

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Hormigón de alta densidad: una excelente solución para obras marítimas

Déborah Cruz Ramos ⁽¹⁾ y José Antonio Lozano ⁽²⁾

⁽¹⁾ Directora de Calidad y Soporte Técnico de Materiales Hanson – HeidelbergCement

⁽²⁾ Responsable Técnico de Materiales Hanson – HeidelbergCement

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5558>

RESUMEN

Durante los últimos años la necesidad de proteger el medioambiente ha pasado a ser una de las prioridades de la sociedad y por ende de las administraciones públicas, las empresas de construcción y los suministradores de productos. Una forma de contribuir a la sostenibilidad es impulsar el uso de subproductos industriales como materiales componentes del hormigón, como es uno de los objetivos del “Plan de Prevención y Gestión de Residuos de la CAPV 2020”.

En la Comunidad Autónoma del País Vasco existen unas 14 Acerías de Arco Eléctrico que generan aproximadamente el 50% de la escoria negra producida en España, del orden de 800.000 Tm al año. Este residuo puede transformarse en áridos siderúrgicos aptos para diferentes aplicaciones, sometiéndolo a un proceso de valorización. En dicho proceso, la escoria negra se somete a la separación magnética de la fracción metálica que lleva incorporada, a una estabilización o inertización y a un envejecimiento del material. Finalmente la escoria es triturada y clasificada por tamaño para las diferentes aplicaciones, para transformarse en árido siderúrgico.

El árido siderúrgico se caracteriza por su elevada dureza, su gran resistencia al desgaste y su alta densidad en comparación con los áridos naturales, por lo que es idóneo para utilizar en la fabricación de hormigones de pavimentos y en hormigones de alta densidad.

Una de las aplicaciones más interesantes de este tipo de hormigón es la construcción de bloques de alta densidad para las obras marítimas y portuarias, por lo que su uso es cada vez más frecuente en los Puertos de Bizkaia.

En esta ocasión les transmitiremos la experiencia que ha supuesto el suministro de este tipo de hormigón siderúrgico en el Proyecto Constructivo de Emergencia del Refuerzo del Dique de Abrigo del Puerto de Bermeo, obra ejecutada por la Ute Espaldón de Bermeo (Sociedad Anónima de Trabajos y Obras - Bycam Servicios, Edificios e Infraestructuras,

Hormigón de alta densidad: una excelente solución para obras marítimas

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

S.A.) y suministrada por Hormigones y Minas S.A. Grupo HeidelbergCement, bajo la Dirección del Servicio Territorial de Puertos de Bizkaia.

PALABRAS CLAVE: hormigón pesado, siderúrgico, sostenibilidad, revalorización

1.- INTRODUCCIÓN

Los importantes daños debidos a los efectos de los temporales, en particular durante los inviernos de 2007, 2010 y 2014, sobre los muelles e instalaciones del puerto de Bermeo, evidenciaron la insuficiencia del diseño de dicho puerto para soportar sin daños los temporales registrados en la última década. Debido a ello, la Dirección de Infraestructura del Transporte, del Departamento de Medioambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco, solicitó la redacción del “Proyecto Constructivo del Refuerzo de Dique de Abrigo del Puerto de Bermeo”, sobre la base de los registros de oleaje de calidad de más de 30 años. Uno de los principales condicionantes era que la superestructura del dique estaba constituida por un espaldón escalonado de anchura insuficiente para el asentamiento de las grúas requeridas para colocación de bloques. Por ello se proponía el estudio de la utilización de bloques de hormigón de alta densidad de áridos siderúrgicos, lo que supondría una optimización de los recursos; una propuesta ventajosa desde el punto de vista medioambiental; una mayor eficacia hidráulica, ya que los bloques de alta densidad tienen una estabilidad hidrodinámica frente al oleaje sensiblemente superior a los bloques de densidad convencional; y la viabilidad constructiva con la reducción de las dimensiones geométricas y el propio peso de los bloques. Los trabajos que habían de realizarse a lo largo de los 755 m. de longitud del dique eran los siguientes:

Micropilotaje del espaldón/ Recrecido del espaldón según secciones tipo mediante hormigón armado y en masa/ Refuerzo del manto exterior del dique de abrigo mediante la fabricación, transporte y colocación de bloques cúbicos de hormigón de alta densidad de 40 t, 60 t y 80 t.

