

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Características mecánico-resistentes de hormigones fabricados con residuos siderúrgicos como conglomerantes y reducción de cemento

M^a Eugenia Parrón Rubio ⁽¹⁾, Francisca Pérez García ⁽¹⁾, Francisco Contreras de Villar ⁽¹⁾,
M^a Dolores Rubio Cintas ⁽¹⁾ y M^a José Pelufo Carbonell ⁽²⁾

⁽¹⁾ TEP-951 ARHENE. Aprovechamiento de Residuos Industriales, de Construcción y/o Demolición para la Fabricación de Hormigón Estructural y No Estructural, Dpto. Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil. EPS Algeciras. Universidad de Cádiz

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de València, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6127>

RESUMEN

Uno de los principales problemas de la siderurgia en lo referente a la fabricación de acero, son los productos secundarios que se producen, provocando en los últimos años nuevos tipos de residuos industriales que, en función de la sostenibilidad del medio ambiente, son reutilizados o bien tratados. Este trabajo propone el análisis del comportamiento resistente de residuos en probetas de hormigón, como son polvos de humo provocados por hornos de arco eléctrico, cuando se produce la fusión de los materiales. Mediante la reducción de cemento y sustitución por este material, pueden tener una segunda vida en el mercado evitando que sean depositados en el vertedero.

PALABRAS CLAVE: Residuos siderúrgicos, Hormigón, Sostenibilidad, Resistencia mecánica.

1.- INTRODUCCIÓN

La industria siderúrgica produce hoy en día residuos que provienen de los distintos procesos en la fabricación del acero. Las cantidades varían en función del tipo de chatarra utilizado en el proceso, así como y del tipo de acero que se desea obtener, generando considerables cantidades de *escorias* y *polvos de humo*. Estos residuos son costosos de reciclar al igual que deshacerse de ellos también supone grandes inversiones. La reutilización de residuos es actualmente la tendencia para convertirlo en materia prima siendo muy importante dado que los recursos naturales del planeta son limitados, y se van agotando por el consumo excesivo de los mismos.

En ocasiones se recuperan ciertos metales de este proceso ya que es más rentable dicha recuperación por el elevado valor del metal en el mercado, que se recupera, estando entorno al 2% de la producción bruta de residuo, en la que se realiza la extracción [4].

El acero que se produjo a nivel mundial el pasado año, es aproximadamente 1.620 millones de toneladas según Internacional Iron and Steel Institute (IISI) Conferences 2016 [5]. El *polvo de humo* y la escoria es un material que se genera con la fundición del acero.

Para los aceros inoxidable, con la volatilización de ciertos elementos que se producen durante la combustión en el horno se genera un polvo muy fino, pero no solo se origina en esta fase del proceso sino también en el convertidor Argon Oxygen Decarburization (A.O.D.), donde tienen lugar las operaciones de descarbonación y afinado del acero. En este caso, por cada tonelada de acero se obtienen sobre 150 kg de residuos.

Desde el punto de vista medioambiental, la Agencia Americana del Medio Ambiente (EPA), al igual que la normativa española, trata a los *polvos de humo* como productos tóxicos y peligrosos, La toxicidad de estos materiales está basada en sus contenidos en metales no férricos, principalmente, cromo, zinc, plomo, níquel y magnesio, metales todos ellos fácilmente lixiviables, filtrables al medio y consecuentemente acumulables en suelos y aguas.

Sin duda, estas transformaciones de la siderurgia generan latentes problemas medioambientales, dado que, en este momento, la reutilización de los residuos provocados por los procesos metalúrgicos no existe o es inapropiada, y estos restos suelen acabar en vertederos especializados, hechos a medida para el depósito de los mismos.

2.- PROCESO DE ANÁLISIS Y ENSAYOS

Fruto del análisis de la situación, con este trabajo pretendemos alcanzar y proponer soluciones para los residuos de aceria, en bruto o parcialmente recuperados, incorporándolos en la fabricación de un nuevo hormigón más sostenible y respetuoso con el medioambiente.

