

Uso potencial de Escorias de Acero Inoxidable en la fabricación de Hormigón Autocompactante*

*Potential use of stainless steel slag waste in manufacturing self-compacting concrete***

Julia Rosales García^a, José Luis Díaz López^b, Francisco Agrela Sainz^{*,c}, Juan F.

Almagro Bello^d y Esther Quirós Pino^e, Manuel Cabrera Montenegro^a

^a Dr. Area of Construction Engineering, University of Cordoba, Cordoba, Spain

^b PhD student, Area of Construction Engineering, University of Cordoba, Cordoba, Spain

^c Prof. Dr. Area of Construction Engineering, University of Cordoba, Cordoba, Spain

^d Laboratory & Research Sec. Manager, Acerinox Europa S.A.U., Los Barrios, Cadiz, Spain

^e Technical Department. Laboratory Section, Acerinox Europa S.A.U., Los Barrios, Cadiz, Spain

RESUMEN

El volumen de escorias generadas en un sector en constante crecimiento como es la producción de acero inoxidable conlleva el planteamiento de nuevas vías para su reutilización. Este trabajo muestra la viabilidad de uso de escorias de acero inoxidable como sustituto de filler calizo en la fabricación de hormigón autocompactante.

Se estudió la influencia de diferentes tratamientos aplicados a las escorias en las propiedades físicas y químicas. Por otro lado, se ha analizado el comportamiento mecánico, así como la durabilidad adquirida en el hormigón autocompactante.

Se obtuvieron resultados muy alentadores, ya que se demuestra a través de esta investigación, la posible aplicación de estos SS como material de construcción, mejorando la sostenibilidad y promoviendo procesos de economía circular, que se logran mediante la minimización de la eliminación y acumulación de residuos.

ABSTRACT

The volume of slags generated from the steel industry, is a source of possible resources which is constantly increasing. Specifically, in the production of stainless steel, a specific and singular slags with unique characteristics are obtained, which allow consider an approach aimed at their use in new recycling ways.

This work shows the feasibility of using stainless steel slags (SSs) as a substitute for limestone filler in the manufacture of self-compacting concrete. The influence of different treatments applied to slags on physical and chemical properties were studied. On the other hand, the mechanical behaviour, as well as the durability acquired in self-compacting concrete, has been analyzed.

Very encouraging results were obtained, since it is demonstrated through this research, the possible application of these SSs as a construction material, improving sustainability and promoting circular economy processes, which are achieved through the minimization of the waste disposal and accumulation

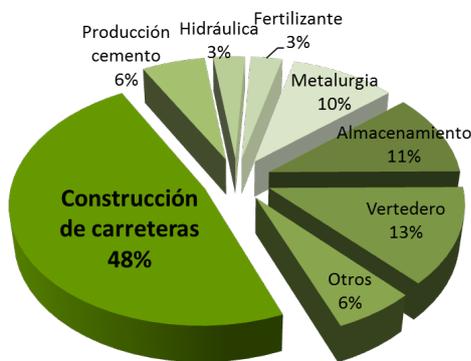
PALABRAS CLAVE: Escorias acero inoxidable, hormigón autocompactante, resistencia y durabilidad

KEYWORDS: stainless steel slag, self-compacting concrete, mechanical and durability properties

1. Introducción

La fabricación y producción de materiales siderúrgicos a partir de diferentes materias primas, en sus diversos procesos industriales, conlleva la generación de diferentes residuos. El principal residuo generado en volumen, en los procesos de fabricación de estos materiales lo constituyen las escorias de acero.

Las escorias de acero se han venido reciclando en diferentes sectores de producción, como agricultura para tratamiento de suelos sulfato-ácidos, en ingeniería civil como material de construcción, ya sea en la conformación de explanadas, bases y sub-bases de carreteras, en capa de rodadura, así como aditivo al clinker en la producción de cemento, entre otras.



1]

Por lo general, la gran mayoría de las investigaciones, muestran que las escorias de acero se han utilizado esencialmente en el sector de la construcción, limitando su uso como árido para hormigón y como adición mineral para cemento. Los posibles cambios volumétricos que se obtienen durante el proceso de fraguado de la pasta de cemento, así como los procesos de carbonatación, serían los inconvenientes más relevantes para el reciclaje de estas escorias, a

parte de las desventajas que pueden acarrear la presencia de cal libre y magnesio en exceso, lo cual puede producir deformaciones excesivas en los procesos de fraguado y curación de materiales base cemento [2, 3].

