



MODELIZACION DEL CALOR DE HIDRATACION DEL CONCRETO EN LAS ESTRUCTURAS

LINA MARGARITA BOHORQUEZ CEDIEL



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA
2016**



MODELIZACION DEL CALOR DE HIDRATACION DEL CONCRETO EN LAS ESTRUCTURAS

LINA MARGARITA BOHÓRQUEZ CEDIEL

Monografía Para optar al título de Especialista en estructuras

DIRECTOR:

EDISON OSORIO BUSTAMANTE

PhD en Ingeniería Estructural y de la Construcción

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

A lo largo de mi vida me he caracterizado por tener la perseverancia de trabajar incansablemente para cumplir mis objetivos, pero esta vez fue diferente, se me apago la mitad de mi vida, sentí que mis fuerzas físicas y emocionales se acabaron, y cuando quise tirar la toalla llegaron a mi mente palabras, imágenes, sueños, que me hicieron levantarme y luchar con las uñas por honrar la memoria de la mejor persona que Dios pudo poner en mi camino.

Gracias pá; esta va por los buenos tiempos, como el mejor homenaje que una hija puede hacer, y por el amor que siempre existirá entre los dos, más que por mi...ESTO ES POR TI Y PARA TI...

AGRADECIMIENTOS:

La culminación de esta monografía en gran parte se debe al apoyo constante que he recibido por parte de mi madre, Esperanza Cediél, mi hermana Nathaly Bohórquez, mi novio Diego Barbosa, mi gratitud más sincera para ellos, por darme energía y entender que debí cambiar muchos momentos para compartir con ellos, para realizar avances en este documento

También quiero agradecer muy especialmente a mi director, el ingeniero Edison Osorio, por aportar sus conocimientos para guiarme y su paciencia para corregir mis errores.

A mis profesores, compañeros de clase, director de facultad y personal administrativo, les agradezco sus contribuciones, comentarios, criterios profesionales, porque con ellos facilite mi crecimiento profesional y personal

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	16
1. JUSTIFICACION.....	17
2. CONCEPTOS BASICOS DE LA TRANSFERENCIA DEL CALOR	19
2.1 CONDUCCIÓN	19
2.1.1 Proceso adiabático	21
2.2 CONVECCIÓN	21
2.3 RADIACIÓN.....	23
3. EL PROBLEMA TÉRMICO EN LAS ESTRUCTURAS	25
3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR	29
4. EL CALOR DE HIDRATACION DEL CEMENTO	30
4.1 CALOR DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO	30
4.2 TIPOS DE CEMENTO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA:	33

4.3 COMPONENTES DEL CONCRETO.....	34
4.4 PROPIEDADES TÉRMICAS DE HORMIGÓN.....	36
4.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	36
4.6 CALOR ESPECÍFICO.....	36
4.7 CEMENTO EN COLOMBIA	39
4.8 HORMIGÓN EN MASA.....	40
4.9 ¿CÓMO PREDECIR LA TEMPERATURA EN EL CONCRETO?.....	42
5. EJEMPLO DE CALOR DE HIDRATACION EN MIDAS CIVIL.....	46
5.1 DEFINICIÓN DE MATERIALES.....	47
5.2 INCIDENCIA DEL TIEMPO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO	48
5.2.1 Retracción por secado y fluencia del concreto	48
5.2.2 Esfuerzo de compresión	50
5.2.3 Calor de hidratación.....	50
5.3 TEMPERATURA AMBIENTE.....	51
5.4 COEFICIENTE DE CONVECCION.....	52

5.5 DEFINICIÓN DE FUNCIONES DE FUENTE DE CALOR	53
6. RESULTADOS DEL SOFTWARE.....	54
6.1 DADO DE 1.00 M X 1.00 M	54
6.2 DADO DE 1.50 M X 1.50 M	58
6.3 DADO DE 2.00 M X 2.00 M	61
7. ANALISIS DE RESULTADOS.....	67
8. CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFIA.....	69

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evolución de las primeras 120 horas de calor de hidratación con el tiempo de mortero con puzolana natural	32
Figura 2. Evolución de las primeras 120 horas de calor de hidratación con el tiempo de mortero con puzolana natural	32
Figura 3. Grieta térmica en concreto	42
Figura 4. Efecto de la temperatura de los ingredientes sobre la temperatura del concreto, recién mezclado	43
Figura 5. Propiedades del concreto	48
Figura 6. Propiedades de retracción y fluencia del concreto	49
Figura 7. Grafica Tiempo Vs Elasticidad.	50
Figura 8. Datos para análisis de calor de hidratación.....	51
Figura 9. Función temperatura ambiente.	52
Figura 10. Función para el coeficiente de convección.....	52
Figura 11. Definición de la función de fuente de calor.....	53
Figura 12. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la primera hora	54
Figura 13. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la segunda hora.....	55
Figura 14. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la tercera hora	55
Figura 15. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la cuarta hora	55
Figura 16. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la quinta hora.....	56

Figura 17. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la sexta hora.....	56
Figura 18. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la séptima hora.....	56
Figura 19. Grafica de variación de temperatura respecto al tiempo para diferentes alturas del dado de 1.00m X 1.00 m.....	57
Figura 20. Modelación de dado de 1.50 m X 1.50m.....	58
Figura 21. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la primera hora.	58
Figura 22. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la segunda hora.....	59
Figura 23. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la tercera hora.	59
Figura 24. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la cuarta hora.	59
Figura 25. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la quinta hora.....	60
Figura 26. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la sexta hora.....	60
Figura 27. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la séptima hora.....	60
Figura 28. Grafica de variación de temperatura respecto al tiempo para diferentes alturas del dado de 1.50m X 1.50 m.....	61
Figura 29. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la primera hora	62
Figura 30. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la segunda hora.....	62
Figura 31. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la tercera hora	63

Figura 32. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la cuarta hora	63
Figura 33. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la quinta hora.....	64
Figura 34. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la sexta hora.....	64
Figura 35. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la séptima hora.....	65
Figura 36. Grafica de variación de temperatura respecto al tiempo para diferentes alturas del dado de 2.00 m X 2.00 m.....	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Conductividad térmica en diferentes materiales.....	20
Tabla 2. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.....	23
Tabla 3. Tipos y usos del cemento Portland.	33
Tabla 4. Tipos y usos del cemento Portland.	34
Tabla 5. Calor liberado por los distintos compuestos del cemento para varias edades.....	35
Tabla 6. Efecto del hielo sobre la temperatura del concreto.....	45
Tabla 7. Propiedades del concreto asumidas por el software para concreto C4000.....	47
Tabla 8 Propiedades de transferencia de calor asumida por el software para concreto grado C4000	47
Tabla 9. Propiedades de retracción y fluencia del concreto	49
Tabla 10. Variación de temperatura según tiempo y altura para dado de 1x1.....	57
Tabla 11. Variación de temperatura según tiempo y altura para dado de 1.50 m x 1.50 m.....	61
Tabla 12. Variación de temperatura según tiempo y altura para dado de 2.00 m x 2.00 m.....	65

RESUMEN.

TITULO: MODELIZACIÓN DEL CALOR DE HIDRATACIÓN DEL CONCRETO EN LAS ESTRUCTURAS*

AUTORA: LINA MARGARITA BOHÓRQUEZ CEDIEL**

PALABRAS CLAVE: Modelización, calor de hidratación, térmico, mecanismos, esfuerzo, tensiones, grietas, termodinámico, energía.

Debido a la continua construcción de elementos estructurales de concreto de grandes volúmenes, se hace necesario el estudio del problema térmico en las estructuras debido del calor de hidratación que se genera por la reacción química entre el cemento y el agua. Los cambios de temperatura producen expansión o contracción térmica y gradientes térmicos productos de las propias propiedades térmicas de los materiales y los mecanismos de transferencia de calor que gobiernan el problema. El problema térmico puede producir esfuerzos térmicos y fisuración a edades tempranas del concreto que comprometen la durabilidad de las estructuras. En ese sentido, este trabajo monográfico aborda el tema con el objetivo de presentar los mecanismos térmicos asociados al problema de calor de hidratación y las estrategias de modelización numérica para predecir su comportamiento en las estructuras. Como resultados se presenta un marco conceptual de los mecanismos de transferencia de calor y calor de hidratación del concreto. Además, se presenta un caso de estudio análisis numérico mediante la técnica de elementos finitos y usando el programa Midas Civil para simular el comportamiento térmico de un bloque de concreto con diferentes espesores

Los mecanismos de transferencia de calor, pueden conllevar a esfuerzos en las estructuras que es una problemática generado en las fundiciones de grandes volúmenes de concreto, una de las causas del cambio térmico es el calor de hidratación, que se genera por la reacción química entre el cemento a el agua, el desarrollo del calor es generado durante el fraguado.

Finalmente, se ejemplifica la teoría expuesta mediante un modelo en el software MIDA CIVIL, en donde se ilustrará

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil Especialización en estructuras. Director Edison Osorio Bustamante

ABSTRACT

TITLE: MODELING OF THE HEAT OF HYDRATION OF CONCRETE STRUCTURES*

AUTHOR: LINA MARGARITA BOHÓRQUEZ CEDIEL**

KEY WORDS: Modeling, heat of hydration, thermal, mechanisms, effort, stress, cracks, thermodynamic, energy.

Due to the continuous construction of structural concrete of large volumes, elements is necessary because of the heat of hydration heat in the structures problem study which is generated by the chemical reaction between cement and water. Changes in temperature cause expansion or thermal contraction and gradients thermal products of the own thermal properties of materials and heat transfer mechanisms that govern the problem. The thermal problem can produce excessive thermal stress and cracking at an early age concrete that compromise the durability of structures. In that sense, this monographic work aborts the issue with the aim of presenting thermal mechanisms associated with the problem of heat of hydration and the strategies of numerical modelling to predict its behavior in the structures. A conceptual framework of the mechanisms of heat transfer and heat of hydration of concrete is presented as results. Also presents a case study numerical analysis by finite element technique and using the Midas Civil to simulate the thermal behavior of a block of concrete with different thickness

Heat transfer mechanisms, can lead to efforts in the structures which is a problem in the foundries of large volumes of concrete, one of the causes of the heat exchange is the heat of hydration, which is generated by the chemical reaction between cement, water development of heat is generated during curing.

Finally, exemplified the theory exposed by a model in software CIVIL measure, where will be illustrated

* Monograph

** Faculty of Physical Engineering - Mechanical School of Civil Engineering Specialization structures. Director Edison Osorio Bustamante

INTRODUCCION

En esta época de constante evolución, se observa constantemente la construcción de estructuras cada vez más grandes, estas dimensiones no solo requieren diseños estructurales especiales, sino también analizar el problema del calor de hidratación en el concreto, debido a la generación de fisuras por esfuerzos térmicos producidos por la diferencia de temperaturas (interna y externa) de los diferentes elementos estructurales, que conllevan a la pérdida de resistencia y propiedades físicas con las que se diseña normalmente.

Los mecanismos de transferencia de calor, pueden conllevar a esfuerzos en las estructuras que es una problemática generada en las fundiciones de grandes volúmenes de concreto, una de las causas del cambio térmico es el calor de hidratación, que se genera por la reacción química entre el cemento y el agua, el desarrollo del calor es generado durante el fraguado.

La transferencia de calor es la energía que se produce en el tránsito de partículas debido a una diferencia de temperaturas, siempre que hay una divergencia de temperaturas entre dos medios en contacto, se genera transferencia de calor, los procesos de transferencia de calor se basan en la primera ley de la termodinámica y se realizan mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

1. JUSTIFICACION

Actualmente se está evidenciando el crecimiento permanente de ciudades como Bucaramanga, construyendo constantemente estructuras como puentes, embalses, edificios, viaductos. La construcción de estas grandes obras, requiere grandes volúmenes de hormigón, para materializar los diferentes elementos estructurales, presentando el inconveniente de agrietamiento del concreto y temperaturas difíciles de manejar debido al calor de hidratación que libera en la reacción química.

Esta problemática no afecta únicamente al diseño de las estructuras, en obra también se ve seriamente afectado el cronograma, ya que el tiempo que dure la reacción química del cemento (calor de hidratación), genera afectación en procesos como fraguado y curado del hormigón. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004)

En concretos masivos la temperatura interna se eleva y cae lentamente, mientras que la superficie se enfría rápidamente a temperatura ambiente. La contracción de la superficie debido al enfriamiento está restringida por el hormigón interior más caliente que no se contrae tan rápidamente como la superficie. Por lo tanto se generan esfuerzos de tracción que pueden agrietar la superficie de hormigón como resultado de esta diferencia de temperatura no controlada a través de la sección transversal. NRMCA, (2005)

La fisuración puede comprometer la durabilidad de las estructuras. Sin embargo, las recomendaciones de las normas y/o códigos de diseño son someras sobre

este tema. Actualmente se encuentran disponibles modelos y herramientas para simular matemáticamente este fenómeno. *NRMCA, (2005)*

En consecuencia, la monografía tiene como objetivo realizar la descripción de un modelo matemático y sus variables para simular el fenómeno del calor de hidratación del concreto, así como realizar un ejemplo de aplicación para que el ingeniero estructural pueda tener acceso a una guía en la modelización de este tipo de problemas

2. CONCEPTOS BASICOS DE LA TRANSFERENCIA DEL CALOR

En este capítulo se describen los fenómenos de la termodinámica relacionados con la transferencia de calor, como un tema introductorio al calor de hidratación del cemento y sus efectos en el concreto y las estructuras. Se encontrarán conceptos básicos de la transferencia de calor, un resumen de los mecanismos, las leyes, las variables del problema y la aplicación de las mismas al problema que abarca esta monografía, el calor de hidratación en concretos masivos.

