

Efecto del empaquetamiento en el contenido crítico de fibra en hormigones autocompactante

Packing effect on the critical fibre content in self-compacting concretes

Gemma Rojo López^a, Belén González Fonteboa^b, Fernando Martínez Abella^c, Blas Cantero Chaparro^c

^a Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). gemma.rojo@udc

^b Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). Catedrática de Universidad, bfonteboa@udc.es

^c Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). Catedrático de Universidad, fmartinez@udc.es

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña (UDC), Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC). Investigador Postdoctoral Juan de la Cierva, b.cantero@udc.es

RESUMEN

Se presentan los resultados del estudio de mezclas de hormigón autocompactante reforzado con fibras con tres contenidos de pasta (350, 400 y 450 l/m³), dos sistemas cementantes, 100% de cemento y 60% de cemento, 25% de filler calizo y 15% de metacaolín y tres tipos de fibras rígidas. El objetivo del trabajo es analizar el efecto de la fracción volumétrica de sólidos y la interacción entre partículas en el comportamiento en fresco a través de la reología mediante el ensayo Stress Growth Test (SGT), que permite la obtención de la tensión de flujo umbral. Se observó que existe un valor crítico de contenido de fibra que afecta gravemente al comportamiento en fresco del hormigón autocompactante y que puede predecirse con ensayos de medida de empaquetamiento.

ABSTRACT

The results of the study of fibre-reinforced self-compacting concrete mixes with three paste contents (350, 400 and 450 l/m³), two cementitious systems, 100% cement and 60% cement, 25% limestone filler and 15% metakaolin and three types of rigid fibres are presented. The aim of the work is to analyse the effect of the volume fraction of solids and the interaction between particles on the fresh behaviour through rheology by means of the Stress Growth Test (SGT), which allows the threshold flow stress to be obtained. It was observed that there is a critical value of fibre content that severely affects the fresh behaviour of self-compacting concrete. This value can be predicted with packing tests.

PALABRAS CLAVE: reología, tixotropía, fibras, fracción de empaquetamiento.

KEYWORDS: rheology, thixotropy, packing fraction

1. Introducción

La incorporación de fibras afecta tanto al comportamiento del hormigón endurecido como fresco. Las propiedades del hormigón en

estado endurecido suelen mejorar con el uso de fibras; sin embargo, en estado fresco las fibras suelen reducir la trabajabilidad, lo que puede

suponer un problema en el caso del hormigón autocompactante cuyo principal interés es la facilidad de colocación.

En este sentido, son muchos los parámetros de las fibras que influyen en el comportamiento en estado fresco del hormigón autocompactante reforzado con fibras (HACRF), de modo que el tipo de fibra y sus propiedades geométricas afectan significativamente. Abdelaleem et al. [1] encontraron que la capacidad de paso se veía más afectada por la inclusión de fibras sintéticas que por la incorporación de fibras de acero, ya que, para un mismo volumen de fibra, el número de fibras con baja densidad era elevado, aumentando así a la capacidad de paso [1,2]. Además, las fibras de polipropileno (PP) mostraron una mayor capacidad de absorción de agua que las de acero, reduciendo así la cantidad de agua libre en la mezcla y aumentando la viscosidad plástica [3].

Las propiedades geométricas de la fibra también desempeñan un papel fundamental en el comportamiento en fresco. Banfill et al. [4] y Poznyak et al. [5] observaron que ambos parámetros reológicos (tensión de flujo umbral y viscosidad plástica) aumentaban al aumentar la longitud de la fibra. Otros autores observaron que las fibras largas favorecen el entrelazado de las partículas y conducen a peores resultados de trabajabilidad [1,6]; por el contrario, las fibras cortas podrían mejorar los parámetros reológicos y la trabajabilidad [7]. Asimismo, la relación entre la longitud y el diámetro de la fibra (ratio de aspecto) suele considerarse para definir la geometría de la fibra [8]. Una ratio de aspecto elevada afecta negativamente a la trabajabilidad del hormigón [9]. Además, la ratio de aspecto de las fibras y la fluidez del hormigón están inversamente correlacionadas [10,11]. La capacidad de fluir más libremente se ve limitada por la gran dificultad de mover las partículas gruesas debido al aumento de la ratio de aspecto de las fibras.

