

# **ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA VIABILIDAD DEL USO DE ESCORIAS DE ACERÍA ELÉCTRICA EN HORMIGONES COMPACTADOS A RODILLO**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**MÁSTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS**

Bilbao, febrero 2018

**AUTORA: AINHOA LANDABEREA LORENZO**

**DIRECTOR: JOSÉ TOMÁS SAN JOSÉ LOMBERA**



## ÍNDICE

<i>Resumen</i> .....	7
<i>Abstract</i> .....	7
<i>Agradecimientos / Acknowledgements</i> .....	7
<i>Apéndice de siglas ordenadas alfabéticamente</i> .....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1. Aspectos generales .....	9
1.2. Objetivos y estructura del trabajo .....	10
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	10
2.1. Hormigón Compactado con Rodillo.....	10
2.1.1. Definición .....	10
2.1.2. Avance histórico .....	11
2.1.3. Componentes de la mezcla .....	11
2.1.4. Propiedades.....	15
2.1.5. Producción, transporte y puesta en obra .....	17
2.1.6. Aplicaciones.....	21
2.1.7. Ventajas frente al hormigón convencional .....	23
2.2. Escorias siderúrgicas.....	23
2.2.1. Introducción .....	23
2.2.2. Producción de acero y escorias.....	24
2.2.3. Tipos de escorias provenientes de la fabricación del acero .....	26
2.2.4. Características .....	29
2.2.5. Propiedades.....	30
2.3. Escorias de acero de Horno Eléctrico de Arco (EAFS y LFS) .....	31
2.3.1. Definición .....	31
2.3.2. Proceso de fabricación del acero y las escorias .....	32
2.3.3. Volumen de EAFS y LFS generadas.....	35
2.3.4. Composición química y mineralógica.....	36
2.3.5. Características y propiedades .....	38
2.3.6. Aplicaciones.....	39

3.	MATERIALES RECICLADOS UTILIZADOS EN MORTEROS Y HORMIGONES.....	42
4.	MATERIALES RECICLADOS UTILIZADOS RECIENTEMENTE EN LOS HCR .....	45
5.	HORMIGONES COMPACTADOS A RODILLO CON ESCORIAS DE ACERÍA ELÉCTRICA .....	47
5.1.	Pretratamiento de las escorias negras: estabilización volumétrica .....	47
5.2.	Dosificación de los HCR con escorias de acería eléctrica .....	48
5.2.1.	Diseño y proporción de la mezcla .....	48
5.2.2.	Mezclado de los componentes .....	50
5.3.	Propiedades de los HCR con EAFS y LFS .....	51
5.3.1.	Densidad y peso unitario.....	51
5.3.2.	Resistencia mecánica .....	51
5.3.3.	Rigidez .....	56
5.3.4.	Consistencia y trabajabilidad .....	57
5.3.5.	Contracción volumétrica .....	58
5.3.6.	Durabilidad .....	59
5.4.	Viabilidad del empleo de escorias de acería eléctrica en HCRs .....	60
6.	CONCLUSIONES .....	61
7.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS .....	62
8.	FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aspecto (Izda.) y consistencia (Dcha.) del HCR. ....	10
Figura 2. Comparación entre las dosificaciones utilizadas en HCR vs HC .....	14
Figura 3. Mezclador de flujo continuo. ....	17
Figura 4. Mezclador de tambor inclinable . ....	18
Figura 5. Mezclador de tránsito .....	18
Figura 6. Mezclador de doble eje .....	19
Figura 7. Colocación (izda.) y extendido (dcha.) del HCR.....	20
Figura 8. Compactación (izda.) y extendido emulsión curado (dcha.) del HCR .....	20
Figura 9. Alisado de la superficie del HCR .....	21
Figura 10. Puesta en obra de pavimentos de HCR.....	21
Figura 11. Puesta en obra de presas de HCR .....	22
Figura 12. Mapa de localización de la producción de acero en España .....	24
Figura 13. Progresión de la producción mundial de acero bruto desde 1950 hasta 2017.....	25
Figura 14. Producción de acero bruto en España en los últimos 10 años .....	25
Figura 15. Métodos de producción de acero en España y a nivel mundial. ....	26
Figura 16. Clasificación de las escorias siderúrgicas según su procedencia .....	27
Figura 17. Escorias de horno alto (BFS): granuladas, expandidas/peletizadas y enfriadas al aire (de izda. a dcha.) .....	28
Figura 18. Proceso de fabricación del acero y de las escorias generadas .....	28
Figura 19. Escorias de la fabricación del acero: BFS, LDS, EAFS y LFS (de izda. a dcha.). ....	29
Figura 20. Escorias de horno eléctrico de arco: EAFS (izda.) y LFS (dcha.) .....	32
Figura 21. Esquema y componentes de un HEA .....	33
Figura 22. Esquema de un Horno Cuchara .....	34
Figura 23. Proceso de fabricación del HEA.....	34
Figura 24. Representación esquemática del proceso de fabricación del acero en Horno Eléctrico de Arco y posterior refino en Horno Cuchara .....	35
Figura 25. Escorias de HEA: EAFS (izda.) y LFS (dcha.) .....	38
Figura 26. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como sustitución de los áridos naturales. De izda. a dcha.: cenizas volantes, RCD y NFU troceados.....	44

Figura 27. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como sustitución de los áridos naturales. De izda. a dcha.: cenizas de fondo, vidrio reciclado y EAFS.....	44
Figura 28. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como adición del cemento: lodos de depuradora de aguas residuales (izda.) y humo de sílice (dcha.).....	45
Figura 29. Relación típica de contenido de humedad-densidad establecida en el método de compactación del suelo.....	50
Figura 30. Representación esquemática (izda.) e imagen SEM (dcha.) de la interfase árido-pasta de cemento.....	52
Figura 31. Interfase árido natural-pasta de cemento VS interfase escoria EAF-pasta de cemento .....	53
Figura 32. Imagen de la interfase EAFS-pasta de cemento mediante SEM (aumento x1000)	53
Figura 33. Ensayo de resistencia a compresión .....	54
Figura 34. Ensayo de resistencia a flexión a cuatro puntos.....	55
Figura 35. Ensayo de resistencia a tracción indirecta .....	55
Figura 36. Procedimiento para realizar el ensayo del módulo de elasticidad del HCR .....	56
Figura 37. Consistómetro Vebe empleado para evaluar la consistencia de mezclas de HCR en estado fresco.....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cementos recomendados para aplicaciones estructurales .....	12
Tabla 2. Rangos compositivos típicos de escorias de hierro (arrabio) y acero.....	30
Tabla 3. Propiedades físicas de los áridos siderúrgicos vs áridos naturales .....	31
Tabla 4. Volumen de escorias negras y blancas generadas en España en el año 2017.....	35
Tabla 5. Composición química de las EAFS .....	36
Tabla 6. Composición mineralógica de las EAFS.....	36
Tabla 7. Composición química de las LFS.....	37
Tabla 8. Composición mineralógica de las LFS.....	37
Tabla 9. Propiedades físico-mecánicas de las EAFS y LFS .....	39

## **Resumen**

El impacto ambiental generado por la actividad humana ha conducido a la búsqueda de la sostenibilidad a nivel global. Sectores, como la industria del cemento y del hormigón, consumen grandes cantidades de materias primas, además de generar altos impactos ambientales en el planeta. Con lo que sustituir dichas materias por subproductos de otras industrias, como la industria del acero, ayudaría a preservar los recursos naturales, disminuir la contaminación y reducir la demanda en vertederos, impulsando así la sostenibilidad.

En este sentido, se estudia la reutilización de las escorias de acería eléctrica (EAFS + LFS) en hormigones compactados a rodillo, desde el punto de vista del comportamiento mecánico y la durabilidad. Ambas escorias, y en especial la escoria EAF, muestran un amplio potencial de utilización en esta aplicación. Se requieren estudios adicionales que corroboren este asunto.

## **Abstract**

The environmental impact due to human activity has led to the search for global sustainability. Sectors, such as the cement and concrete industry, consume large quantities of raw materials, in addition to generating high environmental impacts on the planet. Therefore, replacing these materials with by-products from other industries, such as the steelmaking industry, would help to preserve natural resources, reduce pollution and reduce landfills, thus promoting sustainability.

In this sense, the reuse of electric steel slag (EAFS + LFS) in roller compacted concretes is studied, from the point of view of mechanical behaviour and durability. Both slags, and especially the EAF slag, show a wide potential for use in this application. Additional studies are needed to asses this key point.

## **Agradecimientos / Acknowledgements**

El presente trabajo de investigación ha sido parcialmente financiado con fondos provenientes del MINECO y FEDER (contrato “BlueCons” BIA2014-55576-C2-2-R) y del **Grupo Consolidado del Gobierno Vasco (IT781-13: <https://www.ehu.eus/es/web/scm/home>)**.

Present research work was partially financed through Spanish Ministry MINECO and FEDER funds (contract “BlueCons” BIA2014-55576-C2-2-R) and by the Basque Government Consolidated Research Group (IT781-13: <https://www.ehu.eus/en/web/scm/home>).

### ***Apéndice de siglas ordenadas alfabéticamente***

a/c	Relación agua/cemento
AODS	Argon Oxygen Decarburization Slag (Escoria de Descarburación con O <sub>2</sub> y Ar o de AOD)
BFS	Blast Furnace Slag (Escoria de Horno Alto)
BOF	Basic Oxygen Furnace (Convertidor Básico de Oxígeno o Convertidor LD)
CCP	Convencional Concrete Pavements
C-S-H	Silicato Cálcico Hidratado
DSC	Differential Scanning Calorimetry (Calorimetría Diferencial de Barrido)
DTA	Differential Thermal Analysis (Análisis Térmico Diferencial)
EAFS	Electric Arc Furnace Slag (Escoria de Horno Eléctrico de Arco, o negra)
HAC	Hormigón Autocompactante
HAR	Hormigón de Alta Resistencia
HC	Hormigón Convencional
HCR	Hormigón Compactado con Rodillo
HEA	Horno Eléctrico de Arco
ITZ	Interfacial Transition Zone (Zona de Transición Interfacial)
LDS	Linz-Donawitz process Slag (Escoria del proceso LD/Linz-Donawitz)
LFS	Ladle Furnace Slag (Escoria de Horno Cuchara, o blanca)
NFU	Neumáticos Fuera de Uso
RCC	Roller Compacted Concrete
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEM	Scanning Electron Microscopy (Microscopía Electrónica de Barrido)
TGA	Thermogravimetric Analysis (Análisis Termogravimétrico)
XRD	X-ray diffraction (Difracción de rayos X)

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Aspectos generales

Desde sus inicios la especie humana ha explotado los diversos recursos que la naturaleza ha puesto a su alcance, sin apenas causar efectos a su alrededor. Sin embargo, a partir del siglo XX el constante desarrollo socioeconómico y los avances tecnológicos e industriales han dado lugar a una economía basada en el consumo y la cultura del “usar y tirar” que generan impactos cada vez mayores en el medio ambiente [1].

La generación de residuos es uno de los retos ambientales más complejos al que se enfrentan las sociedades modernas. El incremento en la producción de residuos a escala global es continuo. Por esta razón, es necesario llevar a cabo su correcta gestión a fin de evitar impactos negativos en el planeta y poder conservar los recursos naturales, reducir el consumo energético y disminuir las emisiones contaminantes y la demanda de vertederos.

La valorización de residuos, que consiste en su utilización como sustitutivo de otros productos en un proceso productivo, es una de las posibles soluciones para lograr los objetivos mencionados. Según datos de EUROSTAT, el 61% de los residuos generados en España se destinan a valorización, mientras que el 37% termina en vertederos. Si bien es cierto que el volumen de residuos producidos en nuestro país ha decaído en los últimos años, el sector de la construcción (a veces denominado hipersector, por su transversalidad) sigue siendo uno de sus mayores productores [2].

Este sector es considerado mundialmente como una de las principales fuentes de contaminación ambiental, ya que consume una gran cantidad de recursos naturales. Recursos no renovables para la extracción de materias primas. Sector que, además, genera un volumen de residuos (RCDs, de construcción y demolición, por ejemplo) inasumible para el medioambiente. Todo ello, sumado al alto consumo de energía requerido, así como de sus consecuentes emisiones (gaseosas y polvo). Por este motivo, es fundamental proceder al desarrollo de métodos de aprovechamiento de residuos, al objeto de progresar hacia una construcción más sostenible y entornos alineados con los conceptos de la llamada *economía circular* [3].

La industria siderúrgica, asimismo, produce un número considerable de residuos (subproductos) procedentes de su proceso de obtención y fabricación de materiales. Y que, entre otros (refractarios, electrodos, etc.), los más numerosos son las llamadas “escorias siderúrgicas”. Un modo de darle uso a estos residuos, y evitar así mayores impactos ambientales, se basa en reutilizarlos como áridos para la fabricación de hormigones, desde luego, más sostenibles en todos sus planos: ambiental, económico, social y funcional [3 - 5].

## 1.2. Objetivos y estructura del trabajo

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica de las escorias siderúrgicas, provenientes del horno eléctrico de arco, para la fabricación de hormigones compactados con rodillo. Todo ello con el fin de dar uso a este subproducto en aplicaciones convencionales y reducir así la sobreexplotación de recursos naturales. En este contexto se realiza una exhaustiva búsqueda bibliográfica, la cual se presenta mediante el consiguiente estado del conocimiento sobre la dualidad de: procedencia, características, propiedades y aplicaciones de los hormigones compactados a rodillo sumado a, en pura lógica, el estado de la cuestión sobre las escorias de acería eléctrica. Adicionalmente, se discute sobre el comportamiento mecánico y la durabilidad de este hormigón con escorias, y finalmente se discute sobre la viabilidad del empleo de estas escorias en hormigones compactados a rodillo.

## 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

A continuación, se describen conceptos generales, pero necesarios, sobre los hormigones compactados con rodillo y las escorias de acería eléctrica.

### 2.1. Hormigón Compactado con Rodillo

#### 2.1.1. Definición

El Hormigón Compactado con Rodillo, o HCR, se define como “un hormigón de consistencia seca y asiento nulo, que se coloca de forma continua y se consolida mediante un rodillo vibrante” [6]. Este hormigón consiste en una mezcla de muy baja fluidez formada por áridos gruesos y arena, cemento con otros agregados suplementarios (como cenizas volantes, escorias y humo de sílice), aditivos y agua [7]. El HCR difiere del convencional (hormigón de cemento Portland colocado con medios tradicionales) tanto en la dosificación de los componentes como en la consistencia y en el procedimiento de aplicación. En la imagen siguiente se puede apreciar como el hormigón no sufre ningún asiento en su cono de Abrams.



Figura 1. Aspecto (Izda.) y consistencia (Dcha.) del HCR [7].

La necesidad de un material de bajo costo y alto volumen condujo a su desarrollo [8].

### 2.1.2. Avance histórico

El hoy llamado Hormigón Compactado con Rodillo comenzó a utilizarse a finales de los años 40 en el Reino Unido como sub-base de firmes de carretera y pavimentos en aeropuertos, conocido con el nombre de “hormigón pobre” [9]. Años más tarde comenzó a plantearse el uso del HCR para otras aplicaciones, como se explica a continuación.

En la década de los 50 se perfeccionaron los equipos de puesta en obra, siendo éstos capaces de mover grandes volúmenes de material, lo que provocó un descenso en la construcción de presas de hormigón convencional (HC), para dar lugar a presas de materiales sueltos. Éstas presas ofrecían claras ventajas económicas frente a las de HC. Sin embargo, las presas de materiales sueltos presentaban una alta probabilidad de fallo debido al sobrepeso por crecidas o erosión interna. De modo que en los años 60 comenzó a plantearse la necesidad de desarrollar un nuevo tipo de presas que combinara la fiabilidad de las presas de HC con la eficiencia de los métodos de construcción de las presas de materiales sueltos. Lo que dio lugar al HCR, material de aplicación más rápida, seguro y económico [6].

El primer HCR utilizado en la construcción de presas fue en la presa de Shihmen en Taiwan, en 1960. Entre los años 1961 y 1964 se construyó la presa Alpe Gera en Italia. Este suceso supuso el nacimiento de un nuevo método de construcción para presas de hormigones, lo que dio lugar a posteriores construcciones, como son la presa de Manicouagan en Canadá y la presa de Tarbela en Pakistán, entre otras [6 - 9].

Durante la década de los 70 se hicieron numerosos estudios y ensayos para llegar a conocer con mayor exactitud el comportamiento y las propiedades que exhibía este hormigón [6 - 9]. En esa misma época comenzaron a construirse pavimentos para uso militar e industrial, y años más tarde esta tecnología se expandió a muchas otras aplicaciones viales, como carriles bici, calzadas nuevas, estacionamientos comerciales y caminos peatonales, entre otras [10].

Hoy en día el HCR también se utiliza en trabajos de reparación y rehabilitación de obra civil [11].

### 2.1.3. Componentes de la mezcla

El HCR se compone de los mismos constituyentes que el HC (cemento con adiciones, agua, áridos gruesos y finos y aditivos) pero adicionados en diferente proporción (ver Figura 2). Los HCR tienen, aproximadamente, un 40% menos de agua y un 30% menos de pasta cementante (en volumen) con respecto a los HC.

◦ **Cemento:**

El contenido de cemento de una mezcla típica de HCR es aproximadamente el 11-13% del peso total de los materiales secos, porcentaje algo menor que el utilizado en HCs [12].

Un volumen excesivo de cemento puede inducir un mayor agrietamiento por contracción y aumentar significativamente los costos de producción, sin necesariamente mejorar la resistencia mecánica o extender la vida útil del hormigón. Por el contrario, un bajo contenido de cemento puede no ser suficiente para que la pasta rellene y colmate todos los espacios y el hormigón puede estar sujeto a segregación debido a la baja consistencia [12].

Los cementos más apropiados para la fabricación del HCR pueden ser el cemento Portland, el cemento puzolánico, o una mezcla de ambos con cenizas volantes u otro material puzolánico [6, 9]. Estos cementos permiten una mayor trabajabilidad, impermeabilidad, bajo calor de hidratación y resistencia final.

Según el Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16), los cementos recomendados para la fabricación del HCR, según la aplicación, son los mostrados en la Tabla 1:

*Tabla 1. Cementos recomendados para aplicaciones estructurales [13].*

<b>Aplicación</b>	<b>Cementos recomendados</b>
Construcción de presas de HCR	Cementos comunes de los tipos CEM III, CEM IV y CEM V.
	Cementos para usos especiales ESP VI-1.
	Cementos especiales de muy bajo calor de hidratación VLH III, VLH IV y VLH V.
	Cementos de escoria de horno alto de baja resistencia inicial (L).
Firmes de carreteras, puertos y aeropuertos de HCR	Cementos comunes de los tipos CEM II/B, CEM III, CEM IV y CEM V excepto los tipos CEM II/B-Q, CEM II/B-W y CEM II/B-T.
	Cemento para usos especiales ESP VI-1.
	Cementos de escoria de horno alto de baja resistencia inicial (L).

◦ **Agua:**

El contenido de humedad en la mezcla debe ser tal que la mezcla esté lo suficientemente seca como para soportar el peso de un rodillo vibratorio, pero, por otro lado, lo suficientemente húmeda para asegurar una distribución uniforme de la pasta de cemento [8]. La falta de agua aumenta el riesgo de segregación y, por contra, el exceso dificulta el aprovechamiento total de la energía de compactación.

El porcentaje óptimo de agua oscila entre el 10 y el 14% del peso seco de los materiales.

La calidad del agua para HCR se rige por los mismos requisitos que para el HC [11].

◦ *Áridos:*

Los áridos constituyen aproximadamente el 75-85% del volumen del HCR, siendo el 40-45% áridos gruesos y el 35-40% áridos finos. Pueden emplearse áridos de origen natural (cantos rodados) o de machaqueo (piedras trituradas) [6]. Son preferibles los áridos triturados ya que sus bordes angulosos logran entrelazarse (trabarse) unos con otros, lo que disminuye la cantidad de huecos y, por lo tanto, sirve de ayuda para reducir la segregación y proporcionar mayores resistencias [8].

