

Impacto de la optimización de la relación arena fina-arena gruesa en el desempeño del UHPC

Leites, Rafael^a; Molina, Anyela^a; Novello, Diego^a; Segura, Luis^a

^a Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, rleites@fing.edu.uy

Palabras clave: UHPC, Hormigón de ultra alto desempeño, empaquetamiento de partículas, relación arena fina-arena gruesa.

RESUMEN

El rendimiento del hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) depende en gran medida del empaquetamiento de las partículas granulares, el cual incide en la trabajabilidad y las propiedades mecánicas. Este estudio evalúa el efecto de la relación entre arena fina y gruesa sobre el comportamiento reológico y mecánico, un parámetro clave que controla la densidad y la uniformidad del esqueleto granular.

Se aplicó el método de O'Reilly utilizando arenas locales de Uruguay para identificar la relación óptima en función de la máxima densidad aparente. Se elaboraron seis mezclas a escala de laboratorio (1,5 L), variando únicamente la proporción de arenas, y se replicaron con dos tipos de cemento con el fin de evaluar la consistencia de los resultados frente al tipo de cemento utilizado. Se midieron la resistencia a compresión (7 y 28 días), la reología (mini-slump) y la densidad en estado endurecido.

Los resultados muestran que la relación óptima de arenas obtenida mediante el análisis de empaquetamiento en seco proporciona el mejor desempeño reológico, independientemente del tipo de cemento. Sin embargo, esta optimización no condujo a un incremento equivalente de la resistencia a compresión, evidenciando las limitaciones del empaquetamiento en seco de las arenas como único criterio de optimización.

ABSTRACT

The performance of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) largely depends on the packing of granular particles, which influences workability and mechanical properties. This study evaluates the effect of the fine-to-coarse sand ratio on the rheological and mechanical behavior of UHPC, a key parameter controlling the density and uniformity of the granular skeleton.

The O'Reilly packing method was applied using locally available sands in Uruguay to identify the optimal ratio based on maximum bulk density. Six laboratory mixtures (1.5 L) were then produced, varying only the sand ratio, and replicated with two cement types to assess the consistency of the results across cement types. Compressive strength (7 and 28 days), rheology (mini slump) and hardened density were measured.

Results show that the optimal sand ratio obtained through dry packing analysis provides the best rheological performance, independent of cement type. However, this optimization did not lead to an equivalent increase in compressive strength, highlighting the limitations of dry sand packing as the sole optimization criterion.

1. Introducción

El hormigón de ultra alto desempeño (UHPC, por sus siglas en inglés) es un material cementicio de desarrollo relativamente reciente, caracterizado por combinar resistencias elevadas, gran tenacidad y excelente durabilidad. Estas prestaciones se logran mediante relaciones agua/cemento (a/c) muy bajas, típicamente del orden de 0,20, lo cual es posible gracias al uso de aditivos superplastificantes de última generación. Adicionalmente, la incorporación de fibras de acero permite mejorar la respuesta post-fisuración del material, proporcionando un comportamiento de endurecimiento por deformación a tracción [1-5]. La creciente utilización de este material en aplicaciones estructurales e industriales ha impulsado el desarrollo de normativas específicas para su diseño y caracterización. La guía ACI 239 [6] define al UHPC como un material compuesto con una resistencia mínima a compresión de 150 MPa, acompañado de requisitos específicos de ductilidad a tracción, tenacidad y durabilidad. Por su parte, la norma ASTM C1856 [7] considera UHPC a aquellos materiales con una resistencia a compresión superior a 120 MPa, un tamaño máximo nominal de árido inferior a 5 mm y una elevada fluidez en estado fresco.

Una de las particularidades del UHPC es que su desempeño depende en gran medida de la optimización de la distribución granulométrica de sus componentes. A diferencia de los hormigones convencionales, donde el diseño de la mezcla suele estar gobernado principalmente por la relación agua/cemento [8], el diseño de mezclas de UHPC busca maximizar la densidad de empaquetamiento de las partículas sólidas con el fin de minimizar la porosidad, reducir la demanda de pasta y mejorar simultáneamente las propiedades mecánicas, la durabilidad y reducir costos [8-10]. Para optimizar esta distribución granulométrica se han desarrollado diversas metodologías, entre ellas los métodos de empaquetamiento de partículas en estado seco y húmedo, los enfoques basados en propiedades reológicas y, más recientemente, herramientas de optimización mediante aprendizaje automático [8,11,12].

En las etapas iniciales de desarrollo de este material, los métodos de empaquetamiento de partículas en estado seco, como el método de O'Reilly, son ampliamente utilizados debido a la simplicidad de su aplicación. Estos procedimientos buscan identificar combinaciones granulométricas que maximicen la densidad aparente de la mezcla seca. No obstante, diversos estudios han demostrado que la máxima densidad de empaquetamiento en seco no necesariamente conduce a la mejor trabajabilidad ni a las mayores resistencias mecánicas, debido a que estos métodos no consideran la influencia del agua y los aditivos superplastificantes, ni tampoco las interacciones físicas y químicas que se desarrollan durante el mezclado [8]. Por lo tanto, resulta de interés evaluar experimentalmente en qué medida una mayor densidad de empaquetamiento obtenida mediante estos procedimientos se traduce efectivamente en mejoras del desempeño reológico y mecánico del UHPC.

Por otra parte, el desempeño de cualquier metodología de diseño depende fuertemente de las características de los materiales disponibles localmente. Factores como la forma de las partículas, la distribución granulométrica, la mineralogía de las arenas y la compatibilidad entre cementos y aditivos pueden modificar significativamente la respuesta observada. Por este motivo, la validación experimental de estos métodos utilizando materiales locales resulta fundamental para evaluar su

puesta en práctica. En Uruguay, el desarrollo del UHPC se encuentra en una etapa incipiente y no existen antecedentes publicados sobre el comportamiento de mezclas elaboradas exclusivamente con materiales locales. En particular, no se dispone de antecedentes que evalúen la aplicación de métodos de empaquetamiento para el diseño de UHPC utilizando arenas uruguayas destinadas a alcanzar niveles de resistencia, densidad y trabajabilidad propios de este tipo de materiales.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto de la optimización de la relación arena fina-arena gruesa (AF/AG) en el desempeño reológico y mecánico de un UHPC elaborado con materiales locales. Utilizando dos tipos de cementos previamente seleccionados, compatibles con un mismo aditivo superplastificante, se analiza, a través de una campaña experimental, el comportamiento de mezclas basadas en tres proporciones distintas de arenas: una correspondiente a la densidad máxima optimizada mediante el método de O'Reilly, y dos proporciones subóptimas que arrojaron menores densidades en los ensayos en seco. A través de este enfoque, los resultados permiten evaluar el potencial y las limitaciones de esta metodología como herramienta preliminar para el diseño de UHPC en Uruguay, constituyendo una primera etapa hacia el desarrollo de procedimientos de optimización más avanzados adaptados a los materiales disponibles en el país.

