

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Dosificación de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero basado en el estudio de la reología de la pasta

A. de la Rosa Velasco ⁽¹⁾, E. Poveda Bautista ⁽¹⁾, H. Cifuentes Bulté ⁽²⁾ y G. Ruiz López ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grupo de Mecánica de Sólidos, Universidad de Castilla-La Mancha, España.

⁽²⁾ Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad de Sevilla, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5645>

RESUMEN

Este trabajo presenta un método de diseño de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero (HACRFA) que se basa en un modelo de reología de pasta de cemento, a partir del cual se determina la viscosidad plástica de la misma mediante la relación agua-materiales cementíceos, y en un modelo micromecánico que permite estimar la viscosidad plástica efectiva del HACRFA. Son datos necesarios los valores deseados de resistencia a compresión y de viscosidad efectiva del HACRFA, así como la fracción en volumen de fibra de acero a emplear y su esbeltez. Por medio de unos sencillos gráficos de diseño, particulares para cada resistencia a compresión, se calculan las cantidades de los distintos componentes del HACRFA.

PALABRAS CLAVE: HACRFA, método de diseño, reología, viscosidad plástica, resistencia a compresión

1.- INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se han desarrollado numerosos métodos de diseño de HAC fundamentados en diferentes propiedades [1], entre los que destacan los métodos basados en modelos de reología de pasta. El comportamiento en estado fresco del HAC está muy influenciado por su composición y las características de los materiales que lo componen, siendo imprescindible entender correctamente la reología de dicho hormigón [2, 3, 4] y convirtiéndose el diseño de la mezcla en un concepto fundamental para conseguir un HAC de alta calidad. Además, una buena metodología debe ser ampliamente aplicable, suficientemente robusta ante la variabilidad de materiales y condiciones, además de cumplir con los requisitos técnicos establecidos y basarse en criterios de sostenibilidad y coste [1].

La introducción de fibras en el HAC une a los efectos de su buen comportamiento en estado fresco la mejora de las propiedades mecánicas en estado endurecido que proporcionan las fibras, dando lugar al hormigón autocompactante reforzado con fibras (HACRF) [5]. El

mayor contenido de partículas finas del HAC aumenta la compacidad de su matriz, mejorando la intercara fibra-matriz y favoreciendo su unión, lo cual repercute positivamente en la tenacidad post-fisuración y la capacidad de absorción de energía [6].

Las características reológicas de los materiales cementíceos se ven afectadas por las fibras [7], cuya adición debe considerarse en el diseño de la mezcla. Un aspecto fundamental a tener en cuenta es la trabajabilidad del HACRFA, que se ve muy influenciada por la geometría y la fracción en volumen de las fibras (ϕ_{fibra}). El producto de la esbeltez de la fibra (λ) y ϕ_{fibra} , denominado factor de fibra, cuantifica el efecto de las fibras en el comportamiento en estado fresco del HACRF [8, 9]. Existe un contenido máximo de fibra por encima del cual la trabajabilidad se reduce notablemente, perdiendo el hormigón sus características de autocompactabilidad [10]. Así, es necesario llegar a un compromiso entre el contenido máximo de fibra, que permite mejorar las propiedades mecánicas en estado endurecido del HACRFA, y la trabajabilidad adecuada para considerarlo dentro de esta tipología de hormigones de altas prestaciones.

2.- MODELOS CONSTITUTIVOS MICROMECAÑICOS. CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE HAC Y HACRFA

El comportamiento en estado fresco del HAC se puede aproximar mediante un modelo de Bingham, que consta de dos parámetros reológicos principales: la tensión de fluencia (τ_0) y la viscosidad plástica (η) [11, 12]. Mediante modelos constitutivos micromecánicos se puede estimar el valor de η , tanto del HAC como del HACRFA, empleando la medida de η de la pasta de cemento [13]. El hormigón se puede considerar como un sistema bifásico en el que la fase sólida (áridos) está suspendida en una fase líquida viscosa (pasta de cemento). El valor de η de la fase líquida, considerada como un fluido viscoso homogéneo, se puede medir con precisión por medio de viscosímetros y aproximarse a través de otros instrumentos de laboratorio de bajo coste, ya que no es un valor único sino que depende de diferentes factores como el tipo de cemento, la cantidad de suplerplastificante o el tipo de adición. Así, el incremento de η que supone la adición de fases sólidas a la pasta de cemento (filler, árido fino, árido grueso y fibras) se puede calcular utilizando un modelo micromecánico bifásico [13, 14].