Introducimos también el análisis de la Huella Hídrica (HH) como concepto de Agua Virtual (AV), definido por primera vez por Allan [6, 7] como el agua “contenida” en un producto, entendiéndose por tal, no únicamente la cantidad física contenida en el producto, sino la cantidad de agua que ha sido necesario utilizar para generar dicho producto, considerándose con esta definición como un indicador físico de agua en el proceso de la producción de un bien o servicio.

Queremos aclarar que AV y HH están íntimamente relacionadas y diferenciadas porque el AV es el agua que ha hecho falta utilizar para producir un producto; y la HH es el agua necesaria para que una determinada persona consuma ese mismo producto.

Conocemos que por sus características los *polvos de humo* tienen propiedades aglomerantes si se incorporan a sistemas adecuados de modo que su reutilización no contamine y ejerza un efecto favorable en el sistema.

De los posibles residuos que se generan en el proceso de la fundición del acero, el más abundante es la escoria y los *polvos de humo* ferrítico y austenítico. En este trabajo se

estudiarán los polvos de humo ferrítico, mediante diversos tipos de ensayos, con variaciones en las proporciones de adición de los distintos componentes a las dosificaciones.

2.1.- Materiales

2.1.1.- Polvos de Humo Ferrítico (PHF)

En este estudio vamos a trabajar básicamente con residuos derivados de aceros inoxidables: polvos de humo ferrítico de horno de arco eléctrico (PHF). La composición en óxidos metálicos o metales de estos residuos que se van a usar como materiales se desglosan en la Tabla 1, [8].

Tabla 1. Composición típica elementos de los metales en los polvos de humo.
(Fuente: Acerinox)

	<i>Ferrítico %</i>		<i>Ferrítico %</i>
Carbono	0,20-0,50	Calcio	6,00-10,00
Silicio	2,00-4,00	Plomo	0,20-2,00
Manganeso	1,50-4,00	Zinc	5,00-15,00
Estaño	< 0,010	Magnesio	2,00-3,50
Níquel	< 0,30	Hierro	23,00-32,00
Cobre	0,20-0,50	Molibdeno	0,10-0,20
Cromo	7,00-9,00		

2.1.2.- Hormigón convencional (NA)

Los materiales de hormigón tipo que utilizaremos como modelo comparativo para el resto de ensayos de adición que se realicen. En la fabricación de este hormigón NA se partió de las siguientes propiedades y condiciones:

- Contenido de cemento 325 kg/m³. Tipo CEM I 52,5 R con una densidad 3.1 g/cm³.
- Relación w/c $3.1 \leq 0.5$
- Proporción grava/arena = Arena 50% (0-4) grava 50% (4-16)
- Consistencia blanda = 6 y 9 cm cono de Abrams
- Objetivo aproximado de categoría resistente H-35

Los componentes áridos calizos son de machaqueo, y provienen de plantas de fabricación situadas en el Campo de Gibraltar.

2.1.3.- Polvo de Humo de Sílice (PHS)

Se realizó una comparativa mediante el empleo de humo de sílice ya que nos pareció adecuado puesto que dicho material cuando se adiciona a la dosificación proporciona una mayor resistencia al hormigón. El humo de sílice que se usó fue de la marca Meyco, ya aplicado para la preparación de hormigones de alta resistencia, y sus propiedades se dan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del humo de sílice. (Fuente: Fuente Meyco)

<i>Aspecto</i>	<i>Polvo gris</i>
Densidad a 20° C (real)	>2.3 g/cm ³
Densidad aparente	≈ 0,2 g/cm ³
Contenido en SiO ₂	> 90%
Contenido en cloruros	< 0.1 %

2.2.- Descripción del Ensayo

2.2.1.- Elaboración de las probetas

Para el desarrollo del trabajo se elaboraron probetas de hormigón realizándose 15 amasadas con diferentes proporciones las cuales se describen en la Tabla 3 y Figuras 1 y 2, valores ideales en función de las adiciones. El análisis de diferentes artículos [9], referidos al humo de sílice, adecuaron estas proporciones al 5, 10 y 15% del polvo de humo, y 10 y 15% de adiciones de humo de sílice, aunque las “recomendaciones” indican que la sustitución óptima es un máximo del 10% de humo de sílice, el investigador deberá ir más allá en el estudio, para el desarrollo de la misma y descarte de aquellos posibles elementos no contributivos en el hormigón.

