

Estudio del comportamiento en estado fresco de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero mediante el uso de bombeabilímetro

Study of the fresh state behavior of steel fiber reinforced self-compacting concretes using a pumpability meter

Francisco José Rubiano Sánchez^a, Isabel María Martínez Sierra^b, Luis Francisco Córdoba Fernández^c y Ángel Castillo Talavera^d

^a Arquitecto Técnico. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc-CSIC. franrs12@ietcc.csic.es

^b Dra. en Ciencias Químicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – CSIC. Científico Titular IETcc-CSIC. isabelms@ietcc.csic.es

^c Técnico Superior en Mantenimiento Electrotécnico. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc-CSIC. luis.cordoba@ietcc.csic.es

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc-CSIC. Director del IETcc-CSIC. acastillo@ietcc.csic.es

RESUMEN

El artículo aborda el estudio de la influencia de diferentes materiales, aditivos, adiciones y las proporciones de estos materiales constituyentes del hormigón en las propiedades del mismo, especialmente en su bombeabilidad. También se han estudiado las propiedades en estado endurecido. Se han evaluado varias mezclas de hormigón con distintas relaciones agua/cemento, aditivos y adiciones como cenizas volantes y humo de sílice. Los resultados muestran que la sustitución de cemento por filler calizo, el uso de cenizas volantes y de humo de sílice mejoran la bombeabilidad y la manejabilidad del hormigón, sin comprometer su resistencia en estado endurecido.

ABSTRACT

The article addresses the study of the influence of different materials, additives, admixtures and their proportions in the constituent materials of concrete on its properties, especially its pumpability. The properties in the hardened state have also been studied in detail. Several concrete mixtures with different water/cement ratios, additives and admixtures such as fly ash and silica fume were evaluated. The results show that the substitution of cement with limestone filler and the use of fly ash and silica fume improve the pumpability and workability of the concrete without compromising its strength in the hardened state, making it more suitable for practical applications.

PALABRAS CLAVE: bombeabilidad, ensayos in-situ, pérdida de carga, reología, superplastificante, viscosidad.

KEYWORDS: pumpability, in-situ testing, head loss, rheology, superplasticizer, viscosity.

1. Introducción

En los últimos años, el uso de hormigones bombeables se ha extendido gracias a la facilidad de puesta en obra, evitando el transporte con otros medios (elevadores, carretillas, ...) y reduciendo costes y tiempo de colocación. Además, debido a las geometrías y acabados cada vez más exigentes, a la concentración de armaduras en las grandes estructuras actuales y a la disminución de los tiempos de puesta en obra eliminando el proceso de vibrado, se eligen habitualmente hormigones que sean autocompactantes cuando las exigencias son elevadas. Si a lo mencionado anteriormente se le suma el aporte de resistencia a flexión y residual, así como la consecuente reducción de armadura cuando un hormigón contiene fibras de acero, el tipo de hormigón más adecuado es el hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero.

El hormigón autocompactante reforzado con fibras, cuando se encuentra en estado fresco, puede considerarse como una suspensión heterogénea de sólidos tales como la grava, la arena y las fibras (fases dispersas) en una pasta de cemento viscosa (fase dispersante). **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Para adquirir las cualidades de hormigón autocompactante, la pasta de cemento y agua contiene también aditivos fluidificantes, plastificantes o superplastificantes. La determinación de la bombeabilidad no puede llevarse a cabo con métodos tradicionales como los ensayos de asentamiento o empleando el uso de reómetros ya que, como se ha demostrado anteriormente 0 y se corrobora en este presente trabajo, no hay una relación determinante entre estos ensayos y la capacidad real del hormigón de fluir por un conducto. Para hallar los valores de bombeabilidad se ha utilizado un equipo diseñado recientemente por Putzmeister y comercializado por Schleibinger Geräte denominado Sliper ("SLIding PipE Rheometer"). Las mezclas ensayadas varían su

composición en cuanto al tipo y cantidad de adición, contenido de agua, relación agua/cemento, cantidad de cemento y naturaleza y cantidad de los aditivos.