2.1.- Cálculo de la viscosidad plástica del HAC

El modelo micromecánico se aplica en etapas añadiendo, en primer lugar, el material sólido más fino (filler) al fluido viscoso (pasta de cemento) e incorporando, a continuación, el siguiente material sólido más fino (árido fino) a la suspensión formada en la primera etapa (pasta de cemento y filler), que se trata como una nueva fase fluida viscosa. El proceso concluye al introducir todas las fases sólidas. Por tanto, el valor de η del sistema líquido-sólido i se puede estimar a partir del sistema previo $i-1$ [11, 13, 15]:

$$\eta_{ci} = \eta_{ci-1} f_i(\phi_i) \quad (1)$$

η_{ci} : viscosidad plástica de la suspensión líquido-sólida i

η_{ci-1} : viscosidad plástica de la suspensión previa i-1, siendo η_{c0} : viscosidad plástica conocida de la pasta de cemento (η_{pasta})

$f_i(\phi_i)$: función que depende de ϕ_i , que calcula el aumento de η producida por la fase sólida con una fracción en volumen ϕ_i

Concretando la Ec. (1) para la viscosidad plástica del HAC [3, 11, 13, 14]:

$$\eta_{HAC} = \eta_{pasta} f_1(\phi_1) f_2(\phi_2) \dots f_n(\phi_n) \quad (2)$$

n: número total de fases sólidas

En suspensiones diluidas las partículas están suficientemente alejadas unas de otras, de manera que el movimiento relativo del fluido cerca de una partícula no se ve afectado por la presencia de las demás, despreciándose la interacción hidrodinámica [13, 14, 16]. La siguiente ecuación, establecida por Einstein, permite calcular el valor η de suspensiones diluidas de esferas rígidas o huecas distribuidas aleatoriamente [13, 14]:

$$f_i(\phi_i) = 1 + \eta \phi_i \quad (3)$$

Sin embargo, el hormigón es una suspensión no diluida y tanto las interacciones hidrodinámicas como el movimiento Browniano no se pueden despreciar, por lo que $f_i(\phi_i)$ no solo depende de ϕ_i de la fase sólida sino también de su forma y su distribución en el fluido. La fracción de empaquetamiento máximo ϕ_m representa la situación en la que las partículas están mínimamente separadas y el valor de η es infinito. Este valor está afectado por la distribución del tamaño de partículas [13, 14]. La ecuación propuesta por Krieger-Dougherty [13, 14, 17] es apropiada para suspensiones cementíceas no newtonianas de esferas rígidas:

$$f_i(\phi_i) = \left(1 - \frac{\phi_i}{\phi_m}\right)^{\eta \phi_m} \quad (4)$$

El valor de ϕ_m es igual a 0.524, 0.63 y 0.74 si se considera empaquetamiento de partículas cúbico, hexagonal aleatorio y hexagonal compacto, respectivamente. El exponente de la Ec. 4 permanece prácticamente constante para partículas esféricas rígidas, con valor 1.9 [13, 14]. La fracción de aire ocluido se considera alrededor del 2%, por lo que se puede aplicar la ecuación de Einstein, e incluirse dentro del valor η de la pasta de cemento. De este modo, para calcular el valor η del HAC, la ecuación de Krieger-Dougherty tiene el siguiente aspecto [14]:

$$\eta_{HAC} = \eta_{pasta} \left(1 - \frac{\phi_{filler}}{0.524}\right)^{-1.9} \left(1 - \frac{\phi_{árido\ fino}}{0.63}\right)^{-1.9} \left(1 - \frac{\phi_{árido\ grueso}}{0.74}\right)^{-1.9} \quad (5)$$

2.2.- Cálculo de la viscosidad plástica del HACRFA

Cuando se añaden fibras de acero al HAC se incrementa el valor de su η . Ghanbari y Karihaloo [13] proponen una ecuación para calcular el valor de la viscosidad plástica

efectiva (η_e) del HACRFA, la cual es válida para partículas esféricas rígidas en altas concentraciones y/o fibras rígidas de acero, con valor máximo de λ igual a 85 y ϕ_{fibra} hasta un 2% (concentraciones diluidas de fibras) a partir del HAC base [13]:

$$\eta_e = \eta_{\text{HACbase}} \left[(1 - \phi_{\text{fibra}}) + \frac{\pi \phi_{\text{fibra}} \lambda^2}{3 \ln(2\lambda)} \right] \quad (6)$$