2.1 CONDUCCIÓN

Siempre que exista una discrepancia de temperatura en un medio, el calor fluirá de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. La conducción se puede observar en todos los estados de la materia, en los gases y líquidos. La conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio, mientras que en los sólidos se debe al transporte de energía por parte de los electrones libres, generando una disminución en la temperatura del elemento (Çengel, Y.A., 2007).

La velocidad a la que el calor se transfiere por conducción es proporcional a la diferencia de temperatura por el área a través de la que se transfiere el calor. Entonces para la conducción a través de un medio homogéneo, la tasa de transferencia de calor es

$$q_k = -KA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

- K es la conductividad térmica, que es la propiedad que tienen los materiales de almacenar calor, esta propiedad varia de un material al otro. En la Tabla No. 1 se observan los valores de K para diferentes materiales a temperatura ambiente medida en unidades de vatio por metro.

Tabla 1. Conductividad térmica en diferentes materiales.

MATERIAL	K
Diamante	2300.00 W/m °C
Plata	429.00 W/m °C
Cobre	401.00 W/m °C
Oro	317.00 W/m °C
aluminio	237.00 W/m °C
hierro	80.20 W/m °C
mercurio	8.54 W/m °C
vidrio	0.78 W/m °C
ladrillo	0.72 W/m °C
agua	0.61 W/m °C
piel húmeda	0.37 W/m °C
madera (roble)	0.17 W/m °C
helio	0.15 W/m °C
caucho suave	0.13 W/m °C
fibra de vidrio	0.04 W/m °C
aire	0.03 W/m °C
Espuma rígida	0.03 W/m °C
Hormigón	1.40 W/m °C

Fuente: Rolle, C. K, 2004

- A es el área
- $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura

El signo menos es consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, como se mencionó anteriormente, requiere que el flujo del calor debe fluir en dirección de una temperatura mayor a una menor. La anterior ecuación es la ley de Fourier de la conducción del calor. Aquí, $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura, el cual es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama T-x (la razón de cambio de T con respecto a x), en la ubicación x. La relación antes dada indica que la razón de conducción del calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer x. El signo negativo en la ecuación de transferencia de calor garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva (Çengel, Y.A., 2007).

2.1.1 Proceso adiabático Se presenta cuando no se permite un flujo de calor, esto se puede presentar cuando el sistema está muy bien aislado, o cuando el proceso se produce tan rápido que el calor no puede fluir hacia el centro o hacia afuera del sistema, es decir, no hay intercambio de calor, (Giancoli. D, 2006)

2.2 CONVECCIÓN

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección debido al aumento de fricción (Incorpera, P. F, 1996). En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo

del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia (Giancoli. D, 2006).

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es obligado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento, como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido. (Çengel, Y.A., 2007).

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como lo expresa la siguiente ecuación

$$Q_{CONV} = HA_S(T_S - T_{\infty}) \quad \textbf{Ecuación 2}$$

En donde:

H: coeficiente de transferencia de calor por convección.

En la tabla No, 2, se muestran valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección, medidos en unidades de vatio por metro cuadrado Celsius [W/m² °C]

Tabla 2. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Convección libre	gases	2 W/m ² °C - 25 W/m ² °C
	líquidos	50 W/m ² °C - 1000 W/m ² °C
Convección forzada	gases	25 W/m ² °C - 250 W/m ² °C
	líquidos	50 W/m ² °C - 20000 W/m ² °C
Convección con cambio de fase	Ebullición	25000 W/m ² °C - 100000 W/m ² °C
	Condensación	25000 W/m ² °C - 100000 W/m ² °C

Fuente: Incorpora, P. F, 1996

A: es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección

T_s = es la temperatura de la superficie

T_∞ = temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie. (Yunus A. Çengel. 2007).

2.3 RADIACIÓN

En los estudios de transferencia de calor es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura mayor a cero emiten radiación térmica. (Esplugas, S. 2005)

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos.

La diferencia entre la convección y la conducción respecto a la radiación no solo se debe a las ecuaciones, sino porque la radiación es mucho más sensible a la temperatura, también difieren en que a diferencia de la convección y la conducción, en la radiación el calor se transmite mucho mejor en el vacío que en un medio material. (Esplugas, S. 2005)

3. EL PROBLEMA TÉRMICO EN LAS ESTRUCTURAS

En muchos casos se da muy poca orientación sobre cómo sobre los efectos de la temperatura en las estructuras, por esta razón muchos diseños estructurales son realizados empíricamente, casi que con ningún cambio relacionado a los efectos de la temperatura en la estructura.

A partir de los mecanismos de transferencia de calor, se puede estudiar el caso particular de la superestructura de un puente ya que este requiere grandes volúmenes de concreto. Para lograr observar el flujo de calor en la sección transversal de la viga, se puede recurrir a la siguiente ecuación (Ghali. A, 2006):

$$K \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + K \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + Q = \rho c \frac{\delta T}{\delta t} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

T = la temperatura en cualquier punto (x, y) en cualquier instante, t.

K = conductividad térmica que es la tasa de flujo de calor por conducción por unidad de área por unidad de gradiente de temperatura. Las unidades de k son W / (m ° C).

Q = cantidad de calor generado dentro del cuerpo (por ejemplo, por hidratación del cemento) por unidad de tiempo por unidad de volumen, W / m³

ρ = densidad kg / m³

c = calor específico; es decir, la cantidad de calor requerida para aumentar la temperatura de la unidad de masa del material en un grado, $J / (kg \text{ } ^\circ C)$.

El flujo de calor en cualquier instante, en cualquier punto de los límites de la sección transversal, se calcula con la siguiente ecuación (Ghali. A, 2006).

$$K \frac{\delta T}{\delta x} nx + K \frac{\delta T}{\delta y} + q = 0 \quad \textbf{Ecuación 4}$$

Donde nx es el coseno director de un vector hacia el exterior normal hasta el límite; q , es la cantidad de transferencia de calor por unidad de tiempo por unidad de área de la frontera en unidades de W / m^2 .

El valor de q , que varía con el tiempo y con la posición del punto en el límite, es la suma de tres componentes (Ghali. A, 2006):

$$q = q_s - q_c - q_r \quad \textbf{Ecuación 5}$$

En donde

- q_s = la radiación solar ; es decir, la ganancia de calor debido a los rayos del sol
- q_c = la convección debido a la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire
- q_r = la re- radiación desde la superficie hasta el aire circundante.

La radiación solar se puede expresar como:

$$q = a_a I_s \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

- a_a = coeficiente de absorción de la radiación solar adimensional menor de 1,0
- I_s = calor total de los rayos del sol que alcanza la superficie por unidad de área por unidad de tiempo.

La cantidad de transferencia de calor por convección está dada por la ley enfriamiento de Newton:

$$q_c = h_c(T - T_a) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde T y T_a son las temperaturas de la superficie y del aire circundante, respectivamente; h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección (W / (m² ° C)). El valor de h_c depende principalmente de la velocidad del viento y en un pequeño grado en la orientación y configuración de la superficie y el tipo de material. La cantidad de re- radiación desde la superficie hasta el aire está dada por la ley de Stefan -Boltzmann que se puede escribir en la forma (Ghali. A, 2006):

$$q_x = h_x(T - T_a) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde h_x es el coeficiente de transferencia de calor por radiación dada por:

$$h_x = C_s * a_e [(T + T^*)^2 + (T_a + T^*)^2] (T + T_a + 2T^*) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde C_s = constante de Stefan- Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ [W/ (m²K⁴)], T^* = 273°C o 460°F; α_e es un coeficiente adimensional de emisividad de la superficie, y toma un valor entre 0 y 1.

La Ecuación 9, indica que h_x puede ser calculado solamente cuando se conoce en calor de la temperatura T. Sin embargo, debido h_r está sólo ligeramente afectada por T, en una solución de tiempo incremental de las ecuaciones $K \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + K \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + Q = pc \frac{\delta T}{\delta t}$ y $K \frac{\delta T}{\delta x} nx + K \frac{\delta T}{\delta y} + q = 0$, un valor aproximado de horas puede ser empleado, basado en los valores anteriores de T (Ghali. A, 2006).

Los coeficientes de convección y la re- radiación h_c y h_r se puede combinar en un coeficiente global de transferencia de calor para la superficie

$$h = h_c + h_x \quad \textbf{Ecuación 10}$$

Y el calor por la convección y la re-radiación, q_{cr} , puede ser expresado por una ecuación combinando las ecuaciones $q_c = h_c(T - T_a)$ y $q_x = h_x(T - T_a)$ (Ghali. A, 2006).

$$q_{cx} = h(T - T_a) \quad \textbf{Ecuación 11}$$

En donde:

$$q_{cx} = q_c + q_x \quad \textbf{Ecuación 12.}$$

Para el análisis de distribución de la temperatura sobre el grosor de una losa o una pared, es suficiente emplear una forma simplificada unidimensional de las

ecuaciones $K \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + K \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + Q = \rho c \frac{\delta T}{\delta t}$ y $K \frac{\delta T}{\delta x} n_x + K \frac{\delta T}{\delta y} n_y + q = 0$, por la deserción el término que involucra x (o y). (Ghali. A, 2006)

3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es la energía que se produce en el tránsito de partículas debido a una diferencia de temperaturas, siempre que hay una desigualdad de temperaturas entre dos medios en contacto, se genera transferencia de calor. El flujo de calor, así como, la realización de trabajo, es un proceso mediante el cual se cambia la energía interna de un sistema (Chamarro, M.E., 2005).

La primera ley de la termodinámica establece que la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma, mientras que en la segunda ley, se establece el sentido en el cual se produce la transformación; todos los procesos de transferencia de calor conllevan a un intercambio de energía, por lo tanto se basan en la primera ley de la termodinámica (Giancoli, D. C. 2006).

Existen tres mecanismos por los cuales ocurre la transferencia de calor, los cuales son: conducción, convección y radiación.

4. EL CALOR DE HIDRATACION DEL CEMENTO

Los cambios de temperatura pueden producir esfuerzos en las estructuras de hormigón del mismo orden de magnitud que las cargas muertas o vivas. Sin embargo, las tensiones debidas a la temperatura se producen sólo cuando se restringe la expansión o contracción térmica. La restricción a la expansión o contracción térmica del hormigón puede producir esfuerzos que agrietan el concreto. (Sánchez. G. D. 2000)

4.1 CALOR DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

El calor de hidratación es el calor que se genera por la reacción química entre el cemento y el agua. La cantidad de calor generado depende, primariamente, de la composición química del cemento y cantidad, siendo el C_3A y el C_3S los compuestos más importantes para la evolución de calor. También son factores que intervienen la relación agua-cemento, finura del cemento y temperatura de curado. Un aumento de la finura, del contenido de cemento y de la temperatura de curado aumenta el calor de hidratación. (Sánchez, D. R. M. I, 2000)

La reacción química del cemento Portland puede liberar calor por muchos años. La tasa de generación de calor es mayor en las edades tempranas. Una gran cantidad de calor se genera en los tres primeros días, ocurriendo normalmente la mayor tasa de liberación de calor en las primeras 24 horas. (Incropera, F. P.1999)

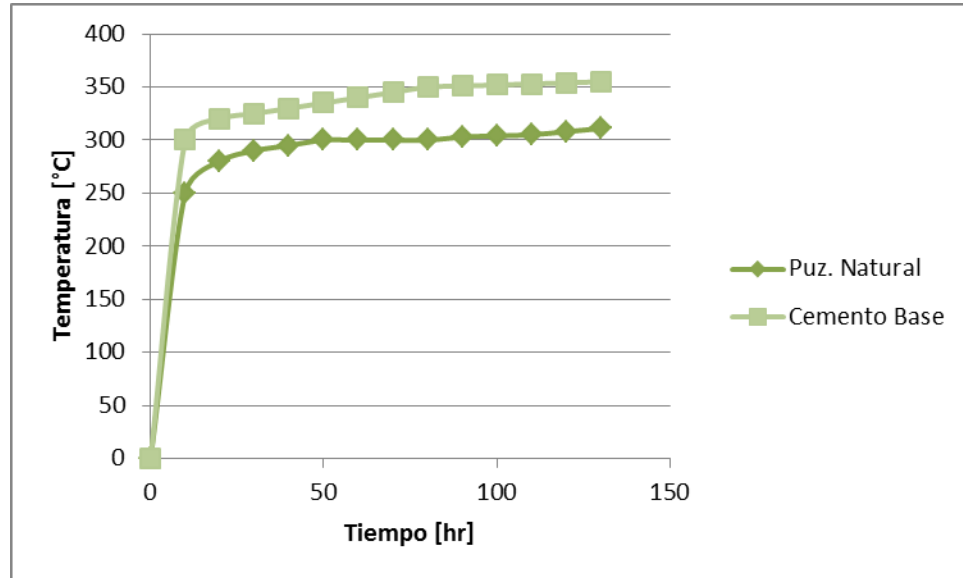
Las reacciones de hidratación del cemento portland son altamente exotérmicas, provocando el calentamiento del mortero. El desarrollo de calor es rápido durante

el fraguado y parte del endurecimiento, disminuyendo paulatinamente al hacerse la hidratación más lenta, hasta llegar a estabilizarse. Así, en los primeros 3 días se genera el 50% del calor y el 80% hasta los 7 días (Incropera, F. P., R. 1999).