2. Fundamento teórico

Un hormigón, ya sea convencional, para proyectarse ("shotcrete") o autocompactante, fluye en el interior de las tuberías como un tapón formado por todos los áridos gruesos. Este tapón se desliza gracias a una capa lubricante fácilmente deformable compuesta por una parte de las cantidades totales de cemento, agua, aditivos y finos 0. Los métodos tradicionales de ensayo de asentamiento con cono o similares no son concluyentes para establecer cuál es la presión de bombeo necesaria; estos ensayos no son capaces de reproducir o simular la interacción entre la tubería con dicha capa lubricante y entre ésta y el resto del hormigón en movimiento. Por otro lado, los reómetros utilizados actualmente sí proporcionan dos propiedades reológicas importantes, la tensión superficial y la viscosidad dinámica, pero que no se pueden relacionar con la bombeabilidad ya que en la ejecución del ensayo no separan la mezcla total en estas dos fases (tapón y capa lubricante) que sí se generan cuando el hormigón se bombea.

La viscosidad es la propiedad que representa la resistencia al movimiento de un fluido, ya sea líquido, gas, plasma o cualquier otro. La fuerza que se opone a que el fluido se mueva se conoce como fuerza de arrastre. El hormigón fluirá apropiadamente si, para cualquier sección de la tubería elegida por la cual circula un caudal de hormigón, existe una capa de mortero que envuelva los áridos por completo 0. Esta capa se ve influida por adiciones como las cenizas volantes, el humo de

sílice, el filler calizo y otros materiales adicionados, ya que la constituyen junto con el agua, los áridos finos, el cemento y los aditivos [6, 7, 8]. El origen de los áridos, es decir, que sean o no áridos reciclados, también afecta a la trabajabilidad del hormigón [9].

3. Ensayo de bombeabilidad

3.1 Equipo

El Sliper (Figura 1) es un bombeabilímetro que dispone de dos sensores que se complementan: uno de ellos es un sensor de distancia que permite calcular la velocidad al conocer el tiempo que tarda la pieza móvil con forma de tubo en caer, el otro es un sensor de presión que mide la fuerza por unidad de superficie ejercida por la masa de hormigón que se encuentra en la tubería. De esta manera, se pueden establecer relaciones entre la cantidad de presión necesaria de la hipotética bomba a pie de obra (P) y un determinado caudal que se quiere conseguir (Q). La recta resultante de los ensayos muestra que la presión y el caudal están relacionados de manera directa: a mayor presión, mayor caudal. El gráfico generado sería análogo al modelo de Bingham de velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) frente a tensión aplicada (τ) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El factor A está relacionado con la tensión tangencial en las cercanías del tubo, mientras que el factor B tiene que ver con la viscosidad plástica del material en la misma zona. El valor de P_H hace referencia a la presión que ejerce el “peso muerto” del hormigón **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Al igual que en el modelo de Bingham es obligatorio sobrepasar una tensión crítica para empezar el movimiento, en este modelo se debe superar la tensión crítica de la capa lubricante, A, y el peso muerto del hormigón parado, P_H (Figura 2).

3.2 Método de ensayo

El método de ensayo para obtener los datos de bombeabilidad se resume a continuación: la tubería fija se llena totalmente con hormigón hasta la parte superior. Después, la tubería móvil, que se encuentra limpia, es levantada por primera vez, generando la capa lubricante. Una vez arriba, la tubería móvil se deja caer. En este momento, el sensor de distancia calcula la velocidad ya que conoce el tiempo que tarda en caer la parte móvil y la distancia de esta y un punto fijo situado en el inferior del aparato.

Es ahora, mientras la tubería se mueve, cuando la masa de hormigón carga sobre el sensor de presión en mayor medida que con la que lo hacía en reposo. Estos valores de velocidad y presión, junto con los parámetros fijos o conocidos del equipo, le permiten reflejar en el gráfico la presión ejercida frente al caudal provocado



Figura 1. Bombeabilímetro Sliper.

