



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE APLICABILIDAD EN CHILE DE LA GUÍA “PAUTAS PARA EL CONTROL
DE FISURACIÓN EN HORMIGÓN MASIVO 2008 – INSTITUTO DEL CONCRETO DE
JAPÓN”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

PAULINA ISABEL BABUL GUIXÉ

PROFESOR GUÍA:
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA
FERNANDO YÁÑEZ URIBE

SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2013

Resumen

La propuesta de trabajo de título consiste en analizar la aplicabilidad en Chile de la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo” elaborada por el Instituto del Concreto de Japón en el 2008. Más específicamente, se propone analizar el método descrito en dicha guía para la determinación de la probabilidad de fisuración térmica de una estructura de hormigón masivo y determinar su aplicabilidad en las construcciones de nuestro país.

Para esto se realizará el análisis térmico y el análisis de esfuerzo a un bloque de hormigón masivo de 1.07 m × 1.07 m × 1.07 m mediante un programa computacional que utiliza el método de elementos finitos. Los resultados de ese análisis teórico se comparan con los resultados empíricos obtenidos por Lawrence (2009).

Además, sobre la base de estos análisis y aplicando los criterios entregados por la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo 2008”, se determinará la probabilidad de fisuración del bloque modelado. La probabilidad obtenida se compara con el estado actual de fisuración del bloque experimental.

A través de los análisis computaciones realizados, y teniendo en cuenta la guía del Instituto del Concreto de Japón, se puede recrear todo el proceso de verificación de fisuración térmica propuesto por dicha guía, comprobando que, en efecto, es posible predecir el estado de fisuración de una estructura de hormigón.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi profesor guía, el Sr. Augusto Holmberg Fuenzalida, y a mi profesor co-guía, el Sr. Federico Delfín Ariztía, por toda la ayuda y apoyo que me brindaron a lo largo de todo el proceso.

Agradecer también al ingeniero Sr. Fernando García por su buena voluntad y por la ayuda que me brindó en el manejo de ABAQUS, software ocupado en la realización de este trabajo de título.

A toda mi familia por el apoyo y cariño que siempre me han ofrecido. A mi hermana Francisca por sus consejos y apoyo incondicional, y a mis padres por todas las oportunidades que me han dado, las cuales me han llevado a ser la persona que soy hoy.

A mis compañeros y amigos, que hicieron de mi paso por esta carrera una experiencia alegre e inolvidable, sin ellos no hubiese sido lo mismo.

Y sobre todo agradecer a Pablo por su compañía, cariño y apoyo que me brindó en todo momento.

Índice de Contenido

CAPÍTULO 1	Introducción	1
1.1.	Introducción y motivación	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	Objetivos generales.....	2
1.2.2.	Objetivos específicos	2
1.3.	Alcance.....	3
CAPÍTULO 2	Antecedentes.....	4
2.1.	Problemas de fisuración en hormigones masivos	4
2.2.	Factores que afectan el aumento de temperatura en estructuras masivas de hormigón.....	5
2.2.1.	Generación de calor	6
2.2.2.	Disipación de calor	8
2.3.	Normas existentes con respecto a hormigones masivos.....	9
2.3.1.	Norma Chilena NCh170 Of.85.....	9
2.3.2.	Norma Americana ACI 207.2R-07	10
2.3.3.	Guía del Instituto del Concreto de Japón: “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”	11
CAPÍTULO 3	Guía del Instituto del Concreto de Japón: “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”	12
3.1.	Introducción	12
3.2.	Rango de aplicabilidad de la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”.....	13
3.3.	Probabilidad de fisuración térmica.....	14
CAPÍTULO 4	Procedimiento de verificación de fisuración térmica de la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”	19
4.1.	Verificación de la fisuración térmica	19
4.2.	Verificación de la fisuración térmica basada en el método de elementos finitos tridimensional (MEF-3D)	19
4.2.1.	Creación del modelo	20

4.2.2. Análisis térmico	20
4.2.3. Análisis de esfuerzo	27
4.2.4. Propiedades de otros materiales	40
4.3. Método de verificación para evitar la fisuración térmica	42
CAPÍTULO 5 Análisis Térmico	45
5.1. Calibración 1.....	46
5.2. Calibración 2.....	50
CAPÍTULO 6 Análisis de Esfuerzo	58
CAPÍTULO 7 Cálculo de índice y de probabilidad de fisuración.....	64
7.1. Cálculo de índice de fisuración térmica y de probabilidad de fisuración térmica.....	64
7.2. Estado de fisuración	68
CAPÍTULO 8 Discusión y comentarios.....	69
8.1. Método de verificación de fisuración térmica.....	69
8.2. Resultados de análisis térmico y de esfuerzo.....	71
8.3. Índice y probabilidad de fisuración térmica.....	71
CAPÍTULO 9 Conclusiones.....	73
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS.....	77
ANEXO A Derivación de la curva de probabilidad de fisuración térmica.....	77
ANEXO B ABAQUS	79
ANEXO C Propiedades bloque de hormigón.....	91
ANEXO D Aumento de temperatura adiabática como flujo de calor de cuerpo.....	102

Índice de tablas

Tabla 2-1: Caracterización de los cementos chilenos y sus calores de hidratación (Figueroa y Delfín 2009).....	6
Tabla 4-1: Funciones adoptadas para modelar los parámetros en la Ecuación (4.2) correspondientes al incremento de temperatura del hormigón en condiciones adiabáticas (JCI 2008)	22
Tabla 4-2: Valores de coeficiente de transferencia de calor (JCI 2008).....	24
Tabla 4-3: Conductividad térmica del hormigón mezclado con varios tipos de agregados (JCI 2008).....	25
Tabla 4-4: Ejemplo típico de intervalo de tiempo en análisis térmico (JCI 2008)	27
Tabla 4-5: Parámetros de la ecuación de desarrollo de la resistencia a compresión....	30
Tabla 4-6: Ecuación y constantes para la resistencia a la compresión a una edad específica de control de resistencia (N/mm^2) (JCI 2008).....	31
Tabla 4-7: Constantes η_c , las cuales representan el efecto del tipo de cemento en el valor final de la deformación por contracción autógena (JCI 2008).....	34
Tabla 4-8: Tiempo de fraguado inicial (JCI 2008).....	36
Tabla 4-9: Constantes recomendadas de la Ecuación (4.20) (JCI 2008)	37
Tabla 4-10: Ejemplos de coeficientes de expansión térmica medidos para hormigón hecho con varios tipos de cemento (JCI 2008)	39
Tabla 4-11: Coeficientes de expansión térmica para hormigones mezclados con diversos tipos de agregados (JCI 2008).....	39
Tabla 4-12: Propiedades térmicas del suelo y de la roca base (JCI 2008)	41
Tabla 4-13: Valores de referencia de módulo de elasticidad de la roca base (JCI 2008)	41
Tabla 5-1: Sistema Internacional de Unidades.....	45
Tabla 5-2: Composición hormigón (Lawrence 2009).....	51
Tabla 5-3: Conductividad y calor específico de los materiales (Lawrence 2009)	51
Tabla 6-1: Módulo de elasticidad y resistencia a la tracción en función de la edad del hormigón. (Lawrence 2009).....	58
Tabla 6-2: Elementos de las cuatro ubicaciones	60
Tabla 7-1: Menor índice de fisuración y probabilidad de fisuración térmica para la Ubicación 1.....	65
Tabla 7-2: Menor índice de fisuración y probabilidad de fisuración térmica para la Ubicación 3.....	66
Tabla 7-3: Menor índice de fisuración y probabilidad de fisuración térmica para la Ubicación 4.....	67
Tabla C-1: Composición hormigón	91
Tabla D-1: Flujo de calor de cuerpo del hormigón.....	103

Índice de figuras

Figura 2-1: Desarrollo de temperatura a través del tiempo de una estructura de hormigón masivo (Figuroa y Delfín 2009).....	5
Figura 2-2: Evolución de temperatura en hormigón masivo con diferentes tipos de cemento (colocado a 23°C y que contiene 223 kg/m ³ de cemento). (ACI 207.2R-95)	7
Figura 2-3: Razón de generación de calor afectada por la finura del cemento (ASTM C 115) para pasta de cemento curada a 24°C. (ACI 207.2R-95)	8
Figura 2-4: Efecto de la temperatura de colocación del hormigón en el aumento de temperatura en hormigón masivo con 223 kg/m ³ de cemento Tipo I. (ACI 207.2R-95) ..	9
Figura 3-1: Histograma de frecuencia según ausencia o presencia de fisuras en relación al índice de fisuración térmica (Japan Concrete Institute 2008)	15
Figura 3-2: Histograma de frecuencia acumulada según ausencia o presencia de fisuras en relación al índice de fisuración térmica (JCI 2008)	16
Figura 3-3: Relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica	16
Figura 3-4: Relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica basada en la función de distribución de Weibull (JCI 2008)	17
Figura 3-5: Comparación de las curvas de probabilidad de fisuración térmica especificadas en los estándares de la SICJ (JCI 2008).	18
Figura 4-1: Concepto de madurez (Carrasquillo 2009)	29
Figura 4-2: Constante de reducción para el módulo de elasticidad debido a la fluencia lenta del hormigón (JCI 2008).....	33
Figura 4-3: Diagrama esquemático de la deformación de expansión en hormigón expansivo (JCI 2008).	37
Figura 4-4: Relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica (JCI 2008).....	43
Figura 4-5: Diagrama esquemático del proceso de verificación de fisuración térmica ..	44
Figura 5-1: Malla del cubo del modelo analizado (Al-Manaseer y Elias 2008).	46
Figura 5-2: Malla del cubo utilizada en ABAQUS	47
Figura 5-3: Flujo de calor de cuerpo en el período de análisis (Al-Manaseer y Elias 2008).	48
Figura 5-4: Temperatura ambiente en el período de análisis (Al-Manaseer y Elias 2008).	48
Figura 5-5: Temperatura al centro del cubo de hormigón	49
Figura 5-6: Vista en corte del cubo con el encofrado y la aislación (Unidades en centímetros)	50
Figura 5-7: Temperatura ambiente registrada durante el análisis (Lawrence 2009)	52
Figura 5-8: Aumento de temperatura bajo condiciones adiabáticas (calorimetría isotérmica) (Lawrence 2009)	53

Figura 5-9: Temperaturas a distintas alturas en el eje central del bloque de hormigón en función del tiempo (Lawrence 2009)	54
Figura 5-10: Temperaturas a distintas alturas en el eje ubicado a 5 cm de una de las caras laterales en función del tiempo (Lawrence 2009)	55
Figura 5-11: Comparación de la temperatura en el centro a 10 cm de la cara superior expuesta determinada con ABAQUS con la temperatura experimental	56
Figura 5-12: Comparación de la temperatura en el centro a 54 cm de la cara superficial expuesta determinada con ABAQUS con la temperatura experimental	57
Figura 6-1: Ubicaciones de los elementos a los cuáles se les determinará el estado de tensiones	60
Figura 6-2: Comparación estado de tensiones en el centro de la cara superficial (Ubicación 1)	61
Figura 6-3: Comparación estado de tensiones en el centro del bloque de hormigón (Ubicación 2)	62
Figura 6-4: Comparación estado de tensiones en el centro del borde la cara superior (Ubicación 3)	63
Figura 6-5: Comparación estado de tensiones en el centro superficial de una de las caras laterales del cubo (Ubicación 4)	63
Figura 7-1: Índice de fisuración térmica en el tiempo para la ubicación 1	65
Figura 7-2: Índice de fisuración térmica en el tiempo para la ubicación 3	66
Figura 7-3: Índice de fisuración térmica en el tiempo para el elemento	67
Figura 7-4: Cara superior del bloque experimental que muestra numerosas grietas a lo largo de los bordes (Lawrence 2009).	68
Figura A-1: Relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica – Ambos ejes están expresados por el logaritmo natural –	78
Figura B-1: Interfaz de ABAQUS	79
Figura B-2: Cubo de hormigón con encofrado de madera y aislación de poliestireno... ..	80
Figura B-3: Módulo de edición de materiales	80
Figura B-4: Módulo de edición del paso de análisis	81
Figura B-5: Módulo de edición de campo predefinido	82
Figura B-6: Malla del bloque de hormigón y de los materiales que lo rodean	83
Figura B-7: Módulo de creación del trabajo	84
Figura B-8: Contorno de temperatura a 35 horas del comienzo del análisis	84
Figura B-9: Temperatura (°C) versus Tiempo (segundos) en el centro del bloque de hormigón	85
Figura B-10: Módulo de edición de materiales	86
Figura B-11: A la derecha se observa el módulo de edición de los pasos, y a la izquierda los 17 pasos creados.	87

Figura B-12: Módulo de edición de campos predefinidos.....	87
Figura B-13: Módulo de edición de condiciones de borde.....	88
Figura B-14: Malla del bloque de hormigón, la misma utilizada que en el análisis térmico	89
Figura B-15: Módulo de edición del trabajo.....	89
Figura B-16: Contorno de tensiones en el bloque de hormigón después de 40 horas del inicio del análisis.....	90
Figura B-17: Tensión (Pa) versus Tiempo (segundos) en el centro de la cara superior del bloque de hormigón.....	90
Figura C-1: Dimensiones del bloque de hormigón	92
Figura C-2: Vista en corte del bloque de hormigón con el encofrado y la aislación térmica	92
Figura C-3: Bloque de hormigón terminado, con el encofrado de madera contrachapada y la capa de poliestireno.	93
Figura C-4: Vista en planta del cubo con la ubicación de los sensores de temperatura y deformación.....	94
Figura C-5: Vista en corte del cubo con la ubicación de los sensores de temperatura y deformación.....	94
Figura C-6: Distribución de la instrumentación en el bloque experimental.....	95
Figura C-7: Curvas calorimétricas isotérmicas resultantes representando energía versus tiempo.....	96
Figura C-8: Curvas calorimétricas isotérmicas resultantes representando energía versus madurez.....	97
Figura C-9: Esquema del calorímetro de calor específico.....	98
Figura C-10: Disposición esquemática del test ASTM C496 de resistencia a tracción por hendimiento.....	98
Figura C-11: Resistencia a tracción por hendimiento del hormigón utilizado.	99
Figura C-12: Módulo de elasticidad de compresión versus edad del hormigón	100
Figura C-13: Módulo de elasticidad a tracción por hendimiento versus edad del hormigón	100
Figura C-14: Coeficiente de expansión térmica versus edad del hormigón	101
Figura D-1: Flujo de calor de cuerpo en el tiempo.....	104

CAPÍTULO 1 Introducción

1.1. Introducción y motivación

La norma ACI 207 “Mass Concrete” 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 términos de tamaño la norma americana ACI 211.1R-91 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete” 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/m^3 .

Las estructuras de hormigón masivo normalmente corresponden a presas, fundaciones en plantas de energía eléctrica, pilares de puentes, fundaciones de grandes edificios y otros elementos estructurales de grandes dimensiones.

El hormigón en grandes volúmenes genera calor que se disipa muy lentamente lo que produce un importante diferencial térmico entre el núcleo y el exterior. A causa de los gradientes térmicos, la masa de hormigón experimenta cambios diferenciales de volumen que tienen como consecuencia la generación de esfuerzos internos en el hormigón y eventualmente la fisuración del elemento estructural.

De aquí surge la pregunta ¿cómo saber si la estructura se fisurará o no dado cierto diseño, materiales y condiciones ambientales? En el año 2008 fue publicada por el Instituto del Concreto de Japón la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”, donde se propone un método de determinación de la probabilidad de fisuración térmica de una estructura tomando en consideración la geometría de la estructura, materiales usados, temperatura ambiente, temperatura de colocación del hormigón, calor específico, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, entre otros.

Este método de determinación de probabilidad de fisuración se sustenta en principios físicos que lo hacen teóricamente de validez general, por lo que en este trabajo de título se analizará si, en efecto, dicho método presenta un potencial efectivo para el control de fisuración para hormigones masivos utilizados en Chile, y de esta manera adaptarlo y dejarlo operativo para las prácticas constructivas de nuestro país.

Lo anterior se llevará a cabo siguiendo paso a paso el procedimiento descrito en la guía, el que considera un análisis térmico y un análisis de esfuerzo mediante un programa de elementos finitos a un bloque de hormigón, para luego analizar su

potencial de fisuración. De ser aplicable este método contribuiría a la implementación de medidas que ayudarían a controlar la fisuración térmica en futuras estructuras de hormigón masivo durante las etapas de diseño y construcción.

Cabe notar que el presente trabajo de título no contempla un trabajo experimental con hormigones chilenos, si no que estudia la aplicabilidad del método para el control de la fisuración de bloques masivos de hormigón, introduciendo al modelo los parámetros que caracterizan al tipo de materiales y tipo de estructuras que se construirán en un determinado proyecto.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

Como objetivo general del presente trabajo de título se plantea estudiar la aplicabilidad del método de determinación de la probabilidad de fisuración presentado por la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo 2008” publicada por el Instituto del Concreto de Japón y analizar su aplicabilidad a los proyectos de construcción de hormigones masivos en Chile.

1.2.2. Objetivos específicos

- Entender el fenómeno e identificar las variables que influyen en la fisuración de estructuras de hormigones masivos.
- Analizar y estudiar la situación actual y la práctica en cuanto a normas y técnicas que rigen en Chile para la especificación de hormigones masivos.
- Estudiar y analizar en detalle la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo 2008” publicada por el Instituto del Concreto de Japón.
- Analizar en detalle el método de determinación de probabilidad de fisuración descrito en la guía del Instituto del Concreto de Japón.
- Aplicar dicho método a un bloque de hormigón de dimensiones 1.07 m × 1.07 m × 1.07 m, modelado imponiendo al hormigón las propiedades térmicas y mecánicas correspondientes, y comparar los resultados del análisis térmico y tensional de este bloque con los resultados empíricos del trabajo realizado por Adrian M. Lawrence de la Universidad de Florida (2009).

1.3. Alcance

La guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo” del Instituto del Concreto de Japón aborda los diferentes aspectos que deben ser considerados para un adecuado análisis y manejo de hormigones masivos. Se refiere, por ejemplo, a valores límites para prevenir la fisuración térmica, valores límites para controlar la fisuración térmica, métodos para controlar el cambio volumétrico, método para reducir las restricciones externas, métodos para controlar el ancho de fisuras térmicas, plan de control de calidad, inspección, entre otros. Sin embargo en el presente trabajo el objetivo se centrará particularmente en estudiar la predictibilidad de la eventual fisuración por tensiones térmicas aplicando los conceptos y la curva de probabilidad de fisuración térmica que presenta la guía, junto con los valores límites para prevenir la fisuración que se desprenden de esa curva.

CAPÍTULO 2 Antecedentes

2.1. Problemas de fisuración en hormigones masivos

La fisuración de los elementos de hormigón masivo puede ser el resultado de diversas causas relacionadas con los materiales, el proceso constructivo, el diseño estructural o una combinación de éstas. Las fisuras atribuibles a los materiales son provocadas, tal como se mencionó anteriormente, porque el hormigón en grandes volúmenes genera calor que se disipa lentamente resultando un diferencial térmico entre el núcleo y el exterior, es decir, la temperatura en la superficie del hormigón es menor que la temperatura al interior del hormigón. Esta diferencia de temperatura provoca que el interior del hormigón, que está más caliente y dilatado, se oponga a la contracción de la parte exterior más fría. Esto se conoce como restricción interna y crea esfuerzos térmicos de tracción en la superficie. Como el hormigón aún está en edad temprana, no se ha desarrollado por completo su resistencia a la tracción, y si los esfuerzos de tracción superan la resistencia a la tracción, el hormigón se fisurará. Por lo general las grietas generadas por restricción interna son de poca profundidad.

Por otro lado también existe la restricción externa que se ocasiona cuando el elemento o estructura de hormigón tiende a contraerse como un cuerpo rígido, pero está restringido por su base o por una superficie de borde, como por ejemplo, estructuras adyacentes. Este tipo de restricción también produce esfuerzos térmicos, cuya magnitud depende del grado de restricción, mientras mayor sea la restricción, mayor serán los esfuerzos. Dichos esfuerzos llevan a la generación de grietas profundas, las cuales afectarán la habilidad del hormigón de soportar su carga de diseño y permitirán la filtración de materiales dañinos que afectarán negativamente su durabilidad.

Como se mencionó, la restricción interna genera grietas superficiales a edades tempranas, pero de todas maneras éstas se deben evitar ya que promueven la generación de grietas profundas, generadas debido a la restricción externa, cuando se produce un enfriamiento rápido después de la remoción del encofrado.

Este trabajo se centrará justamente en la fisuración generada a partir de esfuerzos térmicos. Para el estudio de estas fisuras se recomienda el desarrollo de análisis térmicos de los elementos con el fin de evaluar los cambios de temperatura interna y/o los posibles gradientes de temperatura a edad temprana en el hormigón.

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 (Fitzgibbon 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, Kerkhoff y Panarese 2003).

Con respecto a la temperatura máxima en el hormigón algunas recomendaciones sugieren que ésta no sobrepase los 70°C, ya que el curado del hormigón por encima de ciertas temperaturas críticas puede conducir a la expansión y fisuración asociadas con la formación de etringita diferida (Johansen, Klemm y Taylor 2002).

2.2. Factores que afectan el aumento de temperatura en estructuras masivas de hormigón.

La temperatura máxima que alcanzará una estructura de hormigón masivo va a depender tanto de la generación de calor durante el proceso de hidratación, como de la disipación de calor.

La Figura 2-1 muestra el desarrollo típico de temperatura en el núcleo una estructura de hormigón masivo, donde:

T_0 : Temperatura de colocación del hormigón

$T_{m\acute{a}x}$: Temperatura máxima

T_f : Temperatura final de equilibrio

ΔT_1 : Elevación de temperatura

ΔT_2 : Descenso de temperatura

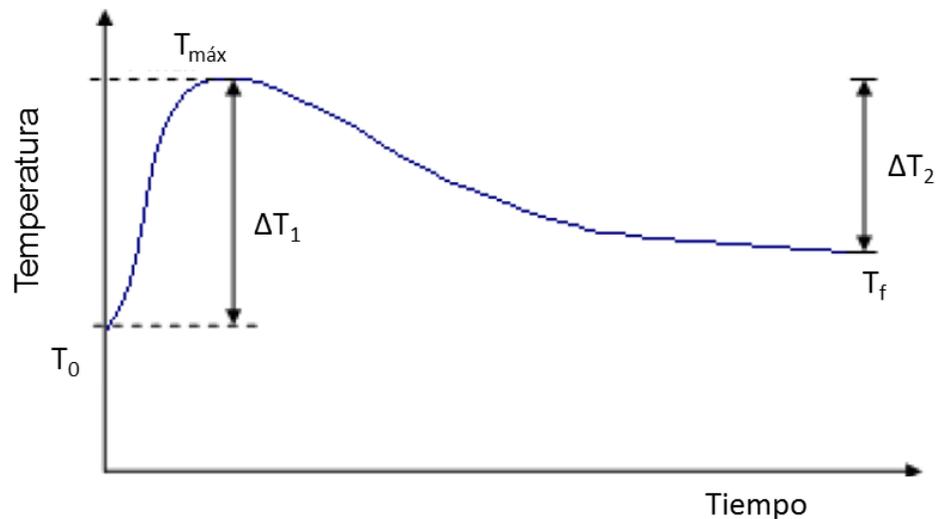


Figura 2-1: Desarrollo de temperatura a través del tiempo de una estructura de hormigón masivo (Figuerola y Delfín 2009).

2.2.1. Generación de calor

La generación de calor se ve afectada por el tipo de cemento utilizado. De acuerdo a la norma ACI 207.1R-96 los siguientes tipos de cemento hidráulico son adecuados para uso en construcción de hormigón masivo:

- Cemento Portland: Tipo I, II, IV y V que cumplen con la norma ASTM C150.
- Mezcla de cemento: Tipo P, IP, S, IS, I (PM), y I (SM) que cumplen con la norma ASTM C595.

Los cementos utilizados en Chile y sus respectivos calores de hidratación se muestran en la Tabla 2-1. El calor de hidratación es la cantidad de calor, en calorías por gramo de cemento deshidratado, generado después de una hidratación completa a una temperatura dada.

Tabla 2-1: Caracterización de los cementos chilenos y sus calores de hidratación (Figuroa y Delfín 2009)

Clase (NCh 148)	Grado (NCh 148)	Calor hidratación 7 días (cal/gr)
Puzolánico	Corriente	55 – 68
Portland puzolánico	Alta resistencia	70 – 80
Portland	Alta resistencia	80 – 85

Calor hidratación cementos nacionales. Método Langavant.

En la Figura 2-2 se observa un gráfico que muestra cómo el tipo de cemento afecta la generación de calor en el tiempo.