2. Métodos de diseños de mezclas de UHPC

El diseño de mezclas de UHPC puede considerarse un problema de optimización con múltiples objetivos, en el que deben satisfacerse simultáneamente requisitos de resistencia mecánica, trabajabilidad, estabilidad, durabilidad y costos [6]. Como se mencionó anteriormente, en las últimas décadas se han desarrollado diversas metodologías para abordar este problema, entre ellas los métodos de empaquetamiento de partículas en estado seco y húmedo, los enfoques basados en propiedades reológicas, los métodos estadísticos de optimización y, más recientemente, herramientas basadas en aprendizaje automático [8,11,12]. Estas metodologías difieren en el grado de complejidad del proceso de diseño y en las variables consideradas para optimizar el desempeño del material.

Los métodos de empaquetamiento en seco continúan siendo ampliamente utilizados durante las etapas iniciales del desarrollo de mezclas debido a su simplicidad experimental, bajo costo y rapidez de aplicación. Por este motivo, constituyen una herramienta atractiva para el diseño preliminar de UHPC utilizando materiales locales.

2.1. Métodos de empaquetamiento de partículas en seco y optimización por método de O'Reilly

Los métodos de empaquetamiento de partículas buscan maximizar la densidad del sistema granular mediante una adecuada combinación de partículas de distintos tamaños. Como se esquematiza en la Figura 1, el principio consiste en que los vacíos generados por las partículas de mayor dimensión sean ocupados progresivamente por partículas más pequeñas, cuyos espacios remanentes son, a su vez, rellenos por partículas de tamaño aún menor. Este proceso conduce a una distribución

granulométrica más continua y a una reducción del volumen de vacíos del sistema [13].

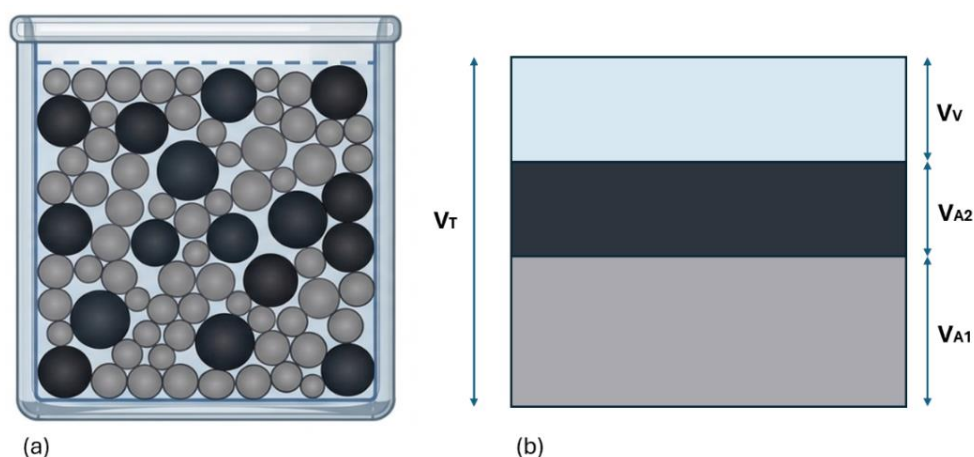


Figura 1 - Diagrama de densidad de empaquetamiento de un sistema de mezcla granular. (a) Configuración de empaquetamiento de las partículas. (b) Volumen ocupado por cada componente de la mezcla.

Entre los métodos de empaquetamiento en seco, uno de los procedimientos más difundidos es el método de O'Reilly [14]. A diferencia de los enfoques basados en curvas granulométricas ideales, este método propone determinar experimentalmente la combinación óptima de agregados mediante la reducción del contenido de vacíos, considerando que la forma de las partículas puede ejercer una influencia más significativa sobre el empaquetamiento que la distribución granulométrica teórica. Además, propone optimizar secuencialmente la proporción entre los agregados, considerando pares de materiales desde la fracción de mayor tamaño hasta la de menor tamaño [15]. En este método, la densidad aparente compactada de una combinación granular de dos agregados, se determina mediante la Ecuación (1):

$$d_{A/B} = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Donde,

$d_{A/B}$ es la densidad aparente compactada de la mezcla de agregados A y B, expresado en kg/m^3 .

m es la masa compactada de la mezcla, expresado en kg.

v es el volumen del recipiente donde se compacta la mezcla, expresado en m^3 .

Más recientemente, Hoang *et al.* [16] extendieron este concepto de optimización secuencial al conjunto de los constituyentes del UHPC. En este enfoque, la optimización se realiza de forma progresiva con todos los constituyentes de la mezcla. Inicialmente se determina la combinación óptima de las partículas de mayor tamaño (por ejemplo, diferentes fracciones de arena) y posteriormente, dicha combinación se incorpora como un nuevo componente y se optimiza juntamente con la siguiente

fracción granulométrica, como el cemento, repitiendo sucesivamente el procedimiento con materiales de menor tamaño, como el humo de sílice y otras adiciones. De esta manera, el sistema evoluciona hacia una distribución granulométrica continua que minimiza progresivamente el volumen de vacíos.

En consecuencia, la optimización de la relación entre arena fina y arena gruesa representa únicamente la primera etapa del proceso de diseño basado en empaquetamiento, aunque constituye una de las variables de gran influencia sobre la configuración del esqueleto granular y, por consiguiente, sobre el desempeño del UHPC.

Si bien el empaquetamiento en seco proporciona una estimación rápida de la compacidad del sistema granular, presenta limitaciones al no considerar la presencia de agua, aditivos ni las interacciones fisicoquímicas que ocurren durante el mezclado [8]. Además, en materiales cementicios con partículas finas, las fuerzas de Van der Waals y las interacciones electrostáticas favorecen la formación de aglomerados, lo que incrementa el contenido de vacíos y puede conducir a una subestimación de la densidad de empaquetamiento [17]. Como alternativa, se han desarrollado métodos de empaquetamiento húmedo y metodologías basadas en propiedades reológicas, que incorporan el efecto de la fase líquida y permiten representar con mayor fidelidad el comportamiento del sistema durante el amasado [8,17].

