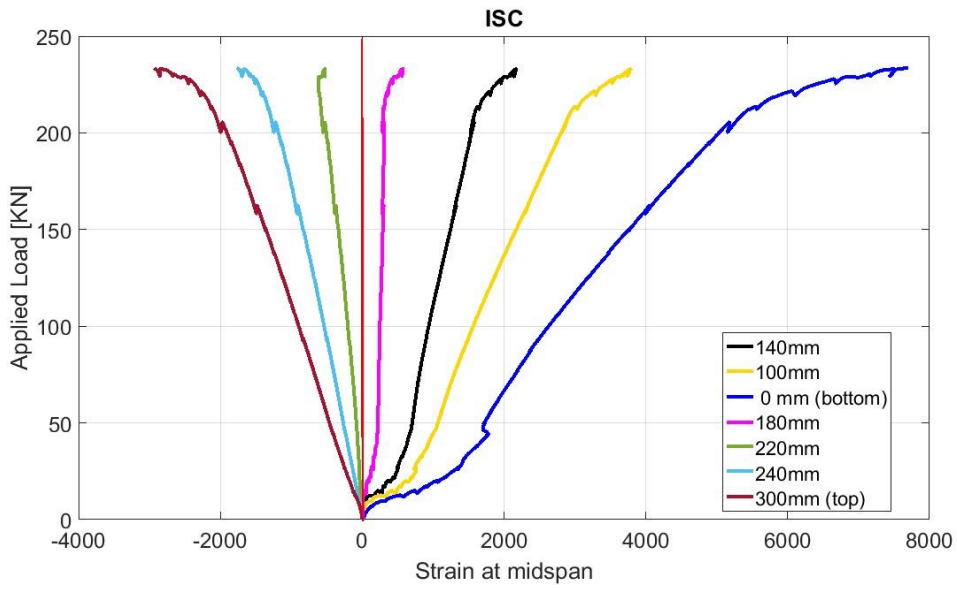
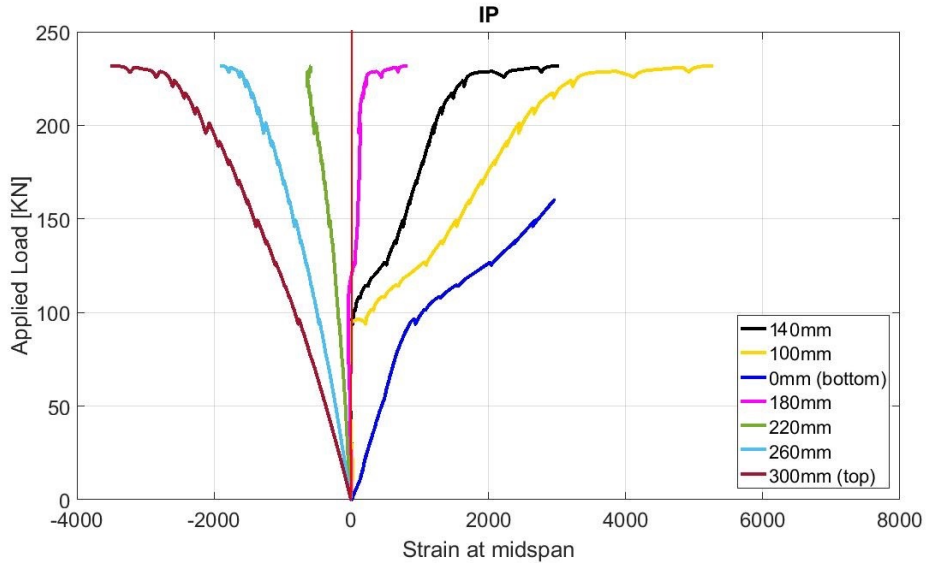


Figura 49. Distribución de la deformación, a diferentes cargas, según la sección transversal del centro de vano.

