

SENSIBILIDAD A LA FISURACIÓN POR COACCIONES TÉRMICAS Y RETRACCIÓN HIDRÁULICA A EDAD TEMPRANA EN TABIQUES DE HORMIGÓN

Zappitelli, M. Paula¹, Villa, Ignacio¹, Rocco, Claudio¹

¹Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Plata. Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina
paula.zappitelli@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: Modelos de elementos finitos, Análisis térmicos, hormigón, fisuración por contracción

1. INTRODUCCIÓN

En las obras hidráulicas destinadas a la contención o transporte de aguas, tales como son las plantas de tratamiento, estaciones de bombeo y conductos, un requisito muy importante es poder asegurar que los elementos estructurales que componen la obra cumplan con ciertos requisitos de estanqueidad y de durabilidad establecidos en los reglamentos de diseño y los estipulados por el proyectista [1].

En el caso particular de estructuras de hormigón armado el cumplimiento de tales requisitos conlleva a la necesidad de tener que asegurar la impermeabilidad de las juntas y fijar ciertos límites a la fisuración del hormigón. En relación con este último aspecto es muy común que no se admitan anchos de fisura mayores que 0,1 mm o 0,2 mm dependiendo del tirante hidráulico y del espesor de la estructura [2]. Atendiendo a estas limitaciones es importante que a nivel del proyecto ejecutivo se realicen análisis de fisuración que no solo incluyan a las sollicitaciones impuestas por las cargas externas sino también las originadas por las coacciones térmicas debidas al calor de hidratación del cemento y la retracción hidráulica del hormigón [2,3].

Atendiendo a esta necesidad en el presente trabajo se presenta un análisis numérico, aplicando el Método de los Elementos Finitos, con el objetivo de estudiar la sensibilidad a la fisuración a edad temprana debida al calor de hidratación del cemento y la contracción autógena en tabiques de hormigón. Los resultados de las simulaciones realizadas permiten cuantificar la influencia que el tipo de cemento, tipo de encofrado y época de hormigonado tienen sobre los requerimientos de armadura mínima necesaria para poder garantizar determinados anchos de fisura. Para la simulación se han tenido en cuenta las condiciones ambientales típicas imperantes en CABA y zona de influencia.

3. PROBLEMA ANALIZADO

En el presente trabajo se modeló la evolución de temperatura a edad temprana en un tabique de hormigón de 20 cm de espesor sometido a la acción del calor de hidratación del cemento. Se consideraron tres tipos de cemento: cemento portland compuesto (CPC40), cemento portland normal (CPN40) y cemento de alto horno (CAH40). A su vez se adoptaron invierno y verano como épocas de hormigonado y se modelaron encofrados metálicos y fenólicos. Como condiciones ambientales se consideró la fluctuación de la temperatura diaria en períodos de 24 horas, adoptando máximos y mínimos representativos correspondientes con la época de hormigonado. En la Tabla 1 se resumen los doce casos analizados.

El análisis térmico aplicando el Método de los Elementos Finitos se llevó a cabo en el código Abaqus/Standard [4] empleando un modelo bidimensional de 2400 elementos tipo DC2D4 (elementos de transferencia de calor cuadriláteros de cuatro nodos).

Se consideró como edad de desencofrado 3 días y el tiempo total de análisis fue de 30 días. El coeficiente de convección con el aire utilizado fue $2.5e^{-9}$ Kcal/mm²°C.

Para la determinación del área de armadura para el control de fisuración se emplearon las ecuaciones indicadas en el reglamento CIRIA C660 [2]. Se consideró al tabique fundado sobre

una losa de hormigón pre-existente de 60 cm de espesor, ver Figura 1. En esta figura también se indican los puntos en los cuales se obtuvo la evolución de la temperatura en el tiempo en el modelo numérico. Uno de los puntos está ubicado en el centro del tabique y el otro a la misma altura, pero en la superficie exterior.

Además, se adoptó un valor de contracción autógena ($\varepsilon_{\text{autógena}}$) de $18e^{-6}$ y una capacidad de deformación en tracción del hormigón (ε_{ctu}) de $75e^{-6}$, que según [2] corresponde a un hormigón tipo H35 de uso típico en estructuras hidráulicas.

Se adoptó $1e^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$ como coeficiente de expansión térmica, un recubrimiento de 3 cm y un diámetro de barra de acero de 2 cm.

Para los cálculos de armadura se consideró un ancho máximo de fisura de 0.015 cm (w_{k1}), el cual representa un valor límite al considerarse un tabique delgado como el presentado en este trabajo.

Tabla 1. Casos analizados

Caso	Tipo de cemento	Tipo de encofrado	Época de hormigonado
1	CPC40	Fenólico	Invierno
2	CPC40	Fenólico	Verano
3	CPC40	Metálico	Invierno
4	CPC40	Metálico	Verano
5	CPN40	Fenólico	Invierno
6	CPN40	Fenólico	Verano
7	CPN40	Metálico	Invierno
8	CPN40	Metálico	Verano
9	CAH40	Fenólico	Invierno
10	CAH40	Fenólico	Verano wider></td
11	CAH40	Metálico	Invierno
12	CAH40	Metálico	Verano

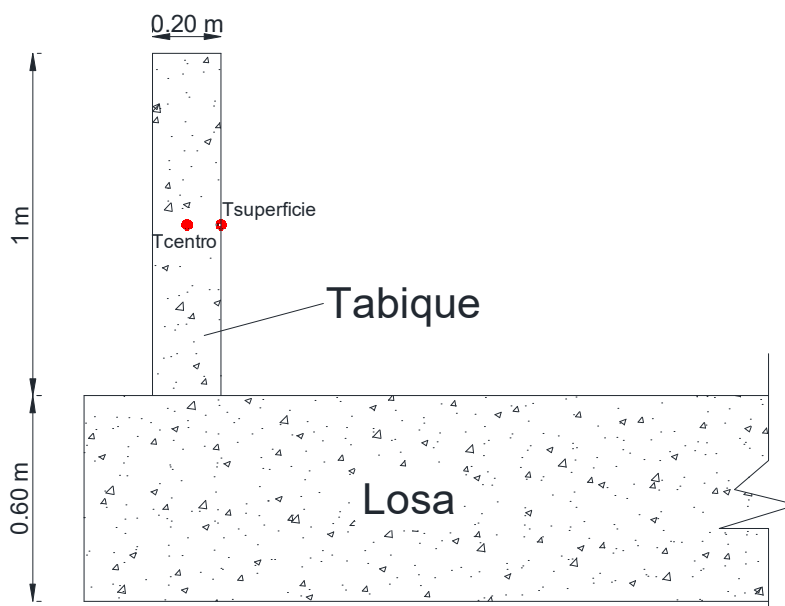


Figura 1. Geometría del tabique analizado

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 2 y 3 se presenta, para los tres cementos empleados, ambas épocas de hormigonado y encofrado fenólico y metálico, la evolución de temperatura en el centro del tabique en los primeros 6 días. Ver Tabla 1 para referencia de los casos presentados.

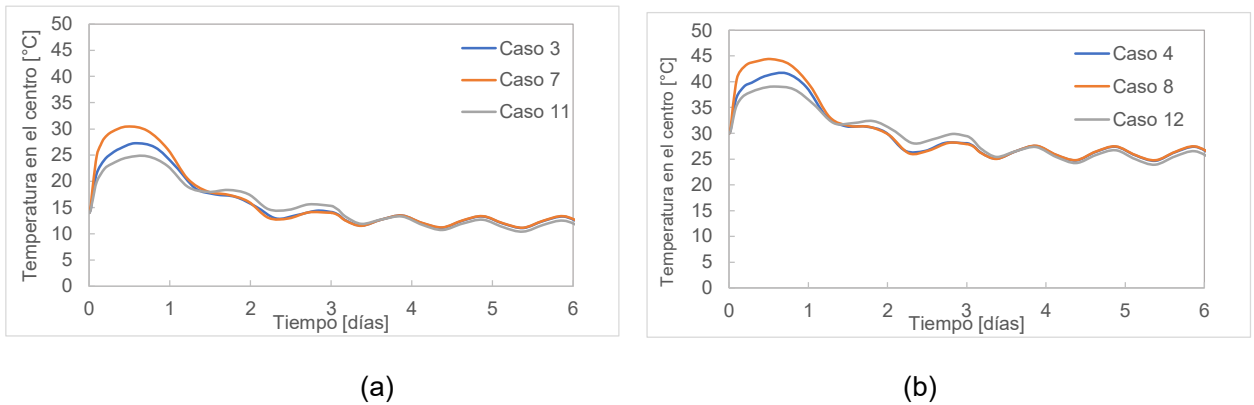


Figura 2. (a) Evolución en el tiempo de la temperatura en el centro del tabique. Encofrado fenólico-Invierno. (b) Evolución en el tiempo de la temperatura en el centro del tabique. Encofrado fenólico-Verano

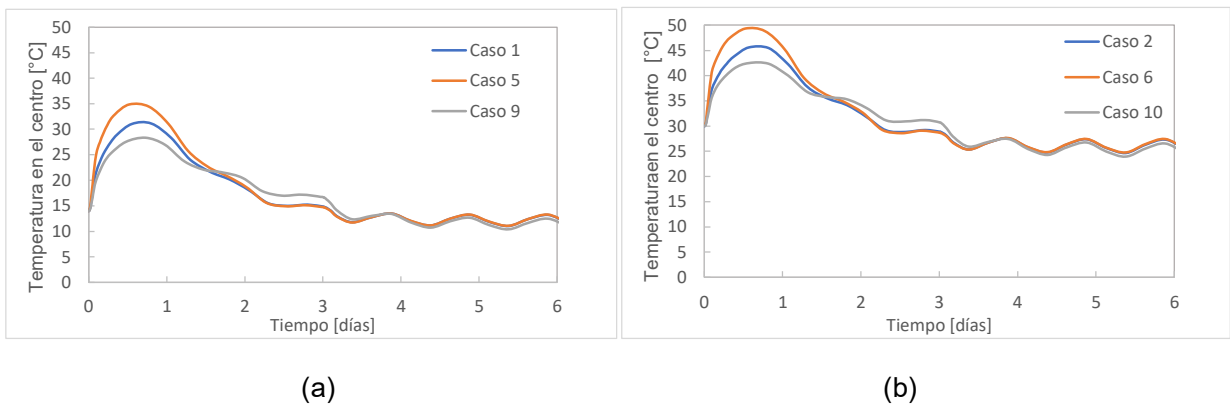


Figura 3. (a) Evolución en el tiempo de la temperatura en el centro del tabique. Encofrado metálico-Invierno. (b) Evolución en el tiempo de la temperatura en el centro del tabique. Encofrado metálico-Verano

En las Figuras 4 y 5 se comparan, para los tres cementos empleados, ambas épocas de hormigonado y encofrado fenólico y metálico, las diferencias de temperatura entre el centro del tabique y la superficie (ΔT). Ver Tabla 1 para referencia de los casos presentados.

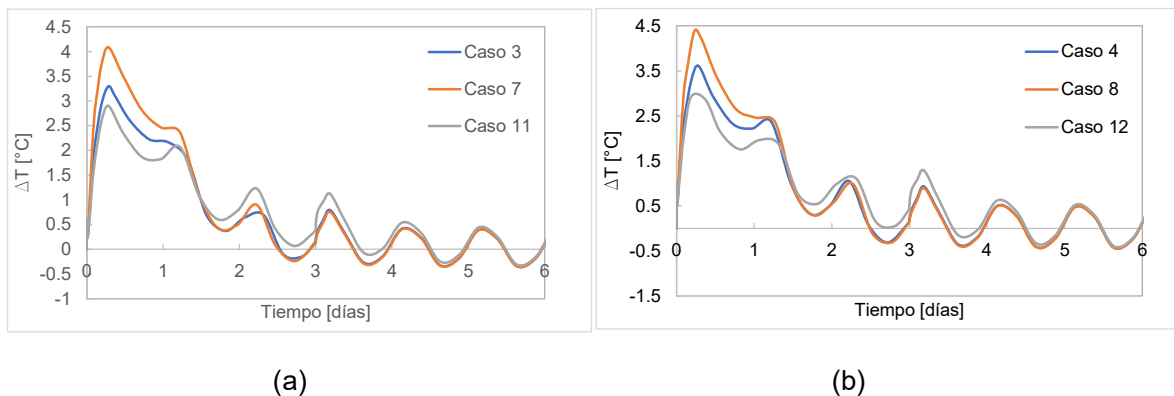


Figura 4. (a) Evolución en el tiempo de ΔT . Encofrado fenólico-Invierno. (b) Evolución en el tiempo de ΔT . Encofrado fenólico-Verano

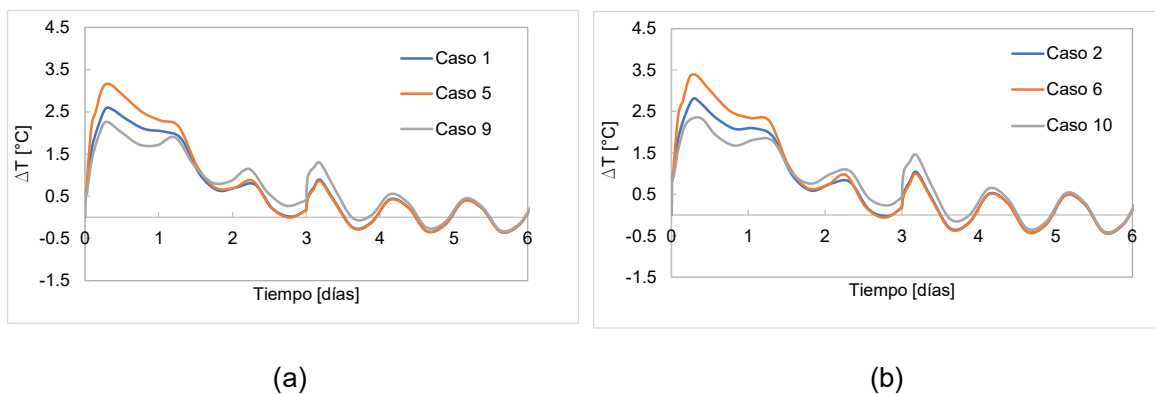


Figura 5. (a) Evolución en el tiempo de ΔT . Encofrado metálico-Invierno. (b) Evolución en el tiempo de ΔT . Encofrado metálico-Verano

Finalmente, en la Figura 5 se graficaron, para el cemento CPN40, la evolución en el tiempo de la temperatura en el centro del tabique y el ΔT , respectivamente, considerando los distintos tipos de encofrados y épocas de hormigonado.

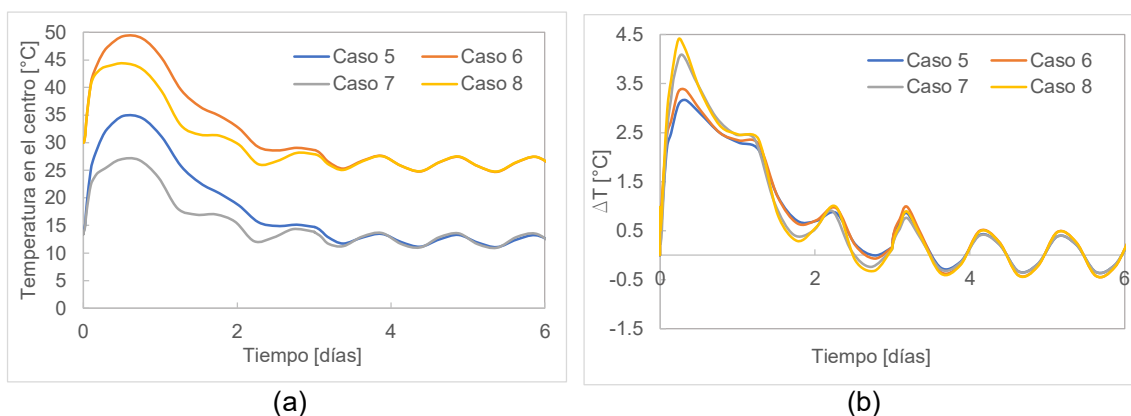


Figura 6. (a) Evolución en el tiempo de la temperatura en el centro del tabique. Encofrado metálico-fenólico-Invierno-Verano. (b) Evolución en el tiempo de ΔT . Encofrado metálico-fenólico-Invierno-Verano

En la Tabla 2 se presenta el resumen de los valores máximos de la temperatura en el centro del tabique ($T_{\text{centro máx}}$) y de $\Delta T_{\text{máx}}$, informando las edades en que ocurren cada uno de ellos. A su vez se indica el valor de T_1 , el cual corresponde a la diferencia entre la temperatura máxima en el centro del tabique y la correspondiente a la edad de estabilización, en este caso, 10 días. Este valor se utilizará en el cálculo de la sección de armadura.

Tabla 2. Valores máximos de la temperatura en el centro del tabique, ΔT y sus respectivas edades

Caso	T centro máx	ΔT máx	Edad T centro Máx	Edad ΔT máx	T1
	[°C]	[°C]	[días]	[días]	[°C]
1	31.15	2.57	0.8	0.28	19.24
2	45.6	2.81	0.57	0.28	19.9
3	27.26	3.3	0.57	0.28	15.33
4	41.61	3.61	0.72	0.28	15.87
5	34.85	3.16	0.52	0.33	22.9
6	49.32	3.36	0.52	0.33	23.55
7	30.46	4.09	0.47	0.28	18.45
8	44.38	4.4	0.52	0.24	18.56
9	28.3	2.26	0.72	0.29	17.1
10	42.5	2.34	0.57	0.38	17.53
11	24.8	2.9	0.72	0.28	13.58
12	39.05	2.92	0.57	0.19	14.11

Finalmente, en la Tabla 3 se presenta el cálculo de la armadura mínima necesaria para garantizar el ancho de fisura w_{k1} .

Tabla 3. Cálculo de la armadura mínima

Caso	T ₁	ε_r	$\varepsilon_r \geq \varepsilon_{ch}$	ε_{cr}	As wk1	Separación
	[°C]	[-]	[-]	[-]	[cm ² /m]	[cm]
1	19.24	1.71E-04	Ok	1.33E-04	7.18	28
2	19.9	1.76E-04	Ok	1.38E-04	7.50	27
3	15.33	1.39E-04	Ok	1.01E-04	5.35	38
4	15.87	1.43E-04	Ok	1.06E-04	5.60	36
5	22.9	2.00E-04	Ok	1.63E-04	8.99	22
6	23.55	2.06E-04	Ok	1.68E-04	9.31	22
7	18.45	1.64E-04	Ok	1.27E-04	6.81	30
8	18.56	1.65E-04	Ok	1.28E-04	6.86	29
9	17.1	1.53E-04	Ok	1.16E-04	6.17	33
10	17.53	1.57E-04	Ok	1.19E-04	6.37	32
11	13.58	1.25E-04	Ok	8.72E-05	4.55	44
12	14.11	1.29E-04	Ok	9.15E-05	4.79	42

Del análisis comparativo de las figuras 2 y 3 a y b se puede observar que, tanto en verano como en invierno, los mayores niveles de temperatura en el hormigón del tabique se alcanzaron con el empleo de encofrado fenólico y de cemento portland normal CPN, resultando esta la condición más desfavorable desde el punto de vista del riesgo de fisuración

temprana por gradiente de masa (ver T1 en Tabla 2). En estos casos se alcanzaron temperaturas máximas que dependiendo de la época de hormigonado y tipo de encofrado llegaron a valores comprendidos entre 34.85°C en invierno y de 49,3 °C en verano. Respecto a la edad a la que se alcanzan las mayores temperaturas se observa que las mismas ocurren antes de las primeras 24 horas. En este sentido resulta de interés poder adoptar medidas que permitan disipar calor dentro de este periodo. Regar los encofrados con agua fría y proteger la estructura de la acción directa del sol son medidas que permiten bajar las temperaturas máximas en el hormigón de estructuras delgadas como la estudiada.

Con el objeto de poder analizar el efecto de la época de hormigonado respecto del riesgo de fisuración por coacciones térmicas debido al gradiente de masa resulta de interés observar los valores del salto térmico T1. En este caso los resultados obtenidos con la modelación muestran que, si bien los valores alcanzados en verano son ligeramente mayores que en invierno, las diferencias producidas no resultan importantes. Por lo tanto, se puede concluir que para el elemento estructural analizado la época de hormigonado no constituye un factor relevante respecto del riesgo de fisuración por restricción externa. Otro factor importante a tener en cuenta es que la magnitud del salto térmico T1, considerando todos los casos analizados, estuvo comprendido dentro de un rango de 13 a 24 grados que son valores que implican una carga térmica calificable entre baja y moderada.

Respecto a las diferencias de temperatura entre el centro y la superficie del tabique, las curvas de las Figuras 4 y 5 a y b, y los resultados volcados en la Tabla 2 muestran que las máximas diferencias de temperatura se producen cuando se emplea encofrado metálico y cemento portland normal. De los casos analizados esta situación resulta la mas desfavorable frente a fenómenos de fisuración por gradiente de superficie. No obstante, cabe indicarse que debido al bajo espesor que presenta la estructura modelada la magnitud de las diferencias de temperatura obtenidas fueron poco relevantes como factor de riesgo para la fisuración.

En la Tabla 3 se presenta el cálculo de armadura mínima para garantizar un ancho de fisura wk1 de 0.15 mm, valor que se asume como admisible en estructuras hidráulicas de bajo espesor. Se puede ver que los requerimientos de armadura mínima son mayores para los casos en los que se emplea encofrado fenólico y cemento CPN40, tanto en hormigonado en invierno como en verano. Esto se corresponde con el análisis realizado respecto de las temperaturas.

5. CONCLUSIONES

En base a la estructura propuesta y los casos analizados en el presente trabajo puede concluirse que:

- El mecanismo de fisuración para una estructura de espesor delgado, como el tabique analizado, lo constituye el gradiente de masa, representado a través de T1.
- El caso más desfavorable ocurre al considerar el cemento CPN junto con encofrado fenólico. La época de hormigonado no presenta una influencia significativa en los resultados obtenidos.
- La cuantía de armadura necesaria para el control de fisuración, considerando el ancho de fisura propuesto (0.15 mm), es baja.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACI Committee 224, Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01), American Concrete Institute, 2001.
- [2] CIRIA-660. Early-age thermal crack control in concrete. CIRIA, 2007.

[3] Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B. y Panarese, W. C. Design and Control of Concrete Mixtures. Portland Cement Association, 2002.

[4] ABAQUS. ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume II: Analysis. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013.