Según diversos autores, existe un contenido umbral de fibra que hace que el efecto

de las mismas pase de mejorar o apenas afectar al comportamiento reológico a empeorarlo significativamente. Kuder et al. [12] concluyeron que los parámetros Bingham disminuyen cuando el contenido de fibra es inferior a un porcentaje fijo; mientras que cuando se supera este porcentaje, aumentan tanto la tensión de flujo umbral como la viscosidad plástica. Otros autores han establecido límites al contenido de fibra, aunque no hay acuerdo sobre la cantidad óptima. Abdelaleem et al. [1] limitaron el uso de la fracción volumétrica hasta el 0.35 % para las fibras metálicas y el 0.2 % para la fibra sintética. Farhan et al. [13] establecieron un contenido máximo de fibra metálica del 0.5 % (en volumen de áridos). Nehme et al. [14] establecieron un rango entre 30 y 60 kg/m³ para evitar efectos negativos, aunque concluyeron que el límite podría elevarse hasta un máximo de 90 kg/m³, garantizando así el cumplimiento de las recomendaciones del EFNARC. Martinie et al. [15] demostraron la existencia de una dosificación crítica de fibra que, una vez superada, aumenta significativamente la tensión de flujo umbral de la mezcla.

Este trabajo tiene como objetivo definir el contenido máximo de fibra que puede utilizarse para mantener el comportamiento autocompactante en un rango adecuado, en el que los cambios en la composición de la mezcla no modifiquen significativamente el comportamiento reológico del hormigón. Para ello, se analizó el efecto de un porcentaje de fibra en diversas mezclas autocompactantes. Por un lado, se diseñaron mezclas autocompactantes para estudiar la influencia de las fibras cuando se utilizaban diversas fracciones de volumen de árido en la composición de la mezcla, de forma que el contenido de árido variaba desde una cantidad baja (550 l/m³) hasta una cantidad alta (650 l/m³). Por otra parte, se evaluó el efecto de la fibra cuando se cambia la composición del ligante diseñando los HACRF con dos composiciones de ligante diferentes.

2. Materiales y mezclas

2.1 Materiales

Los materiales cementantes fueron: Cemento Portland (CEM), CEM I 52.5 N-SR5, filler calizo (LF) y metacaolín (MK) combinados en un ligante ternario en el que el contenido de clínker se reduce al incorporar estos dos materiales cementantes suplementarios (SCM).

Se utilizaron dos sistemas cementantes: 100C (100% de cemento) y 60C25F15M (60% cemento, 25% filler calizo y 15% metacaolín). En la Figura 1 se incluye la distribución granulométrica de los tres materiales cementantes medida mediante análisis láser. En la Figura 2 se muestran imágenes SEM de CEM, LF y MK.

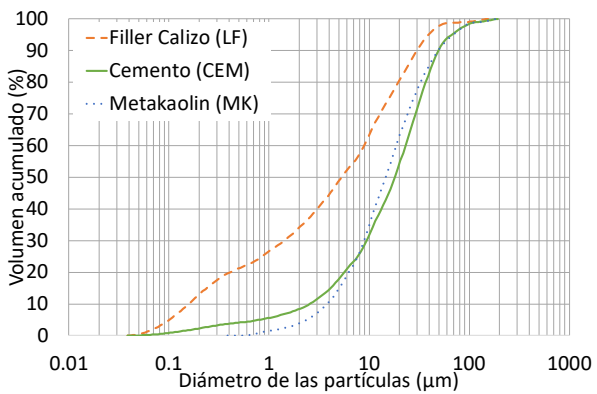


Figura 1. Distribución granulométrica de los materiales cementantes

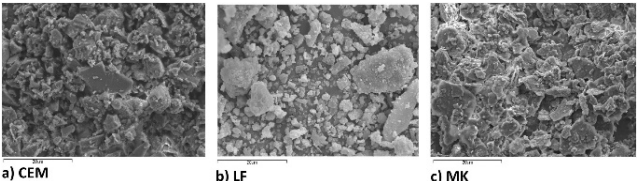


Figura 2 . SEM de los materiales cementantes.

Se utilizaron dos fracciones diferentes de áridos: un árido fino y un árido grueso de machaqueo (ambos calizos) con un tamaño nominal de 0-4 mm y 6-12 mm, respectivamente (FA y CA) (Figura 3).

En las mezclas se utilizó agua potable y un superplastificante de base policarboxilato (Sika ViscoCrete-3500).



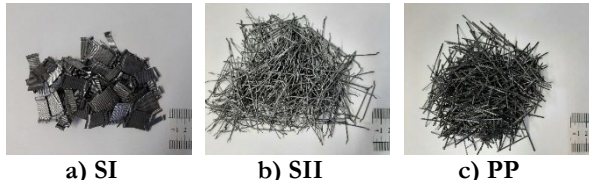
a) Árido fino (FA) b) Árido grueso (CA)
Figura 3. Áridos

2.2 Fibras

Se utilizaron dos fibras de acero (SI y SII) y una fibra de PP (Figura 4): Las fibras SI eran fibras de alambre estiradas en frío con extremos en forma de gancho, superficie brillante y encoladas en grupos; las fibras SII eran fibras de alambre estiradas en frío con extremos en forma de gancho, superficie brillante y sueltas, sin cola, y las fibras PP tenían una superficie estampada y rugosa. La Tabla 1 muestra sus características físicas y geométricas.