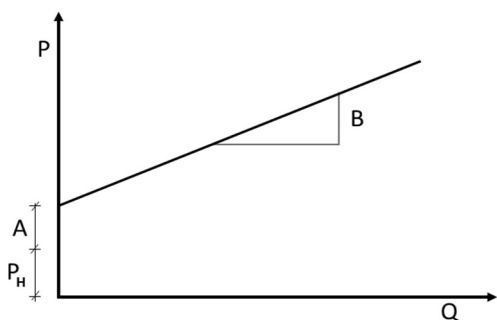


Figura 2. Ejemplo de gráfico obtenido con Sliper.

Cuando se tratan los datos del Sliper, se obtienen dos factores, a y b , que se relacionan con la tensión superficial y la viscosidad dinámica del material de la región cercana a la tubería a través de los valores A y B citados anteriormente [4].

$$a = \frac{d \cdot A}{4l} \quad (1)$$

$$b = \frac{B \cdot \pi \cdot d^3}{16l} \quad (2)$$

Independientemente de estos valores, simplemente estudiando la pendiente de la recta presión frente a caudal (P - Q), se puede obtener un valor que indica la facilidad de bombeo de la mezcla. Cuanto mayor sea la pendiente, mayor será la dificultad para bombear el hormigón, es decir, para un aumento pequeño en la demanda de caudal, la presión requerida aumenta mucho más que en un hormigón que posea una pendiente menor.

Para un caudal dado, cuando la viscosidad de la mezcla es mayor, se requiere más presión. Esto puede llevar a la conclusión de que la viscosidad es un impedimento para que el hormigón se bombee bien y que siempre es mejor aumentar la bombeabilidad. Sin embargo, no siempre es mejor aumentar la bombeabilidad, sino que hay que mantener la cohesión de los constituyentes para que no se produzcan segregaciones, estancamientos durante el bombeo o una terminación superficial no satisfactoria una vez desencofrado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

4. Proceso experimental

El cemento empleado es un tipo CEM I 52,5 R. Los áridos se han dosificado considerando que el hormigón definitivo presente buena compacidad, resistencia a la segregación y distribución granulométrica continua [9, 10]; esto se ha conseguido mediante aproximaciones utilizando curvas de Fuller. La curva de la mezcla de áridos es la mejor posible mezclando los áridos disponibles, esto es, la que más se aproxima a la curva ideal de Fuller para el tamaño máximo de 12 mm. Las curvas granulométricas de los áridos y la mezcla de ellos pueden verse en la Figura 3. Por otro lado, todas las mezclas, menos la mezcla número 4, poseen filler calizo; en las mezclas 3 y 4 se sustituyó una parte y la totalidad, respectivamente, por cenizas volantes. En las mezclas 6 y 7 se hicieron sustituciones parciales de dicho filler calizo por humo de sílice. Además, el hormigón lleva incorporadas fibras metálicas; en todas las mezclas se ha utilizado Dramix 3D 65/35BG en cantidades cercanas a los 53-55 kg/m³.

Todas las mezclas cumplen con las especificaciones enumeradas en este párrafo. Al tratarse de hormigones autocompactantes, los tamaños máximos de los áridos en todas las mezclas son de 12 mm. Por otra parte, en estos hormigones, es recomendable que ciertas relaciones y contenidos estén dentro de unos intervalos [11]. Es preferible que el contenido de finos, partículas menores a 75 μ m, se encuentre entre 450 y 600 kg/m³. El porcentaje en volumen de fibras respecto al volumen total tiene que ser menor al 1 % para evitar la formación de cúmulos de fibras conocidos como “erizos”. La relación agua/polvo en volumen debe estar entre 0.8 y 1.2. El contenido de árido fino respecto al mortero, también en volumen, debe ser mayor a 40 e inferior a 50. El porcentaje del volumen de árido grueso tiene que estar entre 30 % y 34 %. Por último, la relación entre el volumen de pasta y el volumen total debe encontrarse entre 340 y 390.

A todas las mezclas se les ha añadido un aditivo superplastificante para aumentar la fluidez sin disminuir la viscosidad, la cual es necesaria para facilitar el bombeo; este aditivo es el MasterEase 3690 de BASF. Esta cantidad no ha superado el 2.5 %. A las dosificaciones 2 y 3

se les agregó un aditivo polifuncional denominado MasterPozzolith 7005 de BASF para aumentar el “tiempo de apertura” y determinar su efecto en las características reológicas. La suma de las dos cantidades tampoco rebasó ese límite del 2.5 % de aditivo.