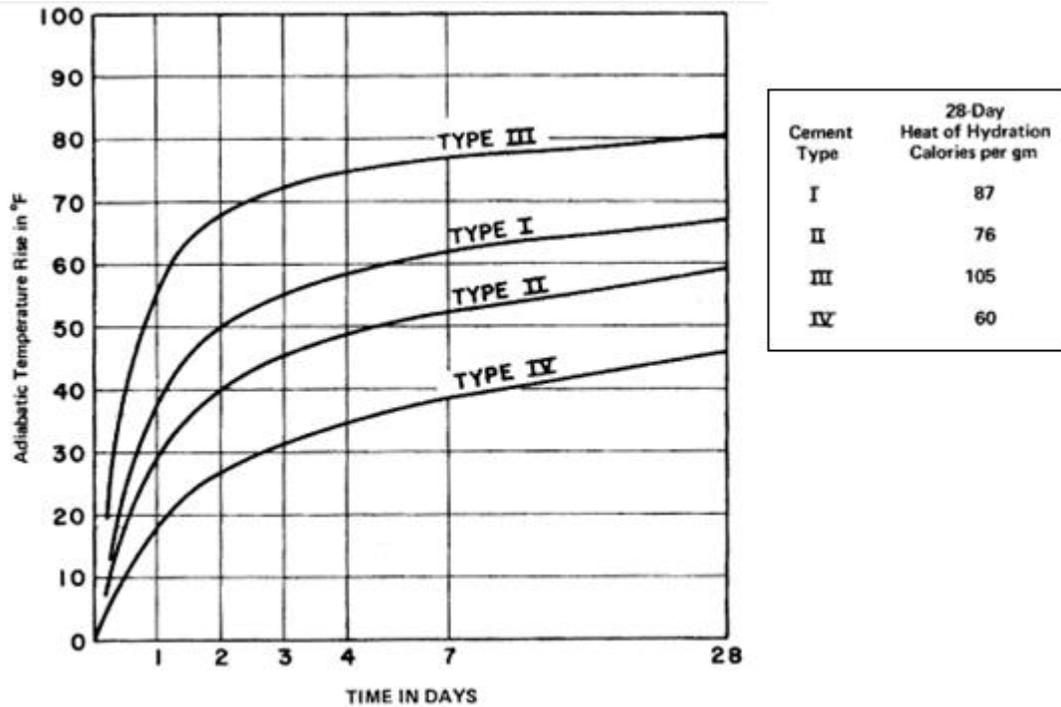


Figura 2-2: Evolución de temperatura en hormigón masivo con diferentes tipos de cemento (colocado a 23°C y que contiene 223 kg/m³ de cemento). (ACI 207.2R-95)

Otro factor que influye es la finura del cemento. Tal como se observa en la Figura 2-3, la finura del cemento aumenta la tasa de generación de calor, más que aumentar la generación total de calor.

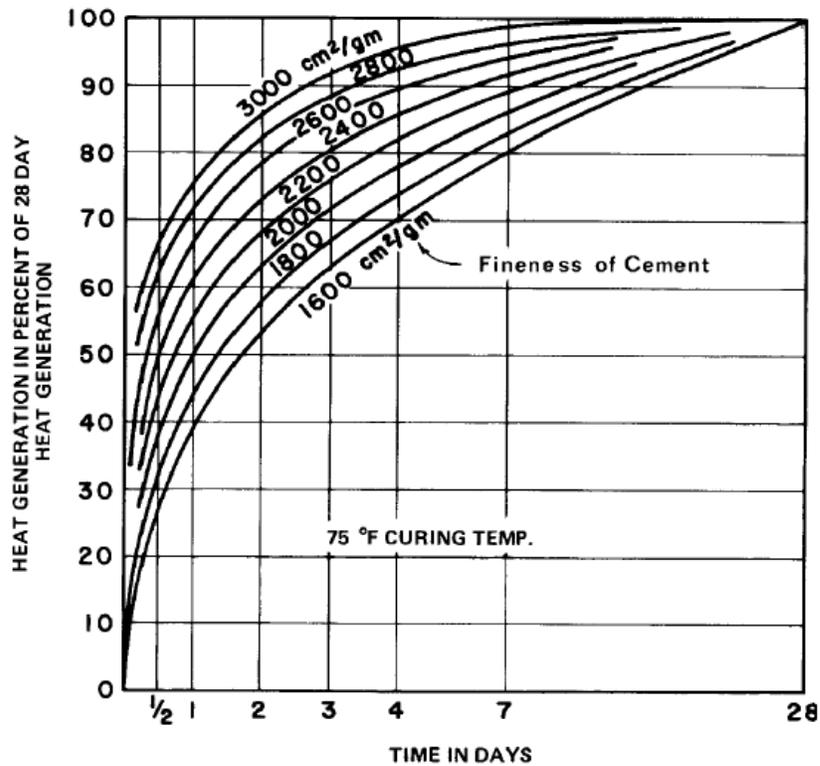


Figura 2-3: Razón de generación de calor afectada por la finura del cemento (ASTM C 115) para pasta de cemento curada a 24°C. (ACI 207.2R-95)

2.2.2. Disipación de calor

La tasa de disipación de calor es una propiedad térmica que se ve afectada, entre otros, por la forma y tamaño del bloque de hormigón y por las condiciones ambientales.

Dentro de esos factores se encuentran la temperatura de colocación del hormigón, la cual a su vez es afectada por la temperatura ambiente. La Figura 2-4 muestra cómo la temperatura de colocación afecta el desarrollo de la temperatura a través del tiempo.

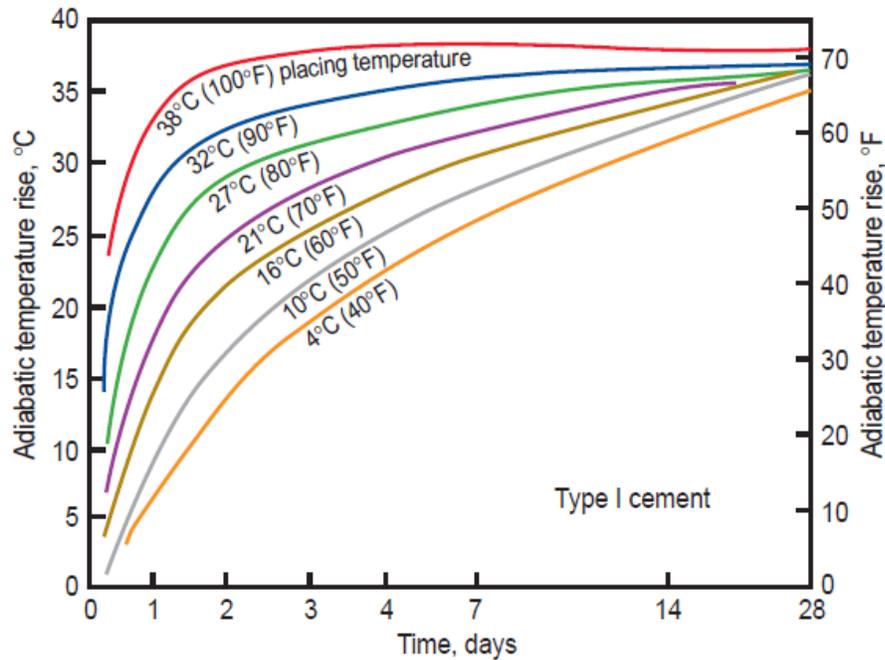


Figura 2-4: Efecto de la temperatura de colocación del hormigón en el aumento de temperatura en hormigón masivo con 223 kg/m³ de cemento Tipo I. (ACI 207.2R-95)

Se puede observar de la Figura 2-4 que una mayor temperatura de colocación, acelera el aumento de temperatura, por lo que en algunos casos, sobre todo en lugares de climas cálidos, deben tomarse medidas para enfriar el hormigón y así lograr una temperatura de colocación más baja.

Todos estos factores se deben tener en cuenta al momento de construir una estructura de hormigón masivo, con el objetivo que la temperatura alcanzada por el hormigón no sobrepase los niveles establecidos. Por lo tanto, también es muy importante determinar e incluir estos factores en el modelo computacional que se utilice para resolver el problema tensional y de fisuración en estructuras masivas de hormigón.

2.3. Normas existentes con respecto a hormigones masivos

2.3.1. Norma Chilena NCh170 Of.85

Como se mencionó anteriormente, en Chile actualmente no existe una norma dedicada específicamente a hormigones masivos. Dentro de las normas chilenas, en la NCh170 Of.85 "Hormigón – Requisitos Generales" se encuentran sólo un par de menciones al hormigón masivo, las cuales se reproducen a continuación.

Con respecto a la definición de hormigón masivo:

- "Elementos cuyas menor dimensión exceda de 0,80 m."

Con respecto a la temperatura de colocación del hormigón:

- *“Para el hormigonado de elementos corrientes se recomienda que la temperatura del hormigón en el momento de colocación no exceda de 30 °C, mientras que para hormigonado de elementos masivos se recomienda que la temperatura del hormigón en el momento de colocación no exceda de 16 °C.”*

Como se puede observar estas especificaciones son limitantes y muy rígidas, ya que no considera factores que cambian de una situación a otra como lo son el tipo de cemento utilizado, temperatura ambiente, clima del lugar, tipo de construcción, proceso constructivo, entre otros.

2.3.2. Norma Americana ACI 207.2R-07

Al comienzo de este trabajo se mencionó la definición de hormigón masivo según el Instituto Americano del Concreto: “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”. Esta definición permite aplicar ingeniería y considera el comportamiento del elemento de hormigón y no lo define simplemente por su tamaño como lo hace la norma chilena.

Con respecto a la temperatura de colocación la norma ACI 305R-99 “Hot Weather Concreting” indica que la temperatura de colocación del hormigón durante altas temperaturas puede sobrepasar la temperatura ambiente promedio diaria por 3 a 6°C, a menos que se tomen medidas para enfriar el hormigón o el agregado grueso.

A diferencia de la norma chilena que impone una temperatura fija de colocación, las normas ACI toman en consideración la temperatura ambiente y el clima donde se encuentra la construcción. De hecho la norma ACI 305R-99 establece que en los tipos más generales de construcción en climas cálidos, es poco práctico recomendar una temperatura máxima ambiente o máxima del hormigón, porque la humedad y velocidad del viento pueden ser bajas, permitiendo así mayores temperaturas ambiente y del hormigón. Por lo que una temperatura máxima ambiente o del hormigón que servirá en un caso específico, puede ser poco realista en otros casos. De acuerdo a esto, el comité sólo puede proveer información sobre los efectos de temperaturas más altas en el hormigón y aconsejar que a cierta temperatura, entre aproximadamente los 24 y 38°C, hay un límite que resultará ser el más favorable para obtener los mejores resultados en cada operación realizada en clima cálido, y dicho límite debe ser determinado para la obra.

2.3.3. Guía del Instituto del Concreto de Japón: “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”

La guía japonesa analizada en este trabajo tiene como diferencia respecto a la norma americana ACI 207 el abordar el agrietamiento de hormigones masivos desde un punto de vista cuantitativo vinculado al desempeño buscado, ligando las propiedades físicas de los materiales, estructuras y procesos constructivos con los efectos térmicos que experimenta el hormigón, el desarrollo de tensiones internas en el hormigón y el potencial de fisuración.

La guía japonesa cuenta con 6 capítulos donde en ellos se abordan temas como los valores de diseño de las propiedades de los materiales, verificación de la fisuración térmica, valores límites para prevenir la fisuración, plan de ejecución y plan de control de calidad de una obra de construcción, métodos de inspección, entre otros. En particular, la guía propone un método de determinación de la probabilidad de fisuración térmica de una estructura tomando en consideración la resistencia del hormigón utilizado, la distribución de temperatura al interior del elemento de hormigón masivo y las tensiones existentes, dentro de otros factores.

Los valores de temperatura y tensiones de la estructura se obtienen realizando un análisis tridimensional mediante el método de elementos finitos, más conocido como MEF-3D. Este es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El MEF-3D está pensado para ser usado en computadores a través de un software y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. De hecho, este método es utilizado como el estándar tanto en análisis térmico como de tensiones en estructuras de hormigón porque permite modelar formas geométricas para diversos tipos y formas de estructuras.

Para modelar la estructura en el programa se necesita conocer su geometría junto con todas las propiedades del hormigón utilizado, tanto térmicas como mecánicas, tales como el coeficiente de transferencia de calor, calor de hidratación, módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, entre otros. Con todos estos datos se alimenta el modelo y éste arrojará el valor de las tensiones existentes en la estructura. Luego, la resistencia a tracción por hendimiento del hormigón se divide por el valor de la tensión arrojado por el programa, para cierta edad de la estructura modelada, y con eso se obtiene el índice de fisuración térmica I_{cr} . La idea es que dado un cierto valor de este índice se pueda saber la probabilidad de fisuración térmica de la estructura. Este método ha sido perfeccionado a través de los años por los investigadores japoneses obteniendo muy buenos resultados.

CAPÍTULO 3 Guía del Instituto del Concreto de Japón: “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”

3.1. Introducción

El problema de la fisuración térmica en hormigón masivo, que resulta del calor de hidratación del cemento en estructuras de hormigón armado y hormigón pretensado, ha sido un tema de constante mejoramiento y control a través de los años. Esta razón, ha motivado la creación de tecnologías de predicción y control de fisuración térmica. Para satisfacer esta demanda en 1986 el Comité Técnico del Instituto del Concreto de Japón publicó “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigones Masivos” que aborda el problema de agrietamiento en estructuras de hormigón. Después de la publicación de estas pautas, se adoptaron varias medidas de diseño y construcción ahí mencionadas y se demostró la efectividad de dichas medidas en el control de fisuración térmica en hormigones masivos en muchas obras de construcción.

Sin embargo, se seguían observando deterioros significativos en las estructuras de hormigón, esto motivó el desarrollo de nuevas y más efectivas tecnologías para el control de fisuración térmica. Como respuesta a estas necesidades, se creó un comité técnico dentro del Instituto del Concreto de Japón en abril del 2004 para desarrollar pautas para el control de fisuración en hormigón masivo. El comité inicial estuvo activo por dos años. Un comité posterior formado en abril del 2006 continuó este tema y estuvo activo por dos años con el propósito de revisar las pautas. Finalmente pautas revisadas de “Control de Fisuración de Hormigones Masivos” fueron publicadas en noviembre del 2008, que corresponde a la guía que se estudia en este trabajo de título.

Las pautas revisadas adoptaron un sistema de verificación basado en el desempeño apoyado en los conceptos del control de fisuración térmica de las pautas originales. Este sistema de verificación basado en el desempeño fue desarrollado usando información de las últimas tecnologías de control y análisis de fisuración térmica en estructuras de hormigón.

Los aspectos más importantes de las pautas revisadas son:

- a. Se aclaran los principios básicos para el control de fisuración térmica.
- b. Usando MEF-3D (Método de los Elementos Finitos Tridimensional) como técnica de análisis estándar, se entrega un nuevo diagrama de probabilidad de fisuración relacionado con el índice de fisuración térmica.
- c. Usando la última información, se entregan valores que orientan el diseño de hormigones con diferentes tipos de cemento, incorporando las propiedades físicas a edades tempranas.
- d. Se entrega una ecuación simple para predecir el ancho de grieta, que usa la razón de refuerzo como parámetro y el índice de fisuración térmica.
- e. Se entrega una ecuación simple para el índice de fisuración térmica.

3.2. Rango de aplicabilidad de la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”

Las disposiciones de estas pautas son aplicables a estructuras de hormigón de resistencia a la compresión característica no mayor a 60 N/mm^2 (60 MPa). Estas son estructuras de hormigón masivo reforzado y no reforzado, como muros muy gruesos, losas de fundación, columnas y vigas, construidas mediante la colocación de un gran volumen de hormigón de una sola vez, resultando en la generación y almacenamiento de una gran cantidad de calor. La guía también se aplica a estructuras de hormigón reforzado y pretensado que experimentan grandes caídas de temperatura desde valores máximos como resultado del alto contenido de cemento o altas temperaturas del hormigón durante la construcción, incluso si las estructuras no son de tamaño masivo. En general, las estructuras de hormigón masivo podrían ser definidas como muros reforzados con espesores mayores a 50 cm restringidos en la base o como losas de grandes superficies con espesores mayores a 80 cm, diseñadas para altas prestaciones en cuanto a resistencia mecánica y durabilidad.

La guía del Instituto del Concreto de Japón se aplica a estructuras de hormigón masivo y el período de verificación de fisuración térmica comprende desde el momento del término de la colocación del hormigón hasta el momento cuando la temperatura del hormigón se equilibra con la temperatura ambiente después de haberse alcanzado la temperatura máxima. Durante este período, el efecto de contracción por secado es insignificante y como consecuencia no se toma en cuenta en el procedimiento de verificación. Las grietas superficiales desarrolladas dentro de los primeros días, después de colocar el hormigón, debido al secado y a la caída de temperatura en la capa superficial y las grietas desarrolladas dentro de varios días debido a la restricción interna causada por una distribución no lineal de la temperatura y contracción, no son el objetivo de la verificación. Esto implica que la fisuración superficial puede ser evitada si la construcción, especialmente el curado y protección, es realizada con el debido cuidado.

La guía también se aplica a muros de contención de hormigón para el control de erosión y contención frente a deslizamiento de suelo, pero no se aplican a represas de hormigón construidas con hormigón de nulo o bajo asentamiento.

Un hecho muy importante que se menciona en la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”, es que es aplicable a estructuras de hormigón masivo en cualquier país si los valores de diseño del hormigón producido son determinados de una manera similar a la que se realiza en la guía conforme con las propiedades físicas y térmicas y las características de los materiales en cada país.

3.3. Probabilidad de fisuración térmica

La probabilidad de fisuración térmica es un índice que muestra la tendencia de fisuración cuando el esfuerzo de tracción en el hormigón es inducido tanto por contracción autógena como por cambio volumétrico del hormigón debido al calor de hidratación, y generalmente es expresado en relación al índice de fisuración térmica. El índice de fisuración térmica es definido como la razón entre la resistencia a tracción por hendimiento y el esfuerzo en algún punto de la estructura de hormigón. Los esfuerzos en el hormigón son calculados por el método de análisis numérico, en este caso por el método de elementos finitos tridimensional, y la resistencia a la tracción del hormigón se obtiene por el método de ensayo aplicado. Por lo tanto, la probabilidad de fisuración térmica depende del método de análisis y del método de ensayo de resistencia.

Para determinar la relación entre la probabilidad de fisuración térmica y el índice de fisuración térmica el Comité decidió incluir en el estudio 65 estructuras masivas típicas para ser analizadas. De éstas se tenía información adecuada de la forma y tamaño de la estructura y de las condiciones de construcción tales como fecha de hormigonado, materiales usados para el hormigón, proporciones de mezclas, entre otros. Esta información fue obtenida mediante un cuestionario realizado por el comité técnico del Instituto del Concreto de Japón. Los datos que eran evidentemente inadecuados fueron excluidos y finalmente 728 conjuntos de datos estaban disponibles para el análisis, los que corresponden a 728 secciones del total de 65 estructuras. 204 es el número de conjuntos de datos de estructuras con fisuración y 524 es el número de conjuntos de datos de estructuras sin fisuración. Clasificando los datos de acuerdo el tipo de elemento, los detalles son los siguientes:

- 282 conjuntos de datos de elementos tipo muro (ancho: 0.3m - 5.4m, largo: 3m - 34.6 m, alto: 0.8m - 7.2 m)
- 63 conjuntos de datos de elementos tipo losa (ancho: 2.8m - 45.4m, largo: 6.3m - 34.6 m, alto: 0.3m - 5m)
- 349 conjuntos de datos de elementos tipo multicapa (muros de contención para controlar la erosión del suelo, ancho: 3m - 44.6 m, largo: 2.3m - 65.8m, altura: 0.4m - 5.2m)
- 34 conjuntos de datos de estructuras tipo columna (pilares de puente, ancho: 2m - 15.5m, largo: 2.3m - 19m, alto: 1.5m - 5.8m)

La Figura 3-1 muestra el histograma del índice de fisuración térmica con una división de 0.05. El índice de fisuración térmica de los elementos con fisuras va desde 0.45 a 1.85. El índice de fisuración térmica de los miembros que no presentan fisuras va desde 0.70 a 1.10. La mayoría de los miembros que no presentan fisuras tienen un índice de fisuración térmica igual o superior a 1.0.

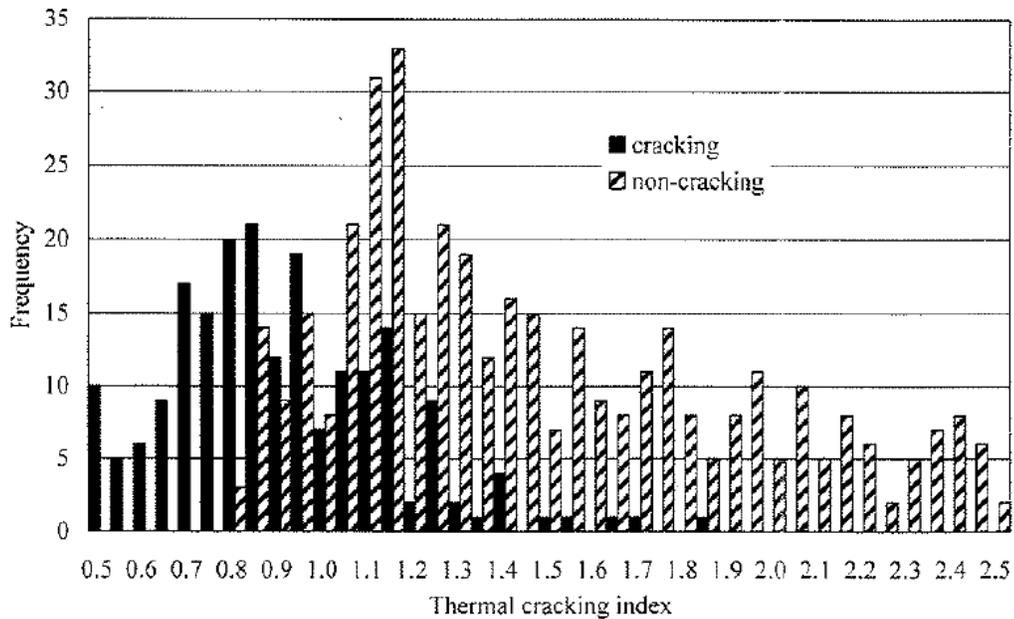


Figura 3-1: Histograma de frecuencia según ausencia o presencia de fisuras en relación al índice de fisuración térmica (Japan Concrete Institute 2008)

La Figura 3-2 muestra el histograma acumulativo sobre el índice de fisuración térmica. Cuando la frecuencia acumulativa del índice de fisuración térmica de los elementos de hormigón con fisuras es la misma que la de los miembros sin fisuras, el índice de fisuración térmica se aproxima a 1.0. La Figura 3-3 muestra la relación entre la razón de probabilidad de fisuración térmica y el índice de fisuración térmica basada en los resultados mostrados en la Figura 3-1 y Figura 3-2. El intervalo del eje horizontal es 0.05.

En comparación con la razón de probabilidad de fisuración térmica calculada por cada intervalo, la razón de probabilidad de fisuración térmica calculada usando la frecuencia acumulada varía notablemente alrededor del índice de fisuración térmica igual a 1.0. La razón de probabilidad de fisuración térmica es casi cero cuando el índice de fisuración térmica es mayor a 1.40. Mientras la razón de probabilidad de fisuración térmica es aproximadamente 90% cuando el índice de fisuración térmica es 0.90, la razón de probabilidad de fisuración térmica es aproximadamente 30% cuando el índice de fisuración térmica es 1.10. En este rango, cuando el índice de fisuración térmica varía en 0.2, la razón de probabilidad de fisuración térmica varía en un 60%. Cuando la razón de probabilidad de fisuración térmica es calculada por cada intervalo, la razón es aproximadamente 15% incluso a un índice de fisuración térmica de 1.5.

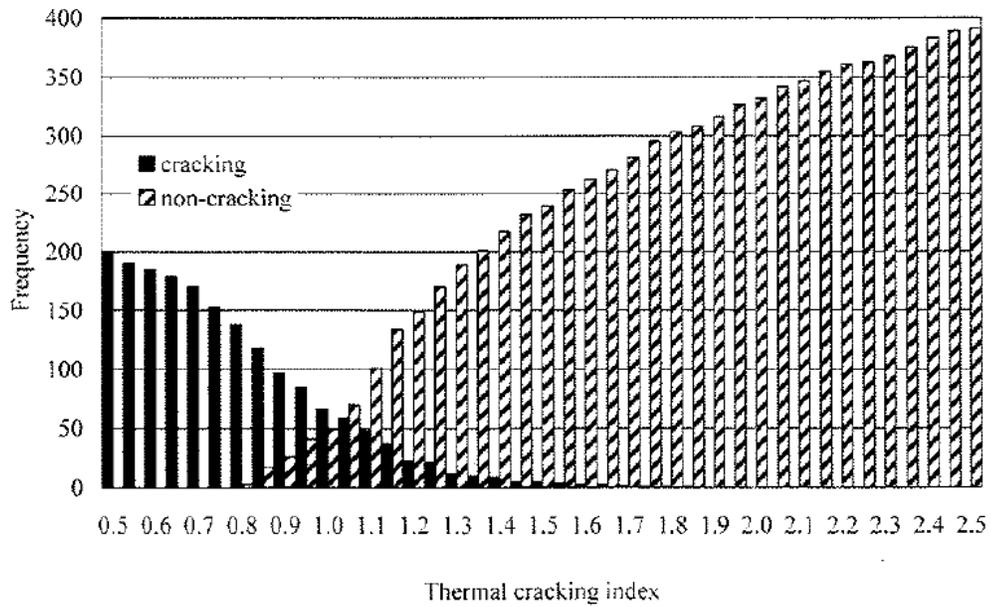


Figura 3-2: Histograma de frecuencia acumulada según ausencia o presencia de fisuras en relación al índice de fisuración térmica (JCI 2008)

De los resultados mostrados, se concluye que la relación entre la probabilidad de fisuración térmica y el índice de fisuración térmica debe ser determinada de acuerdo a lo mostrado en la Figura 3-3.