La relación carga-deformación medida de cada viga se muestra en la Figura 50. Se puede observar que, como se mencionó, el eje neutro de las vigas fabricadas con cemento tipo I se encuentra más alto durante todo el ensayo que el eje neutro de las vigas fabricadas con cemento tipo IV. Los valores de los extensómetros ubicados en 0, 100 y 140 mm se distorsionaron debido a la posible presencia de grietas.



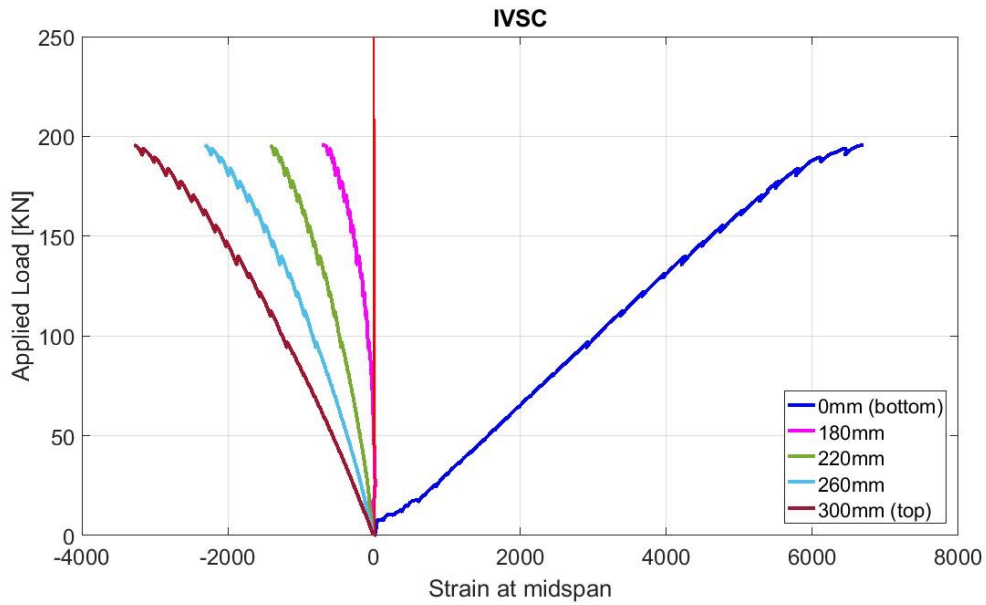


Figura 50. Distribución de la deformación (a diferentes cargas) según planos longitudinales en la sección transversal del centro de vano.

Ensayos de carga mantenida:

La Figura 51 representa la evolución de la deformación de las vigas durante todo el periodo de tiempo en el que el ensayo fue realizado. A los seis meses del inicio del ensayo, las deformaciones que se alcanzaron fueron las siguientes: 13,52 mm para la viga IP, 12,23 mm para la ISC, 16,90 mm para la IVP y 12,53 mm para IVSC.