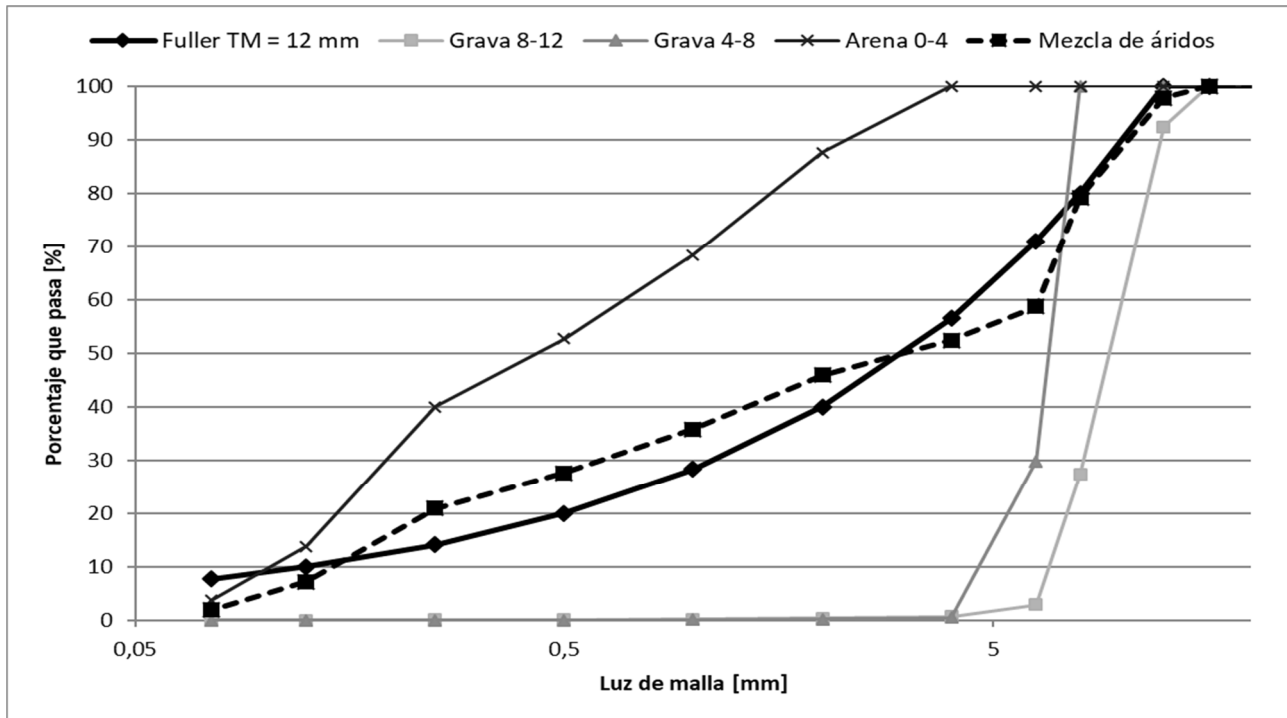


Figura 3. Análisis granulométricos de los áridos.

A modo de resumen, se formularon 7 dosificaciones distintas en las cuales se variaba el contenido de cemento, la cantidad de adición, la naturaleza de la misma, la cantidad de agua que, a su vez, conllevaba un cambio en la relación

agua/cemento y el porcentaje de aditivo superplastificante. Las dosificaciones en peso saturado con superficie seca (PSSS) para cada una de las mezclas se representan en la Tabla 1:

Número de mezcla	1	2	3	4	5	6	7
Agua	198	172	172	172	183	178	178
CEM I 52,5 R	420	409	409	408	439	439	439
Grava silícea 8-12	415	462	460	452	427	425	425
Grava silícea 4-8	317	331	329	323	366	364	364
Arena silícea 0-4	855	877	873	857	795	791	796
Filler calizo	120	97	49	-	117	68	68
MasterEase 3690	4.2	6.1	5.4	6.1	5.7	8.4	9.5
Master Pozzolith 7005	-	2.0	2.0	-	-	-	-
Fibras Dramix 3D	55	53	53	53	54	54	54
Cenizas volantes	-	-	49	117	-	-	-

Humo de sílice	-	-	-	-	-	49	49
Porcentaje de aditivo [%]	1.0	1.5	1.3	1.5	1.3	1.9	2.2
a/c	0.47	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.40

Tabla 1. Dosificaciones de los hormigones en PSSS [kg/m³].