η_{HACbase} : viscosidad plástica de la fase fluida viscosa o viscosidad plástica del HAC base

En la Ec. 6 el valor η_e de la mezcla aumenta con el incremento del parámetro de fibra ϕ_{fibra} λ^2 , lo cual es consistente con la literatura, que indica que la capacidad de fluidez y la trabajabilidad del HACRFA, o de los materiales cementíceos que contienen fibras en general, se ve afectada por el aumento de ϕ_{fibra} y/o λ [9, 13, 18, 19]. A mayor valor de ϕ_{fibra} para un mismo tipo de fibra (igual λ) y para un determinado valor de η_e del HACRFA, le corresponde un hormigón base (HAC base) menos viscoso, de forma que se puedan acomodar las características y el contenido de la fibra sin perder las propiedades de autocompactabilidad en el HACRFA [11]. El modelo constitutivo del comportamiento de este flujo se puede describir mediante un fluido de Bingham.

3.- MÉTODO DE DISEÑO DE HACRFA BASADO EN LA VISCOSIDAD PLÁSTICA Y LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El método de diseño de HAC desarrollado por Abo Dhaheer y coautores [14] emplea como datos de entrada los valores de η_{HAC} y de resistencia a compresión (f_{cu}) en probetas cúbicas de 100 mm de lado. Por medio de unos sencillos gráficos, esta metodología permite calcular las proporciones de materiales constituyentes del HAC con valores de η_{HAC} y de f_{cu} en el intervalo de 3-15 Pa s y 30-80 MPa, respectivamente. La relación agua/materiales cementíceos (w/c) se calcula a través de f_{cu} con la siguiente ecuación experimental de ajuste [14]:

$$f_{\text{cu}} = \frac{195}{12.65^{w/c}} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Una vez establecida la composición de la pasta de cemento (cemento, adición, agua y aditivo superplastificante) el valor de viscosidad de la pasta, η_{pasta} , se puede medir con un viscosímetro y aproximarse mediante otros instrumentos de laboratorio de bajo coste. De este modo se relacionan los valores de η_{pasta} y w/c con la tasa de aditivo superplastificante/materiales cementíceos (SP/c), y se procede a crear una tabla con los datos de partida a utilizar en la metodología. La Tabla 1 muestra la relación entre w/c del HAC y η_{pasta} para dos tipos de cemento, con una composición de cemento del 75%, escoria granulada de alto horno 25%, aditivo superplastificante y agua. Para el CEM II los valores se han obtenido del trabajo de Abo Dhaheer y coautores [14] mientras que para el CEM I han sido medidos experimentalmente con un viscosímetro cono-placa.

Tabla 1. Viscosidad plástica de la pasta de cemento: CEM (75%), escoria granulada de alto horno (25%), aditivo superplastificante y agua para diferentes tipos de cemento.

	η_{pasta} para CEM II (75%) + escoria(25%) obtenido del trabajo de Abo Dhaheer y coautores [14]		η_{pasta} para CEM I (75%) + escoria(25%) medido experimentalmente
w/c	η_{pasta} [Pa s]	$\eta_{pasta\ pasta + aire}$ <i>ocluido</i> [Pa s]	η_{pasta} [Pa s]
0.63	0.104	0.11	0.012
0.53	0.224	0.23	0.030
0.47	0.286	0.29	0.040
0.35	0.365	0.37	0.089

Obtenida la viscosidad de la pasta de cemento se procede a resolver la Ec. 5, cuya solución no es única sino que existen numerosas combinaciones de ϕ_i de las fases sólidas a partir de los datos f_{cu} y η_{HAC} ; muchas de dichas soluciones no dan lugar a un hormigón con características de autocompactabilidad, por lo que se necesita incluir otras restricciones relacionadas con el HAC [14, 20, 21], como las recogidas en los límites recomendados por la Federación Europea de Asociaciones de Marcas Nacionales (EFNARC) [20].

A través de MATLAB se ha creado un código que proporciona unos gráficos de diseño de mezcla de HAC para cada valor de f_{cu} , en los que a partir del parámetro de entrada, η_{HAC} , se pueden obtener las cantidades de cada componente del HAC [14].