Sin embargo, en las primeras horas se producen variaciones importantes de temperatura que pueden ser causa de retracciones, que a su vez dan como resultado el agrietamiento observado en algunas obras de construcción que emplean grandes masas de concreto. En este aporte de calor debido a procesos de hidratación participan los distintos constituyentes del cemento portland, de forma que es el aluminato tricálcico con 207 cal/g y la cal libre con 279 cal/g los que más calor desarrollan, y siendo el silicato bicálcico el que menos aumenta calor, con 62 cal/g. Por lo tanto, el calentamiento en la hidratación del cemento es función de la proporción de sus distintos constituyentes, de forma que es importante conocer y cuantificar el contenido de los mismos, así como de los materiales que sean incorporados como adiciones. Por este motivo, cuando a través de la incorporación de puzolanas se quieran elaborar cementos de bajo calor de hidratación, la selección de los materiales a adicionar es un tema a tener en cuenta. (Sánchez, D. R. M. I, 2000)

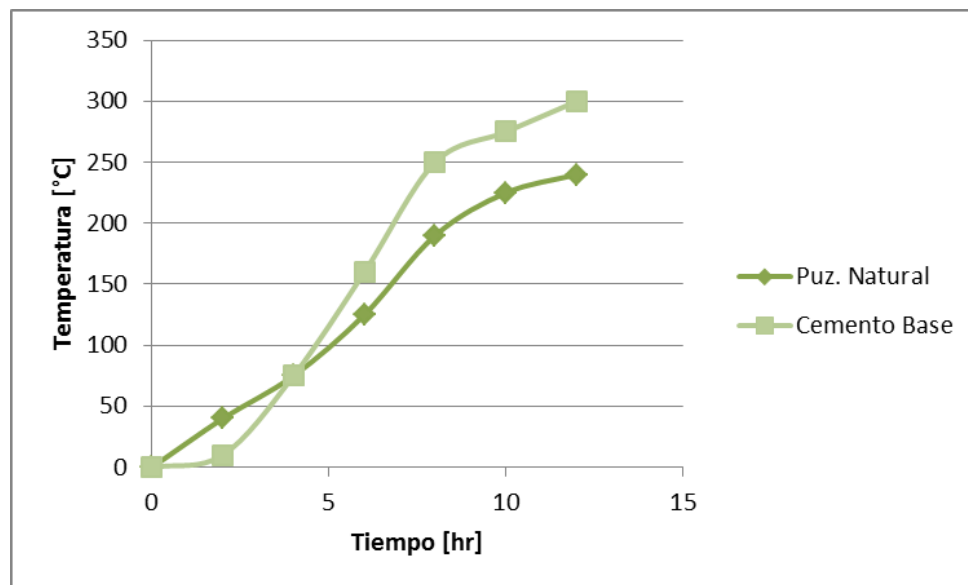
A continuación, se mostraran diferentes graficas del proceso de calor a lo largo de 120 horas, para morteros con puzolana natural, que contiene sílice, originalmente no son cementosas, pero al molerlos finamente y mezclarlas con cal, la mezcla fragua y se endurece, tal como ocurre con el cemento (Sánchez, D. R. M. I, 2000).

Figura 1. Evolución de las primeras 120 horas de calor de hidratación con el tiempo de mortero con puzolana natural



Fuente: Sánchez, D. R. M. I, 2000

Figura 2. Evolución de las primeras 120 horas de calor de hidratación con el tiempo de mortero con puzolana natural



Fuente: Sánchez, D. R. M. I, 2000

Durante las primeras horas del experimento, es posible evidenciar que los aditivos que tienen mayores dosificaciones, ocasionan un incremento en el calor de hidratación, se puede observar que a partir de la quinta hora hasta la hora número 12, la mezcla sufre reacciones altamente exotérmicas, lo que genera una alta pendiente creciente, de esta manera se hace evidente el mayor calor de hidratación que sufre la base de cemento. (Sánchez, D. R. M. I., 2000)

4.2 TIPOS DE CEMENTO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA:

En la Tabla No. 3, se muestran diferentes tipos de concreto, especificando las características y usos de cada uno

Tabla 3. Tipos y usos del cemento Portland.

TIPO	CARACTERISTICA
Tipo I	Usado en obras de hormigón común y corriente, al que no se le exigen propiedades especiales
Tipo II	Se usa cuando se requiere hormigón que este expuesto a la acción moderada de sulfatos y a obras en donde se requiere moderado calor de hidratación
Tipo III	Desarrolla altas resistencias iniciales
Tipo IV	Desarrolla baja calor de hidratación
Tipo V	Es el que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos

Fuente: Guzmán. D. S. 2001

De acuerdo a la tipología de cemento mostrada, en la Tabla No. 4 se muestran los valores típicos de las principales propiedades

Tabla 4. Tipos y usos del cemento Portland.

Cemento	Composición química en porcentaje				Finura Blaine	Resistencia a la compresión		
	C ₃ S	C ₃ S	C ₃ a	C ₃ AF		1 día	28 días	90 días
Tipo I	48	27	12	8	Min 2800	100	100	100
Tipo II	40	35	5	13	Min 2800	75	90	100
Tipo III	62	13	9	8	Max 4200	190	100	100
Tipo IV	25	50	5	12	Min 2800	55	75	100
Tipo V	38	37	4	9	Min 2800	65	85	100

Fuente: Guzmán. D. S. 2001

4.3 COMPONENTES DEL CONCRETO

El concreto está conformado por cemento Portland, agregado y agua. El cemento tiene propiedades adhesivas y cohesivas, estas propiedades dependen de su composición química, el grado de hidratación, el tamaño de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación. El proceso de hidratación es exotérmico, lo cual hace que los concretos en el fraguado aumenten la temperatura, este aumento es de vital importancia en concretos en masa, ya que al momento de iniciar el fraguado se inicia una disminución de temperatura que genera una contracción del concreto, lo que puede generar grietas (Sánchez, D. R. M. I, 2000).

En la Tabla No. 5 se muestra el calor liberado por los diferentes compuestos del cemento en diferentes edades.

Tabla 5. Calor liberado por los distintos compuestos del cemento para varias edades

compuesto	calor liberado el cal/g			
	7 días	28 días	6 meses	Hidratado totalmente
C _Y S	110	120	120	120
C _Y S	20	45	60	62
C _f a	185	205	207	207
C _f AF	40	50	70	100

Fuente: (Sánchez, D. R. M. I, 2000).

El agua cumple la función de hidratar las partículas del cemento y hace que se desarrollen sus propiedades aglutinantes, la mezcla de cemento con agua conforma el mortero que puede tener diferentes consistencias de acuerdo a la dosificación que se le asigne.

Los agregados, se usan diferentes tamaños de acuerdo al servicio que vaya a prestar el concreto, el agregado no afecta el proceso de endurecimiento del cemento, el triturado actúa como material de relleno economizando la mezcla. Esta combinación conforma el hormigón y las propiedades del agregado grueso ayuda a mejorar la resistencia a compresión del concreto (Sánchez, D. R. M. I, 2000).

Los aditivos, pueden ser reductores de agua, retardantes o acelerantes, de acuerdo a las necesidades de la obra o estructura, se utilizan para modificar las propiedades del concreto y también con fines de reducir los costos del concreto (Sánchez, D G, D, 2001)

4.4 PROPIEDADES TÉRMICAS DE HORMIGÓN

El hormigón es un material heterogéneo en el cual, los componentes tienen diferentes propiedades térmicas. Por lo tanto las propiedades térmicas del concreto dependen de varios factores, como los tipos de materiales utilizados y relaciones de volumen de agregado, la temperatura del concreto, contenido de agua y porosidad.

4.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El coeficiente de conductividad térmica se define como un flujo uniforme de calor a través de una unidad de espesor de material entre dos caras sometidas a una temperatura diferente durante una unidad de tiempo. El coeficiente está influenciado por el peso del hormigón, el tipo de áridos utilizados y el contenido de humedad del hormigón

Generalmente, un valor típico de la conductividad térmica del hormigón oscila entre $2,15 \pm 2,51$ kcal / mh ° C de acuerdo con acuerdo con la JCI, y en el rango de $1,7 \pm 2,53$ kcal / mh ° C de acuerdo con (American Concrete Institute. 2007)

4.6 CALOR ESPECÍFICO

El calor específico es un parámetro principal para la capacidad calorífica. Es la cantidad de calor requerida por unidad de masa para cambiar una temperatura de todo el volumen en un pequeño intervalo de temperatura. El calor específico del concreto de peso normal varía ligeramente de un tipo de agregado usado ya que el calor específico de la mayoría de las rocas tienen contenido mineralógico

similar. Sin embargo, el calor específico del mortero varía dependiendo en gran medida de su porosidad, contenido de agua, y las características de temperatura de la muestra. La variación del calor específico del concreto depende de estos factores. El valor de calor específico representante de hormigón está en el intervalo $0,27 \pm 0,31$ kcal / kg ° C de acuerdo a JCI y $0,22 \pm 0,24$ kcal / kg ° C de acuerdo con ACI. (Kosmatka. H. S.. J. 2004).

Por lo tanto, el calor de hidratación debe ser controlada a fin de evitar grietas térmicas de hormigón en masa por parte de ciertos métodos de enfriamiento, tales como un método de pre-enfriamiento o un método de refrigeración por tubos. (Çengel, Y.A., 2007).

Los materiales pueden ser seleccionados para minimizar o maximizar el calor de hidratación, dependiendo de la necesidad. Cementos con mayor contenido de silicato tricálcico y aluminato tricálcico, así como una finura superior, como cemento tipo III, tienen mayores tasas de generación de calor que otros cementos. El contenido de sulfatos, en su relación con el control de la hidratación del aluminato de calcio, participa en la tasa de liberación de calor (Çengel, Y.A., 2007).

Una finura superior proporciona una mayor área de superficie que se humedece, resultando en una aceleración de la reacción entre el cemento y el agua. Esto provoca un aumento en la tasa de liberación de calor en edades tempranas, pero no puede influir en la cantidad total de calor desarrollado a lo largo de varias semanas (Çengel, Y.A., 2007).

Otros factores que influyen en el desarrollo de calor en concreto incluyen el contenido de cemento, relación agua-cemento, la colocación y la temperatura de

curado, la presencia de minerales y químicos aditivos, y las dimensiones del elemento estructural.

En general, los contenidos de cemento más altos resultan en un mayor desarrollo de calor. (American Concrete Institute. 2007)

La hidratación del cemento genera un aumento de temperatura de aproximadamente 4,7 ° C a 7,0 ° C por cada 50 kg de cemento por m³ de hormigón (10 ° F a 15 ° F por 100 libras de cemento por yd³ hormigón) en 18 a 72 horas. (NRCMCA, National Ready Mixed Concrete Association, 2009). Al comparar los hormigones de contenido de cemento iguales pero diferentes relaciones agua-cemento, se mezcla con relaciones agua-cemento más altos tienen más agua y espacio microestructural disponibles para la hidratación del cemento, lo que resulta en un aumento de tasa de desarrollo de calor. El aumento de calor de hidratación a los 7 días como resultado de un aumento en la relación agua-cemento de 0.4 a 0.6 es aproximadamente 11% para el cemento Tipo I Sánchez. G. D. (2000).

El efecto relación agua-cemento es menor en comparación con el efecto del contenido de cemento. Sin embargo, una relación agua-cemento en el hormigón inferior se logra aumentando los resultados de contenido de cemento en una mayor generación de calor. Las temperaturas más altas aceleran en gran medida la velocidad de hidratación y la tasa de liberación de calor a edades tempranas (menos de 7 días). Los aditivos químicos que aceleran la hidratación también aceleran la liberación de calor y aditivos que retardan el desarrollo de calor, también ocasionan un retardo en la hidratación. Adiciones minerales, tales como cenizas volantes, pueden reducir significativamente el desarrollo de calor de hidratación (Çengel, Y.A., 2007).

A menudo en lugar de utilizar un cemento especial, es posible cambiar algunas de las propiedades de los cementos utilizados más comúnmente mediante la incorporación de un aditivo adecuado en la mezcla. En otros casos, tal incorporación es el único medio de lograr el efecto deseado. Un gran número de productos patentados están disponibles, sus efectos deseables son descritos por los fabricantes, pero algunos otros efectos no se conocen, por lo que un enfoque cauteloso, incluyendo las pruebas de rendimiento, es sensato, es importante tener en cuenta que un aditivo es una sustancia que se añade en la etapa de fabricación del cemento (Khal. K. H, 2000).