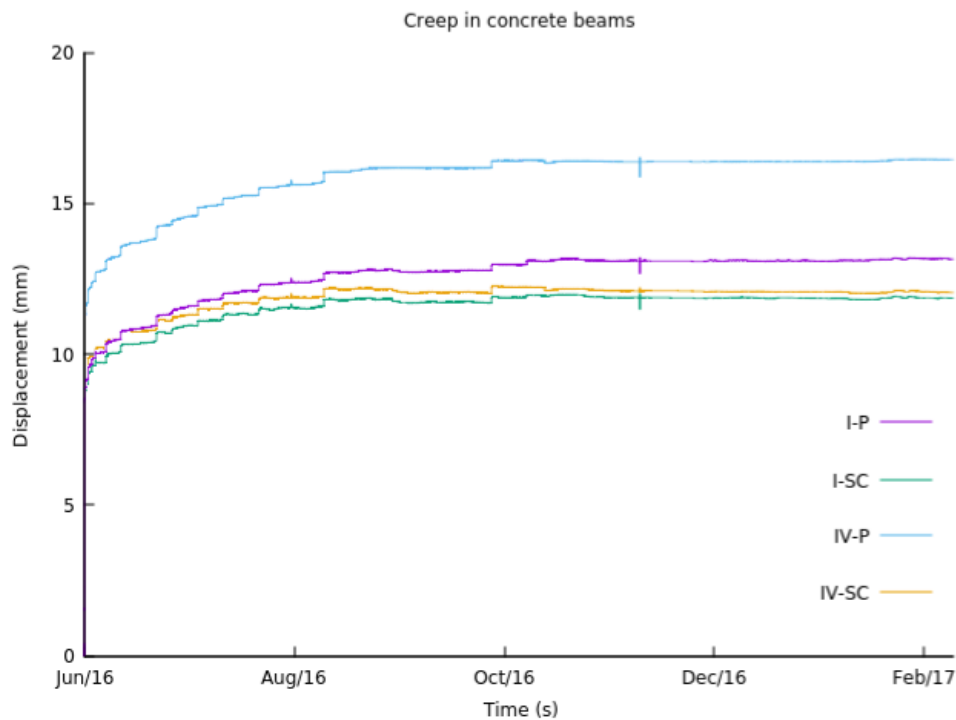


Figura 51. Evolución de la flecha en el centro de vano en el tiempo.

En las tablas 16 y 17 están definidos los valores teóricos de las deformaciones de las vigas, asumiendo 39 GPa de módulo de elasticidad para las vigas fabricadas con cemento del tipo I y 31 GPa para las fabricadas con IV. Los valores de deformación esperados después de seis meses eran de 12,9 mm para las fabricadas con cemento tipo I y 16,2 mm para las de tipo IV. En las vigas IP, ISC, e IVP, los valores experimentales y los teóricos son similares, demostrando la posibilidad de utilizar los métodos existentes para predecir el comportamiento de elementos estructurales fabricados con EAFS. La viga IVSC tiene un comportamiento fuera de lo esperado, mostrando una deformación menor que la teórica.

Días	0	1	3	7	14	30	60	90	120	180	210	240	270	360
Deformación instantánea	5,8													
ξ	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4
Deformación total	5,8	5,8	5,8	7,2	8,4	9,7	10,9	11,6	12,1	12,9	13,1	13,4	13,6	14,1

Tabla 16: Resultados teóricos de la flecha de las vigas con $E_c=39$ GPa.

Días	0	1	3	7	14	30	60	90	120	180	210	240	270	360
Deformación instantánea	7,2													
E	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4
Deformación total	7,2	7,2	7,2	9,0	10,6	12,2	13,8	14,7	15,3	16,2	16,5	16,8	17,1	17,7

Tabla 17: Resultados teóricos de la flecha de las vigas con $E_c=31$ GPa.

Después de fabricar y estudiar el rendimiento de vigas de hormigón armado bombeable y autocompactante con escoria de horno de arco eléctrico como árido a escala real, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones.

La fabricación de mezclas autocompactantes a escala real con EAFS como árido es posible. Durante la fabricación de estas no se observaron problemas durante el colado en lo que refiere a segregación del árido o fluidez a través del refuerzo.

Los resultados de los ensayos a flexión y de carga mantenida demuestran que su comportamiento estructural, tal y como se predecía con los datos analíticos, es razonablemente bueno, presentando en todos los casos un comportamiento estándar de las estructuras de hormigón armado ordinarios. De igual manera, se ha demostrado una gran correlación entre los resultados experimentales y teóricos.

No obstante, se debe realizar una investigación adicional para asegurar que el comportamiento de las vigas de hormigón armado que incorporan escoria de EAF se pueda predecir mediante las formulaciones existentes.

7. Conclusiones

Una vez hecho el estudio de las diferentes mezclas hidráulicas fabricadas con escoria de horno de arco eléctrico (EAFS) como sustituto del árido convencional se presentan las siguientes conclusiones:

- Interacción de la EAFS con diferentes tipos de cementos Portland estandarizados por la UE:

El uso de este tipo de escoria en mezclas con cemento Portland ha mostrado buenos resultados en lo referido a propiedades frescas y endurecidas del hormigón, sin observarse reacciones perjudiciales en el hormigón.