Para identificar el hormigón con cada una de sus adiciones se emplea la nomenclatura siguiente: PHF (Polvo de Humo Ferrítico) y PHS (Polvo de Humo de Sílice), realizándose 3 ensayos de hormigón convencional como referencia, definido como NA (hormigón sin adición). Una vez manufacturados cada modelo de hormigón se vaciaron en moldes, vibrándose en mesa para su compactación a una frecuencia de 42 Hz (2400 ciclos por minuto) según UNE 83-301-91.

Posteriormente se introdujeron los moldes en cámara húmeda para su curado, siendo este un recinto que permite mantener en su interior una humedad relativa igual o superior al 95% y una temperatura de 20° ± 2° C. Por último, se realizó la extracción de testigos y probetas con las cuales se realizarán los ensayos.

Tabla 3. Organización del modelo experimental de amasadas

<i>Ensayo</i>	<i>5 %</i>	<i>10%</i>	<i>15%</i>	<i>NA</i>
PHF	M-1	M-2	M-3	-
PHS	-	M-4	M-5	-
NA	-	-	-	M-6/M-7/M-8

2.2.1.- Geometría de las probetas

En lo referente a la geometría de las probetas, se confeccionaron según normativa: de forma cilíndrica de diámetro d y altura $2d$. En nuestro caso sus dimensiones se corresponden con 45 mm de diámetro y 90 mm de altura como se muestra en la Figura 1. Con estas probetas se realizarán, en una fase posterior, parte de los ensayos a compresión, [15].

Las probetas cilíndricas se tallaron sin alteraciones de morteros ni de áridos gruesos, y debido a que su superficie era plana se prescindió del refrentado de las mismas.



Figura 1. a) Muestra de probeta cilíndrica. b) Muestra de probeta prismática

Para los ensayos a flexotracción se realizaron probetas prismáticas cuyas dimensiones, según normativa, son de sección cuadrada de arista d y de longitud $2d$ o $4d$. En nuestro caso las dimensiones de dichas probetas son $40 \times 40 \times 160$ mm como muestra la Figura 2, [15].

2.2.3.- Ensayos de compresión uniaxial

Estos ensayos proporcionaron los resultados de la resistencia a compresión que se ordenan en la Tabla 4. Los ensayos a las probetas se han realizado a 7, 28 y 90 días.

Para las probetas circulares se utilizó una prensa hidráulica formada por 2 platos de compresión perfectamente rígidos, de los cuales el plato superior estaba ligado por una junta articulada, Figura 1. Este tipo de junta conserva la carga en el testigo incluso en caso de defectos entre las superficies planas, no siendo nuestro caso, ya que las caras han sido talladas. En lo referente a la carga aplicada, se seleccionó una velocidad de carga constante de $0,5$ MPa/s. (Ns/mm^2). Para la expresión de resultados la resistencia a compresión viene dada por la expresión (1):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

Donde f_c es la resistencia a compresión en MPa (N/mm^2); F es la carga máxima de rotura expresada en Newton y A_c es el área transversal de la probeta dada en mm^2 .

En la Tabla 6 se detallan los resultados de los ensayos de las probetas cilíndricas. Se han considerado los valores medios de los esfuerzos obtenidos después de romper 3 probetas en cada caso, siendo satisfactoria la valoración de la rotura según normativa. Ensayos realizados según UNE-EN 12390-3.