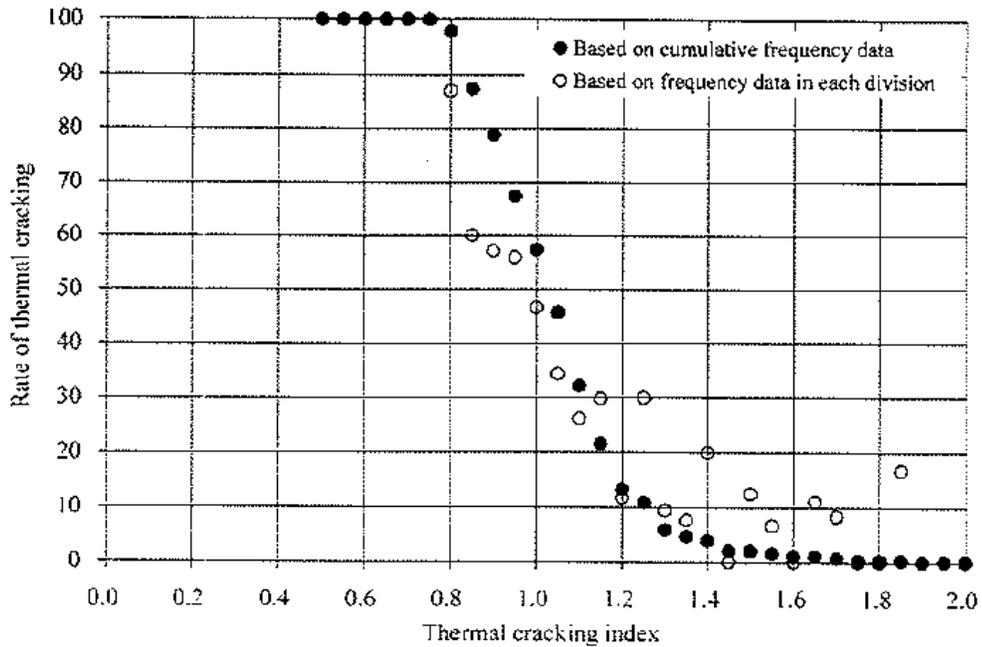


Figura 3-3: Relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica (JCI 2008)

Para obtener la curva de probabilidad, el comité técnico introdujo una adaptación de la función de distribución de Weibull como una curva de regresión de la probabilidad de fisuración térmica. A continuación se muestra la ecuación final obtenida, pero el detalle completo de la derivación de la curva se incluye en el Anexo A.

$$P(I_{cr}) = \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{I_{cr}}{0.92} \right)^{-4.29} \right\} \right] \cdot 100 \quad (3.1)$$

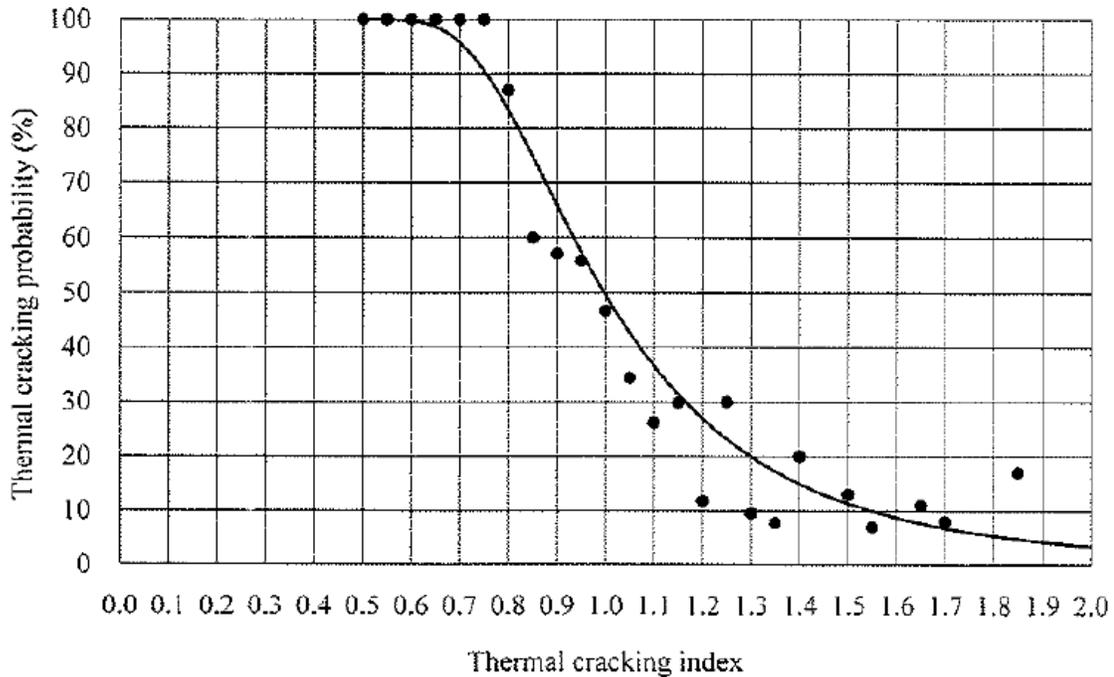


Figura 3-4: Relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica basada en la función de distribución de Weibull (JCI 2008)

La Figura 3-4 muestra la relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica expresada por la Ecuación (3.1). De acuerdo a la Figura 3-4, la probabilidad de fisuración térmica es 50% cuando el índice de fisuración térmica es 1.0 y el índice de fisuración térmica es 1.85 cuando la probabilidad de fisuración térmica es 5%. La probabilidad de fisuración térmica del 5% y el índice de fisuración térmica de 1.85, son los valores límite que previenen la fisuración térmica en hormigones masivos según la guía japonesa.

En versiones anteriores del documento “Especificaciones Estándar para Estructuras de Hormigón” de la Sociedad de Ingenieros Civiles de Japón, se habían determinado curvas de probabilidad, pero éstas eran distribuciones normales. La Figura 3-5 muestra la curva de probabilidad de fisuración basada en la función de distribución de Weibull en comparación con las curvas de probabilidad de las versiones anteriores basadas en la distribución de Gauss. Como se muestra en la Figura 3-5, la tendencia de la curva de probabilidad basada en la función de distribución de Weibull de la probabilidad de

fisuración térmica (indicada en la Figura 3-5 como “This Guidelines”) es la más precisa y la que mejor se adapta a la relación determinada empíricamente entre el índice y la probabilidad de fisuración, representada por los puntos mostrados en la Figura 3-4.

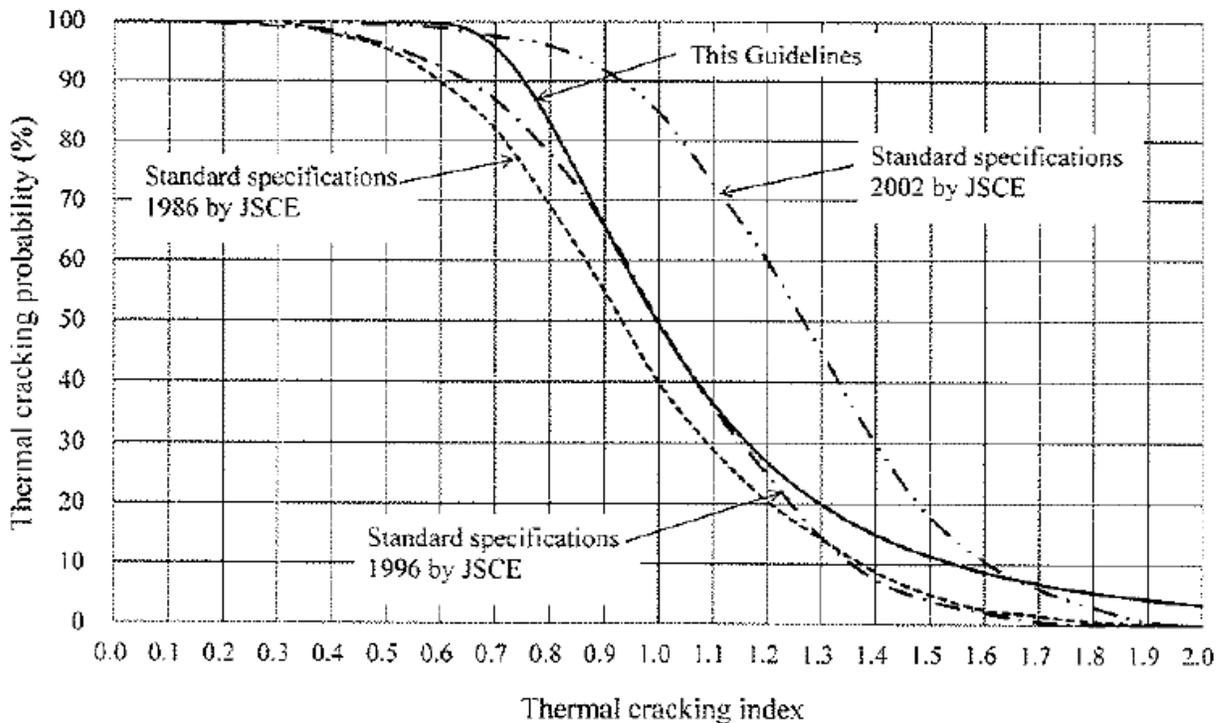


Figura 3-5: Comparación de las curvas de probabilidad de fisuración térmica especificadas en los estándares de la SICJ (JCI 2008).

CAPÍTULO 4 Procedimiento de verificación de fisuración térmica de la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”

4.1. Verificación de la fisuración térmica

La fisuración térmica debe ser verificada a partir de la probabilidad de fisuración térmica o los anchos de fisuras térmicas, obtenidos aplicando un método de análisis demostradamente confiable y teniendo como referencia los valores límites descritos en la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”. En este trabajo de título se estudiará la verificación de fisuración de un elemento de hormigón masivo mediante la determinación de la probabilidad de fisuración térmica.

La guía describe dos métodos para la verificación de la fisuración térmica. Uno es el método de elementos finitos tridimensional y el otro método se basa en una ecuación simple propuesta por la guía para determinar el índice de fisuración térmica, y en función de éste estimar la probabilidad de fisuración. En este trabajo de título se analizará el primer método, el método de elementos finitos tridimensional, ya que es el método recomendado por la guía debido a que es el más completo y el que tiene la precisión más alta.

4.2. Verificación de la fisuración térmica basada en el método de elementos finitos tridimensional (MEF-3D)

El método estándar de análisis para la verificación de fisuración térmica debe ser el método de elementos finitos tridimensional (MEF-3D). MEF-3D es considerado como la herramienta estándar para el análisis térmico y de esfuerzo, porque es fácil modelar en MEF-3D formas geométricas para una gran variedad de estructuras. Además, MEF-3D tiene la ventaja de permitir la implementación del análisis térmico y de esfuerzo con la misma malla. A menos que el análisis esté basado en MEF-3D, se debe confirmar que la precisión del método de análisis alternativo que se utilice, sea equivalente a la precisión de MEF-3D.

Cabe destacar que en hormigones masivos no es necesario modelar el refuerzo ya que la restricción dada por el refuerzo es generalmente insignificante y por lo tanto la influencia en el esfuerzo térmico es muy pequeña. Sin embargo, es necesario hacer un modelo del refuerzo cuando la contracción autógena del hormigón es significativa o cuando se elige un tipo especial de agregado para reducir el coeficiente de expansión térmica del hormigón, con el propósito de controlar los esfuerzos térmicos donde se presenta una diferencia no despreciable de la deformación de expansión térmica entre el hormigón y el refuerzo.

A continuación se describe el procedimiento que se debe realizar para llevar a cabo tanto el análisis térmico como de esfuerzo, para cualquier elemento o estructura de hormigón masivo, y los resultados que se obtienen de esos análisis, que son los necesarios para finalmente obtener el índice y probabilidad de fisuración térmica.

4.2.1. Creación del modelo

Para poder determinar el índice de fisuración térmica y su probabilidad de fisuración correspondiente a una determinada estructura de hormigón masivo, se debe realizar un análisis de elementos finitos tridimensional con la ayuda de un software. Este análisis consta de dos pasos: un análisis térmico y un análisis de esfuerzo.

A continuación se describen las propiedades del material y otras condiciones necesarias para realizar cada uno de estos análisis. Un aspecto importante a tener en cuenta es que los valores de diseño considerados para las propiedades de los materiales hormigón, acero, terreno/roca-base y otros materiales que serán utilizados para el análisis de temperatura y esfuerzo térmico, deberán ser empíricamente determinados. A falta de resultados experimentales, los valores de diseño podrán ser determinados basados en información de referencia confiable.

Con el fin de mejorar la precisión, los valores de diseño deberán estar basados en ensayos usando los mismos materiales, la misma proporción de mezcla del hormigón y acero del mismo estándar que el usado in situ y sobre los resultados de la investigación del tipo de suelo en el sitio de construcción. Sin embargo, también se permite que los valores de diseño estén basados en información confiable cuando no esté disponible información propia de ensayo.

4.2.2. Análisis térmico

El análisis térmico tiene como objetivo determinar la temperatura a través del tiempo en todo la estructura o elemento sometido a análisis. Para lograr ese objetivo, se mencionan a continuación los valores y condiciones necesarias para realizar el análisis térmico de una estructura o elemento de hormigón masivo.

1) Geometría

Se debe modelar tanto la estructura objetivo como las estructuras que proveen la restricción a los cambios de volumen del hormigón. El suelo incluido en el modelo como soporte de la estructura (o elemento) debe tener una profundidad igual o mayor a 10 m y debe tener un ancho igual o mayor que el doble del ancho de la estructura objetivo (o elemento), tomando en cuenta la transferencia de calor, dependiendo del aumento de temperatura en la estructura (o elemento) y la influencia debido a la restricción del suelo.

2) Propiedades del hormigón

Con respecto a las siguientes propiedades del hormigón, cabe destacar que la guía japonesa “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”, menciona que los ensayos de referencia para la determinación de los valores de las propiedades

deben realizarse según lo indicado en JIS A, donde JIS corresponde a “Japanese Industrial Standards” (Normas Industriales Japonesas) y “A” corresponde al área técnica de Ingeniería Civil y Arquitectura. Las Normas Industriales Japonesas especifican las normas utilizadas en las actividades industriales de Japón, y se dividen en 19 áreas técnicas.

- a. Densidad del hormigón: Cantidad de masa de hormigón contenida en un determinado volumen. La densidad del hormigón de peso normal depende de las proporciones de la mezcla y sus valores generalmente varían desde 2200 a 2500 kg/m^3 , y se expresa como:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

Donde:

ρ : Densidad (kg/m^3)

m : Masa (kg)

V : Volumen (m^3)

- b. Aumento de temperatura adiabática: Las propiedades del aumento de temperatura adiabática en el hormigón serán determinadas mediante la Ecuación (4.2) tomando en cuenta el tipo de cemento, contenido de cemento por unidad de volumen de hormigón y la temperatura del hormigón en la colocación.

$$Q(t) = Q_{\infty} \left[1 - \exp \left\{ -r_{AT} (t - t_{0,Q})^{S_{AT}} \right\} \right] \quad (4.2)$$

Donde:

t : Edad (días)

$Q(t)$: Incremento de la temperatura en condiciones adiabáticas a una edad de t días ($^{\circ}C$)

Q_{∞} : Incremento de la temperatura adiabática al término del análisis ($^{\circ}C$)

r_{AT}, S_{AT} : Parámetros que representan la tasa de incremento de temperatura adiabática

$t_{0,Q}$: Edad donde comienza el aumento de temperatura

Las constantes correspondientes a la tasa de incremento de temperatura en condiciones adiabática expresadas en la Ecuación (4.2) deben ser determinadas mediante ensayos, tomando en cuenta el tipo de cemento, contenido de cemento por unidad de volumen del hormigón y la influencia de la temperatura de colocación. Cuando las constantes no son determinadas mediante experimentos, se puede usar la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Funciones adoptadas para modelar los parámetros en la Ecuación (4.2) correspondientes al incremento de temperatura del hormigón en condiciones adiabáticas (JCI 2008)

$$Q(t) = Q_{\infty} \left[1 - \exp \left\{ -r_{AT} (t - t_{0,Q})^{S_{AT}} \right\} \right]$$

Tipo de cemento	Función	$W_c: 250 \text{ kg/m}^3 \leq W_c \leq 400 \text{ kg/m}^3$	
Cemento portland corriente	$Q_{\infty} = a + b \cdot T_a$	$a = 17.5 + 0.113 \cdot W_c$	$b = -0.146 + 0.000308 \cdot W_c$
	$r_{AT} = a + b \cdot T_a$	$a = -0.426 + 0.00207 \cdot W_c$	$b = 0.0471 + 0.0000188 \cdot W_c$
	$S_{AT} = 1$		
	$t_{0,Q} = a \cdot \exp(-b \cdot T_a)$	$a = 0.832 - 0.000531 \cdot W_c$	$b = 0.0482 + 0.000068 \cdot W_c$
Cemento portland de calor moderado	$Q_{\infty} = a + b \cdot T_a$	$a = 8.0 + 0.118 \cdot W_c$	$b = 0.079 - 0.00016 \cdot W_c$
	$r_{AT} = a + b \cdot T_a$	$a = 0.101 + 0.000811 \cdot W_c$	$b = 0.00679 + 0.0000631 \cdot W_c$
	$S_{AT} = 1$		
	$t_{0,Q} = a \cdot \exp(-b \cdot T_a)$	$a = 1.02 - 0.000867 \cdot W_c$	$b = 0.0493 + 0.0000295 \cdot W_c$
Cemento portland de calor bajo	$Q_{\infty} = a + b \cdot T_a$	$a = 12.2 + 0.0912 \cdot W_c$	$b = 0.0946 - 0.000159 \cdot W_c$
	$r_{AT} = a + b \cdot T_a$	$a = 0.218 + 0.0003 \cdot W_c$	$b = -0.00179 + 0.0000598 \cdot W_c$
	$S_{AT} = a + b \cdot T_a$	$a = 0.302 + 0.00104 \cdot W_c$	$b = 0.00293 - 0.0000216 \cdot W_c$
	$t_{0,Q} = a \cdot \exp(-b \cdot T_a)$	$a = 1.178 - 0.00115 \cdot W_c$	$b = 0.0503 - 0.00000289 \cdot W_c$
Cemento portland de alta resistencia a edad temprana	$Q_{\infty} = a + b \cdot T_a$	$a = 15.9 + 0.135 \cdot W_c$	$b = -0.106 + 0.0000257 \cdot W_c$
	$r_{AT} = a + b \cdot T_a$	$a = 0.601 + 0.0031 \cdot W_c$	$b = 0.0989 - 0.0000688 \cdot W_c$
	$S_{AT} = 1$		
	$t_{0,Q} = a \cdot \exp(-b \cdot T_a)$	$a = 0.607 - 0.000388 \cdot W_c$	$b = 0.0158 + 0.000188 \cdot W_c$
Cemento portland de escoria de alto horno clase B	$Q_{\infty} = a + b \cdot T_a$	$a = 17.9 + 0.115 \cdot W_c$	$b = -0.149 + 0.000314 \cdot W_c$
	$r_{AT} = a + b \cdot T_a$	$a = -0.325 + 0.00156 \cdot W_c$	$b = 0.0216 + 0.000039 \cdot W_c$
	$S_{AT} = 1$		
	$t_{0,Q} = a \cdot \exp(-b \cdot T_a)$	$a = 0.279 + 0.000795 \cdot W_c$	$b = 0.0693 + 0.0000904 \cdot W_c$
Cemento portland de ceniza volante clase B	$Q_{\infty} = a + b \cdot T_a$	$a = 3.03 + 0.138 \cdot W_c$	$b = 0.0741 - 0.00016 \cdot W_c$
	$r_{AT} = a + b \cdot T_a$	$a = -0.0212 + 0.00033 \cdot W_c$	$b = 0.146 + 0.000308 \cdot W_c$
	$S_{AT} = 1$		
	$t_{0,Q} = a \cdot \exp(-b \cdot T_a)$	$a = 0.526 - 0.00022 \cdot W_c$	$b = 0.0963 - 0.00007 \cdot W_c$

T_a : Temperatura del hormigón en la colocación ($^{\circ}\text{C}$) W_a : contenido de cemento (kg/m^3)

- c. Coeficiente de transferencia de calor: El coeficiente de transferencia de calor o coeficiente de convección, cuantifica la influencia de las propiedades del fluido (capa de aire o agua), de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección con el medio exterior en contacto con la estructura.

Convección se refiere a la energía transportada como resultado de movimientos macroscópicos, en otras palabras, la transferencia de calor desde la superficie de un material al fluido que se mueve alrededor de la superficie.

Este coeficiente se determina de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \quad (4.3)$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

Q : Flujo de calor recibido o perdido (W)

A : Área de la superficie de transferencia de calor (m^2)

ΔT : Diferencia de temperatura entre la superficie sólida y el fluido en contacto con la superficie ($^\circ C$)

El coeficiente de transferencia de calor depende del tipo de encofrado, tiempo de desencofrado, método de curado, duración del curado, temperatura ambiente, velocidad del viento y condiciones de humedad del ambiente, y por lo tanto es difícil determinarlo exactamente. En la guía estudiada en este trabajo de título, los valores de referencia correspondientes al encofrado típico y método de curado se muestran en la Tabla 4-2.

Además, cuando los valores de la Tabla 4-2 no son utilizados, se puede usar la Ecuación (4.4) para obtener el coeficiente de transferencia de calor.

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \sum \frac{d_{Fi}}{\lambda_{Fi}}} \quad (4.4)$$

Donde:

η : Coeficiente de transferencia de calor modificado ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

β : Coeficiente de transferencia de calor en la superficie expuesta al ambiente ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), generalmente se permite tomarlo como 12-14 $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

d_{Fi} : Espesor de los materiales de curado (m)

λ_{Fi} : Conductividad térmica del material de curado ($W/m \cdot ^\circ C$)

Tabla 4-2: Valores de coeficiente de transferencia de calor (JCI 2008)

N°	Tipo de encofrado y método de curado	Coeficiente de transferencia de calor (W/m ² °C)
1	Encofrado de acero, curado rociando agua (profundidad de poza <10mm)	14
2	Poza (10mm ≤ profundidad poza ≤ 50mm) incluyendo curado con estera de paja	8
3	Poza (50mm ≤ profundidad poza ≤ 100mm) incluyendo curado con estera de paja	8
4	Madera contrachapada	8
5	Mantas	6
6	Estera de curado, poza + estera de curado, incluyendo sábana empapada	6
7	Espuma de poliestireno (espesor: 50mm) + mantas	2
8	Bolsa de aire (con manta adjunta): 2 mantas, 3 mantas, 4 mantas	6,4,2
9	Superficie expuesta en hormigón, suelo, lecho rocoso.	14

- d. Calor específico: Se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (Kelvin o grado Celsius). El calor específico es generalmente afectado por la temperatura de ensayo, pero se asume constante para los efectos de análisis de generación de calor en estructuras de hormigón masivo.

La relación entre el calor específico y el cambio de temperatura se expresa en la Ecuación (4.5).

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T \quad (4.5)$$

Donde:

Q : Calor añadido (J)
 c_p : Calor específico (J/kg·°C)
 m : Masa (kg)
 ΔT : Cambio de temperatura (°C)

El calor específico del hormigón es influenciado por la razón agua/cemento y el tipo de roca usado como agregado, generalmente está en el rango de 1000 a 1250 J/kg°C. Si el valor de diseño no es obtenido por prueba o experimento, se puede usar un valor de 1105 J/kg°C.

- e. Conductividad térmica: Se define como la razón entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura. El contenido de agua, el tipo de agregado, la densidad y la temperatura en la mezcla de hormigón influyen en la conductividad térmica.

La conductividad del hormigón puede ser calculada mediante la Ecuación (4.6).

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \quad (4.6)$$

Donde:

k : Conductividad térmica (W/m·°C)

α : Difusividad térmica (m²/s)

ρ : Densidad (kg/m³)

c_p : Calor específico (J/kg·°C)

El término α de la Ecuación (4.6) es la difusividad térmica, parámetro que caracteriza la rapidez con la que varía la temperatura del material ante una solicitud térmica, por ejemplo, ante una variación brusca de temperatura en la superficie.

La conductividad térmica del hormigón es influenciada por el tipo de roca usada como agregado como se muestra en la Tabla 4-3 y generalmente está en el rango de 2.0 a 3.5 W/m°C. Cuando el valor de diseño no es obtenido por prueba o experimento, se recomienda usar el valor de 2.7 W/m°C.

Tabla 4-3: Conductividad térmica del hormigón mezclado con varios tipos de agregados (JCI 2008)

Tipo de hormigón	Tipo de roca	Conductividad térmica (W/m°C)
Hormigón de peso normal	cuarcita	3.5 – 3.6
	caliza	3.1 – 3.3
	dolomita	3.2 – 3.3
	granito	2.6
	riolita	2.1
	basalto	2.1
Hormigón de peso liviano		0.5 – 0.8

3) Condiciones de borde

Con respecto a la transferencia de calor en el análisis térmico debe determinarse, ya sea, el límite efectivo de transferencia de calor, el límite adiabático o el límite de la temperatura fija. El coeficiente de transferencia de calor, mencionado anteriormente en

el punto c., es el que determinará la transferencia de calor entre la estructura y el ambiente, y en este caso las caras de la estructura o elemento expuestas al ambiente, son el límite de transferencia de calor.

Las caras laterales del suelo, que interactúan con la estructura, pueden ser determinadas como límites adiabáticos, y la cara inferior puede ser determinada como el límite de temperatura fija la cual puede ser igual a la temperatura promedio anual. En general, la influencia del calor de radiación o radiación térmica puede ser despreciada.