En la práctica, estas metodologías deben entenderse como herramientas complementarias más que excluyentes. El empaquetamiento en seco constituye una etapa eficiente de preselección, ya que permite identificar rápidamente configuraciones granulométricas prometedoras con un reducido número de ensayos. Posteriormente, dichas configuraciones pueden refinarse mediante métodos de empaquetamiento húmedo o evaluaciones reológicas, obteniendo un diseño de mezcla más representativo del comportamiento real del UHPC.

3. Programa Experimental

El programa experimental tuvo como objetivo evaluar la influencia del empaquetamiento de las arenas sobre el desempeño del UHPC en estado fresco y endurecido. En la primera etapa, se estudió la compacidad de 11 combinaciones arena fina y arena gruesa mediante el método de O'Reilly para determinar la curva de máxima compacidad. A partir de estos resultados, se seleccionaron tres combinaciones representativas para el diseño de las mezclas: la óptima, una intermedia y una de baja compacidad.

En la segunda etapa, estas tres combinaciones se evaluaron con dos sistemas de aglomerantes, tomando una misma dosificación de referencia, dando lugar a un total de seis mezclas de UHPC. Para aislar el efecto del empaquetamiento de las arenas, únicamente se modificó la relación entre las arenas.

3.1. Materiales

Para el estudio de la compacidad y el diseño de las mezclas de UHPC se utilizaron dos agregados finos silíceos, con módulos de finura de 1,61 y 2,86, identificados como arena fina (AF) y arena gruesa (AG), respectivamente. La Figura 2 y Figura 3 presentan las curvas granulométricas y la morfología de las partículas obtenida

mediante análisis óptico, respectivamente.

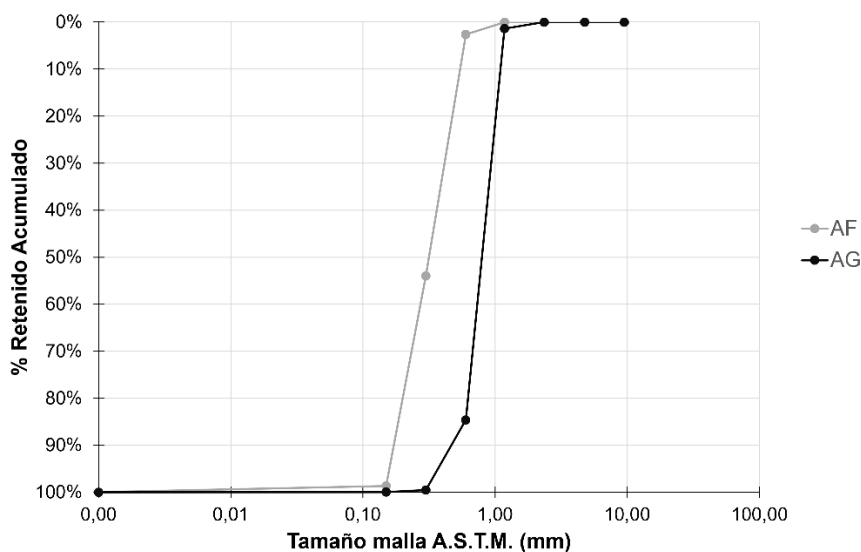


Figura 2 - Curva granulométrica de la arena fina (AF) y arena gruesa (AG) empleadas en las dosificaciones de UHPC.

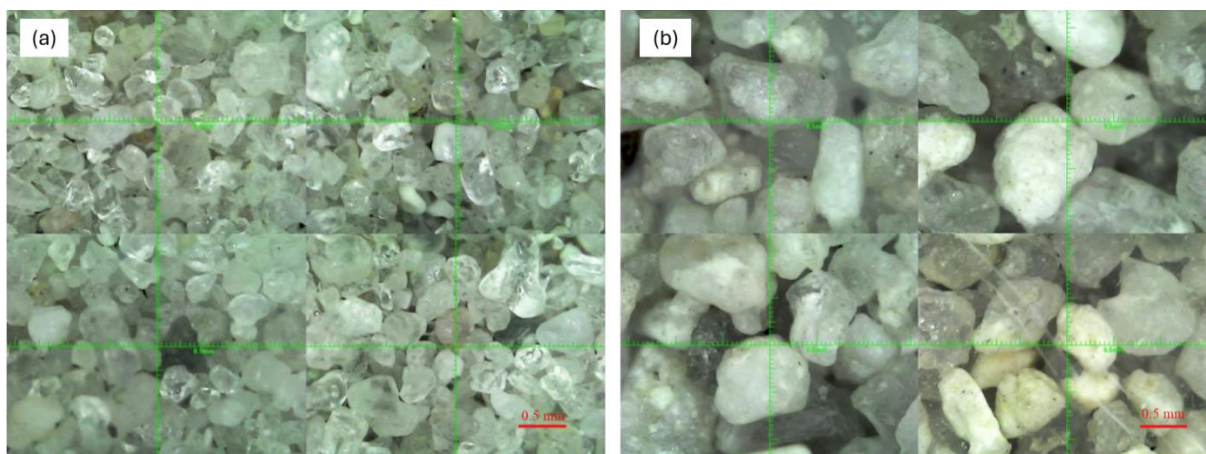


Figura 3 - Morfología de las partículas de arena fina (a) y arena gruesa (b) obtenida mediante análisis óptico.

Para la elaboración de las mezclas de UHPC se utilizaron dos sistemas aglomerantes, constituidos por un cemento portland normal de alta resistencia inicial de 50 MPa (C1) y un cemento portland compuesto de 40 MPa (C2). En ambos casos, se incorporó humo de sílice densificado con un contenido de SiO_2 mayor a 85% y una densidad aparente mayor a 350 kg/m^3 , un aditivo superplastificante compuesto por policarboxilatos con una densidad de 1080 kg/m^3 y fibras metálicas.

Dado que no existe producción nacional de este tipo de fibras, estas constituyen el único componente de la mezcla que debió ser importado. Para este estudio se

seleccionaron fibras metálicas rectas, trefiladas en frío, de 20 mm de longitud y 0,20 mm de diámetro, con una esbeltez de 100.

3.2. Empaquetamiento de partículas de arena

La optimización del empaquetamiento granular del sistema de arenas se realizó mediante el método de O'Reilly. Para ello, se plantearon 11 combinaciones con diferentes proporciones en masa de arena gruesa (AG) y arena fina (AF), variando el contenido de ambas desde 0% hasta 100% tal como se aprecia en la Figura 4.

Para cada combinación, los agregados secos se mezclaron homogéneamente. Posteriormente, el material se introdujo en un recipiente cilíndrico de volumen conocido ($V=0,22$ L) y se compactó aplicando seis golpes uniformes en el exterior del recipiente para favorecer el reordenamiento de las partículas. Una vez enrasado, se registró la masa de la mezcla compactada. Este procedimiento se replicó dos veces por cada dosificación, adoptando el valor medio de ambas determinaciones para los análisis posteriores. La densidad aparente en seco compactada de cada combinación se calculó mediante la Ecuación 1.