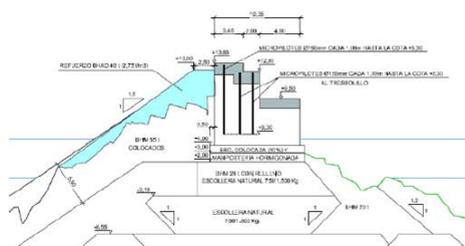


Figura 1. Proyecto constructivo del refuerzo del Dique de abrigo del puerto de Bermeo. Resumen

Las Obras de “Reparación del espaldón del dique de abrigo de Bermeo” fueron adjudicadas a la UTE ESPALDON, formada por BYCAM y SATO, con base en el proyecto redactado por TYPESA y el suministro de hormigón lo realizó HORMIGONES Y MINAS.

2.- REQUISITOS SOLICITADOS PARA EL HORMIGÓN DE ALTA DENSIDAD DEL ESPALDÓN DEL DIQUE DE ABRIGO DEL PUERTO DE BERMEO.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la obra (en adelante P.P.T.P.), definía como bloques prefabricados de hormigón, <<los macizos de hormigón procedente de fábrica>>, exigiendo la forma cúbica para los mismos y altas densidades de hormigón en masa HAD (ver Tabla 1) , determinadas sobre el propio hormigón endurecido una vez fabricado el bloque, tras pesar el mismo y considerar su volumen.

Tabla 1. Tipos y clases de HAD

<i>Densidad del HAD</i>	<i>Bloques</i>			
	<i>Peso</i>	<i>Volumen</i>	<i>Lado a</i>	<i>Número</i>
2,75t/m ³	≥40t	14,55m ³	2.44 m	609
2,90t/m ³	≥60t	20,69m ³	2.75 m	162
2,90t/m ³	≥80t	27,59m ³	3,02 m	59

Se explicitaba que el hormigón en masa a emplear sería del tipo HM-30/F/20/IIIc+Qb+E. Aunque sea extraño designar esta clase general de exposición para un hormigón en masa sin barras de armado, para el que habitualmente se usa la clase I como se indica en la Instrucción de Hormigón Estructural, hay que señalar que estamos ante un hormigón especial que está excluido del ámbito de aplicación de la misma (Artículo 2 de la EHE-08).

El texto del P.P.T.P. indicaba que <<la docilidad del hormigón sería la necesaria para que, con los métodos previstos de puesta en obra y compactación, el hormigón rellenas completamente los encofrados sin que se produjesen coqueas>> y <<el asiento medido en el cono de Abrams debía estar comprendido entre 9 y15 centímetros>>, aclarando que el Director de Obra podría pedir consistencia líquida o blanda si se requiriese.

Al ser un ambiente marino con una clase de exposición Qb se exigía garantizar que el hormigón fabricado y puesto en obra cumpliera el artículo 37.3.3 de la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08 sobre impermeabilidad del hormigón.

En lo que respecta a la dosificación de estos HAD se imponían las siguientes limitaciones:

- a)El contenido mínimo de cemento por metro cúbico de hormigón sería de 320 kg en los hormigones en masa.
- c)En el caso de los bloques de 2,90 t/m³ se emplearía arena siderúrgica y/o de arena caliza a fin de garantizar dicho valor de densidad. Para el HAD densidad 2,75 t/m³ se exigía que la arena caliza no superase el 36% sobre el total de los áridos medidos en volumen.
- d)La cantidad total de agua debía ser tal que se cumpliera con una relación agua/cemento ≤ 0,50.
- e)El uso de reductores de agua de alta actividad (superfluidificantes) en la proporción que se determinase mediante ensayos era obligado.