4.7 CEMENTO EN COLOMBIA

Las Normas Técnicas Colombianas (NTC), establece seis (6) tipos de cemento en Colombia:

- El cemento portland tipo 1, para uso general, que tienen materiales que incluyen aire
- El cemento portland de resistencia media ante presencia de sulfatos y posee un calor de hidratación moderada.
- Cemento portland tipo 3 es el que presenta alta resistencia inicial
- El cemento portland tipo 4, es aquel que desarrolla un calor de hidratación más bajo, por lo cual es indicado para construcción de obras en las que se requiera gran volumen de hormigón, como por ejemplo presas.
- Cemento portland de alta resistencia a los sulfatos
- El cemento portland blanco (Kosmatka. S. H, 2004)

4.8 HORMIGÓN EN MASA

La tasa y la cantidad de generación de calor son importantes en las estructuras de hormigón que tienen masa considerable. Un aumento de la temperatura acompaña a la expansión térmica, y el enfriamiento no uniforme del hormigón en masa crea tensiones indeseables. Las fisuras por problemas térmicos tienden a ser anchas y su recorrido abarca la totalidad de la estructura. Esto, tiene efectos desfavorables sobre la resistencia, durabilidad y permeabilidad. Por otra parte, de hormigón en masa en las estructuras de grandes dimensiones, se acostumbra a fundir el concreto por etapas, es decir, se aplica una capa y luego que esta fragüe, se aplica la siguiente, o bien, se realizan juntas de construcción (Mehta, P. K, 2000).

Los esfuerzos debidos al calor de hidratación se dividen en dos: esfuerzo de restricción interna y el esfuerzo de contracción externa. El esfuerzo de restricción interna se traduce en el efecto de restricción de los cambios volumétricos debido a las diferentes distribuciones de temperatura dentro de la estructura de hormigón. Por ejemplo, en el estado inicial de hidratación, las diferencias de temperatura entre la superficie y partes internas dan lugar a la tensión superficial. Considerando que en una etapa posterior, las deformaciones resultantes en las partes internas son mayores que los que están en la superficie, resultando así una tensión interna. La magnitud de la tensión interna es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y las partes internas.

El esfuerzo de contracción externo es causado por restringir el cambio volumétrico del hormigón fresco en contacto con el subsuelo o el sustrato de hormigón fundido previamente (Mehta, P. K, 2000)

Estas condiciones pueden resultar en las fases iniciales debido al calor de hidratación y durante las etapas posteriores debido a cambios de temperatura ambiente. Otro factor es un diferencial de temperatura entre un miembro de hormigón en masa y los elementos adyacentes. A medida que el elemento de masa se enfría desde su temperatura pico. (NRMCA, 2009)

El principal factor que define un elemento de hormigón en masa es su dimensión mínima. American Concrete Institute (ACI) sugiere que un miembro de hormigón con una dimensión mínima de 1,3 m debe considerarse como hormigón en masa. Algunas especificaciones usan una relación de volumen - superficie.

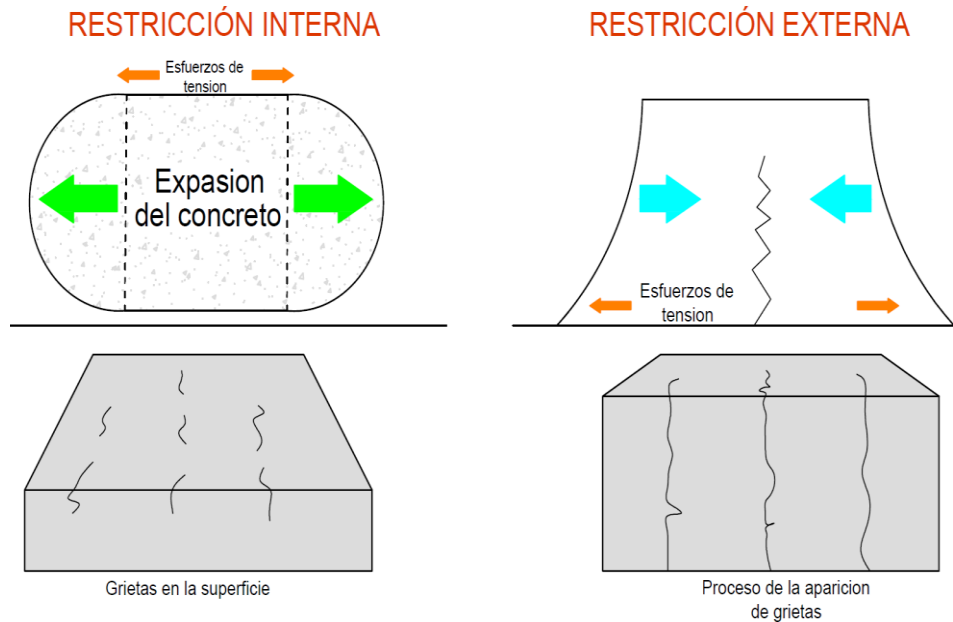
El control de la formación de grietas en estructuras de hormigón en masa es un tema importante hoy porque muchas estructuras civiles y arquitectónicas, como enormes estructuras costeras, puentes de tramo largo, centrales eléctricas y edificios de gran altura, son cada vez más y más grande.

Tal tipo de agrietamiento generalmente tiene lugar como consecuencia de la tracción excesiva generada por tensiones debidas a las cargas y los cambios de temperatura. Particularmente en hormigón en masa, el control de temperatura es una clave más crítica para prevenir o minimizar grietas. Por lo tanto, muchos ingenieros e investigadores están tratando de reducir el calor de hidratación, que es uno de los factores más importantes relacionados con la calidad de las estructuras de hormigón en masa.

Durante la hidratación del hormigón el calor de hidratación aumenta la temperatura interna del hormigón e induce una diferencia térmica entre el interior y el exterior de la estructura debido a la baja conductividad térmica del hormigón. Este hueco térmico genera tensión de tracción como resultado de la condición de retención de la parte interior y exterior de la estructura. Posteriormente, grietas térmicas se

producen cuando la tensión de tracción alcanza la resistencia a la tracción del hormigón. (Mehta, P. K, 2000)

Figura 3. Grieta térmica en concreto

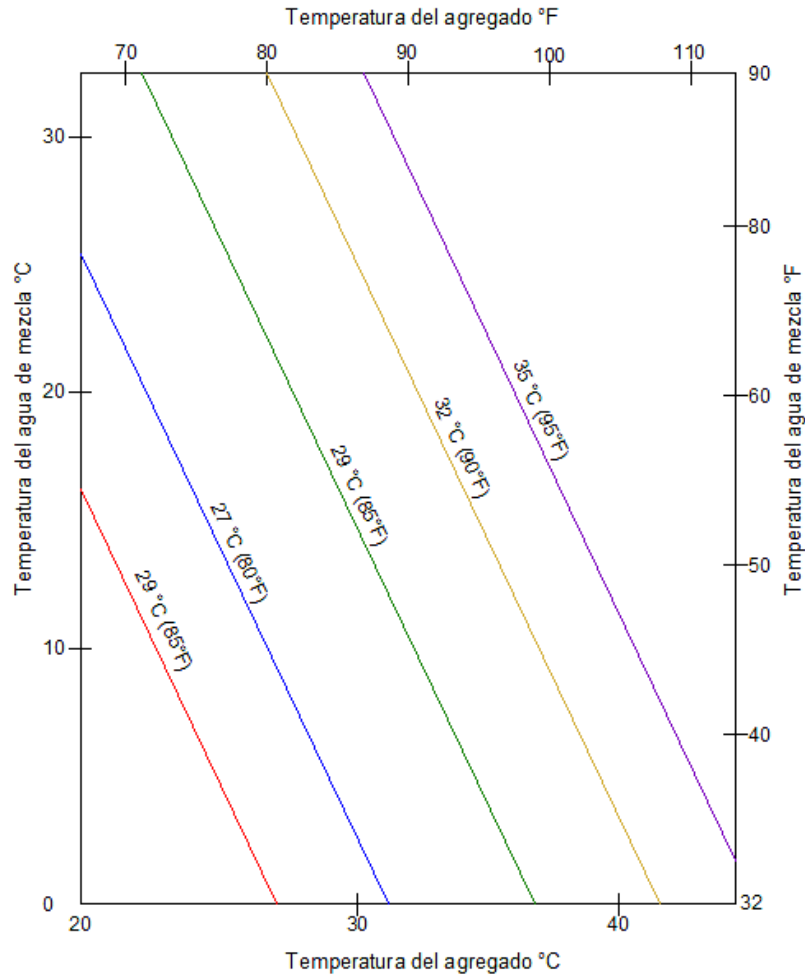


Fuente: J.H. haetal (2014).

4.9 ¿CÓMO PREDECIR LA TEMPERATURA EN EL CONCRETO?

Para disminuir la problemática del calor de hidratación, el método más usual es enfriar los materiales antes de realizar el mezclado, sobretodo el agua y los agregados, en la Figura No.3 se muestra como la temperatura de la mezcla se ve afectada por la temperatura de cada uno de los materiales.

Figura 4. Efecto de la temperatura de los ingredientes sobre la temperatura del concreto, recién mezclado



Fuente: Kosmatka. S. H. 2004

Una forma eficiente de predecir la temperatura del concreto es mediante la ecuación 13 (Kosmatka. H. S, 2004):

$$T = \frac{0.22(T_a M_a + T_c M_c) + T_w M_w + T_{wa} M_{wa}}{0.22(M_a + M_c) + M_w + M_{wa}}$$

Ecuación 13

En donde

- T = temperatura del concreto fresco en °C
- T_a, T_c, T_w y T_{wa} = temperatura en °C de los agregados, cemento, agua y humedad libre en los agregados, respectivamente.
- M_a, M_c, M_w, M_{wa} = masa en Kg de los agregados, cemento, agua y humedad libre en los agregados, respectivamente.

El agua es el material que tiene la posibilidad de enfriarse rápidamente, la tubería, tanques o depósitos en donde se almacene el agua deben estar bajo tierra para evitar que esta, reciba rayos solares y de esta manera garantizar su baja temperatura al momento de la mezcla, es importante recalcar que, debido a la poca cantidad de agua que generalmente está presente en la mezcla, la reducción de temperatura en el concreto es máximo de 4.5 °C.

Otro método utilizado es emplear hielo en el agua, considerando el calor de fusión del hielo, lo que genera un cambio en la ecuación de la temperatura del concreto fresco (Kosmatka. H. S, 2004):

$$T(^{\circ}C) = \frac{0.22(T_a M_a + T_c M_c) + T_w M_w + T_{wa} M_{wa} - 80M_i}{0.22(M_a + M_c) + M_w + M_{wa} + M_i} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$T(^{\circ}F) = \frac{0.22(T_a M_a + T_c M_c) + T_w M_w + T_{wa} M_{wa} - 112M_i}{0.22(M_a + M_c) + M_w + M_{wa} + M_i} \quad \text{Ecuación 15}$$

En donde M_i es la masa en kg del hielo.

En la tabla No. 6 se refleja el efecto de la adición de 44 kg de hielo molido en la reducción del concreto

Tabla 6. Efecto del hielo sobre la temperatura del concreto.

Material	Masa M, kg	Calor específico kj/kg*K	Joules para variar la temperatura, 1 °F	Temperatura inicial del material T, °F	Joules totales en el material
	(1)	(2)	(3) Col 1xCol 2	(4)	(5) Col 3xCol 4
Cemento	564 (Mc)	0.22	124	150 (Tc)	18600
Agua	207 (Mw)	1.00	207	80 (Tw)	16560
Agregados totales	3100 (Ma)	0.22	682	80 (Ta)	54560
Hielo	75(Mi)	1	75	32(Ti)	2400
			1088		92120
Menos 75 (Mi) x calor de fusión, (144 Btu/lb)					-10800
					81320

Fuente: Kosmatka.S.H. 2004

En cuanto a los agregados, la forma de mantenerlos fríos es protegerlos del sol y realizar rociados con agua dulce constantemente, cuidando de prevenir grandes variaciones en la humedad relativa de la superficie del agregado y así generar problemas de asentamiento (Kosmatka. H. S, 2004):

5. EJEMPLO DE CALOR DE HIDRATACION EN MIDAS CIVIL

El análisis del calor de hidratación se puede lograr analizando la transferencia de calor y la tensión térmica del concreto. El análisis de la transferencia de calor implica calcular el cambio de temperaturas nodales con el tiempo debido a la fuente de calor (interna o externa) y por cual mecanismo de transferencia de calor se lleva a cabo (conducción, convección o radiación), que tienen lugar en el proceso de generación de calor de hidratación del cemento.

El Análisis de tensión térmica proporciona cálculos de esfuerzos del hormigón en masa en cada etapa basada en el cambio de la distribución de la temperatura nodal con el tiempo como resultado del análisis de transferencia de calor. Con el fin de mostrar claramente la incidencia del volumen de concreto en el calor de hidratación del mismo, en este capítulo, se realizaran varios modelos que consisten en fragmentos de dados de concreto de 1.00 m x 1.00 m, 1.50 m x 1.50 m y 2.00 m x 2.00 m, todos con variación en altura desde los 0.20 m a 1.00 m.

Se maneja una discretización de 0.10 m y restricciones internas y externas, para observar claramente los resultados. Debido a que se van a manejar masas de concreto independientes, solo se maneja una etapa de construcción. Una vez obtenidos los resultados de las diferentes geometrías, se realizara un análisis sobre la incidencia del volumen de concreto en la afectación del elemento por el fenómeno del calor de hidratación. En este caso se utilizara bajo el calor de hidratación del cemento. El aumento máximo de la temperatura adiabática (K) y el coeficiente de la velocidad de reacción (α) se basan en valores experimentales relacionados con el contenido de la unidad de cemento.