3.1.- Metodología de diseño de HACRFA basada en modelos micromecánicos

Sustituyendo la Ec. 5 en la Ec. 6, descritas en el apartado anterior, se obtiene el modelo micromecánico bifásico, en el que la nueva fase sólida a añadir es la fibra que se encuentra suspendida en una fase fluida viscosa, que es el HAC base:

$$\eta_e = \eta_{pasta} \left(1 - \frac{\phi_{filler}}{0.524}\right)^{-1.9} \left(1 - \frac{\phi_{árido\ fino}}{0.63}\right)^{-1.9} \left(1 - \frac{\phi_{árido\ grueso}}{0.74}\right)^{-1.9} \left[(1 - \phi_{fibra}) + \frac{\pi \phi_{fibra} \lambda^2}{3 \ln(2\lambda)} \right] \quad (8)$$

Los datos necesarios para calcular la mezcla de HACRFA son: f_{cu} del HACRFA, η_e del HACRFA y la tipología de fibra (rígida), determinada por λ y ϕ_{fibra} . El objetivo es calcular la composición de un HAC base con el valor de viscosidad correspondiente, de forma que al añadir la fibra de acero (de esbeltez λ y cuantía ϕ_{fibra}) a su matriz, se consiga un HACRFA con el valor η_e requerido (según los datos de entrada).

La literatura científica dice que la adición de fibra al HAC no supone incrementos significativos de f_{cu} [22] para cuantías de fibra inferiores al 2%, pudiéndose utilizar ese dato de entrada tanto para diseñar un HAC como para un HACRFA. El valor f_{cu} va a establecer un intervalo admisible de $\eta_{HACbase}$ que cumple con las condiciones impuestas en el modelo

y es solución de la Ec. 5, dando lugar a combinaciones de cantidades de los materiales constituyentes del HAC. Se calcularán unos valores de viscosidad plástica máximos ($\eta_{\text{máx}}$) y mínimos ($\eta_{\text{mín}}$) del HAC base que, con el dato de η_e del HACRFA y λ de la fibra, establecen el intervalo de fracción en volumen de fibra mínimo ($\phi_{\text{fímín}}$) y máximo ($\phi_{\text{fmáx}}$), respectivamente, que se puede utilizar para diseñar dicho HACRFA:

$$\phi_{\text{fímín}} = \frac{3 \ln(2\lambda) (\eta_e - \eta_{\text{máx}})}{\eta_{\text{máx}} \pi \lambda^2 - 3 \ln(2\lambda)} \quad (9)$$

$$\phi_{\text{fmáx}} = \frac{3 \ln(2\lambda) (\eta_e - \eta_{\text{mín}})}{\eta_{\text{mín}} \pi \lambda^2 - 3 \ln(2\lambda)} \quad (10)$$

Establecido el valor ϕ_{fibra} dentro del intervalo admisible determinado con anterioridad, se calcula el valor de η_{HACbase} :

$$\eta_{\text{HACbase}} = \frac{\eta_e}{\left[(1 - \phi_{\text{fibra}}) + \frac{\pi \phi_{\text{fibra}} \lambda^2}{3 \ln(2\lambda)} \right]} \quad (11)$$

El valor η_{HACbase} se utilizará para definir las cantidades de los componentes del HAC base a partir de los gráficos de diseño de mezcla calculados de acuerdo con la metodología de Abo Dhaheer y coautores [14]. Así se diseña una mezcla de HACRFA dados sus valores deseados de f_{cu} , η_e , λ y ϕ_{fibra} . Por último, se implementa en el código MATLAB mencionado, las Ecs. 6, 8, 9, 10 y 11. De este modo se crean unos nuevos gráficos adicionales para HACRFA.