Tabla 1. Propiedades de las fibras

	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Ratio de aspecto (l/d)
Dramix 3D XX/30 (SI)	30	0.4	60.0
Dramix 3D 45/50 (SII)	50	1.05	47.6
SikaFibre T (PP)	48	0.93	51.6



a) SI b) SII c) PP
Figura 4. Tipos de fibras

Es importante determinar si las fibras en la mezcla son inclusiones rígidas o flexibles. Este comportamiento depende de tres aspectos: el módulo de elasticidad del material que conforma la fibra, las características geométricas de la fibra y la tensión de flujo umbral que está en el origen de la deformación de las fibras. Para determinar este comportamiento, la fibra puede considerarse como una viga uniformemente cargada en el interior del material base cemento. Basándose en este comportamiento de viga, cuando la relación entre la deformación y la

longitud de la fibra (establecida por la ecuación (1)) es elevada (superior al 1 % [15]), la fibra debe considerarse flexible; en caso contrario, puede considerarse una inclusión rígida.

En esta ecuación, según Martinie et al. [15], la tensión de flujo umbral que debe considerarse es la del fluido, suspensión en el que se incorpora la fibra, sin embargo, Sultangaliyeva et al. [16] concluyeron que se trata de la tensión de flujo umbral del sistema completo (fibras incluidas) la que debería considerarse. También afirmaron que una fibra de PP típica con una ratio de aspecto de 300 y un módulo de Young de 1 GPa se considerará flexible cuando la relación entre la deflexión y la longitud sea del orden de varios cientos (en %).

$$\frac{f}{l} \cong \frac{\tau_0}{E} \left(\frac{l}{d} \right)^3 \quad (1)$$

Donde:

f/l : relación entre deformación y longitud

τ_0 : límite elástico

l : longitud de la fibra

d : diámetro de la fibra

E : módulo de Young del material de la fibra

En este estudio, todas las fibras pueden considerarse partículas no coloidales debido a su gran tamaño. Además, SI y SII se considerarán inclusiones rígidas mientras la tensión de flujo umbral del HACRF sea inferior a 9700 Pa para SI e inferior a 19400 Pa para SII. Estos valores de tensión de flujo umbral garantizan que la relación entre la deflexión y la longitud de la fibra es inferior al 1 % [15,17–20]. Se espera que la tensión de flujo umbral de las mezclas HACRF diseñadas (incluidas las fibras) sea muy inferior a estos valores. Por lo tanto, estas fibras se considerarán inclusiones rígidas.

Cuando se analiza la fibra de polipropileno, los valores de tensión de flujo umbral que garantizan que la ratio deflexión-longitud está por debajo de cientos (en %) [16], se sitúan en torno a 4000 Pa. De nuevo, se espera que la tensión de flujo umbral de las mezclas HACRF diseñadas con fibras de PP esté por debajo de este valor, lo que significa que estas

fibras también se considerarán como inclusiones rígidas en este estudio.

2.3 Empaquetamiento de sólidos

El valor de la densidad de empaquetamiento de los áridos y de las fibras se midió experimentalmente siguiendo el procedimiento específico descrito en la literatura, [21] para áridos y [15] para fibras. Los resultados del ensayo permiten obtener la fracción de empaquetamiento suelta (ϕ_c) y densa (ϕ_m) de las inclusiones sólidas.

La fracción de empaquetamiento denso de áridos (y mezcla de áridos más fibras) se midió utilizando el método descrito por Hafid et al. [21]. La fracción de empaquetamiento denso de las fibras se obtuvo utilizando el mismo método, pero con un recipiente cuyas dimensiones eran al menos 5 veces la longitud de las fibras utilizadas. En ambos casos se midieron los volúmenes ocupados por los sólidos antes y después de la vibración durante un minuto para calcular la fracción de empaquetamiento suelto y denso, respectivamente. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

Según la bibliografía, la fracción de empaquetamiento suelto (ϕ_c) y denso (ϕ_m) de las fibras también puede estimarse utilizando el valor de la ratio de aspecto como $\phi_c = \alpha_c/r$ y $\phi_m = \alpha_m/r$. Si la ratio de aspecto oscila entre 50 y 10, Martinie et. al [15] propusieron $\alpha_c=3.2$ y $\alpha_m=4$; Philipse [20] sugirió un valor de α_m de 5.4, y Nardin et al. [22] sugirieron un valor de α_m de 4.5. La Figura 5 a) muestra la relación entre la ratio de aspecto y la fracción de empaquetamiento calculada experimentalmente en este estudio, obteniéndose valores de α_m de 4.5 y de α_c de 3.4, lo que indica que los valores experimentales se encuentran en el rango de los propuestos en la literatura.