5.1 DEFINICIÓN DE MATERIALES.

En este caso se utilizará la norma ASTM, que es el reglamento estadounidense que se refiere a todo lo relacionado con el concreto, el concreto a usar será “Grade C4000”, lo que quiere decir que tiene una presión de 4000 lb/in² 28×10^3 kgf/m². Al seleccionar este tipo de concreto, el software automáticamente utiliza las características del concreto, como se muestra en la Tabla No. 7

Tabla 7. Propiedades del concreto asumidas por el software para concreto C4000

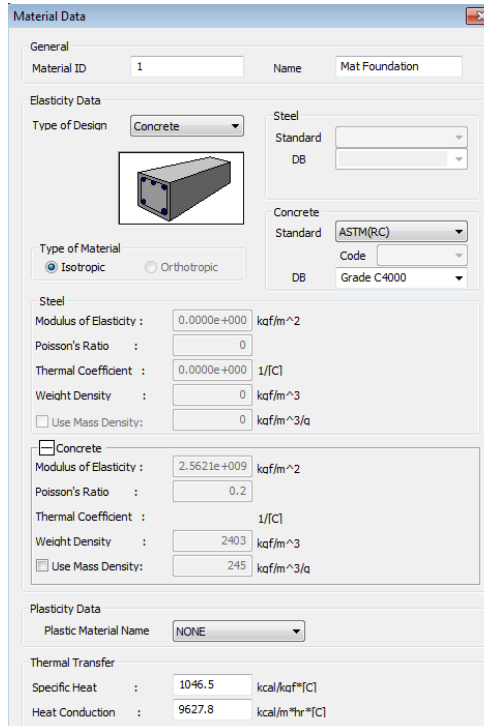
Característica	valor
Módulo de elasticidad	2.562 e + 9 kgf/m ²
Coefficiente de Poisson	0.2
Coefficiente térmico	9.00 e -6 1/[C]
Densidad del concreto	2400 kgf/m ³

En cuanto a las propiedades de transferencia de calor, se pueden observar en la Tabla No. 8, estos son valores de los que se describieron anteriormente

Tabla 8 Propiedades de transferencia de calor asumida por el software para concreto grado C4000

Característica	valor
Calor específico	0.25 Kcal/kgf*[°C]
Conducción del calor	2.3 Kcal/m*hr*[°C]

Figura 5. Propiedades del concreto



5.2 INCIDENCIA DEL TIEMPO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO

5.2.1 Retracción por secado y fluencia del concreto Como se indicó, la retracción y la fluencia del concreto corresponden a deformaciones a lo largo del tiempo, la retracción se debe a la diferencia de humedades entre el concreto y el ambiente, mientras que la fluencia es debida a la carga de tensión, las dos presentan ciertas similitudes como por ejemplo que se presentan en el estado sólido del concreto y sus curvas de deformación-tiempo son similares.

El software ofrece una variedad de códigos al momento de definir estas características, para este caso se usa el American Concrete Institute (ACI), con el fin de agregar el asentamiento de la mezcla del concreto.

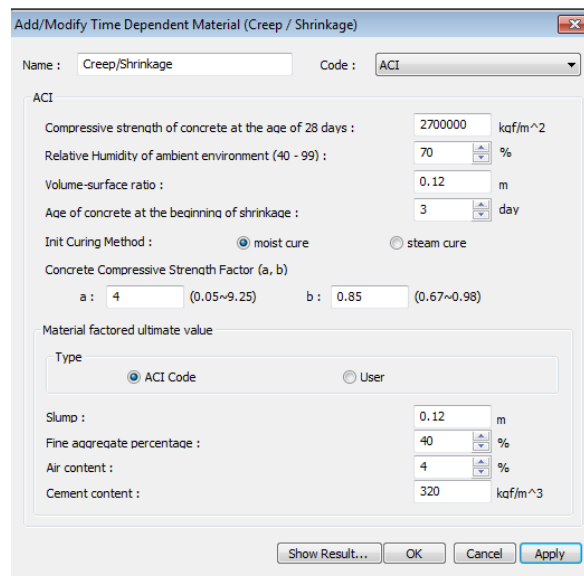
Para hablar se estas características, se recurrirá a la tabla No. 9

Tabla 9. Propiedades de retracción y fluencia del concreto

Característica	valor
Esfuerzo a compresión a los 28 días	2700000 kgf/m ²
Humedad relativa del medio ambiente	70 %
Relación volumen - área	0.12 m
Edad del hormigón en el momento de la contracción	3 días
Asentamiento de la mezcla	0.12 m
Porcentaje de agregado fino	40 %
Contenido de aire	4 %
Contenido de cemento	320 kgf/m ³

Para el método de curado del concreto, se elige curado húmedo, ya que es el más usado en Colombia (American Concrete Institute (ACI), 2007),

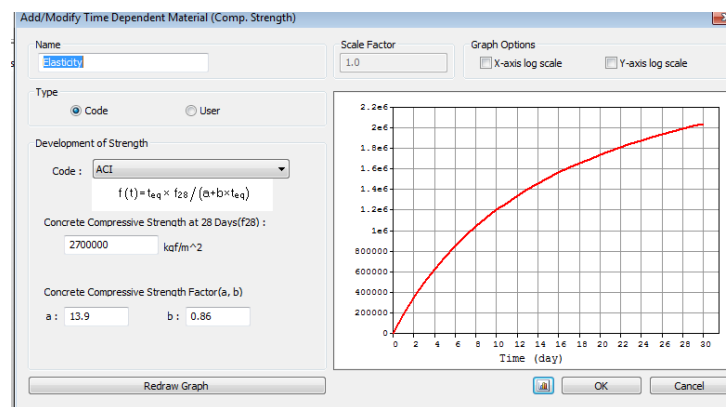
Figura 6. Propiedades de retracción y fluencia del concreto



5.2.2 Esfuerzo de compresión La resistencia del concreto tiende a aumentar con el tiempo de la siguiente manera.

En los primeros días, del fraguado del concreto (3 días) aumenta a gran velocidad, pero con el paso del tiempo tiende a disminuir su velocidad de aumento, esta propiedad sigue aumentando en el tiempo de manera indefinida. Como se mencionó anteriormente, la resistencia al concreto a los 28 días se tomara como 2700000 kgf/m²

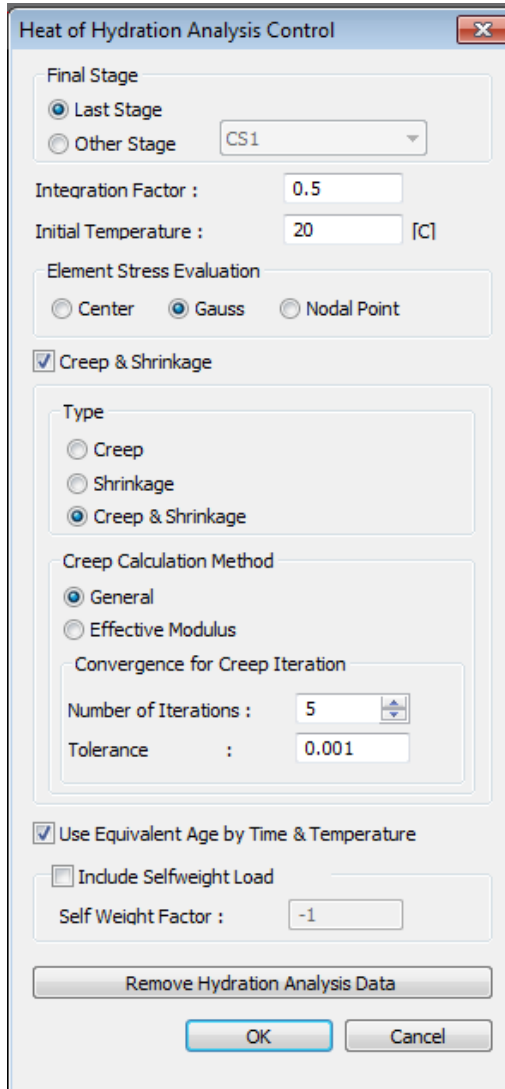
Figura 7. Grafica Tiempo Vs Elasticidad.



5.2.3 Calor de hidratación. Una vez ingresadas las características físicas, químicas y térmicas del concreto es necesario ingresar al software los valores para el correspondiente análisis de calor de hidratación.

Al ingresar la información al software, se solicita que este, realice el análisis de esfuerzos de elementos por el método de Gauss, al igual que se ingresa 5 como valor de iteraciones, con el fin de realizar un modelo de análisis rápido y sencillo.

Figura 8. Datos para análisis de calor de hidratación



Heat of Hydration Analysis Control

Final Stage
 Last Stage
 Other Stage: CS1

Integration Factor : 0.5
 Initial Temperature : 20 [C]

Element Stress Evaluation
 Center Gauss Nodal Point

Creep & Shrinkage

Type
 Creep
 Shrinkage
 Creep & Shrinkage

Creep Calculation Method
 General
 Effective Modulus

Convergence for Creep Iteration
 Number of Iterations : 5
 Tolerance : 0.001

Use Equivalent Age by Time & Temperature

Include Selfweight Load
 Self Weight Factor : -1

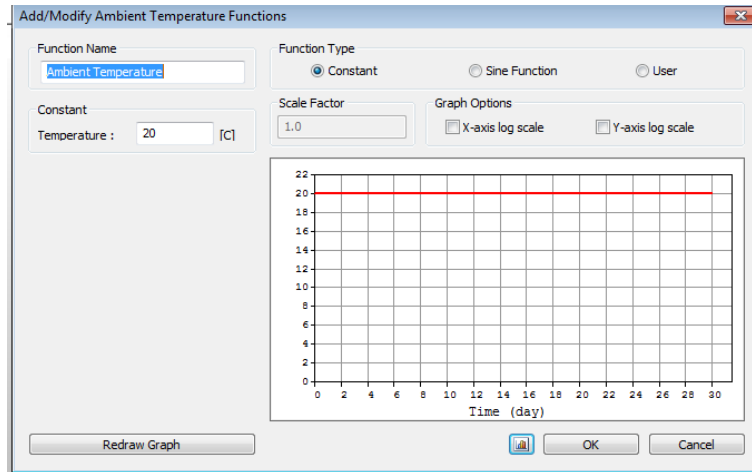
Remove Hydration Analysis Data

OK Cancel

5.3 TEMPERATURA AMBIENTE

Es necesario ingresar valores de la temperatura ambiente, para que el software realice el cálculo de la radiación con la temperatura del concreto. Este valor se asume como un valor de 20°C, y que es constante a lo largo del fraguado del concreto.

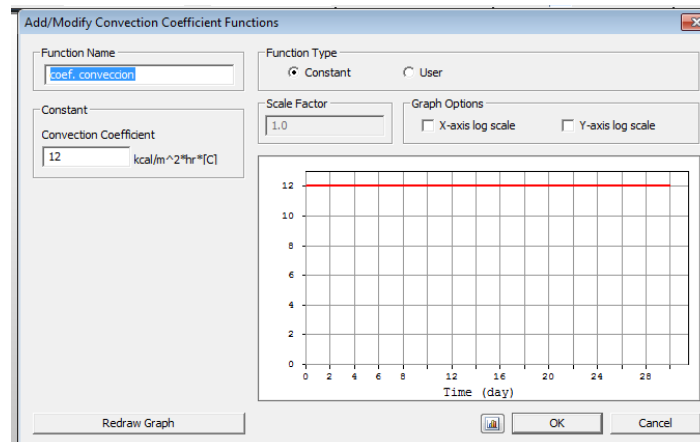
Figura 9. Función temperatura ambiente.



5.4 COEFICIENTE DE CONVECCION

Para el coeficiente de convección, se asume un valor de $12 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{C}$, a la vez que se elige la opción de un valor constante

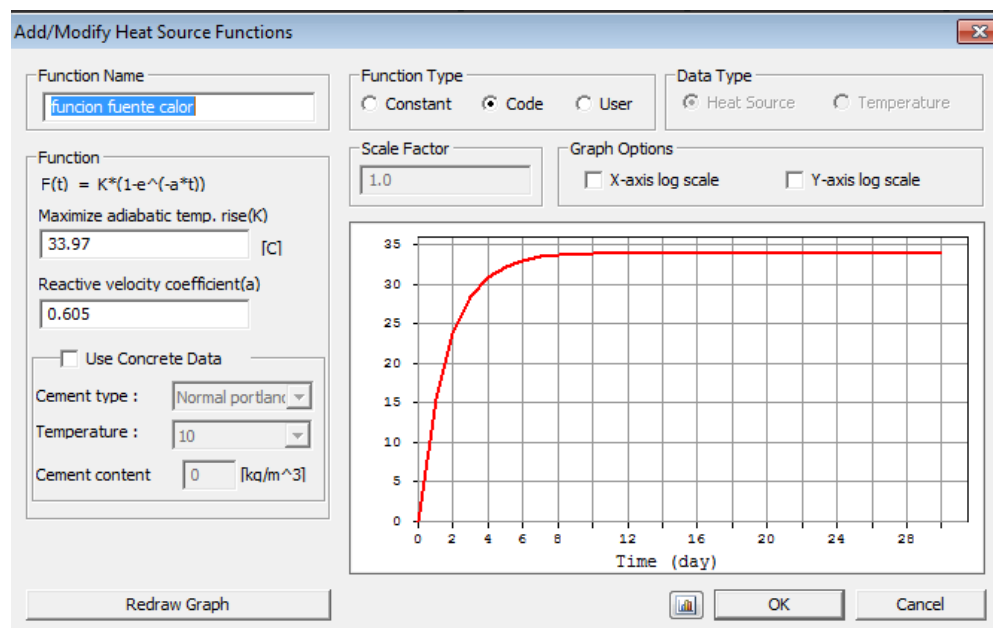
Figura 10. Función para el coeficiente de convección



5.5 DEFINICIÓN DE FUNCIONES DE FUENTE DE CALOR

Las funciones fuente de calor definen el estado de emisión de calor en el proceso de hidratación, que dependen del tipo de cemento y la unidad de contenido de cemento. Para la mezcla de concreto utilizada, el máximo aumento de temperatura adiabática y coeficiente de velocidad reactiva automáticamente se calculan con base a ecuaciones experimentales e introduciendo el tipo de cemento, se especifican temperatura y el contenido de unidad de cemento (Incropera, F. P. 1999)

Figura 11. Definición de la función de fuente de calor.