Estos áridos influyen directamente en el logro de las propiedades deseadas, incluida la trabajabilidad, la densidad específica, las resistencias a compresión y flexión, el módulo de elasticidad, las propiedades térmicas, la durabilidad y el rendimiento a largo plazo.

Para lograr un hormigón denso y de asiento nulo es necesario una granulometría continua, por lo que se emplean áridos de diversos tamaños, siendo el contenido de áridos finos mayor que en el HC. De esta manera la fracción fina ocupa los huecos existentes entre los áridos gruesos, minimizando el contenido de aire ocluido en la masa.

Para su uso en pavimentos es recomendable limitar el tamaño máximo del árido a 20 mm a fin de evitar la segregación, segregación producida al verter y extender el material, de modo que se obtenga un buen acabado superficial. Por otro lado, referido a otras aplicaciones, como la construcción de presas, el tamaño máximo de árido se limita a unos 75 mm. Dichos tamaños facilitan el mezclado durante la fabricación del hormigón [11].

◦ *Adiciones:*

Las adiciones que suelen emplearse en los HCR en sustitución parcial del cemento (1-3% peso en seco) son las cenizas volantes, escorias de horno alto, humo de sílice y puzolana natural [8, 11, 12]. Éstas se usan para proporcionar material fino adicional a la mezcla, así como para asegurar una compactación adecuada, además de aumentar la trabajabilidad.

Las adiciones ocupan el espacio que de otra manera sería ocupado por cemento puro o agua. Colmatar dicho espacio con agua causaría una reducción de resistencia y rellenarlo con cemento puro provocaría problemas derivados del calor de hidratación, además de encarecer la obra [9].

◦ *Aditivos:*

Generalmente se trata de evitar su uso. En algunos casos se emplean aditivos aireantes para mejorar la resistencia al hielo-deshielo, la impermeabilidad, la manejabilidad y la durabilidad del hormigón. En otros casos se utilizan retardadores de fraguado, en cuyo caso la incorporación debe realizarse junto con el agua en su vertido a hormigonera. O, por otro lado, aditivos plastificantes para reducir el contenido de agua, lo que ayuda a la compactación y, por consiguiente, al aumento de la resistencia del hormigón [6, 8, 11, 14].

En ciertas ocasiones se utilizan acelerantes de fraguado cuando la apertura temprana al tráfico es motivo de preocupación o, en otras ocasiones, aditivos fluidificantes al mezclar o transportar el HCR en mezcladoras de tránsito (ver apartado 2.1.5.). Debido a que las mezclas de HCR son muy secas, los aditivos deben agregarse en mayores cantidades que en el HC para que sean efectivos [12].

En la Figura 2 se comparan las dosificaciones de las mezclas de los HCR con las de los HC.

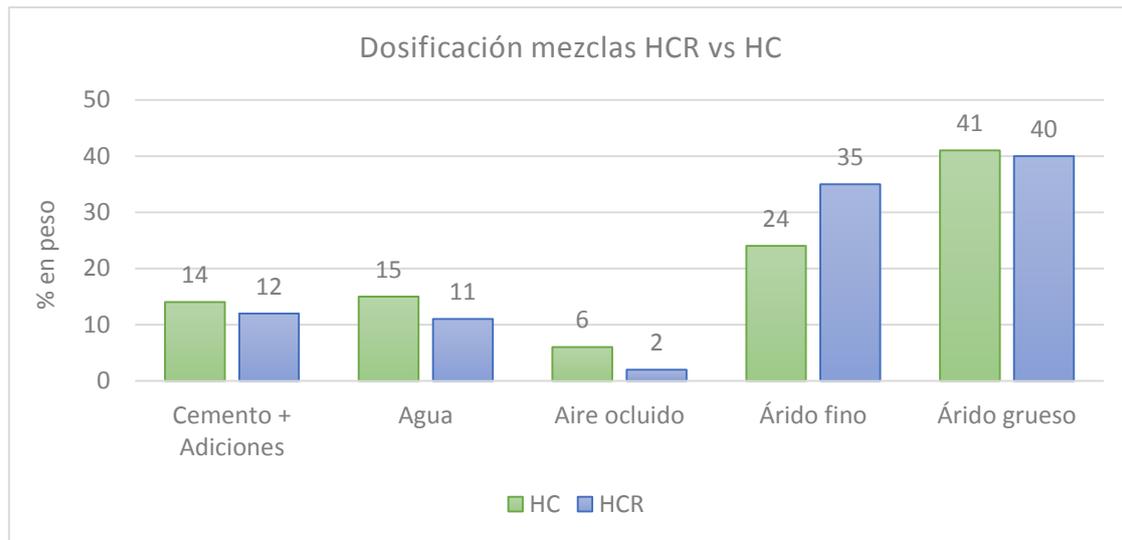


Figura 2. Comparación entre las dosificaciones utilizadas en HCR vs HC [12, 15].

Como bien es cierto, la tecnología del hormigón no es una ciencia exacta, por lo que el porcentaje de los constituyentes mencionado es aproximado. Deberá adecuarse a cada amasada.

En comparación con los HC, las mezclas de HCR tienen:

- Menor contenido de cemento, agua y aire ocluido. Es posible usar aditivos para aumentar la trabajabilidad y controlar el tiempo establecido.
- Mayor contenido de áridos finos, lo que da lugar a una masa más densa y resistente.
- Mayor diversidad de tamaños de áridos, que faciliten granulometrías continuas.
- Áridos de menor tamaño.
- Árido grueso de tamaño máximo más pequeño.
- Mayor densidad.

La mezcla obtenida debe permitir la consolidación bajo rodillos mientras mantiene su forma, sin segregarse [11].

#### 2.1.4. Propiedades

Las propiedades del HCR dependen en gran medida de las proporciones de la mezcla y de la calidad de la compactación. Las propiedades que son significativas en los HC lo son también en los HCR. Las diferencias entre ambos hormigones son debidas a las distintas proporciones de las mezclas.

El HCR es un hormigón con baja relación  $a/c$ , lo que permite minimizar las fisuras por retracción y, por lo tanto, aumentar su durabilidad. Además, es transitable a pie inmediatamente después de ser compactado. Es un hormigón en masa, por lo que evita los problemas de corrosión de armaduras y presenta altas resistencias a compresión [16].

El HCR en estado endurecido alcanza una resistencia, impermeabilidad, densidad y durabilidad comparables a las del HC [6, 8].

Seguidamente, se describen más detalladamente algunas propiedades que presentan los HCR [14, 16].

- *Resistencia mecánica:*

La resistencia mecánica (a compresión) de los HCR consolidados depende principalmente de la relación  $a/c$ . Incluso con cantidades de agua menores que en los HC, este componente siempre es suficiente para asegurar una hidratación continuada del HCR, lo que garantiza una ganancia de resistencia. Por otro lado, el cemento y las adiciones también contribuyen al desarrollo de la resistencia mecánica, tanto a corto como a largo plazo. El riesgo de pérdida de resistencia debido a la variación en el contenido de agua se puede reducir aumentando la cantidad de cemento.

El HCR presenta altas resistencias para soportar cargas pesadas.

- *Propiedades elásticas:*

Los principales factores que afectan a las propiedades elásticas del hormigón son la edad, el tipo de árido y la calidad de la pasta (relación  $a/c$ ).

El módulo elástico (o de deformación longitudinal en compresión) del hormigón aumenta con la edad y con el contenido de cemento. Además, ciertos tipos de áridos le confieren cierta fragilidad, lo que implica altos valores de módulo elástico. Asimismo, una cantidad elevada de huecos, que simboliza un volumen de pasta insuficiente, afectará negativamente al módulo elástico.

Al aumentar la proporción de áridos en el HCR (lo que supone un aumento en la densidad) aumenta ligeramente su módulo de elasticidad, con respecto al del HC.

◦ *Consistencia:*

La consistencia es la capacidad que tiene el hormigón fresco para deformarse (escurrirse o extenderse) y, como consecuencia de esta propiedad, de ocupar todos los huecos del encofrado o molde donde se vierte. Es una de las principales propiedades para el control de la calidad del HCR durante su construcción.

La cantidad de agua de amasado, el contenido de cemento, el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y su granulometría son factores que influyen en la consistencia del hormigón, cuestión bien conocida ya en la tecnología del hormigón.

El HCR se trata de una pasta de consistencia seca que no sufre asentamiento alguno tras su colocación.

Es importante que las mezclas de HCR tengan una consistencia adecuada. Si son demasiado húmedas, el hormigón se desintegrará durante la colocación o compactación. En cambio, si son demasiado rígidas o secas, es posible que no se adquiera la densidad máxima y, por lo tanto, se requiera una energía de compactación adicional.

◦ *Capacidad de deformación:*

Las deformaciones en el hormigón pueden ser provocadas por reducciones de volumen motivadas por secado y contracción consecuente o por enfriamiento del hormigón.

La capacidad de deformación del HCR no debería diferir de la del HC con el mismo contenido de material cementante. Sin embargo, en ciertos casos resulta ser mayor ya que, usualmente, dicho hormigón se confecciona con cementos de elevado contenido de puzolana natural o artificial.

◦ *Durabilidad:*

La durabilidad de estos hormigones se estima por su resistencia a la meteorización (ciclos de hielo-deshielo), al ataque químico y al desgaste o erosión (caso de la lixiviación de las pastas en presas, expuestas al agua líquida durante años).

La resistencia a la meteorización depende principalmente de la resistencia que tienen los áridos y el aire ocluido a las heladas. El HCR, al tener poco contenido de aire (2 - 3%), resiste el daño provocado por los ciclos de congelación-descongelación, siempre y cuando los áridos sean seleccionados para garantizar una alta durabilidad. La resistencia al desgaste, en cambio, se mejora con el empleo de áridos de tamaño más pequeño.

Cumpliendo estos factores el HCR será altamente durable a largo plazo.

◦ *Permeabilidad:*

La permeabilidad de una masa de hormigón depende primordialmente del aire atrapado en los huecos. El HCR al ser más denso y tener menos volumen de huecos que el HC, es tanto o más impermeable que éste.

2.1.5. Producción, transporte y puesta en obra

El método de construcción es muy similar a la construcción de pavimentos asfálticos. El HCR se coloca en capas de 0,30 m de espesor a lo largo de toda la extensión del lugar de colocación. Las etapas constructivas del HCR son las que se detallan a continuación.

◦ *Producción*

El HCR puede fabricarse en cualquier tipo de equipo que proporcione una mezcla uniforme de los componentes. La elección dependerá principalmente del tamaño y naturaleza del proyecto a realizar. Generalmente se fabrica en las mismas plantas de producción empleadas para los HC. Los tipos de equipos de mezclado utilizados en la fabricación de HCR son los siguientes [10, 15, 17]:

- **Mezcladoras de flujo continuo (“Continuous Flow Mixers”).** Estas mezcladoras de doble eje están formadas por cámaras de mezclado (llamadas “pugmills”) y plantas de mezclado de eje horizontal y se emplean para los proyectos de HCR más grandes, pudiendo llegar a producir desde 300 a 800 toneladas-hora. En una planta de flujo continuo los elementos se introducen continuamente en la mezcladora a la misma velocidad con la que se descarga el hormigón, siendo el tiempo de mezclado de 10 a 30 segundos. Debido a la facilidad de transporte, configuración rápida y altas tasas de producción, estas plantas comúnmente se instalan in-situ en el tajo de construcción.



Figura 3. Mezclador de flujo continuo [17].

- **Mezcladoras de tambor inclinable (“Tilt-Drum Mixer”).** Son el tipo de mezcladora más común. Estas mezcladoras proporcionan disponibilidad local junto con capacidades de producción rápidas, lo que las hace adecuadas para la mayoría de los proyectos de HCR.



Figura 4. Mezclador de tambor inclinable [17].

- **Mezcladoras de tránsito (“Transit Mixers”).** La baja velocidad de la mezcla y el proceso de descarga en 2 pasos hacen que este equipo esté diseñado para la producción de hormigón en una escala menor. El equipo dispone de una rampa o área elevada para facilitar el proceso de descarga.



Figura 5. Mezclador de tránsito [17].

- **Inserto de mezclador de doble eje (“Twin-Shaft Mixer Insert”).** Este equipo de tipo discontinuo está diseñado para convertir cualquier planta de lote seco existente en una planta central de mezcla y HCR. Es fácilmente transportable y puede insertarse fácilmente en una planta existente. La capacidad de producción de estas plantas es alrededor de 200 toneladas-hora, pero puede llegar a ser más alta dependiendo de la velocidad de la planta. Proporciona un mezclado intenso y rápido, convirtiéndola en la mejor opción para proyectos grandes y de alta producción.



Figura 6. Mezclador de doble eje [17].

El tiempo de mezclado necesario para el HCR dependerá del tamaño del lote, la gradación de la mezcla, la relación a/c y el tipo de equipo de mezclado utilizado [17].

◦ *Transporte*

La mezcla se transporta desde la planta hasta la obra con equipos para movimientos de tierra, usualmente camiones volquete. Deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos al transportar HCR:

- Los camiones volquete deben limpiarse con frecuencia, ya que de otra manera el HCR podría adherirse al cuerpo del tambor y causar problemas durante la descarga. Además, dicho tambor debe limpiarse después de cada entrega para asegurarse de que el hormigón más viejo, y por tanto potencialmente seco, no termine en la siguiente carga del camión.
- El HCR debe cubrirse con lonas para evitar la pérdida excesiva de humedad, a fin de evitar problemas de colocación y compactación.
- La mezcla debe mantenerse ligeramente por encima del contenido de humedad óptimo para compensar la pérdida de agua durante el transporte.

La trabajabilidad del HCR en estado fresco disminuye con el tiempo, por lo que el tiempo máximo de transporte debe ser de 45 minutos, lapso que debe reducirse en caso de que la temperatura ambiente durante el transporte sea igual o mayor a 27 °C [17].

◦ *Puesta en obra: colocación y compactación*

La puesta en obra del HCR se trata de una secuencia continua. Tras vaciar la mezcla del camión volquete en el lugar requerido, ésta se extiende y se compacta con equipos de pavimentación, cuya elección dependerá de la aplicación. El orden de intervención de los equipos es el siguiente [7 - 20]:

- La mezcla se extiende a lo largo de toda la extensión del lugar de colocación mediante buldóceres, motoniveladoras o incluso pavimentadoras convencionales hasta lograr un espesor de unos 0,33 m.
- Se compacta inmediatamente después de la colocación mediante rodillos vibratorios hasta lograr una capa de 0,30 m de espesor.
- Tras realizar la compactación, automáticamente después se realiza el curado para evitar las pérdidas de humedad, y así lograr la hidratación del cemento. El riego se realiza con una emulsión asfáltica no ácida para no atacar al cemento.
- Finalmente, y solo en caso de ser necesario, se pule la superficie mediante una rectificadora para eliminar las marcas de los rodillos y mejorar su acabado.



Figura 7. Colocación (izda.) y extendido (dcha.) del HCR [21].



Figura 8. Compactación (izda.) y extendido emulsión curado (dcha.) del HCR [21].



Figura 9. Alisado de la superficie del HCR [17].

### 2.1.6. Aplicaciones

Las dos grandes aplicaciones en las que se utiliza el HCR son los pavimentos y las presas [8,11].

#### ◦ *Pavimentos*

Los pavimentos de HCR se construyen cuando es necesaria una superficie fuerte, dura y resistente que pueda manejar el tráfico de baja velocidad.

El hormigón se coloca y se extiende mediante una pavimentadora convencional, similar a las utilizadas en pavimentos asfálticos, y se compacta con rodillos vibratorios (ver Figura 10). A diferencia del asfalto, el HCR se coloca y compacta en una sola pasada. Además, es mucho más resistente y duradero que el asfalto, pudiendo colocarse en menores espesores para lograr la capacidad de carga deseada. El HCR utilizado para pavimentos no requiere de acabados especiales ya que su superficie rugosa favorece la adherencia de los vehículos que circulan por él.



Figura 10. Puesta en obra de pavimentos de HCR [21].

Las mezclas de HCR para pavimentos contienen, aproximadamente, tres veces más conglomerante que las mezclas de HCR para las presas, pero menos que las mezclas de HC.

La reducción de mano de obra y espesor, combinada con la rapidez de construcción y el costo competitivo del material inicial en comparación con el asfalto, hace que el HCR sea extremadamente rentable.

- *Presas*

El HCR tiene tres propiedades clave que lo hacen especialmente adecuado para la construcción de presas: economía, rendimiento y construcción a alta velocidad.

Las presas de HCR se construyen elevación por elevación, en capas horizontales sucesivas, de manera que la pendiente corriente abajo se asemeje a una escalera de hormigón (ver Figura 11). La mezcla se transporta con camiones volquete hasta el lugar requerido, se extiende con buldócer o pavimentadoras y se compacta con rodillos vibratorios.

El HCR se puede usar para construir presas nuevas o bien para reparar las antiguas. En el caso de las presas de materiales sueltos, el HCR actúa como un blindaje para protegerlas de la erosión de los flujos de agua a alta velocidad. Además, las antiguas presas de hormigón y mampostería se pueden reforzar con HCR para aumentar la resistencia a la carga sísmica y mejorar la estabilidad a fin de evitar el vuelco y el deslizamiento.

Si bien es cierto que el HCR es más económico para la construcción de grandes presas, éste se usa cada vez más en la construcción de pequeñas presas para el suministro de agua y el control de inundaciones.



*Figura 11. Puesta en obra de presas de HCR [21].*

- *Otras aplicaciones*

El HCR se emplea además en trabajos de reparación y rehabilitación, como la reparación de superficies ya construidas con el fin de dotarlas de una mayor durabilidad, la protección de terraplenes durante el desbordamiento y la construcción de contrafuertes con el fin de fortalecer las presas pesadas [11].

### 2.1.7. Ventajas frente al hormigón convencional

El HCR presenta los siguientes beneficios en comparación con el HC [8, 11, 19]:

- Hormigón de bajo coste, alto rendimiento y de fácil construcción.
- Alta velocidad de construcción. Dependiendo del grosor y ancho deseado, puede colocarse muy rápido, de 60 a 120 metros/hora.
- No requiere de vibración interna para consolidarse.
- La mezcla es tan rígida que el rodillo vibratorio puede comenzar a compactar inmediatamente después de la pavimentadora.
- No precisa de moldes laterales para su contención, ya que su propia consistencia inicial lo mantiene conformado adecuadamente.
- No sufre asentamiento tras su colocación, debido a su alta capacidad de compactación, lo que permite que sea transitable inmediatamente después de realizar la puesta en obra.
- Debido al bajo contenido de agua y a la baja relación a/c, el HCR tiene resistencias similares o mayores que el HC, siendo el consumo de cemento menor.
- No requiere de acabado superficial, juntas o refuerzo con armaduras de acero.
- Su aspecto superficial es rugoso, lo que beneficia la adherencia de la circulación.
- Los pavimentos HCR se pueden construir más rápidamente y con mano de obra y equipo mínimos, lo que permite la finalización rápida de pavimentos.

## 2.2. Escorias siderúrgicas

### 2.2.1. Introducción

La industria siderúrgica se encarga del proceso de transformación del hierro, acero y fundiciones a partir de minerales naturales y/o reciclados metálicos (chatarras).

El acero es una de las aleaciones metálicas más importantes y más empleadas en el sector de la ingeniería debido, principalmente, a sus prestaciones y la gran cantidad de materia prima existente en la corteza terrestre [22]. Sin embargo, dada la elevada tecnología precisa para su fabricación, muchos países no son capaces de alcanzar determinadas calidades, lo que lo convierte en un material de cierto carácter estratégico [23].

Actualmente en España hay implantadas 22 acerías, una de las cuales es de Siderurgia Integral y las 21 restantes son de arco eléctrico (Ver Figura 12). Además, se disponen de 50 instalaciones de laminación y primera transformación [24].