Los estudios centrados en el uso de Escorias de Acero Inoxidable (EAI), son más reducidos en relación a los relacionados con las escorias de aceros comunes. Las EAI son obtenidas tras un proceso de tratamiento específico, que incluye una trituración para conseguir una distribución de tamaño de partícula continua y tamaño similar a áridos comunes, que permitan ser aptos para su uso como árido en hormigón. Los hormigones fabricados con EAI, han demostrado propiedades mecánicas y de durabilidad similares, o incluso mejores, en comparación con los hormigones convencionales, a pesar de las dificultades que pueden aparecer en el diseño de dosificaciones y su fabricación [4]. El fenómeno de la difusión de cloruros en el interior de las masas de hormigón, puede ser relevante, si estos materiales entran en contacto con el ambiente marino o directamente con el agua de mar, ya que suelen presentar una porosidad superior a los hormigones convencionales [5, 6].

Por otro lado, Rosales y col, 2017 [7], estudiaron las posibilidades de usar EAI como adición mineral para la fabricación de cementos puzolánicos o con adiciones (CEM-IV y CEM-II). En esta investigación se comprobó un incremento de las resistencias a compresión y flexión obtenidas en morteros con adiciones minerales de EAI, en contraste con las que se aplicaron cenizas volantes de carbón (CVC).

Las características físico-químicas de las EAI, ya sea el tamaño de partículas o el contenido en óxido de calcio, así como sus propiedades

puzolánicas, permiten considerarlas como aptas para la fabricación de hormigones autocompactantes (HAc), sustituyendo filler calizo, componente habitualmente aplicada en este tipo de hormigones.

Los HAc presentan una consistencia que hace que se compacten por la mera acción de la gravedad, llenando encofrados y discurriendo entre las armaduras sin necesidad de aplicar medios de compactación, esto se consigue mediante una reducción de árido grueso y aumento de fino.

Subproductos industriales como cenizas volantes de carbón, humo de sílice, escoria de alto horno, metacaolín, etc., se usan generalmente como materiales para la elaboración de HAc reciclado [8, 9]. Existen diversos estudios en los que se han utilizado residuos como sustituto de la fracción fina en la fabricación de HAc, obteniendo resultados muy positivos. Entre ellos, cabe destacar la utilización de polvo de mármol, que es residuo con alto contenido en CaCO_3 [10]. La incorporación de este residuo mejora considerablemente la trabajabilidad de HAc con una tasa de sustitución del 100% del filler calizo, mejorando las propiedades respecto al HAc convencional [10, 11].

Las escorias de acero convencional, que son de horno de arco eléctrico (EAE) o de alto horno (EAH), también han sido aplicadas en la fabricación de HAc, pero mayoritariamente como sustituto de la fracción gruesa y media, debido a su peculiar granulometría similar a la zahorra artificial [12]. Al aplicar EAH en la fabricación de hormigones, se obtuvo un buen comportamiento en estado fresco, así como un incremento en las propiedades mecánicas y de durabilidad del HAc. Se observaron mejores resultados en las propiedades mecánicas y de durabilidad en HAc fabricados con EAI cuando se aplicaron como sustituto de la fracción fina [4].

Los resultados de los estudios indicaron que al aplicar un mayor contenido de EAH como árido,

se reduce la fluidez del HAc debido a la rugosidad y a la angulosidad de las partículas, incrementándose la fricción intergranular. Adicionalmente, el uso de estas EAH como árido condujo al aumento de la resistencia a compresión, relacionado a una mejoría en la disposición de la interfaz pasta-árido.

En general, se han realizado muchos más estudios centrados en la aplicación de EAH como áridos en la fabricación de HAc que con EAI. Por ese motivo, y observando que las EAI son materiales con estructura granular de tipo vítreo, y que están compuestos principalmente de varios óxidos metálicos como CaO , SiO_2 y Al_2O_3 , se plantea la realización de este trabajo.

Las características de la EAI difieren de las EAH o EAE debido principalmente a los elementos adicionales de aleación, como cromo y níquel, que contienen. En general, y según se ha observado en estudios previos, las EAI podrían utilizarse en el sector de la construcción, debido a sus características físico-químicas y su puzolanicidad [7].