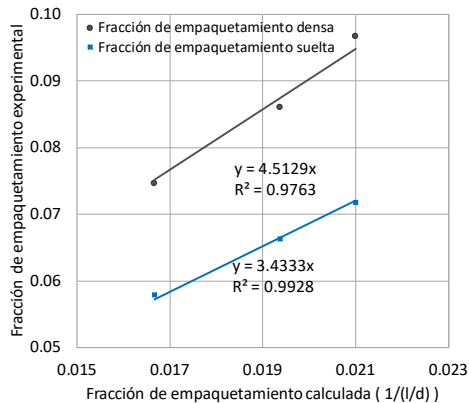
Asimismo, la Tabla 3 incluye los valores de ϕ/ϕ_m , que se calcularon con los datos experimentales de ϕ_m (Tabla 2) y con la fracción volumétrica de sólidos (ϕ) utilizada en cada mezcla.

Los valores de ϕ/ϕ_m se obtuvieron mediante dos procedimientos diferentes. Para el cálculo de los «Valores experimentales» (Tabla 3) se utilizaron los valores de ϕ_m (Tabla 2) obtenidos mediante el ensayo realizado con la muestra de

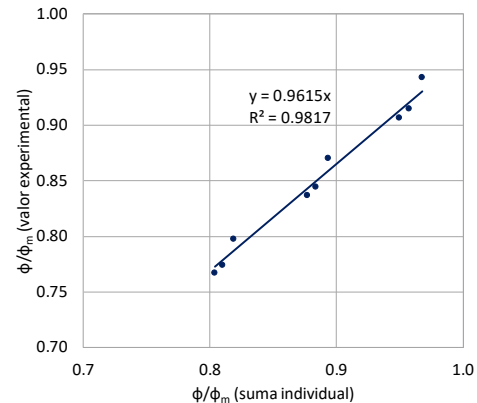
áridos y fibras juntos (CA+FA+fibra). Para el cálculo de los «Valores calculados», se utilizaron los valores de ϕ_m de los áridos (CA+FA) y ϕ_m de las fibras de la Tabla 2, calculándose el ϕ/ϕ_m de la

Tabla 2. Fracción de empaquetamiento densa y suelta de inclusiones granulares y fibras

	CA	FA	CA+FA	SI	SII	PP	CA+FA+SI	CA+FA+SII	CA+FA+PP
Densa ϕ_m	0.568	0.728	0.731	0.075	0.096	0.086	0.689	0.717	0.711
Suelta ϕ_c	0.505	0.630	0.617	0.058	0.072	0.066	0.574	0.592	0.585
Ratio ϕ_c/ϕ_m			0.845				0.833	0.826	0.824



a) Relación entre los valores calculados y experimentales de fracción de empaquetamiento



b) Relación entre ϕ/ϕ_m calculado con ecuación 2 y obtenido experimentalmente

Figura 5 Relaciones de empaquetamiento

Tabla 3 ϕ/ϕ_m calculado con ecuación 2 y obtenido experimentalmente

	Valores experimentales			Valores calculados		
	350 l	400 l	450 l	350 l	400 l	450 l
CA+FA	0.889	0.821	0.753			
CA+FA+SI	0.943	0.870	0.798	0.968	0.893	0.819
CA+FA+SII	0.907	0.837	0.767	0.950	0.877	0.804
CA+FA+PP	0.915	0.844	0.774	0.957	0.884	0.810