Figura 12. Mapa de localización de la producción de acero en España [25].

Como se aprecia en la Figura 12, la mayoría de las plantas de producción de acero se sitúan en la cornisa cantábrica, principalmente en Asturias, Cantabria y País Vasco, siendo este último el mayor productor de acero de horno eléctrico [24].

Durante los procesos de transformación se generan diferentes tipos de residuos que, por orden de importancia, en cuanto a volumen, son: escorias, polvos de acería, refractarios, arenas de función y cascarillas de laminación [26].

### 2.2.2. Producción de acero y escorias

A comienzos del siglo XX la producción mundial de acero fue de unos 28 millones de toneladas, cifra que se incrementó a lo largo de los años (ver Figura 13). En el año 2001 la producción ascendió hasta los 851 millones de toneladas, prácticamente duplicada en la actualidad [25].

La producción mundial de acero bruto en el año 2017 fue de 1692 millones de toneladas, siendo casi el 50% de dicha cantidad fabricada en China [27].

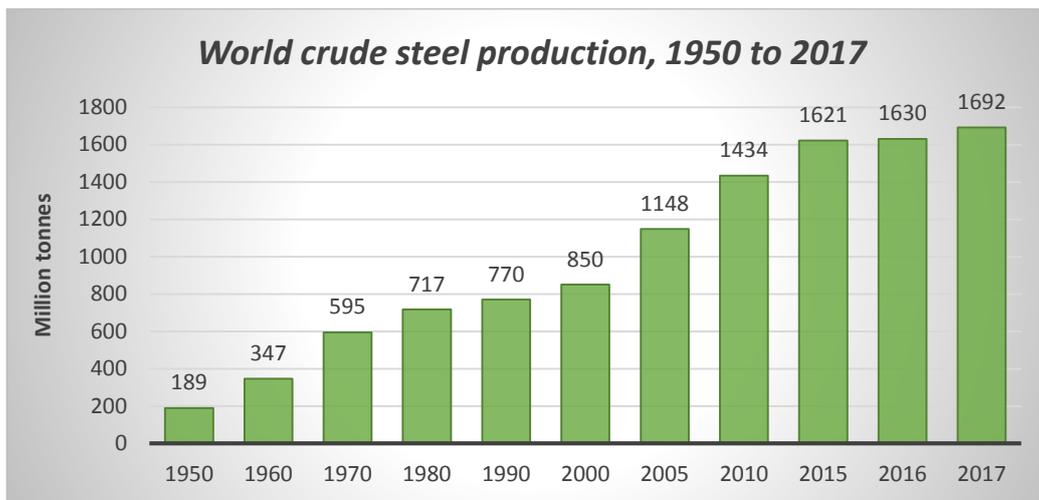


Figura 13. Progresión de la producción mundial de acero bruto desde 1950 hasta 2017 [27-29].

La producción de acero en España se ha ido incrementando a lo largo de los años, llegando a fabricarse 19,0 millones de toneladas en 2007. Sin embargo, en 2009 debido a la crisis mundial la producción sufrió un descenso del 23% respecto al 2008 (14,4 millones de toneladas). A partir de entonces la producción en España se ha mantenido en cifras similares. En la Figura 14 se puede observar la producción de acero bruto en España en los últimos 10 años [27, 30].

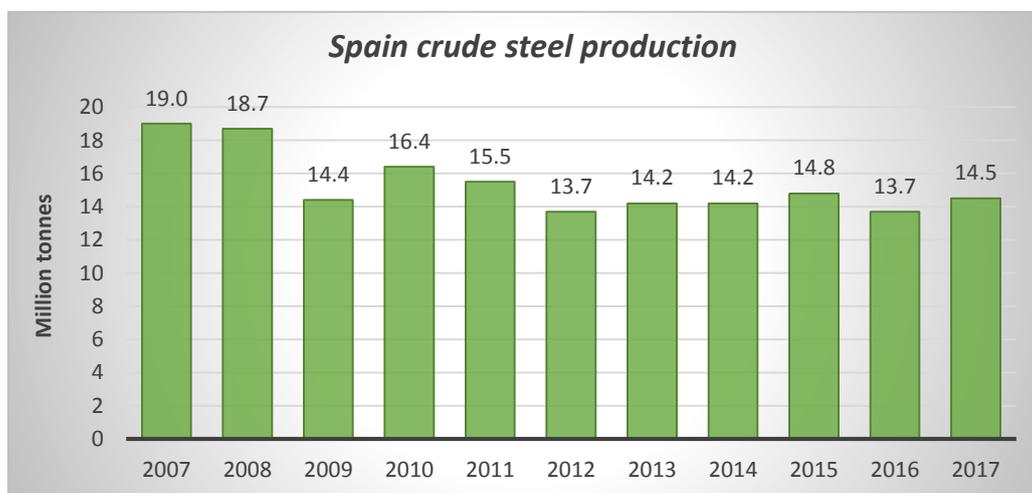


Figura 14. Producción de acero bruto en España en los últimos 10 años [27, 30].

Como puede observarse en los gráficos, la producción mundial de acero en los últimos 15 años prácticamente se ha duplicado, lo que ha supuesto un incremento similar en la producción de escorias. Dicho de otro modo, se ha originado una descompensación en los procesos de reutilización y puesta en valor de las escorias, pasando de ser un material útil a acopiarse en vertederos.

Es tan importante conocer la cantidad de acero producido como su proceso de fabricación. Según datos de *World Steel Association*, el 75% del acero mundial se fabrica mediante la ruta convencional o siderurgia integral y el 25% mediante hornos eléctricos de arco [31].

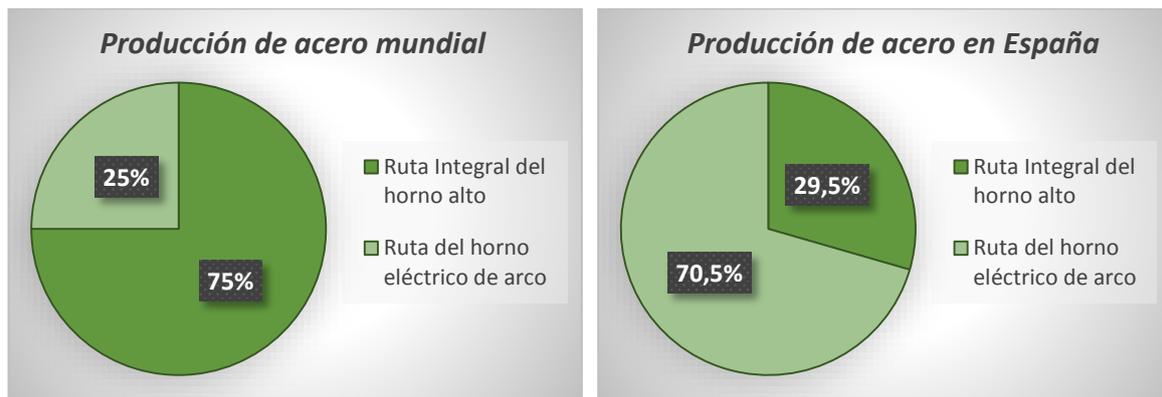


Figura 15. Métodos de producción de acero en España y a nivel mundial.

En España, en cambio, el 70,5% de la producción de acero se lleva a cabo en hornos eléctricos de arco, por lo que en nuestro país se genera un mayor volumen de escorias de acería eléctrica (EAFS, negras y LFS, blancas). Además, de las 21 acerías de horno eléctrico implantadas en España, el País Vasco cuenta con 11. Esto implica que la problemática que entraña la generación de escorias es mayor en ciertas zonas geográficas. Por este motivo, la investigación llevada a cabo a lo largo de este trabajo se centra en la valorización de escorias según vía HEA (las EAFS + LFS), concretamente en la elaboración de hormigón compactado con rodillo, a diferencia de los abordados por otras investigaciones hasta ahora, más centradas en el compactado por vibración o autocompactante [3, 26].

### 2.2.3. Tipos de escorias provenientes de la fabricación del acero

Las escorias siderúrgicas son el resultado de la combinación de los componentes no metálicos de los minerales en las diferentes metalurgias con las cenizas del combustible usado como agente reductor y con la caliza o dolomía empleadas como fundentes, que sobrenadan sobre el caldo líquido de las aleaciones férreas y que se obtienen tras someterlas a enfriamiento y solidificación [26, 32].

Éstas pueden provenir de diversos tipos de metalurgias, como puede ser de la fabricación del hierro (arrabio o fundición), acero, níquel, manganeso, cromo, cobre, etc. Todas ellas cumplen con la misma función metalúrgica; función consistente en proteger al caldo líquido de las diversas impurezas, pero poseen composiciones, características y propiedades físicas y químicas totalmente distintas.

Las escorias siderúrgicas generalmente se clasifican en función de su procedencia. En la Figura 16 se muestra la clasificación de las escorias que provienen de la fabricación del hierro y del acero. Estas escorias son las más utilizadas en el campo de la construcción. El nombre asignado a cada escoria proviene del tipo de horno utilizado a través del cual éstas se producen [3 - 5].

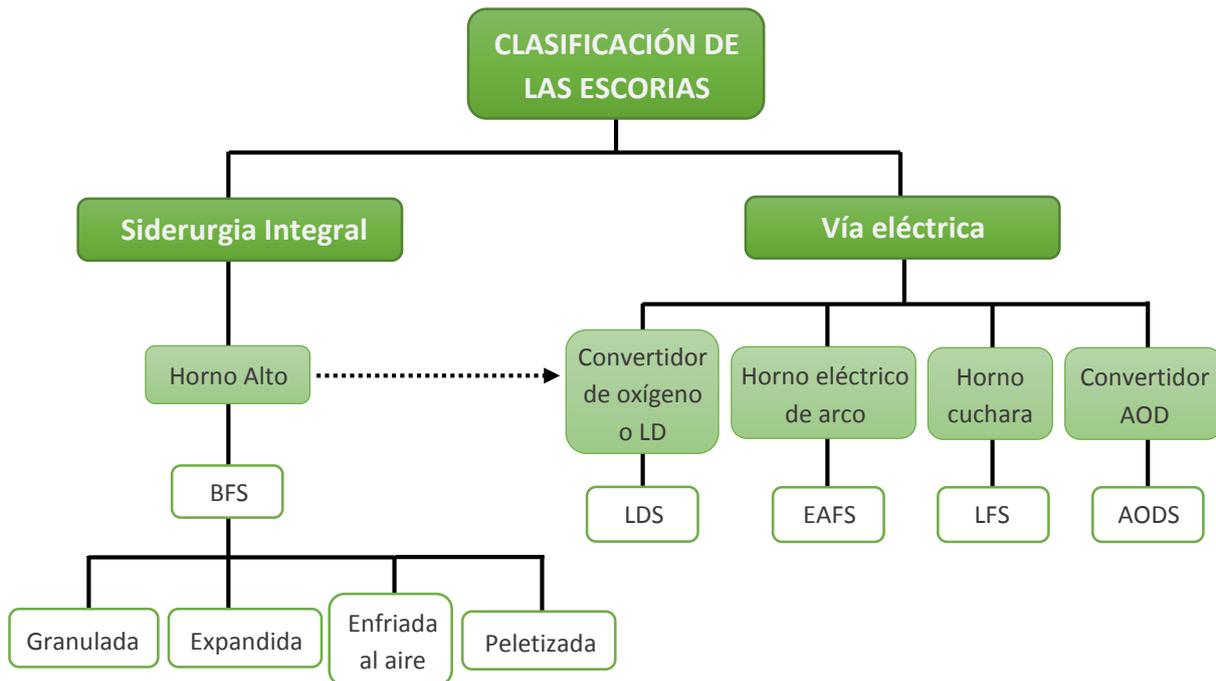


Figura 16. Clasificación de las escorias siderúrgicas según su procedencia [3-5].

La fabricación del **hierro o arrabio** se lleva a cabo mediante la ruta integral del horno alto, que consiste en introducir el mineral de hierro junto con el coque metalúrgico y los fundentes (habitualmente caliza) en el horno alto para obtener el arrabio o fundición líquida que contiene escorias BF sobrenadando en la superficie (ver Figura 18). Estas escorias se clasifican en 4 tipos, dependiendo del método de enfriamiento utilizado: granuladas, expandidas, enfriadas al aire y peletizadas (ver Figura 17).

Las escorias granuladas se obtienen por enfriamiento brusco de la escoria líquida, dejándola caer sobre un chorro de agua fría, lo que da lugar a un grano de aspecto similar a la arena que se seca y se muele para obtener cemento de escoria.

Las escorias expandidas se obtienen al añadir una pequeña cantidad de agua a la escoria fundida a fin de someterla a un enfriamiento rápido, logrando un árido de baja densidad que se emplea como árido de mampostería de hormigones ligeros.

Cuando la escoria líquida se deja enfriar lentamente al aire libre se obtiene un producto con características similares a las rocas volcánicas que presenta textura rugosa, color gris oscuro y abundantes poros tanto externos como internos. Este material se emplea comúnmente como árido de construcción tras someterlo a cribado y trituración.

La escoria peletizada se obtiene al dejar caer la escoria líquida sobre un tambor giratorio, regado con agua, que lanza la escoria al aire, formando una pila al caer al suelo. Este tipo de escoria BF es de baja porosidad y posee baja capacidad de absorción de agua [3-5, 22, 33, 34].



Figura 17. Escorias de horno alto (BFS): granuladas, expandidas/peletizadas y enfriadas al aire (de izda. a dcha.) [34, 35].

La fabricación del **acero** es posible llevarla a cabo mediante dos métodos: la ruta integral del horno alto y la ruta del horno eléctrico de arco (ver Figura 18).

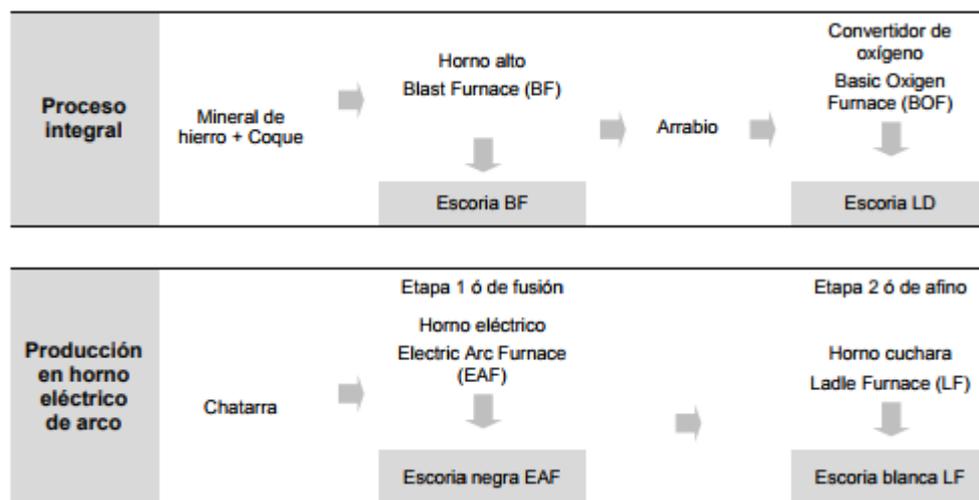


Figura 18. Proceso de fabricación del acero y de las escorias generadas [26].

Como se puede observar, en cada tipo de horno se generan diferentes tipos de escorias con características fisicoquímicas distintas.

El arrabio producido en el horno alto, durante la ruta integral, tiene un alto contenido en carbono (3,5%), por lo que es un material frágil y quebradizo. Para evitar este comportamiento, el arrabio en estado líquido se trata en el Convertidor de Oxígeno (BOF en inglés), obteniendo acero líquido con escoria LD líquida en la superficie.

La fabricación del acero a través del horno eléctrico de arco se lleva a cabo en dos fases. En la primera, denominada metalurgia primaria o proceso de fusión, se funde la chatarra con los fundentes en el horno eléctrico (EAF - *Electric Arc Furnace*) obteniendo el metal fundido con escorias líquidas de tipo EAFS (*Electric Arc Furnace Slags* o escorias negras) en la superficie. En la segunda fase, llamada metalurgia secundaria o proceso de afino, el baño fundido se traslada al Horno Cuchara (LF - *Ladle Furnace*) donde se lleva a cabo la desulfuración, desgasificación y el ajuste de su composición. Cuando la escoria se forma en esta segunda fase, es conocida como escoria blanca (LFS – *Ladle Furnace Slag*) [26].

Para la fabricación de aceros inoxidables de alta aleación, la segunda fase se lleva a cabo en Convertidores AOD, que soplan oxígeno y argón por su zona inferior (lo que permite obtener un acero más limpio), dando lugar a escorias de tipo AOD, las cuales apenas se utilizan debido al alto contenido de cromo y sus deficientes propiedades físicas [36].



Figura 19. Escorias de la fabricación del acero: BFS, LDS, EAFS y LFS (de izda. a dcha.).

A causa de su mayor producción en España, y con mayor presencia en el País Vasco, los residuos más habituales son los derivados de la obtención y fabricación del acero por la vía eléctrica. Abundando más en ello, más concretamente, nos referimos a las escorias de horno eléctrico (escorias EAFS, o negras) y las escorias de horno cuchara de la metalurgia secundaria o de afino antes comentada (escorias LFS, o blancas). Es por ello que el presente trabajo está centrado en analizar la viabilidad teórica de reutilizar las EAFS y/o LFS en mezclas de HCR.

#### 2.2.4. Características

Las escorias siderúrgicas son un conjunto de óxidos que flotan por encima del caldo líquido, debido a su bajo punto de fusión y su baja densidad (siempre menor que la del propio caldo que protegen).

Cada proceso de fabricación siderúrgico produce un tipo de escoria y cada una de ellas posee características propias que la diferencian de las demás, siendo su aprovechamiento como subproducto totalmente diferente entre sí. Sin embargo, el papel que desempeñan todas es el mismo:

- Proteger el caldo del contacto con la atmósfera, evitando la entrada de gases.
- Ayudar en el control de la temperatura durante la fundición, disminuyendo la pérdida de calor y un gradiente de temperatura alto en el metal líquido.
- Producir una serie de reacciones químicas de afino o purificación con el fin de eliminar residuos en la fundición del metal.

De manera general, las escorias siderúrgicas presentan elevada densidad, forma angular, textura superficial rugosa, gran dureza y absorción de agua media. En relación a su uso como árido, presentan buena resistencia a la abrasión, fragmentación y compresión [37].

### 2.2.5. Propiedades

Las **propiedades químicas** de los diferentes tipos de escoria ferrosa varían en función de la materia prima utilizada para la fabricación del acero y del proceso de producción de cada una.

Una característica común de estas escorias es que resultan de la fusión a base de cal y sílice, por lo que el óxido de calcio (CaO) y la sílice (SiO<sub>2</sub>) son sus componentes principales. Otros componentes incluyen alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de magnesio (MgO). El contenido de hierro en la escoria BF suele ser inferior al 0,5% en peso, al ser éstas el resultado de un proceso de reducción. La escoria LD y la escoria EAF, en cambio, son generadas a través de un proceso de oxidación y, por tanto, tienen contenidos de hierro significativamente más altos.

En la Tabla 2 se puede observar la composición química de las escorias BF, LD, EAF y LF.

Tabla 2. Rangos compositivos típicos de escorias de hierro (arrabio) y acero [35, 38, 39].

Constituyente	BFS (% en peso)	LDS (% en peso)	EAFS (% en peso)	LFS (% en peso)
CaO	32 - 45	30 - 60	22 - 60	30 - 60
SiO <sub>2</sub>	32 - 42	8 - 20	6 - 34	2 - 35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7 - 16	1 - 6	1 - 14	5 - 35
MgO	5 - 15	3 - 15	2 - 13	1 - 10
FeO	≤ 1	7 - 35	10 - 40	0 - 15
MnO	≤ 1	0,3 - 8	2 - 6	0 - 5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,2 - 3	1-2	0,1 - 0,4
S <sub>total</sub>	1 - 2	-	≤ 0,2	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,1	-	0,5 - 2	-

Las composiciones químicas varían según el tipo de horno, la composición de las cargas del horno, las calidades de acero producidas y el método de funcionamiento de cada horno.