La adición de cenizas volantes en las mezclas fabricadas a partir de cemento Portland con EAFS ha mostrado un buen comportamiento, siendo la trabajabilidad similar a mezclas convencionales con este tipo de cemento, y con unas propiedades mecánicas buenas, sin que se hayan observado problemas en la durabilidad.

- Fabricación de hormigón con la trabajabilidad deseada:

Mediante el análisis y estudio del comportamiento reológico de las diferentes mezclas, se consigue demostrar la posibilidad de fabricar hormigones siderúrgicos con la trabajabilidad deseada.

Se demuestra que la utilización de EAFS como árido en mezclas bombeables es una solución viable, proporcionando buenos resultados de trabajabilidad, a escala de laboratorio y a escala real.

En cuanto a las mezclas autocompactantes con EAFS en la fracción gruesa, se han diseñado y fabricado mezclas estructurales autocompactantes con éxito, con un control cuidadoso de la fracción fina.

- Comportamiento mecánico y durabilidad de las mezclas hidráulicas con EAFS

La resistencia a la compresión de las mezclas con escoria de EAFS como árido ha mostrado resultados alentadores, como consecuencia de una estructura interna cohesiva, como se evidencia en los análisis de MIP. En general las mezclas con árido siderúrgico tienen una rigidez menor que las mezclas convencionales.

El aumento de densidad de las mezclas con EAFS era esperado. El aumento de la resistencia en muchos casos, gracias a la escoria, podría compensar esta mayor densidad.

En general, los hormigones que incorporan EAFS como árido muestran una durabilidad bastante buena, similar a los hormigones convencionales. Además, la resistencia a la corrosión de las barras de acero es mayor en estas mezclas.

- Comportamiento estructural de los elementos de hormigón armado (HA) con EAFS:

El análisis del comportamiento a flexión de vigas de HA con escoria de EAF ha mostrado el comportamiento típico esperado en vigas de HA ordinarias, que puede predecirse con las formulaciones existentes.

El ensayo de flexión a largo plazo realizado en vigas a escala real ha mostrado valores de fluencia similares a los valores predichos analíticamente.

Analizando las conclusiones generales, se puede afirmar que se han cumplido los objetivos de este trabajo de fin de máster, avanzando hacia la estandarización en el uso la escoria de horno de arco eléctrico como material granular en la fabricación de mezclas utilizadas en la construcción, demostrando la viabilidad de fabricación de elementos estructurales con este tipo de escoria.

8. Bibliografía

- [1] Gómez-Navarro, T., & Fernández-González, D. (2021). Economía circular y sostenibilidad: una revisión bibliográfica. *Revista de Estudios Empresariales*.
- [2] Quijano B., L., Diez-Silva, H. M., Montes G., M. I., & Castro S., H. F. (s. f.). Reciclaje de residuos siderúrgicos como proyecto de c. EAN.
- [3] World Steel Association. (s. f.). Annual Production - Steel Data. Recuperado de https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND
- [4] Villaverde, A. (2009). Procesos de obtención del acero y otros productos ferrosos. Recuperado de <http://adriantecnologia2.blogspot.com.es/2009/02/procesos-de-obtencion-del-acero-y-otros.html>
- [5] De la Fuente Alonso, J. A. (2015). Comportamiento del hormigón con áridos siderúrgicos (EAF) reforzado con fibras (Tesis doctoral). Universidad de Burgos.
- [6] Statista. (s. f.). Acero crudo: producción mundial 2021. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/600143/produccion-global-de-acero-crudo/>
- [7] World Steel Association. (s. f.). World Steel in Figures 2021. Recuperado de <https://worldsteel.org/world-steel-in-figures-2021/>
- [8] Larrea, A., & García, L. (s. f.). El comercio exterior de productos siderúrgicos: una visión de la industria y el comercio en España. *Revista Economía Industrial*, 406. Recuperado de <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/406/LARREA%20Y%20GARCIA.pdf>
- [9] Española: Perpe. (2012, 10 de septiembre). OC0612. Recuperado de <https://www.perpe.es/2012/09/10/oc0612/>
- [10] UNESID. (s. f.). Cifras clave. Recuperado de <https://unesid.org/cifras-clave/>
- [11] UNESID. (2013). IRIS 2013. Informe 2013 sobre el Reciclaje del acero en la Industria Siderúrgica Española. Madrid.
- [12] Portilla, M. G. (1988). Aspectos de la industrialización del País Vasco. *Ekonomiaz: Revista vasca de economía*, 173-188.
- [13] Instituto Nacional de Estadística. (2020). Cifras de la población a 1 de enero de 2020.
- [14] Mansó, M. (2001). "Fabricación de hormigón hidráulico con escorias de horno eléctrico de arco" (Tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos. Departamento de Ingeniería Civil. Burgos.