4.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE HACRFA Y USO DE LOS GRÁFICOS DE DISEÑO DE MEZCLA

Se van a calcular las proporciones de mezcla de un HACRFA con las siguientes características:

$f_{\text{cu}} = 60$ MPa, $\eta_e = 40$ Pa s, fibra de acero rígida de 13 mm de longitud ($\lambda = 62$, $\rho_{\text{fibra}} = 7850$ kg/m³) y cuantía de fibra $\phi_{\text{fibra}} = 0.0055$

1- Calcular la relación w/c utilizando la Ec. 7: $f_{\text{cu}} = 60$ MPa, w/c = 0.46

2- Seleccionar una relación SP/c según la recomendación del fabricante y/o ensayos previos en estado fresco efectuados. Para un HAC con $f_{\text{cu}} = 60$ MPa. Se establece una relación SP/c = 2.8%

3- Calcular el valor η_{pasta} (incluido el 2% de aire ocluido) con la Tabla 1 para CEM II (75%) y escoria (25%): w/c = 0.46; $\eta_{\text{pasta} + \text{aire ocluido}} = 0.29$ Pa s

4- Comprobar que $\phi_{\text{fibra}} = 0.0055$ está dentro del intervalo admisible para el HACRFA con $f_{\text{cu}} = 60$ MPa y $\eta_e = 40$ Pa s. Se utiliza el gráfico de la Fig. 1, que muestra la región factible

de diseño obtenida mediante los datos de partida y las Ecs. 9 y 10. También incluye los valores η_{\min} y η_{\max} admisibles asociados al HAC base de acuerdo con el dato f_{cu} (f_{cu} HAC = f_{cu} HACRFA), que son los mismos que aparecen en el eje de abscisas de la Fig. 3 (Abo Dhaheer y coautores [14]).

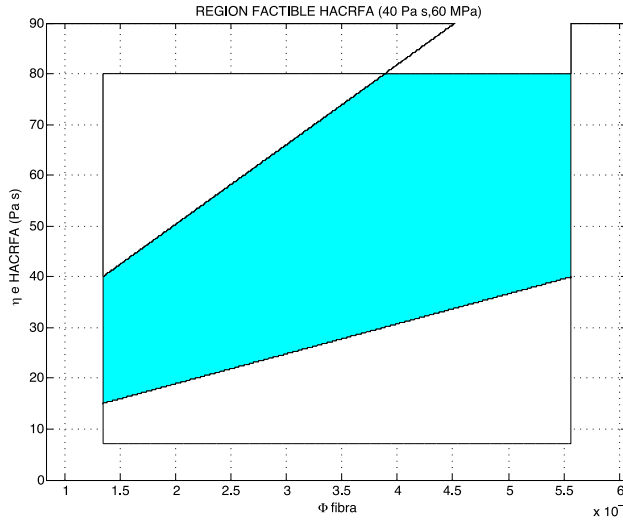


Figura 1. Región factible para HACRFA [$\eta_e = 40$ Pa s, $f_{cu} = 60$ MPa]

$\phi_{f\min}$ y $\phi_{f\max}$ se calculan a través de las Ecs. 9 y 10: $f_{cu} = 60$ MPa, $\eta_{\min} = 7$ Pa s, $\eta_{\max} = 18.9$ Pa s

$$\phi_{f\min} = \frac{3 \ln(2 \times 62) (40 - 18.9)}{18.9 \times \pi \times 62^2 - 3 \ln(2 \times 62)} = 0.0013 \quad (9)$$

$$\phi_{f\max} = \frac{3 \ln(2 \times 62) (40 - 7)}{7 \times \pi \times 62^2 - 3 \ln(2 \times 62)} = 0.0056 \quad (10)$$

$$0.0013 \leq 0.0055 \leq 0.0056$$

5- Estimar el valor $\eta_{HACbase}$ por medio de la Fig. 2, que muestra el intervalo de valores posibles de η para un HAC base con $f_{cu} = 60$ MPa.

Dados los valores de λ y ϕ_{fibra} , y el dato η_e del HACRFA, utilizando la Ec. 6, se calcula el valor $\eta_{HACbase}$ buscado: $\lambda = 62$, $\phi_{fibra} = 0.0055$, $\eta_e = 40$ Pa s

$$\eta_{HACbase} = \frac{40}{\left[(1 - 0.0055) + \frac{\pi \times 0.0055 \times 62^2}{3 \ln(2 \times 62)} \right]} = 7.2 \text{ Pa s} \quad (6)$$