En el presente estudio se estudiaron las propiedades de las EAI para su uso como sustituto de filler calizo en HAc. Las EAI se procesaron aplicando tres tratamientos diferentes, de manera que se fabricaron amasadas que incluyeron EAI no procesadas (EAI-NP), trituradas y tamizadas (EAI-T) y calcinadas (EAI-C).

Se caracterizaron, analizando las propiedades físicas y químicas de las EAI, y también se llevó a cabo un estudio del comportamiento mecánico y de las propiedades de durabilidad de HAc fabricados con EAI. Los valores de resistencia a la compresión fueron muy similares a los obtenidos en la mezcla de control HAc. El comportamiento mecánico mejoró cuando los EAI fueron tratados mediante procesos de trituración y calcinación. En cuanto a los parámetros de durabilidad, el uso de EAI conduce a una mejora del rendimiento como barrera para reducir la penetración de iones

cloruro, una característica esencial para evitar la degradación. Y por último, la aplicación de estas EAI en HAc, condujo a una disminución en la penetración de la carbonatación y en la penetración del agua.

2. Metodología experimental

2.1 Materiales

Escorias de Acero Inoxidable:

Las EAI fueron procesadas en laboratorio obteniéndose tres materiales diferentes para su análisis (Figura 2): **EAI** (escoria de acero inoxidable secada en estufa durante 24 horas cribadas con un tamaño de partícula no superior a 1 mm), **EAI-T** (escoria de acero inoxidable secada en estufa durante 24 horas y triturada, con un tamaño de partícula no superior a 0.25 mm) y **EAI-C** (escoria de acero inoxidable calcinada, sometidas a una calcinación en horno a 800 °C durante 24 h).



Figura 2. Procesamientos EAI

Se comprobó un mayor tamaño de partículas de las EAI en comparación con un Cemento Portland. El tratamiento de trituración, como era de esperar, disminuyó el tamaño de partículas (Figura 3).

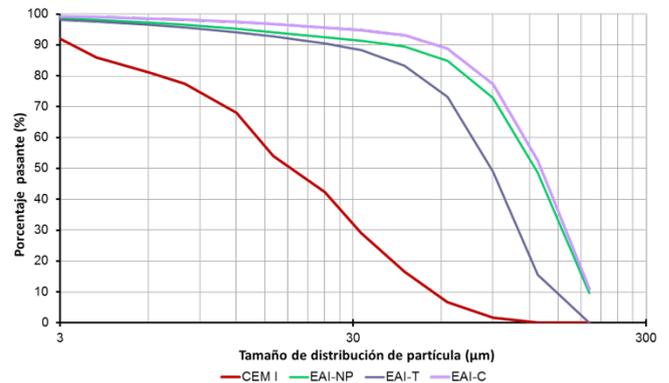


Figura 3. Distribución de tamaño de partículas

Las propiedades físicas mostraron una alta densidad y absorción de las distintas EAI procesadas. El tratamiento del material mediante procesos de trituración y calcinación redujo la densidad, al igual que ocurrió con la absorción del material.

En relación a las propiedades química, las EAI presentan elevados contenidos de SiO₂ y CaO. No se observaron cambios significativos de los componentes elementales de las EAI a las que se aplicó algún tratamiento.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas EAI.

	EAI	EAI-T	EAI-C	
Propiedades físicas				
Densidad-SSD (kg/m ³)	2.06	1.8	1.69	
Absorción (%)	6.12	5.31	5.44	
Propiedades químicas				
Componentes elementales (%)	SiO ₂	28.30	29.88	29.04
	Al ₂ O ₃	5.64	5.73	5.64
	Fe ₂ O ₃	3.09	1.31	2.30
	CaO	42.09	44.51	43.11
	MgO	10.97	11.68	11.22
	SO ₃	0.39	0.34	0.33
Cloruros solubles en agua	0.025	0.017	0.016	

Debido a que los cloruros pueden producir corrosión en las armaduras utilizadas en combinación con el hormigón para elementos estructurales y afectar a los parámetros de durabilidad [13], se evaluó la presencia de cloruros solubles en agua. Los resultados obtenidos mostraron una disminución de la presencia de cloruros (g/100 g) en todas las muestras de EAI que han sido procesadas.