Tabla 4. Composición de las mezclas

Pasta (l)	Ligante (%)	CEM	LF	MK	FA	CA	SI	SII	PP	Sp	Agua
350	100C-PP	503.3			884	897			5.3	2.43	182.4
	100C-SI	503.3			884	897	45.9			2.43	182.4
	100C-SII	503.3			884	897		45.9		2.43	182.4
	60C25F15M-PP	302.4	109.4	63.5	884	897			5.3	1.82	182.6
	60C25F15M-SI	302.4	109.4	63.5	884	897	45.9			1.82	182.6
	60C25F15M-SII	302.4	109.4	63.5	884	897		45.9		1.82	182.6
400	100C-PP	575.1			816	828			4.9	2.78	208.4
	100C-SI	575.1			816	828	42.4			2.78	208.4
	100C-SII	575.1			816	828		42.4		2.78	208.4
	60C25F15M-PP	345.5	124.9	72.6	816	828			4.9	2.09	208.7
	60C25F15M-SI	345.5	124.9	72.6	816	828	42.4			2.09	208.7
	60C25F15M-SII	345.5	124.9	72.6	816	828		42.4		2.09	208.7
450	100C-PP	647.0			748	759			4.5	3.12	234.5
	100C-SI	647.0			748	759	38.9			3.12	234.5
	100C-SII	647.0			748	759		38.9		3.12	234.5
	60C25F15M-PP	388.74	140.6	81.6	748	759			4.5	2.35	234.8
	60C25F15M-SI	388.74	140.6	81.6	748	759	38.9			2.35	234.8
	60C25F15M-SII	388.74	140.6	81.6	748	759		38.9		2.35	234.8

mezcla según la Ecuación 2 propuesta por Martinie et al. [15].

$$\frac{\phi}{\phi_m} = \frac{\phi_{\text{árido}}}{\phi_{m-\text{árido}}} + \frac{\phi_{\text{fibra}}}{\phi_{m-\text{fibra}}} \quad (2)$$

En la Figura 5b se observa la relación entre los valores experimentales y los valores calculados. El valor de R^2 indica que ambos métodos son adecuados para calcular ϕ/ϕ_m .

2.4 Mezclas

Los parámetros de dosificación fueron los siguientes: relación volumétrica agua/ligante (V_w/V_p de 1.1), relación volumétrica árido grueso/árido fino (CA/FA de 1.0) y dosificación de superplastificante (1.12 %). Además, la dosificación de las fibras se realizó en volumen sobre la cantidad de árido grueso establecida, reduciéndola en la misma cantidad que el volumen de fibras añadido. Este porcentaje se estableció en el 1.8%, lo que correspondía a una dosificación tradicional para las fibras metálicas y de polipropileno.

Se diseñaron hormigones de referencia (sin fibras) utilizando dos niveles de pasta (400 l y 450 l) combinados con dos ligantes, uno de ellos solo de cemento (100C) y el otro con el sistema ternario (60C25F15M). Las proporciones de mezcla se muestran en la Tabla 4.

3 Ensayos

Los hormigones se prepararon siguiendo el mismo protocolo de amasado de estudios previos que puede consultarse en Rojo et al. [23].

Tras la mezcla, se evaluó el comportamiento en estado fresco mediante reología. El comportamiento en fresco de las mezclas se midió a los 10, 30 y 65 minutos del contacto cemento-agua.

El ensayo reológico se realizó con un reómetro comercial portátil (ICAR) [23]. Se seleccionó el ensayo de tensión creciente (SGT) para caracterizar la reología, y el ensayo se repitió dos veces en condiciones de reposo y perturbadas según la descripción de Rojo et al. [23]. En este ensayo la velocidad de rotación constante fue de 1.5 rpm y el ensayo se detuvo después de 60 s, garantizando que se alcanzaba el par máximo. El protocolo del SGT puede verse en la Figura 6.

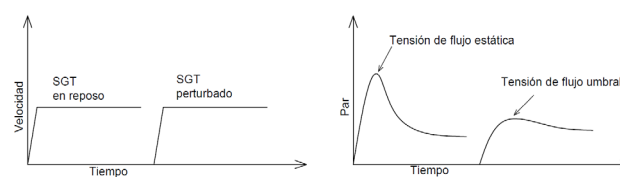


Figura 6. Ensayo SGT

4. Contenido crítico de fibras

Las interacciones fluido/partícula o partícula/partícula dependen en una suspensión de la fracción de empaquetamiento de sólidos. En fracciones volumétricas de sólido bajas (estado diluido o semidiluido), estas interacciones son principalmente hidrodinámicas. El movimiento de las partículas en la pasta de cemento implica cierto flujo o deformación de la misma. En fracciones de volumen de sólidos elevadas (estado semiconcentrado o concentrado), se producen contactos directos entre las partículas. En estos estados, las interacciones fibra-fibra, árido-árido y fibra-árido dominan el régimen. Según Martinie et al. [15], este fenómeno está asociado a un proceso de percolación y se produce cuando la fracción volumétrica de sólido es superior a un valor denominado contenido crítico de sólido (ϕ_c).