También debe determinarse la temperatura ambiente. La temperatura promedio diaria de los tres últimos años en el lugar de construcción debe ser usada como la temperatura ambiente del lugar, para los efectos de la modelación. Si los datos de los tres últimos años no están disponibles, entonces se deben usar los datos del observatorio meteorológico más cercano o de la estación meteorológica más cerca del lugar en cuestión.

Y por último también debe establecerse una temperatura inicial del análisis que corresponde a la temperatura de colocación del hormigón. La temperatura de colocación del hormigón debe ser dada como la temperatura ambiente más 5°C, lo que representa el aumento de temperatura durante el proceso de mezclado y transporte del hormigón, a no ser que se apliquen medidas para controlar la temperatura de colocación del hormigón como, por ejemplo, enfriamiento de los materiales.

Las temperaturas iniciales del suelo y/o de la estructura de hormigón existente para el análisis del hormigón recién colocado, deben ser determinadas a través de un análisis transitorio para el cambio de temperatura de los tres meses antes de la colocación del hormigón de la estructura objetivo (o miembro), donde la temperatura ambiente promedio mensual puede ser usada como las temperatura inicial del suelo y/o de la estructura de hormigón existente para el análisis transitorio.

4) Malla

Cuando se implementan los análisis de temperatura y de esfuerzo, es necesario tomar un modelo apropiado para la estructura objetivo (o miembro) y para el cuerpo restrictivo. Se desea dividir la región que es susceptible a fisuración térmica en más de 6 elementos. La región que se extienda a una profundidad de aproximadamente 60 cm desde la superficie de radiación de calor, debe ser dividida en más de 3 elementos, y la razón del largo del lado más largo versus el largo del lado más corto de la región, debe ser menor a 10.

5) Período de análisis

El período de análisis debe ser iniciado al comienzo del aumento de temperatura en el hormigón y debe continuar hasta que la temperatura interna del hormigón se equilibre con la temperatura ambiente.

El período de análisis es diferente dependiendo del espesor mínimo de la estructura objetivo (o miembro). El período de análisis debe ser aproximadamente un mes para espesores iguales o menores a 2 metros y tres meses para espesores mayores a 2 metros. Cuando sea necesario considerar el cambio de temporada en la temperatura ambiente, el período de análisis debe ser un período de tiempo que abarque desde la colocación del hormigón hasta el día en que la temperatura promedio diaria en el próximo invierno sea la más baja.

El intervalo de tiempo para el análisis térmico debe establecerse más corto en edades tempranas cuando el calor de hidratación del cemento es alto, pero deben configurarse gradualmente más largos en las edades siguientes.

Ajustando de esta manera los intervalos, será posible acortar el tiempo de análisis sin disminuir la precisión del análisis. Un ejemplo de intervalo de tiempo en análisis térmico se muestra en la Tabla 4-4. El intervalo de tiempo en el análisis de esfuerzo debe ser el mismo que en el análisis térmico estándar.

Tabla 4-4: Ejemplo típico de intervalo de tiempo en análisis térmico (JCI 2008)

Edad	Intervalo de tiempo
0 - 6 horas	1 hora
6 horas – 12 horas	2 horas
12 horas – 24 horas	3 horas
24 horas – 72 horas	6 horas
72 horas – 168 horas	12 horas
Después de 168 horas	24 horas

6) Datos de salida

Los datos de salida que se obtienen de este análisis es el valor de la temperatura en el tiempo para cada punto de la estructura. Este resultado es muy importante ya que se utilizará como dato de entrada en el análisis de esfuerzo, y será un factor determinante en los resultados que se obtendrán del análisis de esfuerzo.

4.2.3. Análisis de esfuerzo

1) Geometría

La geometría es la misma que se utilizó para el análisis de esfuerzo.

2) Propiedades del hormigón

- a. Resistencia a la compresión: Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.

La resistencia a la compresión del hormigón podrá ser determinada mediante la Ecuación (4.7) la cual toma en cuenta la edad, la dependencia del historial de temperatura, entre otros.

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b \cdot (t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad (4.7)$$

Donde:

t_e : Edad equivalente (días)

t_n : Edad de control de la resistencia del hormigón curado bajo agua a 20°C (días)

$f'_c(t_e)$: Resistencia a la compresión del hormigón en función de t_e (N/mm²)

a, b : Parámetros adimensionales asociados al desarrollo de la resistencia, dependiendo del tipo de cemento y edad de control de la resistencia.

S_f : Edad equivalente correspondiente al inicio del endurecimiento, dependiendo del tipo de cemento (días)

$f'_c(t_n)$: Resistencia a la compresión del hormigón en t_n (N/mm²)

El desarrollo de la resistencia del hormigón deber ser determinado mediante la Ecuación (4.7) basado en mediciones experimentales. El parámetro t_e de la Ecuación (4.7) representa la edad equivalente, o más conocida como madurez, y es determinado por la Ecuación (4.8).

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i)}{T_0}} \right] \quad (4.8)$$

Donde:

t_e : Edad equivalente del hormigón (días)

Δt_i : Intervalo de temperatura constante continuo en el hormigón (días)

$T(\Delta t_i)$: Temperatura del hormigón para Δt_i (°C)

T_0 : 1°C

El concepto de edad equivalente, o más bien conocido como madurez (t_e), utiliza el principio en que la resistencia del hormigón, y otras propiedades, están directamente relacionadas con la edad y la temperatura ambiente de curado del hormigón. El concepto de madurez asume que las muestras de una mezcla de hormigón que tengan la misma madurez, tendrán resistencias similares independientemente de la combinación de tiempo y temperatura con la que se alcance la madurez. Esto se explica gráficamente en la Figura 4-1.

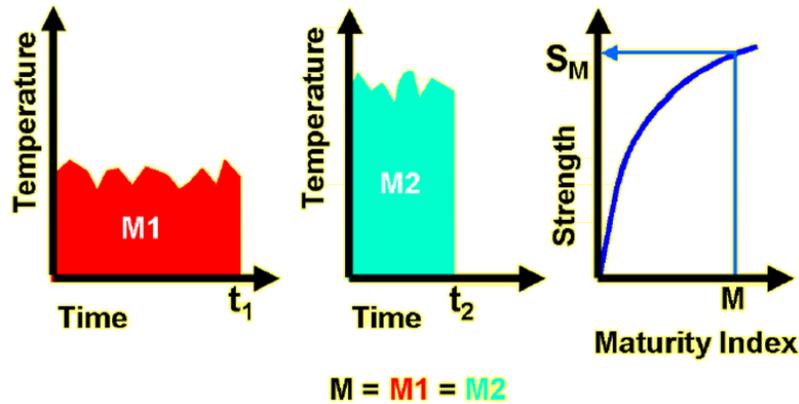


Figura 4-1: Concepto de madurez (Carrasquillo 2009)

Continuando con lo anterior, cuando los parámetros en la Ecuación (4.7) no son obtenidos experimentalmente, pueden ser obtenidos de la Tabla 4-5, es decir, a y b dependiendo del tipo de cemento y de la edad de control de la resistencia, mientras que S_f es obtenido dependiendo del tipo de cemento. Asimismo, la resistencia a la compresión $f'_c(t_n)$ en la edad de control de resistencia específica en la Ecuación (4.7), puede ser obtenida de la Tabla 4-6, considerando la razón agua/cemento.

Ya que estas constantes son obtenidas de muestras curadas bajo agua, se realizar un ajuste para el hormigón que no es curado bajo agua. Dependiendo de la condición de curado, especialmente en el caso de cemento con adiciones, es necesario evaluar la resistencia a la compresión apropiadamente, porque la condición de curado tiene una gran influencia en el desarrollo de la resistencia a la compresión.

Tabla 4-5: Parámetros de la ecuación de desarrollo de la resistencia a compresión
(JCI 2008)

Tipo de cemento	Edad de control de resistencia t_n (días)	$a = \alpha_1 + \beta_1(C/W) *$		$b = \alpha_2 + \beta_2(C/W) *$		S_f
		α_1	β_1	α_2	β_2	
Cemento portland corriente	28	6.31	-1.36	0.771	0.0494	0.37
	56	6.94	-1.54	0.875	0.0278	
	91	7.37	-1.67	0.946	0.0138	
Cemento portland de calor moderado	28	15.8	-3.44	0.428	0.125	0.42
	56	20.2	-4.79	0.637	0.0862	
	91	24.3	-6.09	0.844	0.0399	
Cemento portland de calor bajo	28	21.9	-3.94	0.203	0.143	0.50
	56	32.8	-6.92	0.410	0.125	
	91	42.0	-9.72	0.612	0.086	
Cemento portland de alta resistencia a edad temprana	7	3.27	-0.816	0.512	0.122	0.30
	14	3.96	-1.04	0.711	0.0759	
	28	4.39	-1.19	0.841	0.0428	
	91	4.79	-1.32	0.966	0.0096	
Cemento portland de escoria de alto horno clase B	28	14.4	-3.86	0.477	0.140	0.42
	56	17.4	-4.88	0.687	0.0877	
	91	19.2	-5.44	0.787	0.0757	
Cemento portland de ceniza volante clase B	28	13.4	-3.20	0.514	0.116	0.47
	56	16.2	-4.12	0.708	0.0739	
	91	18.4	-4.80	0.850	0.0456	

*C/W: razón cemento/agua

Tabla 4-6: Ecuación y constantes para la resistencia a la compresión a una edad específica de control de resistencia (N/mm²) (JCI 2008)

Tipo de cemento	Edad de control de resistencia t_n (días)	$f'_c(t_n) = p_1 + p_2(C/W) *$	
		p_1	p_2
Cemento portland corriente	28	-14.5	28.1
	56	-12.8	28.7
	91	-11.6	29.1
Cemento portland de calor moderado	28	-17.6	27.5
	56	-12.9	28.8
	91	-7.28	29.1
Cemento portland de calor bajo	28	-17.6	25.2
	56	-13.4	28.7
	91	-6.44	29.4
Cemento portland de alta resistencia a edad temprana	7	-22.6	30.5
	14	-18.2	31.0
	28	-14.9	30.9
	91	-11.5	30.5
Cemento portland de escoria de alto horno clase B	28	-10.2	24.3
	56	-3.38	23.6
	91	-1.43	24.5
Cemento portland de ceniza volante clase B	28	-27.2	31.8
	56	-24.2	32.9
	91	-22.4	34.0

*C/W: razón cemento/agua

- b. Resistencia a tracción por hendimiento: Es el máximo esfuerzo de tracción indirecta que un cuerpo puede soportar antes de romperse.

La resistencia a tracción del hormigón puede ser determinada, a partir de la resistencia a compresión (f'_c), por la Ecuación (4.9) para una determinada edad equivalente.

$$f_t(t_e) = C_1 \cdot f'_c(t_e)^{C_2} \quad (4.9)$$

Donde:

$f_t(t_e)$: Resistencia a tracción por hendimiento del hormigón en t_e (N/mm²)

$f'_c(t_e)$: Resistencia a compresión del hormigón en t_e (N/mm²)

C_1, C_2 : Constantes

La resistencia a la tracción descrita en esta sección se refiere a la resistencia a tracción por hendimiento. Cuando no es determinada mediante ensayos, puede ser obtenida por la Ecuación (4.9). Se recomienda que las constantes C_1 y C_2 en la Ecuación (4.9) sean 0.13 y 0.85, respectivamente. Dependiendo de la condición de curado, especialmente en el caso de cemento con adiciones, es necesario evaluar la resistencia a la tracción apropiadamente ya que la condición de curado tiene una gran influencia en el desarrollo de la resistencia a la tracción.

- c. Módulo de elasticidad: El agrietamiento en hormigones masivos ocurre cuando los esfuerzos de tracción inducidos por el gradiente térmico superan la resistencia a la tracción del material. El módulo de elasticidad del hormigón es la razón entre el esfuerzo aplicado y la deformación elástica resultante y determina la rigidez de la estructura de hormigón.

Esta relación lineal se conoce como la Ley de Hooke y se expresa en la Ecuación (4.10).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.10)$$

Donde:

σ : Esfuerzo (Pa)

E : Módulo de Young (Pa)

ε : Deformación unitaria

El límite elástico representa el esfuerzo máximo permitido antes que el hormigón se agriete y experimente deformaciones permanentes. En materiales multifase heterogéneos como el hormigón, el módulo de elasticidad aumenta a medida que se hidrata la pasta de cemento, lo cual se traduce en un aumento de la rigidez y fisurabilidad del hormigón.

El módulo de elasticidad del hormigón puede ser determinado por la Ecuación (4.11) para una determinada edad equivalente.

$$E_c(t_e) = C_3 \cdot f'_c(t_e)^{C_4} \quad (4.11)$$

Donde:

$E_c(t_e)$: Módulo de elasticidad del hormigón en t_e (N/mm²)

$f'_c(t_e)$: Resistencia a la compresión del hormigón en t_e (N/mm²)

C_3, C_4 : Constantes

A no ser que existan datos experimentales, el módulo de elasticidad del hormigón puede ser determinado por la Ecuación (4.11), la cual es una función de la resistencia a la compresión. Se recomienda en ese caso que las constantes C_3 y C_4 sean 6300 y 0.45, respectivamente.

- e. Deformación por contracción autógena: La contracción autógena es consecuencia de la contracción química desarrollada durante la hidratación del cemento. Esta contracción tiene lugar sin la pérdida real de agua del hormigón.

La deformación por contracción autógena en el hormigón puede ser determinada por la Ecuación (4.13).

$$\varepsilon_{as}(t_e) = \eta_c \cdot \varepsilon_{as,\infty} \cdot r_{as}(t_e) \quad (4.13)$$

Donde:

$\varepsilon_{as}(t_e)$: Deformación por contracción autógena en el hormigón en t_e ($\times 10^{-6}$)

η_c : Constante que representa la influencia del tipo de cemento en la deformación por contracción autógena.

$\varepsilon_{as,\infty}$: Valor final de la deformación por contracción autógena ($\times 10^{-6}$)

$r_{as}(t_e)$: Función que representa el desarrollo de la deformación por contracción autógena.

La deformación por contracción autógena en el hormigón debe ser determinada por la Ecuación (4.13). Los parámetros de la Ecuación (4.13) pueden ser entregados por las Ecuaciones (4.14), (4.15), (4.16) y la Tabla 4-7, tomando en cuenta el tipo de cemento, razón agua/cemento y el historial de temperatura.

Tabla 4-7: Constantes η_c , las cuales representan el efecto del tipo de cemento en el valor final de la deformación por contracción autógena (JCI 2008)

Tipo de cemento	η_c
Cemento portland corriente	1.00
Cemento portland de calor moderado	0.85
Cemento portland de calor bajo	0.40
Cemento portland de alta resistencia a edad temprana	1.20
Cemento portland de escoria de alto horno clase B	1.00
Cemento portland de ceniza volante clase B	1.00

- a) Cemento portland corriente, cemento portland de calor moderado, cemento portland de bajo calor, y cemento portland de ceniza volante clase B:

$$\varepsilon_{as,\infty} = 3070 \cdot \exp\{-7.2(W/C)\} + 50 \cdot [1 - \exp\{-1.2 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{m\acute{a}x} - 20)^4\}]$$

$$(20^\circ\text{C} \leq T_{m\acute{a}x} \leq 70^\circ\text{C}) \quad (4.14)$$

b) Cemento portland de escoria de alto horno clase B:

$$\varepsilon_{as,\infty} = 2350 \cdot \exp\{-5.8(W/C)\} + 80 \cdot [1 - \exp\{-1.2 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{m\acute{a}x} - 20)^4\}]$$

$$(20^{\circ}C \leq T_{m\acute{a}x} \leq 70^{\circ}C) \quad (4.15)$$

$$r_{as}(t_e) = 1 - \exp\{-a_{as}(t_e - t_{e,set})^{b_{as}}\} \quad (4.16)$$

a_{as} y b_{as} en la Ecuación (4.16) son los coeficientes que muestran la propiedad progresiva de la deformación por contracción autógena y son obtenidos de las Ecuaciones (4.17), (4.18) y (4.19) dependiendo del tipo del cemento.

i. Cemento portland corriente, cemento portland de calor moderado, cemento portland de resistencia alta temprana y cemento portland de ceniza volante clase B:

$$a_{as} = 3.7 \cdot \exp\{-6.8 \cdot (W/C)\} \quad b_{as} = 0.25 \cdot \exp\{2.5 \cdot (W/C)\} \quad (4.17)$$

ii. Cemento portland de bajo calor:

$$a_{as} = 2.4 \cdot \exp\{-6.5 \cdot (W/C)\} \quad b_{as} = 0.12 \cdot \exp\{2.7 \cdot (W/C)\} \quad (4.18)$$

iii. Cemento portland de escoria de alto horno clase B:

$$a_{as} = 3.7 \cdot \exp\{-6.8 \cdot (W/C)\} \cdot (0.060 T_{m\acute{a}x} - 0.20)$$

$$b_{as} = 0.25 \cdot \exp\{2.5 \cdot (W/C)\} \cdot (-0.075 T_{m\acute{a}x} + 1.15) \quad (4.19)$$

Donde:

W/C : Razón agua/cemento

$T_{m\acute{a}x}$: Temperatura máxima del hormigón ($^{\circ}C$)

$t_{e,set}$: Tiempo de fraguado inicial (edad equivalente) mostrado en la Tabla 4-8 (días)

Tabla 4-8: Tiempo de fraguado inicial (JCI 2008)

Tipo de cemento	Tiempo de fraguado inicial (edad equivalente) (días)
Cemento portland corriente	0.30
Cemento portland de calor moderado	0.30
Cemento portland de calor bajo	0.35
Cemento portland de alta resistencia a edad temprana	0.20
Cemento portland de escoria de alto horno clase B	0.30
Cemento portland de ceniza volante clase B	0.30

- f. Deformación de expansión: La deformación de expansión en hormigones expansivos depende de los materiales, proporciones de mezcla, método de curado y temperatura del hormigón. Los valores de diseño para la deformación de expansión deben estar basado en ensayos según JIS (Japanese Industrial Standards) A 6202 Apéndice 2 (muestra: 100×100×360mm o 385 mm, razón de acero: 0.95%, curado: en agua a 20°C), ya que este método de prueba ha sido extensamente usado. Basado en este experimento, una ecuación tipo exponencial como la Ecuación (4.20) puede ser usada para obtener el desarrollo de la deformación de expansión. En esta ecuación, el efecto de la temperatura en la deformación de expansión es considerado mediante la edad equivalente.

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = \varepsilon_{ex,\infty} [1 - \exp\{-a_{ex}(t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}}\}] \quad (4.20)$$

Donde:

- $\varepsilon_{ex}(t_e)$: Deformación de expansión según edad equivalente t_e ($\times 10^{-6}$)
 $\varepsilon_{ex,\infty}$: Valor final de deformación de expansión ($\times 10^{-6}$)
 a_{ex}, b_{ex} : Constantes que muestran el efecto del tipo de cemento en la propiedad progresiva de la deformación de expansión.
 $t_{ex,0}$: Edad equivalente cuando comienza la expansión ($t_{e,set}$) (días)

Se asume que la deformación por contracción autógena no se incluye en la deformación de expansión calculada por la Ecuación (4.20) y por las constantes de la Tabla 4-9. La Figura 4-3 muestra el diagrama esquemático de la correlación entre la deformación de expansión dada por la Ecuación (4.20), la deformación por contracción autógena dada por la Ecuación (4.13) y la deformación observada que se asume se desarrollará en condición de sellado.

Las constantes en la Ecuación (4.20), las cuales están dadas en la Tabla 4-9, han sido determinadas para que el esfuerzo de restricción calculado con los valores de diseño, incluyendo la contracción autógena dada en esta guía, pueda coincidir con el esfuerzo medido en muestras restringidas y selladas (dimensiones: 100×100×800mm, cuerpo restrictivo: acero invar, razón de acero:

5.7%, aditivo expansivo: 20kg/m³) sometidas al historial de temperatura, simulando eso en hormigón masivo. Estas muestras fueron hechas con cemento portland corriente y cemento portland de escoria de alto horno clase B y con una razón agua/cemento de 0.55. Las deformaciones de expansión finales de ambos hormigones dadas por la Ecuación (4.15) y las constante de la Tabla 4-9, son aproximadamente un 75% de las deformaciones de expansión promedio de los hormigones con la misma razón agua/cemento (JIS A 6202 Apéndice 2).

Las deformaciones de expansión son obtenidas para hormigones con diferentes tipos de cemento y diferentes razones agua/cemento. Si las constantes en la Tabla 4-9 son determinadas para estos hormigones a través del procedimiento ya mencionado, se puede usar la Ecuación (4.20) para obtener el valor de diseño de la deformación de expansión.

Puede ser razonable obtener la deformación de expansión de muestras selladas sometidas a un historial de temperatura definido, en que las condiciones de la muestras pueden estar de acuerdo con JIS A 6202 Apéndice 2. Si se aplica este método para determinar la deformación de expansión como el valor de diseño, debe verificarse la validez de este método. Y debe destacarse que la deformación de expansión obtenida por este método incluye la deformación autógena.

Tabla 4-9: Constantes recomendadas de la Ecuación (4.20) (JCI 2008)

Tipo de cemento	$\epsilon_{ex,\infty}$	a_{ex}	b_{ex}	$t_{ex,0}$
Cemento portland corriente	150	0.69	1.11	0.30
Cemento portland de escoria de alto horno clase B	145	0.27	1.53	0.30

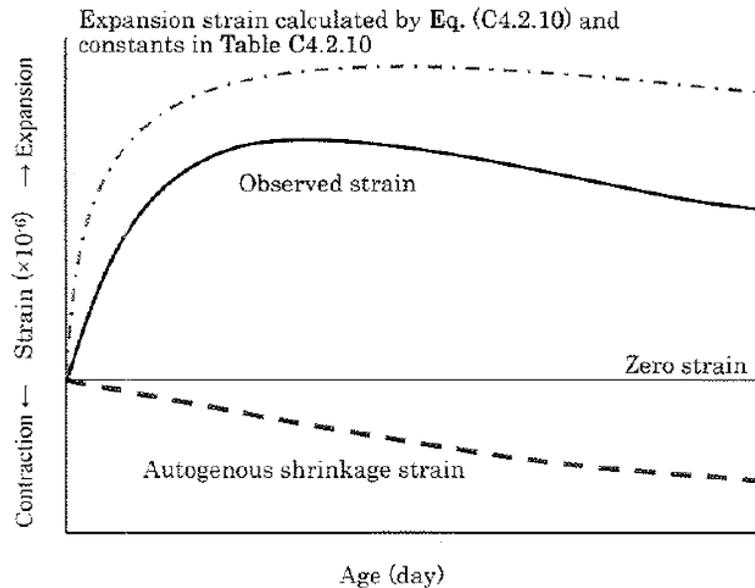


Figura 4-3: Diagrama esquemático de la deformación de expansión en hormigón expansivo (JCI 2008).

- g. Contracción por secado: Cuando la cantidad de agua en la pasta de cemento es mayor que la necesaria para la hidratación completa del cemento, el agua que no se usa para hidratar el cemento tiende a salir del conjunto, produciendo entonces una reducción en el volumen con su consecuente contracción.

La contracción por secado del hormigón puede ser obviada, por ser de segundo orden con respecto a las contracciones térmicas.

El efecto de la contracción por secado en el esfuerzo de tracción inducido en hormigones masivos que están restringidos externamente es pequeño, porque el esfuerzo de tracción debido a la contracción por secado se desarrolla principalmente en la capa superficial cuando se remueve el encofrado. Sin embargo, alrededor de este mismo período de tiempo, el esfuerzo de tracción debido a la contracción por secado es contrarrestado por el esfuerzo de compresión térmico. Por lo tanto, la influencia de la contracción por secado en grietas profundas, las cuales son el objetivo de esta guía, es despreciable y puede ser obviada en el análisis de esfuerzo térmico.

- h. Coefficiente de Poisson: Es la razón entre la deformación lateral y la deformación axial dentro del rango elástico de un material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. El coeficiente de Poisson del hormigón es 0.2, pero puede ser usado un valor experimental en lugar de este valor estándar.
- i. Coefficiente de expansión térmica: El hormigón se expande volumétricamente con el aumento de la temperatura y se contrae con la disminución de ésta. El coeficiente de expansión térmica mide la variación relativa de volumen por cada grado que varía la temperatura.

El valor del coeficiente de expansión térmica es particularmente importante en hormigones masivos debido a que la deformación inducida durante el período de enfriamiento depende tanto de la magnitud del cambio de temperatura como del coeficiente de expansión térmica del hormigón. Cabe mencionar que en el análisis de esfuerzo se utiliza un valor único de coeficiente de expansión térmica durante el período de análisis, ya que éste permanece constante en el tiempo.

El coeficiente de expansión térmica es generalmente $6-13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ como se muestra en las Tablas 4-10 y 4-11. Cuando el valor de diseño no es derivado de una prueba o ensayo, se puede usar $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para cemento portland y $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para cemento portland de escoria de alto horno clase B.

La influencia del tipo de roca del agregado en el coeficiente de expansión térmica puede ser determinada según la Tabla 4-11.