Áridos

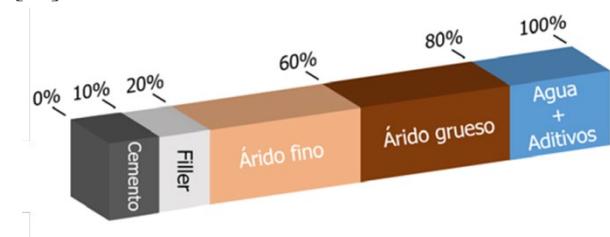
Los áridos naturales utilizados en este trabajo fueron suministrados por Pretersa Prenavisa, empresa dedicada a la ingeniería, diseño y fabricación de hormigones, por lo que su materia prima (arena, filler y grava), cumple con las especificaciones técnicas para su uso en HAC. Cada uno de los áridos se agrupó según su granulometría considerando la fracción 4-20mm para la grava, la fracción 0-40mm para la arena y 0-20mm para el filler calizo.

Cemento

El cemento utilizado fue CEM I 42,5R suministrado por la empresa Cementos Portland Valderrivas.

2.2 Diseño dosificaciones HAC

Los materiales empleados en la fabricación del HAC no difieren de los del hormigón convencional, aunque se hace necesario incrementar sustancialmente la aplicación de áridos de granulometría muy fina (partículas que pasan por el tamiz 0.125 mm), por lo que las proporciones de los áridos más gruesos disminuyen. De manera adicional, se incorporan aditivos para obtener las propiedades de consistencia y autocompactabilidad requeridas [14].



[14]

Como se ha comentado previamente, se ha llevado a cabo la sustitución de filler calizo por EAI con diferentes tratamientos, como estrategia para su fabricación.

Se utilizó el mismo método de mezcla para todas las amasadas. Se introdujo el árido grueso en la amasadora, seguido del árido fino y filler o EAI y el 50% del total de agua de amasado. La mezcla se homogeneizó durante cinco minutos, y posteriormente, se añadieron el cemento y el aditivo disuelto en el agua restante y se mezclaron durante 10 min.

A continuación, se determinó la consistencia y se fabricaron las probetas. Después de 24 h, las muestras se retiraron de sus moldes y se curaron

en la cámara de curado a una temperatura ambiente de 20 °C y 100% de humedad relativa. Este estudio se ha realizado considerando la consistencia y el volumen de material total producido, de esta forma, se consigue una dosificación óptima que se asimile a la de control, sustituyendo el filler calizo por diferentes cantidades de EAI con los distintos procesamientos aplicados. (Tabla 2).

Se fabricaron dos grupos de hormigones HAC-30 y HAC-50 y cuatro series de amasadas en cada uno de ellos:

HAc – hormigones de control fabricados con filler calizo.

HAc-EAI – Esta segunda serie de HAc se fabricó con EAI sin procesar, y controlando parámetros como humedad, densidad, volumen, consumo de agua y aditivos.

HAc-EAI-T – Fabricación de HAc con EAI procesadas mediante procesos de trituración.

HAc-EAI-C – Fabricación de HAc con EAI que fueron calcinadas a 800° C.

Tabla 2. Dosificaciones HAC-30 y HAC-50

	ARENA (0-4mm)	GRAVA (4-20mm)	CEMENTO	FILLER	ADITIVO	AGUA	Relación				
							A/C	EIA- NP	EAI- T	EAI- C	
HAC-30	H30-CONTROL	1000	700	325	125	3.41	195	0.60	-	-	-
	H30-EAI	1000	700	330	-	3.3	210	0.64	115	-	-
	H30-EAI-C	1000	700	325	-	3.25	205	0.63	-	125	-
	H30-EAI-T	1000	700	325	-	3.25	205	0.63	-	-	125
HAC-50	H50-CONTROL	1000	700	450	20	4.95	180	0.40	-	-	-
	H50-EAI	1000	700	450	-	4.90	185	0.41	20	-	-
	H50-EAI-C	1000	700	450	-	4.90	185	0.41	-	20	-
	H50-EAI-T	1000	700	450	-	4.90	185	0.41	-	-	20

2.2 Ensayos sobre HAc fresco y HAc endurecido

La consistencia fluida de los HAc es una propiedad característica de esta tipología de hormigones, cuyos valores orientativos están establecidos en la EHE [15]. Se llevó a cabo un estudio mediante el Ensayo de extensión de flujo

(UNE-EN 12350-8:2011) y el ensayo de Anillo japonés (UNE-EN 12350-12:2011).

