

DESARROLLO DE HORMIGONES PARA MUROS COLADOS EN LAS OBRAS DE CIERRE DE LA CIRCUNVALACIÓN DE CÓRDOBA Y EL RÍO SUBTERRÁNEO EN LOMAS DE ZAMORA, BUENOS AIRES

Martín Santiago Grosso, Juan Pedro Cantarella, Raúl López, Luciano Sambataro
Centro de Desarrollo e Innovación (CDi), Holcim (Argentina) S.A., Casilla de correo 16,
X5101ACE, Córdoba, Argentina, raul.lopez@lafargeholcim.com

RESUMEN

Ambas obras han presentado diversos desafíos. Particularmente requirieron la construcción de muros colados ejecutados previamente a la excavación como método de contención de las trincheras, utilizando el sistema Tremie. Los desafíos para la ejecución de estas obras estuvieron relacionados con el mantenimiento de la fluidez por largos períodos, lograr tiempos de fraguado prolongados pero acotados y el control de la exudación excesiva, muy perjudicial por la altura de estas estructuras. La falta de experiencia local en estas aplicaciones y requerimientos del hormigón, implicaban una gran cantidad de pruebas en hormigón hasta lograr la combinación de aditivos adecuada, por lo que se definió realizar un estudio de velocidad de hidratación en morteros con la ayuda de un calorímetro semiadiabático y así correlacionar la evolución de temperatura con el mantenimiento de la fluidez y el tiempo de fraguado de distintas combinaciones y proporciones de aditivos. Con esta metodología se pudo obtener una gran cantidad de resultados en un corto tiempo, y así seleccionar las combinaciones más convenientes de aditivos para su posterior verificación en hormigón a escala de laboratorio y luego a escala industrial, alcanzándose los resultados esperados con mínimos ajustes. A la fecha ambas obras se han ejecutado en su totalidad evidenciando una buena calidad de ejecución del hormigón.

Palabras clave: muros colados, controladores de hidratación, calorímetro.

INTRODUCCIÓN

La técnica de construcción de muros de sostenimiento de excavaciones denominados muros diafragmas se desarrolló alrededor de 1960 principalmente en Alemania, Francia e Italia, tras la implementación de la suspensión de lodo bentonítico en las industrias de gas y petróleo para lograr excavaciones más profundas [1]. El procedimiento consiste en la excavación de trincheras discretas, que son llenadas temporalmente con una suspensión coloidal de lodo bentonítico para garantizar la estabilidad lateral de las mismas. Al alcanzar la profundidad de diseño del panel, éste es hormigonado desde su base hasta el filo superior mediante la metodología llamada Tremie. Esta técnica es una de las más utilizadas para la colocación de hormigón bajo agua y consiste en una cañería que dispone en la parte superior de una tolva donde se vierte el material y un sistema de izado para levantar el conjunto a medida que avanza el colado. El extremo inferior de la tubería por la que se coloca el material debe estar siempre sumergido en el hormigón ya colado, para

prevenir el ingreso de agua a ella. La velocidad de colocación debe ser tal que no genere turbulencias que puedan mezclar el agua o el lodo con el hormigón [2].

La técnica constructiva mencionada requiere de hormigones muy fluidos y de baja viscosidad (Figura 1, adaptada de EEFC 2016 [3]). Adicionalmente es necesario mantener la fluidez y retrasar de manera controlada los tiempos de fraguado para evitar juntas frías o defectos de compactación.

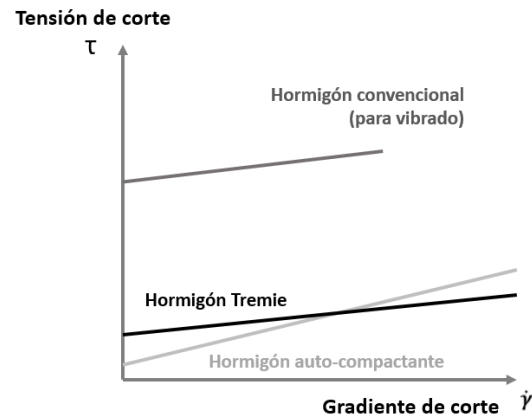


Figura 1: Parámetros reológicos de un hormigón para sistema Tremie, comparado cualitativamente con otros hormigones.

Para obtener las propiedades mencionadas de fluidez y tiempos de fraguados extendidos en el tiempo, se utilizan aditivos fluidificantes, retardadores de fraguado y en condiciones más extremas, controladores de hidratación. Estos últimos son agentes orgánicos quelantes que cubren los granos de cemento suprimiendo la hidratación superficial. De esta manera los tiempos de fraguados se retrasan, la mezcla retiene la fluidez y se estabiliza su temperatura mientras dura el retraso del fraguado. Cuando el aditivo es consumido químicamente la actividad de hidratación normal se reinicia. El efecto del aditivo mejora, además, el desarrollo de resistencias finales [4, 5].