6. RESULTADOS DEL SOFTWARE.

Una vez ingresados los valores solicitados por el software para el análisis de las estructuras mencionadas, se debe extraer la información necesaria para realizar el análisis de calor de hidratación.

Para términos de modelo, se generan medios cubos, es decir, para un cubo de 1.00 m x 1.00 m, se realiza un cubo de 0.50 m x 0.50 m, con el fin de observar la temperatura en la parte interna de la estructura.

6.1 DADO DE 1.00 M X 1.00 M

Figura 12. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la primera hora

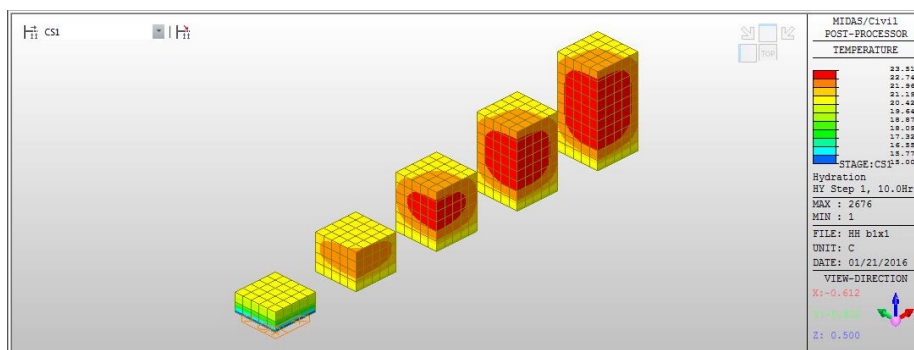


Figura 13. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la segunda hora

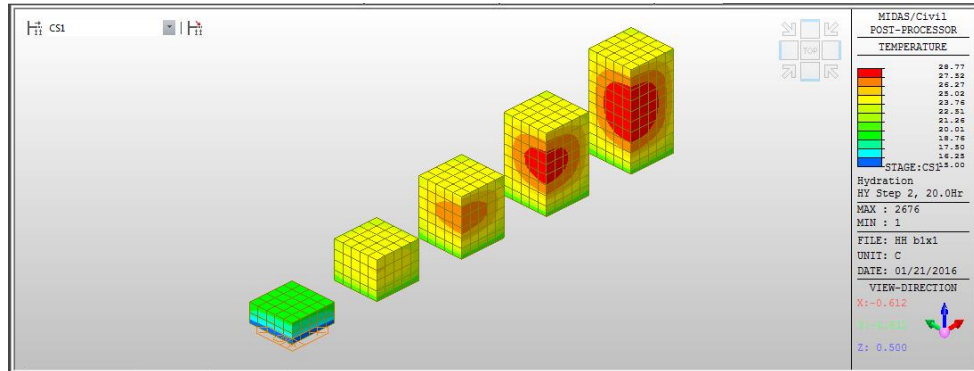


Figura 14. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la tercera hora

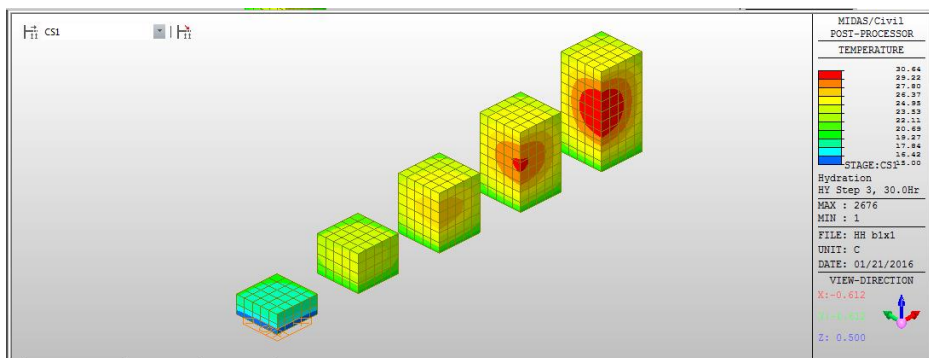


Figura 15. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la cuarta hora

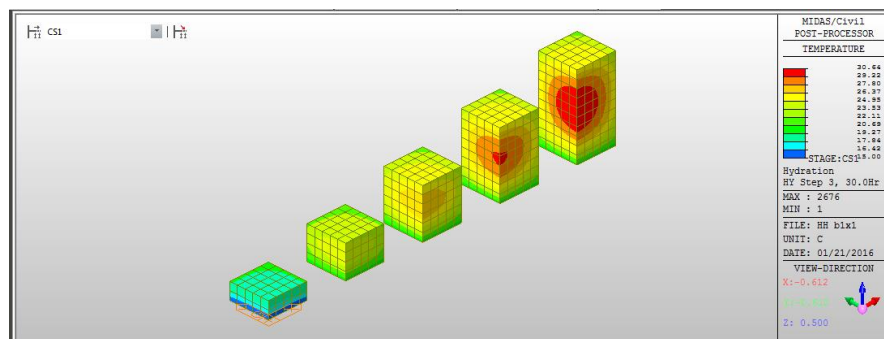


Figura 16. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la quinta hora

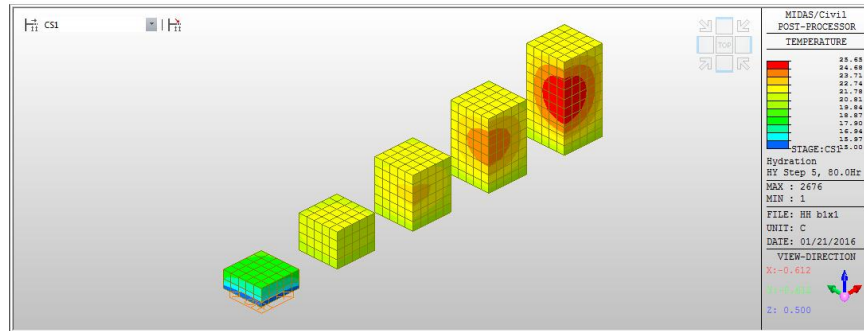


Figura 17. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la sexta hora.

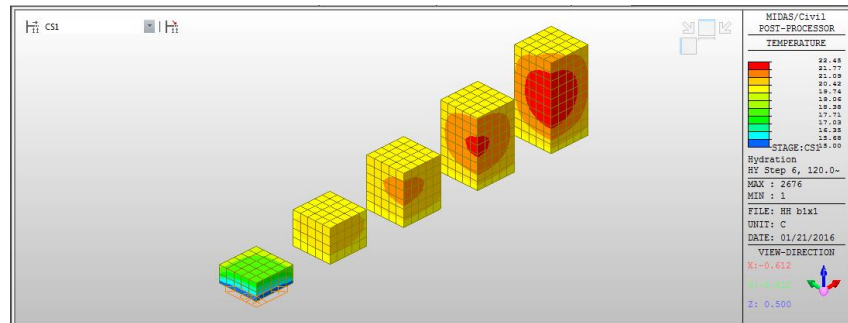
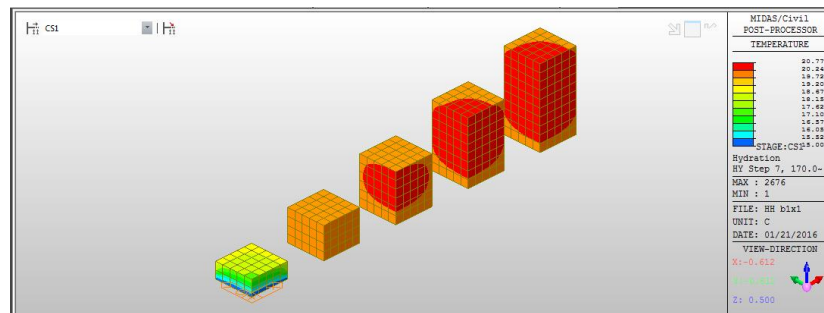


Figura 18. Resultados de temperatura para dado de 1.00 m x 1.00 m en la séptima hora.

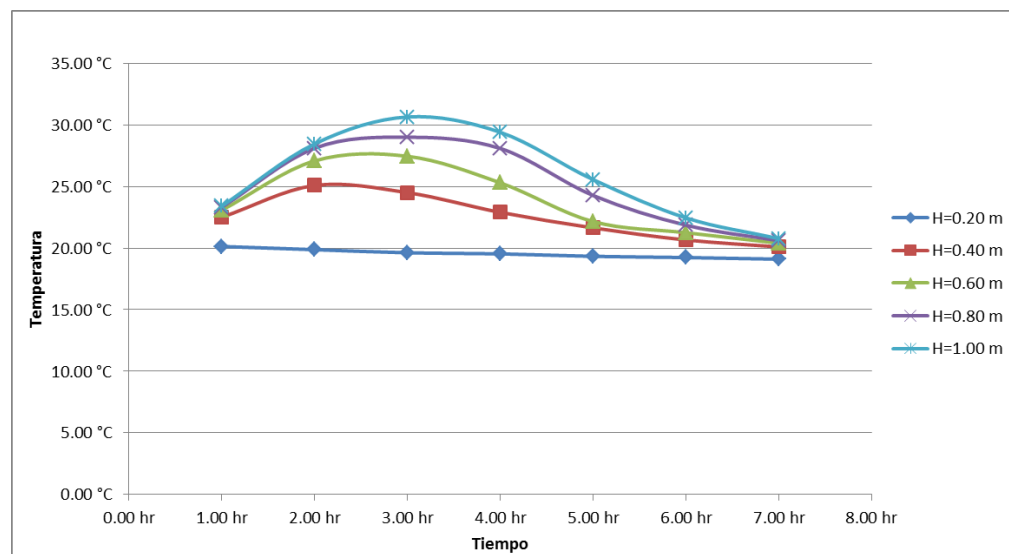


A modo de resumen se tiene que para un dado de 1.00 m x 1.00 m, con diferentes alturas la temperatura varía de acuerdo al tiempo de tal como se muestra en la Tabla No. 10.

Tabla 10. Variación de temperatura según tiempo y altura para dado de 1x1

Altura/tiempo	1.00 hr	2.00 hr	3.00 hr	4.00 hr	5.00 hr	6.00 hr	7.00 hr
0.20 m	20.13 °C	19.87 °C	19.62 °C	19.53 °C	19.53 °C	19.23 °C	19.10 °C
0.40 m	21.00 °C	25.08 °C	22.65 °C	22.90 °C	21.64 °C	20.66 °C	20.10 °C
0.60 m	23.07 °C	27.07 °C	27.45 °C	25.30 °C	22.15 °C	21.25 °C	20.40 °C
0.80 m	23.30 °C	28.10 °C	29.00 °C	28.09 °C	24.27 °C	21.86 °C	20.60 °C
1.00 m	23.40 °C	28.45 °C	30.64 °C	29.40 °C	25.56 °C	22.45 °C	20.77 °C

Figura 19. Grafica de variación de temperatura respecto al tiempo para diferentes alturas del dado de 1.00m X 1.00 m



Las mayores concentraciones de calor se observan en la parte interna del dado, en la parte externa del elemento se presenta una menor temperatura, debido al intercambio de moléculas con el medio ambiente

6.2 DADO DE 1.50 M X 1.50 M

Es importante tener en cuenta que el modelo del dado anterior, no es útil para realizar una nueva estructura, lo ideal es introducir las propiedades de materiales, de temperatura y demás, que se mencionaron anteriormente. Para términos de modelo, se generan medios cubos, es decir, para un cubo de 1.50 m x 1.50 m, se realiza un cubo de 0.75 m x 0.75 m, con el fin de observar la temperatura en la parte interna de la estructura.