Tabla 4-10: Ejemplos de coeficientes de expansión térmica medidos para hormigón hecho con varios tipos de cemento (JCI 2008)

W/B* ⁴ (%)	Período de curado bajo condiciones herméticas (edad al momento de medición)	Coeficiente de expansión térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				RT* ⁹
		OPC* ⁵	BFS* ⁶	MH* ⁷	LH* ⁸	
55	Más de 3 meses a 20°C	8.8	10.3 - 12.2	-	-	1.17 - 1.39
45		9.2	10.7 - 13.0	-	-	1.18 - 1.41
30		10.8	11.0 - 12.0	-	-	1.02 - 1.11
55	Más de 4 meses a 20°C	8.4	8.4	8.3	8.5	1.00
55	Más de 3 meses a 20°C	8.9	12.8	-	-	1.44
55	0.5, 1, 3, 7 días sujeto a historial de temperatura	9	12	9	9	1.3
	14 días sujeto a historial de temperatura	9	12	8.5	8	1.3
	14 días a 20°C	9.5	11	8.5	8	1.2
25* ¹	Dentro de 24 horas a 20°C	23 - 28	25 - 43* ²	-	-	1.1 - 1.5
35* ¹		25 - 30	25 - 34* ²	-	-	1.0 - 1.1
34.5* ¹		24 - 30	24 - 32* ²	-	-	1.0 - 1.1
30* ¹	7 días a 20°C	14.8	19.4* ³	-	-	1.31
50* ¹		14.3	19.9* ³	-	-	1.39

*1: Medido para pasta de cemento

*2: Mezclado con escoria de alto horno granulada de 6000 cm^2/g finura del 60%

*3: Mezclado con escoria de alto horno granulada de 4000 cm^2/g finura del 50%

*4: W/B: Razón entre el agua y los materiales cementosos

*5: OPC: Cemento portland corriente

*6: BFS: Cemento portland de escoria de alto horno clase B

*7: MH: Cemento portland de calor moderado

*8: LH: Cemento portland de calor bajo

*9: RT: Razón entre el coeficiente de expansión térmica de OPC y el coeficiente de expansión térmica de BFS

Tabla 4-11: Coeficientes de expansión térmica para hormigones mezclados con diversos tipos de agregados (JCI 2008)

Tipo de roca	Coeficiente de expansión térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	Curado bajo agua	Curado bajo condiciones herméticas	Expuesto al ambiente
Granito	9.5	8.6	7.7
Cuarcita	12.8	12.2	11.7
Dolerita	9.5	8.5	7.9
Arenisca	11.7	10.1	8.6
Caliza	7.4	6.1	5.9

3) Condiciones de borde

En el análisis de esfuerzo térmico, el desplazamiento en la cara inferior del suelo puede ser libre en la horizontal y ser fijo en las direcciones verticales y que en las caras laterales del suelo sea libre tanto en las direcciones horizontales como verticales.

4) Malla

En el análisis de esfuerzo se utiliza la misma malla utilizada en el análisis térmico.

5) Duración del análisis

La duración de análisis del análisis de esfuerzo es la determinada en el análisis térmico.

6) Datos de salida

De este análisis se obtienen los esfuerzos de tracción y compresión dependientes de la madurez (t_e) en cada punto de la estructura. Con estos esfuerzos y con los valores de la resistencia a tracción por hendimiento del hormigón también dependiente de la madurez (determinada ya sea experimentalmente o por la ecuación propuesta por la guía japonesa) se determinará el índice de fisuración térmica, tal como se explica en la sección 4.3.

4.2.4. Propiedades de otros materiales

Aparte del hormigón el modelo puede incluir materiales como el acero y el suelo o roca base donde se apoya la estructura. A continuación se muestran las propiedades de estos materiales que se deben definir en el modelo computacional.

- **Acero**

Se permite que las propiedades térmicas adoptadas para el acero sean las siguientes:

- Calor específico: 0.43 - 0.49 kJ/kg°C
- Conductividad térmica: 50.0 - 85.0 W/m°C.

Se permite que las propiedades mecánicas adoptadas para el acero sean las siguientes:

- El módulo de elasticidad del acero puede ser 200 kN/mm².
- El coeficiente de Poisson del acero puede ser 0.3.
- El coeficiente de expansión térmica del acero puede ser $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Cuando el hormigón queda restringido en sus deformaciones por refuerzo de acero, la diferencia entre el coeficiente de expansión térmica del acero y del hormigón puede ser de interés. Sin embargo, este efecto es generalmente pequeño y por lo tanto no es considerado en el análisis.

- **Suelo y roca base**

- Las propiedades térmicas del suelo y la roca base deben ser determinadas en base a datos existentes confiables.

Las propiedades térmicas del suelo y de la roca base mostradas en la Tabla 4-12 pueden ser usadas para el análisis de temperatura sin mediciones experimentales directas. El coeficiente de expansión térmica generalmente está en el rango de $8-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, pero en general se permite que sea $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

- Las propiedades mecánicas del suelo y roca base deben ser determinadas basadas en datos existentes confiables.

Cuando se conoce el valor N del suelo, el cual es un índice de penetración que muestra la dureza del suelo obtenido mediante la prueba estándar de penetración, el módulo de elasticidad del suelo (E_b) puede ser obtenido por la ecuación $E_b = 2.8 \cdot N$ (N/mm^2). La Tabla 4-13 puede ser usada para obtener el módulo de elasticidad de la roca base. En términos del coeficiente de Poisson, se puede usar un valor de 0.4 - 0.5 para suelo arenoso, mientras que para otros tipos de suelo cohesivo se puede usar 0.2 - 0.3.

Tabla 4-12: Propiedades térmicas del suelo y de la roca base (JCI 2008)

Tipo de suelo o roca base	Valor N	Densidad (kg/m^3)	Calor específico ($\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$)	Conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
Roca base	-	2650	0.80	3.5
Suelo blando	0 – 20	1800	2.60	1.0
Suelo corriente	Mayor a 50	2100	1.40	1.7

Tabla 4-13: Valores de referencia de módulo de elasticidad de la roca base (JCI 2008)

Tipo de roca base	Módulo de elasticidad (N/mm^2)
Tipo A	10000
Tipo B	6000
Tipo C_H	4000
Tipo C_M	3000
Tipo C_L	1000

Con respecto a la clasificación mostrada en la Tabla 4-13, se debe saber que en geología se clasifican los macizos rocosos de acuerdo a su grado de desgaste y la presencia de fracturas. En Japón, los macizos rocosos se dividen en 4 clases, de la A a la D, en base a tres propiedades: desgaste, dureza y densidad de fracturas. Las clases A y B comprenden rocas duras con fracturas menores. Las rocas clase C son de dureza intermedia. Esta clase se subdivide en las subclases C_H, C_M y C_L, en orden creciente de las 3 propiedades. Las rocas clase D se caracterizan por su notable blandura y por la ausencia de cohesión entre los planos de exfoliación donde se presenta el relleno de arcilla. Tales rocas se quiebran fácilmente por pequeñas sacudidas. La clase D se subdivide en las subclases D_H y D_L, donde esta última se caracteriza por fuerte argilización. La argilización es el proceso de transformación de minerales y rocas no arcillosos en arcillosos.

4.3. Método de verificación para evitar la fisuración térmica

Como se mencionó anteriormente, usando el método de elementos finitos tridimensional descrito en la sección anterior, se obtienen los esfuerzos de tracción en toda la estructura dependiente de la madurez. También se necesita saber la resistencia a tracción por hendimiento dependiente de la madurez.

Luego se eligen los puntos de la estructura más propensos a fisurarse y se les determina el índice de fisuración térmica usando la Ecuación (4.21) que corresponde a dividir la resistencia a tracción por hendimiento por los esfuerzos de tracción principal del punto de la estructura escogido.

Como resultado se obtiene un índice de fisuración térmica para un punto de la estructura en el tiempo, durante todo el período de análisis. Luego se tiene que el índice de fisuración térmica usado para la verificación en relación a la probabilidad de fisuración térmica, es el mínimo que ocurre durante el período de verificación.

Dado el índice se procede a calcular la probabilidad de fisuración que se obtiene evaluando el índice de fisuración térmica, en la Ecuación (4.22). Como se explicó recientemente, el índice de fisuración térmica usado en la Ecuación (4.22) es el valor mínimo durante el período de análisis.

$$I_{cr} = \frac{f_t(t_e)}{\sigma_t(t_e)} \quad (4.21)$$

$$P(I_{cr}) = \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{I_{cr}}{0.92} \right)^{-4.29} \right\} \right] \cdot 100 \quad (4.22)$$

Donde:

$f_t(t_e)$: Valor de diseño de la resistencia a tracción por hendimiento según edad equivalente t_e .

$\sigma_t(t_e)$: Esfuerzo de tracción principal según edad equivalente t_e .

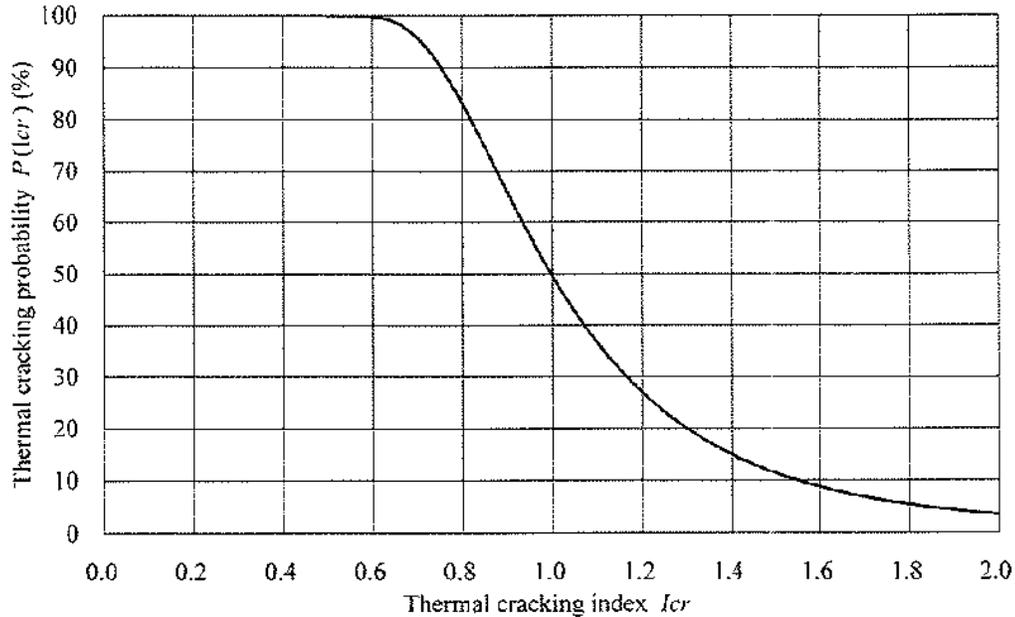


Figura 4-4: Relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica (JCI 2008).

Gracias al método estudiado, se puede imponer un porcentaje máximo de probabilidad de fisuración de la estructura para evitar la fisuración de ésta, lo que implica efectuar ajustes en el plan de construcción hasta obtener la probabilidad deseada.

Según la guía del Instituto del Concreto de Japón, el valor límite de probabilidad de fisuración para evitar la fisuración térmica es 5%.

Si el índice de fisuración térmica obtenido del análisis es igual o mayor a 1.85, entonces la probabilidad de fisuración térmica es igual o menor a 5%, ya que de acuerdo a la Figura 4-3, el índice de fisuración térmica equivalente a la probabilidad de fisuración térmica de 5% es 1.85.

Cuando se puede tolerar un riesgo mayor de fisuración térmica, se permite un valor límite de probabilidad de fisuración térmica mayor a 5%. El valor límite del índice de fisuración térmica correspondiente a este caso se obtiene de la Ecuación (4.23).

$$I_{lim} = \frac{0.92}{\left[-\log_e\left(1 - \frac{P_c}{100}\right)\right]^{\frac{1}{4.29}}} \quad (4.23)$$

Donde:

$I_{lím}$: Valor límite del índice de fisuración térmica correspondiente al valor de probabilidad de fisuración térmica superior a 5%.

P_c : Probabilidad de fisuración térmica superior a 5% (%).

A modo de resumen, en la Figura 4-5 se muestra un diagrama esquemático con los pasos del proceso de verificación de fisuración térmica descrito en el presente capítulo.

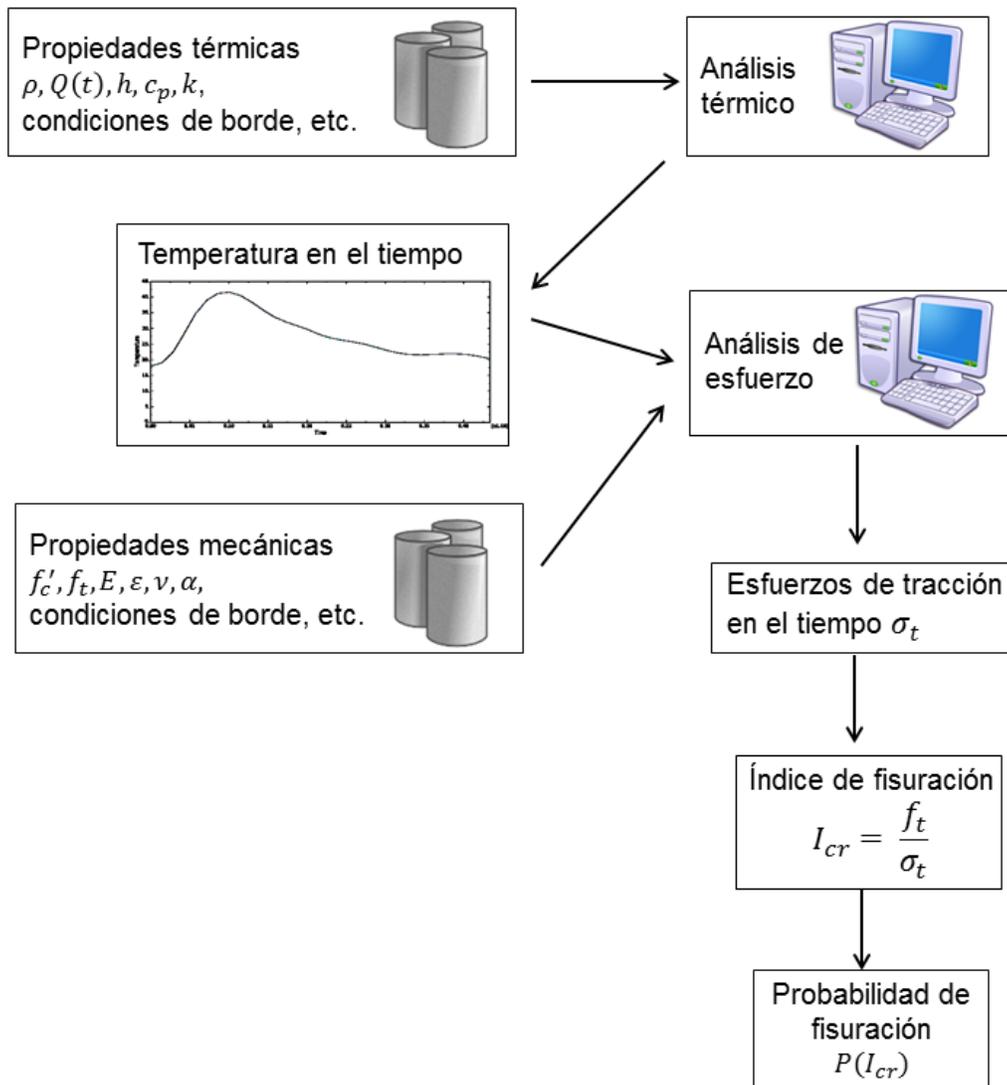


Figura 4-5: Diagrama esquemático del proceso de verificación de fisuración térmica

CAPÍTULO 5 Análisis Térmico

Lo que se realizará en este capítulo y en el siguiente, es el análisis térmico y el análisis de esfuerzo, respectivamente, mediante el método de elementos finitos tridimensional, mencionado anteriormente, y reproducir el proceso descrito en la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo” para la verificación de la fisuración térmica de una estructura o elemento.

Para realizar los análisis se debe elegir una herramienta, en este caso la herramienta con la que se realizará el análisis térmico y el análisis de esfuerzo es un software basado en el método de los elementos finitos llamado ABAQUS, en su versión educacional. El programa puede resolver casi todo tipo de problemas, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales. ABAQUS posee una extensa librería de elementos finitos que permite modelar virtualmente cualquier geometría, así como su extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran cantidad de materiales. Los detalles del procedimiento realizado en ABAQUS se muestran en el Anexo B.

Una observación importante es que ABAQUS no tiene un sistema de unidades determinado, si no que simplemente hay que trabajar con un sistema de unidades consistente, cualquiera que este sea. En este caso se trabajará con el sistema internacional de unidades.

Tabla 5-1: Sistema Internacional de Unidades

Magnitud	Unidad	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Tiempo	Segundo	s
Fuerza	Newton	N
Energía	Joule	J
Presión	Pascal	Pa
Temperatura	Grado Celsius	°C

En primer lugar se realiza el análisis térmico. Del análisis térmico se obtiene el desarrollo de la temperatura en el tiempo de toda la estructura. Dichos resultados se guardan en un archivo para luego ser importados y leídos en el análisis de esfuerzo, el cual finalmente arrojará los esfuerzos generados en la estructura.

Los análisis se deben realizar de manera secuencial y no simultánea debido a que las deformaciones y cambios de volúmenes que generan las tensiones dependen de la

temperatura de la estructura, pero no viceversa, es decir, las deformaciones y esfuerzos producidos en un caso como este no influyen en la temperatura.

Para la parte térmica se realizarán 2 calibraciones en ABAQUS utilizando datos experimentales de otras investigaciones mencionadas a continuación.

5.1. Calibración 1

Para este análisis térmico, se modeló en ABAQUS el mismo modelo, con las mismas propiedades, que se encontró en el trabajo realizado por Al-Manaseer y Elias (2008). Cabe destacar que dicha investigación también utilizó el software ABAQUS para llevar a cabo el análisis térmico.

En el estudio mencionado (Al-Manaseer y Elias 2008) se muestran los resultados que se obtuvieron al modelar un cubo de hormigón de 1m^3 sometido a un aumento de temperatura adiabática. Se realizará ese mismo modelo para luego comparar los resultados entregados por ABAQUS en este trabajo de título con los resultados empíricos mostrados en el trabajo en cuestión y de esta manera tener un punto de referencia experimental para corroborar los resultados del modelo computacional.

- **Detalles del modelo**

El modelo realizado por Al-Manaseer y Elias (2008) consiste en un cubo de hormigón de 1m^3 . La temperatura de colocación del hormigón es de 18°C . Se utilizó un elemento DC3D10 y el modelo tiene 7769 elemento y 11751 nodos. La malla utilizada en dicho trabajo se muestra en la Figura 5-1.

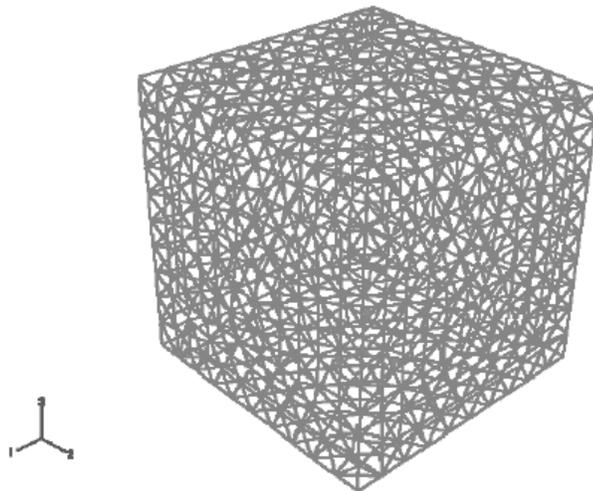


Figura 5-1: Malla del cubo del modelo analizado (Al-Manaseer y Elias 2008).

Notar que en el modelo realizado en ABAQUS en esta calibración, se utilizó una malla cuadrícula como se muestra en la Figura 5-2, lo cual no afectó el resultado final.

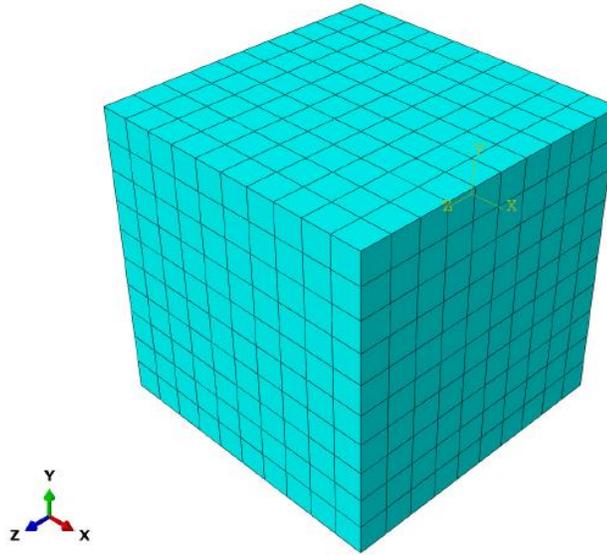


Figura 5-2: Malla del cubo utilizada en ABAQUS

Las propiedades térmicas del material utilizado en el análisis del cubo son:

- Densidad: 2240 kg/m^3
- Conductividad térmica: $2.5 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$
- Coeficiente de expansión térmica: $1 \times 10^{-5}/\text{°C}$
- Calor específico: $922 \text{ J/(kg}\cdot\text{°C)}$

El aumento de temperatura adiabática en función del tiempo es medido mediante un ensayo experimental y luego convertido a flujo de calor de cuerpo, como se muestra en la Figura 5-3, para poder ingresarlo al programa ABAQUS. En el Anexo D de este trabajo se muestra cómo se realiza la conversión de aumento de temperatura adiabática a flujo de calor de cuerpo.

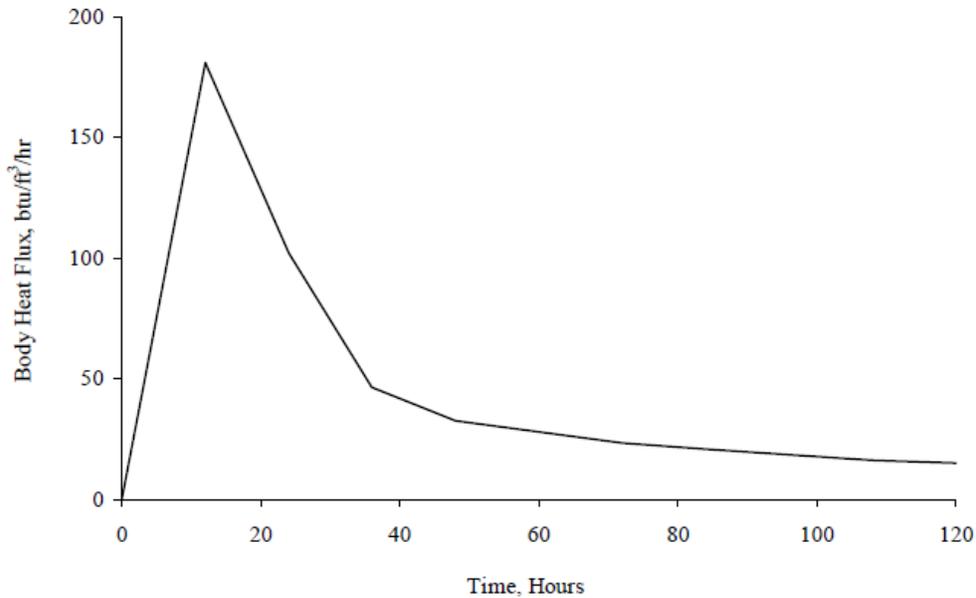


Figura 5-3: Flujo de calor de cuerpo en el período de análisis (Al-Manaseer y Elias 2008).

La temperatura exterior que rodea la cara inferior del cubo se asumió igual a 16°C al momento de la colocación. Cabe mencionar que no se utilizó un material aislante, por lo que todas las caras del cubo, excepto la cara inferior, estaban en contacto con el ambiente.

La temperatura ambiente que rodea las demás caras del cubo varía desde los 7°C a los 20°C dependiendo del momento del día, tal como se muestra en la Figura 5-4.

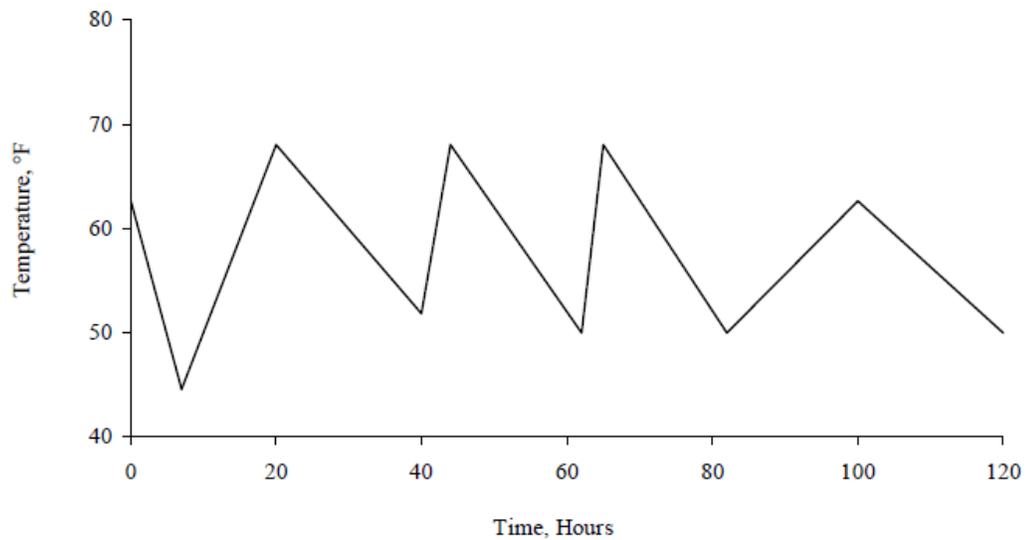


Figura 5-4: Temperatura ambiente en el período de análisis (Al-Manaseer y Elias 2008).