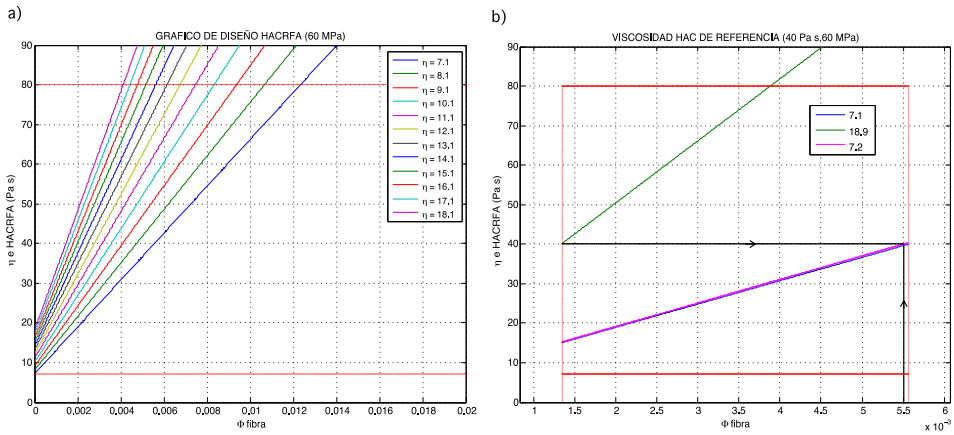


Figura 2. a) Cálculo de η_{HACbase} ($\eta_e = 40 \text{ Pa s}$, $\phi_{\text{fibra}} = 0.0055$, $f_{\text{cu}} = 60 \text{ MPa}$);
 b) Detalle en $\eta_{\text{HACbase}} = 7.2 \text{ Pa s}$

6- Calcular las cantidades de las fases sólidas del HACRFA una vez determinado el valor $\eta_{\text{HACbase}} = 7.2 \text{ Pa s}$ a través de la Fig. 3, correspondiente a $f_{\text{cu}} = 60 \text{ MPa}$

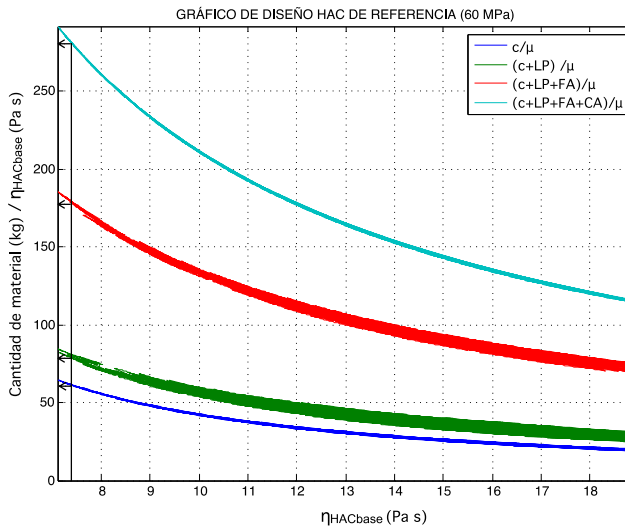


Figura 3. Cálculo de las cantidades de materiales constituyentes del HAC base según su viscosidad plástica [$f_{\text{cu}} = 60 \text{ MPa}$]

Materiales cementíceos (c): $\frac{c}{\eta_{\text{HACbase}}} = 63$; $c = 63 \times 7.2 = 453.6 \text{ kg/m}^3$ (12)

$$\text{Agua (w): } \frac{w}{c} = 0.46; w = 453.6 \times 0.46 = 208.7 \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

$$\text{Aditivo superplastificante (SP): } \frac{SP}{c} = 0.028; SP = 453.6 \times 0.028 = 12.7 \text{ kg/m}^3 \quad (14)$$

Filler calizo (LP):

$$\frac{(c+LP)}{\eta_{\text{HACbase}}} = 81; c + LP = 81 \times 7.2 = 583.2 \text{ kg/m}^3 \quad (15)$$

$$LP = 583.2 - 453.6 = 129.6 \text{ kg/m}^3$$

Árido fino (FA):

$$\frac{(c+LP+FA)}{\eta_{\text{HACbase}}} = 179; c + LP + FA = 179 \times 7.2 = 1288.8 \text{ kg/m}^3 \quad (16)$$

$$FA = 1288.8 - 453.6 - 129.6 = 705.6 \text{ kg/m}^3$$

Árido grueso (CA):

$$\frac{(c+LP+FA+CA)}{\eta_{\text{HACbase}}} = 284; c + LP + FA + CA = 284 \times 7.2 = 2044.8 \text{ kg/m}^3 \quad (17)$$

$$CA = 2044.8 - 453.6 - 129.6 - 705.6 = 756 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Fibra de acero (f): } f = \phi_{\text{fibra}} \rho_{\text{fibra}} = 0.0055 \times 7850 = 43.2 \text{ kg/m}^3 \quad (18)$$

