

ANÁLISIS TÉRMICO DE BLOQUES DE HORMIGÓN MASIVO UTILIZANDO UN MODELO EN DIFERENCIAS FINITAS

THERMAL ANALYSIS OF MASS CONCRETE BLOCK USING A FINITE DIFFERENCE MODEL

Luisa R. Vargas^a, Carlos M. Albarracín^a y María V. Quintana^b

^aFacultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia, 4400 Salta, Argentina,
<http://www.ing.unsa.edu.ar>

^bINIQUI- CONICET, Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, 4400
Salta, Argentina, vquintana@unsa.edu.ar

Palabras clave: Hormigón Masivo, Análisis Térmico, Diferencias Finitas.

Resumen. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo numérico que permita simular la distribución de temperatura en bloque de hormigón masivo y su variación en el tiempo. Se considera que un hormigón es masivo cuando la dimensión mínima de la sección transversal del elemento sólido se aproxima o excede de 60 a 90 cm o cuando el contenido de cemento excede 360 kilogramos por metros cúbico. La generación de calor provocada por la hidratación del cemento, produce cambios de volumen en este tipo de elemento que pueden provocar la fisuración del mismo, por ello resulta necesario controlar la variación de temperatura entre la cara exterior y el núcleo. El problema de generación y conducción de calor, conduce a un problema en derivadas parciales transitorio, con condiciones iniciales y de contorno. En este trabajo se aplica el método θ de diferencias finitas para resolver las ecuaciones gobernantes. Este procedimiento conduce a un sistema de ecuaciones lineales en cada instante de tiempo, cuya solución provee la distribución de la temperatura. Se presentan los resultados obtenidos en dos bloques de iguales dimensiones (40x40x40cm) con contenidos de cemento de 300 y 430 kilogramos por metro cúbico. La variación máxima de temperatura alcanzada es de 11.97 grados centígrados y 18.7 grados centígrados respectivamente.

Keywords: Massive Concrete, Thermal Analysis, Finite Difference

Abstract. The paper aims is to develop a numerical model that allows simulating the temperature distribution in massive concrete block and its variation over the time. It is considered that a concrete is massive when the minimum dimension of the cross section of the solid element approaches or exceeds 60 to 90 cm or when the cement content range exceeds 360 kilograms per cubic meter. The heat generation caused by cement hydration, produces volume changes in this type of element that can cause the cracking, therefore it is necessary controlling the temperature variation between the outer face and the core. The heat generation and conduction problem leads to a problem in transient partial derivatives, with initial and contour conditions. In this work the finite differences method is used to solve the governing equations. This procedure leads to a system of linear equations at each moment of time, whose solution provides the distribution of temperature. The results obtained are presented for two blocks, with the same dimensions (40x40x40cm) and with two different cement contents: 300 and 430 kilograms per cubic meter. The maximum temperature variation reached is 11.97 degrees Celsius and 18.7 degrees Celsius.

1 INTRODUCCIÓN

La norma [CIRSOC 201 \(2005\)](#), define al Hormigón como “Una mezcla homogénea compuesta por una pasta de cemento y agua, con agregados gruesos y finos, que en estado fresco tienen cohesión y trabajabilidad y que luego, por el fraguado y el endurecimiento de la pasta cementicia, adquiere resistencia, también pueden contener aditivos químicos y/o adiciones minerales” y considera hormigón masivo, “al colocado en secciones macizas cuya menor dimensión lineal sea igual o mayor que 75cm”.

La norma [ACI 207 \(1996\)](#) del Instituto Americano del Concreto, define hormigón masivo como “cualquier volumen de hormigón con dimensiones suficientemente grandes que requiera medidas para enfrentar la generación de calor provocada por la hidratación del cemento y para controlar los cambios de volumen, a fin de minimizar el agrietamiento”.

En término de tamaño, la norma [ACI 211.1R-91 \(1991\)](#), considera que un hormigón es masivo cuando la dimensión mínima de la sección transversal del elemento sólido se aproxima o excede de 60 a 90 cm o cuando el contenido de cemento excede 360 Kg/m³.