Para las seis primeras dosificaciones se amasaron 35 litros con la mezcladora DIEM DZ 60 VS de la marca Inhera. Con la dosificación número 7, se fabricaron 110 litros con una energía mayor en una amasadora más grande, la DZ 180 V de la propia marca Inhera. El hormigón se utilizó para hacer los ensayos en fresco y para fabricar probetas cúbicas de lado 150 mm según Norma UNE-EN 12390-2:2009 que se curaron en cámara húmeda hasta su rotura tras 1 o 28 días.

El proceso de amasado ha sido:

- Adición de una parte del agua total a todos los áridos con el estado de humedad que tenga cada uno. La humedad real es calculada en el mismo día del amasado y es considerada en los cálculos de la dosificación.
- 30 segundos mezclando la cantidad de agua añadida y todos los áridos.
- 60 segundos de reposo para que el agua entre en los poros de los áridos.
- Adición del cemento y, en su caso, el filler, las cenizas volantes y el humo de sílice.
- 3 minutos mezclando todo mientras se va añadiendo el agua restante mezclada con todos los aditivos.
- Adición de las fibras metálicas sin parar de mezclar hasta alcanzar un tiempo total no superior a 10 minutos.

Los hormigones resultantes se ensayaron en fresco para obtener las siguientes características: bombeabilidad con Sliper, fluidez con el ensayo de escurrimiento según Norma UNE-EN 12350-8:2011, densidad según Norma UNE-EN 12350-6:2009, contenido de aire según Norma UNE-EN 12350-7:2010. En estado endurecido, se obtuvo la resistencia a

compresión según Norma UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011.

5. Resultados

Los resultados obtenidos en estado fresco se han plasmado en la Tabla 2, en la Figura 4 y en la Figura 6. Puede verse que la relación agua/cemento mayor, en la mezcla 1, dio lugar al más bombeable de los hormigones (menor pendiente); sin embargo, a la hora de hacer el ensayo de escurrimiento, se producía una segregación de los áridos mayores a la vez que se observaba en el borde de la torta el denominado como “sangrado”, es decir, el hormigón contenía una cantidad excesiva de agua. Durante la puesta en obra de este hormigón, a pesar de que en el bombeabilímetro Sliper diera buenos resultados, probablemente habría sufrido segregación, provocado tapones y resultado finalmente en un material cuya masa sería heterogénea.

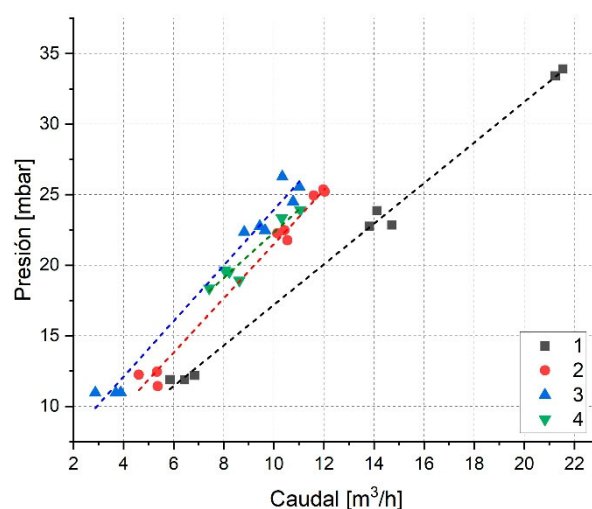


Figura 4: Rectas P-Q de las mezclas 1, 2, 3 y 4.