La composición mineral de la escoria BF consiste generalmente en *melilita* (Ca<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub> – Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>) y *merwinita* (Ca<sub>3</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>8</sub>). Las escorias tipo LD o EAF consisten principalmente en *silicato dicálcico* (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), *ferrita dicálcica* (Ca<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y *wuestita* (Fe<sub>1-x-y</sub>, Mg<sub>x</sub>, Mn<sub>y</sub>)O<sub>z</sub>.

Las **propiedades físicas** de las escorias procedentes de la fabricación del hierro y del acero dependen tanto de la composición química como de las condiciones de enfriamiento, y pueden verse influidas por el procesamiento una vez que la escoria se retira del horno. El enfriamiento lento, por ejemplo, genera escorias cristalinas. En cambio, el enfriamiento rápido de la escoria líquida generará una escoria vítrea con propiedades hidráulicas latentes. Por tanto, las condiciones de enfriamiento determinan la estructura cristalina, la densidad y la porosidad de la escoria.

Las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las escorias de hierro y acero son similares o superiores a las de los áridos naturales (ver Tabla 3), por lo que la mayoría de los campos de aplicación son idénticos a los de éstas. Estas escorias son de alta densidad, alta resistencia a la compresión y presentan buena resistencia al pulido y al hielo/deshielo. Estas propiedades hacen que sean ideales para su uso en construcciones viales. Además, la forma cúbica y la textura de la superficie rugosa de la escoria proporcionan una excelente resistencia a la formación de surcos en la superficie del asfalto [35, 38].

A continuación, se presentan algunas propiedades de los áridos siderúrgicos y de las rocas naturales.

Tabla 3. Propiedades físicas de los áridos siderúrgicos vs áridos naturales [54, 37, 47].

Propiedad	Escoria BF	Escorias LD y EAF	Basalto	Arenisca	Granito
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,4	3,6	3,0	2,3	2,7
Resistencia a compresión (MPa)	100	200	> 250	200	> 160
Resistencia al impacto (%)	27	17	17	20	12
Coefficiente de Pulido Acelerado	50	57	45 - 56	56	45 - 58
Absorción de agua (%)	2	1	< 0,5	< 0,5	0,3-1,2
Resistencia al hielo-deshielo (%)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Las escorias procedentes del acero, en comparación con las escorias de horno alto, son mucho más pesadas, más duras y más densas, y además tienen una resistencia inusualmente alta al pulido y al desgaste [35, 38].

### 2.3. Escorias de acero de Horno Eléctrico de Arco (EAFS y LFS)

#### 2.3.1. Definición

Las escorias negras (EAFS) y blancas (LFS) de horno eléctrico de arco, o también llamadas escorias oxidantes y escorias reductoras, respectivamente, son subproductos de la fabricación del acero cuya materia prima principal es la chatarra.



Figura 20. Escorias de horno eléctrico de arco: EAFS (izda.) y LFS (dcha.) [33, 35].

### 2.3.2. Proceso de fabricación del acero y las escorias

El método más utilizado en España para la fabricación de acero es la ruta del horno eléctrico de arco (HEA, en inglés EAF). Las etapas básicas de la fabricación de acero mediante este procedimiento son la fusión de la materia prima a través de una corriente eléctrica y el afino posterior del baño fundido.

El HEA habitualmente es cilíndrico y está recubierto de material refractario. Dispone de una bóveda móvil, situada en la parte superior del horno, por la cual se introducen las diferentes materias primas con la ayuda de una cesta, una compuerta utilizada durante la fusión y el desescoriado, y una piqueta situada en el fondo o en un costado del horno que se utiliza para colar el acero [40].

En la Figura 21 se presenta el esquema y los componentes de un HEA [41 - 43].

La principal materia prima empleada para la fabricación de acero en horno eléctrico de arco es la chatarra de hierro dulce o acero. Como elementos auxiliares se pueden cargar también pequeñas cantidades de fundición, mineral de hierro y ferroaleaciones. Muchos, y cada vez en mayor proporción (30-70%), utilizan prerreducidos (hierro de reducción directa o esponja de hierro) que, siendo prácticamente hierro puro, favorecen la dilución de contaminantes presentes en la chatarra.

En ciertas ocasiones el HEA se carga con fundición o arrabio líquido en proporción máxima de 40% del total de la carga, obviando el deterioro de los refractarios, por deterioro al soplar de manera prolongada oxígeno para eliminar el carbono de la masa metálica.

Además, se añaden materiales formadores de escoria, que protegen el revestimiento refractario del horno y que están constituidos en su mayor parte por cal, sílice, magnesia y alúmina [40 - 44].

Junto con la materia prima, se añaden fundentes, que se encargan de rebajar el punto de fusión de la ganga y las impurezas, de forma que éstas se funden y se recogen en la escoria, mejorando así la calidad del arrabio y, por tanto, del acero final.

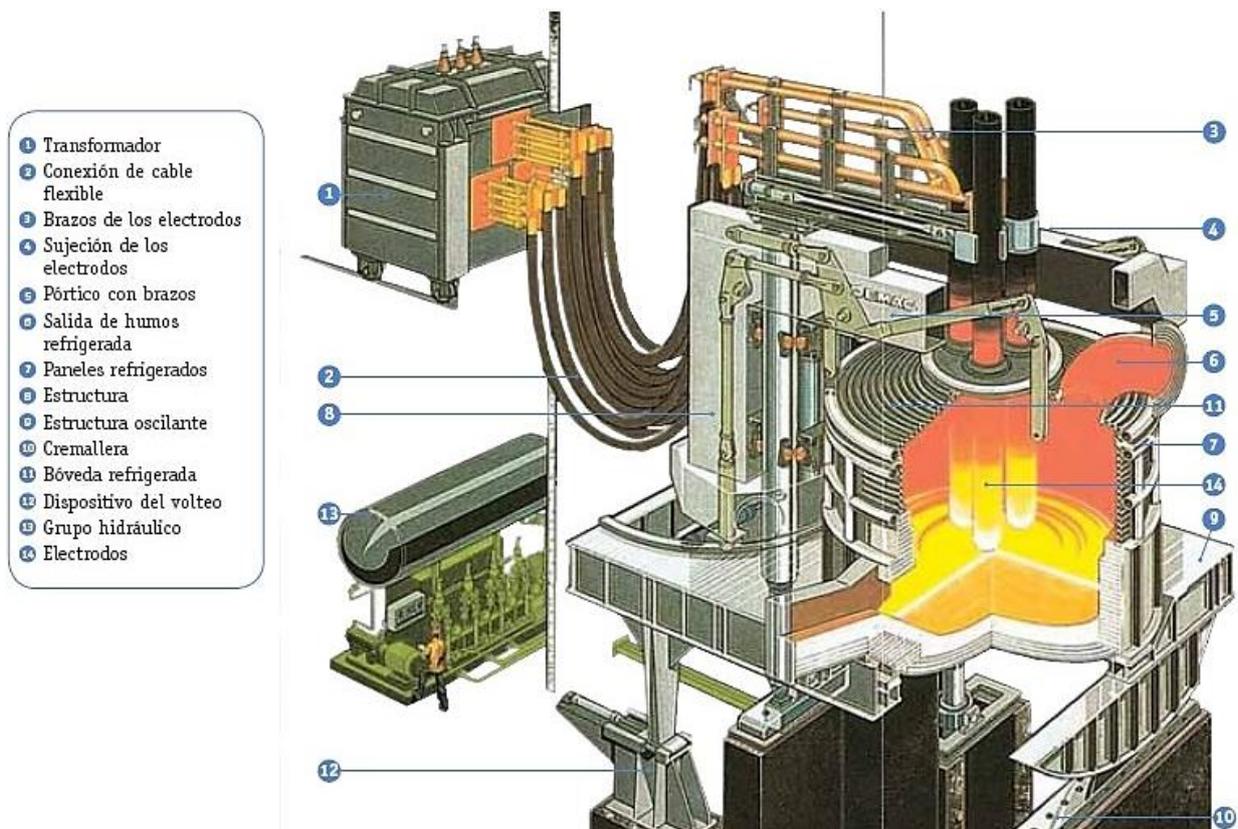


Figura 21. Esquema y componentes de un HEA [41, 42].

La ruta del HEA se divide en dos grandes fases: la fusión de la chatarra y el afino del acero líquido en la metalurgia secundaria. La etapa de fusión, a su vez, incluye una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar las impurezas de fósforo, manganeso y silicio, la defosforación y la formación de escoria espumante (protectora también del arco eléctrico) en la que se acumulan todas las impurezas. La etapa de afino incluye la desoxidación, que permite eliminar los óxidos metálicos del baño, la desulfuración y la decarburación del acero.

A continuación, se describe más detalladamente la secuencia de operaciones llevadas a cabo durante el proceso del HEA:

El proceso comienza con la carga de la chatarra y los fundentes en la bóveda del horno. Tras la carga se cierra la bóveda, se bajan los electrodos de grafito hasta entrar en contacto con la materia prima y se conecta el suministro de energía eléctrica, de manera que se establece un arco eléctrico (habitualmente en alterna) entre los 3 electrodos y la carga sólida, proceso por el cual se funde la chatarra.

La etapa de fusión se completa con la fase de oxidación y defosforación, mediante el soplado del caldo líquido por medio de la lanza de oxígeno, que permite eliminar los elementos indeseables de la chatarra por oxidación de los mismos. El fundente se va combinando con las impurezas de la carga, rebajando el punto de fusión y promoviendo la formación de un material no metálico denominado escoria negra u oxidante (EAFS).

A resultas de este proceso eléctrico del acero, aguas abajo, se obtiene acero líquido, que debe ser afinado en la metalurgia secundaria (Horno Cuchara, *Ladle Furnace*), donde se generan las escorias blancas o reductoras (LFS). Para ello, se procede a retirar la escoria negra (desescoriado) y se vierte el metal líquido en el Horno Cuchara; proceso en el cual el acero líquido se cubre inmediatamente con una escoria reductora.

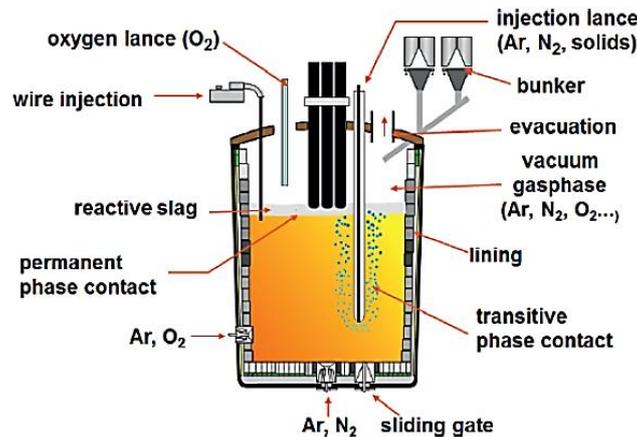


Figura 22. Esquema de un Horno Cuchara [45].

El refinado consiste en eliminar el exceso de oxígeno y azufre gracias a la adición de cal, carburo cálcico y ferroaleaciones. Finalizada esta etapa, se diferencian dos materiales distintos debido a la diferencia de densidades y su inmiscibilidad: el acero líquido con la composición deseada y la capa sobrenadante de escoria blanca. Antes de colar el líquido fundido se vuelve a desescoriar, eliminando la escoria blanca.

A continuación, se muestra el proceso de fabricación del acero vía HEA.

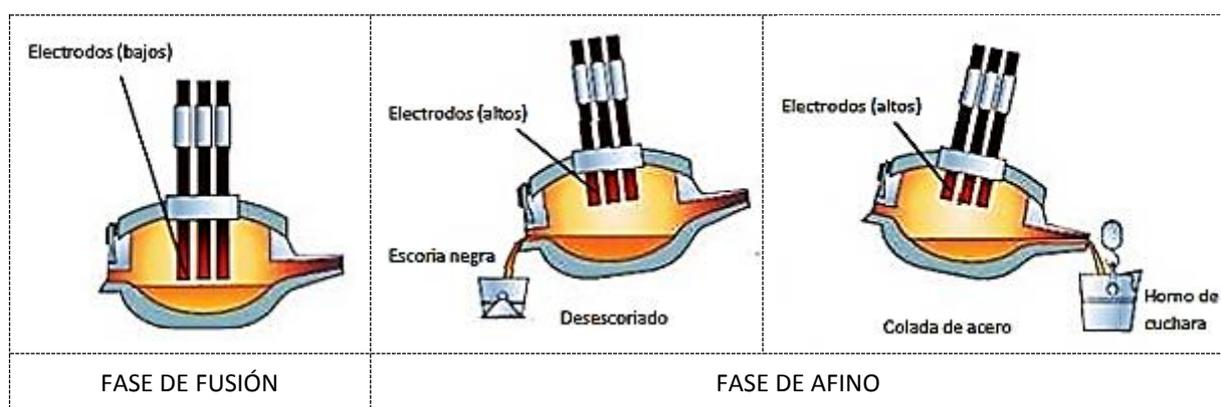


Figura 23. Proceso de fabricación del HEA [4].

Las escorias salen del horno con una temperatura de alrededor de 1500 a 1600°C. A continuación, son acumuladas en un silo hasta que son enfriadas a unos 200°C y se acopian al aire libre continuando su enfriamiento. Posteriormente, se procede a la recuperación de las escorias, las cuales se someten a diversos tratamientos para conseguir áridos siderúrgicos

estabilizados. Los tratamientos más habituales para escorias negras son: el granulado de la escoria mediante machaqueo, así como su triturado y molienda hasta alcanzar un tamaño adecuado a su uso, la eliminación de elementos metálicos existentes en las escorias mediante electroimanes (desferretización), la separación o cribado del material granulado por fracciones granulométricas y almacenamiento posterior a la intemperie con humectación y volteo periódicos hasta garantizar valores de expansividad nulos (estabilización) [4, 46, 48].

En la Figura 24 se muestra la representación esquemática del proceso de fabricación del acero en Horno Eléctrico de Arco y posterior refinado en Horno Cuchara.

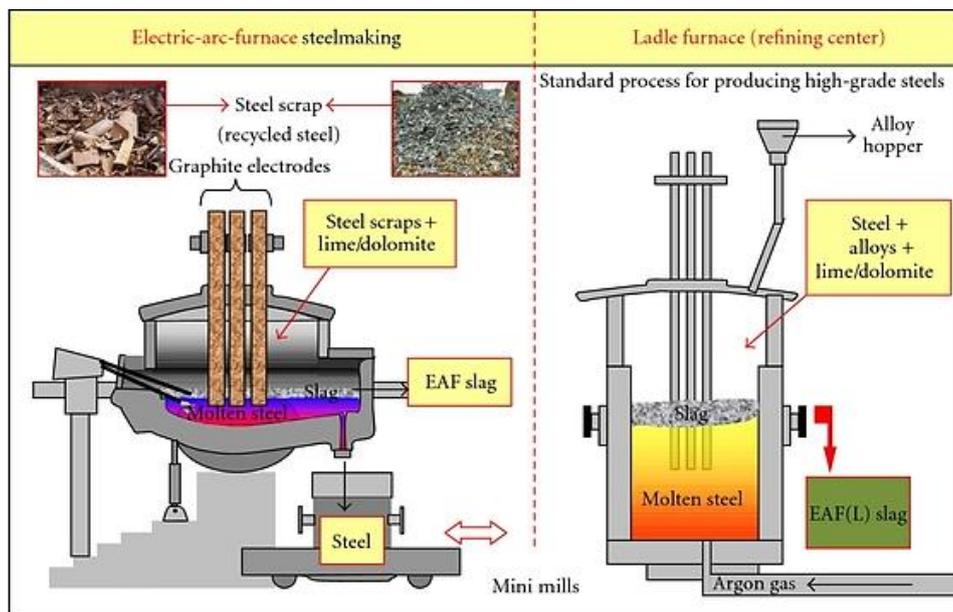


Figura 24. Representación esquemática del proceso de fabricación del acero en Horno Eléctrico de Arco y posterior refinado en Horno Cuchara [39].

### 2.3.3. Volumen de EAFS y LFS generadas

La fabricación de acero vía HEA implica la generación de, aproximadamente, 120 a 180 kg de escoria negra y de 20 a 30 kg de escoria blanca por cada tonelada de acero producido [3 - 5, 26, 47]. Como se comentó en el punto 2.2.3., el 70,5% del acero producido en España se fabrica a través del HEA, siendo en torno al 50% producida en el País Vasco (en el entorno de las 800.000 toneladas/año). Partiendo de estos datos, se estima, de manera orientativa, la cantidad total de escorias de HEA generadas en España en el año 2017.

Tabla 4. Volumen de escorias negras y blancas generadas en España en el año 2017.

Producción de acero en España en 2017 (10 <sup>6</sup> t)	Producción en HEA: 70,5% (10 <sup>6</sup> t)	EAFS (10 <sup>6</sup> t)	LFS (10 <sup>6</sup> t)
14,5	10,2	1,23 ÷ 1,84	0,20 ÷ 0,31

#### 2.3.4. Composición química y mineralógica

La composición de las escorias depende principalmente del tipo de chatarra utilizada, así como del control de las variables de operación.

Las **escorias negras** están compuestas principalmente de hierro, calcio y silicio. En la Tabla 5 se recogen los porcentajes relativos a la composición química de las EAFS procedentes del estudio de diversos autores.

Tabla 5. Composición química de las EAFS [4, 26, 44, 49-51].

	CaO (% en peso)	CaO <sub>libre</sub> (% en peso)	SiO <sub>2</sub> (% en peso)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% en peso)	MgO (% en peso)	MgO <sub>libre</sub> (% en peso)	Fe <sub>total</sub> (% en peso)	Mn <sub>total</sub> (% en peso)
[4]	25 - 35	0 - 4	8 - 18	3 - 10	2 - 9	-	20 - 30	2 - 8
[26, 44]	22 - 60	0 - 4	8 - 37	2 - 8	4 - 12	-	38	1 - 4
[26, 49]	23,9	0,5	15,3	7,4	5,1	-	42,5	-
[26, 50]	38,8	-	14,1	6,7	3,9	-	-	-
[26, 51]	35,7	-	17,5	6,3	6,5	-	-	-
(-) Información no disponible								

Las EAFS poseen entorno al 20 - 42,5% de hierro, elemento que les confiere alta densidad y cierta resistencia al desgaste y a la abrasión. Los contenidos de CaO y MgO libres (cuando el porcentaje de MgO es mayor del 2% aparece como la especie cristalina *periclasa*) pueden llevar a fenómenos de expansión a corto y a largo plazo, respectivamente.

En la composición mineralógica de las escorias negras predominan los óxidos y los silicatos, tales como el silicato bicálcico, silicato tricálcico, cal libre, wüstita, ferrita bicálcica y la fase magnética (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [4, 26, 44, 48].

Tabla 6. Composición mineralógica de las EAFS [4, 26, 48].

Fase mineral	% en peso	Principales componentes, % molar
Silicato bicálcico	30 - 60	CaO (64), SiO <sub>2</sub> (32), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (1 - 3)
Silicato tricálcico	0 - 30	CaO (70 - 73), SiO <sub>2</sub> (23 - 25)
Cal libre	0 - 10	CaO (75 - 90), Mn (25 - 30), CaO (10 - 20), SiO <sub>2</sub> (0 - 10)
Ferrita bicálcica	5 - 20	CaO (60 - 65), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (15 - 45)
Wüstita	10 - 40	FeO (45 - 55), MnO (10 - 20), CaO (10 - 30), MgO (5 - 20)
Fase magnética	0 - 20	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (50 - 80), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10 - 40)

La escoria negra posee una alta presencia de silicato bicálcico (30 - 60%), ya sea por su formación a altas temperaturas o por la descomposición parcial del silicato tricálcico en silicato bicálcico y CaO<sub>libre</sub> (cal libre) durante su enfriamiento. Esta cal libre, así producida, no tiene riesgo de expandirse al estar distribuida uniformemente en la matriz compacta de la escoria. Sin embargo, la cal que no está completamente disuelta en la matriz puede tener

riesgo de expandirse. La wüstita, segundo componente más abundante en las EAFS, presenta una leve reactividad en la hidratación del MgO en fase cristalina.