Las dosis pueden variar ampliamente, y están influenciadas, además del tiempo requerido de estabilización, por: la dosificación del hormigón, la temperatura media ambiente, y el momento de incorporación del aditivo a la mezcla [5]. A diferencia de los retardadores de fraguado convencionales los controladores de hidratación pueden usarse en grandes dosis sin presentar efectos indeseados como un descontrolado tiempo de fraguado o un pobre desarrollo de resistencias [5].

El estudio del uso de estos aditivos en hormigones para muros colados en combinación con reductores de agua de medio rango, en distintas proporciones, se realizó mediante un calorímetro semiadiabático, que permitió evaluar la velocidad de hidratación y el tiempo de fraguado con las diferentes combinaciones y dosis de aditivos. Estas técnicas fueron utilizadas en dos obras de gran envergadura en las que se debían diseñar hormigones para muros colados con especificaciones y materiales diferentes.

La primera de estas obras corresponde al cierre del anillo de circunvalación de la ciudad de Córdoba, que comprendió 17 km de traza en hormigón, 24 puentes, 7 nuevos distribuidores junto a la readecuación de otros dos con excavaciones de gran profundidad para viaductos y un túnel en cuya construcción se utilizaron muros colados con sistema Tremie. Las dimensiones de éstos fueron: 1 m de espesor, profundidad media de 24 m, volumen de hormigón por segmento de aproximadamente 150 m³.

La segunda de las obras analizadas se refiere al Río Subterráneo Tramo 1 de la obra de abastecimiento de agua potable de Aysa denominada Sistema Agua Sur. Esta etapa comprende la construcción mecanizada de 13,5 km de un túnel de 3900 mm de diámetro en los partidos de Quilmes y Lomas de Zamora en la provincia de Buenos Aires. Como punto de partida de la tuneladora, se construyó un pozo de ataque conformado por 4 anillos secantes constituidos por muros colados de 2,15 m de ancho y 37 m de profundidad.

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

En la Tabla 1 se presentan los requerimientos técnicos de cada proyecto. Si bien los requisitos de ambas obras son comparables y presentan similitudes, es posible destacar algunas diferencias. En términos de reología del hormigón, se distinguen 2 situaciones de requerimientos para el mantenimiento del asentamiento en el tiempo. En el caso del hormigón para la obra de Circunvalación de Córdoba, el asentamiento debía de mantenerse por 6,5 horas aceptando una pérdida de 20 mm. En el caso del Río subterráneo, dado que la planta elaboradora de hormigón se encontraba en el emplazamiento de la obra, este requerimiento era de sólo 2 horas.

Tabla 1: Principales requerimientos técnicos de cada proyecto.

Descripción	Unidad	Circunvalación de Córdoba	Río Subterráneo Lomas de Zamora
Tipo de cemento	--	-	ARS
Contenido de cemento	kg/m ³	≥ 385	≥ 380
Resistencia especificada a 28 días	MPa	30	35
Resistencia mínima a compresión a 24 h	MPa	≥ 1	-
Relación agua cemento	--	≤ 0,50	≤ 0,45
Contenido de aire incorporado	%	-	4,5±1,5
Velocidad de succión capilar	g/m ² s ^{1/2}	-	≤ 4,0
Asentamiento de inicial	mm	≥ 220±20	≥ 220±20
Asentamiento a 2 horas	mm	≥ 220±20	≥ 200±20
Asentamiento a 6,5 horas	mm	≥ 200±20	-
Velocidad de exudación		≤ 0,1 ml/min	≤ 100 x 10 ⁻⁶ cm/s

CEMENTOS UTILIZADOS Y ESTUDIOS REALIZADOS

Distintas combinaciones de materiales debían ser probadas en cada proyecto para poder satisfacer los requerimientos presentados en la Tabla 1.

Los cementos utilizados en cada obra respondían a la disponibilidad local. En Córdoba se utilizó un CPF40, producido en Malagueño. En Buenos Aires el cemento utilizado fue un CAH40 (ARS) producido en Campana. La evolución de las propiedades mecánicas y reológicas del hormigón están fuertemente influenciadas por el proceso de hidratación del cemento. En la Figura 2 se muestra la comparación en el desarrollo del calor de hidratación de ambos cementos de acuerdo a la norma IRAM 1852 [6]. La evidente diferencia de reactividad entre los cementos, implicó la necesidad de incorporar un aditivo controlador de la hidratación en el caso de la obra de Circunvalación de Córdoba, mientras que el uso de un plastificante con efecto retardador fue suficiente en la obra del Río Subterráneo.