2.2.3.- Ensayos de flexotracción

Las pruebas de flexotracción realizadas a las probetas de hormigón fueron consecutivas y a 28 días, efectuando todos los ensayos en un mismo día y en función de la normativa UNE-EN 12390-5 [14]. El tipo de dispositivo de carga centrada de probetas utilizado está representado en la Figura 2.

En cuanto a la aplicación de la carga, se realiza de forma continua y sin choques bruscos. La fuerza no comienza a aplicarse hasta que el rodillo de carga y los de apoyo no descansen firmemente sobre la probeta (Figura 2). El incremento de velocidad R que se selecciona será conforme a la expresión:

$$R = \frac{2}{3} \cdot \frac{s \cdot d_1 \cdot d_2^2}{l} \text{ N/s} \quad (1)$$

Siendo d_1 y d_2 las dimensiones laterales de la sección cuadrada de la probeta y $l=3 \cdot d$ la distancia entre rodillos en milímetros.

La velocidad de aplicación obtenida desarrollada de la expresión (2) es,

$$R = \frac{2}{3} \cdot \frac{0.06 \cdot 40 \cdot 40^2}{160} = 16 \text{ N/s}$$

Los resultados de estos ensayos se muestran en la Tabla 7.

2.2.3.- Cálculo de la huella hídrica

Para los cálculos de la cantidad de agua que se elimina, nos basamos en datos de un estudio que nos dice la cantidad de agua virtual que se utiliza para la fabricación del cemento [7]. Los datos de partida son los siguientes:

- Para la obtención de 1.000 kg de cemento se necesitan antes de que los materiales lleguen a la fábrica de cemento 3.600 litros de agua de buena calidad.
- Una vez los materiales lleguen a la cementera para la fabricación de 1.000 kg de cemento se necesitan dependiendo de la tecnología empleada entre 180 y 360 l de agua de buena calidad

Como adicionamos un 10% o un 15% eso sería que en lugar de 1000 kg tendríamos 1100 kg o 1150 kg respectivamente, por lo que el ahorro sería de:

Tabla 4. Ahorro de agua en la incorporación del NA

Agua	H.C. (l)	10% (l)	15% (l)
Antes de llegar a la planta cementera	3600	360	540
Fabricación cemento	360	36	54
TOTAL AHORRO	0	396	592

En la elaboración del hormigón también se tiene un ahorro de agua, ya que fluidifica el material obtenido. Dependiendo de la temperatura ambiente se reduce entre un 10% o un 15% de agua, por lo que para fabricar una estructura en la que se utilizase 1.000 kg de cemento se necesitaran 604 litros de agua de buena calidad. En la Tabla 5 se facilitan los datos obtenidos de esta reducción de agua.

Tabla 5. Ahorro de agua en la fabricación NA

Agua	H.C. (l)	10% (l)	15% (l)
Fabricación hormigón	604	60.4	90.6
Total reducción	0	60.4	90.6

La Tabla 6 muestra la reducción total de agua virtual de la puesta en obra del nuevo producto. Se subraya que para una estructura que llevase 1.000 kg de cemento más 100 kg de adición de residuos industriales y en el caso más favorable que sería el 15% de eliminación de agua en su la fabricación, se reduciría aproximadamente 630 litros de agua. Esto equivaldría al consumo medio de agua de 5 personas al día.

Tabla 6. Total de ahorro de agua para la fabricación de hormigón PHA

Agua	10%+10%	10%+15%	15%+10%	15%+15%
Fabricación hormigón	369+60,4	369+90,6	540+60,4	540+90,6
Total reducción	429,4	759,6	600,4	630,6

2.3.- Resultados

Los distintos ensayos practicados, compresión y flexotracción, resultaron exitosos en un 95% de su desarrollo. Una vez desencofradas las probetas, todas tuvieron idéntico tratamiento respecto a su curado en la cámara húmeda.