En lo que respecta a las características de las materias primas se prescribía:

- a) Un cemento con adiciones resistentes a sulfatos III/B, IV/B o V/A de clase de resistencia 32,5 N según la UNE 83 303-1:2013 y la vigente Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08.
- b) Agua que cumpliera las condiciones señaladas en el artículo 27 de la Instrucción EHE y con un contenido de ion cloruro más limitativo ($\leq 0,5$ g/l)
- c) Los áridos calizos debían cumplir lo prescrito en la EHE, además de presentar un Desgaste de Los Angeles (UNE-EN 1097-2) igual o inferior a 35, un peso específico (UNE 7083) igual o superior de $2,65 \text{ g/cm}^3$ y un módulo de finura de la arena caliza o del conjunto de las arenas a emplear menor o igual a tres coma uno.
- d) La utilización de los áridos de origen siderúrgico se sometía a lo prescrito en el Decreto 34/2003, de 18 de febrero, del Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Debían cumplir lo especificado en la EHE, con un Desgaste de Los Angeles igual o inferior a 35, un peso específico (UNE-EN 1097-6:2001) igual o superior a $3,45 \text{ g/cm}^3$ y un tamaño máximo igual o inferior a 20 mm. En cuanto a la expansividad se exigía la realización del ensayo de expansividad UNE-EN 1744-1 a 24 horas y 168 horas, siendo potestad del Director de la Obra exigir ensayos alternativos y/o complementarios.
- e) Los aditivos debían ser superfluidificantes, reductores de agua de alta actividad que garantizaran el cumplimiento de la relación agua / cemento prevista en este Pliego y cumplieran la normativa UNE, UNE-EN o ASTM.

3.- MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS

3.1.- Áridos siderúrgicos procedentes de la valorización de la escoria de horno eléctrico (EAFS)

La Propiedad decidió utilizar los áridos siderúrgicos que la empresa Transportes Bombín S.A. viene comercializando en Euskadi, con la pertinente autorización administrativa para realizar la valorización de escorias procedente de acería de horno eléctrico. Esta empresa disponía de experiencia en el suministro de este material a otras obras públicas realizadas en la comunidad autónoma del país Vasco.

Los áridos disponían de certificado de marcado CE emitido por Bureau Veritas para uso en hormigón conforme a UNE-EN 12620 y sólo para las fracciones 0/4, 6/12 y 11/22, lo que condicionaba el diseño de la mezcla y obligaba a admitir finalmente un tamaño máximo ligeramente superior al prescrito en el P.P.T.P. Otra limitación venía dada por la arena siderúrgica, que era bastante gruesa, con un bajo porcentaje de finos y un módulo de finura superior al deseable por cuestiones de trabajabilidad y reducción de la exudación.

Los áridos siderúrgicos procedentes de la escoria negra de horno eléctrico (EAFS), un subproducto obtenido tras el fundido de la chatarra en las acerías, contienen esencialmente hierro, sílice y calcio, y además pueden presentar componentes expansivos como el óxido

de calcio CaO y el de magnesio, MgO (magnesia), por lo que antes de su uso es imprescindible verificar su estabilidad mediante los preceptivos ensayos comentados en el punto anterior.

La realización de estos ensayos de expansividad conforme al P.P.T.P. suponía una demora en la validación de estos áridos, debido a la baja disponibilidad de equipos para realizarlos. Para agilizar la ejecución de los trabajos, la Asistencia Técnica propuso emplear como método de cribado la fluorescencia de rayos X (XRF), una técnica analítica que permite determinar estos compuestos potencialmente peligrosos con agilidad y precisión.

En cuanto a las densidades, el valor calculado de la densidad aparente de la mezcla de áridos siderúrgicos era superior a $3,45 \text{ g/cm}^3$, si bien no todos los valores individuales de cada fracción alcanzaban este valor y en ningún caso la densidad sobre superficie seca saturada superaba este límite.