Una vez comprobada la consistencia del HAc en estado fresco, se llevó a cabo un estudio de las propiedades mecánicas en estado endurecido evaluando la Resistencia a Compresión a 1, 7 y 28 días (UNE- EN 12390-3:2009;), Resistencia a Tracción Indirecta a 28 días (UNE-83.306:85). Así como, un estudio de la durabilidad del HAc

fabricado con EAI mediante el estudio de Cambios Dimensionales (ASTM C157) a 1, 14, 28 y 56 días. Estudio de Difusión de Cloruros (C1202-97) con el fin de obtener una evaluación de la susceptibilidad de los hormigones fabricados a ambientes agresivos y un estudio de la resistencia a la penetración de CO₂ en el HAc mediante una prueba de carbonatación acelerada (UNE 112011:2011) introduciendo probetas prismáticas dentro de una cámara climática (60% de humedad relativa a 23 °C) con 5% de CO₂.

3. Resultados y discusión

3.1 Consistencia

Los resultados de consistencia mostraron que todas las dosificaciones están dentro de los límites establecidos para este tipo de hormigón. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Ensayos de Consistencia HAc-30 y HAc-50

	Extensión de flujo (mm)	Anillo Japonés H ₁ -H ₂ (mm)
Requisitos de cumplimiento (recomendable)	650-750	<10
HAC-30		
H30-CONTROL	712	5.1
H30-EAI	706	4.3
H30-EAI-C	718	4.2
H30-EAI-T	725	4.2
HAC-50		
H50-CONTROL	726	4.8
H50-EAI	732	4.01
H50-EAI-C	744	3.8
H50-EAI-T	748	3.9

3.2 Resistencia a compresión

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4. Se pudo observar un aumento significativo en los valores de resistencias conforme aumentó la edad de los hormigones fabricados, siendo la media de la resistencia a 7 días del 59% en la serie HAC-30 respecto a la resistencia adquirida a 28

días. En el caso de la serie HAC-50 su resistencia a 7 días aumentó al 79% respecto a la resistencia a 28 días.

Tabla 4. Resistencia Compresión HAc-30 y HAc-50

		Resistencia a compresión (MPa)		
		1 Día	7 Días	28 Días
HAc-30	H30-CONTROL	8.39	25.86	42.21
	H30-EAI	5.12	21.89	38.05
	H30-EAI-C	10.04	28.52	41.29
	H30-EAI-T	9.48	26.08	41.03
HAc-50	H50-CONTROL	18.39	53.38	63.14
	H50-EAI	19.85	44.25	61.69
	H50-EAI-C	20.35	46.24	62.38
	H50-EAI-T	21.02	58.3	65.83

El uso de EAI-T, que fueron procesadas mediante trituración, mostraron un incremento de la resistencia a compresión en las series HAC-50, lo cual se considera un resultado muy positivo de cara a la aplicación de este tipo de EAI en esta tipología de hormigones.

3.3 Tracción indirecta

Los valores de tracción indirecta en el hormigón representan aproximadamente entre un 10-15% de los resultados obtenidos para resistencia a compresión.

Se obtuvieron valores más altos en la serie HAC-50 respecto a la serie HAC-30, como se muestra en la Figura 5.

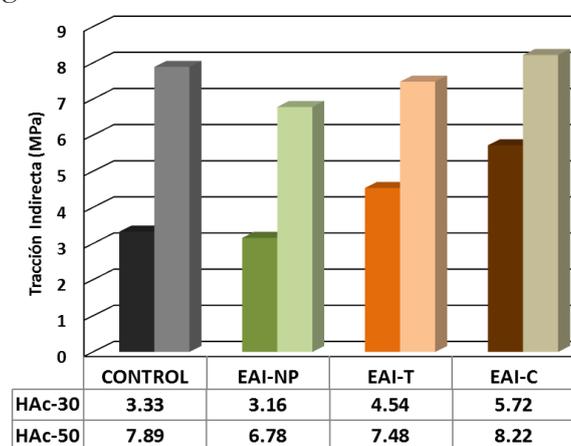


Figura 5. Resistencia Tracción Indirecta 28 Días

Con respecto a los resultados obtenidos de tracción indirecta, las amasadas fabricadas con EAI-C, presentaron los valores más elevados de las cuatro amasadas de la serie HAC-50.

3.4 Cambios dimensionales

Se llevaron a cabo estudios de retracción en dos condiciones de curado, con probetas sumergidas (humedad 100%, temperatura 20 °C) y curado en cámara seca (humedad 50%, temperatura 20 °C).

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos para HAC-30 y HAC-50.