La presencia mayoritaria de óxidos de hierro confiere a la escoria negra su característico color negro. Entre ellos, la fase magnética proviene del enfriamiento del  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  producido en estado líquido a  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ , que se asocia con el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  al descender la temperatura formando una fase sólida única con compuestos químicos [26, 48].

Las **escorias blancas** están compuestas principalmente de calcio, y en menor proporción de silicio y aluminio. En cambio, el contenido en hierro de estas escorias es bajo. En la Tabla 7 se contemplan los porcentajes relativos a la composición química de las LFS procedentes del estudio de diversos autores.

Tabla 7. Composición química de las LFS [4, 44, 53].

	CaO (% en peso)	CaO <sub>libre</sub> (% en peso)	SiO <sub>2</sub> (% en peso)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% en peso)	MgO (% en peso)	MgO <sub>libre</sub> (% en peso)	Fe <sub>total</sub> (% en peso)	Mn <sub>total</sub> (% en peso)
[4]	30 - 52	1 - 10	8 - 23	3 - 20	6 - 12	-	0,5 - 2	0,5 - 3
[44]	45,3 - 62,1	-	17,4 - 19,3	3,2 - 10,4	4,5 - 17,2	-	1,1 - 3,6	0 - 1,2
[53]	56,7	12	17,7	6,67	9,73	8	-	-
	54	5	14,3	10,3	16,5	14	-	-
(-) Información no disponible								

Típicamente, los óxidos de calcio y magnesio constituyen más del 60% de la escoria LF en peso, siendo el óxido de calcio el elemento principal. Estos compuestos pueden llevar a fenómenos de expansión, si éstas se hidratan [4, 44]. Los óxidos de silicio, aluminio y los óxidos férricos representan menos del 40% del peso total. Otros compuestos, incluidos los óxidos de manganeso y titanio, están presentes en cantidades menores.

En la composición mineralógica de las escorias blancas, al igual que en las negras, predominan los óxidos y los silicatos. La Tabla 8 describe algunas de las fases minerales presentes en ellas, con sus componentes más importantes en cada caso.

La fase mineral mayoritaria de las LFS, al igual que las EAFS, es el silicato bicálcico. Por otro lado, la presencia de espinela tiene como principal inconveniente la presencia de MgO, que puede presentar expansión a largo plazo.

Tabla 8. Composición mineralógica de las LFS [4, 44].

Fase mineral	% en peso	Principales componentes, % molar
Silicato bicálcico	30 - 60	CaO (64), SiO <sub>2</sub> (32), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (1 - 3)
Silicato tricálcico	0 - 30	CaO (70 - 73), SiO <sub>2</sub> (23 - 25)
Cal libre	0 - 10	CaO (75 - 90), Mn (25 - 30), CaO (10 - 20), SiO <sub>2</sub> (0 - 10)
Espinela	10 - 30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (50 - 55), MgO (25 - 30), CaO (10 - 20), SiO <sub>2</sub> (0 - 10)

Estos valores de composición son orientativos y pueden variar levemente según la fuente de estudio o incluso aparecer otros elementos químicos no mostrados en las tablas.

### 2.3.5. Características y propiedades

La **escoria negra** presenta tonalidades grises, desde gris claro hasta gris muy oscuro, casi negro. Además, es de aspecto poroso, morfología irregular, cúbica y de fractura puntiaguda.

Esta escoria se caracteriza por su heterogeneidad, tanto de forma como de textura superficial y composición. Como se aprecia en la Figura 25, la forma y tamaño de las distintas partículas varía. Asimismo, existen ciertos granos con superficie lisa y cantos angulosos, otros con superficie más rugosa y otros con una superficie totalmente irregular. Incluso existen partículas que tienen pequeñas oclusiones superficiales que parecen ser burbujas de aire [3, 4, 26, 37, 44, 48, 53]. Adicionalmente, las escorias negras poseen baja cantidad de finos.



Figura 25. Escorias de HEA: EAFS (izda.) y LFS (dcha.) [4, 37].

Las escorias negras poseen propiedades físico-mecánicas muy particulares que las hacen interesantes para su uso en ingeniería civil y otras aplicaciones constructivas (ver Tabla 11).

La **escoria blanca** es de color blanquecino a grisáceo, suave al tacto, pulverulenta y se disgrega al tocarla. Razón por la cual sus propiedades mecánicas son inferiores a las de las escorias negras.

Al producirse en el proceso de afino, posterior al de fusión, puede contener impurezas de escoria negra que se hayan movilizado con el vertido del caldo de acero del HEA al horno cuchara.

Las escorias blancas poseen una gran cantidad de finos, lo que dificulta su manipulación y las hace inadecuadas para su uso como árido. Sin embargo, la proporción de finos las dota de buenas propiedades cementicias [37, 44, 53].

A continuación, se presentan las propiedades físico-mecánicas de ambas escorias. Como se observa en la Tabla 9, las escorias negras son duras y tienen una buena resistencia frente al desgaste y a la abrasión, así como una alta densidad, lo que las convierte en un árido interesante para obtener hormigones pesados. Por otro lado, la alta capacidad de absorción de agua de las escorias puede influir negativamente en la durabilidad de dicho árido, en caso de que éste vaya a estar sometido a ciclos de hielo-deshielo o humedad-sequedad, incrementando su volumen.

Tabla 9. Propiedades físico-mecánicas de las EAFS y LFS [3, 4, 44, 48, 53].

Propiedad	Escoria negra (EAFS)	Escoria blanca (LFS)
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	3,5	2,7
Densidad total (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,4
Resistencia a compresión (MPa)	> 130	-
Resistencia al impacto (% en peso)	18	-
Coefficiente de Pulido Acelerado	54 - 57	-
Desgaste de los Ángeles (%)	12 - 25	-
Absorción de agua (% en peso)	0,3 - 6	-
Resistencia al hielo-deshielo (% en peso)	< 0,3	-
Incremento de volumen (% vol)	1 - 5	5 - 25
(-) Información no disponible		

Ambas escorias tienen naturaleza expansiva, a causa de la presencia de compuestos (óxidos de cal y magnesio libre) en su composición que, en presencia de agua, experimentan un aumento considerable de volumen. La cal libre se hidrata rápidamente y puede ocasionar grandes cambios volumétricos en poco tiempo (hidratación a corto plazo), mientras que la hidratación de la magnesia libre se produce más lentamente (hidratación a largo plazo) [3, 4, 26, 37, 44, 48, 53]. Comparando las Tablas 5 y 8, las escorias negras contienen menor proporción de cal libre en su composición, por lo que el riesgo de sufrir inestabilidad volumétrica es menor que en las blancas. Recientes investigaciones [26, 52] muestran que estos componentes expansivos se encuentran en las escorias negras en muy baja concentración, y confirman que las EAFS utilizadas como áridos en hormigones se mantienen estables.

### 2.3.6. Aplicaciones

Las escorias de acería eléctrica pueden utilizarse para otros usos de manera directa, sin someterlas a ningún tratamiento físico-mecánico previo, o bien tras haber sufrido a una serie de procesos como el machaqueo, homogeneización, separación magnética, cribado, estabilización, envejecimiento, etc. que las convierte en un material granulado y estable que

empieza a conocerse como *árido siderúrgico*. La aplicación directa o indirecta de las escorias es función de sus propiedades y características, además de su estabilidad volumétrica.

Debido a las diferencias tanto físicas como químicas existentes entre ambas escorias, algunas de las aplicaciones en las que son utilizadas son diferentes.

- *Aplicaciones de las EAFS*

Las escorias negras valorizadas se emplean como áridos en firmes de carretera, como adición en la fabricación del cemento, como áridos para la fabricación de morteros y hormigones siderúrgicos y en otras aplicaciones como la consolidación de suelos, capas de rodadura y vías férreas.

Uno de los usos tradicionales y directos de las EAFS es su utilización como áridos de capas granulares en coronación de explanadas, bases y sub-bases de carreteras. Se emplean, además, como áridos en mezclas bituminosas por poseer buena resistencia a la abrasión y un excelente coeficiente de pulimiento acelerado, lo que las hace especialmente utilizables en capas de rodadura. Sin embargo, debido a su porosidad, angulosidad y su falta de finos, las escorias negras pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que suelen combinarse con áridos naturales, generalmente de origen calizo, para lograr una dosificación de áridos adecuada y mejorar así estos aspectos. Asimismo, su inherente riesgo de expansión y de hinchamiento, exige evaluar su potencial expansivo y garantizar su estabilidad volumétrica [3, 4, 48].

Las EAFS se utilizan también como aporte de hierro, silicio y cal en el proceso de fabricación del clinker. Estos cementos con escorias requieren de una menor cantidad de agua, por lo que mejora su trabajabilidad respecto al cemento convencional, además de tener mayor resistencia a la abrasión y desarrollar mayores resistencias con el tiempo; sin embargo, la resistencia inicial de estos cementos es menor y precisan de un mayor tiempo de fraguado. Los únicos elementos que sufren cambios en la composición química del clinker con escorias son el cromo y el manganeso, aumentando considerablemente. No obstante, su presencia al no originar problemas en la calidad técnica del cemento y la legislación española al no imponer restricción alguna para dichos elementos, esta aplicación no presenta ninguna limitación desde el punto de vista técnico y medioambiental. Con objeto de obtener un producto final de características similares al obtenido mediante materias primas convencionales, el contenido de escorias debe ser del 15-30% para lograr cementos de categoría resistente 42,5 y del 45% para lograr cementos de categoría resistente 32,5 [3, 4]. Diversos autores [54] confirman que es necesario el tratamiento de envejecimiento de la escoria (exposición a la intemperie y/o riego de agua) para que pueda utilizarse como adición en el cemento.

Otra aplicación muy común de las escorias negras es su utilización como árido, tanto grueso como fino, para la fabricación de morteros y hormigones. Antes de su utilización, se les debe

realizar un pretratamiento, que consiste en triturar y tamizar las escorias para obtener una granulometría similar a la de los áridos naturales, seguida de la separación de metales y finalmente la estabilización y envejecimiento de las escorias para evitar su expansión. Las EAFS presentan un bajo contenido de finos, por lo que, cuando se utilicen para la fabricación de hormigones, es necesario añadir áridos finos, generalmente caliza, que cierren el esqueleto mineral de los hormigones [3 - 5].

Las escorias negras también se han utilizado, de manera más puntual, como material fino de relleno acompañando a rocas de mayor tamaño en escolleras, o como escolera fina de relleno en obras fluviales [3, 4, 48]. La heterogeneidad de las EAFS implica un control muy riguroso de su comportamiento dimensional, cuestión por la cual estas aplicaciones han sido tan puntuales.

- *Aplicaciones de las LFS*

Actualmente apenas existen alternativas para el uso de la escoria blanca, siendo la mayor parte destinada a vertederos. Dentro de las aplicaciones en las que se les aprecia un futuro más inmediato, se encuentran: la fabricación de clinker, la sustitución parcial de áridos y/o cemento en morteros y hormigones, y otras aplicaciones como la estabilización de suelos y firmes, lechos de impermeabilización en obras hidráulicas o fluviales o el empleo como material fino en mezclas hidráulicas o bituminosas [4, 53].

Al igual que las escorias negras, uno de los usos de las escorias blancas es como material para la fabricación de clinker. Debido a su bajo contenido en hierro, éstas se emplean en sustitución de las margas. La similitud entre los óxidos presentes en las LFS y el clinker del cemento Portland, así como su aspecto pulverulento que no precisa de molienda posterior, hacen que las escorias blancas sean aptas para la fabricación de nuevos conglomerantes. La máxima cantidad de escorias que está permitido utilizar para esta aplicación es alrededor del 5% del volumen total del clinker, a fin de evitar contenidos mayores del 2% en magnesio que ocasionen la inestabilidad volumétrica. Con una dosificación del 5% de LFS, los valores de resistencia a compresión simple son muy similares a los valores con margas [4, 53].

Otra de las aplicaciones en las que se utilizan las LFS es como sustitución parcial del cemento en morteros y hormigones, debido a las propiedades aglomerantes hidráulicas que presentan.

Publicaciones recientes [55] afirman que el empleo de LFS en hormigones auto-compactantes que contienen fibras de acero tiene un efecto positivo en la resistencia a compresión, los ciclos de hielo-deshielo y en la resistencia a la penetración de cloruros de dichos hormigones.

### 3. MATERIALES RECICLADOS UTILIZADOS EN MORTEROS Y HORMIGONES

En la actualidad, la Unión Europea trata de apoyar la transición hacia una economía más circular, donde los residuos generados en una industria se convierten en materia prima secundaria para otra industria. Diversos equipos de investigación se dedican constantemente a estudiar la posibilidad de sustituir ciertos componentes del hormigón, como son los áridos o el cemento, por estos materiales reciclados, a fin de evitar impactos negativos en el planeta y poder conservar los recursos naturales, reducir el consumo energético y disminuir las emisiones contaminantes, así como la demanda de vertederos. Entre ellos, se encuentran las cenizas volantes, los RCD, los NFU, las cenizas procedentes de la biomasa forestal, el vidrio reciclado y las EAFS como sustitución parcial de los áridos naturales, amén de los lodos de depuradora de aguas residuales, el humo de sílice y las LFS como adición o sustitución parcial del cemento, entre otros.

Las *cenizas volantes*, concretamente las silicoaluminosas, pueden emplearse como árido en la fabricación de morteros y hormigones, así como adición en la fabricación de cementos. Debido a la finura de los granos de las cenizas volantes, éstas pueden emplearse para complementar la granulometría del hormigón y hacerla más continua. De esta manera, aumenta la plasticidad, manejabilidad y la resistencia mecánica de los hormigones, a la par que disminuye su porosidad y se evita la segregación. Por otro lado, la adición de cenizas volantes permite reducir la cantidad de cemento empleado en los hormigones, disminuye la generación de calor dentro de la masa del hormigón, por lo que los gradientes de temperatura en el interior del hormigón son más pequeños y, además, reduce el peligro de fisuración superficial y les dota de buena resistencia al ataque por sulfatos y al agua de mar [56].

La utilización de *áridos procedentes del reciclaje de RCD* es muy común en el campo de la construcción. Uno de los ámbitos en los que éstos se utilizan es en la fabricación de hormigones. Los materiales reciclados utilizados en esta aplicación generalmente proceden de residuos de hormigón convencional (in situ o prefabricado), y se emplean para la fabricación de hormigones estructurales (en masa y armado), no estructurales, morteros y cementos. Habitualmente se emplean los áridos gruesos y se desecha la fracción más fina, por ser ésta la que posee mayor cantidad de sulfatos. Estos hormigones presentan menor densidad, mayor porosidad, resistencias mecánicas similares y requieren de contenidos de agua y cemento mayores. Los morteros reciclados, en cambio, presentan resistencias mucho menores, debido a la elevada demanda de agua que requieren los áridos finos reciclados. El uso de áridos de hormigón antiguo reciclado no se recomienda en el diseño de hormigones de alto rendimiento, debido a su alta capacidad de absorción y escasa resistencia [57 - 59].

Con relación a lo comentado en el párrafo anterior, también es común la utilización de *áridos reciclados procedentes de la demolición de pavimentos* en la fabricación de hormigones, en especial los áridos de mayor tamaño. Estos hormigones apenas contienen áridos finos

reciclados, ya que éstos empeoran sensiblemente la trabajabilidad del hormigón, debido a su angulosidad, alta absorción de agua y tendencia a apelmazarse durante su almacenamiento. Los hormigones que contienen hasta un 30% de áridos reciclados mantienen la resistencia de hormigones fabricados con áridos naturales, siempre y cuando el contenido de cemento se aumente ligeramente [60].

Los *neumáticos fuera de uso*, o NFU, empleados como áridos producen una mayor resistencia a la abrasión, durabilidad y elasticidad del hormigón, por lo que podrían ser beneficiosos para construcciones sometidas a impactos o vibraciones, como pavimentos, carreteras y estructuras hidráulicas. Asimismo, la baja densidad que presentan estos hormigones los hace adecuados para aplicaciones en edificación en las que se requiera de un peso reducido. No obstante, el empleo de este material supone una pérdida de resistencia a compresión y flexión que aumenta gradualmente con la cantidad de NFU empleado, de manera que el porcentaje máximo de partículas de NFU a añadir para conseguir hormigones de buena resistencia es del 12,5% [61, 62].

Las *cenizas procedentes de la incineración de la biomasa forestal*, o cenizas de fondo, se utilizan como sustitución parcial de la arena para la producción de morteros y hormigones de baja resistencia. En la fabricación de morteros es posible la sustitución de hasta un 100% en peso de ceniza, logrando características mecánicas similares a los morteros convencionales, además de una mayor consistencia y tiempos de fraguado menores. En la fabricación de hormigones en masa es posible sustituir hasta un 20% de arena por cenizas de fondo, sin producirse excesivas reducciones en las características mecánicas [63, 64]. Asimismo, varios estudios señalan la posibilidad de emplear estas cenizas como reemplazo parcial del cemento, logrando hormigones de resistencia y durabilidad aceptables [65 - 67].

El *vidrio reciclado* posee buenas propiedades mecánicas para ser utilizado como árido. Sin embargo, las partículas de vidrio añadidas al hormigón, y en especial las de tamaño grueso, son atacadas por los álcalis del cemento, dando lugar a una reacción llamada álcali-sílice que ocasiona fisuras en el hormigón por expansión. Es por ello que el porcentaje máximo de vidrio reciclado utilizado en hormigones no debe exceder del 30% en volumen del árido total. La inclusión de cenizas volantes o escoria de horno alto ayudan a mitigar la expansión que sufre el vidrio. También puede añadirse vidrio en polvo al hormigón como adición puzolánica, obteniendo hormigones con una estructura menos porosa y con mayor resistencia y durabilidad [68, 69].

Las *escorias siderúrgicas* procedentes de la fabricación del acero mediante HEA (concretamente las escorias negras, EAFS) son otros de los materiales que se emplean para sustituir los áridos naturales en la fabricación de hormigones, debido a sus buenas propiedades fisicoquímicas y mineralógicas. Varios estudios [59, 70] afirman que el uso de EAFS como árido grueso en hormigón permite que éste alcance una mayor rigidez y resistencia a compresión que con áridos naturales. Por otro lado, el hormigón con escorias es menos

trabajable y más denso que los hormigones ordinarios. Problema que puede ser ventajoso en aquellas construcciones donde el hormigón funciona por gravedad. Otro de los usos de estas escorias es como materia prima en la fabricación de cementos. En 2009 un grupo de investigación [71] analizó la viabilidad del uso de la escoria negra como material cementante suplementario y concluyó que, tras someterlo a un tratamiento de refundición y enfriamiento rápido, para potenciar su comportamiento cementoso y puzolánico, ésta podría reemplazar hasta un 30% de clinker en la mezcla de cemento, manteniendo la misma resistencia a compresión. Otros estudios [72, 73] sostienen que la escoria blanca, o LFS, puede utilizarse como materia prima en la fabricación de clinker de cemento Portland, de manera que se reduce el consumo intensivo de materias primas naturales, energía y emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria del cemento. La incorporación de LFS mejora las propiedades mecánicas del cemento, sin que se vean afectadas sus características mineralógicas. Incluso existen investigaciones recientes en las que se estudia la posibilidad de añadir fibras al hormigón con escorias a modo de refuerzo y mejorar así sus propiedades en aplicaciones como pavimentos, placas o losas de hormigón [26, 74].