3.2.- Resto de materiales componentes

Las materias primas utilizadas por Hormigones y Minas en la fabricación y suministro del hormigón a la Obra fueron las que seguidamente se detallan.

Cemento: i.work BRAVO 32,5 N/SR un cemento compuesto CEM V/A 32,5 N y V/A (S-N) 32,5 N/SRC UNE 80303-1, elegido por su alta resistencia química a los sulfatos, resistencias mecánicas medias y endurecimiento normal.

Agua: el agua utilizada cumplía las prescripciones de la EHE-08, además de la específica del P.P.T.P. para el contenido de ion cloruro, $0,01 < 0,5 \text{ g/l}$.

Arena: a fin de cumplir con la prescripción de un módulo de finura de la arena caliza o del conjunto de las arenas naturales a emplear menor o igual a tres coma uno, y tratar de compensar las deficiencias en finos de la arena siderúrgica, se emplearon dos arenas naturales:

- Una arena caliza 0/4 procedente de la cantera de Mañaria, una de las habitualmente empleadas por el Grupo Heidelberg con Mf en torno a 3,25
- Una arena silíceo 0/1 procedente de Araba con Mf próximo a 0,75

Aditivos: se utilizaron productos de la casa Basf, elegidos para lograr una consistencia fluida con $a/c \leq 0,50$, mejorar la trabajabilidad y la reología, reducir la viscosidad y minimizar la exudación del hormigón con árido siderúrgico de horno eléctrico.

4.- ENSAYOS DE CONTROL

4.1.- Áridos siderúrgicos EAFS

Los resultados de los análisis realizados mostraron que el árido era conforme para uso en hormigón en masa de acuerdo a las prescripciones que se solicitaban

En cuanto a la estabilidad de los mismos, se realizaron los ensayos de fluorescencia de rayos X (XRF) y de expansividad UNE-EN 1744-1 a 24 horas y 168 horas, y se verificó que los áridos siderúrgicos empleados eran estables.

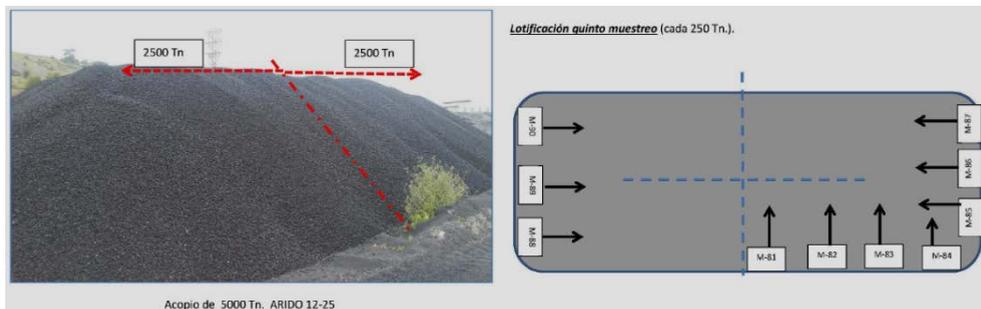


Figura 2. Acopio de árido siderúrgico y esquema de lotificación. Fuente: Euskontrol

Las granulometrías de los áridos variaron notablemente a lo largo del suministro a la obra, como ejemplo en la figura 3 pueden observarse las primeras y las últimas empleadas.