Al diseñar las estructuras de hormigón se trabaja a nivel ingenieril o macronivel, en que se asume que, el hormigón es homogéneo y posee propiedades cuantificables como la resistencia, el módulo de elasticidad, la conductividad, etc. Sin embargo, esas propiedades son el resultado de las dimensiones y propiedades de sus fases componentes e interfaces como así también, de los diferentes tipos de defectos presentes en la matriz porosa, matriz cementicia. La matriz porosa es aquella que “corresponde tradicionalmente a la mezcla de cemento pórtland y agua con la incorporación de algún aditivo, la cual pasa de una etapa, en la mayoría de los casos, de consistencia plástica a un estado endurecido. En este estado la matriz está compuesta por los productos de hidratación del cemento, con la presencia de pequeñas burbujas de aire (natural o intencionalmente incorporado) y una red de poros y capilares originados durante el proceso de compactación, exudación y equilibrio hidrométrico con el medio ambiente” ([Balzamo y col., 2016](#)).

Si bien, la red de poros mencionada, es de importancia en relación a la durabilidad de las estructuras de hormigón, ya que ella se encuentra interconectada con el medio exterior, la presencia de fisuras o microfisuras en la matriz, que aparecen aún antes de que el material sea puesto en servicio, influyen desfavorablemente con el ingreso de agentes agresivos, ya que son menos intrincadas en su recorrido y forma que los poros y/o capilares, por lo cual su presencia, puede originar problemas de durabilidad como así también disminuir la resistencia mecánica del material.

[Giovambattista \(2011\)](#) menciona con respecto a los defectos, presencia de fisuras y los poros mencionados: “Si bien casi todos los materiales los poseen en su estructura interna, en el caso del hormigón su magnitud es importante y puede variar en forma significativa según el diseño de la mezcla y las acciones sobre el material, en especial las desarrolladas a edad temprana (primeras 48 horas). Entre las causas que generan estos defectos se destacan los movimientos de agua por exudación, los cambios de temperatura debido al desarrollo de calor durante la hidratación y las variaciones dimensionales de la pasta por pérdida de humedad en los poros.”

Por lo tanto, son las contracciones y las expansiones de origen térmico, debido al desarrollo de calor durante la hidratación del cemento, uno de los desencadenantes de fisuras o microfisuras a edades tempranas del hormigón. Por ello, el objetivo general del trabajo es la formulación e implementación de un modelo matemático, para el análisis térmico a edades tempranas del hormigón masivo, que permita estudiar la distribución de temperatura en un bloque con la finalidad de establecer criterios a tener en cuenta en la etapa de diseño y en la constructiva de este tipo de estructuras.

2 ANTECEDENTES

2.1 Problema térmico

La reacción de hidratación agua-cemento que se produce en el hormigón es una reacción exotérmica, y cuando se trata de hormigón masivo, esta reacción es de magnitud considerable debido a que la generación de calor depende de la masa del material. La temperatura máxima que alcanza una estructura de hormigón masivo depende no solo de la generación de calor durante el proceso de hidratación, sino también de la disipación de calor. En la [Figura 1](#), se puede observar el comportamiento típico de la temperatura en el núcleo de una estructura de hormigón masivo ([Figuroa y Delfín, 2009](#)):

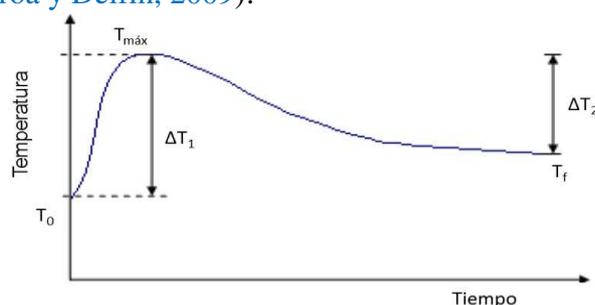


Figura 1: Desarrollo típico de temperatura de una estructura de hormigón masivo.

(T_0 : Temperatura de colocación del hormigón, T_{\max} : Temperatura máxima, T_f : Temperatura final de equilibrio, ΔT_1 : Elevación de temperatura, ΔT_2 : Descenso de temperatura)

3 FORMULACIÓN TEORICA DEL PROBLEMA TERMICO

3.1 Balance de energía

Se considera un volumen elemental $dV = dx \cdot dy \cdot dz$, tal como se observa en la [Figura 2](#). Por la presencia de un gradiente de temperatura se produce un flujo de energía calórica que ingresa al sistema \dot{E}_{in} y uno que sale \dot{E}_{out} . Además, la energía almacenada en el tiempo es \dot{E}_{st} y la energía generada por la hidratación del cemento en el tiempo es \dot{E}_g .