A partir de los valores de densidad obtenidos para las distintas combinaciones, se construyó la curva de empaquetamiento granular de las arenas, representando la densidad aparente compactada en función de la proporción de arena fina.

3.3. Mezclas de UHPC

Se elaboraron seis mezclas de UHPC combinando los dos sistemas aglomerantes con las tres proporciones de arena seleccionadas en el estudio de compactación. Para todas las mezclas se mantuvieron constantes la relación agua/aglomerante (a/a) de 0,17, la cuantía de fibras de 110 kg/m^3 , y la dosis de aditivo superplastificante del 2,5% respecto al peso del aglomerante. Las dosificaciones se presentan en la Tabla 1.

Materiales (kg/m^3)	PC1-30/70	PC1-50/50	PC1-70/30	PC2-30/70	PC2-50/50	PC2-70/30
Cemento	1007	1007	1007	1007	1007	1007
Humo de sílice	120	120	120	120	120	120
Arena fina	296	494	691	296	494	691
Arena gruesa	691	494	296	691	494	296
Aditivo	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
Agua	190	190	190	190	190	190
Fibras	110	110	110	110	110	110

Tabla 1 - Dosificaciones de las mezclas de UHPC estudiadas

Para cada dosificación se elaboró un volumen de 1,5 L de UHPC utilizando una mezcladora de eje vertical de 20 L equipada con una paleta plana. El procedimiento de mezclado consistió, en primer lugar, en la homogeneización de los materiales secos. Posteriormente, se incorporó el 80% del agua de amasado y se continuó con

el mezclado durante 2 minutos. A continuación, se añadió el 20% restante del agua junto con el aditivo superplastificante y se continuó con el mezclado. Transcurridos 20 minutos desde el inicio del amasado, se incorporaron las fibras metálicas, manteniéndose el mezclado durante 2 minutos adicionales para asegurar su adecuada dispersión.

Sobre cada mezcla se evaluó el comportamiento en estado fresco y se moldearon tres probetas cúbicas de 70x70x70 mm³. Dos probetas se ensayaron a compresión a los 7 días y una a los 28 días. El número de probetas estuvo condicionado por el volumen máximo de mezcla que podía elaborarse con el equipamiento disponible, de 1,5 L por dosificación, volumen suficiente para el llenado de tres probetas. Una vez desmoldadas, las probetas se mantuvieron en curado por inmersión en agua a una temperatura de 20 °C hasta la edad de ensayo. En estado endurecido se determinó la densidad en estado saturado de acuerdo con la norma UNIT-ISO 1920-5:2018 y la resistencia a compresión conforme a la norma UNE-EN 12390.

La reología del UHPC en estado fresco se caracterizó mediante el ensayo de mini slump (0,34 L), siguiendo los procedimientos establecidos en las normas UNE-EN 1015-3 y ASTM C230. La fluidez se cuantificó a partir del diámetro de extensión (slump flow) medido a los 60 s de retirado el cono, mientras que la viscosidad se evaluó mediante los tiempos T15 y T20, definidos como el tiempo necesario para que la mezcla alcanzara diámetros de extensión de 15 y 20 cm, respectivamente.

Con el objetivo de determinar la ventana de trabajabilidad de las mezclas, las mediciones reológicas se realizaron inmediatamente después del amasado y posteriormente cada 30 minutos durante un período de una hora, considerando como tiempo cero el instante en que finalizó el proceso de mezclado.

4. Resultados y Análisis

4.1. Empaquetamiento de partículas de arena

La Figura 4 muestra la curva de empaquetamiento granular obtenida para las arenas, donde se correlaciona la densidad aparente seca compactada frente al porcentaje de arena fina en la mezcla. Como se observa en el gráfico, la densidad máxima del esqueleto granular se alcanzó con la combinación compuesta por un 70% de AF y un 30% de AG (70/30), siendo esta la condición óptima de compacidad. Asimismo, siguiendo la metodología adoptada, se seleccionaron las combinaciones 50/50 (50% AF - 50% AG) y 30/70 (30% AF - 70% AG), representativas de una condición de compacidad intermedia y de baja compacidad, respectivamente, para el diseño de las mezclas de UHPC.

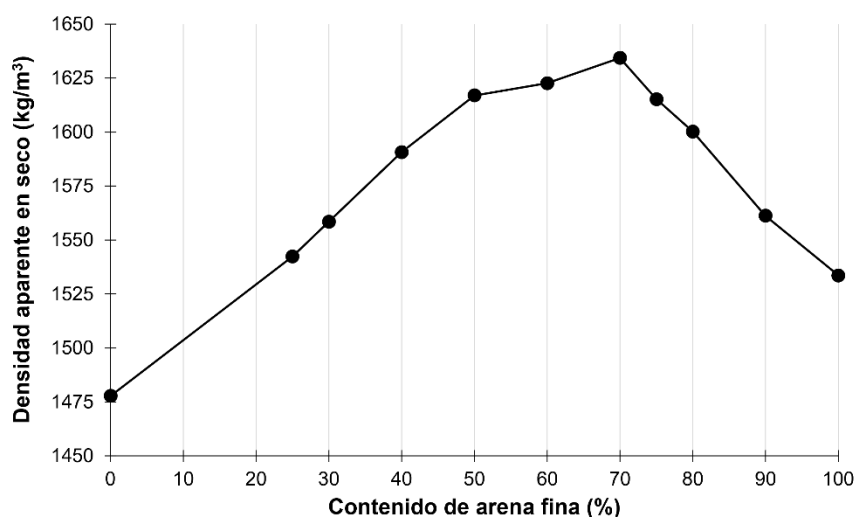


Figura 4 - Curva de empaquetamiento granular de las arenas.

4.2. UHPC

4.2.1. Reología

La Figura 5 muestra la evolución del *slump flow* de las seis mezclas de UHPC, medido inmediatamente después del amasado (T_0) y a los 30 (T_{30}) y 60 minutos (T_{60}). En todas las mezclas se observó una disminución progresiva de la fluidez con el transcurso del tiempo, aunque con diferente magnitud según el sistema aglomerante y la combinación de arenas empleada.