La ecuación (3) se definió basándose tanto en la ecuación de Krieger-Dougherty como en el modelo de Chateau-Ovarlez-Trung [24]. Según esta ecuación, el hormigón en estado fresco

puede considerarse una suspensión en la que los áridos (y las fibras) son las partículas sólidas, y la pasta de cemento es el fluido.

$$\mu_m = \mu_s \sqrt{\frac{(1 - \phi)}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{[\eta] \cdot \phi_m}}} \quad (3)$$

Donde:

τ_m : tensión de flujo umbral del hormigón

τ_s : tensión de flujo umbral de la pasta

$[\eta]$: parámetro intrínseco de los sólidos

ϕ : fracción volumétrica de sólido

ϕ_m : fracción de empaquetamiento denso

Según la Ecuación 3, la tensión de flujo umbral del hormigón es proporcional a la del fluido (pasta de cemento) modificada por una función que tiene en cuenta la incorporación de sólidos. Esta función se ve dominada por la ratio (ϕ/ϕ_m) , o fracción volumétrica de sólidos relativa. Martinie et al. [15] realiza un estudio sobre mortero y concluye que la tensión de flujo umbral relativa (mortero-pasta de cemento) no experimenta cambios significativos mientras que la fracción volumétrica de sólidos relativa se mantiene por debajo de 0.8. Con este valor podría calcularse el contenido crítico de sólidos por debajo del cual pueden despreciarse los contactos directos entre las partículas sólidas y considerarse un sistema semidiluido.

En este estudio, el análisis se desarrolló introduciendo áridos gruesos y fibras. Los resultados experimentales se utilizaron para ajustar una curva, Figura 7, basada en la Ecuación 3 que había sido validada para suspensiones de esferas monodispersas y podría subestimar los resultados experimentales, ya que la forma angular y la textura rugosa de los áridos de machaqueo (en comparación con las partículas esféricas), y especialmente la forma geométrica de las fibras, aumentan la disipación de energía durante el cizallamiento, lo que provoca mayores tensiones. La curva es diferente en función de la composición de la pasta, lo que significa que el parámetro que

representa el comportamiento de la pasta de la curva obtenida por 100 C (Ecuación (4)) es diferente del obtenido para el sistema 60C25F15M (Ecuación (5)). Por ello, cada ligante (100C y 60C25F15M) se estudió por separado para poder desarrollar el análisis considerando directamente la tensión de flujo umbral del hormigón.

$$\mu_{m100C} = 1.50 \sqrt{\frac{(1 - \phi)}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{7.90 \cdot \phi_m}}} \quad (4)$$

$$\mu_{m60C25F15M} = 3.20 \sqrt{\frac{(1 - \phi)}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{7.90 \cdot \phi_m}}} \quad (5)$$

La Figura 7 muestra la relación entre la tensión de flujo umbral del hormigón (tanto con fibras como sin ellas) y la fracción volumétrica sólida relativa medida experimentalmente (considerando las fibras). Esta figura puede utilizarse para definir una fracción volumétrica relativa límite que fijaría la frontera en la que el incremento en el contenido de sólidos supone cambios significativos en la tensión de flujo umbral de los hormigones y que puede utilizarse para calcular la fracción volumétrica crítica de sólidos en las mezclas de hormigón.

La Figura 7 muestra que la fracción de empaquetamiento relativa límite, ϕ/ϕ_m , debe ser inferior a 0.83 para mantener la tensión de flujo umbral sin cambios significativos. En caso de superarse este valor, el comportamiento del hormigón depende en menor medida del comportamiento de la pasta de cemento y en gran medida tanto de la fracción volumétrica como de la fracción de empaquetamiento denso del esqueleto sólido

Se observa que este valor, 0.83, es del mismo orden que la relación entre la fracción de empaquetamiento suelto y la fracción de empaquetamiento densa, ϕ_c/ϕ_m (Tabla 2).