La figura muestra mayores cambios dimensionales en HAC-50 respecto a HAC-30, principalmente debido al mayor contenido en cemento. El hormigón curado sumergido, generalmente, presentó menor retracción que el hormigón curado en cámara seca.

Los valores de retracción similares al HAC-CONTROL se observaron con el uso de EAI-NP y EAI-T en la serie HAC-30. El uso de EAI en la serie HAC-50 llevó a un incremento de la retracción respecto al hormigón de control.

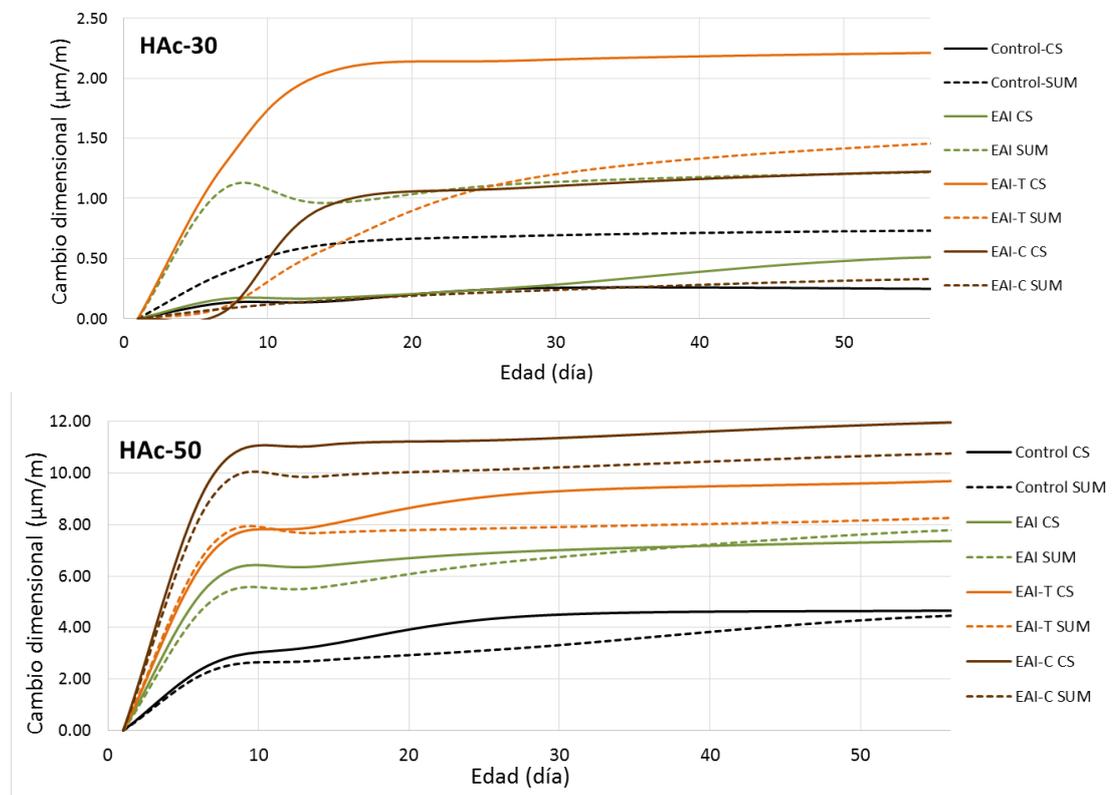


Figura 6. Cambios dimensionales HAC-30, HAC-50

3.5 Difusión de cloruros

La penetración de cloruros es una propiedad determinante en la vida útil de las edificaciones construidas con estructuras de hormigón armado. Este proceso de penetración del ion cloruro en el interior del hormigón, favorecido con un

incremento en su porosidad, se produce por difusión de la solución de iones cloruros en los poros del hormigón, y avanzando hacia el interior de la masa, buscando nuevos canales de penetración. Es necesario por tanto, determinar la difusión de cloruros en las diferentes amasadas realizadas, para valorar su idoneidad respecto a esta propiedad. Se determinó la difusión del ion

cloruro a través del método ASTM C1202, mediante el cual se ha determinado la conductividad eléctrica como medida indirecta de penetración. Para ello se han utilizado probetas de 150 mm de radio y 300 mm de generatriz y se han

extraído de las mismas secciones cortadas con un espesor de 50 mm. Tras impermeabilizar con resina epoxi por su cara perpendicular a sus bases y sumergir los especímenes en agua al vacío durante 18 horas, se ha acoplado a cada espécimen dos electrodos. Un osciloscopio midió la conductividad durante 6 horas.