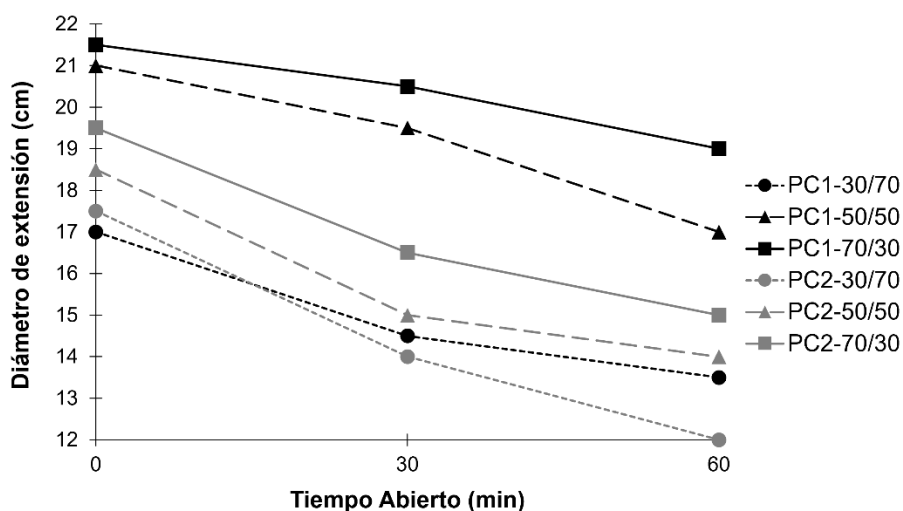


Figura 5 - Resultados de fluidez (*slump flow*) vs. tiempo para las 6 mezclas de UHPC.

Para ambos sistemas aglomerantes, las mezclas elaboradas con la combinación de arenas de mayor compacidad (70/30) presentaron los mayores valores de *slump flow* y conservaron una mayor trabajabilidad durante toda la ventana de evaluación. Por el contrario, las mezclas correspondientes a la combinación de menor compacidad (30/70) exhibieron los menores valores de fluidez en todos los tiempos analizados.

En las mezclas elaboradas con el cemento C1, sustituir la combinación óptima de arenas por la de menor compacidad produjo una reducción del *slump flow* del 21% a tiempo cero, diferencia que se incrementó hasta el 29% al cabo de una hora. Para las mezclas PC2 se observó la misma tendencia, aunque de menor magnitud, con disminuciones del 10% y del 20% a tiempo cero y a la hora, respectivamente.

Por otra parte, la utilización de la combinación de compacidad intermedia (50/50) implicó reducciones más moderadas respecto de la condición óptima: para las mezclas PC1 la disminución fue del 2% en T_0 y del 11% en T_{60} , mientras que para las mezclas PC2 las reducciones fueron del 5% y del 7%, respectivamente. A su vez, se observa que las mezclas 70/30 y 50/50 elaboradas con el cemento PC1 presentaron valores de *slump flow* superiores a los obtenidos con PC2.

El gráfico de la Figura 6 relaciona el *slump flow* con la densidad aparente seca del sistema de arenas para los distintos tiempos evaluados. En todos los casos se obtuvo una tendencia lineal positiva entre ambas variables, con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0,84 y un valor medio de 0,94. Estos resultados sugieren que el grado de empaquetamiento del sistema granular contribuyó al mejor comportamiento reológico observado. Además, esta relación se mantuvo prácticamente invariable durante toda la ventana de trabajabilidad. Dentro de las condiciones evaluadas, las mezclas con las combinaciones de arenas de mayor densidad aparente presentaron mayores valores de *slump flow* tanto inmediatamente después del mezclado como durante todo el período de evaluación.

Este comportamiento resulta consistente con la teoría del empaquetamiento granular, según el cual un sistema de arenas más compacto reduce el volumen de vacíos entre los granos y podría aumentar el contenido de pasta libre disponible para lubricar las partículas sólidas, disminuyendo la fricción interna y favoreciendo el flujo de la mezcla.

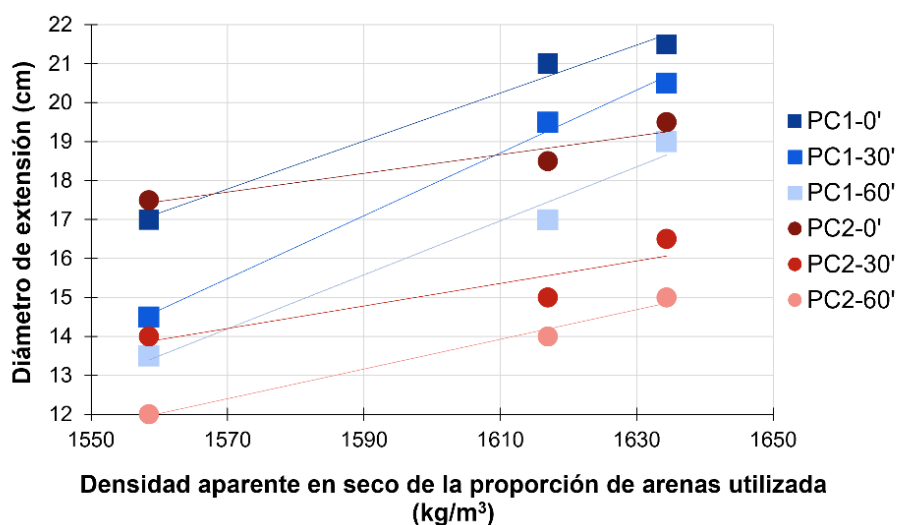


Figura 6 – Diámetro de extensión de las mezclas PC1 y PC2 a distintos tiempos abiertos en relación con la densidad aparente seca de las arenas.

La Figura 7 y la Figura 8 muestran los resultados de viscosidad (T_{15} y T_{20}) para las 6 mezclas de UHPC. En términos de viscosidad, se observó un comportamiento

consistente con los resultados de fluidez. Para ambos sistemas aglomerantes, las mezclas elaboradas con la combinación de arenas óptima (70/30) presentaron sistemáticamente los menores tiempos T15 y T20, mientras que las mezclas con menor grado de empaquetamiento exhibieron los mayores tiempos de extensión, evidenciando una mayor resistencia al flujo.