Figura 26. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como sustitución de los áridos naturales. De izda. a dcha.: cenizas volantes, RCD y NFU troceados [56, 57, 61].



Figura 27. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como sustitución de los áridos naturales. De izda. a dcha.: cenizas de fondo, vidrio reciclado y EAFS [44, 64, 68].

Otros residuos utilizados como adición en la fabricación de hormigones son los lodos secos de depuradora de aguas residuales o el humo de sílice.

La incorporación de *lodos secos de depuradora de aguas residuales*, en pequeñas cantidades (2,5-5%), permite la obtención de hormigones menos porosos y con resistencias mecánicas

similares o superiores a los hormigones convencionales. La adición de una mayor cantidad de lodos supone una pérdida considerable de resistencia, con lo que se obtienen hormigones de baja resistencia, ideales para la fabricación de baldosas hidráulicas, quitamiedos o barreras de medianas [75].

La aplicación más común para el *humo de sílice* es como adición en la fabricación de cemento. Sin embargo, este material también se emplea en pequeñas cantidades (5-10% del peso del cemento) como adición para mejorar ciertas propiedades del hormigón, como la durabilidad [76].



Figura 28. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como adición del cemento: lodos de depuradora de aguas residuales (izda.) y humo de sílice (dcha.) [75, 76].

#### 4. MATERIALES RECICLADOS UTILIZADOS RECIENTEMENTE EN LOS HCR

El HCR es un tipo de hormigón empleado especialmente para la construcción de estructuras macizas, como presas, o grandes superficies horizontales, como carreteras. Es habitual en el HCR la utilización de aditivos minerales, como las cenizas volantes, la puzolana natural o la escoria, para reducir el aumento de la temperatura adiabática del hormigón y mejorar su durabilidad. En este último año, se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre el uso de residuos provenientes de diferentes industrias en la fabricación de este hormigón.

Como se ha comentado anteriormente, el *polvo de vidrio* es uno de los materiales que se añaden al hormigón como sustitución parcial del cemento, debido a su finura (elevada área superficial), alto contenido en sílice (>70%) y al comportamiento puzolánico que presenta. Este residuo, al añadirlo al HCR, mejora su durabilidad y sus propiedades mecánicas a largo plazo, por no mencionar la reducción de coste y de emisiones nocivas que supone [77].

Debido al aumento del número de vehículos, la producción de neumáticos ha aumentado considerablemente, por lo que el reciclaje de partículas procedentes de *NFU* en HCRs ha sido el foco de atención de muchos investigadores [78 - 80]. Una de las formas de valorizar estos residuos es usarlos como áridos finos en mezclas de pavimentos de HCR. Dado que los NFU reducen la resistencia mecánica del hormigón, un grupo de investigación [81] ha encontrado la manera de mitigar dicha pérdida mediante el empleo de sílice nanométrica. La adición de

hasta un 2% de nanosílice en peso de cemento, junto con la sustitución del 10% en volumen de los áridos finos por partículas de NFU mejora las resistencias a compresión, a flexión y a fractura de los HCR.

Recientemente, un grupo de investigadores ha estudiado la posibilidad de emplear residuos de *polietileno reticulado* como árido grueso en mezclas de pavimentos de HCR. Dicho estudio [82] afirma que reemplazos de hasta el 5% de este desecho aumentan ligeramente la resistencia del hormigón, además de aumentar la ductilidad y la resistencia al agrietamiento del mismo. Reemplazos mayores suponen una pérdida de resistencia, que aumenta regularmente con la cantidad de desechos de polietileno añadido. Estos HCRs son adecuados para la fabricación de pavimentos con poco tráfico, caminos rurales, grandes áreas industriales y aceras.

Debido al método de construcción, el HCR no permite la colocación de barras de acero. Por lo que la transferencia de cargas en pavimentos construidos con este tipo de hormigón puede derivar en fisuras. Recientes estudios [83, 84] han demostrado que la adicción de *macro-fibras sintéticas* a los pavimentos de HCR, pueden mejorar la capacidad de transferencia de las cargas, además de mejorar la durabilidad y las propiedades de resistencia y fractura del hormigón.

El empleo de las *escorias siderúrgicas* en mezclas de HCR es otra de las investigaciones que se llevan a cabo. Uno de los usos de estas escorias es como material cementante suplementario. En el 2016 un equipo de investigación [85] analizó el comportamiento de las mezclas de HCR reemplazando parte del cemento por BFS granuladas. Se concluyó que los HCR con BFS granuladas mostraban un incremento de resistencia a compresión, a flexión, a rotura y a la abrasión que aumentaba con el tiempo. En 2017 otro grupo de investigación [86] estudió la posibilidad de reemplazar parte de los áridos gruesos del HCR por EAFS y parte del cemento por cenizas volantes, logrando hormigones con mejores propiedades mecánicas a largo plazo.

Como se ha comentado, numerosos investigadores han estudiado el reciclaje de las escorias de acero en la fabricación de morteros y hormigones, incluidos los HCR, y han demostrado que las escorias de acería eléctrica (EAFS + LFS) son apropiadas para esta aplicación. Sin embargo, no existen hasta la fecha estudios específicos que informen sobre el uso conjunto de ambas escorias en HCRs. Motivo por el cual se aborda el siguiente estudio bibliográfico, que se expone a continuación.

## 5. HORMIGONES COMPACTADOS A RODILLO CON ESCORIAS DE ACERÍA ELÉCTRICA

En este apartado se analiza, de forma teórica, si es factible o no emplear la escoria negra (EAFS) como parte de los áridos del HCR y la escoria blanca (LFS) como parte del cemento. Al no existir, por el momento, ninguna publicación relacionada con este tipo de hormigón (HCR+EAFS+LFS), a continuación, se discute cuál será el posible comportamiento mecánico y la durabilidad de las mezclas de HCR con escorias de acería eléctrica, basándose para ello en resultados obtenidos por diferentes grupos de investigación que analizaron el efecto de estos subproductos en otros tipos de hormigón.

### 5.1. Pretratamiento de las escorias negras: estabilización volumétrica

Las escorias de acería eléctrica suelen tener compuestos inestables (CaO libre y MgO libre) en su composición química, que en presencia de agua tienden a expandirse, lo que conduce a agrietamientos y deterioros. La CaO libre se hidrata rápidamente en presencia de agua y puede ocasionar grandes cambios de volumen en poco tiempo. La hidratación del MgO libre, en cambio, conduce a fenómenos expansivos a largo plazo.

Los áridos utilizados en hormigón, ya sean de origen natural o artificial, deben mantenerse inertes y no deben reaccionar ni con el agua ni con el cemento. Para poder emplear como árido un subproducto como la escoria negra, que tiene cierto comportamiento expansivo al entrar en contacto con el agua, es necesario realizarle un tratamiento de envejecimiento, de acuerdo a la norma NLT-361/91 [87], antes de obtener el árido siderúrgico para fabricar hormigón, a fin de reducir o eliminar los eventuales fenómenos de expansión de dichos compuestos y que se mantenga inerte durante toda la vida útil del hormigón.

Este tratamiento de envejecimiento se puede llevar a cabo de diferentes maneras: exposición a la intemperie y rociado de agua durante un mínimo de 90 días [58, 86], humectación y volteo periódicos [45, 47], envejecimiento rápido en autoclave [88], etc.

Autores como *M. N.-T. Lam et al.* [86], *M. Frías et al.* [89] o *S. Monosi et al.* [90], afirman que durante el tratamiento de envejecimiento llega un momento en el que la escoria EAF se estabiliza por completo y se vuelve inerte, por lo que es apropiada para usar en mezclas hidráulicas como el HCR.

*Mombelli et al.* [91] alegan que la escoria EAF puede reutilizarse como árido si el contenido de MgO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> están en los rangos de 5-7% y 7-10% en peso, respectivamente, y el contenido de CaO no excede del 30% en peso.

Técnicas como el DSC-DTA (o DCS-TGA) y el análisis XRD son ampliamente utilizadas para determinar el contenido de dichos compuestos [88].

Las escorias blancas (LFS), por su parte, tienen porcentajes mucho mayores de cal y magnesia libres que las negras (constituyen más del 60% de la escoria LF en peso). Durante el proceso de envejecimiento, los expertos [88] aseguran que la escoria blanca no llega a estabilizarse del todo, sigue expandiendo a tiempo infinito, por lo que su uso como árido no es apropiado. Sin embargo, la escoria blanca, debido a su estado polvoriento y a su singular composición mineralógica, muy similar a la del cemento, puede desarrollar ciertas propiedades hidráulicas que conllevan a ganancias de resistencia [92]. Razón por la cual se cree que el uso de la escoria blanca como reemplazo parcial del cemento puede ser viable. *Tamara Herrero* [52], en su Tesis Doctoral sobre el estudio de la hidratación de la escoria blanca, recomienda reemplazos no superiores al 10% en peso de cemento, para morteros de albañilería (no estructurales).

Por tanto, las escorias negras se deben estabilizar volumétricamente (tratamiento de envejecimiento) y agregar en un estado saturado, para evitar que absorban grandes cantidades de agua, aumenten su volumen y acaben deteriorando el hormigón. Las escorias blancas, por el contrario, no es necesario estabilizarlas, ya que en presencia de agua actúan como un agente activo similar al cemento, que dota de cierta resistencia al hormigón.

## 5.2. Dosificación de los HCR con escorias de acería eléctrica

### 5.2.1. Diseño y proporción de la mezcla

La correcta dosificación de los componentes es fundamental para la producción de mezclas de HCR de calidad. Teniendo en cuenta la dosificación comentada en el punto 2.1.3., los criterios a tener en cuenta son los siguientes:

- Sustitución parcial (en peso) de más del 50% de los áridos gruesos por escoria negra.
- Sustitución parcial (en peso) del 5-10% de cemento Portland por escoria blanca. Una parte del contenido reemplazará al cemento y otra parte se empleará como árido fino.
- Baja relación agua/cemento.
- Uso de aditivos que mejoren las características y la puesta en obra del HCR.

No existe una única dosificación. La proporción de los componentes de la mezcla se diseñará para conseguir determinadas características, como durabilidad, resistencia o trabajabilidad.

De acuerdo con *K. H. Khayat et al.* [12], los factores a tener en cuenta en la proporción de la mezcla son los siguientes:

- **Trabajabilidad:** el hormigón debe alcanzar la densidad requerida con un esfuerzo de compactación óptimo. La mezcla debe ser lo suficientemente viable y la segregación debe ser prevenida.
- **Resistencia mecánica:** las resistencias a compresión y a flexotracción deben cumplir los criterios de diseño.

- **Economía:** uso de materiales localmente disponibles, menor consumo de cemento, uso de materiales cementosos suplementarios.
- **Durabilidad y rendimiento:** contracción controlada, bajo agrietamiento, baja permeabilidad al agua, buena resistencia a la abrasión.

Debido a las diferencias en las propiedades frescas del HC y el HCR, la mayoría de las técnicas de dosificación de mezcla disponibles para el HC no se pueden aplicar directamente al diseño de mezcla de HCR. Por lo tanto, varios métodos de proporción de mezcla se han desarrollado específicamente para diseñar mezclas de HCR con características adecuadas [12]. Entre ellos, los más comunes son [12, 86]:

#### *1.- Método de consistencia del suelo.*

Este método se centra en la trabajabilidad del HCR en estado fresco. Para que el HCR se consolide de manera efectiva, la mezcla debe ser lo suficientemente seca para soportar el peso de un rodillo vibratorio pero lo suficientemente húmeda para permitir una buena distribución de la pasta durante la puesta en obra.

La mejor forma de medir la consistencia y trabajabilidad de los HCR es mediante el ensayo de Vebe (*Vebe test*) que, de acuerdo a las normas NLT-308/88 [93] y ASTM C1170 [94], consiste en compactar el hormigón dentro de un molde para medir su asentamiento.

Este método requiere la fijación de parámetros de mezcla específicos, como el contenido de agua, el contenido de materiales cementosos o el contenido de áridos, seguido de la variación de un parámetro para obtener el nivel de consistencia deseado. De esta manera, cada parámetro de mezcla se puede optimizar para lograr las propiedades del HCR frescas y endurecidas deseadas.

#### *2.- Método de compactación del suelo.*

Este método es apropiado cuando se usan áridos de pequeño tamaño junto con un contenido relativamente alto de materiales cementosos. Por lo tanto, las mezclas de HCR para pavimentos generalmente se diseñan usando este método.

El objetivo es producir una mezcla de HCR que tenga suficiente volumen de pasta para recubrir los áridos y llenar los huecos, por lo que el contenido de agua debe ajustarse cuidadosamente para dar como resultado una mezcla lo suficientemente trabajable como para facilitar la obtención de la densidad requerida.

Este método permite establecer la curva de compactación para obtener la máxima densidad seca junto con un contenido de humedad óptimo (ver Figura 29). Autores como *M. N. T. Lam et al.* [86] determinaron el contenido de humedad óptimo de las mezclas de HCR con escorias de acería y cenizas volantes mediante el ensayo Proctor (*Proctor test*).

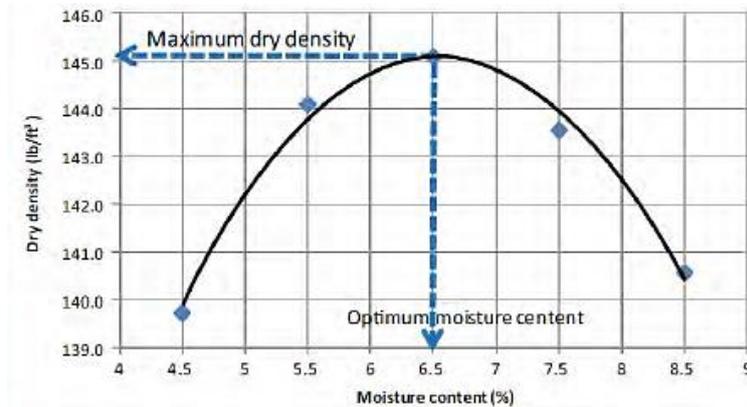


Figura 29. Relación típica de contenido de humedad-densidad establecida en el método de compactación del suelo [12].

El volumen y la composición del aglutinante deben seleccionarse adecuadamente para garantizar que se consigan las características mecánicas requeridas en la mezcla. Asimismo, una granulometría adecuada de los áridos es crucial para conseguir mezclas con el menor contenido de aire ocluido posible. La curva de clasificación de la mezcla no se ajustará a la curva de Fuller, al contener escorias [86]. Sin embargo, la curva debe estar bien ajustada al intervalo recomendado por la norma ASTM C33 [95].

Independientemente de qué método se use, una proporción de mezcla adecuada debe producir la mezcla de HCR más densa posible junto con la máxima trabajabilidad [12].

### 5.2.2. Mezclado de los componentes

Una vez diseñada la mezcla y estabilizado los áridos de escoria negra, se procede al mezclado y amasado de los componentes.

El cemento al entrar en contacto con el agua, reacciona y se hidrata, dando lugar a una pasta moldeable que rodea los áridos y los mantiene unidos. A medida que pasa el tiempo la pasta se endurece y va ganando resistencia debido a las reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento. La escoria blanca, al ser un material pulverulento y estar formado de similares compuestos químicos que el cemento, contribuye a la hidratación del cemento y mejora la resistencia del hormigón a largo plazo.

Durante el amasado, el agua que rodea los áridos tenderá a migrar hacia los poros que no se encuentren saturados, de igual manera que la humedad interior de los áridos migrará hacia el exterior llevando consigo otras especies. La escoria negra, al ser una masa porosa, se producirá una difusión de partículas de agua y otras especies, como puede ser la cal, que contribuirá a la mejora de la unión árido-matriz de cemento.

### 5.3. Propiedades de los HCR con EAFS y LFS

#### 5.3.1. Densidad y peso unitario

Los áridos de EAFS son más densos y pesan más que los naturales, por lo que es de esperar que los HCR con escorias sean más densos y pesados que los HCR convencionales, tanto en fresco como en endurecido. Además, la presencia de la LFS, que actúa como relleno, reduce el porcentaje de aire ocluido, dando lugar a un pequeño aumento en la densidad del HCR. Se recomienda el reemplazo parcial de los áridos naturales, y no el total, a fin de evitar un aumento excesivo en el peso específico de los hormigones, que supondría una pérdida de dispersión de la mezcla y un aumento en la energía de compactación. Problemas que se podrían evitar reemplazando únicamente una parte de los áridos gruesos por escoria negra, de manera que el volumen de huecos necesario para la compactación sea el adecuado.

Diversos autores afirman que el uso de escorias de acería eléctrica en todo tipo de hormigones (hormigón ordinario [L. Coppola et al.][96] [I. Arribas et al.][97] [C. Pellegrino et al.][98], mortero [A. Santamaría et al., 2016][99] [A. Rodríguez et al.][100], HCR [M. N.-T. Lam et al.][86], HAC [A. Santamaría et al., 2017][101], HAR [F. Faleschini et al.][102], etc.) supone un incremento en la densidad con respecto a los hormigones sin escorias.

La densidad aparente de las mezclas se puede evaluar a través de Porosimetría de Intrusión de Mercurio (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP) [99] o con los métodos tradicionales de hormigones (peso sumergido, etc.).

#### 5.3.2. Resistencia mecánica

Las propiedades mecánicas del hormigón dependen principalmente de la calidad de la ITZ. La zona de transición interfacial, o ITZ, es la parte de la matriz de cemento que rodea a los áridos. La estructura de la matriz de cemento en esta zona es diferente a la del resto de la pasta. Esta estructura es variable en función de la naturaleza del cemento, de la calidad de la pasta, del tipo de áridos, de las condiciones de curado, etc. y se caracteriza por presentar etringita (sulfoaluminato de calcio hidratado), alto contenido de cristales de hidróxido de calcio (Portlandita) y una mayor porosidad que en el resto de la pasta [103, 104]. Las características y propiedades de la ITZ juegan un papel importante en las propiedades mecánicas del hormigón (resistencia, rigidez y durabilidad) ya que es la fase más crítica de las 3 (árido, ITZ y matriz cementosa), por lo que cuanto mayor sea la calidad de la ITZ, mejor será el comportamiento mecánico del hormigón [97, 104].

El análisis morfológico-microestructural de la ITZ se puede caracterizar mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), que consiste en barrer la superficie del hormigón con electrones, de manera que se forma una imagen o réplica de la superficie analizada. Esta zona se detecta como un límite más oscuro alrededor de los áridos (ver Figura 30). Se considera que la unión

árido-matriz es fuerte y de buena calidad cuando la región adyacente a los áridos (ITZ) es de bajo espesor (2-4  $\mu\text{m}$ ) y tiene un bajo contenido de poros [97, 105].

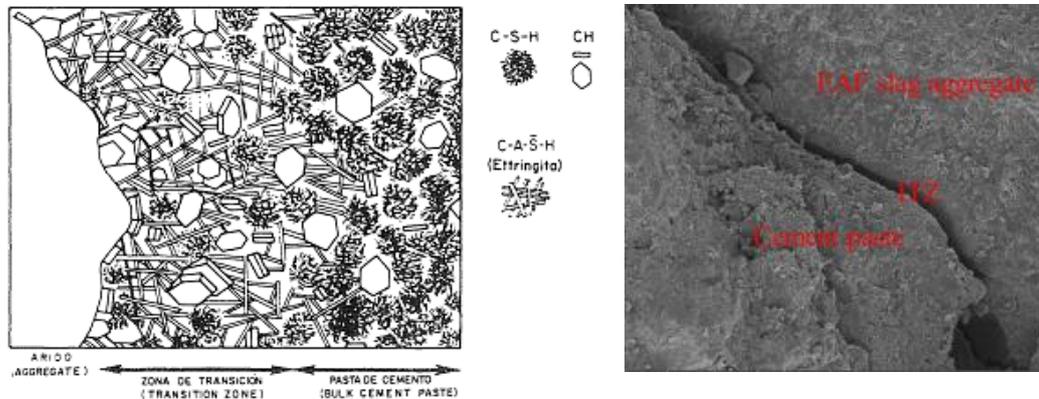


Figura 30. Representación esquemática (izda.) e imagen SEM (dcha.) de la interfase árido-pasta de cemento [86, 104, 105].