- **Resultados**

La temperatura obtenida experimentalmente por Al-Manaseer y Elias (2008) al centro del cubo se compara con la temperatura al centro del cubo obtenida a través de ABAQUS en este trabajo de título, como se muestra en la Figura 5-5.

Se puede observar que la temperatura máxima experimental es de 45°C y se alcanza dentro de las primeras 32 horas, después de lo cual la temperatura comienza a descender hasta alcanzar aproximadamente un valor de 19°C al final del período de análisis, donde ya se comienza a alcanzar un equilibrio.

Ese resultado se compara con la temperatura al centro del cubo de hormigón obtenida mediante ABAQUS. Se observa que la temperatura máxima es de 42°C y se alcanza dentro de las primeras 28 horas y que luego de eso la temperatura comienza a descender alcanzando un valor de aproximadamente 20°C al final del período de análisis.

Con esto se puede decir que ABAQUS realizó una predicción bastante precisa, ya que la tendencia de las curvas es casi idéntica y la curva experimental sólo sobrepasa a la curva obtenida en el análisis por 2 o 3°C.

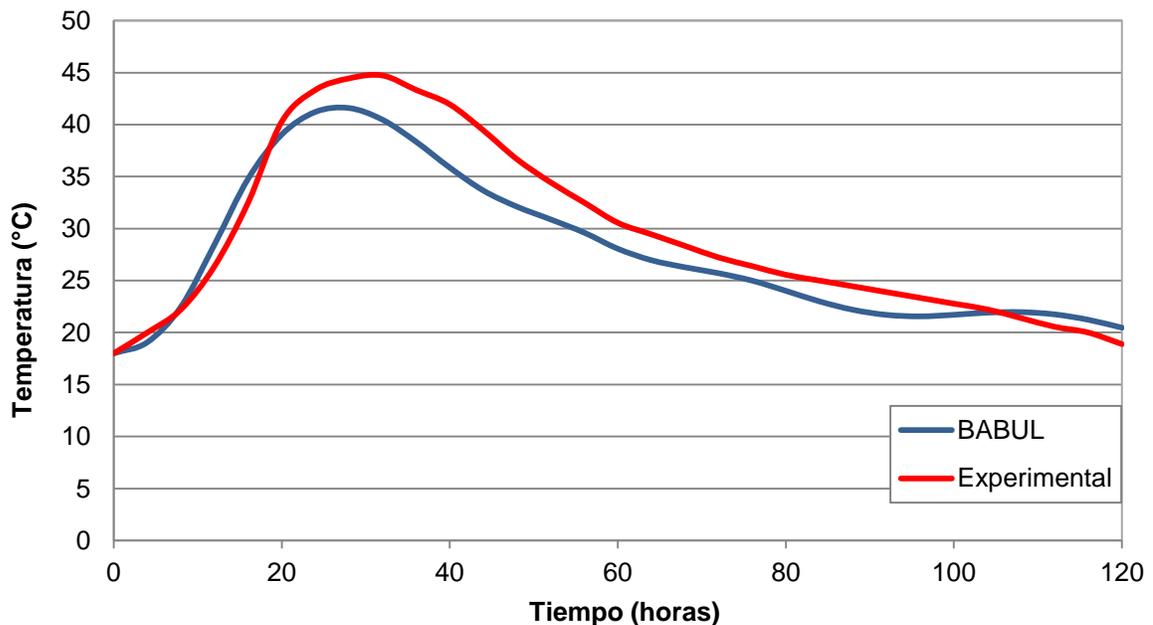


Figura 5-5: Temperatura al centro del cubo de hormigón

5.2. Calibración 2

La segunda calibración, consiste en modelar la misma estructura con las mismas propiedades que las del modelo realizado por Lawrence (2009). Al igual que en la calibración anterior se compararán los resultados experimentales obtenidos en dicho estudio, con los resultados arrojados por el análisis térmico realizado en ABAQUS en este trabajo de título. Se utilizará también este estudio para la calibración del análisis de esfuerzo descrita en el Capítulo 6.

- **Geometría del modelo**

La estructura consiste en un bloque de hormigón de dimensiones 1.07 m × 1.07 m × 1.07 m. El bloque está rodeado de un encofrado de madera contrachapada. Las capas de madera que rodean las cuatro caras laterales del bloque de hormigón tienen un espesor de 1.9 centímetros, mientras que la capa de madera ubicada bajo la cara inferior del cubo tiene un espesor de 3.8 centímetros.

Sobre el moldaje de madera se encuentra una aislación de poliestireno expandido. La capa de poliestireno que rodea las 4 caras laterales tiene un espesor de 7.6 centímetros, al igual que la capa de poliestireno ubicada en el fondo. La cara superior del bloque se deja expuesta al ambiente.

La geometría del bloque de hormigón, junto con los moldajes de madera y poliestireno, se muestra en la Figura 5-6.

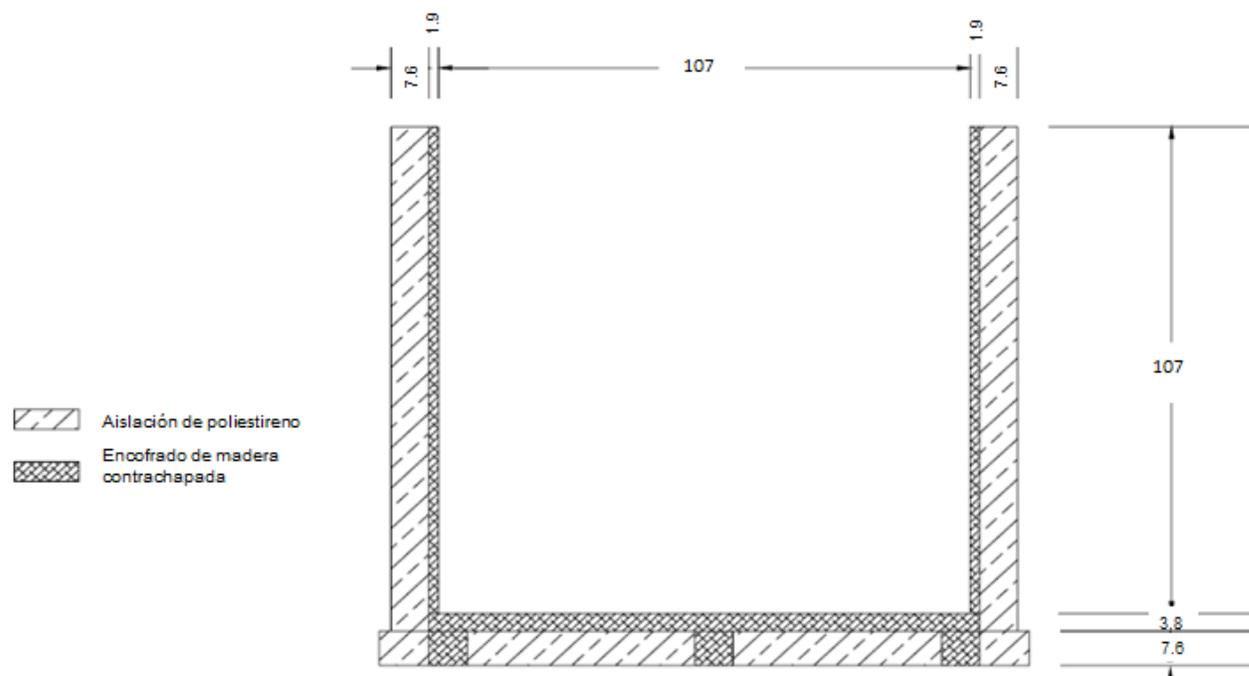


Figura 5-6: Vista en corte del cubo con el encofrado y la aislación (Unidades en centímetros)
(Lawrence 2009)

- **Propiedades de los materiales**

A continuación se muestran las propiedades térmicas determinadas empíricamente por la investigación en el cual se está basando esta calibración (Lawrence 2009), las cuales se utilizarán como datos de entrada en el modelo computacional realizado en ABAQUS.

Hay que tener en cuenta que esa investigación utilizó un software de elementos finitos llamado DIANA (acrónimo de “Displacement Analyzer”) y no ABAQUS como en este caso, por lo que ciertos parámetros de entrada debieron ser transformados a los requerimientos de ABAQUS.

Cabe mencionar que los métodos experimentales utilizados en el trabajo de Lawrence (2009) para determinar las propiedades del hormigón, se describen detalladamente en el Anexo C.

- Volumen bloque de hormigón: 1.225 m³
- Densidad: El hormigón utilizado consiste en una mezcla cuya composición se presenta en la Tabla 5-2. El cemento empleado es un Portland Tipo I.

Tabla 5-2: Composición hormigón (Lawrence 2009)

Material	Cantidad (kg/m ³)
Cemento	404
Agua	202
Agregados Finos	650
Agregados Gruesos	979
Densidad	2235

- Conductividad térmica y calor específico:

Las propiedades térmicas del hormigón y de los materiales aislantes se presentan en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Conductividad y calor específico de los materiales (Lawrence 2009)

Material	Conductividad (W/m·°C)	Calor específico (J/kg·°C)
Hormigón	2.2	1197
Madera	0.15	527
Poliestireno expandido	0.0625	1300

Los valores de conductividad térmica y calor específico del material aislante térmico poliestireno expandido fueron obtenidos de las especificaciones del fabricante, mientras que para la madera contrachapada se tomaron los valores típicos de conductividad y calor específico de madera contrachapada utilizada en Estados Unidos.

- Coeficiente de transferencia de calor de superficie: $5.6 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- Temperatura de colocación del hormigón (temperatura inicial del modelo): 23°C
- Temperatura ambiente: Durante todo el análisis se registró la temperatura ambiente del laboratorio. En la Figura 5-7 se muestra el gráfico con los valores de la temperatura ambiente durante el período de ensayo.

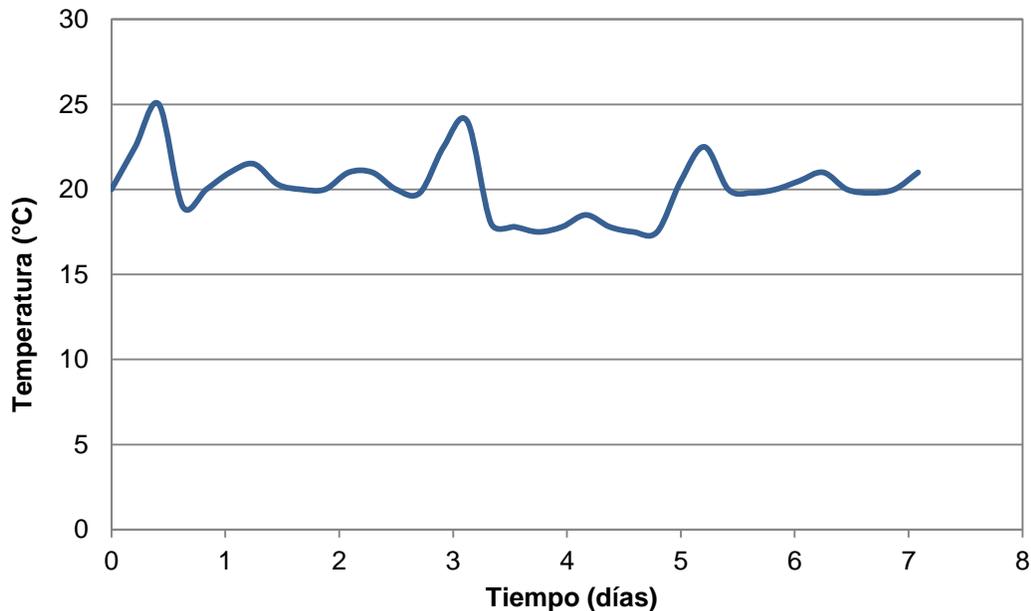


Figura 5-7: Temperatura ambiente registrada durante el análisis (Lawrence 2009)

- Aumento de temperatura del hormigón bajo condiciones adiabáticas:
El aumento de temperatura en el bloque bajo condiciones adiabáticas, determinado por la calorimetría isotérmica se muestra en la Figura 5-8. (Ver Anexo C para más detalles sobre el ensayo de calorimetría isotérmica).

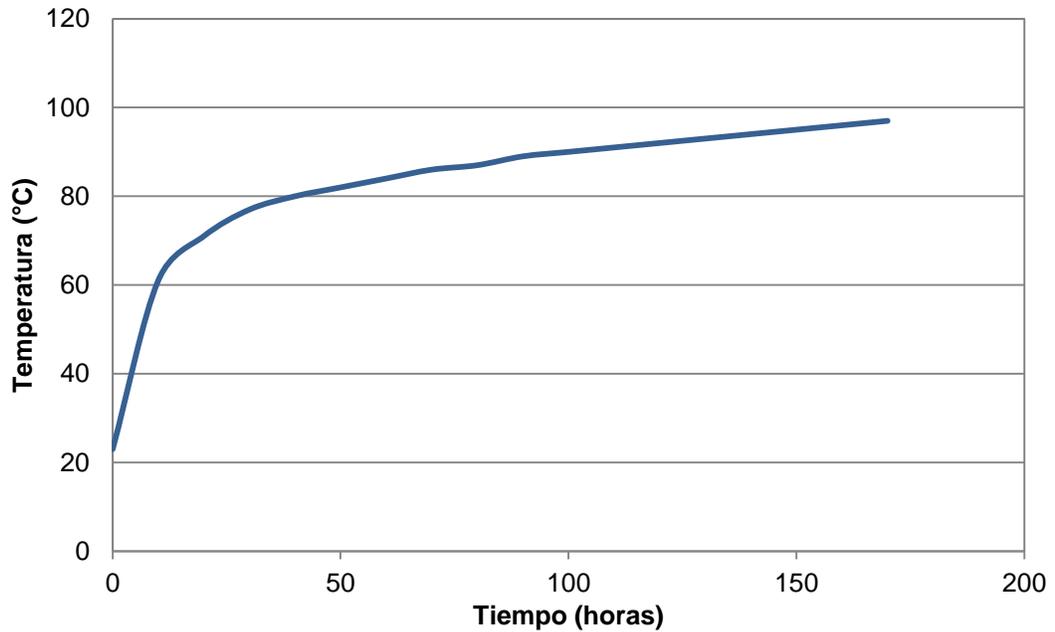


Figura 5-8: Aumento de temperatura bajo condiciones adiabáticas (calorimetría isotérmica) (Lawrence 2009)

- **Resultados**

Resultados empíricos

Las temperaturas registradas por los termopares colocados en el eje central del bloque de hormigón a lo largo del período de ensayo se muestran en las Figura 5-9. Tal como se esperaba, se puede observar que la mayor temperatura se registró en el centro del bloque (54 cm bajo la superficie descubierta) y fue de 67°C a las 20 horas después de la colocación del hormigón. La temperatura máxima medida en la parte inferior del bloque (107 cm bajo la cara superior) también fue de 67°C, pero se alcanzó 33 horas después de la colocación, lo que demuestra que la suposición de que la parte inferior está aislada es válida. También demuestra, como se esperaba, que las temperaturas más bajas fueron registradas por los termopares que se encontraban más cercanos a la superficie del bloque expuesta al ambiente.

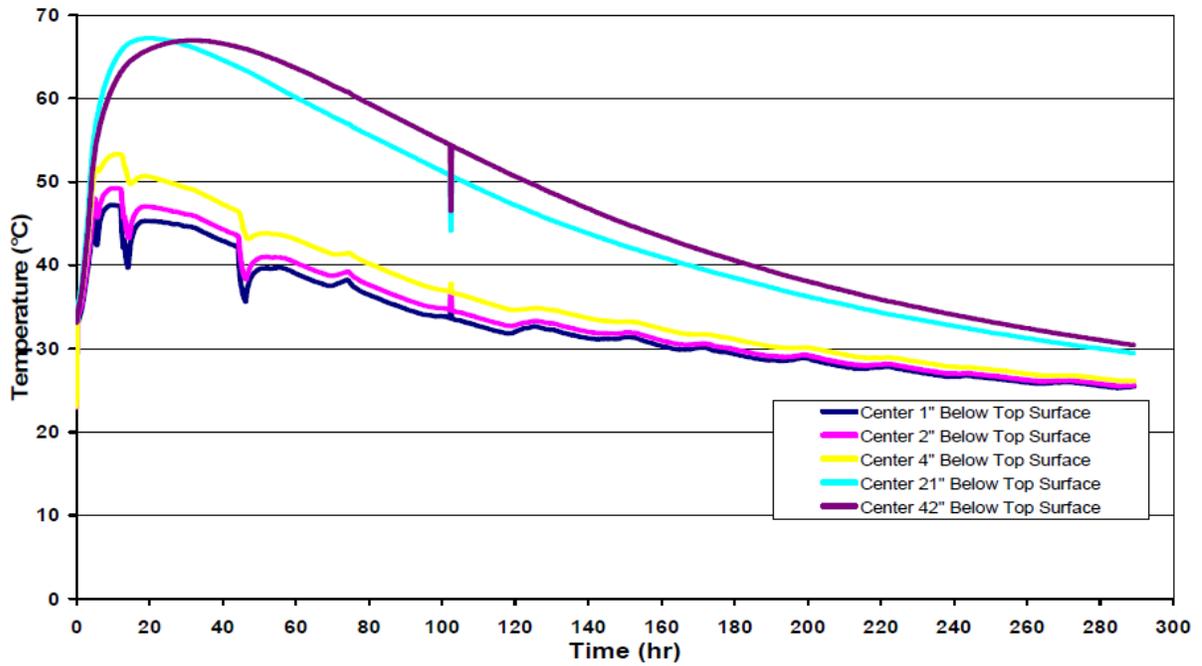


Figura 5-9: Temperaturas a distintas alturas en el eje central del bloque de hormigón en función del tiempo (Lawrence 2009)

Los datos de temperatura mostrados en la Figura 5-10 corresponden a las temperaturas medidas por los termopares ubicados a 5 centímetros de una de las caras laterales del bloque a distintas alturas. La máxima temperatura registrada es de 65°C a 54 centímetros debajo de la cara superior expuesta. Esta temperatura es 2.0°C menor a la temperatura registrada al centro del bloque. Esto valida la suposición de que las caras del bloque están adecuadamente aisladas.

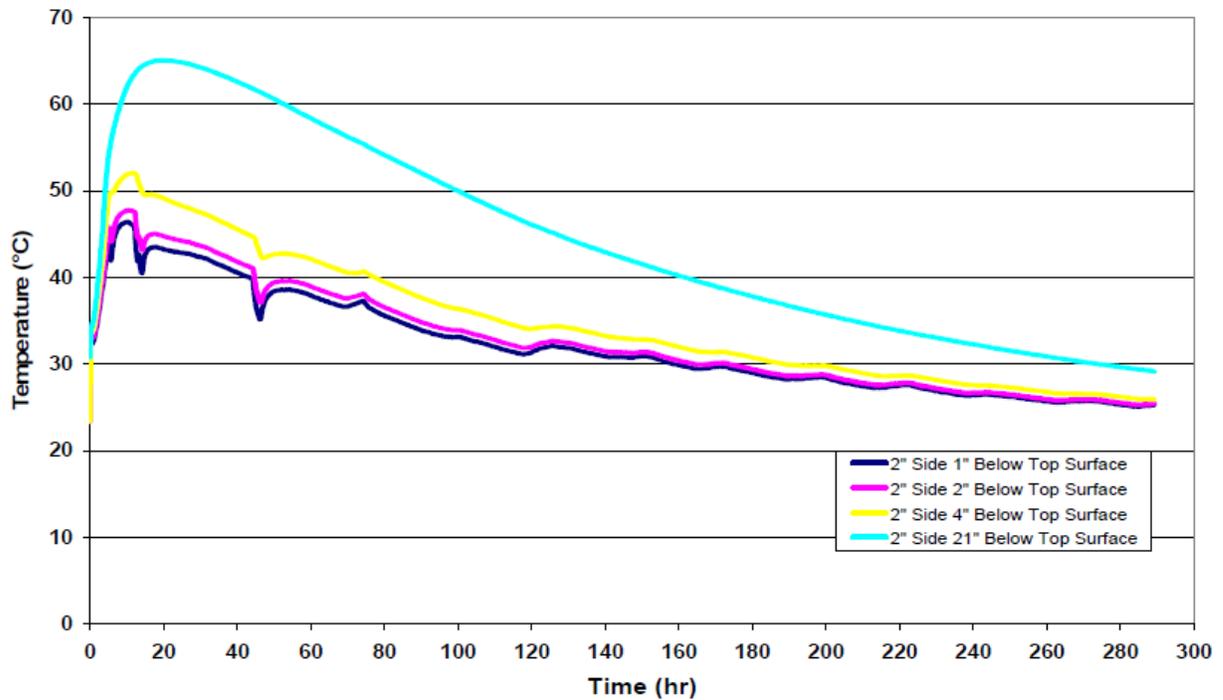


Figura 5-10: Temperaturas a distintas alturas en el eje ubicado a 5 cm de una de las caras laterales en función del tiempo (Lawrence 2009)

Comparación resultados empíricos con los resultados del modelo

Para saber si el modelo arrojó una predicción adecuada se compararán los resultados empíricos con los resultados del análisis térmico realizado en ABAQUS en dos lugares claves del bloque de hormigón.

Comparando las curvas de la Figura 5-11, que corresponden a la temperatura en la parte central del bloque a 10 centímetros de la superficie, se observa que la temperatura máxima medida experimentalmente fue de 53.3°C y se alcanza a las 14 horas después de la colocación, mientras que la temperatura máxima pronosticada por el modelo es de 51.3°C, pero se alcanza luego de 30 horas.

Las temperaturas máximas de ambas curvas son muy similares, pero sí se diferencian en el momento en que cada curva alcanza su temperatura máxima, ya que el modelo predice que se alcanzará después de 30 horas, pero en efecto se alcanza a las 14 horas después de la colocación. Esto quiere decir que el modelo subestima la tasa de elevación de temperatura en las primeras 30 horas.

A pesar de esta diferencia, una vez que se alcanza la temperatura máxima en el modelo, el decaimiento de ambas curvas es prácticamente idéntico. También cabe destacar que las temperaturas de ambas curvas al final del análisis, 170 horas después de la colocación del hormigón, son muy similares. La temperatura final medida

experimentalmente es de 32°C, mientras que la temperatura final del modelo es de 34.5°C.

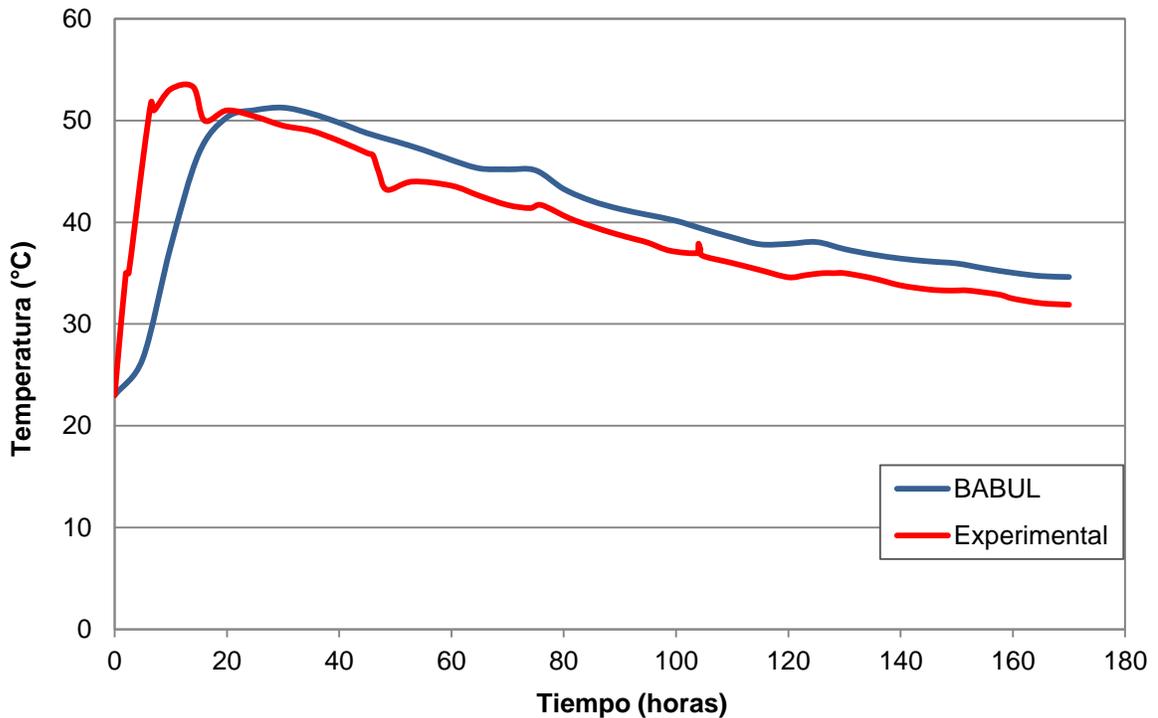


Figura 5-11: Comparación de la temperatura en el centro a 10 cm de la cara superior expuesta determinada con ABAQUS con la temperatura experimental

En la Figura 5-12 se comparan las curvas de temperatura del centro del cubo, es decir a 54 cm bajo la cara superior. En este caso la temperatura máxima medida experimentalmente fue de 67.5°C y se alcanzó a las 20 horas, mientras que según el modelo la temperatura máxima es de 71.1°C alcanzada a las 40 horas. Al igual que en el gráfico anterior, las temperaturas máximas de ambas curvas son muy similares, pero difieren en el tiempo en que se alcanzan. Nuevamente el modelo predice que se alcanzará en el doble del tiempo en que realmente el centro alcanza su temperatura máxima.

