

CEMENTOS DE BAJO CALOR DE HIDRATACIÓN VERSUS TENDENCIA A FISURACIÓN TÉRMICA DE HORMIGONES MASIVOS ESTRUCTURALES

Edgardo Becker¹, Patricio Corallo², Ismael Gea³, Cristian Ríos⁴, Javier Cañari⁵

¹ Loma Negra CIASA, Av. Roca 6757 (C), ebecker@intercement.com;

² Loma Negra CIASA, Av. Roca 6757 (C), pcorallo@intercement.com;

³ Loma Negra CIASA, Av. Roca 6757 (C), igea@intercement.com;

⁴ Loma Negra CIASA, Av. Roca 6757 (C), crios@intercement.com;

⁵ Loma Negra CIASA, Av. Roca 6757 (C), jcanari@intercement.com;

RESUMEN

Algunas fundaciones tienen tales dimensiones que las temperaturas que se generan por la hidratación del cemento inducen tensiones que, si superan el máximo valor que el hormigón puede soportar, la probabilidad de fisuración aumenta drásticamente, ampliándose las vías que facilitan el ingreso de agentes deletéreos. Tradicionalmente, para estos casos tiende a especificarse cementos de “bajo calor de hidratación”, condición alcanzada limitando la cantidad de calor generada por unidad de masa del cemento. Pero, tales cementos también presentan menores resistencias, al menos a las edades en que éstas son de interés. En este artículo se simulan las temperaturas y tensiones de origen térmico en una estructura masiva de hormigón comparando el desempeño de tres cementos muy diferentes. Los resultados muestran que no es necesario ni suficiente especificar un cemento con la propiedad “bajo calor de hidratación” para reducir el riesgo de fisuración térmica.

Palabras claves: calor de hidratación, durabilidad, resistencia a compresión, hormigón masivo estructural.

INTRODUCCIÓN

En la parte del trabajo se evalúa un conjunto de hormigones con diferentes relaciones a/c, con y sin un aditivo reductor de agua de alto rango elegido a modo de ejemplo. Se involucran cementos de muy diferentes comportamientos en lo que concierne a generación de calor de hidratación y evolución de resistencias. En una segunda etapa, con la información obtenida anteriormente, se simula numéricamente el comportamiento térmico de una estructura masiva, con hormigones de cierta resistencia, comparando los distintos cementos en cuestión, con el objeto de escalar riesgo de fisuración térmica.

MATERIALES EMPLEADOS

En la Tabla 1 se muestran los materiales empleados. Nótese que los tres cementos empleados tienen evoluciones muy diferentes en resistencia y calor de hidratación. El CPN posee elevadas resistencias a todas las edades, especialmente, a las más tempranas, como la cantidad de calor generada. El CAH, muy diferente al anterior, presenta resistencias más bajas, especialmente, a edades tempranas, como el calor generado, advirtiendo que cumple con la condición de bajo calor “BCH” descrita en IRAM 50001. El

CPP también presenta menores resistencias que el primero, con valores superiores al CAH a primeras edades, pero inferiores éste a edades más avanzadas, lo que se refleja también en la generación de calor, no obstante, llegando a cumplir también con la condición BCH.

Tabla 1: Materiales empleados.

Material	Características relevantes
Cemento CPP	Resistencia a compresión: 2d: 21MPa; 7d: 33 MPa; 28d: 40 MPa Calor de hidratación ⁽¹⁾ : 41 h: 204 J/g; 5 días: 250 J/g
Cemento CAH	Resistencia a compresión: 2d: 13 MPa; 7d: 29 MPa; 28d: 44 MPa Calor de hidratación ⁽¹⁾ : 41 h: 190 J/g; 5 días: 269 J/g
Cemento CPN	Resistencia a compresión: 2d: 31MPa; 7d: 44 MPa; 28d: 55 MPa Calor de hidratación ⁽¹⁾ : 41 h: 315 J/g; 5 días: 372 J/g
Arena fina natural	Densidad SSS 2,64; Abs: 0,2 %; MF: 1,80; Origen: R. Paraná
Arena granítica 0-6	Densidad SSS: 2,72; Abs: 0,4 %; MF: 3,20; Origen: Olavarría
Piedra granítica 6-20	Densidad SSS: 2,73; Abs: 0,4 %; Tmáx: 19 mm; Origen: Olavarría
Aditivo reductor de agua	Aditivo hiperfluidificante. Densidad: 1,10; Base: Policarboxilato

⁽¹⁾ Determinado por el método de Langavant

MEZCLAS REALIZADAS

Para este trabajo fueron realizadas seis mezclas con cada cemento, tres sin aditivo ($a/c=0,90; 0,65$ y $0,50$) y tres con aditivo reductor de agua ($a/c=0,65; 0,50$ y $0,35$), ajustando siempre el volumen de pasta para un asentamiento inicial de 12 ± 2 cm. En todos los casos, la relación entre agregados finos es tal que su módulo de finura es 2,40 y la relación agregado fino/agregado total se fijó en 48 % en volumen. Cuando corresponde, la dosis del aditivo hiperfluidificante se fijó en 0,5 % (en peso del cemento) para los casos del CPN y CAH, y en 1,0 % para el CPP (por exhibir una dosis de saturación mayor).

ENSAYOS REALIZADOS – RESULTADOS OBTENIDOS

Para cada una de las mezclas descriptas en el apartado anterior, se midió evolución de resistencias a tracción y a compresión, módulo de elasticidad y generación de calor (por el método de calorimetría semiadiabática). El gran volumen de los resultados obtenidos no permite su exposición entera en este artículo. Sólo a modo de ejemplo para las mezclas con relación $a/c=0,50$ y con aditivo reductor de agua, en la Figura 1 se muestran sus evoluciones de resistencias a compresión, tracción, módulo de elasticidad y generación calor. Misma información fue obtenida para todos los demás hormigones. Para dar un dominio continuo en el tiempo a las propiedades halladas, los valores medidos puntualmente fueron correlacionados con una expresión de la forma [1]:

$$R_{(M)} = R_o \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau}{M}\right)^\alpha\right) \quad (1)$$

Donde $R(M)$ es la propiedad a la edad equivalente M ; R_o , τ y α son los tres parámetros de la regresión, hallados para cada propiedad, para cada mezcla. En la Figura 2 se grafica el requerimiento de pasta necesario en cada caso (% en volumen) en función de la relación a/c para que cada mezcla logre alcanzar el asentamiento de diseño. Para darle un dominio continuo en función de la relación a/c a esta propiedad Vp_{12} , los valores medidos puntualmente fueron correlacionados con una expresión de la forma:

$$Vp_{12} = \frac{C_{12}}{D_{12}^{a/c}} + Vv \quad (2)$$

Donde Vv es el volumen de vacíos de la combinación de los agregados, y C_{12} y D_{12} son parámetros de la regresión, hallados para cada mezcla.

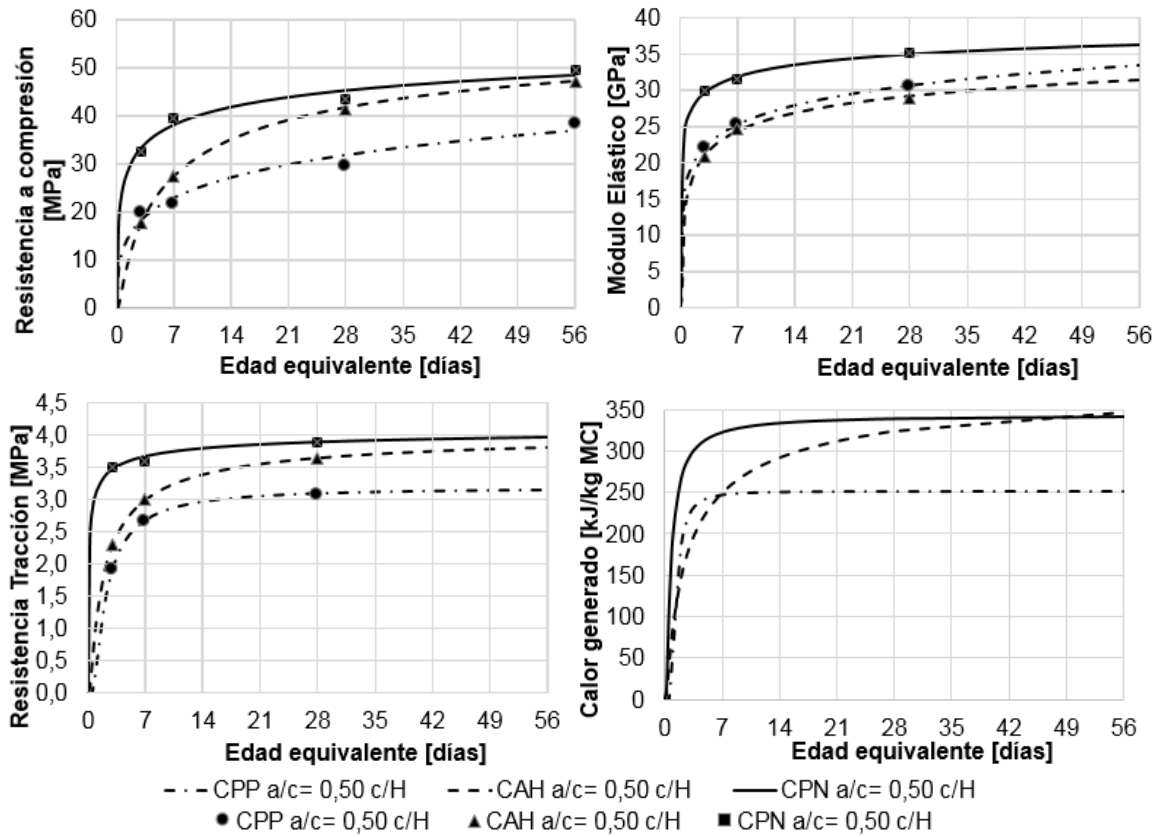


Figura 1: Evolución de propiedades de mezclas con a/c=0,50 y aditivo reductor de agua.

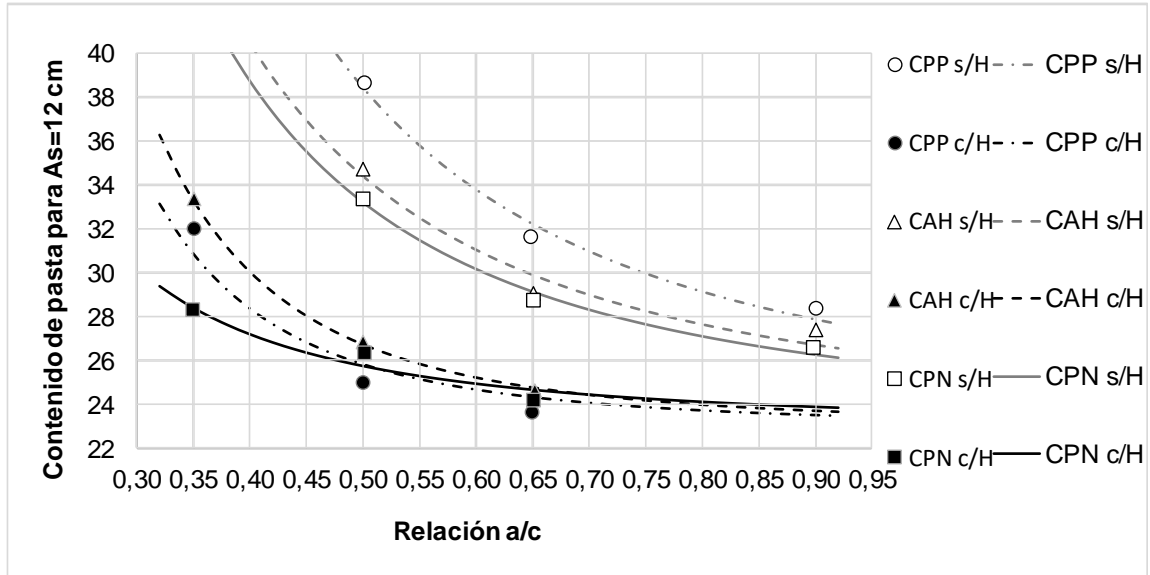


Figura 2: Contenido de pasta de las mezclas.

En cuanto a la resistencia a compresión CST , para cada cemento, con y sin aditivo reductor de agua, fueron determinados los coeficientes de Abrams (A , B), que expresan esta propiedad en función de la relación a/c, en particular para la edad de 28 días se tiene:

$$CST_{28} = \frac{A_{28}}{B_{28}^{a/c}} \quad (3)$$

Pero, con esta información y la indicada en el párrafo anterior, en la Figura 3 se grafica la resistencia a compresión en función del contenido unitario de cemento de las mezclas, para cada tipo cemento, con y sin aditivo reductor de agua. En efecto, para cada nivel de resistencia CST_{28} , la relación a/c se desprende de la ecuación (3):

$$a/c = \frac{\ln A_{28} - \ln CST_{28}}{\ln B_{28}} \quad (4)$$

Y, con la densidad del cemento ρ_c , el correspondiente contenido unitario de cemento CUC se despeja de la ecuación (2):

$$CUC = \frac{Vp_{12}}{a/c + \frac{1}{\rho_c}} = \frac{\frac{C_{12}}{D_{12} a/c} + Vv}{\frac{\ln A_{28} - \ln CST_{28}}{\ln B_{28}} + \frac{1}{\rho_c}} \quad (5)$$

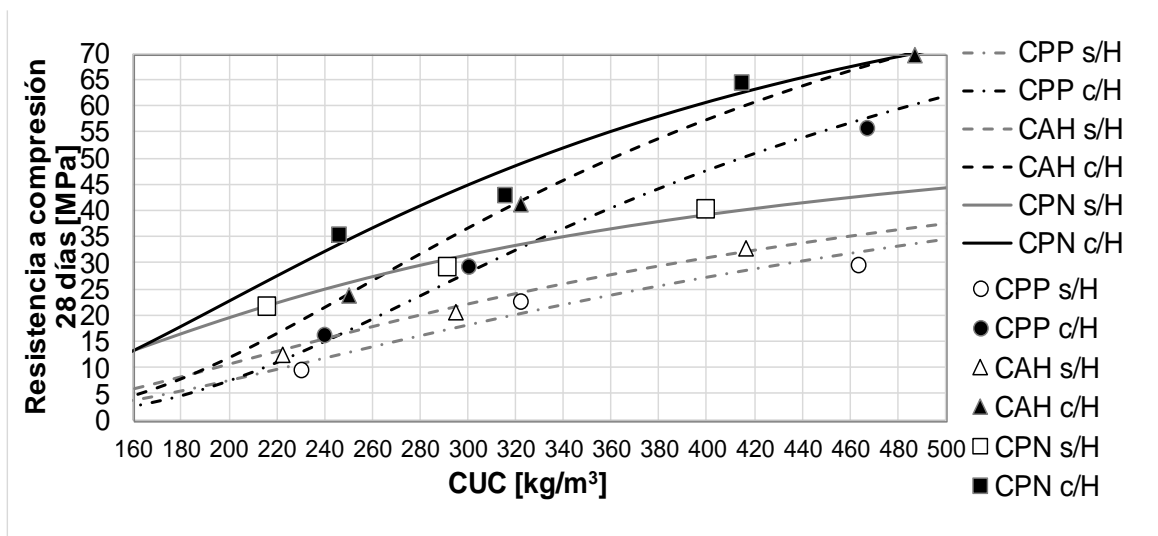


Figura 3: Resistencia a compresión vs contenido de cemento.

En lo que concierne a la generación de calor HET , se representa en la Figura 4, para cada mezcla la elevación adiabática de temperatura $\Delta T_{ad_{28}}$ a la edad equivalente de 28 días en función de su resistencia a compresión a la misma edad, un verdadero indicador de energía generada por unidad de resistencia, sin prestar atención al contenido de cemento que haya sido necesario. Partiendo de la relación de $\Delta T_{ad_{28}}$ con el calor generado HET_{28} , el contenido unitario de cemento, la densidad del hormigón ρ_H y su calor específico C_H , y teniendo en cuenta la ecuación (5), queda:

$$\Delta T_{ad_{28}} = \frac{HET_{28} CUC}{\rho_H C_H} = \frac{HET_{28}}{\rho_H C_H} \left(\frac{\frac{C_{12}}{D_{12} a/c} + Vv}{\frac{\ln A_{28} - \ln CST_{28}}{\ln B_{28}} + \frac{1}{\rho_c}} \right) \quad (6)$$

Como primera conclusión, puede decirse que cuando no se utiliza un aditivo reductor de agua, para alcanzar una determinada resistencia, aunque no existe una enorme diferencia en la cantidad total de calor generada entre los distintos tipos de cemento, el que presenta un desempeño algo mejor es el CPN, justamente quien está muy lejos de poder ser considerado de "BCH". Cuando se emplea el aditivo hiperfluidificante, el CPP parece exhibir un desempeño mejor que los restantes; pero el CAH y CPN presentan un comportamiento semejante en este sentido a pesar de su muy diferente situación frente a la condición "BCH". De todas formas, acá esta historia podría ser diferente si se emplea otro aditivo reductor de agua y/u otras dosis. Y, más aún, la elevación adiabática de

temperatura es sólo una componente del riesgo de fisuración térmica en un hormigón masivo, por cuanto, la evolución en el tiempo de la generación de calor, de la resistencia a tracción y del módulo de elasticidad necesitan ser tenidas en cuenta [2].

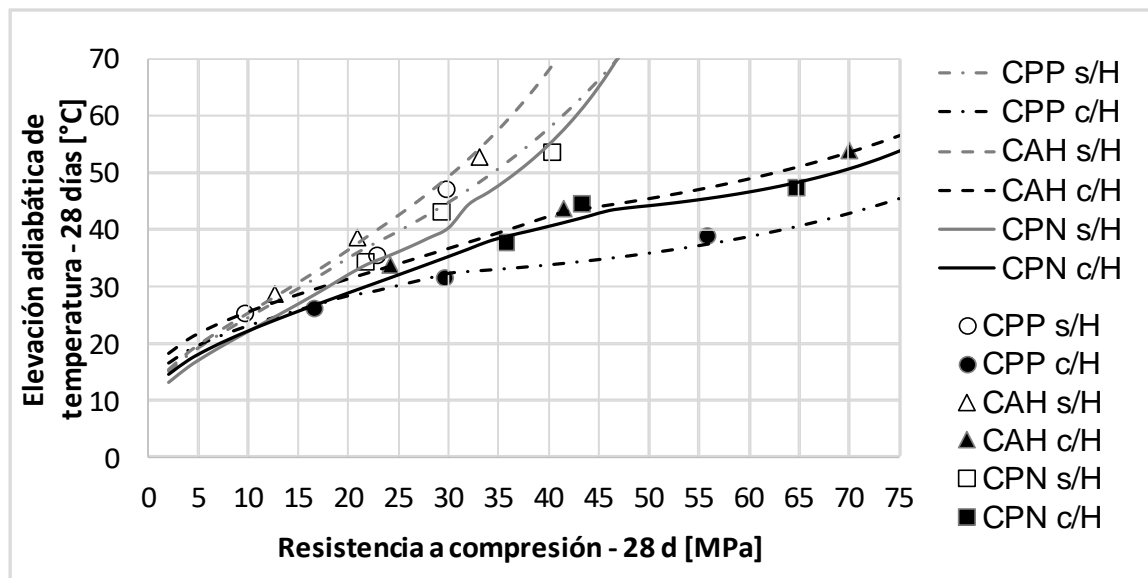


Figura 4: Elevación adiabática de temperatura vs resistencia a compresión a 28 días.

HORMIGÓN H-30 PARA SIMULACIÓN

Con la información obtenida se diseñan ahora en forma teórica hormigones H-30, de 40 MPa de resistencia media a compresión a 28 días, con asentamiento 12 ± 2 cm (usual en estructuras masivas de fundaciones) para comparar el desempeño de los tres cementos, con y sin aditivo hiperfluidificante en lo que concierne a tendencia a fisuración térmica. En la Tabla 2 se muestran algunas características de cada uno de los hormigones, suponiendo que las proporciones relativas entre los agregados son idénticas a las de las mezclas descritas en el apartado anterior. En la Figura 5 se muestran las evoluciones de resistencias a compresión, tracción, módulo de elasticidad y generación calor estimadas, en base a la información mencionada en el apartado anterior.

Tabla 2: Mezclas teóricas para el hormigón H-30.

Material	UM	H-30	H-30	H-30	H-30	H-30	H-30
		CPP s/H	CPP c/H	CAH s/H	CAH c/H	CPN s/H	CPN c/H
Agua	kg/m ³	250	155	221	163	201	161
Cemento	kg/m ³	595	360	550	320	415	280
Aditivo reductor	% MC	-	1,0	-	0,5	-	0,5
Volumen pasta	% vol	44,8	27,4	40,3	26,6	33,9	25,1
Densidad teórica	kg/m ³	2282	2427	2330	2414	2348	2413

El comportamiento térmico (campos de tensiones y temperaturas de origen térmico) de cada uno de estos seis hormigones fue simulado por el método de elementos finitos en una estructura masiva elegida a modo de ejemplo, que se muestra en la Figura 6. Dicha estructura presenta una sección cuadrada en planta, de 8 metros de lado, con un espesor de 2 metros, apoyada sobre el terreno. En la Tabla 3 se muestran algunas hipótesis adicionales adoptadas para llevar a cabo las simulaciones indicadas.

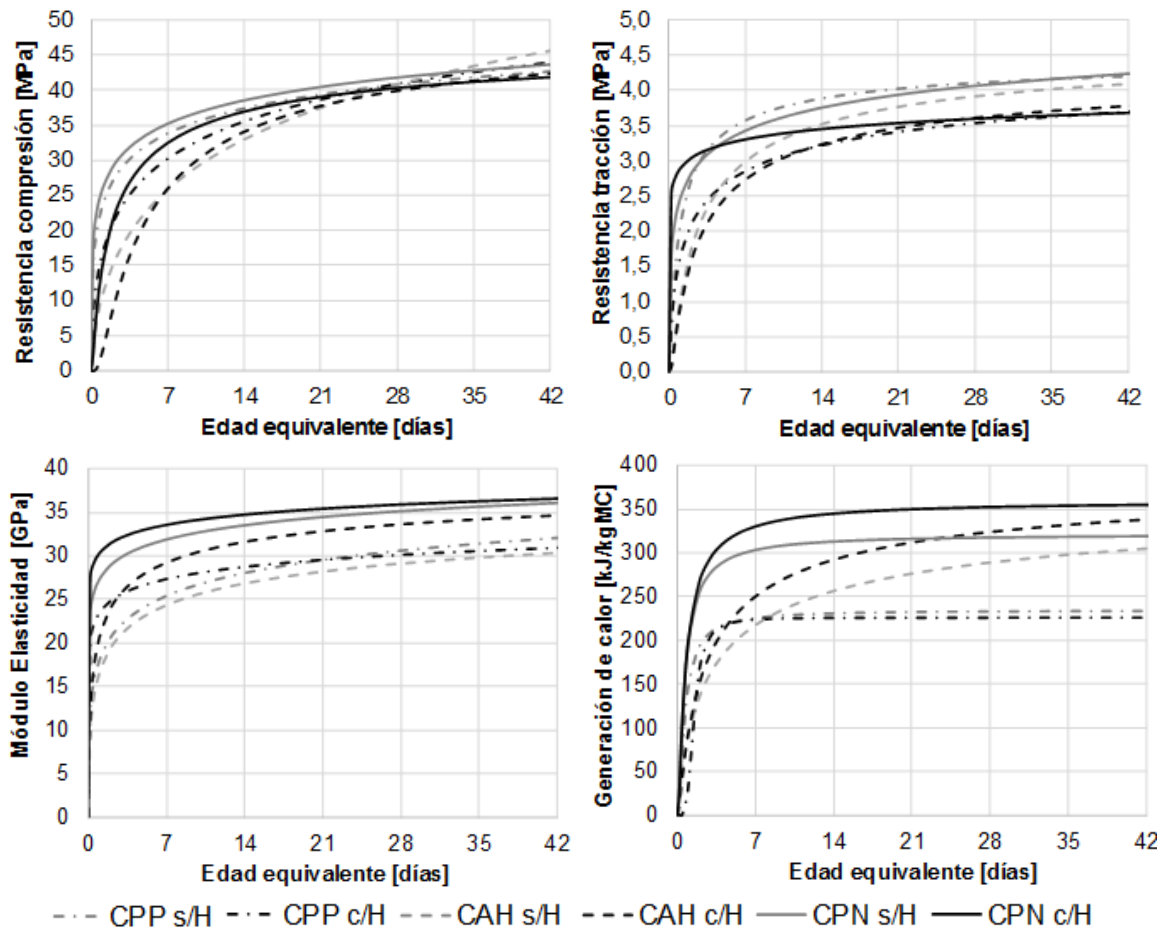


Figura 5: Evolución de propiedades mecánicas estimadas para los hormigones H-30.

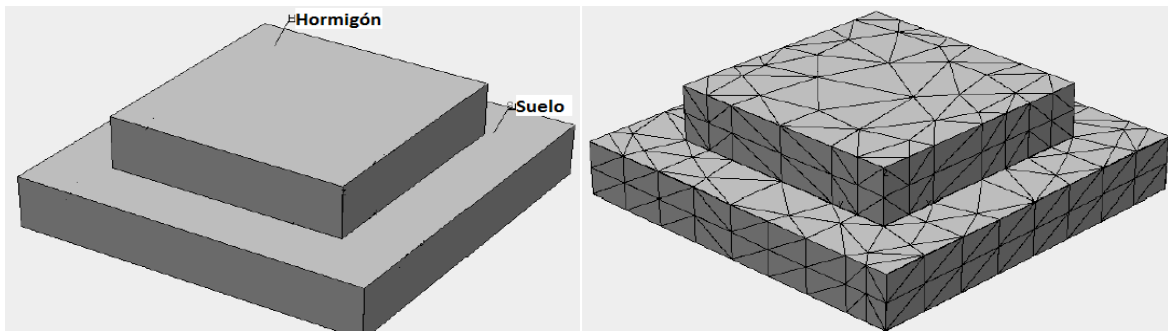


Figura 6: Estructura a simular, elegida a modo de ejemplo.

Tabla 3: Hipótesis adicionales tenidas en cuenta para las simulaciones.

	Parámetro	UM	Valor
Suelo	Temperatura inicial	°C	18
	Densidad	kg/m ³	1700
	Conductividad térmica	kJ/m/h/°C	6,0
	Calor específico	kJ/kg/°C	1,1
Hormigones	Temperatura inicial	°C	20
	Calor específico	kJ/kg/°C	1,0
	Conductividad térmica	kJ/m/h/°C	6,0
	Energía de activación	J/mol	33500 (CPN-CPP); 50000 (CAH)
Condiciones de Borde	Velocidad del Viento	m/s	0
	Temperatura ambiente	°C	18

Mediante el empleo del software Be4cast® para la estructura indicada, con cada mezcla, fueron determinados los campos de edad equivalente $M(x,y,z,t)$, temperatura $T(x,y,z,t)$, propiedades mecánicas $R(x,y,z,t)$ y matriz de tensiones $[T](x,y,z,t)$. Complementariamente, el programa calcula para cada punto, para cada instante, la máxima tensión principal $\sigma I(x,y,z,t)$, el autovalor más positivo o menos negativo de la matriz $[T]$, y el cociente Φ entre la resistencia a tracción $TST(x,y,z,t)$ y dicha magnitud, o sea:

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{\sigma I(x, y, z, t)}{TST(x, y, z, t)} \quad (7)$$

Nótese la magnitud Φ es un parámetro que en una primera aproximación (aunque en coherencia con las hipótesis adoptadas) resulta ser un indicador de la tendencia a la fisuración de una estructura de hormigón [2-4]. En la Tabla 4 se resumen los resultados importantes en cada caso, obtenidos de las simulaciones realizadas.

Tabla 4: Resumen de resultados de las simulaciones realizadas.

Parámetro	UM	H30 CPP s/H	H30 CPP c/H	H30 CAH s/H	H30 CAH c/H	H30 CPN s/H	H30 CPN c/H
T_{max}	[°C]	78,8	52,2	91,2	55,9	73,4	56,9
t_{Tmax}	[hs]	38	63	65	87	41	53
Φ_{max}	[-]	2,2	2,0	3,6	2,3	2,9	2,3
$t_{\Phi max}$	[hs]	23	57	39	56	37	64
σI_{max}	[MPa]	6,1	4,8	8,3	5,4	8,7	7,0
$t_{\sigma I max}$	[hs]	47	85	99	129	63	80

En la fila indicada con T_{max} , se muestran las máximas temperaturas pronosticadas para cada uno de los seis casos analizados, mientras que t_{Tmax} es el instante en el que esto ha de suceder. El valor máximo que toma la relación Φ_{max} (tensión principal/resistencia a tracción) y el correspondiente tiempo $t_{\Phi max}$ se muestran en las dos filas siguientes. Finalmente, en las dos últimas filas se muestran el valor máximo de la mayor tensión principal σI_{max} y su correspondiente tiempo $t_{\sigma I max}$. Notar que $t_{\Phi max}$ y $t_{\sigma I max}$ no coinciden, por cuanto el crecimiento de la máxima tensión principal σI y el de la resistencia a tracción TST no son a la misma velocidad.

Como era de esperar, en todos casos la introducción del aditivo hiperfluidificante disminuye el riesgo de fisuración térmica, en términos de Φ . Esto era esperable pues, a resistencia y trabajabilidad constantes, este producto no altera en forma tan relevante la evolución de las propiedades mecánicas, como sí disminuye notablemente la cantidad total de calor generada, por la fuerte reducción en el volumen de pasta a que da lugar. Esto último es reflejado en la notable disminución y retardo del pico de máxima temperatura. También el pico de las máximas tensiones principales se ve disminuido y retardado por esta misma causa. Al comparar los distintos cementos sin aditivo hiperfluidificante, surge que el hormigón con el CPP presenta el menor riesgo de fisuración, a pesar de que el pico más bajo de temperatura se espera en aquel con el CPN (como hubiera surgido de la Figura 4). Esto se atribuye a que, sin embargo, el hormigón con CPP presenta resistencias a tracción algo mayores y un módulo de elasticidad menor (lo a que su vez se explica por el mayor contenido de pasta), como lo muestra la Figura 5. Notar que el CAH, a pesar de cumplir con la condición “BCH”, exhibe un peor desempeño que el CPN, en este sentido. Al comparar los distintos cementos, ahora con el aditivo hiperfluidificante, se nota que el riesgo de fisuración se torna bastante parecido para todos los productos, al igual que el valor del pico de máxima temperatura.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, pueden obtenerse las siguientes conclusiones, válidas exclusivamente para el conjunto de materiales estudiados:

- De los cementos evaluados, el CPN genera rápidamente mayor cantidad de calor que los otros, especialmente a edades tempranas. El CPP30 desarrolla mucho menos calor que el anterior, pero rápidamente. El CAH genera calor a una velocidad mucho más lenta que los dos anteriores, pero a largas edades la cantidad acumulada resulta ser bastante grande. Esta tendencia se refleja en la evolución de las propiedades mecánicas.
- En cuanto a la demanda de pasta en hormigones, cuando no se emplean aditivos, el orden de menor a mayor para los cementos es CPN, CAH y, más lejos, CPP. Cuando se incluye el aditivo hiperfluidificante la demanda de pasta para todos los cementos disminuye notablemente, y tiende a asemejarse (aunque hay que tener en cuenta que la dosis empleada con el CPP es mayor que con los otros dos).
- En términos de resistencias a compresión a 28 días versus contenido de cemento, el orden del más eficiente al menos es CPN, CAH y CPP. Con el aditivo hiperfluidificante, la eficiencia mejora notablemente, pero la tendencia relativa se mantiene.
- En términos de elevación adiabática de temperatura a los 28 días versus resistencia a compresión a la misma edad, con el contenido de cemento que sea necesario en cada caso, se observa que cuando no se utiliza aditivo, el CPN resulta ser el más eficiente, y el CAH el menos (¡a pesar de cumplir holgadamente con la condición BCH!). Cuando se incorpora el aditivo hiperfluidificante, la eficiencia en este sentido aumenta notablemente, pero ahora el más eficiente pasa a ser el CPP y los menos, CPN y CAH. O sea, a resistencia y trabajabilidad constantes, el uso de cementos con la propiedad BCH no garantiza una menor elevación adiabática de temperatura. En general, cementos con menor calor de hidratación presentan un desempeño mecánico más pobre, por lo que, para un determinado nivel de resistencia especificada en hormigón, resulta necesario colocar más cantidad de este cemento (menos calor por unidad de masa, pero más masa). En cambio, un cemento con mayor calor de hidratación suele presentar un mejor desempeño mecánico, por lo que, para un determinado nivel de resistencia es necesario colocar menos cantidad de este cemento (más calor por unidad de masa, pero menos masa).
- No obstante, la elevación adiabática de temperatura no es el único parámetro que influye en la tendencia a fisuración térmica: las evoluciones de módulo de elasticidad y resistencia a tracción del hormigón deben ser tenidos en cuenta.
- Por lo descripto, ante el proyecto de un hormigón masivo estructural no resulta recomendable apuntar al uso de un cemento con la propiedad BCH. En cambio, sí se aconseja la realización de análisis de temperaturas y tensiones para determinar en ese caso particular qué juego de variables son más influyentes en el riesgo de fisuración térmica.

REFERENCIAS

- [1] Germann Instruments Inc., "4C Temp&Stress: Temperature and Stress Simulation During Hardening – User Manual", Evanston, (1998).
- [2] Spingenschmid R. (editor), "Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Introduction", Rilem Report 15. E & FN Spon. New York, (1998).
- [3] Germann Instruments Inc., "3D Simulation of temperatures and stresses in hardening concrete – User guide and example: Temperature and stress simulation during hardening – User manual", Evanston, (2008).
- [4] Corallo P, Ríos C, Acir A, Collura A, "Estudio de las variables que influyen en la tendencia a fisuración térmica de hormigones masivos estructurales", 18º Reunión Técnica AATH, Mar del Plata, Argentina, (2010).