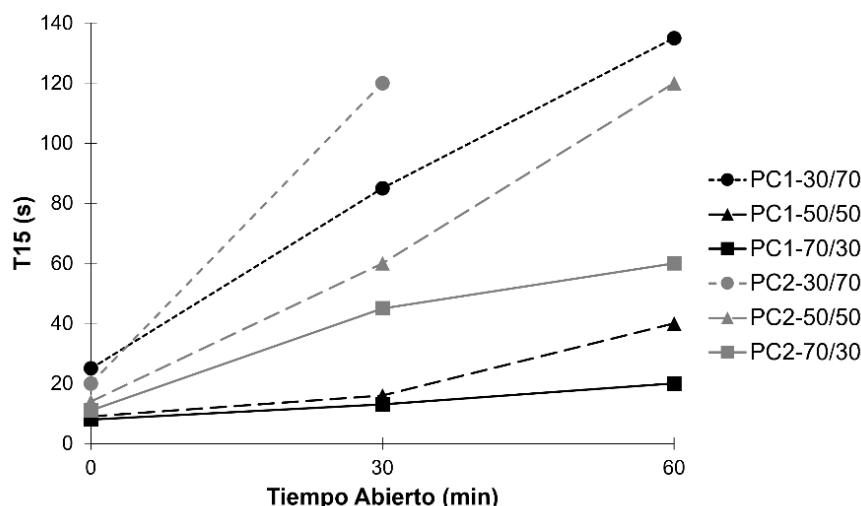


Figura 7 - Resultados de viscosidad (T15) vs. tiempo para las seis mezclas de UHPC.

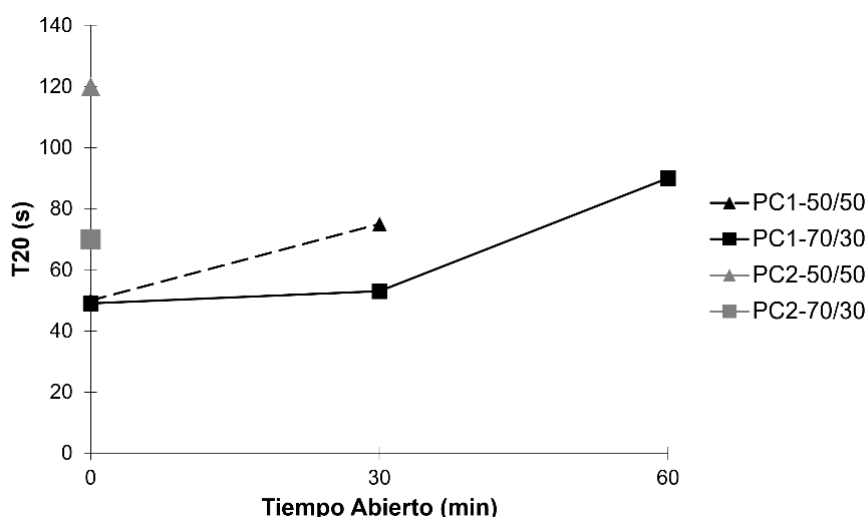


Figura 8 - Resultados de viscosidad (T20) vs. tiempo para las cuatro mezclas de UHPC que alcanzaron un diámetro de extensión de 20 cm en el mini-slump.

En las mezclas elaboradas con el cemento C1, sustituir la combinación óptima de arenas (70/30) por la de menor compacidad (30/70) incrementó el tiempo T15 en más del 200% a tiempo cero y en más del 500% al cabo de una hora. Para las mezclas C2 se observó la misma tendencia: inmediatamente después del amasado, la mezcla con el empaquetamiento óptimo presentó un tiempo T15 aproximadamente un 80% inferior al correspondiente a la combinación de menor compacidad. Además, la mezcla PC2-30/70 no alcanzó un diámetro de extensión de 15 cm a los 60 minutos, por lo que no fue posible determinar el tiempo T15 para dicha condición.

En cuanto al parámetro T20, únicamente cuatro de las seis mezclas alcanzaron un diámetro de extensión de 20 cm durante el ensayo. Y solamente la mezcla PC1-70/30 alcanzó 20 cm de diámetro de extensión a los 60 minutos de finalizado el amasado. Las mezclas con una densidad aparente de arenas menor presentaron una rápida pérdida de trabajabilidad, impidiendo alcanzar dicho diámetro dentro del período de evaluación, lo que sugiere una influencia del grado de empaquetamiento del sistema de arenas sobre la viscosidad del UHPC.

4.2.2. Resistencia a la compresión y densidad del UHPC

La Figura 9 y Figura 10 presentan los resultados de la resistencia media a compresión de las mezclas elaboradas con los cementos C1 y C2 en función de la densidad aparente seca del sistema de arenas.

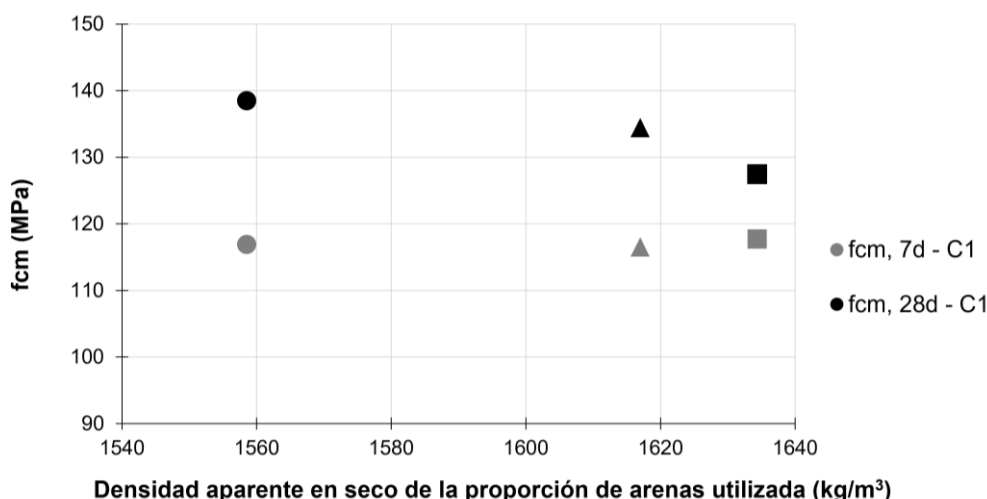


Figura 9 - Resistencia media a compresión para mezclas PC1.

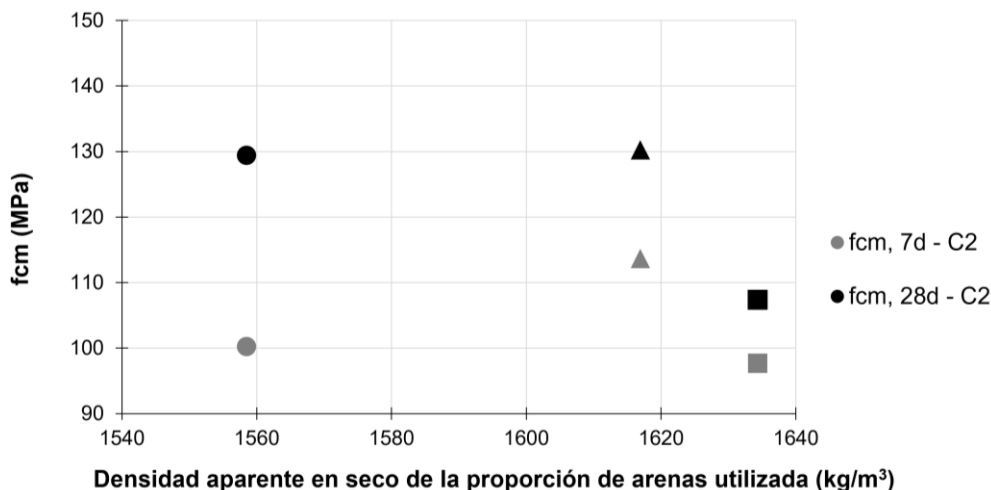


Figura 10 - Resistencia media a compresión para mezclas PC2.