Como podemos ver en la Tabla 6, el hormigón para obtener una correlación más fiable por cada ensayo se realizó una amasada de hormigón convencional H-35, alcanzando su capacidad resistente a compresión.

Realizando la comparación de los resultados obtenidos, para los mismos niveles de adición en cada ciclo de amasada, obtenemos los resultados reflejados en la Tabla 7.

Se puede observar que el hormigón con una adición del 15% de polvo de humo con respecto del hormigón convencional al igual que con la adición de humo de sílice con la misma cantidad.

El aumento de casi el 40% de la resistencia a compresión del PHF15% sobre el hormigón H-35, los datos son PHF15%=61.8MPa por NA=50.6MPa, verifican el éxito del modelo experimental propuesto.

Tabla 7. Resultados de las probetas cilíndricas: ensayos a compresión

Descripción	Compresión			Flexotracción
	7 días (MPa)	28 días (MPa)	90 días (MPa)	28 días (MPa)
Amasada				
PHF 5%	38.3	41.7	45.30	13,83
PHF 10%	41.3	40.17	53.10	12,6
PHF 15%	41.6	46.2	61.8	11,12
PHS 10%	43	46.2	59.5	11,92
PHS 15%	38.2	42.23	52.50	11,13
PHF 15%	41.6	46.2	61.8	13,83
NA	35.4	37	50.5	-
NA	35.15	40.1	52.7	8,5
NA	41.3	43.1	50.6	8,88

En la tabla 7, se observan los valores obtenidos de resistencia a la flexotracción de este hormigón adicionado y su comparativa con el hormigón convencional H-35, en una sola toma a 28 días. Todos los valores superan los establecidos para los H-35.

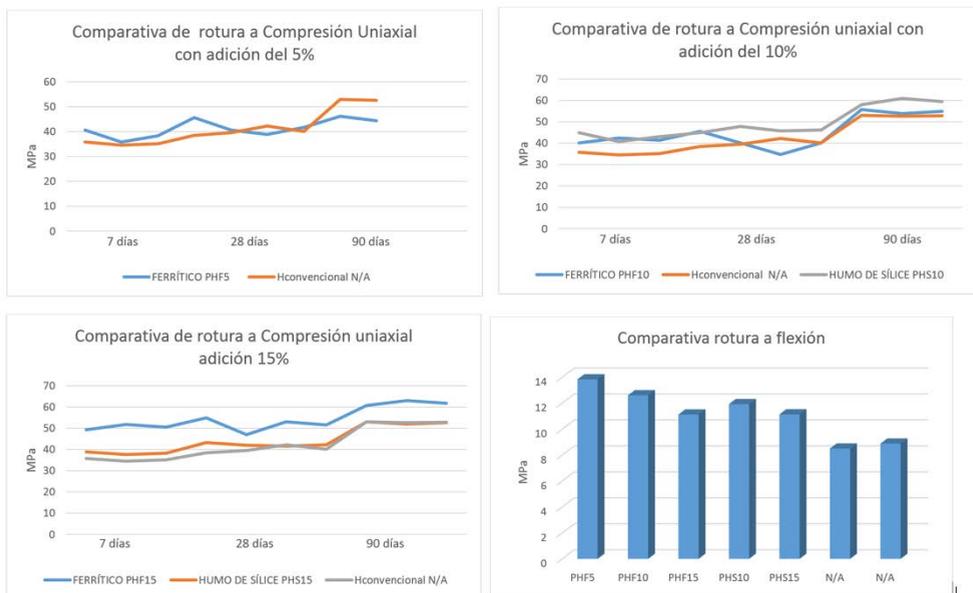


Figura 2. Gráficas de resistencia mecánica de las probetas ensayadas

3.- CONCLUSIONES

El objetivo fundamental del análisis acometido en este artículo ha sido estudiar las propiedades mecánicas resistentes del hormigón adicionado con polvo de humo, procedentes de varios procesos productivos realizados en acerías de hornos eléctricos, y hemos obtenido como principal consecuencia que el aumento de resistencia tanto a compresión como a flexión, que proporcionan estos residuos agregados como componentes de la matriz cementosa habitual que compone el hormigón.