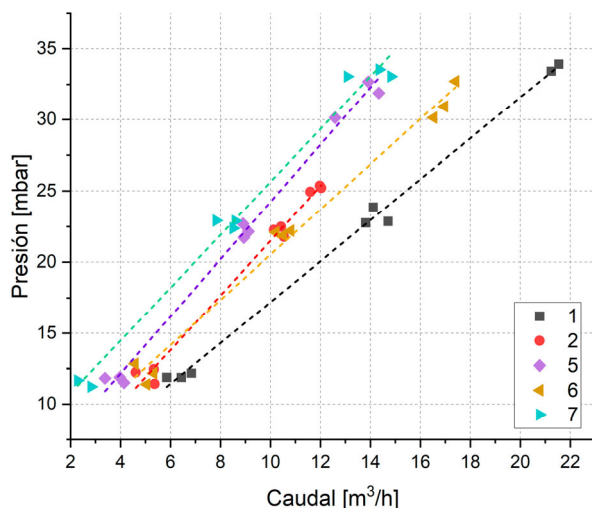


Figura 5: Rectas P-Q de las mezclas 1, 2, 5, 6, y 7.

Tabla 2: Resultados en estado fresco.

Número de mezcla	1	2	3	4	5	6	7
a/c	0.47	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.40
Densidad [kg/L]	2.35	2.40	2.38	2.36	2.38	2.35	2.32
Aire [%]	3.2	1.8	2.0	2.2	2.3	2.1	5.5
T ₅₀ [s]	-	3.41	4.46	4.65	3.09	2.35	3.25
d torta [cm]	-	79.5	59.0	60.5	62.0	70.0	60.0
a [mbar]	0.20	0.16	0.30	0.43	0.29	0.32	0.49
b [10 ⁻⁶ bar·h/m]	1.26	1.68	1.72	1.41	1.76	1.39	1.62
μ [mbar·h/m³]	1.44	1.92	1.97	1.61	2.01	1.59	1.86
ν [mbar]	2.80	2.28	4.22	6.18	4.11	4.64	7.06
R ²	1.00	0.99	0.98	0.93	0.99	0.99	0.99

En las mezclas de la 2 a la 6 no se varió la relación agua/cemento, se dejó estable en 0.42. En las mezclas 2, 3 y 4 ($\approx 409 \text{ kg/m}^3$), la cantidad de cemento fue menor que en las mezclas 5 y 6 (439 kg/m^3). Las diferencias entre las amasadas 2, 3 y 4 vienen determinadas por la sustitución de filler calizo por cenizas volantes y por el contenido de aditivo MasterPozzolith 7005; en la amasada 2 no se sustituyó nada, en la 3 se sustituyó la mitad en peso y en la 4 se sustituyó completamente; el aditivo se añadió a las amasadas 2 y 3 pero no a la 4. A pesar de que el diámetro de torta es mayor en la mezcla número 2, la mejor bombeabilidad se obtiene en la amasada 4 ($\mu = 1.61 \text{ mbar}\cdot\text{h/m}^3$). Esto se debe a la adición de cenizas volantes y a la eliminación del aditivo MasterPozzolith 7005 que aumentaba excesivamente la viscosidad, haciendo la mezcla mucho más pegajosa. Entre las mezclas 5 y 6 la

diferencia principal se encuentra en que en la 6 se sustituyó parte del filler calizo (un 41.5 % en peso) por humo de sílice. Esto provocó mejoras en el diámetro de torta (de 62 cm a 70 cm) y en la pendiente de la recta presión-caudal (de $2.01 \text{ mbar}\cdot\text{h/m}^3$ a $1.59 \text{ mbar}\cdot\text{h/m}^3$).

Por último, la dosificación de la mezcla 7 se basa en la de la mezcla anterior, la 6. Se ha tomado esta dosificación añadiendo la misma cantidad de humo de sílice para aprovechar las propiedades aportadas en la mezcla anterior y se ha disminuido la relación agua/cemento para conseguir unas resistencias aún mayores a largo plazo.

Los resultados obtenidos en fresco con los ensayos tradicionales de asentamiento (diámetro de torta y T₅₀) no se correlacionan directamente con los relativos al bombeo que proporciona el Sliper (Figura 6), por ello es importante ser capaz

de caracterizar la “bombeabilidad” mediante ensayos complementarios que aproximen la reología propia de las mezclas de la mejor manera.