7- Calcular el volumen total de la mezcla mediante las densidades de los materiales. Las densidades son $\rho_c=3000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{SP}=1038 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{FA}=2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{CA}=2600 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{LP}=2510 \text{ kg/m}^3$.

$$V_T = \frac{c}{\rho_c} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + \frac{LP}{\rho_{LP}} + \frac{FA}{\rho_{FA}} + \frac{CA}{\rho_{CA}} + \frac{f}{\rho_{fibra}} + 0.02 = 1.005 \text{ m}^3 \quad (19)$$

8- Calcular nuevamente el valor η_{HACbase} , utilizando la Ec. 5 y sustituyendo las fracciones de los componentes obtenidas, de modo que se compruebe si está dentro del margen de error aceptable de $\pm 5\%$ respecto del valor objetivo. Por último hay que calcular otra vez el valor η_e del HACRFA con la Ec. 6 y el error cometido respecto del valor objetivo (aceptable dentro del intervalo de $\pm 5\%$).

$$\phi_{LP} = \frac{LP/\rho_{LP}}{c/\rho_{cm} + w/\rho_w + SP/\rho_{SP} + 0.02 + LP/\rho_{LP}} = 0.12 \quad (20)$$

$$\phi_{FA} = \frac{FA/\rho_{FA}}{c/\rho_{cm} + w/\rho_w + SP/\rho_{SP} + 0.02 + LP/\rho_{LP} + FA/\rho_{FA}} = 0.38 \quad (21)$$

$$\phi_{CA} = \frac{CA/\rho_{CA}}{c/\rho_{cm} + w/\rho_w + SP/\rho_{SP} + 0.02 + LP/\rho_{LP} + FA/\rho_{FA} + CA/\rho_{CA}} 0.29 \quad (22)$$

El valor $\eta_{HACbase}$ calculado, así como el error cometido son:

$$\eta_{HACbase} = \eta_{pasta} \left(1 - \frac{\phi_{LP}}{0.524}\right)^{-1.9} \left(1 - \frac{\phi_{FA}}{0.63}\right)^{-1.9} \left(1 - \frac{\phi_{CA}}{0.74}\right)^{-1.9} = 7.2 \text{ Pa s} \quad (5)$$

$$\text{Error} = \frac{100(\eta_{HACbase} \text{ calculada} - \eta_{HACbase} \text{ objetivo})}{\eta_{HACbase} \text{ objetivo}} = 0.1\% \quad (23)$$

El valor η_e calculado y su error asociado son:

$$\eta_e = \eta_{HACbase} \left[\left(1 - \phi_{fibra}\right) + \frac{\pi \phi_{fibra} \lambda^2}{3 \ln(2\lambda)} \right] = 40.3 \text{ Pa s} \quad (6)$$

$$\text{Error} = \frac{100 \times (\eta_e \text{ calculada} - \eta_e \text{ objetivo})}{\eta_e \text{ objetivo}} = 0.7\% \quad (23)$$

5.- CONCLUSIONES

Se presenta una nueva metodología de diseño de HACRFA sencilla de calcular a partir de unas curvas de diseño y que garantiza la autocompactabilidad. Esta metodología se basa en modelos constitutivos micromecánicos, en la que el principal parámetro reológico es la viscosidad plástica efectiva de la mezcla. Éste es un dato de partida, además de la resistencia a compresión, la esbeltez de la fibra y su fracción en volumen. Como la viscosidad plástica de la mezcla parte de la viscosidad de la pasta de cemento y ésta depende de las tipologías de cemento, adiciones y relaciones agua-materiales cementíceos, se han medidos los valores de viscosidad de la pasta para cemento tipo I con escoria para diferentes relaciones agua-cemento.