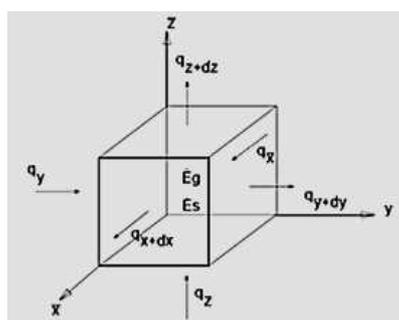


Figura 2: Volumen elemental de análisis

El flujo de energía que ingresa al sistema se obtiene a partir de la expresión:

$$\dot{E}_{in} = q_x + q_y + q_z \quad (1)$$

De acuerdo a la ley de Fourier, y considerando una conductividad térmica constante se tiene que:

$$q_x = -k \cdot A_{yz} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \cdot A_{xz} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \cdot A_{xy} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

donde q_x, q_y, q_z [W] son el flujo de calor a través del área A_{yz}, A_{xz}, A_{xy} [m²] respectivamente, k la conductividad térmica [W.m⁻¹.K⁻¹], T temperatura [K] y x, y, z coordenadas espaciales [m].

El flujo de energía saliente del sistema se obtiene a partir de la expresión siguiente:

$$\dot{E}_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \quad (3)$$

De acuerdo a la expresión en serie de Taylor y despreciando los términos de segundo orden y superior se tiene que:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot dx \quad q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \cdot dy \quad q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} \cdot dz \quad (4)$$

La energía que se almacena en el volumen elemental analizado, puede ser expresada como una función de la derivada de la temperatura en función del tiempo \dot{T} , el calor específico del material ce [J.Kg⁻¹.K⁻¹] y la densidad del hormigón ρ [Kg.m⁻³] (Azenha; 2009), esto es:

$$\dot{E}_{st} = \rho \cdot ce \cdot \dot{T} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (5)$$

Por otro lado, la energía interna generada debido a la hidratación de cemento, se la puede expresar a través de una función denominada tasa de generación de calor \dot{Q} [W.m⁻³], quien representa la fuente de generación interna de energía calórica por unidad de volumen del elemento de análisis, resultando:

$$\dot{E}_g = \dot{Q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (6)$$

Del planteo del balance energético macroscópico en coordenadas cartesianas se tiene:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (7)$$

Finalmente, reemplazando (1), (3), (5) y (6) en la expresión (7) se obtiene la ecuación de conducción de calor expresada en término de derivadas parciales:

$$\rho \times ce \times \frac{\partial T}{\partial t} - k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \dot{Q} \quad (8)$$

3.2 Fuente de calor interna \dot{Q}

El modelo numérico empleado para simular la generación de calor interna \dot{Q} , debe ser capaz de traducir la naturaleza exotérmica y activada térmicamente de las reacciones químicas implicadas en la hidratación del cemento, por ello se hace uso del modelo desarrollado por Azenha (2009), cuya formulación se basa en la propuesta de Reinhardt (1982). El mismo asume que la tasa de generación de calor puede escribirse como el producto de dos funciones independientes, esto es:

$$\dot{Q} = f(\alpha_T) \cdot g(T) \quad (9)$$

donde $f(\alpha_T)$ describe la tasa de generación de calor normalizada, $g(T)$ la influencia de la temperatura. La función $f(\alpha_T)$, se la puede expresar como el cociente entre la tasa de generación de calor \dot{Q} , como función del grado de desarrollo del calor α_T , y \dot{Q}_{peak} valor máximo de la misma:

$$f(\alpha_T) = \frac{\dot{Q}(\alpha_T)}{\dot{Q}_{peak}} \quad (10)$$

Con

$$\alpha_T = \frac{Q(t)}{Q_{total}} \quad (11)$$

y donde $Q(t)$ es el calor acumulado generado hasta un cierto instante t y Q_{total} el valor asintótico al que tiende la integral de la curva de tasa de generación de calor. En este trabajo se usaron los valores de $f(\alpha_T)$ obtenidos a partir de resultados de ensayos experimentales por [Azenha \(2009\)](#), quien trabajando con un calorímetro isotérmico obtiene valores de calor generado por la hidratación de cemento para diferentes valores de temperaturas, de una pasta de cemento comercial, por lo cual con ello se puede obtener \dot{Q} y de este modo el correspondiente \dot{Q}_{peak} .

La función $g(T)$ es la tasa máxima de generación de calor esperado por kg de cemento [$W \cdot kg^{-1}$] para la reacción de hidratación a la temperatura T . Multiplicándola por el contenido volumétrico de cemento en el hormigón se obtiene \dot{Q} para la masa de hormigón en [$W \cdot m^{-3}$].

La función $g(T)$ responde a una ley de tipo Arrhenius, ideada originalmente para describir la cinética de las reacciones químicas simples activadas térmicamente, tal como sigue:

$$g(T) = A_T \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (12)$$

donde A_T es una constante de velocidad, R es la constante de gas ideal y E_a es la energía de activación. Esta última representa la energía que una molécula, en el estado inicial del proceso, debe adquirir antes de que pueda participar en una reacción. En el caso de la hidratación del cemento se producen distintas reacciones químicas al mismo tiempo con interacción entre ellas, por ello E_a se denomina energía de activación “aparente”, ya que no se aplica a una reacción química en particular. Los valores de las constantes A_T y E_a se tomaron del trabajo de [Azenha \(2009\)](#) quien los obtuvo a partir del método de la velocidad, el cual consiste en hacer dos ensayos con el calorímetro isotérmico de una muestra de iguales características pero a diferentes temperaturas de modo que, al aplicar la Ec 13 para ambos casos y trabajando matemáticamente con las mismas se puede obtener el parámetro que se desea conocer, en función de α_T , como por ejemplo E_a , para el cual en el trabajo de la mencionada bibliografía hace uso de un valor promedio de E_a para trabajar el método propuesto.

$$\alpha_T = \frac{f(\alpha_T) \cdot A_T}{Q_{total}} \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (13)$$

3.3 Condiciones de contorno

En las condiciones de frontera espacial, se puede tener en cuenta en la transferencia de energía, la convección y radiación, sin embargo, también con criterio se puede realizar una simplificación considerando una condición adiabática en determinados casos. Particularmente en este trabajo, se asume en la cara inferior del elemento una condición adiabática, simplificación que se considera más desfavorable en el caso analizado. En las caras restantes se asume transferencia de energía por convección y radiación.

En el caso de fronteras no adiabáticas, la condición de contorno es:

$$- \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot l + k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot m + k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot n \right] = heq \cdot (T - T_{env}) \quad (14)$$

donde heq [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] es el coeficiente de transferencia de energía que contempla los efectos de los fenómenos de convección (hc) y radiación (hr) simultáneamente y además contempla la presencia de encofrado (he). Si l , m , n son los cosenos directores de la cara que se analiza, T la temperatura del punto analizado y T_{env} la temperatura del medio que lo rodea, es:

$$heq = \left[\frac{1}{hc+hr} + \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{k_i} \right]^{-1} \quad (15)$$

Para determinar hc se hace uso de la propuesta de Jayamaha, que es:

$$hc = 1,444.V + 4,955 \quad (16)$$

donde V es la velocidad el aire en cercanías del elemento considerado (independiente de que la causa de movimiento del aire sea natural o forzado).

Para el caso hr, se adopta la siguiente expresión:

$$hr = \varepsilon.[4,8 + 0,075.(T_{env} - 278,15)] \quad (17)$$

donde ε es una constante que representa la capacidad de emitir radiación un determinado material, el cual varía entre cero y uno, T_{env} es la temperatura del medio ambiente, la cual se considerada en forma simplificada como la máxima temperatura anual de la zona o territorio donde se coloca el hormigón.

Respecto al encofrado, en la Ec.15, L_i y k_i son respectivamente el espesor y la conductividad térmica de la i^a capa de material entre el hormigón y el medio que lo rodea y n la cantidad de capas de diferente conductividad térmica que conforman el encofrado.

4 MODELACIÓN DEL PROBLEMA

La resolución de la Ec. 8, se lleva a cabo mediante el método θ de diferencias finitas, procedimiento que conduce a un sistema de ecuaciones algebraico para los puntos pertenecientes al volumen analizado, para un dado instantes de tiempo, cuya solución provee el valor de la temperatura en cada uno de los nodos pertenecientes al bloque de hormigón.

Para un punto de coordenada (i,j,k) del interior del bloque tridimensional analizado, resulta la ecuación en diferencias:

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j,k}^{m+1} - T_{i,j,k}^m}{h_t} - \left\{ \frac{c^2}{a^2} \left[\theta \times \left(\frac{T_{i-1,j,k}^{m+1} - 2 \times T_{i,j,k}^{m+1} + T_{i+1,j,k}^{m+1}}{h_x^2} \right) + (1 - \theta) \times \left(\frac{T_{i-1,j,k}^m - 2 \times T_{i,j,k}^m + T_{i+1,j,k}^m}{h_x^2} \right) \right] + \right. \\ \left. \frac{c^2}{b^2} \left[\theta \times \left(\frac{T_{i,j-1,k}^{m+1} - 2 \times T_{i,j,k}^{m+1} + T_{i,j+1,k}^{m+1}}{h_y^2} \right) + (1 - \theta) \times \left(\frac{T_{i,j-1,k}^m - 2 \times T_{i,j,k}^m + T_{i,j+1,k}^m}{h_y^2} \right) \right] + \left[\theta \times \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{T_{i,j,k-1}^{m+1} - 2 \times T_{i,j,k}^{m+1} + T_{i,j,k+1}^{m+1}}{h_z^2} \right) + (1 - \theta) \times \left(\frac{T_{i,j,k-1}^m - 2 \times T_{i,j,k}^m + T_{i,j,k+1}^m}{h_z^2} \right) \right] \right\} = \frac{\dot{Q}}{\rho \times C_e} \quad (18) \end{aligned}$$

donde m indica el instante de tiempo en análisis; i,j,k son índices de posición según los eje x' , y' , z' respectivamente, siendo estos últimos ejes los correspondientes a adimensionar el prisma de análisis; a,b,c son las dimensiones del bloque según los eje x , y , z respectivamente, $hx=1/Nx$; $hy=1/Ny$; $hz=1/Nz$ y Nx , Ny , Nz el número de divisiones para la discretización del dominio según x , y , z respectivamente. El valor de θ puede variar entre 0 y 1. En este modelo se asumió $\theta=0,5$.

5 IMPLEMENTACION Y CALIBRACIÓN

El algoritmo desarrollado fue implementado en el lenguaje de programación C++. Se validó la formulación propuesta por comparación con los valores disponibles en [Azenha; 2009](#). En la [Figura 3](#) y [Figura 4](#) se muestran los valores experimentales y numéricos de la temperatura alcanzada a partir del momento del colado del hormigón, presentados por [Azenha \(2009\)](#) y en color amarillo los valores obtenidos con el algoritmo propuesto. Se puede observar que las formas de las curvas son similares, no obstante, hay una discordancia de aproximadamente 3 horas en la zona del valor pico. Sin embargo, como el objetivo principal del presente trabajo es un estudio de los valores de temperatura máximos alcanzados, más que un análisis del progreso de la misma en el tiempo, se asumió que la curva se encuentra calibrada debido a que se ajusta el valor pico.

El bloque de hormigón analizado tiene un tamaño de 40x40x40cm. Los parámetros adoptados son: conductividad térmica $K_t=2.6W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, densidad $\rho=2336.1 \text{ Kg} \cdot m^{-3}$, calor

específico $c_e=1027 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, coeficiente de transferencia de calor $h_{eq}=5,2\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, constante de Arrhenius $A=1,607.10^9$, energía de activación $E_a=48,19 \text{ KJ.mol}^{-1}$, temperatura de colado $T_{inicial}=26^\circ\text{C}$, densidad del cemento $\rho_{cto}=340\text{Kg.m}^{-3}$. El paso del tiempo adoptado para el análisis fue de: $\Delta t=2\text{hs}$.

Para las condiciones de frontera se utilizaron los valores de los parámetros adoptados por Azenha (2009): $T_{env}=20^\circ\text{C}$; $\varepsilon=0.88$; $V\sim 0\text{m.seg}^{-1}$; $L_1=0.0185\text{m}$; $k_1=0.2\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

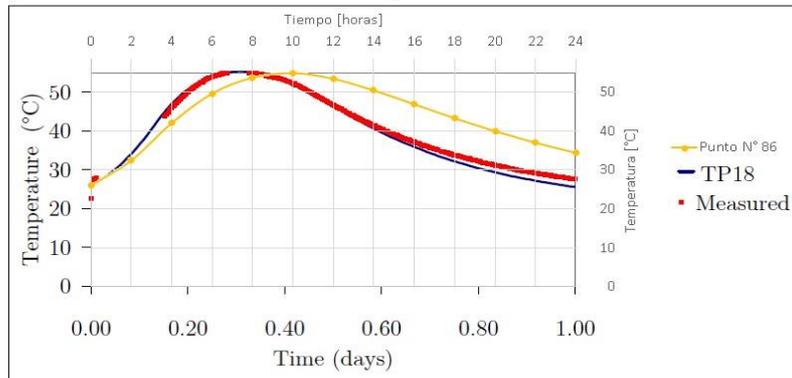


Figura 3: Variación de la temperatura con respecto al tiempo transcurrido desde el colado, del punto 86.

El punto N° 86 es aquel ubicado en las coordenadas $x=0.16\text{m}$, $y=0.16\text{m}$, $z=0.16\text{m}$ (en cercanías del centro del cubo, ver Figura 5). La curva TP18 (Azenha; 2009) corresponde a los valores alcanzados en un punto cuyas coordenadas son: $x=0.2\text{m}$, $y=0.2\text{m}$, $z=0.2\text{m}$ (o sea el centro del cubo).

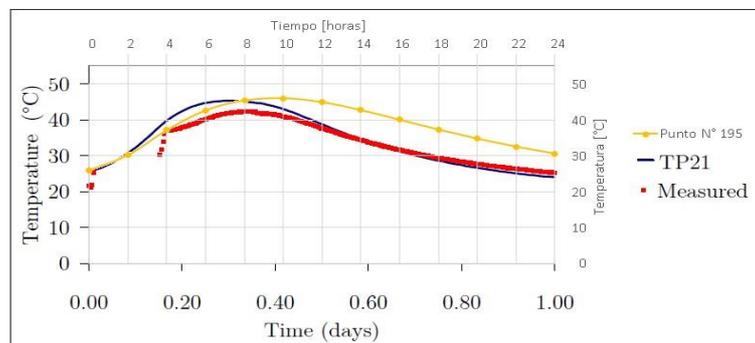


Figura 4: Variación de la temperatura con respecto al tiempo transcurrido desde el colado, del punto 195.

El punto N° 195 es aquel ubicado en las coordenadas $x=0.16\text{m}$, $y=0.24\text{m}$, $z=0.24\text{m}$ (en cercanías del centro de la cara superior del cubo, ver Figura 5). La curva TP21 (Azenha; 2009) corresponde a los valores alcanzados en un punto cuyas coordenadas son: $x=0.2\text{m}$, $y=0.2\text{m}$, $z=0.4\text{m}$ (o sea el punto del centro de la cara superior del cubo).

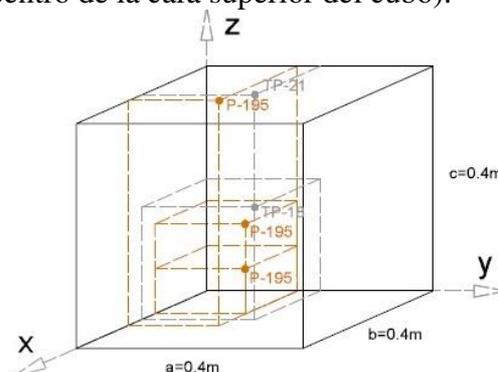


Figura 5: Esquema del bloque analizado.

6 RESULTADOS OBTENIDOS

De acuerdo al ACI, en términos de tamaño, se considera que un hormigón es masivo cuando la dimensión mínima de la sección transversal del elemento sólido se aproxima o excede de 60 a 90 cm o cuando el contenido de cemento excede 360 kg/m³. Por ello, se realizó un análisis para dos tipos de hormigones con contenidos de cemento distinto: uno de 300 kg/m³ (ver Figura 6) y otro de 430 kg/m³ (ver Figura 7). Las dimensiones del bloque son 40x40x40cm. Se empearon los mismos parámetros térmicos que los del ejemplo de calibración. En ambas figuras se grafican las curvas obtenidas para dos puntos distintos: El P50 y el P195. En las mismas se puede observar el valor pico alcanzado en cada caso.

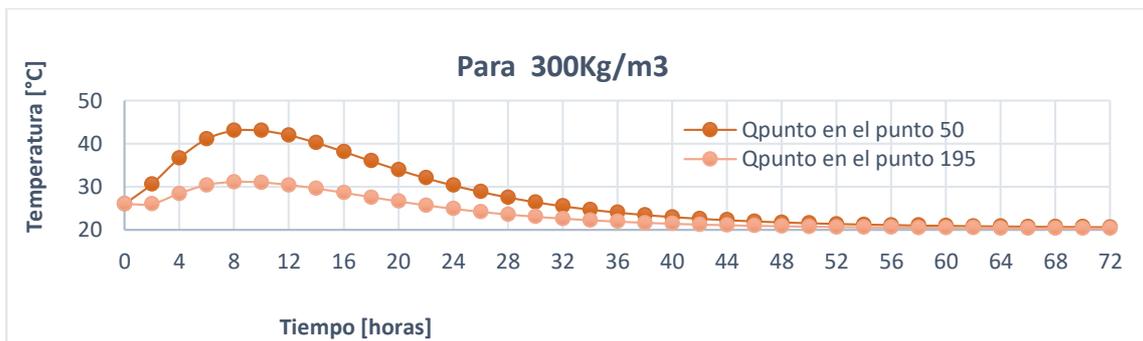


Figura 6: Temperatura vs Tiempo- Cemento 300Kg/m³

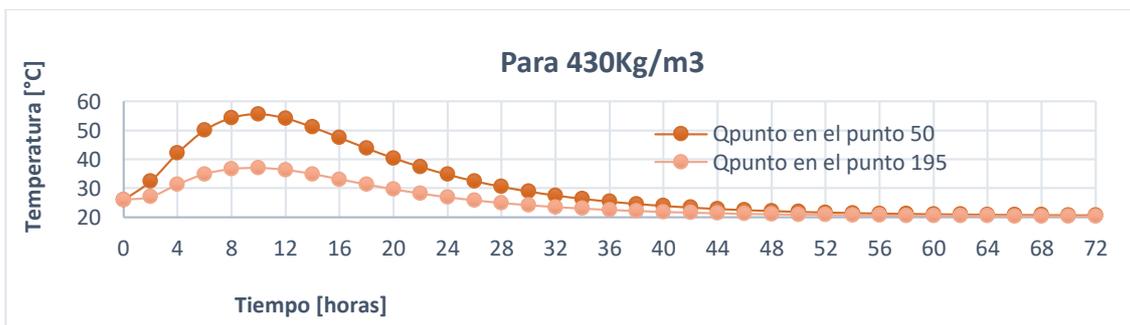


Figura 7: Temperatura vs Tiempo- Cemento 430Kg/m³

En la Figura 8, se presentan las curvas de igual temperatura o isotermas de un plano ubicado en $z=0,16m$ una vez transcurridas 10 horas desde el momento del colado, que corresponde al momento de máxima temperatura que se alcanza en el bloque, con un contenido de cemento de 430 Kg.m⁻³. En azul, se presentan las temperaturas más bajas obtenidas para ese instante y en rojo las más altas. En este plano se ubica el punto P50.

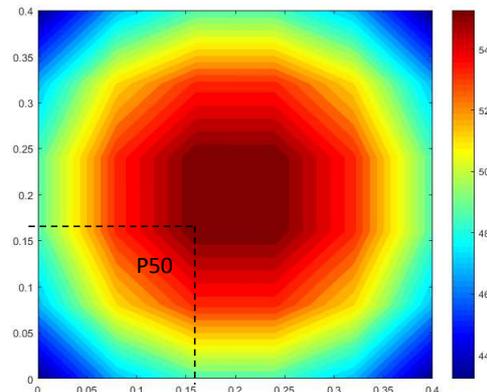


Figura 8- Isotermas para un plano arbitrario en $z=0,16m$. P50 corresponde a la posición del punto 50

Se puede observar que, en el análisis realizado, en el caso de contenido de cemento menor a 360Kg.m^{-3} el salto térmico entre el punto de curva de menor temperatura, perteneciente a la cara superior del bloque analizado, y el punto de curva de mayor temperatura, perteneciente al interior del bloque, es de 11.97°C . En el caso de contenido de cemento 430kg.m^{-3} en el hormigón (es decir mayor al valor mencionado 360Kg.m^{-3} para el cual en norma ACI se considera hormigón masivo) el salto térmico se encontró de $18,70^\circ\text{C}$.

7 PROBLEMA DE FISURACIÓN

El hormigón en grandes volúmenes genera calor que se disipa lentamente, resultando por ello una diferencia térmica entre el núcleo y el exterior, es decir en la superficie la temperatura es menor que en el interior del hormigón. Dicha diferencia de temperatura provoca que el interior del hormigón, que está a mayor temperatura y dilatado, se oponga a la contracción de la zona exterior más fría. Esto se conoce como restricción interna y crea esfuerzos térmicos de tracción en la superficie. Y debido a que el hormigón aun esta en edad temprana, no se ha desarrollado por completo su resistencia a tracción (valor que ronda el 10% de la resistencia a la compresión) y si los esfuerzos de tracción superan la resistencia a la misma, el hormigón se fisura, lo cual puede conllevar a una pérdida de durabilidad y resistencia mecánica.

La experiencia y estudios experimentales han demostrado que si el diferencial máximo de temperatura entre el interior y la superficie exterior del bloque de hormigón es menor a 20°C , se minimiza o incluso se evita la fisuración superficial (Gibbon F, 1977; Fintel y Gosh, 1978). En general se recomienda considerar un diferencial máximo de temperatura de 20°C , a no ser que exista experiencia o cálculos basados en las propiedades físicas de la mezcla de hormigón en cuestión y en la geometría del elemento de hormigón que demuestren que se pueden tolerar diferenciales de temperatura mayores a 20°C (Kosmatka y col., 2003).

Teniendo en cuenta lo anterior y los análisis realizados en el apartado 6 se puede observar que, en el hormigón con contenido de cemento menor a 360Kg.m^{-3} el salto térmico entre el punto de curva de menor temperatura, perteneciente a la cara superior del bloque analizado, y el punto de curva de mayor temperatura, perteneciente al interior del bloque, es de 11.97°C , menor a los 20° . En el hormigón con contenido de cemento de 430kg.m^{-3} de hormigón el salto térmico es de $18,70^\circ\text{C}$, es decir muy cercano al valor de 20°C . En este caso, y de acuerdo a la bibliografía se debería tener en cuenta el problema de fisuración dado que estamos en un salto térmico cercano a 20°C .

8 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentó un algoritmo numérico que permite obtener la distribución de temperatura en bloques de hormigón macizo. La formulación se obtuvo a partir de la implementación de un método en diferencia finita, el cual resulta estable para el paso de tiempo adoptado (2hs). El modelo se validó a partir de casos previamente tratados en la bibliografía disponible, tanto con resultados numéricos como experimentales. Luego, se obtuvieron las curvas de variación de temperatura de bloques con diferentes contenidos de cemento para determinar el gradiente de temperatura entre el punto de temperatura máximo y el de temperatura mínima. Se determinó que el bloque con mayor contenido de cemento, alcanza un gradiente de aproximadamente 20°C , valor a partir del cual hay altas probabilidades de fisuración, y por lo tanto resulta coherente tomar medidas para controlar la variación de temperatura. Los resultados obtenidos en ambos casos fueron coherentes con las recomendaciones dadas en las normativas.

Finalmente, se destaca que con el algoritmo desarrollado se espera poder realizar estudios

paramétricos en bloques con distintas dimensiones y establecer algún tipo de relación simplificada entre estas, el contenido de cemento y el gradiente de temperatura que se podría alcanzar.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta Proyecto CIUNSa N° 2153 y por el Consejo Interuniversitario Nacional a través de las Becas EVC-CIN.

REFERENCIAS

- ACI Committee 207, 207.R1-96: *Mass Concrete*. Farmington Hills, MI USA: American Concrete Institute, 1996.
- ACI Committee 211, 211.1R-91: *Standard Practice for Selecting Proportions for normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills, MI USA: American Concrete Institute, 1999.
- Giovambattista A., *Hormigón, materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005*. INTI, 2011.
- Azenha M., Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages, thesis 2009.
- CIRSOC 201-2005, *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*, INTI-CIRSOC, 2005.
- Babul Guixé P. I., *Análisis de aplicabilidad en Chile de la guía "Pautas para el control de fisuración en hormigones masivo 2008- Instituto del concreto de Japón"*. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, 2013.
- Balzamo y otros. *Ese material llamado Hormigón*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2016.
- Figuroa, M. and Federico d. *Experiencia del IDIEM en el Control y Seguimiento de Obras de Hormigón Masivo. Seminario Internacional de Hormigones Estructurales Masivos*. Santiago de Chile, 2009
- Fintel, M. and Ghosh S.K., *Mass Reinforced Concrete without Construction Joints. Adrian Pauw Symposium on Designing for Creep and Shrinkage*. Fall Convention of the American Concrete Institute, Houston, Texas, 1978.
- Gibbon F., and Michael E. *Large Pours for Reinforced Concrete Structures*. Current Practice Sheets No. 28, 35 y 36. Concrete, Cement and Concrete Association. Wexham Springs, 1977.
- Johansen, V.C. Klemm, W.A and Taylor, P.C., *Why Chemistry Matters in Concrete*. Farmington Hills, MI USA: American Institute, 2002.
- Kosmatka, SH., Kerkhoff, B. and Panarese, W.C., *Design and Control of Concrete Mixtures*. USA: Portland Cement Association, 2003.
- Reinhardt, H., Blaauwendraad, J and Jongedijk, J. *Temperature development in concrete structures taking account of states dependent properties, Int. Conf. Concrete at Early Ages*, Paris, France, 1982.