En cuanto a los resultados en estado endurecido (Tabla 3), la resistencia a compresión guarda relación con las características en estado fresco, ya que hay una concordancia inversa entre éstos y la relación agua/cemento (Figura 7). De esta forma, puede observarse que la mezcla 1, cuya relación a/c es igual a 0.47, es la que posee las resistencias más bajas tanto a 1 día

como a 28 días. Las mezclas con cenizas volantes, la 6 y la 7, presentan las mayores resistencias a edades avanzadas.

6. Conclusiones

Aunque se consiga un bombeo que inicialmente parezca satisfactorio, pueden obtenerse dificultades en la práctica, afectando la calidad final del hormigón tanto en estado fresco como en endurecido.

Tabla 3. Resultados en estado endurecido.

Número de mezcla	1	2	3	4	5	6	7
a/c	0.47	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.40
Resist. comp. 1 día [MPa]	40.34	57.21	55.21	54.12	46.93	46.07	45.11
Resist. comp. 28 días [MPa]	55.30	67.82	68.53	69.36	67.17	80.50	82.35

La mezcla 1, con la relación agua/cemento más alta (0.47), presentó la mejor bombeabilidad en el ensayo inicial mostrando, sin embargo, problemas de segregación y sangrado y resistencias bajas a compresión.

Asimismo, se ha reafirmado que los datos obtenidos por métodos tradicionales no son correlativos a los obtenidos con el equipo específico para estudiar bombeabilidad.

Las adiciones influyen enormemente en las propiedades del hormigón. Las mezclas con cenizas volantes, especialmente la mezcla 4, mostraron mejores características de bombeabilidad y una menor viscosidad.

La sustitución total de filler calizo por cenizas volantes, en la mezcla 4 respecto a la mezcla 2, resultó en una mejora de la bombeabilidad que no se logró con una sustitución parcial en la mezcla 3 respecto a la mezcla 2.

La mezcla 6, en la cual se sustituyó parcialmente el filler calizo por humo de sílice respecto a las cantidades empleadas en la mezcla 5, mostraron mejoras notables en el diámetro de la torta y en la pendiente de la recta presión-

caudal, P-Q. Estos cambios indican que el humo de sílice contribuye a una mejor manejabilidad.

La mezcla 7 se basó en la mezcla 6 con la misma cantidad de filler calizo y de humo de sílice y una relación agua/cemento aún más reducida. Mostró un aumento potencial en las resistencias a largo plazo debido a la disminución de la cantidad de agua, pero el porcentaje tan alto de aditivo llevó a un aumento del contenido de aire en estado fresco provocando que no se lograra el aumento deseado de bombeabilidad, sino que se redujera la capacidad de ser bombeado.

El uso excesivo de aditivos tiene consecuencias indeseadas como, por ejemplo, aumentar la viscosidad de la mezcla. Siempre es necesario valorar los beneficios de su empleo.

La mezcla 6 resultó ser la más equilibrada y satisfactoria entre las siete mezclas evaluadas. Su combinación de filler, humo de sílice y superplastificante no solo mejoró la bombeabilidad, trabajabilidad y manejabilidad, sino que también ofreció excelentes resistencias a compresión.

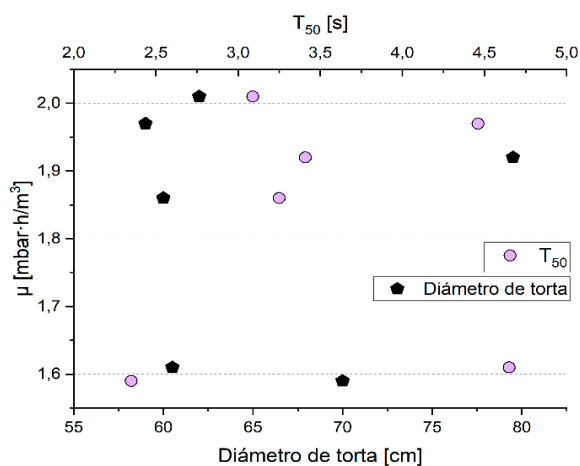


Figura 6: Ensayos tradicionales y bombeabilidad.