A pesar que las curvas tienen una forma de decaimiento idéntica, difieren en aproximadamente 9°C frente a la temperatura que se alcanza al final del análisis, es decir, luego de 170 horas. Mientras el modelo realizado en ABAQUS predice que la temperatura final será de 48.6°C, las medidas experimentales muestran que la temperatura final fue de 40.0°C.

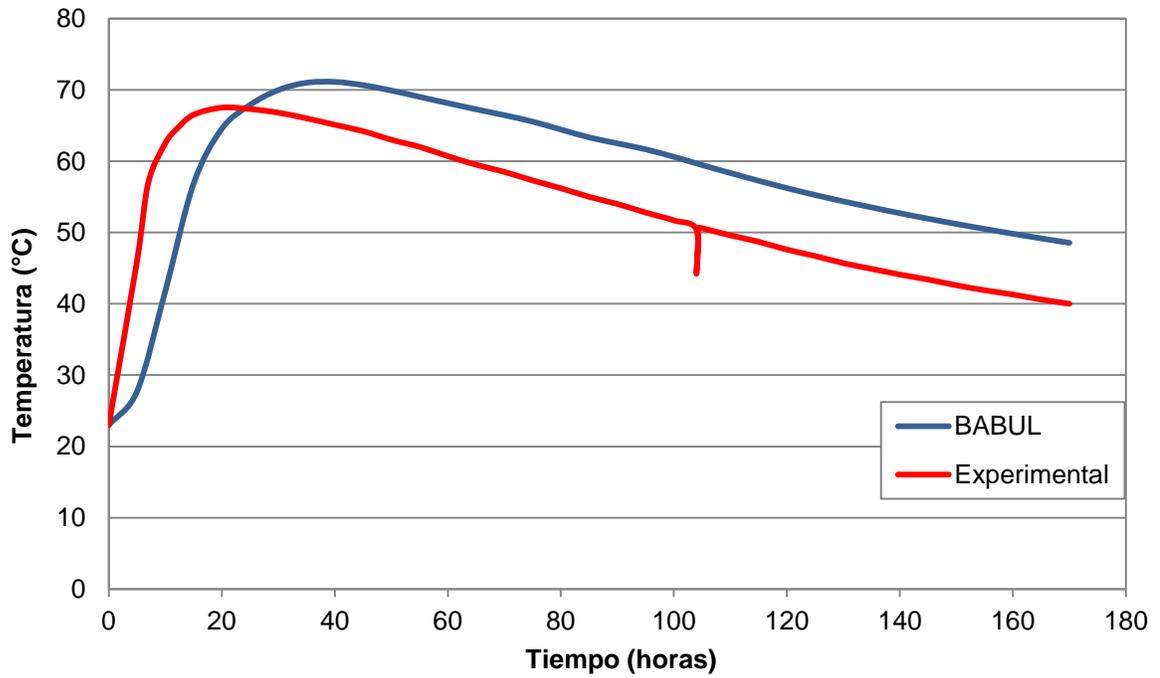


Figura 5-12: Comparación de la temperatura en el centro a 54 cm de la cara superficial expuesta determinada con ABAQUS con la temperatura experimental

CAPÍTULO 6 Análisis de Esfuerzo

En este capítulo se realizará la calibración del análisis de esfuerzo usando el mismo modelo utilizado en la Calibración 2 descrita en el Capítulo 5, es decir, las características y propiedades del trabajo ya mencionado (Lawrence 2009).

El objetivo del análisis de esfuerzo es determinar las tensiones que se generan en la estructura debido al gradiente de temperatura que se forma. Para esto se deben importar los resultados del análisis térmico en el análisis de esfuerzo.

Para esta calibración se compararán los esfuerzos determinados mediante ABAQUS en este trabajo de título con los esfuerzos determinados en el trabajo Lawrence (2009) mediante el software DIANA, ya que en dicho trabajo no se determinaron esfuerzos experimentales directos como para compararlos con esos.

A continuación se muestran las características y propiedades mecánicas del modelo necesarias para realizar el análisis de esfuerzo.

- **Geometría del modelo**

En el análisis de esfuerzo lo único que importa son los resultados térmicos del bloque, es decir, la temperatura de cada nodo a lo largo de todo el tiempo de análisis. Es por esto que en el análisis de esfuerzo sólo se analizará el bloque de hormigón sin considerar los materiales aislantes ya que éstos sólo contribuían en el aspecto térmico.

- **Propiedades del hormigón**

Módulo de elasticidad y resistencia a tracción por hendimiento: A continuación se muestra el módulo de elasticidad del hormigón y la resistencia a la tracción en función de la edad del hormigón utilizado, determinados experimentalmente en el trabajo de Lawrence (2009). Recordar que en el Anexo C se muestra el detalle de cómo se determinaron dichas propiedades.

Tabla 6-1: Módulo de elasticidad y resistencia a la tracción en función de la edad del hormigón. (Lawrence 2009)

Tiempo (días)	Módulo de elasticidad (MPa)	Resistencia a tracción por hendimiento (MPa)
1	13445	1.250
2	16892	1.660
3	18064	1.930
7	20236	2.206
14	22248	2.972
28	25213	3.303

Coeficiente de Poisson: 0.19

Coeficiente de expansión térmica: $9.92 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

- **Condiciones de borde**

El cubo está colocado en un soporte fijo, por lo tanto se impone la condición de borde de que la cara inferior del cubo tiene restringido los desplazamientos a lo largo de los 3 ejes.

- **Resultados**

A continuación se muestran los esfuerzos determinados por el modelo de elementos finitos realizado en ABAQUS, inducidos por las diferencias de temperaturas dentro del hormigón, y se compararán con los resultados obtenidos por el modelo de elementos finitos en el estudio realizado por Lawrence (2009) y que ha sido utilizado en el presente trabajo. Cabe mencionar que el software utilizado en esa investigación se conoce como DIANA, acrónimo de “Displacement Analyzer”, y es un código de elementos finitos de propósito general, desarrollado especialmente para la realización de análisis en una vasta gama de especialidades de ingeniería civil y geotécnica.

Como se dijo anteriormente, estos gradientes de temperatura son producidos cuando el calor generado en el hormigón es disipado al ambiente que rodea al bloque causando que la temperatura en regiones cercanas a la superficie del hormigón sean más bajas que la temperatura al interior del hormigón. Al mismo tiempo el calor generado es una función de la temperatura y el tiempo, por lo tanto distintas ubicaciones en el hormigón experimentarán diferentes niveles de temperatura. La Figura 6-1 muestra la ubicación de los elementos que serán analizados para determinar sus esfuerzos durante el proceso de hidratación. Estas ubicaciones fueron escogidas porque los mayores esfuerzos de tracción y compresión se experimentan en la región superior y región central del bloque de hormigón respectivamente.

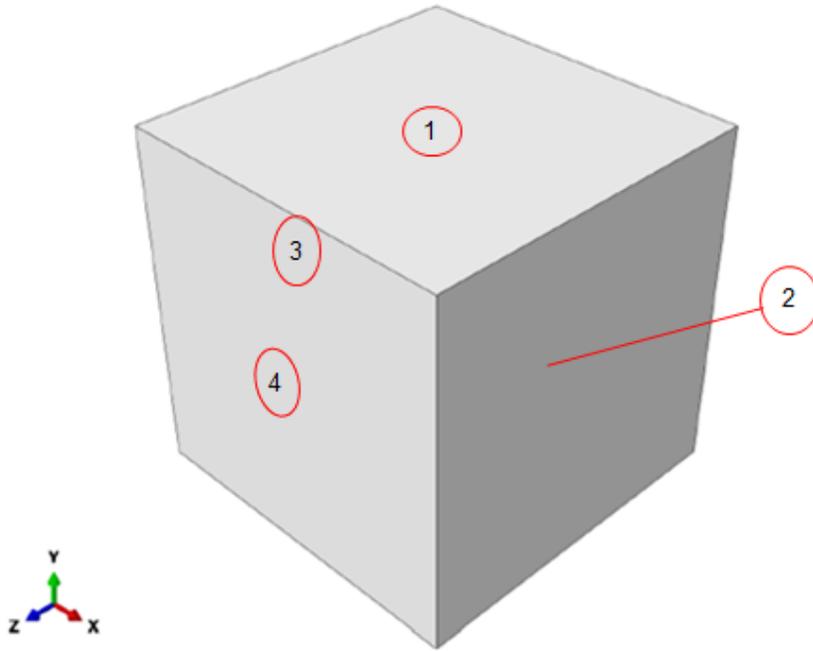


Figura 6-1: Ubicaciones de los elementos a los cuáles se les determinará el estado de tensiones

De acuerdo a la malla aplicada al modelo en ABAQUS los elementos correspondientes a cada ubicación son los que muestran en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2: Elementos de las cuatro ubicaciones

Ubicación	Elemento N°
1	460
2	455
3	50
4	46

La Figura 6-2 y la Figura 6-3 muestran el esfuerzo calculado en el plano Z-Z con respecto al tiempo del Elemento 460 y del Elemento 455 los cuales están ubicados en el centro de la cara superior y en el centro del bloque del modelo de elementos finitos respectivamente. El primer gráfico muestra que el modelo predice que el Elemento 460 está sometido a esfuerzos de tracción (positivo) a medida que el hormigón se hidrata y expande, mientras que el Elemento 455 experimenta esfuerzos de compresión (negativo). Esto es consistente con la teoría de que una región central de hidratación más rápida de una estructura de hormigón masivo estará en compresión mientras se trate de expandir, pero es restringida por el hormigón menos maduro que se encuentra a su alrededor.

A pesar que el modelo en ABAQUS predice correctamente los estados de tracción y compresión a los que están sometidos la región superior y la región central

respectivamente, está un poco alejado en términos de magnitud de los esfuerzos determinados en DIANA. Mientras el modelo realizado en DIANA predice que la tensión máxima en esa ubicación será de 1.03 MPa a las 20 horas, el modelo de ABAQUS predice que el máximo será de 1.19 MPa a las 40 horas.

Por otro lado, al centro del bloque, ambos modelos predicen correctamente que ese elemento estará sometido a compresión, pero nuevamente hay una gran diferencia en las magnitudes de los esfuerzos. Mientras el modelo realizado en DIANA predice que la ubicación 2 estará sometida a un esfuerzo de compresión máxima de -0.42 MPa a las 30 horas después de la colocación del hormigón, el modelo de ABAQUS predice que el máximo será una compresión de -1.25 MPa a las 60 horas.

Nuevamente, tal como ocurrió en el análisis térmico (datos que luego son importados desde el análisis de esfuerzo), el modelo en ABAQUS predice que la tensión máxima se alcanzará más tarde de lo que realmente ocurre. Además en el caso de las tensiones, el modelo de ABAQUS sobredimensiona la magnitud, tanto en los esfuerzos máximos como en los esfuerzos que se alcanzan al final de análisis.

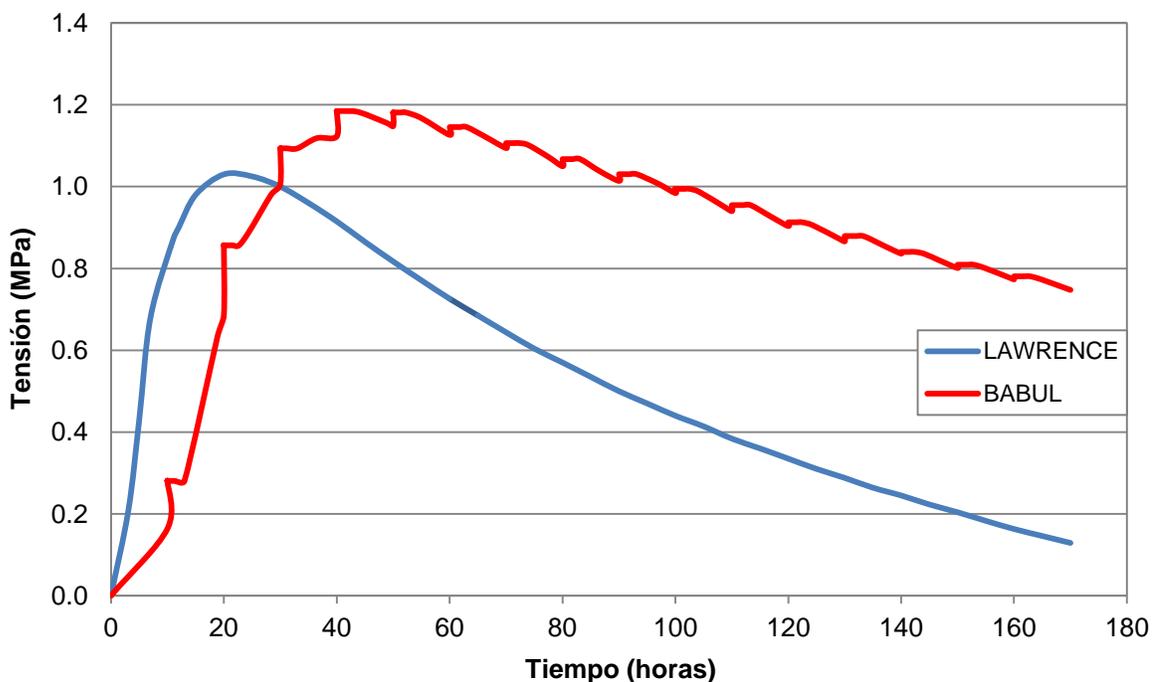


Figura 6-2: Comparación estado de tensiones en el centro de la cara superficial (Ubicación 1)

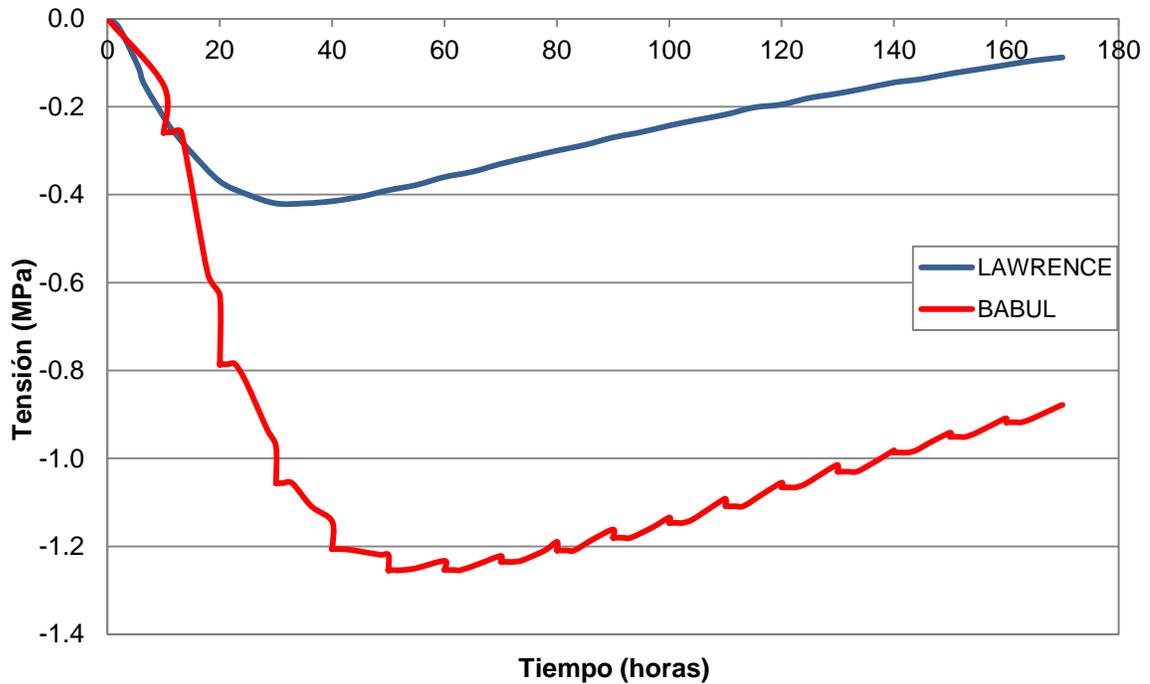


Figura 6-3: Comparación estado de tensiones en el centro del bloque de hormigón (Ubicación 2)

Por otro lado, la Figura 6-4 y la Figura 6-5 muestran el esfuerzo calculado en el plano Z-Z con respecto al tiempo del Elemento 50 y del Elemento 46, los cuales están ubicados en el centro del borde superior y centro de una de las caras laterales respectivamente. El Elemento 50 está sometido a esfuerzos de tracción (positivo) a medida que el hormigón se hidrata y expande. El Elemento 46 también trabaja en tensión a medida que es empujado por el hormigón interior en expansión.

En el caso del Elemento 50 (ubicación 3), el modelo DIANA predice que el máximo esfuerzo será de 1.34 MPa y se alcanza después de 20 horas, mientras que el modelo de ABAQUS predice que el máximo será de 1.42 MPa a las 40 horas. Con respecto al Elemento 46 (ubicación 4), según DIANA el máximo esfuerzo de tracción es de 0.39 MPa y se alcanza a las 40 horas, mientras que según ABAQUS el esfuerzo máximo es de 0.29 y se alcanza a las 80 horas.

En ambos casos nuevamente ABAQUS predijo que el máximo se alcanzaría más tarde, y la diferencia estuvo en que el Elemento 46 fue el único de los 4 casos donde la magnitud máxima de esfuerzo en ABAQUS fue menor que la de DIANA.

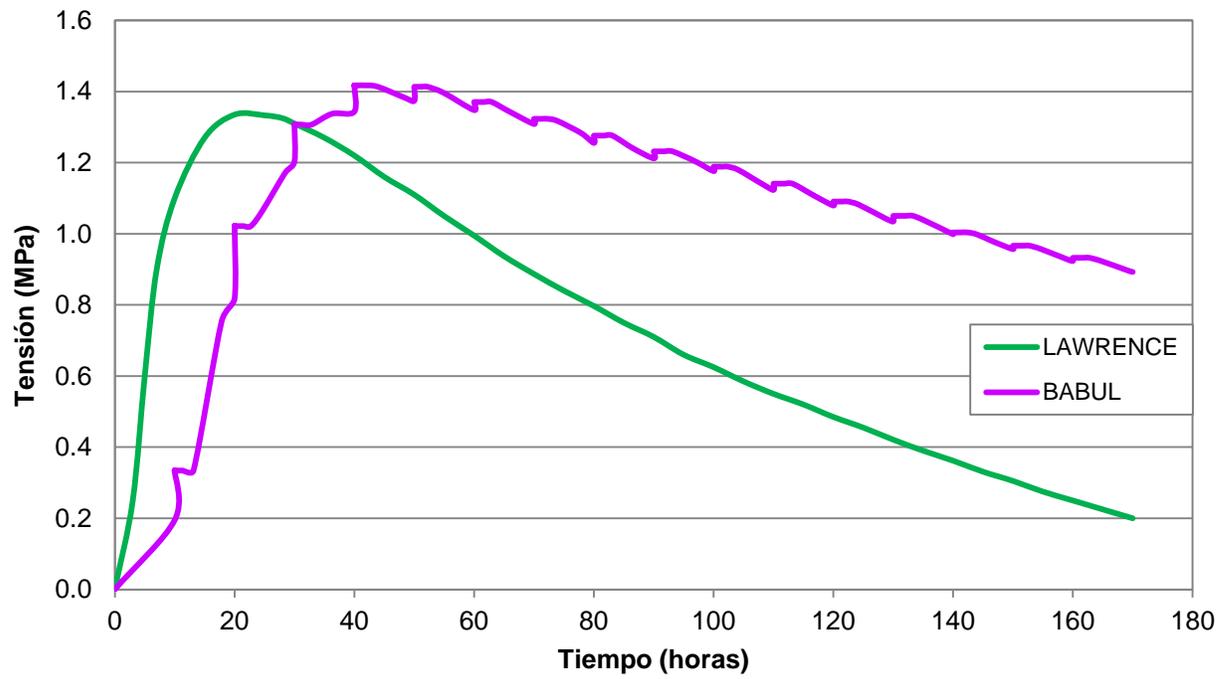


Figura 6-4: Comparación estado de tensiones en el centro del borde la cara superior (Ubicación 3)

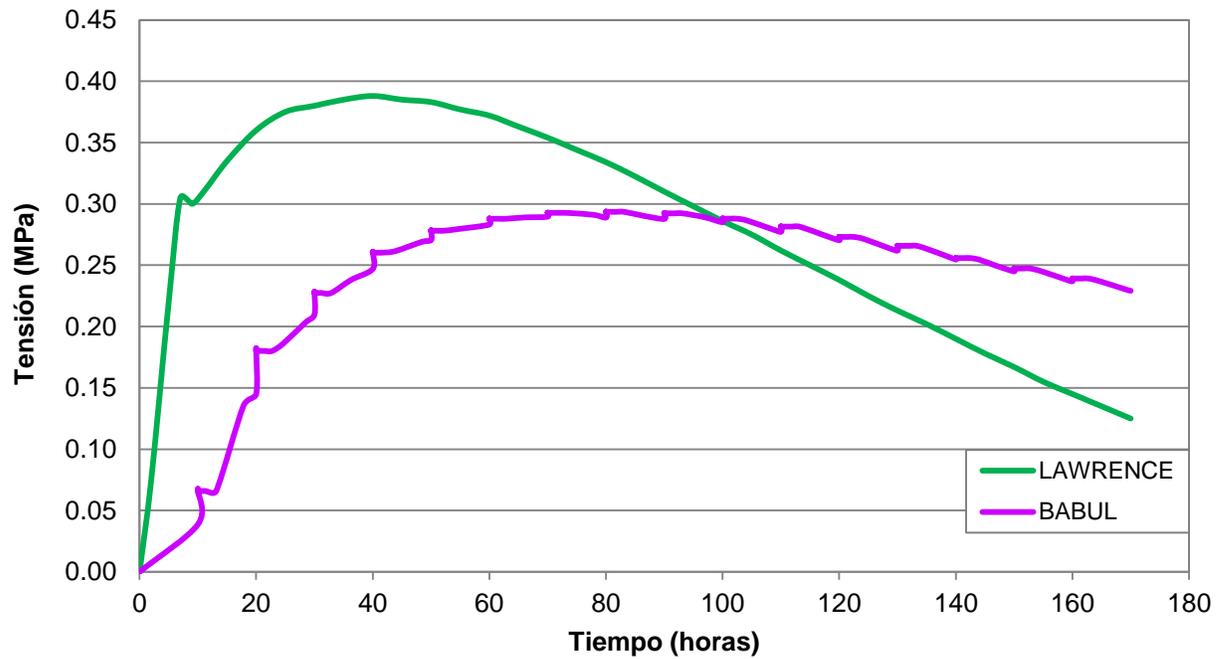


Figura 6-5: Comparación estado de tensiones en el centro superficial de una de las caras laterales del cubo (Ubicación 4)

CAPÍTULO 7 Cálculo de índice y de probabilidad de fisuración

7.1. Cálculo de índice de fisuración térmica y de probabilidad de fisuración térmica

Ahora que se tienen los esfuerzos de tracción en esas cuatro ubicaciones claves desde el punto de vista tensional, se puede determinar el índice y probabilidad de fisuración térmica para cada uno de los elementos analizados.

Tal como se explicó en la Sección 4.3 del Capítulo 4, primero se determina el índice de fisuración térmica usando la Ecuación (7.1), que se muestra a continuación, y luego utilizando el valor mínimo del índice de fisuración del período de análisis, se determina la probabilidad de fisuración térmica utilizando la Ecuación (7.2).

$$I_{cr} = \frac{f_t(t_e)}{\sigma_t(t_e)} \quad (7.1)$$

$$P(I_{cr}) = \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{I_{cr}}{0.92} \right)^{-4.29} \right\} \right] \cdot 100 \quad (7.2)$$

Donde:

$f_t(t_e)$: Valor de diseño de la resistencia a tracción por hendimiento según edad equivalente t_e

$\sigma_t(t_e)$: Esfuerzo de tracción principal según edad equivalente t_e .

A continuación se muestran los índices de fisuración térmica durante el tiempo de análisis para cada elemento, utilizando los valores determinados experimentalmente para la resistencia a tracción por hendimiento determinados por Lawrence (2009). Notar que no se determinará el índice de la ubicación 2 (Elemento 455), ya que dicho elemento se encuentra en compresión en todo momento, por lo que no existe riesgo de fisuración.

Junto con el índice de fisuración, se incluye una tabla que muestra cual es el valor mínimo del índice de fisuración durante el período de análisis, tanto para los resultados de ABAQUS como para los de DIANA, y con ese valor mínimo se calcula la probabilidad de fisuración correspondiente utilizando la Ecuación (7.2).