A los 7 días, el coeficiente de variación entre las dos probetas ensayadas para cada dosificación fue inferior al 3,8% en todas las mezclas, indicando una baja dispersión entre réplicas. Este nivel de variabilidad resulta además consistente con campañas experimentales previas realizadas con el mismo equipamiento y procedimiento de elaboración, en las que se ensayaron en conjunto más de 100 probetas y se obtuvieron coeficientes de variación inferiores al 5% entre probetas correspondientes a una misma mezcla.

A diferencia de lo observado para las propiedades reológicas, el grado de empaquetamiento de las arenas no mostró una influencia clara sobre la resistencia a compresión.

En las mezclas elaboradas con el cemento C1, las resistencias a compresión a 7 días fueron elevadas, con una resistencia media de 117 MPa, y presentaron escasa variación al modificar la proporción de arena fina y arena gruesa, registrándose una diferencia de apenas 1% entre las resistencias máxima y mínima, inferior al coeficiente de variación observado entre réplicas. Sin embargo, a los 28 días se observó una disminución progresiva de la resistencia al incrementar el contenido de arena fina, alcanzándose una diferencia de 11 MPa (8% de la resistencia máxima) entre las combinaciones 30/70 (139 MPa) y 70/30 (128 MPa).

Por su parte, las mezclas elaboradas con el cemento C2 mostraron una mayor dispersión de resultados. A los 7 días, la combinación intermedia (50/50) presentó la mayor resistencia, aproximadamente un 13% superior a las obtenidas con las combinaciones 30/70 y 70/30, diferencia considerablemente superior a la dispersión observada entre las probetas de una misma dosificación. A los 28 días, las mezclas correspondientes a las proporciones 30/70 y 50/50 desarrollaron resistencias similares (en torno a 130 MPa), mientras que la combinación con mayor contenido de arena fina (70/30) presentó una resistencia 20 MPa (18%) menor que las anteriores.

En consecuencia, los resultados muestran que la optimización del empaquetamiento granular estuvo asociada a un mejor comportamiento reológico del UHPC, aunque no produjo un incremento equivalente en la resistencia a compresión. Dentro del rango de combinaciones estudiado, el efecto del empaquetamiento de las arenas sobre la resistencia a compresión fue menos evidente que el observado sobre el comportamiento reológico. La variabilidad entre los sistemas cementicios y otras variables experimentales también pudieron haber contribuido a las diferencias observadas.

La Figura 11 presenta la densidad media del UHPC endurecido en función de la densidad aparente en seco de la combinación de arenas utilizada. Si bien la densidad aparente de las combinaciones de arenas varió aproximadamente un 5% entre las diferentes proporciones evaluadas, la densidad del UHPC endurecido permaneció prácticamente constante, con variaciones inferiores al 0,6% para las mezclas PC1 y al 1,7% para las PC2.

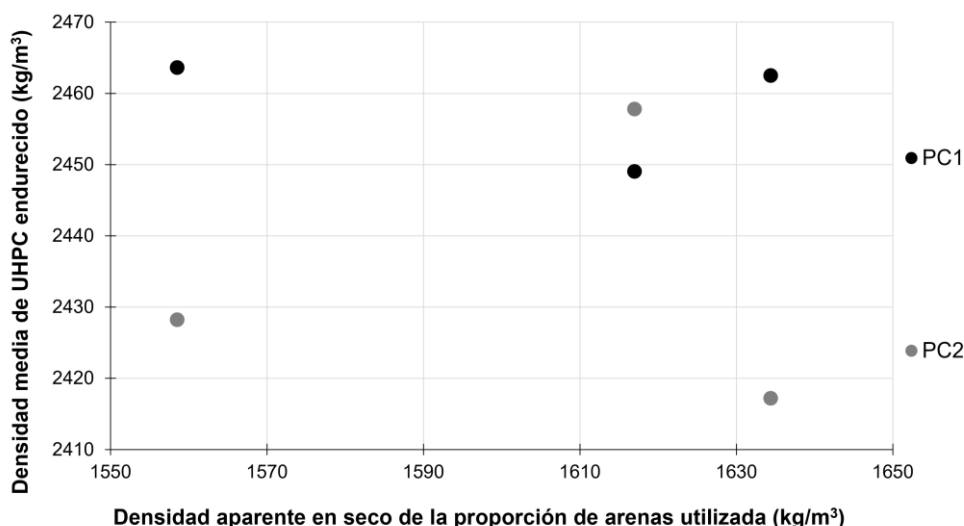


Figura 11 – Densidad media del UHPC endurecido vs. Densidad aparente en seco de la proporción de arenas utilizada.

La Figura 12 presenta la correlación entre la resistencia a la compresión y la densidad medias del UHPC endurecido para las edades de 7 y 28 días. A los 7 días, los resultados muestran una clara tendencia lineal positiva entre ambas variables ($R^2=0,92$). Sin embargo, esta tendencia no se mantiene a los 28 días ($R^2 = 0,57$), donde matrices de densidad similar alcanzaron resistencias marcadamente diferentes.