Según la literatura [104, 105] la microestructura de la ITZ está formada por una doble capa, conocida como *película dúplex*, que está compuesta por una capa de cristales orientados de hidróxido de calcio de aproximadamente 0,5  $\mu\text{m}$  de espesor, hacia el lado del árido, y una capa de silicato de calcio hidratado (gel C-S-H) de similar espesor, hacia el lado de la pasta. Más alejada de los áridos está la zona de interfase principal, de unos 40-50  $\mu\text{m}$  de espesor, que contiene productos de hidratación de cemento con cristales más grandes de hidróxido de calcio.

La resistencia de la ITZ, y por tanto del hormigón, dependen de:

- Volumen y tamaño de los poros. A edades tempranas el volumen y tamaño de los poros es mayor que en el resto de la masa de cemento, siendo la interfase más débil. A mayores edades, la resistencia de la interfase puede aumentar.
- Contenido y orientación de los cristales de hidróxido de calcio. La orientación preferencial de estos cristales favorece la propagación de microfisuras.
- Presencia de microfisuras.

Por estas tres razones y, muy especialmente por la última, la interfase árido-pasta de cemento es la zona más frágil del hormigón endurecido [104, 105].

Autores como A. Santamaría *et al.* [97], F. Faleschini *et al.* [102], C. Pellegrino *et al.* [98] y M. Ozturk *et al.* [105] afirman que el empleo de partículas de EAFS como árido, tanto grueso como fino, mejora el comportamiento mecánico del hormigón ordinario y de alta resistencia, debido a su textura y morfología singular y a una ITZ de mejor calidad (más pequeña y menos porosa que con áridos naturales). En la siguiente imagen se puede observar cómo la masa de cemento liga mejor con la escoria que con el árido natural, llegando incluso a existir fisuración en la

propia escoria, indicativo de una ITZ de buena calidad. Esto indica, además, que los áridos de EAF son más frágiles que los naturales.

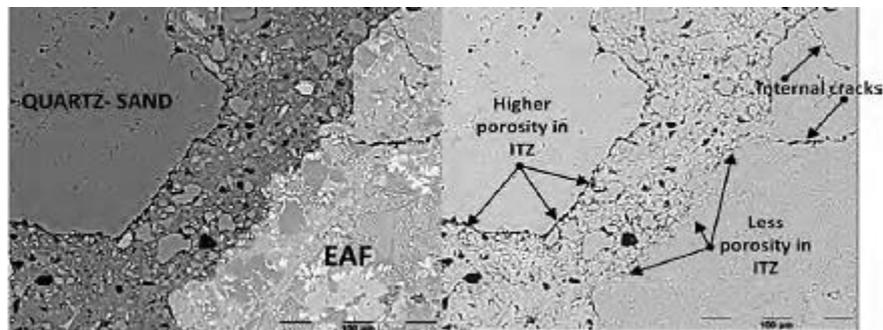


Figura 31. Interfase árido natural-pasta de cemento VS interfase escoria EAF-pasta de cemento [97].

En HCRs, por el contrario, *M. N. T. Lam et al.* [86] manifiestan que el uso de escoria EAF como árido implica una ligera reducción en la resistencia mecánica y en el módulo elástico de los mismos. Valores que decrecen progresivamente al aumentar el contenido de escoria. Los autores comentan que esto puede deberse a dos razones. En primer lugar, las escorias al absorber mayor cantidad de agua, la relación a/c es mayor, lo que da lugar a menores resistencias y a una menor durabilidad. En segundo lugar, la zona que rodea a las partículas de escoria (zona de transición interfacial, o ITZ) es de peor calidad que la que rodea a las partículas de origen natural en HCRs ordinarios, ya que su ancho es de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  (ver Figura 32). Este problema ocurre a causa de la formación de un recubrimiento de calcita durante el proceso de envejecimiento de la escoria EAF, que conlleva a uniones árido-matriz más débiles.

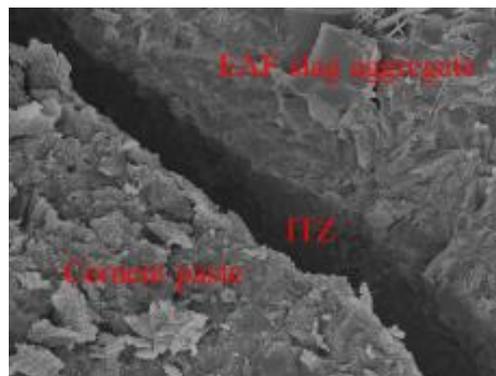


Figura 32. Imagen de la interfase EAF-pasta de cemento mediante SEM (aumento x1000) [86].

Las contradicciones sobre el efecto de las escorias negras en la resistencia mecánica del hormigón pueden deberse al hecho de que se trata de hormigones y tecnologías diferentes. Además, el tipo y porcentaje de los componentes y las características de la mezcla son diferentes, por lo que es necesario realizar estudios adicionales que analicen el comportamiento de la escoria negra en HCRs.

A. Santamaría et al. [99] y J. M. Manso et al. [107] declaran que la escoria blanca mejora la resistencia a largo plazo de los morteros, posiblemente debido a la reacción hidráulica de ciertos componentes, como los aluminatos.

Por lo tanto, se espera que el empleo de ambas escorias mejore las propiedades mecánicas del HCR.

Para conocer la resistencia mecánica que posee el HCR, se deben analizar experimentalmente tres parámetros: la resistencia a compresión (según norma ASTM C39 [108]), la resistencia a flexotracción (según norma ASTM C78 [109]) y la resistencia a tracción indirecta (según ASTM C496 [110]) [12].

- *Resistencia a compresión:*

El ensayo para determinar la resistencia a compresión del HCR se lleva a cabo de la misma manera que en el HC (ver Figura 33).



Figura 33. Ensayo de resistencia a compresión [12].

- *Resistencia a flexotracción:*

El ensayo de resistencia a flexotracción consiste en aplicar una carga gradualmente en una o dos secciones de la probeta apoyada (flexión por tres o cuatro puntos, respectivamente) y registrar la máxima carga aplicada. La resistencia a flexión se calcula usando la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{PL}{bh^2}$$

Donde P es la carga máxima, L es la distancia entre soportes y b y h son el ancho y la altura de la muestra de hormigón.

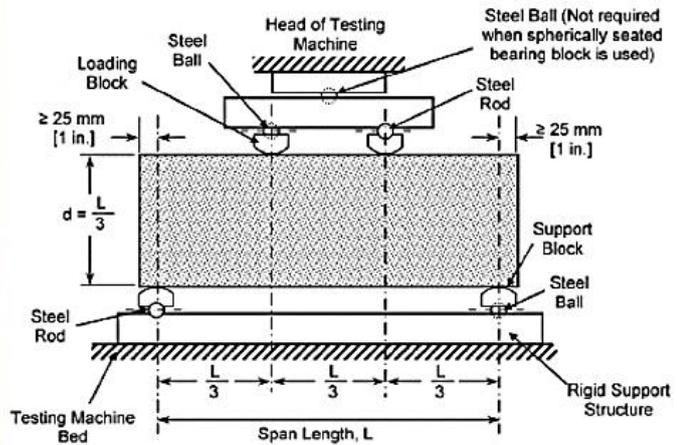


Figura 34. Ensayo de resistencia a flexión a cuatro puntos [12].

◦ *Resistencia a tracción indirecta:*

Este ensayo consiste en aplicar cargas de compresión en la parte superior e inferior de las muestras (generatriz de probetas cilíndricas). La carga máxima que conduce al fallo se registra como la carga pico y la resistencia a la tracción se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$f_t = \frac{P}{\pi DL}$$

Donde P es la carga máxima, L es la longitud de la muestra y D es su diámetro.



Figura 35. Ensayo de resistencia a tracción indirecta [12].

Autores como *F. Autelitano et al.* [111] afirman que el uso de escoria negra garantiza excelentes prestaciones mecánicas, sobre todo en términos de resistencia a tracción indirecta.

### 5.3.3. Rigidez

La rigidez de un hormigón está directamente relacionada con la edad, el tipo de árido, la calidad de la pasta (relación a/c) y, por tanto, con la morfología de la ITZ. La rigidez se determina mediante el valor del módulo de elasticidad, que se obtiene de acuerdo a la norma ASTM C469 [112], ver Figura 36.

Debido a que el HCR es un hormigón con baja relación a/c y a que se crean uniones más fuertes entre la escoria negra y la matriz de cemento, todo indica que los HCR con escorias mostrarán una mejora en la rigidez con respecto a los HCR ordinarios.

*F. Faleschini et al.* [59], *C. Pellegrini et al.* [98] y *S. Monosi et al.* [90] han demostrado que el uso de escoria negra en hormigones convencionales mejora su rigidez. El árido EAF al ser de mejor calidad y la ITZ también, el rendimiento del hormigón es mejor (mejor resistencia y mejor módulo de elasticidad). Por otro lado, *M. N. T. Lam et al.* [86] afirman que el módulo elástico del HCR con escorias negras decrece progresivamente al incrementar el contenido de escoria.

Este desacuerdo por parte de los autores sobre el efecto de las escorias negras en el hormigón puede deberse al hecho de que se trata de hormigones y tecnologías diferentes. Por ello es necesario realizar estudios adicionales que analicen el comportamiento de la escoria en HCR.

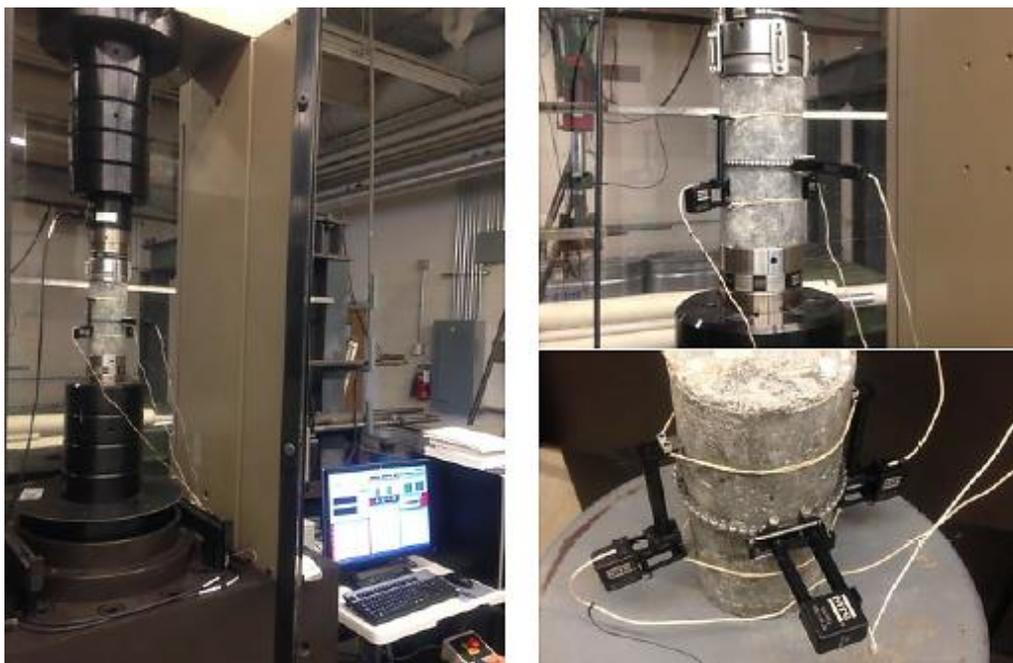


Figura 36. Procedimiento para realizar el ensayo del módulo de elasticidad del HCR [12].

#### 5.3.4. Consistencia y trabajabilidad

El HCR es un tipo de hormigón de consistencia seca, que permite la consolidación bajo rodillos sin segregarse. La consistencia es una de las propiedades más importantes del HCR, que se ve influenciada por la cantidad de agua de amasado, el contenido de cemento, la granulometría, el tamaño máximo y la forma de los áridos. La trabajabilidad representa la facilidad de colocación del hormigón en fresco y proporciona una indicación de su consistencia.

Debido a la naturaleza seca del HCR y al procedimiento mediante el cual se compacta, los métodos tradicionales no son adecuados para evaluar la consistencia del HCR en fresco. La trabajabilidad de una mezcla de HCR se determina experimentalmente midiendo el tiempo de vibración requerido para consolidar por completo un volumen dado de HCR a un nivel de energía específico (ensayo de Vebe) [12].

Según la norma ASTM C1170 [94], el ensayo de consistencia de Vebe se realiza mediante el consistómetro Vebe, que se muestra en la Figura 37.



Figura 37. Consistómetro Vebe empleado para evaluar la consistencia de mezclas de HCR en estado fresco [12].

La escoria negra, debido a su morfología, empeora la trabajabilidad del HCR y dificulta la distribución de la mezcla, además de aumentar el riesgo de segregación [98]. Al emplear la escoria blanca como árido fino, la utilización de ambas escorias crearía una falta de fluidez, produciendo un efecto más negativo todavía en la trabajabilidad del HCR [99].

A. *Rodríguez et al.* [100] han demostrado que la sustitución parcial de los finos y el cemento por escoria blanca implica un aumento en la cantidad de agua requerida para lograr la misma consistencia que la mezcla convencional.

Un excesivo porcentaje de agua conduce a propiedades mecánicas y a durabilidades más bajas e indica que la mezcla tiene demasiada consistencia, debido a su una excesiva evaporación y consiguiente contracción [12].

A fin de evitar dichos problemas, el empleo de aditivos fluidificantes podría mejorar la trabajabilidad del HCR y por tanto ayudar a obtener una consistencia adecuada. Además, es

necesario realizar una buena distribución de tamaño de partículas para asegurar la consolidación adecuada del hormigón fresco bajo la vibración del rodillo y prevenir la segregación durante la colocación del hormigón.

#### 5.3.5. Contracción volumétrica

La contracción del hormigón se define como la pérdida de volumen debido a cambios en el contenido de humedad o en la temperatura.

Los factores que influyen en esta propiedad son la relación a/c y el volumen de los áridos. Cuanto menor sea la relación a/c y cuanto mayor sea el volumen y la diversidad de tamaños de áridos, la contracción del HCR se reduce. La contracción máxima en una mezcla típica de HCR generalmente suele ser entre 400 y 500  $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $> 700 \mu\text{m}/\text{m}$  en HCs) [12].

La contracción del HCR se mide experimentalmente de acuerdo con la norma ASTM C157 [113].

La contracción que sufre el HCR con escorias durante su enfriamiento no debería diferir de la del HCR convencional. Como se recomendó anteriormente, las escorias negras deberían añadirse al hormigón en estado saturado, a fin de evitar problemas de expansión causados por la absorción de agua. Sin embargo, cabe la posibilidad de que dichas escorias no estén completamente saturadas, por lo que la intrusión de agua en los poros no saturados de las escorias puede causar una mayor contracción en el HCR. Este hecho coincide con los resultados obtenidos por *L. Coppola et al.* [96]. Este grupo de investigación ha demostrado que la contracción del hormigón aumenta al agregar una mayor cantidad de escoria EAF al hormigón.

El uso excesivo de escoria blanca como árido fino podría causar problemas de expansión, debido a la hidratación a largo plazo de ciertos compuestos químicos. Dicho aumento de volumen podría compensar la contracción durante el envejecimiento del hormigón, como menciona *J. M. Manso et al.* [107]. Por otro lado, *A. Santamaría et al.* [99] indica que el uso de escoria blanca produce efectos perjudiciales a largo plazo en mezclas endurecidas. Sin embargo, se espera que el uso de porcentajes tan pequeños de escoria blanca como los recomendados (5-10%) no tenga efectos negativos en el HCR.

A fin de evitar cambios excesivos de volumen, que conllevan a acortar la vida útil del HCR, es necesario ajustar el contenido óptimo de agua de la mezcla y emplear dosificaciones apropiadas, así como saturar las escorias negras mediante el tratamiento de envejecimiento. Asimismo, el uso de aditivos que creen capas impermeables podría ser otra solución para evitar dicha pérdida de humedad.

### 5.3.6. Durabilidad

La durabilidad es la capacidad del hormigón para resistir en el tiempo ambientes hostiles, o no, y está directamente relacionada con su capacidad para resistir la penetración de sustancias nocivas en su red de poros. El exceso de porosidad permite la penetración de aire, agua y sustancias agresivas y reduce la durabilidad del hormigón [12]. Por lo que determinar la porosidad y permeabilidad del hormigón es importante para hacerse una idea de su durabilidad.

- *Porosidad y permeabilidad:*

La porosidad y la permeabilidad de la pasta de cemento hidratado tienen una gran influencia en la durabilidad del hormigón. Los HCR con baja permeabilidad resisten la penetración de la humedad en la matriz de hormigón, lo que lleva a una mejor resistencia al hielo-deshielo y una mejor resistencia a los ataques físicos y químicos. Esto se puede conseguir mediante la disminución de la relación a/c, un buen curado y el uso de materiales cementantes suplementarios [12].

La porosidad del HCR se puede evaluar mediante Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP) y la permeabilidad se determina de acuerdo con la norma ASTM C642 [114].

Asimismo, la durabilidad de los HCR depende principalmente de la resistencia a las heladas, al ataque químico y al desgaste, por lo que es necesario evaluar cada una de ellas experimentalmente.

- *Resistencia a ciclos de hielo-deshielo:*

Una de las principales preocupaciones asociadas a los pavimentos de HCR es su resistencia a las heladas en climas fríos [12]. Para evaluar dicha resistencia, una muestra de HCR sumergida en agua se somete a ciclos de *hielo-deshielo* rápidos midiéndose el módulo dinámico de elasticidad, de acuerdo con la norma ASTM C666 [115].

- *Resistencia al ataque químico:*

Cuando el hormigón está expuesto a sales de deshielo, la superficie puede deteriorarse durante los ciclos de *hielo-deshielo*. Para evaluar la resistencia de los HCR a las sales de deshielo, de acuerdo con la norma ASTM C672 [116], la superficie del hormigón se cubre con aproximadamente 6 mm de solución de sal y se somete a ciclos de congelación y descongelación, para finalmente evaluar visualmente la superficie del hormigón [12].

- *Resistencia al desgaste o erosión:*

La resistencia al desgaste de los HCR se mejora mediante el empleo de áridos de tamaños más pequeños, lo que a su vez dificulta su puesta en obra.

Es importante minimizar el contenido de huecos en el hormigón para garantizar una buena durabilidad. Esto se puede conseguir mediante el empleo de áridos de tamaños más pequeños, sin olvidar que en el HCR es necesario un volumen mínimo de huecos para poder llevar a cabo una buena compactación y lograr la densidad esperada.

Estudios relativos al HAR con escoria negra [102] afirman que su uso mejora no solo las propiedades mecánicas del hormigón, sino también su durabilidad en entornos expuestos a cloruros.

#### 5.4. Viabilidad del empleo de escorias de acería eléctrica en HCRs

El empleo de escorias de acería eléctrica (EAFS + LFS) en hormigones compactados a rodillo es una tecnología que a día de hoy está todavía por desarrollar. Por el momento, no existen publicaciones relacionadas con este tipo de hormigones (HCR+EAFS+LFS). Por este motivo, en el presente trabajo se ha discutido, de forma teórica, el efecto de ambas escorias sobre los HCR.

La escoria negra (EAFS) al ser un material de morfología y textura irregular desarrolla una unión entre árido EAF-matriz de cemento más fuerte. Por lo tanto, las propiedades mecánicas y la durabilidad de los HCR mejoran. Sin embargo, las mezclas son más densas y la trabajabilidad del hormigón empeora debido a una falta de fluidez, por lo que el extendido y compactado de la mezcla es más complejo.

La escoria blanca (LFS) tiene un ligero efecto positivo en las propiedades mecánicas del hormigón a largo plazo, debido a su capacidad cementante. Asimismo, esta escoria no causa efectos negativos en el HCR al emplear porcentajes tan pequeños.