En la figura 7 se incluyen unos gráficos de barras, donde se aprecian los valores obtenidos. Se puede apreciar, que se obtuvieron valores de difusión de cloruros inferiores en los hormigones en los que se aplicaron EAI en relación con el HAc de control.

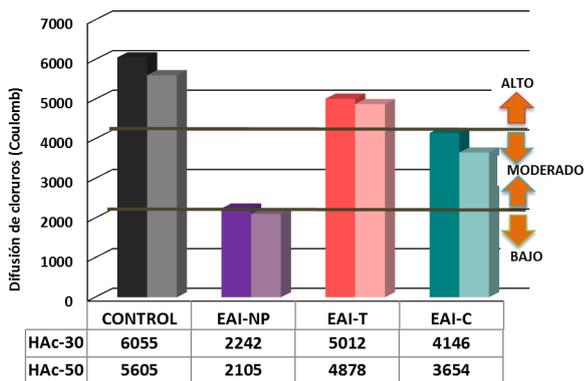


Figura 7. Penetración de cloruros HAC-30, HAC-50

Los hormigones fabricados con EAI sin procesar, presentaron los mejores resultados. El uso de EAI reduce la difusión cloruros.

Se destaca que todos los hormigones de la serie fabricados con EAI, se pueden clasificar como moderados menos cuando se llevó a cabo un tratamiento de trituración frente a este parámetro, a diferencia del hormigón de control (Figura 7).

3.6 Profundidad de carbonatación

La carbonatación se produce cuando el CO₂ atmosférico reacciona con la portlandita generada en el proceso de curado de la mezcla, formando carbonato de calcio en presencia de agua. Esta

reacción disminuye el pH del material que conduce a la pérdida de pasividad del refuerzo, favoreciendo procesos de corrosión en las armaduras.

Para determinar la penetración de carbonatos se utilizó el método UNE 112011:2011. Mediante una prueba de carbonatación acelerada dentro de una cámara climática (60% de humedad relativa a 23°C) con 5% de CO₂, en probetas prismáticas de dimensiones 100x100 mm, curadas durante 28 días en cámara húmeda. La profundidad de carbonatación se midió a 1, 28 y 56 días.



Figura 8. Probetas carbonatadas

El uso de EAI en la fabricación de HAc mostró un aumento en la profundidad de carbonatación para todas las series. El uso de EAI con tratamientos de trituración redujo esta profundidad.

La carbonatación producida en el material también se evaluó a partir del coeficiente de carbonatación. La Figura 9 muestra la profundidad de carbonatación (Cd) en comparación con la raíz cuadrada del tiempo (años).

El mayor coeficiente de carbonatación se produjo en HAC-30 con el uso de EAI sin procesar (60.435 mm/ $\sqrt{\text{año}}$). En la serie HAC-50 se obtuvieron los valores más elevados en las mezclas en las que se aplicó EAI-C (20.298 mm/ $\sqrt{\text{año}}$).

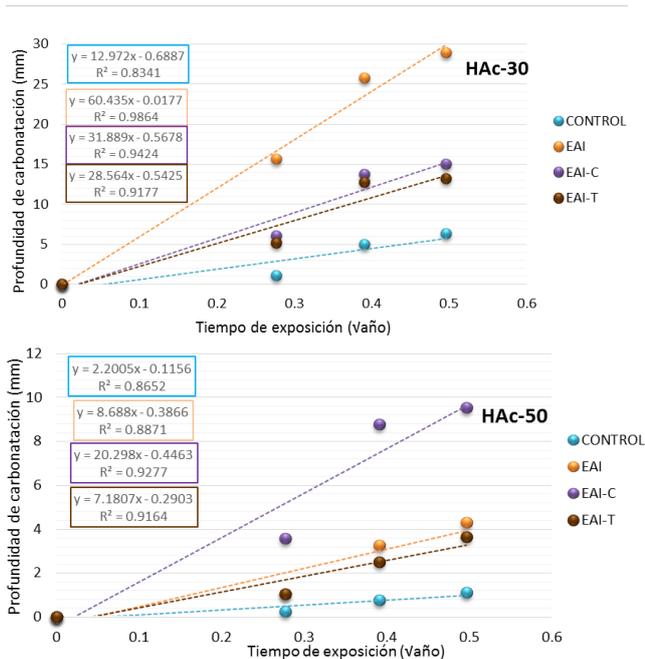


Figura 9. Profundidad de carbonatación en función de \sqrt{t} de HAC-30 y HAC-50

4. Conclusiones

Como análisis general del comportamiento mecánico y de durabilidad de los HAC podemos considerar que la aplicación de EAI sin procesar y EAI-T, que fueron procesadas mediante secado para lograr una humedad inferior al 4%, y posteriormente en la segunda, aplicando el proceso de trituración descrito previamente, son las escorias más viables para la fabricación de HAC. De manera específica se debe destacar lo siguiente:

- Respecto a las dosificaciones diseñadas, se comprueba claramente que se pueden emplear EAI en la fabricación de HAC, a pesar de presentar un tamaño de partícula superior al del filler calizo empleado, es decir, con un mayor tamaño de grano.
- En lo relativo a la resistencia a compresión, la serie HAC-30 mostró resultados similares tanto en las que se usaron EAI-T como las EAI-C, obteniéndose un comportamiento mecánico inferior en las EAI no procesadas.

- La serie HAC-50 mostró resultados muy similares entre las distintas series fabricadas, con la aplicación de contenido de cemento alrededor de 450 kg/m³, por lo que se consiguieron claramente los objetivos de resistencia a 28 días para lograr la clase estructural prevista, de resistencia característica de 50 MPa.
- La retracción de la serie HAC-30 presentó una menor retracción que las de HAC-50. Las amasadas en las que se aplicó EAI sin procesar, presentaron menores diferencias con los hormigones de control, lo que indica la activación de las EAI cuando se procesan.
- En relación a la penetración del ion cloruro se puede observar una reducción de este parámetro con el uso de EAI respecto al control. La profundidad de carbonatación fue inferior cuando las EAI fueron sometidas a procesos de trituración.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Empresa Pretersa Prenavisia por el suministro de material y apoyo técnico en este trabajo y a la Compañía Acerinox Europa S.A.U. por su apoyo financiero, mostrándose en esta trabajo parte de los resultados obtenidos en el proyecto "Escorinox 2".

Referencias

- [1] EUROSLAG, Statistics, 2016.
- [2] J. Setién, D. Hernández, J. González, Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material, Construction and Building Materials, 23 (2009) 1788-1794.
- [3] J.M. Manso, D. Hernández, M.M. Losáñez, J.J. González, Design and Elaboration of Concrete Mixtures Using Steelmaking Slags, ACI materials journal, 108 (2011).
- [4] Y.-N. Sheen, H.-Y. Wang, T.-H. Sun, Properties of green concrete containing stainless steel oxidizing slag resource materials, Construction and Building Materials, 50 (2014) 22-27.

- [5] J.T. San-José, I. Vegas, I. Arribas, I. Marcos, The performance of steel-making slag concretes in the hardened state, *Materials & Design*, 60 (2014) 612-619.
- [6] I. Arribas, I. Vegas, J.T. San-Jose, J.M. Manso, Durability studies on steelmaking slag concretes, *Materials & design*, 63 (2014) 168-176.
- [7] J. Rosales, M. Cabrera, F. Agrela, Effect of stainless steel slag waste as a replacement for cement in mortars. Mechanical and statistical study, *Construction and Building Materials*, 142 (2017) 444-458.
- [8] İ. Türkmen, Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag, *Materials Letters*, 57 (2003) 4560-4569.
- [9] B. Felekoğlu, K. Tosun, B. Baradan, A. Altun, B. Uyulgan, The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars, *Cement and concrete research*, 36 (2006) 1719-1726.
- [10] T. Uygunoğlu, İ.B. Topçu, A.G. Çelik, Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 84 (2014) 691-700.
- [11] V. Corinaldesi, G. Moriconi, T.R. Naik, Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete, *Construction and building materials*, 24 (2010) 113-117.
- [12] E.K. Anastasiou, I. Papayianni, M. Papachristoforou, Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement, *Materials & Design*, 59 (2014) 454-460.
- [13] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R. Polder, *Corrosion of steel in concrete*, Wiley Online Library 2013.
- [14] K. Holschemacher, Y. Klug, A database for the evaluation of hardened properties of SCC, *Lacer*, 7 (2002) 124-134.
- [15] D.H.E. INSTRUCCIÓN, Anejo 17, Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante, 2008, citado em [115].