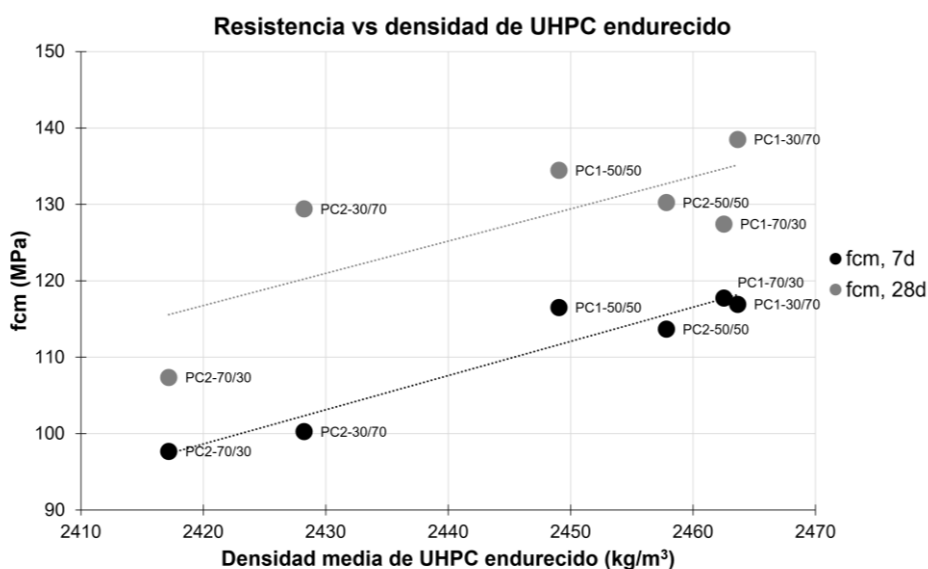


Figura 12 - Resistencia a la compresión del UHPC en función de la densidad media de las probetas a 7 y 28 días.

Considerando además que no se observó una relación clara entre la densidad aparente de las combinaciones de arenas y la densidad del UHPC endurecido, en las condiciones estudiadas, los resultados indican que la optimización del

empaquetamiento de las arenas, por sí sola, no fue suficiente para producir un incremento apreciable en la densidad del UHPC endurecido.

Si bien se buscó aislar el efecto del empaquetamiento de las arenas manteniendo constantes la relación agua/aglomerante, el contenido de fibras, la dosis de superplastificante y el procedimiento de mezclado, no puede descartarse la influencia de otros factores, tales como las diferencias entre los sistemas cementicios, las interacciones entre el cemento y el aditivo superplastificante, la dispersión del humo de sílice y la variabilidad inherente al proceso de mezclado. En consecuencia, las relaciones observadas deben interpretarse como tendencias experimentales dentro de las condiciones evaluadas y no como una demostración de un mecanismo causal único.

A su vez, debe señalarse que el número limitado de probetas por dosificación no permite realizar un análisis estadístico robusto de las diferencias observadas entre las mezclas. En consecuencia, los resultados de resistencia a compresión deben interpretarse principalmente como tendencias experimentales dentro de las condiciones estudiadas.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la optimización de la relación entre arena fina y arena gruesa mediante el método de empaquetamiento en seco permitió identificar, para ambos cementos, la dosificación que presentó el mejor comportamiento reológico. La mezcla correspondiente a la máxima densidad de empaquetamiento exhibió la mayor fluidez, menor viscosidad y mayor tiempo abierto, mientras que la proporción con menor densidad de empaquetamiento presentó sistemáticamente el comportamiento reológico menos favorable. En las condiciones estudiadas, estos resultados muestran una relación consistente entre una mayor densidad de empaquetamiento del sistema de arenas y un mejor comportamiento reológico del UHPC.

Sin embargo, la máxima densidad de empaquetamiento no se tradujo en las mayores resistencias a compresión a 7 y 28 días. Por ello, el empaquetamiento en seco de las arenas se mostró como una herramienta útil para la preselección de composiciones granulométricas orientada a mejorar el comportamiento en estado fresco, pero no permitió establecer una relación clara con la resistencia a compresión.

La optimización realizada se limitó a la relación entre arena fina y arena gruesa, por lo que los resultados obtenidos permiten establecer el alcance y las limitaciones del método de empaquetamiento en seco para esta etapa del diseño de mezclas de UHPC con los materiales estudiados. En este sentido, el trabajo constituye una primera aproximación a la optimización de mezclas de UHPC con materiales disponibles en Uruguay.

Referencias

- [1] M. A. Bajaber and I. Y. Hakeem, "UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 10, pp. 1058-1074, 2021.
- [2] R. Ullah, Y. Qiang, J. Ahmad, N. I. Vatin, and M. A. El-Shorbagy, "Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review," *Materials*, vol. 15, no. 12, 2022.
- [3] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, and Z. Fang, "A review on ultra high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 741-751, 2015.
- [4] D. Yoo, S. T. Kang, and Y. S. Yoon, "Enhancing the flexural performance of ultra-high-performance concrete using long steel fibers," *Compos. Struct.*, vol. 147, pp. 220-230, 2016.
- [5] H.G. Russell, and B. A. Graybeal. "Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community.", 2013.
- [6] American Concrete Institute. *Ultra-High performance concrete: An emerging technology report* (ACI PRC-239-18), 2018.
- [7] American society for testing and materials. ASTM C1856/C1856M-17, *Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [8] M. Zhou, Z. Wu, X. Ouyang, X. Hu, and C. Shi, "Mixture design methods for ultra-high-performance concrete - a review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 124, 2021
- [9] R. Yu, P. Spiesz, and H. J. H. Brouwers, "Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)," *Cement and Concrete Research*, vol. 56, pp. 29-39, 2014.
- [10] A. Akhnoukh and C. Buckhalter, "Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, 2021.
- [11] E. Ghafari, M. Bandarabadi, H. Costa, and E. Júlio, "Prediction of fresh and hardened state properties of UHPC: comparative study of statistical mixture design and an artificial neural network model," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 11, 2015.
- [12] E. Ghafari, M. Bandarabadi, H. Costa, and E. Júlio, "Design of UHPC using artificial neural networks," in *Brittle Matrix Composites 10*, 2012, pp. 61-69.
- [13] A. L. de Castro and V. C. Pandolfelli, "Concepts of particle dispersion and packing for special concretes production," *Cerámica*, vol. 55, no. 333, pp. 18-32, 2009.
- [14] V. A. O'Reilly Díaz, *Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño*. México, D.F.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2007.
- [15] B. F. Tutikian, G. C. Isaia, and P. Helene, "Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho," in *Concreto: Ciência e Tecnologia*, G. C. Isaia, Ed. São Paulo, Brasil: IBRACON, 2011

[16] K.H. Hoang, P. Hadl, and V. T. Nguyen, "A new mix design method for UHPC based on stepwise optimization of particle packing density," in *Proceedings of the International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, Iowa State University Digital Press, 2016.

[17] H. H. C. Wong and A. K. H. Kwan, "Packing density of cementitious materials: part 1-measurement using a wet packing method," *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 689-701, 2008.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII, Uruguay) por el apoyo financiero brindado a través del proyecto CF_1_2024_1_181460: "Desarrollo de Mezclas y Aplicaciones de Hormigón de Ultra Alto Desempeño", en cuyo marco se desarrolló el presente trabajo. Además, expresan su agradecimiento a Astori Uruguay por facilitar sus instalaciones, recursos y apoyo técnico para la ejecución del proyecto.