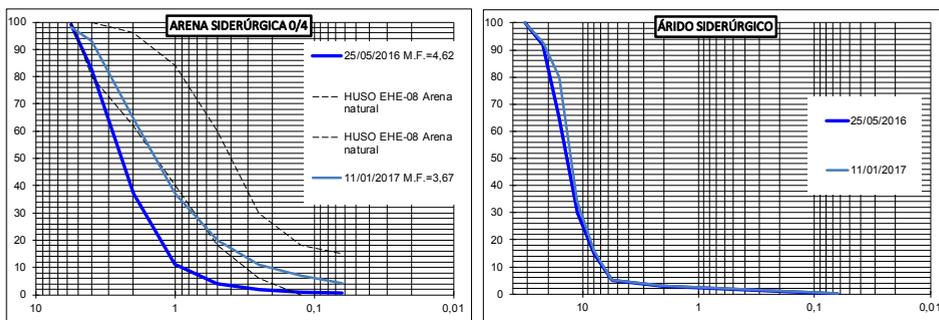


Figura 3. Ejemplos de variación en las granulometrías iniciales y finales

En lo que respecta a las absorciones y densidades de las distintas fracciones, se comprobó que variaban a lo largo del suministro, evidenciándose que en los acopios de 5.000Tm llegaban a existir diferencias relativamente significativas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Ejemplos de variación en la absorción y densidad del árido siderúrgico

	<i>Chequeos en acopios</i>				
	<i>Muestreo</i>	<i>Acta</i>	<i>a(%)</i>	<i>d_a</i>	<i>d_{s.s.s.}</i>
<i>Arena</i>	25.05.16	08.06.16	2,86	3,60	3,35
	20.12.16	29.12.16	2,80	3,64	3,39
<i>Árido 12/25</i>					
	25.05.16	08.08.16	1,6	3,38	3,26
M-81	20.12.16	26.12.16	1,7	3,45	3,31
M-89	20.12.16	26.12.16	1,5	3,38	3,21

4.2.- Resto de materiales componentes

Se realizó el control de cemento, agua, arenas naturales y aditivos prescrito en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, verificando que disponían de los preceptivos marcados CE, que sus características eran conformes con lo especificado, presentando variaciones admisibles para la fabricación de hormigones de calidad.

4.3.- Ensayos de hormigón

Para evaluar las características del hormigón HAD de consistencia, densidad, resistencia y penetración al agua, se utilizaron las normas habitualmente empleadas en los hormigones convencionales, que están prescritas por la Instrucción de Hormigón EHE-08. Se realizaron ensayos previos y característicos, de producción y de recepción.

También se realizaron otros ensayos a fin de contrastar la calidad del hormigón ya colocado en los bloques, como fueron: el pesaje de los bloques construidos con HAD para verificar la resistencia, la extracción de algunos testigos para contrastar los datos de resistencia real con los de las probetas enmoldadas y para verificar que no estaban afectados por una segregación indeseada en los puntos inferiores de los bloques, o ensayos de comportamiento resistente mediante caída de bloques desde determinada distancia.

Los numerosos ensayos realizados tanto en control de producción como en el control de recepción de obra, mostraron que a pesar de las fluctuaciones detectadas en algunas de las cualidades del hormigón fresco, el hormigón suministrado cumplía satisfactoriamente con los requisitos solicitados, por lo que todos los datos se colocaron en el espaldón del puerto de Bermeo.

5.- DIFERENCIAS EN LA FABRICACIÓN, SUMINISTRO Y PUESTA EN OBRA DE UN HORMIGÓN HAD CON ÁRIDO SIDERÚRGICO DE ACERÍA DE HORNO ELÉCTRICO.

Aproximadamente un volumen de unos 14.000m³ de hormigón HAD con árido siderúrgico de acería de horno eléctrico, fue fabricado en la central de hormigón premezclado del Grupo HeidelbergCement sita en Gernika, en amasadora de doble eje horizontal. Fue suministrado en amasadoras móviles a la Obra de “Reparación del espaldón del dique de

Hormigón de alta densidad: una excelente solución para obras marítimas

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

abrigo de Bermeo”, localizada a unos 10 km del lugar de punto de destino en la Obra y a unos 20 minutos en tiempo de camión hormigonera. Los trabajos de puesta en obra de este hormigón HAD fueron realizados por Ute Espaldón.