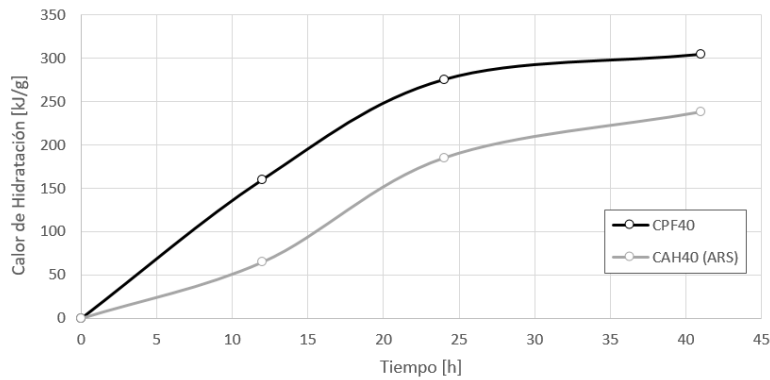


Figura 2: Calor de hidratación del cemento CPF40 y CAH40 (ARS).

El estudio de aditivos fue realizado mediante el procedimiento MeeTooHeat [7]. Esta técnica de Holcim consiste en evaluar la fase mortero de la mezcla de hormigón en términos de fluidez y liberación de calor. A continuación, se describen los resultados para cada proyecto en particular.

Obra circunvalación de Córdoba

En esta obra se estudiaron dos reductores de agua de medio rango para evaluar su eficiencia y conveniencia. En primer lugar, se evaluaron diferentes combinaciones y proporciones de aditivos mediante calorimetría para determinar el rango de dosis más conveniente. Parte de estos resultados se indican en las

Figura 3. Es de especial interés el detalle mostrado en la imagen de la derecha, ya que allí se evidencia el corrimiento de la curva de generación de calor según se incrementa la dosis del controlador de hidratación. A partir de estas curvas se determinaron los tiempos iniciales de fraguado de las diferentes dosis y con ellos se pudo inferir un rango de estudio más acotado. Estos resultados se muestran en la Tabla 2.

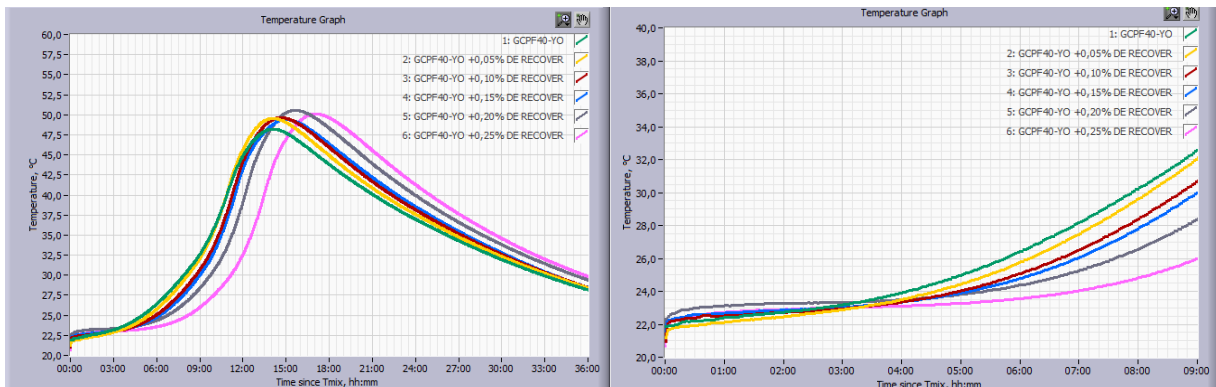


Figura 3: Curvas de calorimetría del cemento CPF40 con diferentes dosis de controlador de hidratación. Derecha: zoom de etapa inicial.

En la Figura 4 se observa la linealidad de comportamiento del tiempo de fraguado del hormigón con la dosis de aditivo, lo que permite un control preciso de dicha propiedad. A partir de estos resultados se optó por trabajar con dosis comprendidas entre 0,05 % y 0,10 % de controlador de hidratación y se realizaron pastones de prueba en laboratorio y posteriormente a escala industrial en conjunto con el cliente para definir la dosificación a utilizar. Ésta es la que se muestra en la Tabla 2, junto con los valores obtenidos de los diferentes parámetros.