- [15] González Ortega, M. A. (2015). Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF (Tesis doctoral). Barcelona.
- [16] Cañas, J. (2012). Estudio del comportamiento de hormigones con áridos siderúrgicos de horno eléctrico (Tesis doctoral). Barcelona.
- [17] Lauber, M. (2009). Influencia de la calidad de los residuos metalúrgicos granulares utilizados como áridos en las propiedades del hormigón (Tesis doctoral). Barcelona.
- [18] Hernández, J. (2007). Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la escoria negra de acero de horno de arco eléctrico (Tesis doctoral). Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Departament d'Enginyeria de la Construcció. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [19] Amaral, L. (1999). Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental (Tesis doctoral). Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Departament d'Enginyeria de la Construcció. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- [20] Jones, N. C. (2001). The Successful use of EAF slag in Asphalt. En Proceedings of 2nd European Slag Conference. October 2000. Dusseldorf (pp. 111-121). ISSN 1617-5867. EUROSLAG Eds. Publication N° 1.
- [21] Murphy, J. N., Meadowcroft, T. R., & Barr, P. V. (1997). Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36, 315-331.
- [22] Etxeberria, M., Pacheco, C., Meneses, J. M., & Berridi, I. (2010). Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. *Construction and Building Materials*, 24, 1594-1600.
- [23] Manso, J. M., Hernández, D., Milagros Losáñez, M., & González, J. J. (2011). Design and elaboration on concrete mixtures using steelmaking slags. *ACI Materials Journal*, 108-M72, 673-681.
- [24] Dreux, G. (1981). *Guía Práctica del Hormigón* (1a. Ed.). Editores Técnicos Asociados, S. A.
- [25] Arribas García, I. (2011). Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad tecnológica (Tesis doctoral). Bilbao. Universidad del País Vasco.
- [26] Maslehuddin, M., Alfarabi, M., Sharif, M. S., Ibrahim, M., & Barry, M. S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 17, 105-112.

- [27] Polanco, J. A., Manso, J. M., Setién, J., & González, J. J. (2011). Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag. *ACI Materials Journal*, 108-M22, 196-203.
- [28] Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15.
- [29] De Schutter, G., Bartos, P. J. M., Domone, P., & Gibbs, J. (2008). *Self-Compacting Concrete*. Dunbeath, Caithness: Whittles Publishing.
- [30] Manso, J. C. (Ed.). (n.d.). Interfacial transition zone in concrete: State-of-the-art report prepared by RILEM Technical Committee 108-ICC, *Interfaces in Cementitious Composites (RILEM report; 11)*.
- [31] Ollivier, J. P., Maso, J. C., & Bourdette, B. (1995). Interfacial transition zone in concrete. *Advanced Cement Based Materials*, 2, 30-38.
- [32] Scrivener, K. L., & Nemat, K. M. (1996). The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, 35-40.
- [33] Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interface Science*, 12, 411-421.
- [34] Elsharief, A., Cohen, M. D., & Olek, J. (2003). Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Research*, 33, 1837-1849.
- [35] Monteiro, P., & Metha, P. K. (1996). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Publishing.
- [36] EFNARC. (2002). *Guidelines for self-compacting concrete*. London, UK: Association House.
- [37] Santamaría, A., Orbe, A., Losañez, M. M., Skaf, M., Ortega-Lopez, V., & González, J. J. (2017). Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate. *Materials Design*, 115, 179-193.