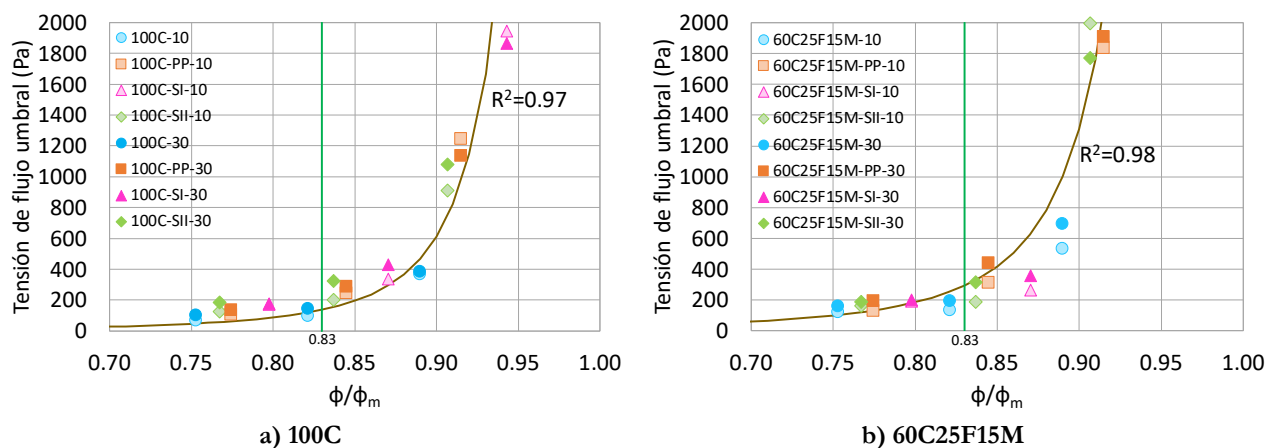


Figura 7. Tensión de flujo umbral vs fracción de empaquetamiento relativa

En la sección 2.3 se había concluido que la fracción relativa de empaquetamiento de la mezcla de áridos gruesos más áridos finos y fibras podía medirse experimentalmente o calcularse como la suma de la contribución de los áridos y las fibras por separado. Se había observado también que la fracción de empaquetamiento denso de las fibras podía estimarse utilizando su ratio de aspecto. Por lo tanto, la Ecuación 6 podría utilizarse como criterio de diseño para hormigones:

$$\frac{\phi}{\phi_m} = \frac{\phi_{aggregate}}{\phi_{m-aggregate}} + \frac{\phi_{fibre}}{\phi_{m-fibre}} = \frac{\phi_{aggregate}}{\phi_{m-aggregate}} + \frac{\phi_{fibre}}{\frac{4.5}{r}} \quad (6)$$

Midiendo el ϕ_m del árido (mezcla de árido fino y grueso en una proporción fija establecida en un primer paso del diseño de la mezcla) y estimando el ϕ_m de la fibra en función de la ratio de aspecto, se puede equilibrar su cantidad (árido y fibras) de acuerdo con la Ecuación 6 para garantizar que la fracción relativa de empaquetamiento sea inferior al valor crítico, 0.83, asegurando así que la incorporación de las fibras no modifica significativamente el comportamiento en fresco.

5. Conclusiones

Se ha visto que existe un valor crítico de la fracción de empaquetamiento relativo que, una vez superado, afecta significativamente al comportamiento en fresco del hormigón con fibras, indicando así que el número de contactos entre inclusiones sólidas es elevado (fija la frontera entre las interacciones hidrodinámicas puras y el dominio de los contactos friccionales). Este valor se sitúa en torno a 0.83 y puede calcularse como la relación entre la fracción de empaquetamiento suelto y la fracción de empaquetamiento denso, ϕ_c/ϕ_m , lo que significa que depende de las características geométricas de los áridos finos y gruesos y de las características geométricas de las fibras.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e innovación - Agencia Estatal de investigación a través de tres proyectos titulados: «Diseño de hormigones sostenibles para impresión 3D basado en la reología y en el control de propiedades muy tempranas (Eco3DConcrete)- PID2020-115433RB-I00», “Diseño de elementos prefabricados de hormigón incorporando

estrategias sostenibles de autocuración para aumentar su vida útil (PREHEALING)-PDC2021-121660-I00” y “Aprovechamiento de los efectos sinérgicos entre la impresión 3D y las tecnologías de autocuración para diseñar hormigones sostenibles y duraderos (3DHealConcrete) - TED2021-129757B-I00”..