En las diferentes etapas que intervinieron en el suministro de este tipo de hormigón HAD, se observaron diferencias respecto a los hormigones convencionales. La angulosidad, la textura superficial rugosa y cavernosa, la elevada absorción, la mayor densidad y la fricción interna de los áridos siderúrgicos, la falta de finos en la arena siderúrgica y la alta densidad del HAD (especialmente en el caso de $2,9 \text{ g/cm}^3$), favorecen la tendencia a la segregación, la exudación y el retraso en el fraguado de este tipo de hormigón, hándicaps que requieren de un esfuerzo extra para lograr el esperado resultado final.

Hay que resaltar que si bien es importante la adecuada dosificación y fabricación de este hormigón especial, aún lo es más adaptar el proceso de puesta en obra, desmoldado y curado del mismo, pues el peligro de disgregación y exudación es mayor cuanto más grueso es el árido, más discontinua es su granulometría y más pesado es el mismo, y el de fisuración se potencia cuando se trata de elementos prefabricados de hormigón en masa de volumen considerable, fabricado con áridos siderúrgicos y ejecutados a la intemperie.

5.1.- Suministro, recepción y almacenamiento del árido siderúrgico de acería de horno eléctrico

Previamente a su empleo es imprescindible comprobar la estabilidad de este árido siderúrgico procedente de la valorización de la escoria negra de horno eléctrico (EAFS), lo que supone la realización de ensayos específicos que no han de hacerse a los áridos convencionales. Para ello se deben lotificar en volúmenes razonables, e identificar adecuadamente para lograr la total trazabilidad.

Se debe acotar la variación permitida en la granulometría y la densidad de los áridos siderúrgicos, a fin de garantizar una mayor homogeneidad en los mismos, siendo necesario extremar las medidas de remezclado en la carga del material por el suministrador, ya que su elevada densidad favorece la segregación del material en los acopios.

El mayor porcentaje de absorción de este material aconseja humectar previamente el árido siderúrgico para evitar una rápida pérdida de la consistencia del hormigón. La calibración de las sondas de humedad debe intensificarse, contrastando los valores con ensayos manuales, ya que las sondas pierden efectividad con este tipo de material. El mantenimiento de los equipos destinados al almacenaje y manipulación del árido siderúrgico EAFS se incrementa por un envejecimiento prematuro. La capacidad de almacenaje y la fabricación simultánea de otros tipos de hormigón en la planta queda comprometida, ya que habrá tolvas destinadas sólo a árido siderúrgico.

5.2.- Dosificación, amasado y transporte a obra

Los ensayos previos y característicos son imprescindibles, así como los reajustes cuando hay variaciones en la calidad de los áridos. La resistencia y la penetración al agua suelen ser menos limitativas que la densidad.

El amasado debe realizarse en amasadora fija para minimizar la segregación. Tanto la capacidad de carga como la de transporte se reducen considerablemente por problemas de peso. Además del efecto de la mayor fricción con el consiguiente desgaste de los elementos, se producen sobrepresiones en los sistemas hidráulicos debido a la gran inercia de la masa al movimiento. Todo ello requiere mayores trabajos de mantenimiento y disminuye la vida útil de los equipos.

5.3.- Recepción, vertido, compactación, desencofrado y curado.

La inspección en la recepción del producto debe intensificarse, para detectar y evitar la descarga de suministros de hormigón HAD que presenten segregación. La consistencia puede ser más rígida que la de un hormigón convencional a igualdad de cono.

En el proceso de vertido es fundamental reducir la altura de caída libre y una descarga lo más cercana posible a su posición final con un mínimo de vibración, evitando que los áridos reboten en las paredes de los encofrados, pues el peligro de disgregación es mayor cuanto más grueso es el árido, más discontinua es su granulometría y más pesado es el mismo. Si se descarga con cubilote se debe reducir el volumen cargado en el mismo como medida de seguridad. La angulosidad de los áridos incrementa el riesgo de bloqueo durante el bombeo, por lo que conviene hacer pruebas de bombeo y adoptar precauciones de seguridad.