Queremos hacer hincapié en los siguientes resultados obtenidos, que ponen en valor la investigación realizada en este artículo, que da continuidad a la actividad reciente del grupo en la consecución de retos de transferencia para la industrialización de la obra pública [16]:

- La fabricación del hormigón (H-35) con adiciones del 15% en polvos de humo ferrítico, nos da como resultado el incremento en la resistencia a compresión del 40%, en las mayores adiciones acompañado del 30% de aumento a flexotracción en las adiciones menores.
- El hormigón elaborado con polvos de humo ferrítico tiene un mayor endurecimiento a corto plazo y mejora en su comportamiento resistente entorno al 25%.
- El hormigón elaborado con polvos de humo ferrítico, empleado en hormigón de alta resistencia, mejora la resistencia frente a otros componentes como el polvo de humo de sílice, ya contrastado.
- Se ha confirmado una evolución armónica de los valores característicos de las gráficas de resistencias, hecho que avala que el modelo experimental es satisfactorio.

Con relación a la Huella Hídrica (HH) estudiada en este trabajo, queremos constatar que, para un indicador de sostenibilidad tan completo, se hacen necesarias nuevas experiencias y conclusiones que nos permitan establecer la complementariedad en su investigación asignando condiciones para las tomas de decisiones últimas.

REFERENCIAS

- [1] U. ISO 14040, “Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principio y marcos de referencia.” (2006).
- [2] U. ISO 14044, “Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y Directrices.” (2006).
- [3] U. ISO 14046, “Gestión Ambiental. Huella de Agua. Principios Requisitos y Directrices.” (2016).
- [4] M. Parrón, A. Herrero: “Proceso de obtención de metal a partir de los óxidos metálicos producidos durante la fabricación de aceros inoxidable”. Rev. Anales de Ingeniería Mecánica. (2000).
- [5] AISI, American Iron and Steel Institute, Steel Industry Technology Roadmap, Strategic Planning for Research and Development Committee, Chicago, pp. 97–100. (2016).

- [6] Allan, J.A. “Virtual Water: A Strategic Resource: Global Solutions to Regional Deficits.” *Groundwater* 36, No. 4: 546 (1998)
- [7] M.M. Cheblé, Adobe y el agua virtual construcción sustentable en regiones semiáridas del Noa, UCC.UNC (2013).
- [8] Rajeh Z. Al-Zaid, Fisal H. Al- Suffir and Abdulaziz I. Al-Negheimish. Investigation of potencial uses of electric-arc furnace dust (EAFD) in concrete *Cement and Concrete Research*, Volume 27, Issue 2, Pages 267-278, (February 1997).
- [9] Duval, R., Kadri, E.H., 1998. Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes. *Cement and Concrete Research*, Volume 28, Issue 4, Pages 533-547, (April 199).
- [10] Prokopski, G., Langier B.. Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes. *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 9Pages 1427-1433, (September 2000)
- [11] Ian W. Hamilton and Nigel M. Sammes. Encapsulation of steel foundry bag house dusts in cement mortar. *Cement and Concrete Research* Volume 29, Issue 1, Pages 55-61, (January 1999).
- [12] Alexandre S. de Vargas, Ângela B. Masuero and Antônio C.F. Vilela Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes *Cement and Concrete Research*, Volume 36, Issue 10, Pages 1833-1841, (October 2006).
- [13] Normas UNE- EN 12390-3 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. (junio 2003).
- [14] Normas UNE- EN 12390-5 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas. (Junio 2001).
- [15] Normas UNE- EN 12390-1 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Formas, medidas y otras características de las probetas y moldes. (junio 2001).
- [16] Rubio M.D., Parrón M.Á., Contreras F., Patente ES2537256 (A1) — (2015-06-03) Page bookmark: ES2537256 (A1) - Method for Producing Cinder Concrete