Referencias

- [1] B.H. AbdelAleem, A.A.A. Hassan, M.K. Ismail, Properties of self-consolidating rubberised concrete reinforced with synthetic fibres, *Https://Doi.Org/10.1680/Jmacr.16.004 33. 69 (2017) 526–540.* <https://doi.org/10.1680/JMACR.16.004 33>.
- [2] M.I. Abukhashaba, M.A. Mostafa, I.A. Adam, Behavior of self-compacting fiber reinforced concrete containing cement kiln dust, *Alexandria Eng. J. 53 (2014) 341–354.* <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2014.03.006>.
- [3] G. Barluenga, F. Hernández-Olivares, Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC, *Cem. Concr. Res. 37 (2007) 1624–1638.* <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONR ES.2007.08.019>.
- [4] P.F.G. Banfill, G. Starrs, G. Derruau, W.J. McCarter, T.M. Chrisp, Rheology of low carbon fibre content reinforced cement mortar, *Cem. Concr. Compos. 28 (2006) 773–780.* <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONC OMP.2006.06.004>.
- [5] S.M.S. Poznyak O.R., Kirakevych I.I., Properties of self-compacting concrete with basalt fiber, *Irbis-Nbuv.Gov.UaOR Poznyak, II Kirakevych, MS StechyshynВісник Національного Університету Львівська Політехніка. Теорія і, 2014•irbis-Nbuv.Gov.Ua. (n.d.).* [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21CO M=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJ RN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21CO M=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJ RN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/VNULPTPB _2014_781_29.pdf)
- [6] E. Secrieru, V. Mechtcherine, C. Schröfl, D. Borin, Rheological characterisation and prediction of pumpability of strain-hardening cement-based-composites (SHCC) with and without addition of superabsorbent polymers (SAP) at various temperatures, *Constr. Build. Mater. 112 (2016) 581–594.* <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD MAT.2016.02.161>.
- [7] W. Wang, A. Shen, Z. Lyu, Z. He, K.T.Q. Nguyen, Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete—A review, *Constr. Build. Mater. 296 (2021) 123734.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat. 2021.123734>.
- [8] Y. Weng, B. Lu, M. Li, Z. Liu, M.J. Tan, S. Qian, Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing, *Constr. Build. Mater. 189 (2018) 676–685.* <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD MAT.2018.09.039>.
- [9] G. Centonze, M. Leone, M.A. Aiello, Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization, *Constr. Build. Mater. 36 (2012) 46–57.* <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD MAT.2012.04.088>.
- [10] Z. Wu, C. Shi, W. He, L. Wu, Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Constr. Build. Mater. 103 (2016) 8–14.* <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD MAT.2015.11.028>.
- [11] M.Y. Yardimci, B. Baradan, M.A. Taşdemir, Effect of fine to coarse aggregate ratio on the rheology and fracture energy of steel fibre reinforced self-compacting concretes, *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci. 39 (2014) 1447–1469.* <https://doi.org/10.1007/S12046->

014-0257-2/FIGURES/15.

- [12] K.G. Kuder, N. Ozyurt, E.B. Mu, S.P. Shah, Rheology of fiber-reinforced cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 191–199. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONR ES.2006.10.015>.
- [13] A.H. Farhan, A.R. Dawson, N.H. Thom, Damage propagation rate and mechanical properties of recycled steel fiber-reinforced and cement-bound granular materials used in pavement structure, *Constr. Build. Mater.* 172 (2018) 112–124. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD MAT.2018.03.239>.
- [14] S.G. Nehme, R. László, A. El Mir, Mechanical Performance of Steel Fiber Reinforced Self-compacting Concrete in Panels, *Procedia Eng.* 196 (2017) 90–96. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.07.177>.
- [15] L. Martinie, P. Rossi, N. Roussel, Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 226–234. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONR ES.2009.08.032>.
- [16] F. Sultangaliyeva, H. Carré, C. La Borderie, W. Zuo, E. Keita, N. Roussel, Influence of flexible fibers on the yield stress of fresh cement pastes and mortars, *Cem. Concr. Res.* 138 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106221>.
- [17] F. Tapia, S. Shaikh, J.E. Butler, O. Pouliquen, É. Guazzelli, Rheology of concentrated suspensions of non-colloidal rigid fibres, *J. Fluid Mech.* 827 (2017) 1–11. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.552>.
- [18] J. Golaszewski, G. Cygan, M. Drewniok, Influence of SCC rheological properties on evolution of formwork pressure at various casting rates, *AIP Conf. Proc.* 2928 (2023) 150032. <https://doi.org/10.1063/5.0170448>.
- [19] S. Grünewald, Fibre reinforcement and the rheology of concrete, in: *Underst. Rheol. Concr.*, Elsevier, 2012: pp. 229–256. <https://doi.org/10.1533/9780857095282.2.229>.
- [20] A.P. Philipse, The Random Contact Equation and Its Implications for (Colloidal) Rods in Packings, Suspensions, and Anisotropic Powders, *Langmuir*. 12 (1996) 1127–1133. <https://doi.org/10.1021/LA950671O>.
- [21] H. Hafid, G. Ovarlez, F. Toussaint, P.H. Jezequel, N. Roussel, Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars, *Cem. Concr. Res.* 80 (2016) 44–51. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONR ES.2015.11.002>.
- [22] M. Nardin, E. Papirer, J. Schultz, Contribution à l'étude des empilements au hasard de fibres et/ou de particules sphériques, *Powder Technol.* 44 (1985) 131–140. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(85\)87019-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(85)87019-4).
- [23] G. Rojo-López, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, I. González-Taboada, Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler, *Case Stud. Constr. Mater.* 17 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01143>.
- [24] F. Mahaut, S. Mokéddem, X. Chateau, N. Roussel, G. Ovarlez, Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 1276–1285. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.06.001>.