Los moldes o encofrados deben reforzarse para soportar la presión de este hormigón pesado y evitar pérdidas de lechada por sus juntas. El peso es mayor, el tiempo de fraguado se retrasa, y no debe desencofrarse hasta alcanzar la resistencia suficiente para que el elemento aguante su propio peso, lo que afecta al ritmo de rotación de encofrados y a la planificación de los trabajos.

Deben usarse vibradores internos, en el caso de bloques se aconsejan automáticos y con acople de varias unidades. No deben usarse para transportar el hormigón lateralmente, y la profundidad de inserción entre capas y la distancia entre puntos debe ser muy cuidada.

Los equipos utilizados también necesitarán más mantenimiento y reducirán su vida útil.

Las operaciones de acabado no deben comenzar hasta que el agua superficial exudada haya desaparecido. Se debe mantener la temperatura y humedad necesaria para el endurecimiento del hormigón del bloque. La temperatura de la masa de los bloques ha de controlarse y el procedimiento de curado adecuarse a este tipo de hormigón en masa.

5.4.- Control del producto y control de ejecución

La eficacia de los procedimientos habituales de control se ve considerablemente reducida debido a la alta fricción interna y a la propia reología de este tipo de hormigón, lo que distorsiona el ensayo de consistencia en cono de Abrams y dificulta notablemente tareas tan simples como el picado de las probetas de hormigón, afectando a cualquier determinación realizada en base a las mismas.

Hormigón de alta densidad: una excelente solución para obras marítimas

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Además del control de la densidad en fresco, los cubos de hormigón HAD deben pesarse una vez endurecido el hormigón. La densidad en fresco es sólo una referencia, ya que el volumen utilizado para su análisis y el procedimiento de compactación difieren notablemente de los realmente empleados en el dado ejecutado en la obra.

Se deben intensificar los controles de recepción y de los trabajos de ejecución en obra para asegurar un adecuado resultado.

6.- CONCLUSIONES

El árido siderúrgico procedente de las acerías de horno eléctrico, posee una elevada dureza, una gran resistencia al desgaste y un mayor peso, pero también una alta absorción, una textura superficial áspera, formas angulares y un bajo contenido en finos. Estas peculiaridades aportan ventajas para determinadas aplicaciones, pero también supone que la manipulación de estos áridos por sí solos o mezclados en un hormigón sea muy diferente a la de un hormigón convencional, lo que a su vez implica un mayor esfuerzo en cuestiones logísticas, tanto en aspectos materiales como en mano de obra en planta y en obra, provoca un envejecimiento prematuro de todos los equipos utilizados, y ocasiona mayores costos de fabricación y puesta en obra que un hormigón convencional. Todo ello debe ser considerado a la hora de hacer un correcto balance sobre su posible uso en hormigón.

Las variaciones en la granulometría de los áridos siderúrgicos y en sus densidades deben limitarse, estableciendo requisitos previos al suministro, a fin de reducir las fluctuaciones en las cualidades del hormigón fresco. Para muy alta densidad, se debe valorar además la prescripción de arenas siderúrgicas con alto contenidos en finos.

Deberían investigarse métodos de ensayo específicos para estos materiales, ya que la fricción interna entre partículas y la reología de los hormigones HAD con árido siderúrgico EAFS distorsiona los resultados de los ensayos basados en métodos tradicionales.

REFERENCIAS

- [1] ACI 304R-00, 'Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete'
- [2] ACI 211.1-91, 'Standard Practice for Selecting Proportions for normal, Heavyweight, and Mass Concrete'
- [3] García-Mochales, José Luis, 'Utilización de áridos siderúrgicos en obras por la autoridad portuaria de Bilbao' (Departamento Construcción APB, Bilbao 2016)
- [4] J. Manso y S. Setién, 'Investigación de nuevos usos de las escorias de horno eléctrico de arco (EAF). La oportunidad de los hormigones', *Hormigón y Acero* **241** (2006) 51-57
- [5] Álvarez Paz, Manel, 'Consideraciones de diseño en relación al hormigón pesado' (E.T.S. d'Enginyers de Camins, Canals i Ports , Barcelona 2007)