Figura 20. Modelación de dado de 1.50 m X 1.50m

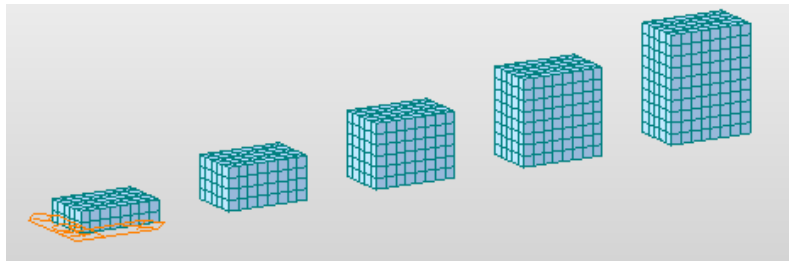


Figura 21. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la primera hora.

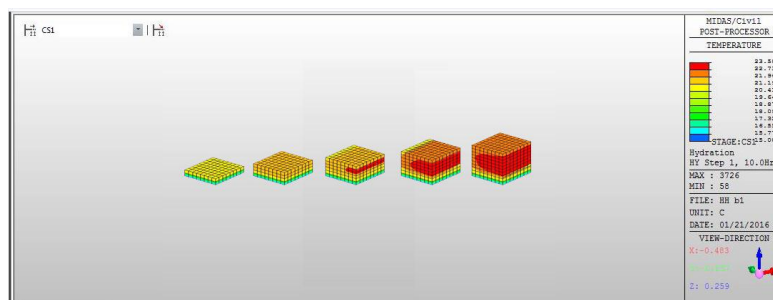


Figura 22. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la segunda hora.

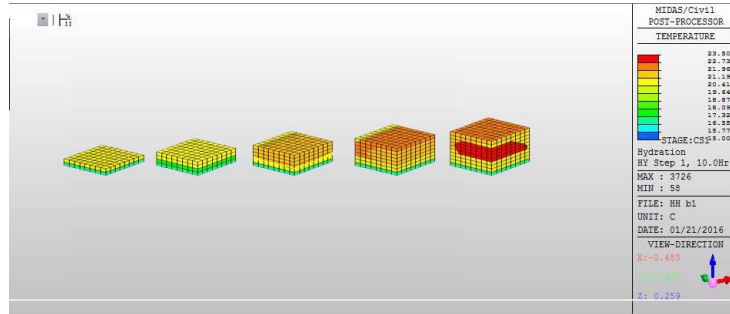


Figura 23. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la tercera hora.

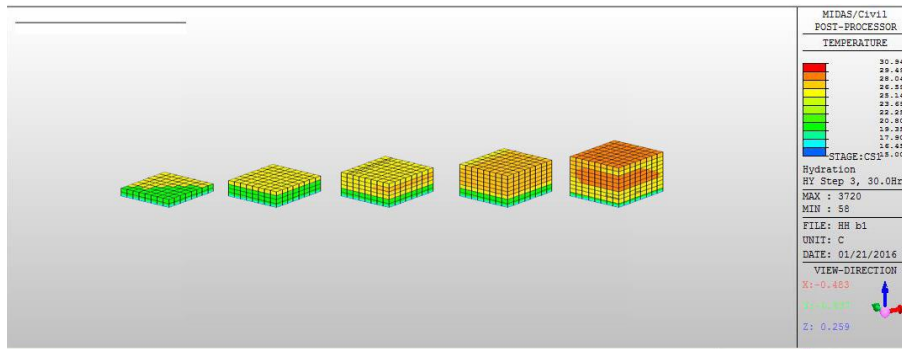


Figura 24. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la cuarta hora.

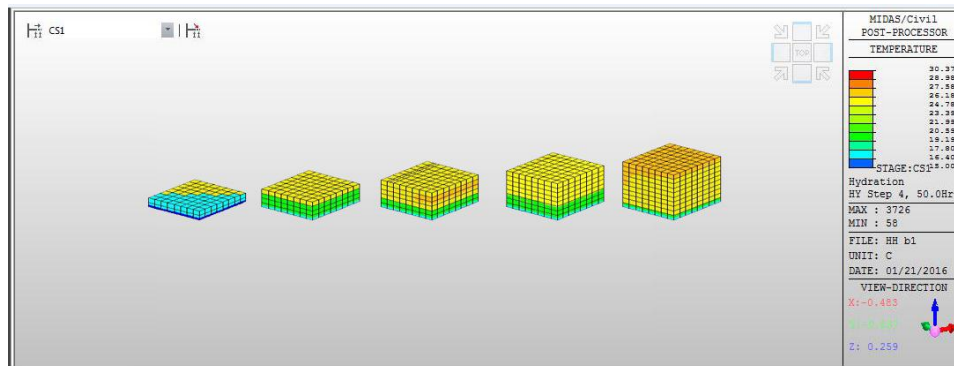


Figura 25. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la quinta hora.

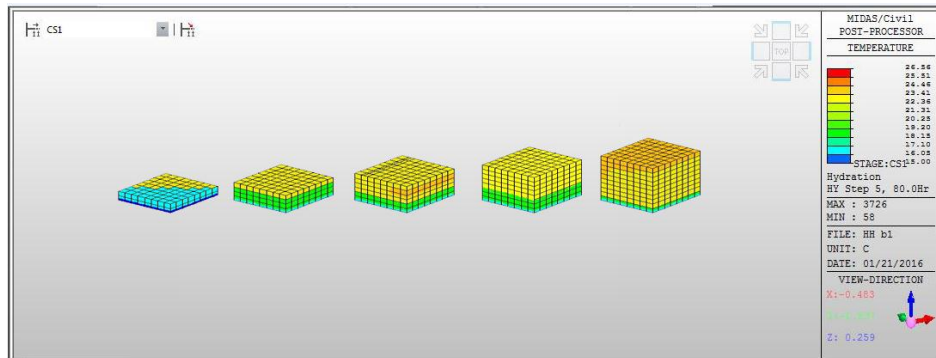


Figura 26. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la sexta hora.

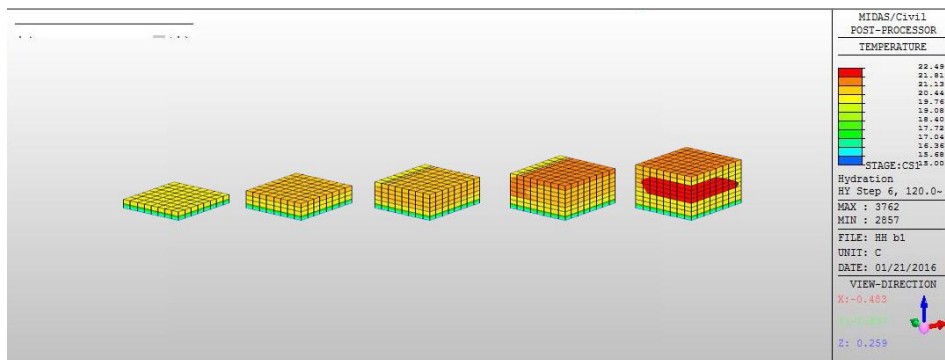


Figura 27. Resultados de temperatura para dado de 1.50 m x1.50 m en la séptima hora.

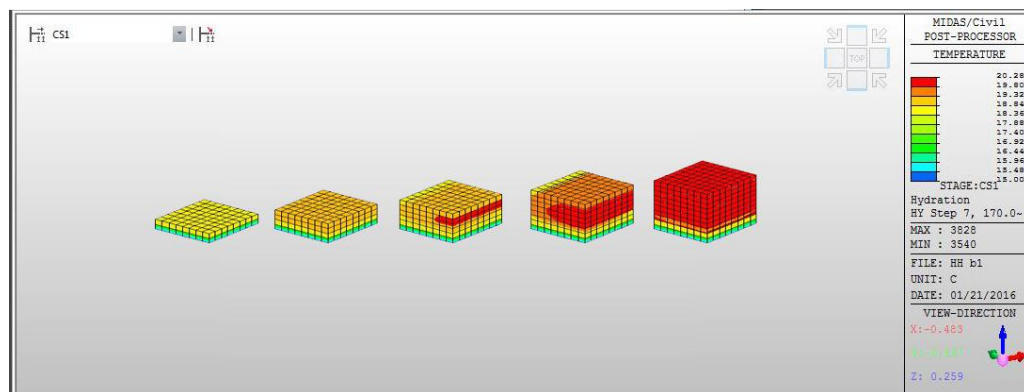
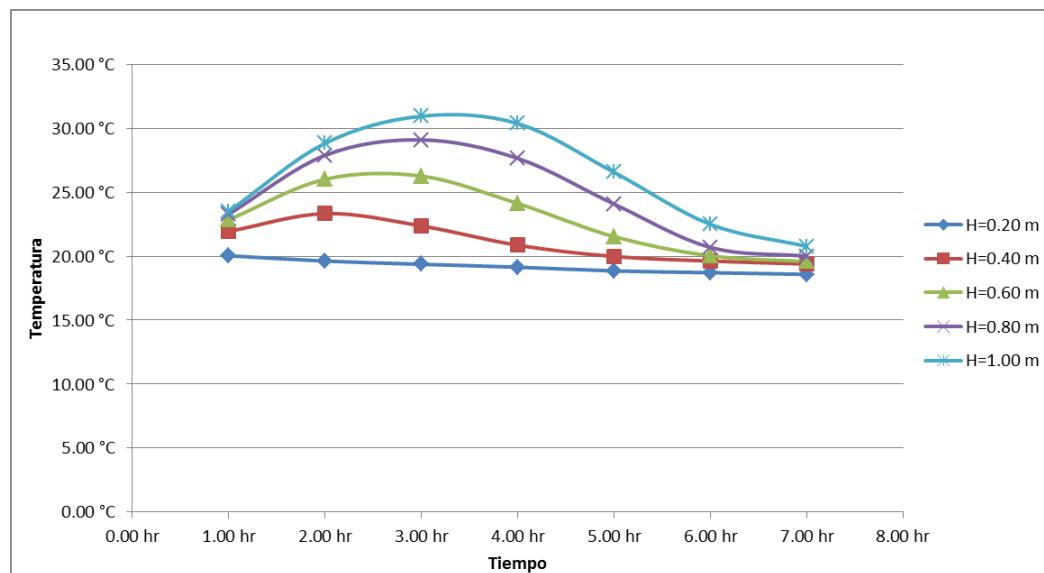


Tabla 11. Variación de temperatura según tiempo y altura para dado de 1.50 m x 1.50 m

Altura/tiempo	1.00 hr	2.00 hr	3.00 hr	4.00 hr	5.00 hr	6.00 hr	7.00 hr
0.20 m	20.04 °C	19.62 °C	19.37 °C	19.14 °C	18.85 °C	18.71 °C	18.58 °C
0.40 m	21.94 °C	23.33 °C	22.37 °C	20.86 °C	19.98 °C	19.62 °C	19.39 °C
0.60 m	22.85 °C	26.01 °C	26.26 °C	24.12 °C	21.53 °C	20.03 °C	19.58 °C
0.80 m	23.28 °C	27.88 °C	29.09 °C	27.65 °C	24.08 °C	20.69 °C	20.00 °C
1.00 m	23.50 °C	28.82 °C	30.94 °C	30.37 °C	26.56 °C	22.49 °C	20.77 °C

Figura 28. Grafica de variación de temperatura respecto al tiempo para diferentes alturas del dado de 1.50m X 1.50 m



6.3 DADO DE 2.00 M X 2.00 M

Para términos de modelo, se generan medios cubos, es decir, para un cubo de 2.00 m x 2.00 m, se realiza un cubo de 1.00 m x 1.00 m, con el fin de observar la temperatura en la parte interna de la estructura.

Figura 29. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la primera hora

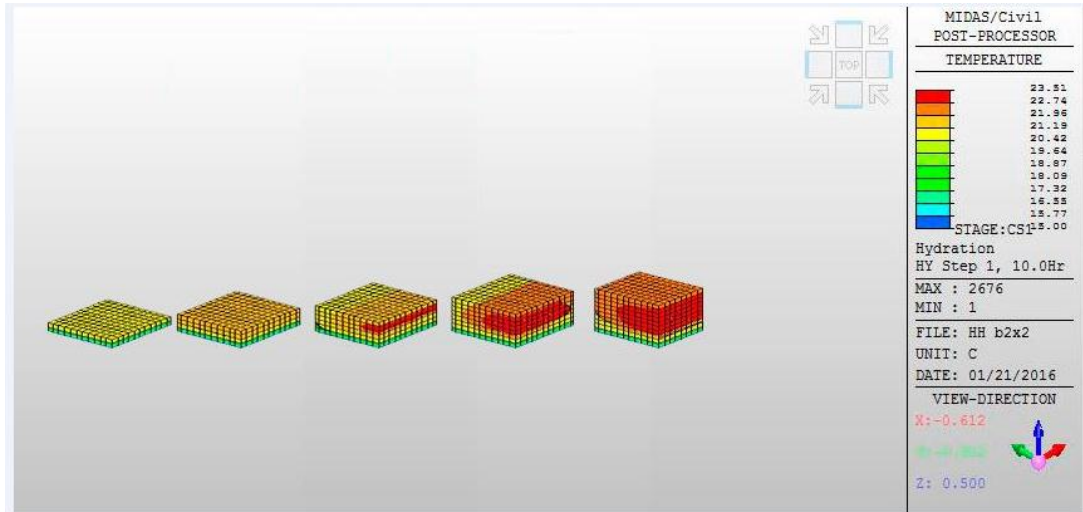


Figura 30. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la segunda hora.