A día de hoy únicamente se han realizado pruebas experimentales en morteros estructurales y de albañilería con pequeñas cantidades de escoria blanca (< 10%), que han aportado resultados favorables. Asimismo, existe un desacuerdo en la literatura sobre el efecto de las EAFS en las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón. Sin embargo, tras examinar una serie de publicaciones relacionadas con el tema que concierne al presente trabajo, todo apunta a que el uso de EAFS+LFS en hormigones compactados a rodillo tiene potencial. Para ello es necesario realizar estudios adicionales que analicen el comportamiento de ambas escorias en hormigones hidráulicos.

Cabe decir, además, que la sustitución de áridos naturales por escorias de acería eléctrica, no sólo aporta ventajas medioambientales, sino que también conduce a ciertas ventajas económicas. Por un lado, los fabricantes de hormigón pueden reducir el uso de materias primas (no se espera que el precio del árido siderúrgico supere al del árido natural, por razones evidentes), mientras que, por otro, la industria se evita el pago de cánones de vertido para la

eliminación de estos residuos (ya hay ejemplos en la industria de cómo los aceristas no cobran si los “hormigoneros” les retiran estos materiales de sus plantas).

Por todo ello, se podría decir que la utilización de escorias de acería eléctrica en hormigones compactados a rodillo es completamente viable.

## 6. CONCLUSIONES

La producción de escorias de acero está aumentando en todo el mundo. Por lo tanto, es esencial realizar investigaciones sobre las posibles aplicaciones de este subproducto, a fin de reducir su vertido en vertederos.

Existen diferentes tipos de escorias provenientes de la fabricación del acero, siendo las de acería eléctrica (EAFS y LFS) las que más abundan en la región norte de España, foco del presente TFM. En la actualidad, numerosos equipos de investigación estudian las aplicaciones más adecuadas en las que emplear estas escorias. Una de las más analizadas es la fabricación de hormigones.

En el presente trabajo se ha estudiado el comportamiento del HCR con escorias de acería eléctrica y, tras analizar el efecto de ambas escorias en el HCR, se han extraído las siguientes conclusiones:

- Previo a su uso como árido, las EAFS requieren de un tratamiento de envejecimiento a fin de obviar eventuales fenómenos de expansión.
- El HCR con escorias es más pesado que el HCR convencional.
- Las resistencias mecánicas, el módulo de elasticidad y la durabilidad del hormigón se ven beneficiadas por el uso de las EAFS.
- Las LFS contribuyen ligeramente a la ganancia de resistencia a largo plazo del HCR.
- Ambas escorias empeoran la trabajabilidad y dificultan la ejecución en obra de la mezcla.
- El empleo de aditivos es importante, a fin de garantizar una compactación adecuada y lograr la densidad esperada, siendo preciso analizar a futuro su compatibilidad con estos nuevos áridos siderúrgicos.
- Los efectos de expansión de las LFS en el hormigón son poco significativos, debido a las pequeñas cantidades empleadas y el efecto matriz fijadora de sus compuestos en estas mezclas.

Finalmente, se concluye que el uso de escorias de acería eléctrica en HCRs puede proporcionar mezclas hidráulicas con la calidad suficiente para aplicaciones convencionales previamente mencionadas, empleando proporciones adecuadas y aditivos químicos compatibles.

## 7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

El presente trabajo es el inicio del estudio de hormigones compactados a rodillo con escorias de acería eléctrica. Un desarrollo futuro de esta investigación sería la evaluación experimental del comportamiento mecánico del HCR con escorias negras, realizando las pruebas pertinentes a nivel de laboratorio, con el fin de avanzar en el desarrollo de posibles aplicaciones para las escorias siderúrgicas en pruebas piloto (demostradores).

## 8. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNED. “Los residuos urbanos y su problemática”. < [www2.uned.es](http://www2.uned.es) >
- [2] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. “Diagnóstico del Sector Residuos en España nº 7”. Catálogo de Publicaciones de la Administración General del estado. Abril 2014.
- [3] M. A. González Ortega. “Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF”. Tesis Doctoral. Barcelona, 2015.
- [4] J. Cañas. “Estudio del comportamiento de hormigones con áridos siderúrgicos de horno eléctrico”. Tesis Doctoral. Barcelona, 2012.
- [5] M. Lauber. “Influencia de la calidad de los residuos metalúrgicos granulares utilizados como áridos en las propiedades del hormigón”. Tesis Doctoral. Barcelona, 2009.
- [6] Dialnet. “Comentarios sobre el Concreto Compactado con Rodillo (CCR)”. Revista de la facultad de Ingeniería (1999), p. 9-23.
- [7] M. I. Abu-Khashaba, I. Adam, A. El-Ashaal. “Investigating the possibility of constructing low cost roller compacted concrete dam”. Alexandria Engineering Journal 53 (2014), p. 131-142.
- [8] M. Umar Rashed. “Roller compacted concrete (RCC) innovations in civil constructions world”. Sulaymaniyah (Iraq), 2012.
- [9] F. Ortega Santos. “Hormigón compactado con rodillo”. Revista de obras públicas (1988), p. 959-975.

- [10] C. Zollinger. "Recent advances and uses of roller compacted concrete pavements in The United States". Paving Solutions, CEMEX. Houston, 2014.
- [11] S. Faisal Saleh, F. Farooq Rather, M. Jasif Jabbar. "Roller-compact concrete (RCC) and its application in modern world of Technology". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 4 (2017), p. 87-91.
- [12] K. H. Khayat, N. A. Libre, "Roller Compacted Concrete: Field Evaluation and Mixture Optimization," A Natl. Univ. Transp. Cent. Missouri Univ. Sci. Technol., vol. August, no. NUTC R363, p. 118, 2014.
- [13] "Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16)". BOE 153 (2016), p. 45755-45824. Tablas AVIII.2.2.3 y AVI.3.
- [14] C. Chhorn, S. J. Hong, S.-W. Lee. "A study on performance of roller-compact concrete for pavement". Construction and Building Materials 153 (2017), p. 535-543.
- [15] Portland Cement Association. "Production of Roller-Compacted Concrete". Illinois, 2006.
- [16] J. A. Galizzi. "Hormigón Compactado con Rodillo, estudio y aplicación en carreteras". Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid.
- [17] National Ready Mixed Concrete Association (2013). "Roller-Compacted Concrete". < [www.rollercompact.org](http://www.rollercompact.org) >
- [18] "Roller Compacted Concrete Production and Construction". American Concrete Pavement Association (ACPA). September 2015.
- [19] D. Zollinger. "Tech Brief on Roller-Compacted Concrete Pavement". CMS Engineering Group. June 2016.
- [20] M. B. Alonso, M. Bangerter, J. Biagini, M. Cavacini. "Hormigón Compactado con Rodillo de uso vial". Noviembre 2002.
- [21] Google Sites. "Puesta en obra del HCR". < [sites.google.com](http://sites.google.com) >
- [22] P. Landa. "Fabricación del hierro y del acero. Parte 1: Horno alto". Obtención y Fabricación de Materiales. Universidad del País Vasco, curso 2016-2017.
- [23] UNESID (2017). "Qué es el acero". < [www.unesid.or](http://www.unesid.or) >
- [24] UNESID (2017). "Mapa siderúrgico nacional". < [www.unesid.or](http://www.unesid.or) >
- [25] UNESID. "IRIS 2013. Informe 2013 sobre el Reciclaje del acero en la Industria Siderúrgica Española." Madrid, 2013.

- [26] J. A. De la Fuente Alonso. “Comportamiento del hormigón con áridos siderúrgicos (EAF) reforzado con fibras”. Tesis Doctoral. Universidad de Burgos, 2015.
- [27] World Steel Association (2017). “World crude Steel output increases by 5.3% in 2017”. <[www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)>
- [28] World Steel Association (2016). “World crude Steel output increases by 0.8% in 2016”. <[www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)>
- [29] World Steel Association (2017). “World steel in figures 2017”. <[www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)>
- [30] World Steel Association (2017). “Steel Statistical Yearbook 2017”. <[www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)>
- [31] World Steel Association (2017). “About steel”. <[www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)>
- [32] J. Calleja. “Escorias y cementos siderúrgicos”. Materiales de construcción 186 (1982), p. 11-36.
- [33] CEDEX (2011). “Escorias de Horno Alto”. Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [34] National Slag Association (2013). “Blast Furnace Slag”. <[www.nationalslag.org](http://www.nationalslag.org)>
- [35] EUROSLAG (2017). “Properties”. <[www.euroslag.com](http://www.euroslag.com)>
- [36] M. Reuter, Y. Xiao and U. Boin. “Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes”. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
- [37] J. Hernández. “Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la escoria negra de acero de horno de arco eléctrico”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya, 2007.
- [38] D. W. Lewis. “Properties and Uses of Iron and Steel Slags”. National Slag Association (1982).
- [39] I. Z. Yildirim, M. Prezzi. “Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag”. Advances in Civil Engineering (2011), 13 pages.
- [40] IHOBE, S.A. “Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escorias de acería”. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. Febrero, 1999.
- [41] Arcelor Mittal (2007). “El proceso siderúrgico” 2ª edición revisada y corregida. Capítulo 3: La acería. El horno eléctrico de arco, p. 281-292.
- [42] Google Sites. “Horno Eléctrico de Arco. Componentes”. <[sites.google.com](http://sites.google.com)>

- [43] P. Landa. “Acería eléctrica. Tema 1: Horno Eléctrico de Arco”. Obtención y Fabricación de Materiales. Universidad del País Vasco, curso 2016-2017.
- [44] CEDEX (2013). “Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico”. Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [45] P. Landa. “Acería eléctrica. Tema 2: Metalurgia secundaria”. Obtención y Fabricación de Materiales. Universidad del País Vasco, curso 2016-2017.
- [46] J. M. Manso, J. J. González and J. A. Polanco. (2004). “Electric Arc Furnace Slag in Concrete”. Journal of Materials in Civil Engineering 16 (6).
- [47] S. Oliver. “Las escorias siderúrgicas: áridos diseñados para el presente y el futuro”. Zuncho 31 (2012), p. 13-23.
- [48] I. Arribas García. “Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad tecnológica”. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco, 2011.
- [49] J. M. Manso, J. A. Polanco, M. Losañez and J. J. González (2006). "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate." Cement & Concrete Composites 28, p. 528-534.
- [50] M. Tossavainen, F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lidstrom Larsson and B. Bjorkman (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." Waste Management 27 (10): p. 1335-1344.
- [51] P.E. Tsakiridis, G. D. Papadimitriou, S. Tsivilis and C. Koroneos. "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." Journal of Hazardous Materials 152 (2008), p. 805-811.
- [52] J. A. Polanco, J. M. Manso, J. Setien and J. J. González. "Strength and Durability of Concrete Made with Electric Steelmaking Slag." Aci Materials Journal 108 (2011), p. 196-203.
- [53] T. Herrero Vázquez. “Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de HEA: aplicación en pastas y morteros de cemento”. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco, 2015.
- [54] Y. Sheen, H. Wang and T. Sun. (2013). “A study of engineering properties of cement mortar witho stainless steel oxidizing slag and reducing slag resource materials”. Construction and Building Materials 40, p. 239-245.
- [55] E. K. Anastasiou, I. Papayianni and M. Papachristoforou. (2014). "Behavior of self-compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement". Materials and Design 59, p. 454-460.

- [56] CEDEX (2011). “Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias”. Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [57] CEDEX (2014). “Residuos de construcción y demolición”. Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [58] M. A. Barbudo. “Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias”. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, 2012.
- [59] F. Faleschini, K. Brunelli, M. A. Zanini, M. Dabalà and C. Pellegrino. “Electric Arc Furnace Slag as Coarse Recycled Aggregate for Concrete Production”. J. Sustain. Metall. 2 (2016), p. 44 - 50.
- [60] CEDEX (2012). “Reciclado de pavimentos de hormigón”. Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [61] CEDEX (2013). “Neumáticos Fuera de Uso (NFU)”. Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [62] A. Sofi. “Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review”. Engineering Journal (2017).
- [63] R. Siddique. “Utilization of wood ash in concrete manufacturing”. Resources, Conservation and Recycling 67 (2012), p. 27 - 33.
- [64] CEDEX (2014). “Cenizas procedentes de la biomasa”. Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [65] M. da Luz Garcia, J. Sousa-Coutinho. “Strength and durability of cement with forest waste bottom ash”. Construction and Building Materials 41 (2013), p. 897 - 910.
- [66] S. Chowdhury, M. Mishra, O. Suganya. “The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview”. Ain Shams Engineering Journal 6 (2015), p. 429 - 437.
- [67] I. Martínez-Lage, M. Velay-Lizancos, P. Vázquez-Burgo, M. Rivas-Fernández, C. Vázquez-Herrero, A. Ramírez-Rodríguez, M. Martín-Canob. “Concretes and mortars with waste paper industry: Biomass ash and dregs”. Journal of Environmental Management 181 (2016), p. 863 - 873.
- [68] CEDEX (2015). “Vidrio reciclado”. Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [69] A. Mohajerani, J. Vajna, T. H. Cheung, H. Kurmus, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk. “Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review”. Construction and Building Materials 156 (2017), p. 443 - 467.

- [70] A. Santamaría, J. T. San-José, I. Vegas, V. Ortega-López, J. J. González. "Performing self-compacting concrete with electric arc-furnace slag as aggregates". MATEC Web of Conferences 120, 03003 (2017).
- [71] L. Muhmood, S.Vitta, D.Venkateswaran. "Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags". Cement and Concrete Research 39 (2009), p. 102-109.
- [72] A. Sáez-de-Guinoa Vilaplana, V. J. Ferreira, A. M. López-Sabirón, A. Aranda-Usón, C. Lausín-González, C. Berganza-Conde, G. Ferreira. "Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement". Construction and Building Materials 94 (2015), p. 837 - 843.
- [73] R. I. Iacobescu, G. N. Angelopoulos, P. T. Jones, B. Blanpain, Y. Pontikes. "Ladle metallurgy stainless steel slag as a raw material in Ordinary Portland Cement production: a possibility for industrial symbiosis". Journal of Cleaner Production 112 (2016), p. 872 - 881.
- [74] V. Ortega-López, J. A. De la Fuente, M. Skaf, A. Santamaría, A. Aragón and J. M. Manso. "Performance of steel-making slag concrete reinforced with fibers". MATEC Web of Conferences 120, 04001 (2017).
- [75] CEDEX (2013). "Lodos de depuradora". Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [76] CEDEX (2012). "Humo de sílice". Ficha técnica. Catálogo de residuos utilizables en construcción.
- [77] A. Omran, D. Harbec, A. Tagnit-Hamou, R. Gagne. "Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study". Construction and Building Materials 133 (2017), p. 450 - 458.
- [78] A. Meddah, M. Beddar, A. Bali. "Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement". Journal of Cleaner Production 72 (2014), p. 187 - 192.
- [79] J. Lv, K. Zhou, Q. Du, H. Wu. "Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete". Construction and Building Materials 91 (2015), p. 145 - 149.
- [80] M. Fakhri, K. F. Saberi. "The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement". Journal of Cleaner Production 129 (2016), p. 521 - 530.
- [81] B. S. Mohammed, M. Adamu. "Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica". Construction and Building Materials 159 (2018), p. 234 - 251.

- [82] M. Shamsaei, I. Aghayan, K. A. Kazemi. "Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement". *Journal of Cleaner Production* 165 (2017), p. 290 - 297.
- [83] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, A. N. Amir Khanian. "Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers". *Construction and Building Materials* 135 (2017), p. 440 - 446.
- [84] H. Rooholamini, A. Hassani, M. R. M. Aliha. "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology". *Construction and Building Materials* 159 (2018), p. 517 - 529.
- [85] S. Krishna Rao, P. Sravana, T. Chandrasekhar Rao. "Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS". *Construction and Building Materials* 114 (2016), p. 925 - 933.
- [86] M. N. T. Lam, S. Jaritngam, D.-H. Le. "Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties". *Construction and Building Materials* 154 (2017), p. 482 - 495.
- [87] NLT-361/91. "Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería".
- [88] T. Herrero, I. J. Vegas, A. Santamaría, J. T. San-José, M. Skaf. "Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars". *Construction and Building Materials* 123 (2016), p. 404-413.
- [89] M. Frías, J. T. San-José, I. Vegas. "Árido siderúrgico en hormigones: proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos potencialmente expansivos". *Materiales de Construcción* 60, p. 33 - 46.
- [90] S. Monosi, M. L. Ruello, D. Sani. "Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production". *Cement and Concrete Composites* 66 (2016), p. 66-72.
- [91] D. Mombelli, C. Mapelli, S. Barella, C. Di Cecca, G. Le Saout, E. Garcia-Diaz. "The effect of chemical composition on the leaching behaviour of electric arc furnace (EAF) carbon steel slag during a standard leaching test". *J. Environ. Chem. Eng.* 4 (2016), p. 1050 - 1060.
- [92] J. Setién, D. Hernández, J. J. González. "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material". *Construction and Building Materials* 23 (2009), p. 1788-1794.
- [93] NLT-308/88. "Consistencia del hormigón seco con el equipo V.B.".

- [94] ASTM C1170/C1170M. "Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table".
- [95] ASTM C33/C33M. "Standard Specification for Concrete Aggregates".
- [96] L. Coppola, A. Buoso, D. Coffetti, P. Kara, S. Lorenzi. "Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete". *Construction and Building Materials* 123 (2016), p. 115-119.
- [97] I. Arribas, A. Santamaria, E. Ruiz, V. Ortega-Lopez, J. M. Manso. "Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete". *Construction and Building Materials* 23 (2015), p. 68-79.
- [98] C. Pellegrino, P. Cavagnis, F. Faleschini, K. Brunelli. "Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate". *Cement and Concrete Composites* 37 (2013), p. 232-240.
- [99] A. Santamaría, E. Rojí, M. Skaf, I. Marcos, J. J. González. "The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars". *Construction and Building Materials* 106 (2016), p. 364-373.
- [100] A. Rodríguez, J. M. Manso, A. Aragón, J. J. González. "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag". *Resources, Conservation and Recycling* 53 (2009), p. 645-651.
- [101] A. Santamaría, A. Orbe, M. M. Losañez, M. Skaf, V. Ortega-Lopez, J. J. González. ". Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate". *Materials and Design* 115 (2017), p. 179-193.
- [102] F. Faleschini, M. A. Fernández-Ruíz, M. A. Zanini, K. Brunelli, C. Pellegrino, E. Hernández-Montes. "High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties". *Construction and Building Materials* 101 (2015), p. 113-121.
- [103] A. Sidorova. "Estudio del efecto de la naturaleza del árido reciclado en la microestructura y propiedades de la zona de transición árido-pasta de cemento". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [104] P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro. "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials". Fourth ed., McGraw-Hill, New York, 2014.
- [105] F. Puertas, A. Palomo, M. T. Blanco. "Microestructuras interfaciales en el hormigón". *Materiales de construcción* 41 (1991), p. 91-106.
- [106] M. Ozturk, O. Akgol, U. K. Sevim, M. Karaaslan, M. Demirci, E. Unal. "Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of

- mortar containing electric arc furnace slag". *Construction and Building Materials* 165 (2018), p. 58-63.
- [107] J. M. Manso, A. Rodríguez, A. Aragón, J. J. González. "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag". *Construction and Building Materials* 25 (2011), p. 3508-3519.
- [108] ASTM C39/C39M-14. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
- [109] ASTM C78/C78M. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete".
- [110] ASTM C496/C496M. "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
- [111] F. Autelitano, F. Giuliani. "Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties". *Construction and Building Materials* 113 (2016), p. 280-289.
- [112] ASTM C469-02. "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".
- [113] ASTM C157/C157M. "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete".
- [114] ASTM C642-13. "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".
- [115] ASTM C666/C666M. "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing".
- [116] ASTM C672/C672M. "Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals".