

EVALUACIÓN DEL GRADIENTE TÉRMICO EN HORMIGONADO MASIVO A EDADES TEMPRANAS

EVALUATION OF THERMAL GRADIENT IN EARLY AGE OF MASS CONCRETE

María Inés Montanaro^a, David Díaz Maimone^a y María Haydée Peralta^a

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Av. Del valle 5737, 7400 Olavarría, Argentina, mperalta@fio.unicen.edu.ar. <http://www.fio.unicen.edu.ar>

Palabras clave: hormigón masivo, calor de hidratación, temperatura

Resumen. En hormigonados de grandes volúmenes, a edades tempranas, la masa de hormigón experimentará cambios volumétricos, debido a un incremento de la temperatura que diferirá punto a punto seguida de un posterior enfriamiento, que son necesarios controlar para minimizar la fisuración. Los parámetros que influyen la generación de calor y consecuentes tensiones se relacionan con la dosificación del hormigón, la geometría y dimensiones de la estructura, colocación, compactación y curado, condiciones ambientales. El estudio de la generación de calor de hidratación y tensiones involucradas permite planificar las tareas de hormigonado El CIRSOC 201, que define como hormigón masivo aquel cuya mínima dimensión excede 75 cm, establece los límites para el caso de hormigonado masivo de la temperatura de hormigón fresco y del gradiente térmico máximo admisible entre los puntos de máxima y mínima temperatura. Asimismo establece la necesidad de colocar la armadura necesaria para tomar las tensiones origen térmico que surjan de estudios realizados al efecto. La solución analítica para los campos de temperatura es muy compleja por lo que la solución numérica surge como una herramienta valiosa para el análisis del problema. En el presente trabajo se estudia numéricamente el perfil térmico a edades tempranas de una losa de 4.00 m x 7.00 m x 0.80 m correspondiente a la losa reactiva de fundación del marco de carga del Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UNICEN, considerando la representación de la curva de generación de calor a partir de la resolución de la correspondiente ecuación diferencial del calor. Los resultados obtenidos se comparan con los experimentales logrados, mediante la instrumentación con termocuplas, en la etapa de hormigonado de la losa. El desarrollo permitió el ajuste del modelo y establecer pautas para el análisis de otras obras de hormigonado masivo.

Keywords: massive concrete, heat of hydration, temperature.

Abstract. In large volume concretes, at early ages, the concrete mass will undergo volumetric changes, due to an increase in temperature that will differ point-to-point followed by subsequent cooling, which must be controlled to minimize cracking. The parameters that influence the generation of heat and consequent stresses are related to the dosage of the concrete, the geometry and dimensions of the structure, placement, compaction and curing, environmental conditions. The study of the generation of heat of hydration and stresses involved allows to plan the tasks of concreting The CIRSOC 201, which defines as massive concrete that whose minimum dimension exceeds 75 cm, establishes the limits for the case of mass concrete of the concrete temperature cool and the maximum permissible thermal gradient between the maximum and minimum temperature points. It also establishes the need to place the necessary reinforcement to take the thermal origin stresses that arise from studies carried out for this purpose. The analytical solution for the temperature fields is very complex, so the numerical solution emerges as a valuable tool for the analysis of the problem. In the present work, the thermal profile at an early age of a slab of 4.00 m x 7.00 m x 0.80 m is studied numerically, corresponding to the reactive slab of foundation of the load frame of the Structures Laboratory of the Engineering Faculty of UNICEN, considering the representation of the heat generation curve from the resolution of the corresponding heat differential equation. The results obtained are compared with the experimental ones obtained, by means of instrumentation with thermocouples, in the concreting stage of the slab. The developments allowed the adjustment of the model and establish guidelines for the analysis of other massive concreting works.

1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento térmico caracteriza y diferencia al hormigón masivo respecto de un hormigón no masivo. En el caso del hormigón masivo el calor de hidratación generado se disipa lentamente lo cual produce elevadas temperaturas en la masa de hormigón (Soo Geun Kim, 2010). Dado que la superficie de los elementos se encuentra a temperatura ambiente se origina un significativo gradiente térmico entre el interior y la superficie expuesta. Esto debe tenerse en cuenta en el proceso que incluye selección de materiales, dosificación de la mezcla, transporte, colocación, compactación y curado para que no se produzcan tensiones y consecuentes fisuraciones indeseadas.

El desarrollo de las temperaturas depende, fundamentalmente, de los siguientes factores: dimensiones y geometría de la estructura; propiedades térmicas del hormigón joven (calor de hidratación, conductividad, calor específico); condiciones de hormigonado (temperatura de puesta en obra, tipo de encofrado, forma de colocación, protección, enfriamiento), condiciones ambientales (temperatura del aire, radiación solar, temperatura de las estructuras adyacentes) (Neville, 1998).

Se puede lograr una reducción en la generación del calor interno, y por ende en la temperatura interna de la masa del hormigón mediante el uso en la mezcla de contenidos bajos de cemento; la sustitución de parte del cemento por material puzolánico; el uso de cementos especiales de bajo calor de hidratación.

El Reglamento Argentino de estructuras de Hormigón (CIRSOC 201, 2005) propone que la temperatura máxima del hormigón masivo inmediatamente después de su colocación debe ser la que surja de los estudios térmicos realizados para el diseño de la estructura y deberá constar en los Documentos del Proyecto. Estos estudios térmicos además de permitir predecir la temperatura máxima permiten predecir el gradiente térmico el cual no debería superar 20 o 25 °C, según las normas. Caso contrario deberán colocarse los refuerzos de armaduras que determine el análisis correspondiente para evitar comportamientos indeseados.

La solución analítica para los campos de temperatura es muy compleja por lo que la solución numérica surge como una herramienta valiosa para el análisis del problema. En el presente trabajo se estudia numéricamente el perfil térmico a edades tempranas la losa reactiva correspondiente al marco de carga del Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UNICEN, considerando la representación de la curva de generación de calor a partir de la resolución de la correspondiente ecuación diferencial del calor.

2 CASO DE ESTUDIO

En el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UNICEN se construyó una losa reactiva de hormigón de 4.00 m x 7.00 m y de 0.80 m de espesor para la instalación de un marco de carga de 20 t de capacidad, Figura 1. La calidad del hormigón especificada es H25 y la armadura de la losa fue 1 Ø 16 c/15 cm en ambas direcciones superior e inferior. Se colocaron insertos para la posterior colocación del marco de carga, según se indica en Figura 2. De acuerdo a la reglamentación vigente en Argentina, la obra se encuadra en hormigón masivo lo cual fue aprovechado para la evaluación experimental del gradiente térmico a edades tempranas para la posterior calibración de los modelos y contrastación de resultados en el análisis numérico.

Se evaluó, de acuerdo a la dosificación propuesta por el contratista, la temperatura máxima del hormigón fresco de acuerdo a la expresión dada por (Neville, 1998). La predicción teórica fue de 64 grados. La dosificación propuesta por el contratista contempló las recomendaciones reglamentarias con vistas a acotar la generación de calor de hidratación. Complementariamente, se analizaron 2 propuestas de dosificación que contemplaron la

disminución del contenido unitario de cemento a partir del aumento del tamaño máximo del agregado en un caso y la incorporación de aditivos reductores de agua en el segundo caso a efectos de no disminuir la resistencia. Se obtuvieron temperaturas de 62.4 y 59.5 °C respectivamente. No obstante la disminución de temperatura obtenida con las alternativas se consideró la dosificación del contratista teniendo en cuenta que las predicciones teóricas, según la experiencia, sobreestiman la temperatura máxima.



Figura 1: Marco de carga



Figura 2: Armaduras e insertos en losa

3 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

A efectos de realizar el monitoreo de las temperaturas en la masa del hormigón durante la etapa de construcción se insertaron termoclas adheridas a la armadura e insertos de la losa (Telechea, 2002), Figura 3 y conectadas a un adquisidor de datos disponible en el Área de Electrónica de la facultad. Los registros se tomaron en los puntos A, B y C dispuestos según lo indicado en los cortes de la Figura 4.



Figura 3: Termoclas adheridas a los insertos

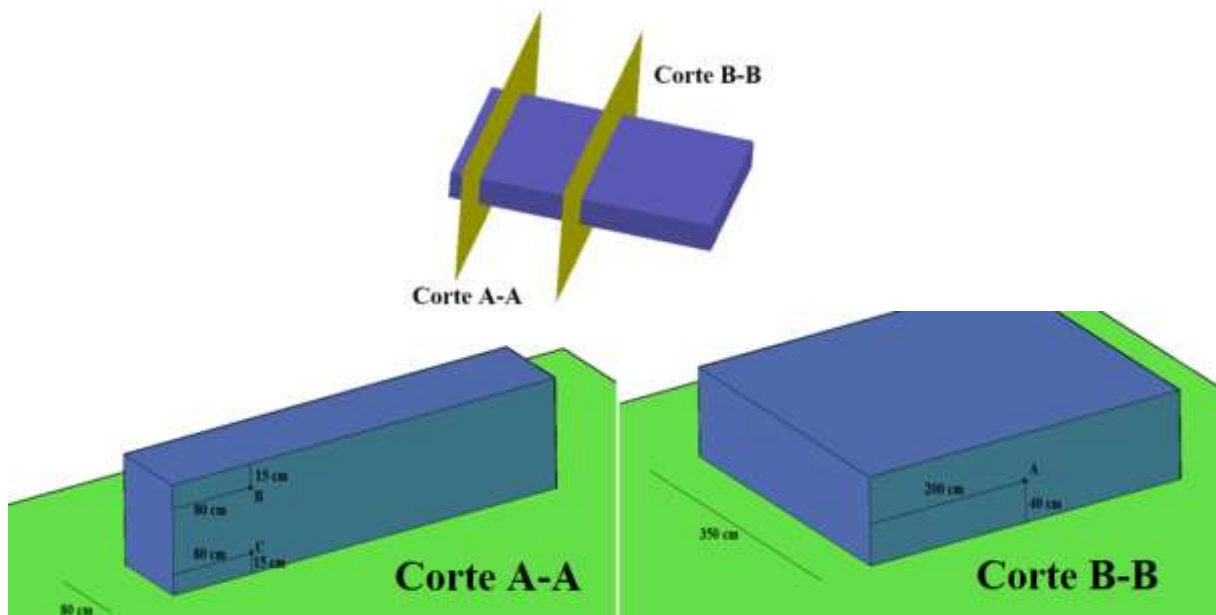


Figura 4: Ubicación de las termocuplas

Los registros experimentales obtenidos a partir de la instrumentación con termocuplas indicadas correspondientes a punto A(sensor 8), B(sensor 4), C(sensor 3) y temperatura ambiente (sensor 0) se indican en **Figura 5** y con más detalle en el ítem 4.

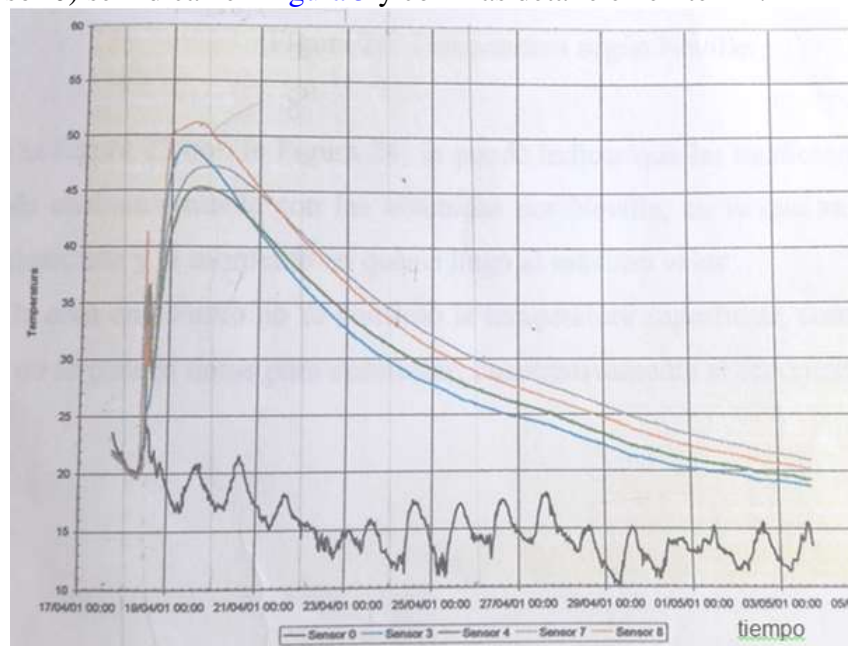


Figura 5: Registros de termocuplas y temperatura ambiente

4 EVALUACIÓN NUMÉRICA

La solución analítica para los campos de temperatura es muy compleja por lo que la solución numérica surge como una herramienta valiosa para las predicciones que permitan la planificación de las tareas de hormigonado con control del incremento térmico y por lo tanto el control de la fisuración. Se analiza por la vía numérica el perfil térmico a edades tempranas de la losa reactiva del marco de carga del Laboratorio de Estructuras indicada precedentemente.

4.1 Modelo Numérico

Se consideró el modelo geométrico indicado en [Figura 6](#). Por un lado se modeló la losa o losa de fundación y por otro lado el suelo sobre el que se apoyó la misma considerando dimensiones acordes a condiciones de borde infinitas. El tipo de elemento adoptado para cada una de las partes es de tipo “Brick”, con material isotrópico.

Se está frente a un problema transitorio o de estado no estacionario para el cual se predice la respuesta temporal de la temperatura que interviene en el proceso de transferencia de calor. Se modelaron las primeras 120 horas. Se considera la representación de la curva de generación de calor a partir de la resolución de la correspondiente ecuación diferencial del calor. Los resultados obtenidos se comparan con los experimentales. Las características del hormigón y suelo usados en la simulación se encuentran en la [Tabla 1](#).

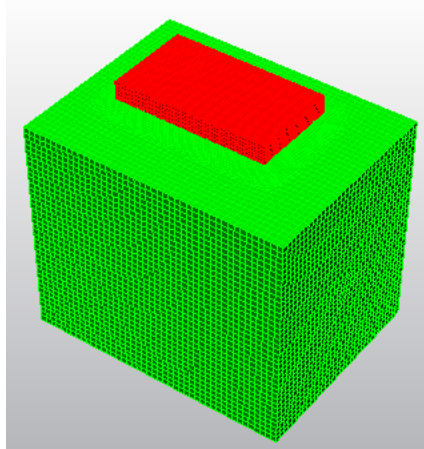


Figura 6: Modelo de elementos finitos

	Hormigón	Suelo
Conductividad térmica (J/h*m*°C)	7920	6120
Calor específico(j/Kg*°C)	1020	1100
Densidad de masa (kg/m ³)	2399	1700

Tabla 1: Características del hormigón y suelo

Se efectuó la optimización del mallado, considerando finalmente el modelo con 12644 elementos y 123877 nodos. Se utilizó para el análisis de los modelos el [Software Algor 22](#).

Las condiciones de borde son de tipo térmico. A la losa se le aplica la curva de calor generada por el calor de hidratación en edades tempranas. El hormigón producido en planta posee una temperatura de 22°, este mismo valor se aplica como temperatura inicial de la losa. La temperatura inicial del suelo se estima en 20°. Las cargas de convección del suelo al aire y de la losa curada en edad temprana son 25200 J/(hr*m²*°C) y 50241 J/(hr*m²*°C) respectivamente.

Para modelar la generación de calor producida por la hidratación del cemento en el hormigón se usó la formulación de Rastrup ([Calmon Nogueira da Gama,1995](#)) que usa una temperatura equivalente, ver Ec. (1).

$$t_e = \int_0^T 2 * \frac{(T - T_a)}{10} * dt \quad (1)$$

Siendo T la temperatura adiabática del hormigón y Ta es la temperatura uniforme de referencia. Y la cantidad de calor generado interno por unidad de volumen (w/m³), Ec. 2, es:

$$\dot{q} = C * n * b * (t_e)^{-n-1} * E * e^{(-b*(t_e)^{-n})^{2+\frac{(T-T_A)}{10}}} \tag{2}$$

Donde C es el contenido de cemento por m³ de hormigón, E, n y b son parámetros que dependen del tipo de cemento. Para esta simulación se adoptaron los valores de C=275 E = 93.3, n=0.35 y b=3.5. En la Figura 7 se grafica la curva cargada en la simulación numérica.

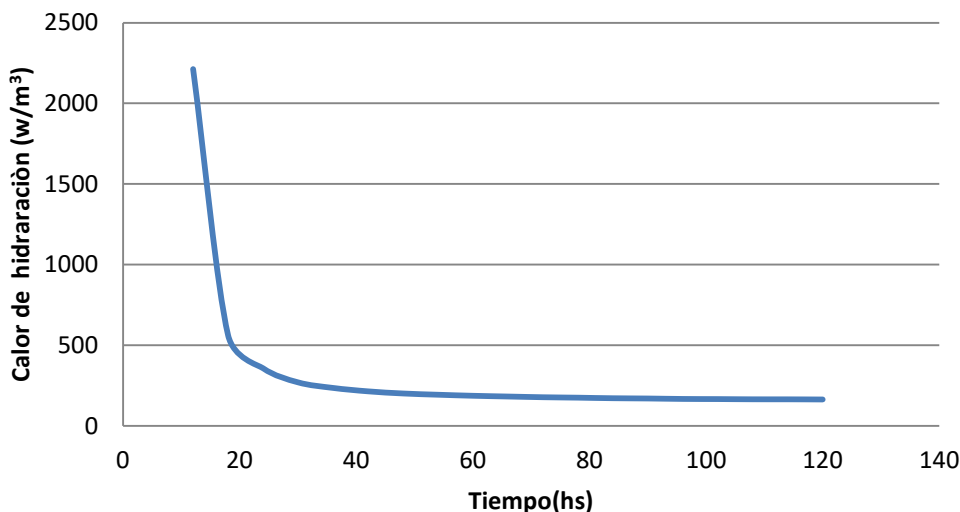


Figura 7: Curva de calor generado

5 RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Evolución de temperaturas

En la Figura 8 se muestra la evolución de la temperatura obtenida por vía experimental y numérica para el nodo central A (sensor 8) durante las 120 horas simuladas.

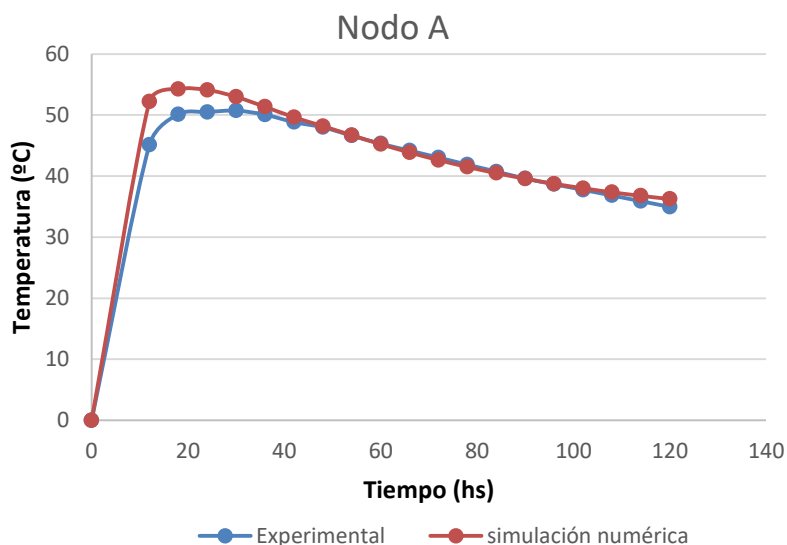


Figura 8: Evolución de temperatura en el nodo A

En la Figura 9 se muestra la evolución de la temperatura obtenida por vía experimental y numérica para el nodo central B (sensor 4) durante las 120 horas simuladas.

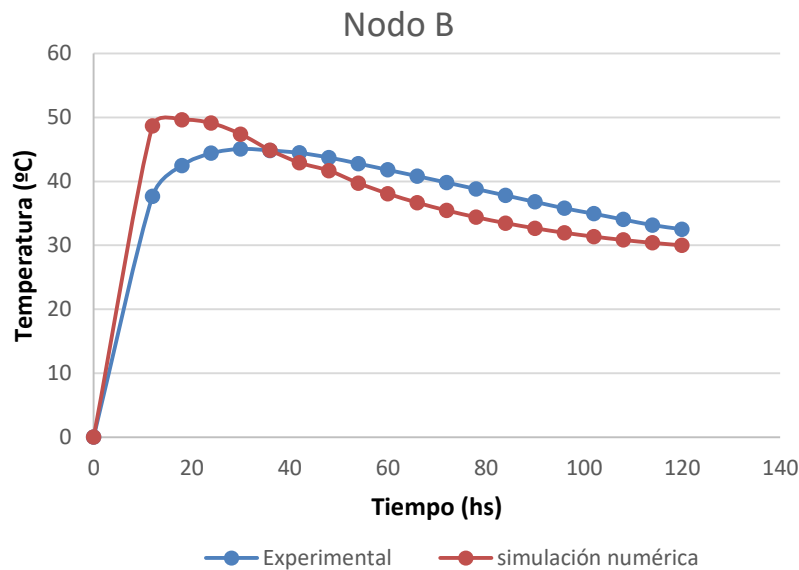


Figura 9: Evolución de temperatura nodo B

Para visualizar las diferencias de comportamiento entre los nodos B y C se representan, en Figura 10, la evolución térmica correspondiente a ambos puntos.

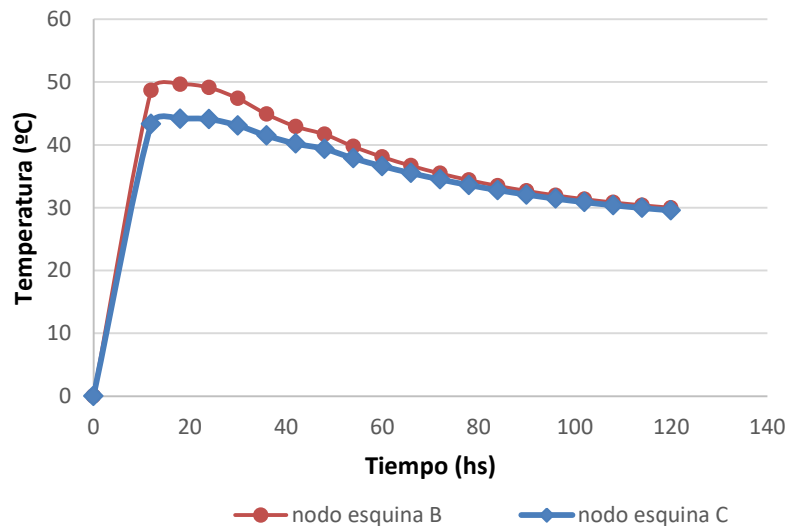


Figura 10: Evolución de temperaturas en nodos B y C

5.2 Perfiles Térmicos

A continuación, se presentan los perfiles térmicos, obtenidos numéricamente, en el corte B-B de la platea. Se representan los mismos para los tiempos $t=0$, $t=1h$, $t=12$ hs, el tiempo correspondiente a la temperatura pico $t=18$ hs y el tiempo final $t=120$ hs del análisis en Figura 11. Las condiciones iniciales (tiempo inicial), son las condiciones de borde consideradas en el modelo: la temperatura en el hormigón fresco y las condiciones del suelo. Las siguientes imágenes muestran la evolución de la temperatura hasta llegar al pico de $54,24^{\circ}\text{C}$ a las 18 hs de llenado. Como era de esperar, la generación de calor es intensa en el centro de masa y

menor en los bordes debido a la disipación por convección y conducción. Dichas temperaturas que se van disipando hasta llegar a los 36.25°C a las 120 hs desde el llenado.

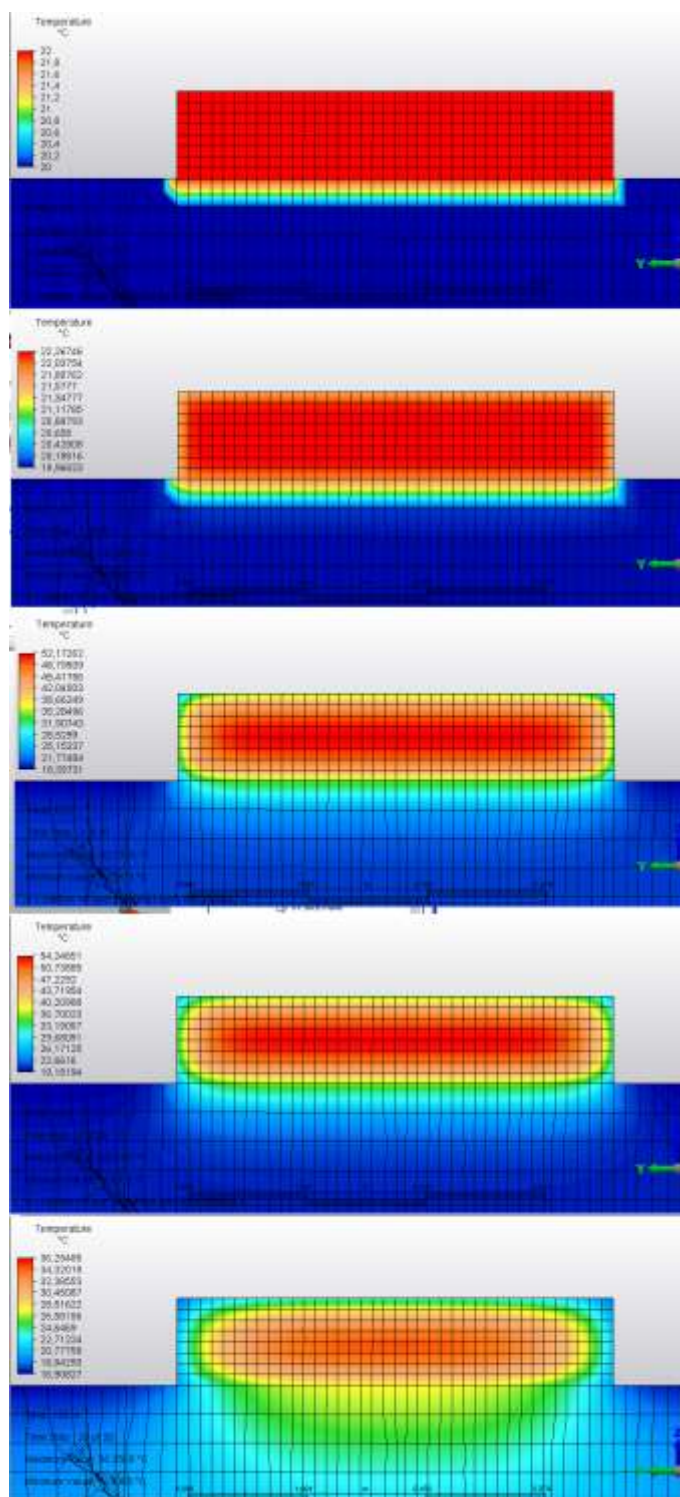


Figura 11: Perfiles térmicos para t=0, t=1, t=12 y t= 18 y t= 120 hs en el corte B-B.

Los resultados obtenidos numéricamente presentan una buena correlación con los obtenidos experimentalmente.

Los perfiles térmicos permiten evaluar los máximos gradiente térmicos que corresponden a $t=18$ hs. El gradiente térmico máximo obtenido se encuentra por debajo de 20 °C. Cabe acotar que si el gradiente térmico no fuera adecuado podría tomarse medidas en la dosificación, en la colocación y/o en el diseño de armadura resistente adecuada para tomar las tensiones que podrían provocar fisuración en el hormigón.

6 CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo permite contrastar los modelos numéricos con los datos experimentales.

Los modelos de análisis adoptados fueron adecuados, tanto desde el punto de vista geométrico, como de las condiciones de borde y fundamentalmente de la curva de calor de hidratación considerada.

En el caso analizado los gradientes de temperaturas se mantienen en rangos admisibles, no obstante ello se dispone de armadura resistente obtenida del diseño estático que contribuiría en caso que así no fuera.

Se demuestra la validez de vía numérica para evaluar la evolución de las temperaturas y perfiles térmicos en hormigones masivos a través de un caso de estudio sencillo. Esto adquiere relevancia al momento de planificar hormigonados de estas características.

REFERENCIAS

ALGOR 22. Profesional Mech/VE. Docutech, linear stress and dynamics, reference Division. Pittsburg, Pennsylvania, 2009.

Calmon Nogueira da Gamma, Joao Luiz, Estudio paramétrico de bloques masivos de hormigón en presas, Tesis doctoral, Universitat politécnica de Catalunya, España, 1995.

CIRSOC 201 “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón” INTI-CIRSOC, 2005

Neville “Tecnología del Concreto” Ed. Trillas, 1998

Soo Geun Kim “Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement” Iowa State University, Digital Repository, 2010

Telechea, Juan Manuel; Hormigón masivo, control de Ejecución de losa del Laboratorio de estructuras. Biblioteca Facultad de Ingeniería, UNCPBA, I-CIV T274, 2002