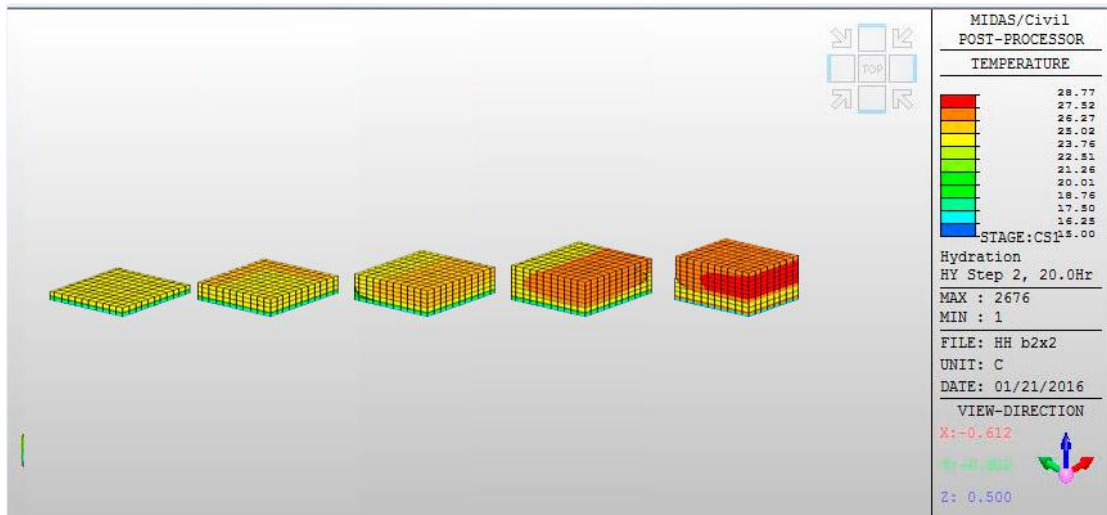


Figura 31. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la tercera hora

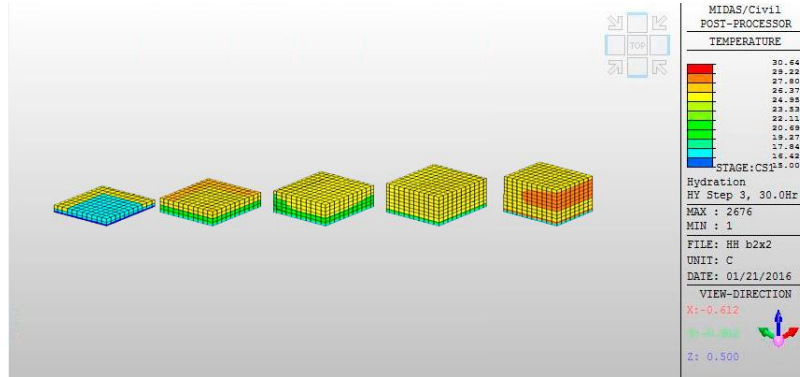


Figura 32. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la cuarta hora

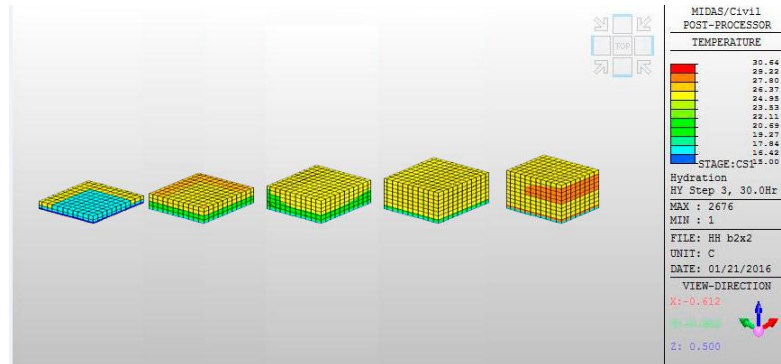


Figura 33. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la quinta hora

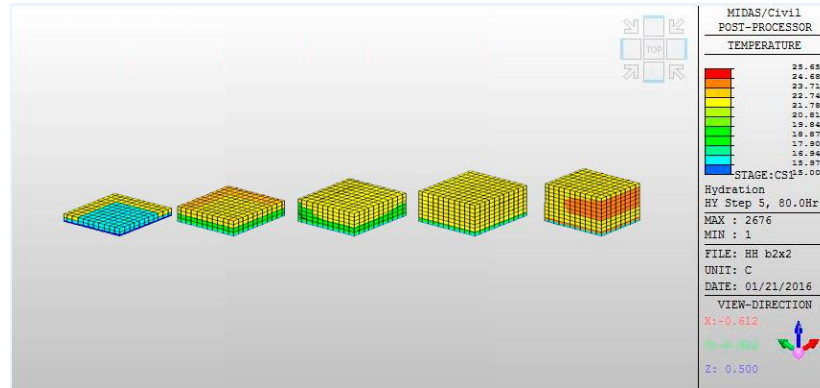


Figura 34. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la sexta hora.

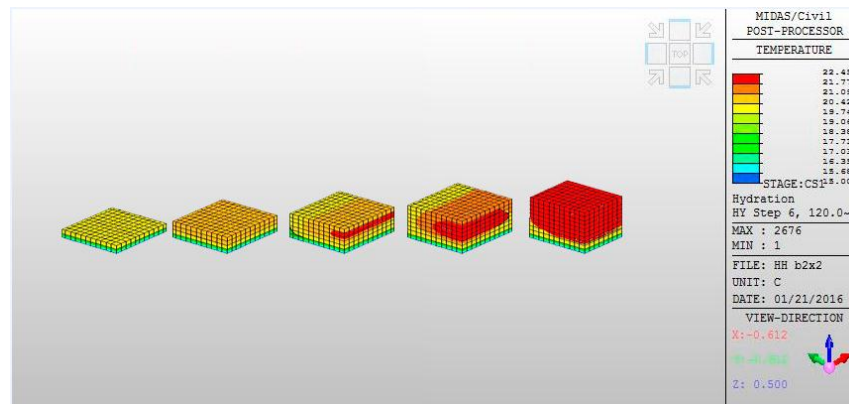


Figura 35. Resultados de temperatura para dado de 2.00 m x 2.00 m en la séptima hora.

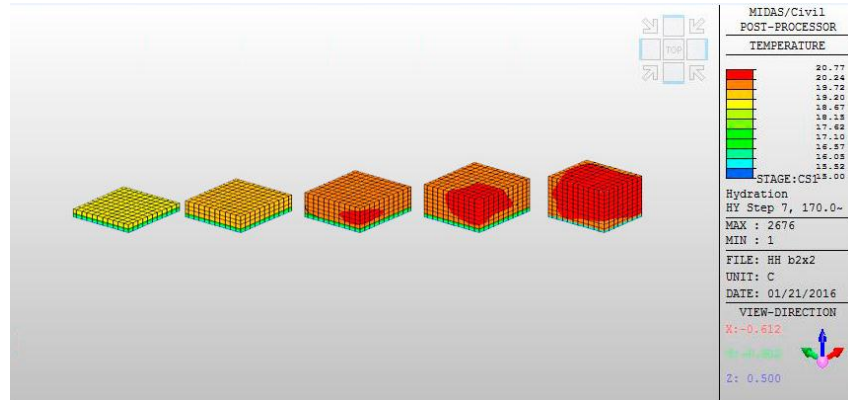
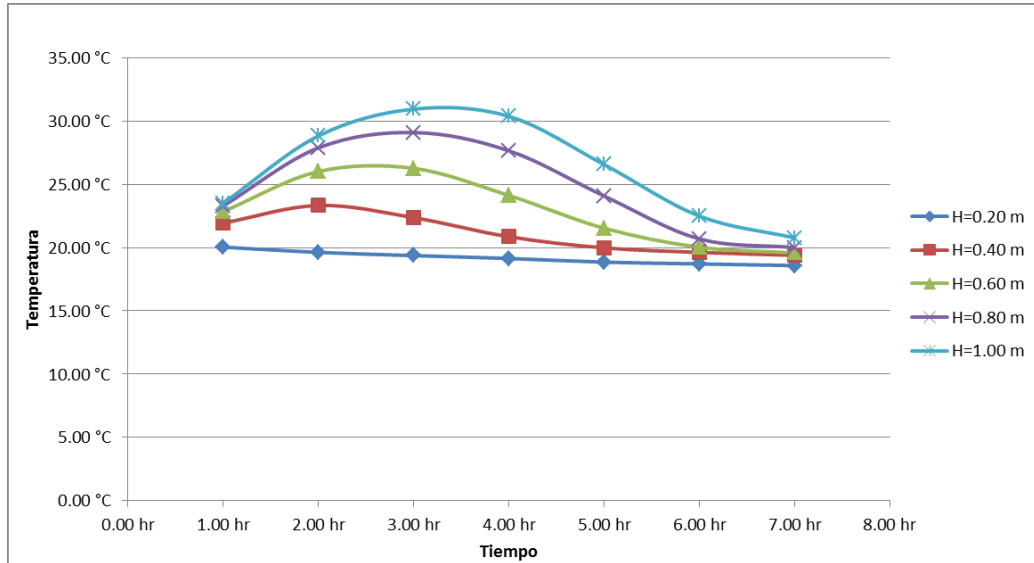


Tabla 12. Variación de temperatura según tiempo y altura para dado de 2.00 m x 2.00 m

Altura/tiempo	1.00 hr	2.00 hr	3.00 hr	4.00 hr	5.00 hr	6.00 hr	7.00 hr
0.20 m	22.00 °C	22.10 °C	22.50 °C	22.35 °C	21.00 °C	20.50 °C	20.00 °C
0.40 m	22.90 °C	24.30 °C	23.90 °C	23.50 °C	22.00 °C	21.50 °C	20.10 °C
0.60 m	23.50 °C	25.00 °C	26.20 °C	25.90 °C	25.20 °C	24.50 °C	20.50 °C
0.80 m	24.00 °C	28.76 °C	30.58 °C	29.60 °C	25.40 °C	24.00 °C	21.00 °C
1.00 m	28.67 °C	29.98 °C	37.36 °C	31.39 °C	27.08 °C	25.12 °C	22.49 °C

Figura 36. Grafica de variación de temperatura respecto al tiempo para diferentes alturas del dado de 2.00 m X 2.00 m



7. ANALISIS DE RESULTADOS

La principal causa de los esfuerzos térmicos es debido a las diferencias de temperatura dentro de la masa de hormigón que resulta en restricciones internas. Recapitulando la información general, las limitaciones internas son causadas por cambios de volumen desiguales. Inicialmente, la superficie de enfriamiento y partes internas con temperaturas elevadas causan tensión en la superficie y de compresión en las partes internas.

Como se puede observar en las gráficas de cada uno de los modelos realizados, entre más grande es el área del dado, es más grande la diferencia de temperaturas entre las distintas alturas modeladas.

Esto se debe a la reacciones de hidratación del cemento portland, que son muy exotérmicas, lo que genera un desarrollo de calor entre las primeras tres horas, luego de esto, la temperatura se hace menor al hacerse la hidratación más lenta hasta llegar a su nivelación.

Por otra parte se presenta un ascenso en la temperatura aproximadamente hasta las tres horas de colocación de concreto en el sitio, posteriormente, el elemento inicia una etapa de enfriamiento progresivo (fuerza de contracción) de las partes internas y fuerzas de compresión en la superficie hasta la hora séptima, en donde adquiere una temperatura cercana a la temperatura ambiente (20 °C).

8. CONCLUSIONES

- Según lo observado en la modelación, es posible concluir que de manera general, sin importar el área o altura del elemento, se presenta una mayor afectación debido a esfuerzos térmicos en la tercera hora.
- En espesores menores a 0.20 m el concreto no sufre el efecto de calor de hidratación.
- A lo largo de la séptima hora de la fundición del concreto, es elemento, adquiere valores de temperatura cercanos a los del medio ambiente (20 °C)
- Al agregar a la mezcla de agua, cemento y agregado, aditivos como puzolana natural, esta se ve afectada por el calor de hidratación de manera proporcional al contenido del agregado en la mezcla.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI,. 2007

ÇENGEL, Y.A., Transferencia de calor y masa, México, McGraw Hill. 2007

GHALI. A, FAVRE. R Y ELDBADRY. M Concrete Structures –third Edition.
Londres, E&FN SPON 2002

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., & CRUZ, R. Fundamentos de transferencia
de calor. México: Prentice-Hall. 1999

J.H. HA ET AL Automation in construction, Canada, Elsevier 2014

KOSMATKA. H. S, KERKHOFF .B, PANARESE. W. C Y TANESI. J, Diseño y
control de mezclas de concreto, EE.UU., Portland Cement Association 2004

MEHTA. K. P Y MONTEIRO. P. J. M, Concrete, microstructure, properties and
materials, EE.UU. McGraw Hill. 2006

NEVILLE. A. M Y BROOKS .J. J., Concrete Technology Second edition, Canada,
Pearson 2010

NEVILLE. A. M., Properties of concrete, Inglaterra, Pearson 2011

NRCMCA, NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, National
Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland. 2009



SÁNCHEZ. G. D. Tecnología del concreto y del mortero. Santafé de Bogotá:
Bhandar Editores. 2000