A través de estos datos de partida, se calculan las proporciones de los componentes del HACRFA con unos sencillos y útiles gráficos de diseño de mezcla. Por último, se ha desarrollado un ejemplo en el que se explica pormenorizadamente el uso de estos gráficos y la resolución mediante las ecuaciones que intervienen en la metodología de diseño.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida al Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto BIA2015-68678-C2-1-R. A. de la Rosa agradece la ayuda económica recibida mediante la beca FPI BES-2016-077458. Así como al Instituto de Cerámica y Vidrio del CSIC, en especial al Profesor de Investigación Rodrigo Moreno por la ayuda y el instrumental para la medición de la viscosidad.

REFERENCIAS

- [1] Caijun S., Zemei W., KuiXi L., Linmei W. “A review on mixture design methods for self-compacting concrete”. *Construction and Building Materials*. 2015, nº 84, p. 387-398.
- [2] Karihaloo B.L., Ghanbari A. “Mix proportioning of self-compacting high-and ultra-high-performance concretes with and without steel fibres”. *Magazine of Concrete Research*. 2012, vol. 64, p. 1089–1100.
- [3] Deeb R., Karihaloo B.L. “Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes”. *Magazine of Concrete Research*. 2013, vol. 65, nº 9, p. 546-556.
- [4] Heirman G., Vandewalle L., Van Gemert D., Wallevik O. “Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2008, vol. 150, p. 93-103.
- [5] Ferrara L., Grünwald S., Dehn F. “Design with Highly Flowable Fiber-Reinforced Concrete: Overview of the Activity of fib TG 8.8” *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada, 2010*, p. 395-406.
- [6] Ferrara L., Park Y.D., Shah S.P. “A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete”. *Cement and Concrete Research*. 2007, vol. 37, p. 957-971.
- [7] Martinie L., Roussel N. “Fiber-Reinforced Cementitious Materials: From Intrinsic Isotropic Behavior to Fiber Alignment”. *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada, 2010*, vol. 1, p. 407-415
- [8] Ferrara L. “Fiber Reinforced SCC”. *Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete*. 2014, p. 161-220.
- [9] Grünwald S. *Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete*. PhD-thesis. Delft, The Netherlands: Delf University of Technology, 2004.
- [10] Grünwald S., Laranjeira F., Walraven J., Aguado A., Molins C. “Improved Tensile Performance with Fiber Reinforced Self-compacting Concrete”. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6. RILEM State of the Art Reports*. 2012, vol. 2, p. 51-58.
- [11] Karihaloo B.L., Ghanbari A. “Mix proportioning of self-compacting high- and ultra-high-performance concretes with and without steel fibres”. *Magazine of Concrete Research*. 2012, vol. 64, nº 12, p. 1089-1100.

- [12] Qiong W., Xuehui A. “Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste”. *Construction and Building Materials*. 2014, vol. 53, p. 642-651.
- [13] Ghanbari A., Karihaloo B.L. “Prediction of the plastic viscosity of self-compacting steel fibre reinforced concrete”. *Cement and Concrete Research*. 2009, vol. 39, p. 1209-1216.
- [14] Abo Dhaheer M.S., Al-Rubaye M.M., Alyhya W.S., Karihaloo B.L., Kulasegaram S. “Proportioning of self-compacting concrete mixes based on target plastic viscosity and compressive strength: mix design procedure”. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2016, vol. 5, n° 4, p. 199-216.
- [15] Deeb R., Karihaloo B.L. “Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes”. *Magazine of Concrete Research*. 2013, vol. 65, p. 546–556.
- [16] Batchelor G.K. “The stress generated in a non-dilute suspension of elongated particles by pure straining motion”. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*. 1971, vol. 46, p. 813–829.
- [17] Krieger I.M., Dougherty T.J. “A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres”. *Journal of Rheology*, 1959, vol. 3, p. 137–152.
- [18] Rossi P. “Mechanical behaviour of metal-fibre reinforced concretes”. *Cement and Concrete Composites*. 1992, vol. 14, n° 1, p. 3-16.
- [19] Martinie L., Rossi P., Roussel N. “Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction”. *Cement and Concrete Research*. 2010, vol. 40, p. 226-234.
- [20] EFNARC. “The European guidelines for self-compacting concrete - specification, production and use”. 2005, www.efnafr.org.
- [21] Domone P.L. “Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies”. *Cement and Concrete Composites*. 2006, vol. 28, p. 197-208.
- [22] Poveda E., Ruiz G., Cifuentes H., Yu, R.C. and Zhang X.X. Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting sfrc. *International Journal of Fatigue*. 2017, vol. 101, p. 9-17.