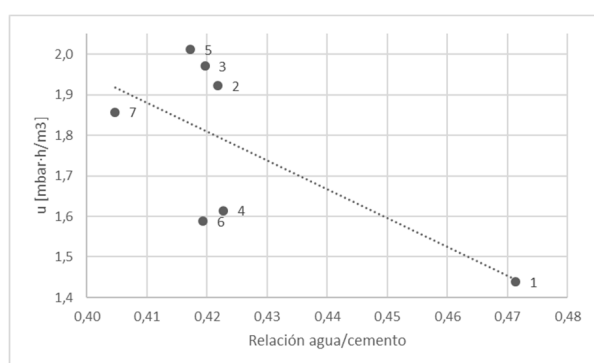


Figura 7: Relación agua/cemento frente a facilidad de bombeo.

En los resultados obtenidos también se observa que no varían las propiedades relativas a la bombeabilidad durante los primeros minutos tras el amasado. Algunos autores afirman que la capa lubricante va empeorando con varias pasadas según va fluyendo el hormigón, reflejando una disminución de la bombeabilidad. Es importante destacar que el cambio de temperatura en estos procesos del bombeo hace que varíe dicho comportamiento reológico de la mezcla. En nuestro caso, por el contrario, no se ha detectado una pérdida de fluidez al pasar el tiempo, sabiendo que la longitud de bombeo no es excesiva. Los puntos de una misma amasada, reflejados en el Gráfico 3, siguen una línea recta cuyo factor R^2 es bastante cercano a 1.

Agradecimientos

La motivación principal de este trabajo ha surgido como requerimiento mínimo dentro del

proyecto Hormivén, perteneciente al Programa Nacional de Cooperación Público-Privada, Subprograma RETOS DE COLABORACIÓN en su convocatoria de 2017.

Referencias

- [1] Petersson, O., Billberg, P., & Van, B. K. (2004). *A model for self-compacting concrete*, In Production methods and workability of concrete (pp. 495-504). CRC Press.
- [2] Shi, C., Wu, Z., Lv, K., & Wu, L. (2015). *A review on mixture design methods for self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, 84, 387-398.
- [3] Mechtcherine, V., Nerella, V. N., & Kasten, K. (2014). *Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer*, Construction and Building Materials, 53, 312-323.
- [4] Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2018). *Virtual Sliding Pipe Rheometer for estimating pumpability of concrete*, Construction and Building Materials, 170, 366-377.
- [5] Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH. *Design And Application Of A New Rheometer For Measuring The Pumpability Of Fresh Concrete On Site*, 84428 Buchbach, Germany.
- [6] Ferraris, C. F., Obla, K. H., & Hill, R. (2001). *The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete*, Cement and concrete research, 31(2), 245-255.
- [7] Secieru, E., Cotardo, D., Mechtcherine, V., Lohaus, L., Schröfl, C., & Begemann, C. (2018). *Changes in concrete properties during pumping and formation of lubricating material under pressure*, Cement and Concrete Research, 108, 129-139.
- [8] Calvo, J. G., Carballosa, P., Castillo, A., Revuelta, D., Gutiérrez, J. P., & Castellote, M. (2019). *Expansive concretes with photocatalytic activity for pavements: Enhanced performance and modifications of the expansive hydrates composition*,

Construction and Building Materials, 218, 394-403.

- [9] Maciá, M. E., Castillo, Á., Martínez, I., & Rubiano, F. J. (2022). *High-Temperature Residual Compressive Strength in Concretes Bearing Construction and Demolition Waste (CDW): An Experimental Study*, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46(6), 4303-4312.
- [10] De La Rosa, Á., Ortega, J. J., Ruiz, G., Calvo, J. G., Sánchez, F. R., & Castillo, Á. (2023). *Autogenous self-healing induced by compressive fatigue in self-compacting steel-fiber reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, 173, 107278.
- [11] Irassar, E. F. (2004). *Hormigones especiales*.