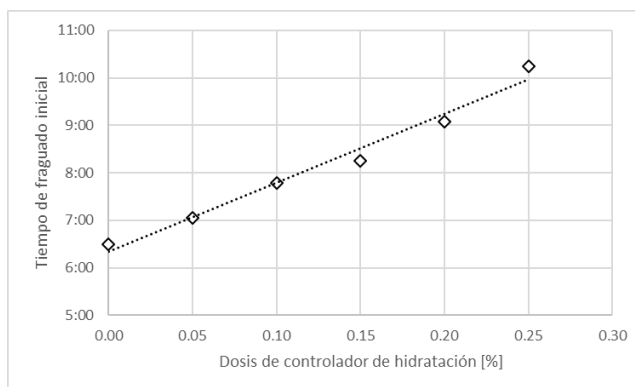


Figura 4: Tiempo de fraguado en función de la dosis de aditivo controlador de fraguado.

Tabla 2: Dosificación final obra Circunvalación de Córdoba.

Material	
Cemento CPF40 (kg/m ³)	430
Agua (kg/m ³)	210
Arena gruesa (kg/m ³)	745
Triturado 6-19 (kg/m ³)	915
Aditivo reductor de agua (kg/m ³) (%)	3,9 (0,9)
Aditivo controlador de la hidratación (kg/m ³) (%)	0,3 (0,07)
Relación a/c	0,49
Resistencia media a compresión (MPa)	
24 h ⁽¹⁾ / 3 días / 28 días	0,6 / 26,5 / 41,7
Nota (1): Se aceptó que el valor presentado era suficiente para satisfacer los requerimientos constructivos.	

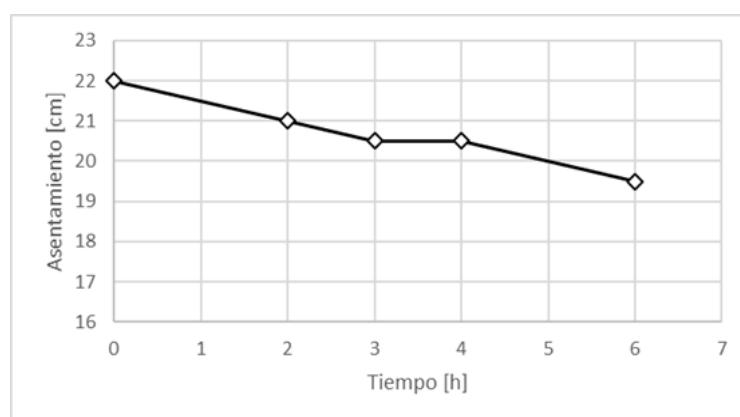


Figura 5: Variación del asentamiento en el tiempo.

Obra Río Subterráneo Lomas de Zamora

Para satisfacer los requerimientos técnicos presentados en la Tabla 1, se utilizó un aditivo incorporador de aire junto al plastificante. Se determinó la compatibilidad entre aditivos y la dosis justa de plastificante, a través del ensayo del Cono Holcim y la calorimetría MeeTooHeat [7]. De esta manera se evaluó el impacto de la dosis de aditivo en la demanda de agua del mortero (Figura 6), con un extendido de referencia inicial, para luego realizar la medición de calorimetría (Figura 7) de donde se obtuvieron los tiempos de fraguado inicial y final.

El estudio en morteros permitió establecer la dosis óptima de aditivo plastificante de 1,0 % que permitía alcanzar los requisitos reológicos del hormigón para muros colados. La dosificación resultante se muestra en la Tabla 3. En una segunda etapa, se verificaron los parámetros de resistencia y asentamiento en hormigones de laboratorio y posteriormente industriales, elaborados con la dosis mencionada.

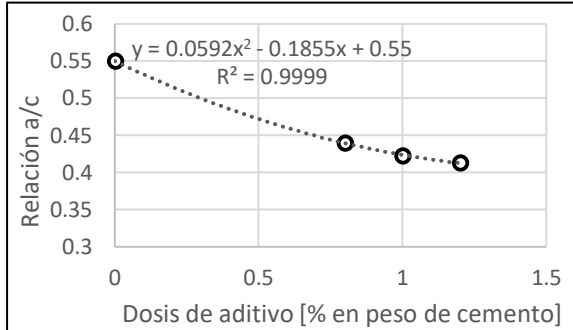


Figura 6: Efecto del aditivo en la demanda de agua del mortero.

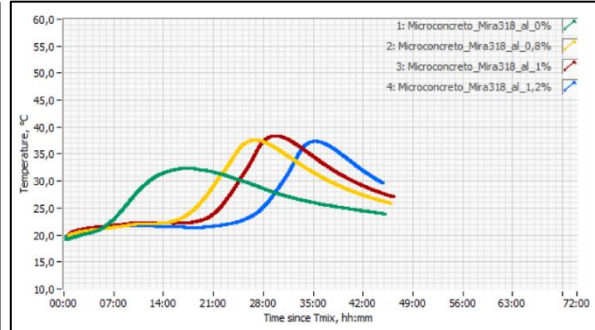


Figura 7: Calor de hidratación de morteros con distintas dosis de aditivo.

Tabla 3: Dosificación final obra Río Subterráneo Buenos Aires.

Material	
Cemento CAH40 (ARS) (kg/m ³)	390
Agua (kg/m ³)	170
Arena (kg/m ³)	860
Triturado 6-19 (kg/m ³)	965
Aditivo reductor de agua (kg/m ³) (%)	3,9 (1,0)
Aditivo incorporador de aire (kg/m ³) (%)	0,39 (0,23)
Relación a/c	0,44
Resistencia media a compresión (MPa)	
3 días / 7 días / 28 días	25,1 / 35,8 / 50,7

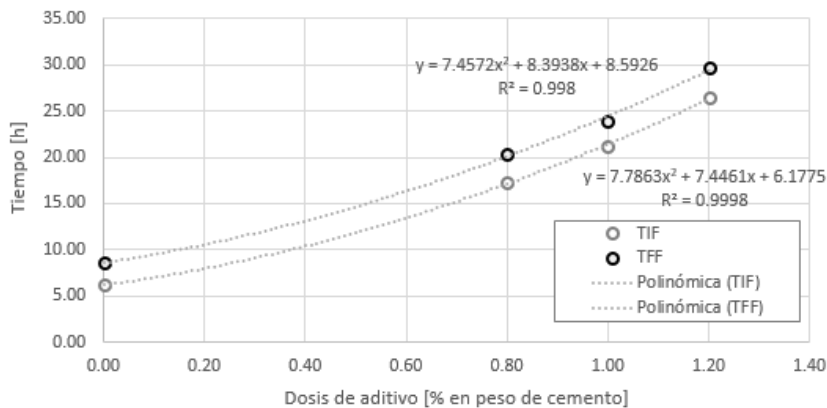


Figura 8: Variación del tiempo de fraguado en relación a la dosis de aditivo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el diseño de hormigones para el llenado de los muros colados por el sistema Tremie bajo estrictos requerimientos de proyecto. De éste se destacan los siguientes aspectos:

1. La gran variedad de cementos y aditivos disponibles en el mercado obligan al uso de métodos rápidos y precisos para la evaluación del comportamiento de las diferentes combinaciones de estos, que nos permitan converger rápidamente a la solución óptima.
2. El método de ensayo de calorimetría permitió realizar un análisis de sensibilidad sobre la dosificación de aditivos de manera eficaz en ambos proyectos, lo que lo transforma en una herramienta de gran utilidad a la hora de evaluar diferentes combinaciones de cementos y aditivos. Esto resultó en un menor número de pastones de prueba con los beneficios en plazos y costos que eso representa, agilizando la respuesta a los requerimientos del cliente.
3. La caracterización y reconocimiento de los cementos empleados resultó fundamental a la hora de escoger los aditivos que mejor se adapten a sus características y a las exigencias particulares de cada proyecto.
4. El uso de aditivos controladores de hidratación permite adaptarse con gran versatilidad, mediante el manejo de la dosis, a los requerimientos de mantenimiento de asentamiento en el tiempo de cada proyecto en particular.
5. Los hormigones diseñados lograron cumplir con los requisitos de proyecto, cuyas estructuras se encuentran finalizadas y operativas al día de la fecha (Ver **Error! Reference source not found.**).

REFERENCIAS

- [1] Lubach, "Bentonite cavities in diaphragm walls", TU Delft, Delft, (2010).
- [2] Nawy E, "Concrete Construction Engineering Handbook", CRC Press, Taylor & Francis Group, (2008).
- [3] EFFC / DFI, "Best Practice Guide to Tremie Concrete for Deep Foundations", (2016).
- [4] GCP, «gcpat.com,» [En línea]. Available: gcpat.com/en/solutions/products/tb-1301-recover-hydration-stabilizer-applications-and-performance-review.
- [5] Ramachandran VS, "Concrete Admixtures Handbook, properties, science and technology", Noyes Publications, (1995).
- [6] IRAM 1852, (Determinación del calor de hidratación", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, (1998).
- [7] Holcim, "MeeTooHeat", (2020).