- **Ubicación 1**

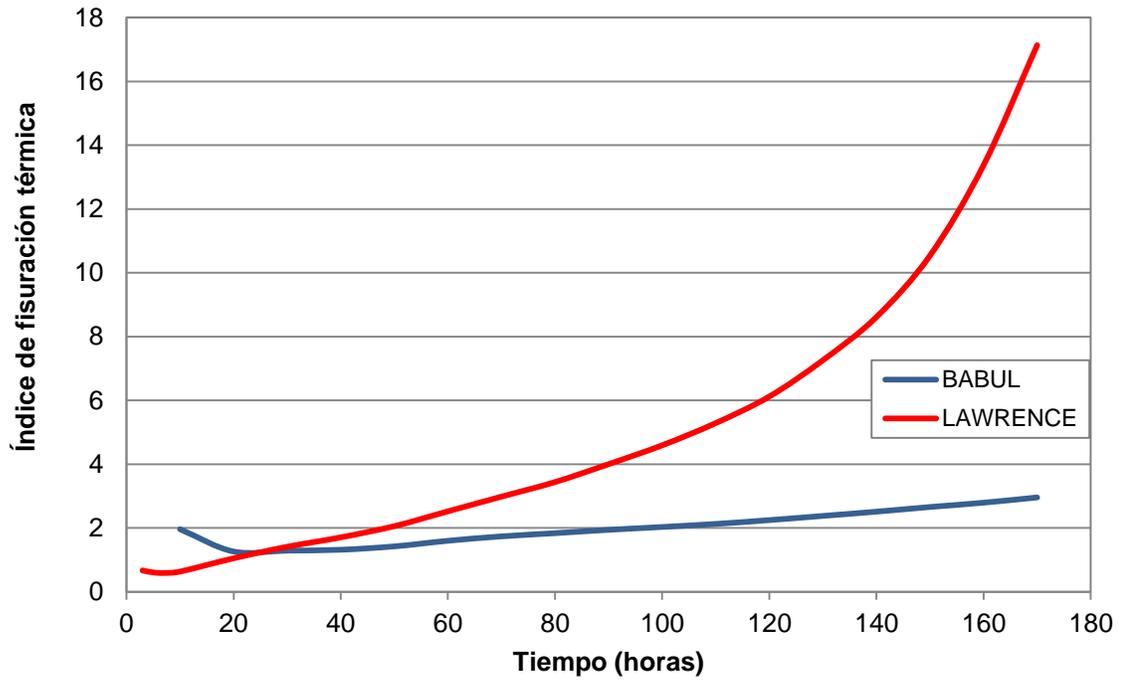


Figura 7-1: Índice de fisuración térmica en el tiempo para la ubicación 1

Tabla 7-1: Menor índice de fisuración y probabilidad de fisuración térmica para la Ubicación 1

	Menor índice de fisuración	Probabilidad de fisuración (%)
BABUL	1.26	22.8
LAWRENCE	0.59	99.9

- **Ubicación 3**

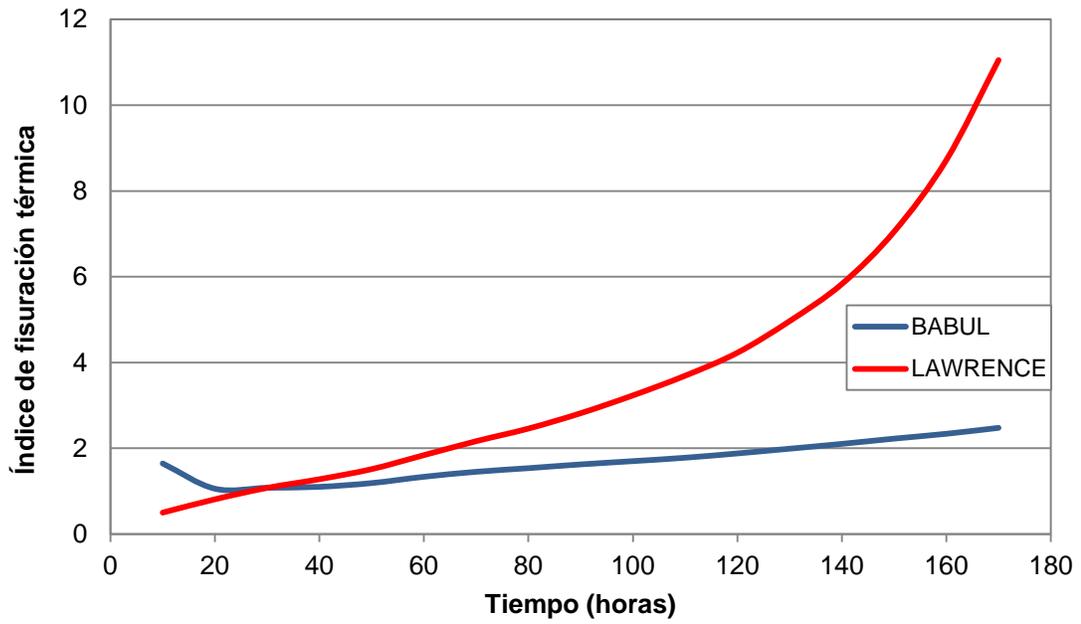


Figura 7-2: Índice de fisuración térmica en el tiempo para la ubicación 3

Tabla 7-2: Menor índice de fisuración y probabilidad de fisuración térmica para la Ubicación 3

	Menor índice de fisuración	Probabilidad de fisuración (%)
BABUL	1.06	42.4
LAWRENCE	0.50	100

- **Ubicación 4**

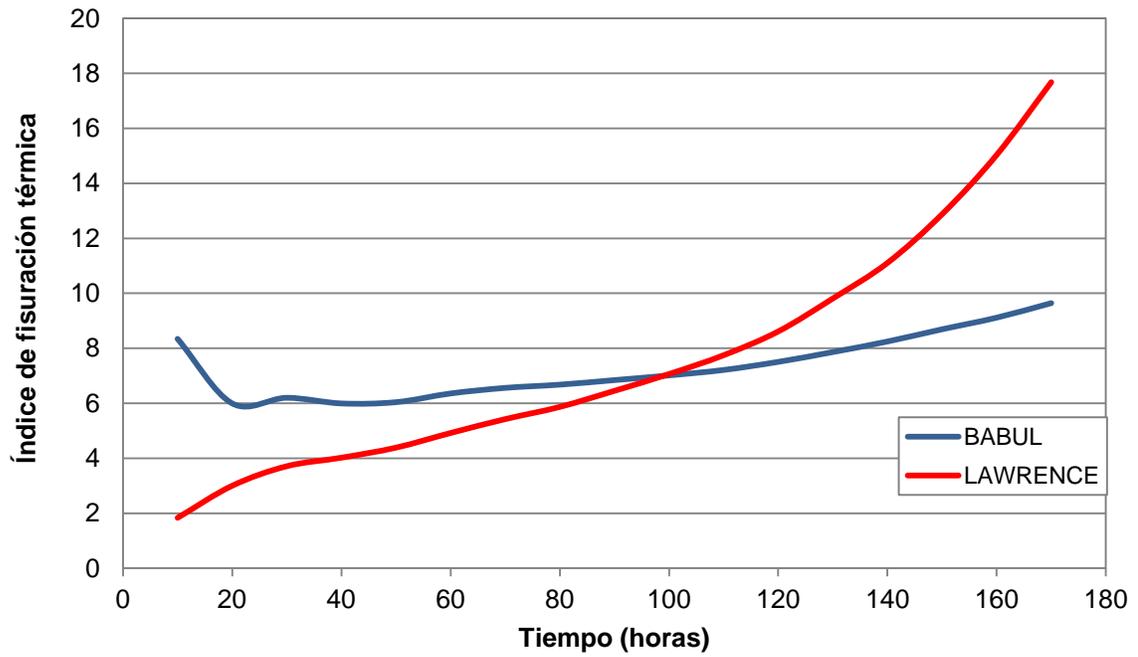


Figura 7-3: Índice de fisuración térmica en el tiempo para el elemento

Tabla 7-3: Menor índice de fisuración y probabilidad de fisuración térmica para la Ubicación 4

	Menor índice de fisuración	Probabilidad de fisuración (%)
BABUL	5.99	0.03
LAWRENCE	1.83	5.1

7.2. Estado de fisuración

Aparte de determinar las probabilidades es importante observar el estado de fisuración final del bloque de hormigón para poder determinar si en efecto las predicciones fueron correctas o no. En la Figura 7-4 se muestra una foto del bloque una vez finalizado el análisis y se aprecia claramente que en la cara superior, sobre todo en los bordes, se produjeron numerosas grietas de tracción.

Tomando en cuenta las probabilidades determinadas considerando los esfuerzos obtenidos mediante DIANA, lo mencionado en el párrafo anterior coincide con que la probabilidad de la ubicación 1 (centro cara superior) y la probabilidad de la ubicación 3 (centro borde superior) sea de 100%, mientras que en la ubicación 4 (centro cara lateral) la probabilidad es de sólo 5 % y como se observa en la Figura 7-4, no se generaron fisuras en esa ubicación.



Figura 7-4: Cara superior del bloque experimental que muestra numerosas grietas a lo largo de los bordes (Lawrence 2009).

CAPÍTULO 8 Discusión y comentarios

El objetivo de este trabajo de título era determinar si se podía aplicar el método de verificación de fisuración térmica propuesto por la guía japonesa “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo” en nuestro país. El primer paso fue desprender de la guía del Instituto del Concreto de Japón todos los pasos a seguir del proceso de verificación de fisuración de manera sencilla y clara, los cuales se plasmaron en el presente trabajo de título.

La guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo” menciona que estas pautas son aplicables a estructuras de hormigón masivo en cualquier país si los valores de diseño del hormigón producido son determinados en una manera similar a la que se realiza en la guía conforme con las propiedades físicas y térmicas y las características de los materiales en cada país. Sin embargo la guía menciona, más que los pasos del procedimiento en sí, los resultados que se deben obtener del modelo computacional y cómo a partir de ellos se determina el índice y probabilidad de fisuración térmica, por lo que queda un vacío sobre cómo se obtienen dichos resultados. En el presente trabajo de título se detallaron todos los pasos del procedimiento, así como los datos y herramientas necesarias para poder aplicar el método de verificación de fisuración térmica a un elemento de hormigón masivo.

8.1. Método de verificación de fisuración térmica

Con respecto al método de verificación de fisuración térmica, hay varios puntos importantes a destacar. La guía explicita que lo ideal al momento de aplicar este método de verificación, es determinar todas las propiedades necesarias de los materiales de manera empírica, pero propone ecuaciones para todas estas propiedades en los casos en que no se puedan obtener valores experimentales. Esto facilita mucho el proceso y además da la oportunidad de crear modelos preliminares confiables antes de pasar a la etapa de determinación experimental de las propiedades.

Otro punto importante es la herramienta que se utilizará para llevar a cabo esta verificación, es decir el software. Como menciona la guía, la verificación más precisa y confiable es que se basa en el método de elementos finitos tridimensional (MEF-3D). Sin embargo, en la guía no se menciona ningún software en particular, por lo que quien quiera aplicar este método debe tomar esa decisión personalmente.

En este trabajo de título se eligió el software ABAQUS para llevar a cabo las calibraciones mostradas en los Capítulos 5 y 6. Se eligió este software debido a que puede resolver casi todo tipo de problemas, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales. Además ABAQUS posee una extensa librería de elementos finitos que permite modelar virtualmente cualquier geometría, así como su extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran cantidad de materiales.

Un aspecto a favor de ABAQUS es que una vez realizado el análisis, ya sea térmico o de esfuerzo, es muy fácil realizar un análisis de sensibilidad con las variables, es decir, cambiar algún valor de una de las propiedades del material y volver a someter el análisis para ver cómo ese cambio afecta los resultados. Este aspecto juega a favor con respecto al tema del tipo de hormigón utilizado. En las calibraciones realizadas en este trabajo de título el hormigón modelado correspondía a 100% cemento portland tipo I, y aunque en Chile no se utiliza cemento portland puro en los hormigones, porque por lo general se utiliza cemento portland puzolánico, el procedimiento realizado para la verificación de la fisuración igual se considera válido para nuestro país ya que eso corresponde a una variable más que se puede modificar.

Un aspecto en contra de ABAQUS se descubrió al realizar el análisis de esfuerzo. En la Sección 4.2.2. se habla sobre las propiedades térmicas necesarias del hormigón para realizar el análisis, y se menciona que el módulo de elasticidad depende de la madurez, es decir, tanto del tiempo como de la temperatura del elemento, lo cual es muy importante al momento de modelar hormigón a edad temprana. El problema es que al realizar el análisis térmico se descubrió que no era posible ingresar directamente en la interfaz de ABAQUS un módulo de elasticidad que dependa de la madurez. La única manera de hacer eso es creando una subrutina llamada UMAT. Una subrutina es un subalgoritmo que forma parte de un algoritmo principal, el cual permite resolver una tarea específica. En este caso esa tarea específica era introducir como parámetro al modelo la ecuación de módulo de elasticidad dependiente de la madurez. La subrutina debe ser escrita a través de Fortran (contracción del inglés Formula Translating System) que es un lenguaje de programación de alto nivel de propósito general, procedimental e imperativo, que está especialmente adaptado al cálculo numérico y a la computación científica. Al investigar más sobre este tema se tomó la decisión de no seguir ese camino ya que el tiempo que toma estudiar y dominar esa materia para poder escribir correctamente una subrutina de ese tipo, es de muchos meses, por lo que no iba ser posible terminar el trabajo de título dentro del plazo estimado. En vez de eso, se decidió optar por la segunda mejor opción que era ingresar el módulo de elasticidad en el tiempo por tramos, ya que no se podía ingresar de manera continua. En este caso se dividió el tiempo de análisis en 17 tramos y se le asignó un valor de módulo de elasticidad a cada uno. Claramente esta opción es bastante menos precisa que la anterior, pero era factible de realizar y los resultados arrojados aún reflejarían de manera correcta el estado de tensiones del hormigón. Cabe destacar que esto sólo afecta a los resultados de las tensiones, y no a los resultados térmicos obtenidos en la etapa anterior.

Otro aspecto importante a mencionar es que Lawrence (2009), utilizó el software DIANA para realizar los análisis, y según dicho trabajo en ese software sí se podía ingresar directamente el módulo de elasticidad dependiente de la madurez, lo cual sería un aspecto a favor de DIANA por sobre ABAQUS. Aunque no se pudo incursionar y estudiar el software DIANA, esto refleja la importancia de la herramienta que se elija, lo que hay que tener muy en cuenta al momento de decidir realizar la verificación de fisuración basada en el método de elementos finitos.

8.2. Resultados de análisis térmico y de esfuerzo

En este trabajo de título se realizaron calibraciones para el análisis térmico y de esfuerzo, utilizando datos experimentales de otros estudios, con el fin de recrear el procedimiento de verificación de fisuración propuesto por la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”.

Con respecto a los resultados del análisis térmico, se observó que el modelo subestimó la tasa de elevación de temperatura en las primeras horas, ya que experimentalmente la temperatura máxima se alcanzó en la mitad del tiempo predicho por el modelo. Una posible explicación para esto es que faltara introducir algún parámetro o no se haya logrado modelar correctamente la interacción entre el hormigón y el material aislante, debido a que en el trabajo de Lawrence (2009) estaba todo indicado para ser modelado en DIANA y no es trivial encontrar las equivalencias de parámetros o de interacciones entre materiales en otro software, ya que las interfaces son muy diferentes.

Con respecto a los resultados del análisis de esfuerzo, también se encontraron diferencias significativas. Una de estas diferencias es que la tensión máxima se alcanzó en la mitad del tiempo estimado por el modelo. Este error se arrastra de los resultados térmicos, donde ocurrió el mismo error de predicción, ya que los resultados del análisis térmico se importan y afectan directamente los resultados de las tensiones obtenidas en el análisis de esfuerzo.

Otra diferencia importante observada en los resultados del análisis de esfuerzo, correspondía a discrepancias entre las magnitudes de tensiones y la forma de decaimiento de la curva. Este problema probablemente tenga relación con el módulo de elasticidad, ya que como se mencionó anteriormente, no se pudo ingresar en ABAQUS el módulo de elasticidad dependiente de la madurez. Esto se debe tener presente en futuros análisis, ya que podría ser una mejor opción utilizar el software DIANA para evitar tener que escribir una subrutina en ABAQUS, y así probablemente se corregiría este error.

Otro aspecto a destacar, es que en los análisis realizados por los dos trabajos estudiados (Al-Manaseer y Elias 2008 y Lawrence 2009), no se utilizaron todas las propiedades que menciona la guía (las que se describen en la Sección 4.2), pero aún así los resultados de los análisis fueron los esperados. Hay que tener en cuenta que se estaba analizando una estructura muy simple como lo es un bloque de hormigón, por lo que para estructuras más complejas tal vez lo mejor sea incluir en los análisis todas las propiedades mencionadas por la guía.

8.3. Índice y probabilidad de fisuración térmica

Luego de determinar los esfuerzos de tracción en el bloque de hormigón, se procedió a determinar el índice y probabilidad de fisuración térmica, tal como se muestra en el Capítulo 7. Recordar que el objetivo es analizar los elementos de la estructura donde

teóricamente se producirán las mayores tensiones, y luego calcular la probabilidad utilizando el menor índice de fisuración determinado en ese elemento durante todo el período de análisis.

Al comparar los resultados, se puede observar que la probabilidad de fisuración en las 3 ubicaciones analizadas, obtenidas utilizando los resultados de tensiones obtenidos mediante ABAQUS, es mucho menor que la probabilidad obtenida por Lawrence (2009). Esto se debe a que el riesgo de fisuración es mayor en las primeras horas después de la colocación del hormigón, cuando la resistencia a la tracción del hormigón no está completamente desarrollada, y como el modelo realizado en ABAQUS subestima las tensiones durante las primeras horas de análisis, por las razones ya comentadas en la sección anterior, como resultado se tiene una subestimación de la probabilidad de fisuración térmica del elemento del hormigón masivo.

Considerando los índices y probabilidades determinadas tomando en cuenta los esfuerzos de tracción determinados por Lawrence (2009) mediante DIANA, se tiene que tanto la ubicación 1 (centro cara superior), como la ubicación 3 (centro borde superior) tienen un 100% de probabilidad de fisuración, mientras que la ubicación 4 (centro cara lateral) tiene sólo un 5% de probabilidad de fisuración. Y en efecto al observar la Figura 7-4 se puede ver observar que en general la cara superior y sobretodo sus bordes sufren de fisuración, mientras que la cara lateral no presenta fisuras. Esto confirma la efectividad del método con respecto a la predicción de fisuración.

CAPÍTULO 9 Conclusiones

Con respecto al procedimiento de verificación de fisuración térmica basado en el método propuesto por la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”, se puede decir que se pudo reproducir y aplicar con éxito dicho método, y a pesar de que hubo ciertos obstáculos relativos al software utilizado que no se resolvieron del todo, este trabajo de título queda como precedente y como guía para cuando en el futuro se requiera aplicar el procedimiento de verificación de la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Hormigón Masivo”.

Los errores encontrados en los resultados del modelo del presente trabajo de título, apuntan a destacar la necesidad de calibrar los modelos numéricos con ensayos experimentales, especialmente en el caso de la simulación térmica, ya que resultados deficientes en la modelación térmica generan errores que se van incrementando al pasar al análisis de tensiones, el cual depende fundamentalmente del gradiente de temperatura. Todo eso se reflejará finalmente en una mala estimación del índice de fisuración, y por ende, en una mala estimación de la probabilidad de fisuración térmica del elemento de hormigón masivo analizado.

Probablemente si se hubiera logrado ajustar el modelo de simulación térmica, de manera que éste reflejara correctamente los valores experimentales, no existiría el problema de subestimación de las tensiones en las primeras horas, pero lo más seguro es que aún existirían diferencias entre las magnitudes de las tensiones o diferencias en el decaimiento de la curva, que tendrían relación con el módulo de elasticidad. Como ya se mencionó anteriormente, este último problema podría solucionarse utilizando el software DIANA dónde, de acuerdo a lo estudiado, es posible ingresar directamente el módulo de elasticidad del hormigón dependiente de la madurez.

La corrección tanto del problema encontrado en el análisis térmico, como del problema relacionado con el módulo de elasticidad, resultaría en una precisa predicción de las tensiones generadas en el bloque de hormigón, por ende, en una correcta estimación del índice y probabilidad de fisuración térmica en cada una de las ubicaciones analizadas.

Dejando de lado estos errores y analizando la efectividad del método a partir de un modelo computacional preciso, si se observan los índices y las probabilidades de fisuración térmica determinados considerando los resultados obtenidos mediante DIANA por Lawrence (2009), y comparando esos resultados con el estado final de fisuración del bloque experimental de dicha investigación, se puede decir que el método en efecto predijo correctamente la presencia o ausencia de fisura en los 3 elementos del modelo analizado.

Tomando lo anterior como antecedente se puede concluir que este método predictivo sí es efectivo para el análisis de fisuración térmica en hormigón masivo. No obstante, cabe destacar que el método de verificación propuesto por la guía estudiada se basa en una

curva que relaciona el índice de fisuración térmica con la probabilidad de fisuración térmica, curva que se construyó analizando 728 elementos correspondientes a 65 estructuras reales de Japón, determinando su índice de fisuración y analizando su estado actual de fisuración. Si bien esta curva podría ser de validez general, sería conveniente realizar un estudio similar para construir una curva de probabilidad de fisuración basada completamente en estructuras existentes en nuestro país. Este tipo de estudio podría implementarse aprovechando la existencia de un número importante de estructuras masivas recientemente construidas en el país, cuyos antecedentes de construcción debieran estar disponibles, lo que constituiría un gran avance en mejorar y expandir las normas chilenas sobre hormigones masivos. Y como la idea es aplicar este procedimiento antes de construir la estructura, podrían evitarse fisuras, accidentes o incluso evitar costos de reparación que tendrían que realizarse a la estructura debido a la aparición de fisuras que, de haber utilizado este método, podrían haberse evitado.

BIBLIOGRAFÍA

- ABAQUS Version 6.7 Documentation, ABAQUS Analysis User's Manual
<http://abaqus.civil.uwa.edu.au/docs/abaqus/v6.7/books/usb/default.htm>
- ABAQUS Version 6.7 Documentation, ABAQUS Example Problems Manual
<http://abaqus.civil.uwa.edu.au/docs/abaqus/v6.7/books/exa/default.htm>
- ABAQUS Version 6.7 Documentation, ABAQUS User Subroutines Reference Manual
<http://abaqus.civil.uwa.edu.au/docs/abaqus/v6.7/books/sub/default.htm>
- ABAQUS Version 6.7 Documentation, ABAQUS/CAE User's Manual
<http://abaqus.civil.uwa.edu.au/docs/abaqus/v6.7/books/usi/default.htm>
- ACI Committee 207. (1996). *207.R1-96: Mass Concrete*. Farmington Hills, MI USA: American Concrete Institute.
- ACI Committee 207. (2007). *207.2R-07: Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*. Farmington Hills, MI USA: American Concrete Institute.
- ACI Committee 211. (1991). *211.1R-91: Standard Practice for Selecting Proportions for normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills, MI USA: American Concrete Institute.
- ACI Committee 305. (1999). *305R-99: Hot Weather Concreting*. Farmington Hills, MI USA: American Concrete Institute.
- Al-Manaseer, Akthem A. & Elias, Najah. (2008). *Placement of Mass Concrete for Cast-in-Place Concrete Piling: The Effects of Heat of Hydration of Mass Concrete for Cast-In-Place Piles*. (Final Report, Report No. CA07-0936). Department of Civil and Environmental Engineering, San José State University, San José, CA.
- Bamforth, P.B. (1981). *Large Pours*. Letter to the editor. Concrete, Cement and Concrete Association. Wexham Springs, Slough, England.
- Carrasquillo, Ramón L. (2009). *Tecnología del Hormigón Aplicada al Caso de Hormigones Masivos*. Presentado en el Seminario Internacional de Hormigones Estructurales Masivos. Santiago, Chile.
- División de Normas del Instituto Nacional de Normalización. (1985). *Norma Chilena Oficial NCh170.Of85: Hormigón – Requisitos Generales*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.

- Figuroa, Miguel & Delfín, Federico. (2009). *Experiencia del IDIEM en el Control y Seguimiento de Obras de Hormigón Masivo*. Presentado en el Seminario Internacional de Hormigones Estructurales Masivos. Santiago, Chile.
- Fintel, Mark & Ghosh, S.K. (1978). *Mass Reinforced Concrete without Construction Joints*. Presented at the Adrian Pauw Symposium on Designing for Creep and Shrinkage. Fall Convention of the American Concrete Institute, Houston, Texas.
- FitzGibbon, Michael E. (1977). *Large Pours for Reinforced Concrete Structures*. Current Practice Sheets No. 28, 35 y 36. Concrete, Cement and Concrete Association. Wexham Springs, Slough, England.
- Japan Concrete Institute. (2008). *Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete*.
- Johansen, V.C., Klemm, W.A. & Taylor, P.C. (2002). *Why Chemistry Matters in Concrete*. Farmington Hills, MI USA: American Concrete Institute.
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B. & Panarese, W. C. (2003). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association.
- Lawrence, Adrian M. (2009). *A Finite Element Model for the Prediction of Thermal Stresses in Mass Concrete*. Tesis presentada a la Escuela de Postgrado de la Universidad de Florida en cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de doctor en filosofía. Universidad de Florida, Estados Unidos.

ANEXOS

ANEXO A Derivación de la curva de probabilidad de fisuración térmica

La curva de distribución de densidad de probabilidad adecuada de la variable probabilidad de fisuración térmica fue examinada de acuerdo a los resultados del cuestionario y al análisis tridimensional de esfuerzo térmico realizado por el comité técnico del Instituto del Concreto de Japón.

En este anexo, se examina la adaptabilidad de la función de distribución de Weibull como una curva de regresión válida para la probabilidad de fisuración térmica. La función de distribución de Weibull fue presentada en 1939 por el físico sueco Waloddi Weibull es la función de distribución de la densidad de probabilidad, la cual se deriva en base a la idea de que la resistencia del material depende de la parte más débil y es muy utilizada para expresar el porcentaje de falla en materiales frágiles.

La función de distribución de Weibull es una función exponencial. La función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulada son representadas por las siguientes ecuaciones.

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$$

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \int_0^x \lambda \exp(-\lambda x) dx = \left[\frac{\lambda \exp(-\lambda x)}{-\lambda} \right]_0^x = -\exp(-\lambda x) + 1 \quad (\text{A.1})$$

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$$

Cuando la dependencia del tiempo de la Ecuación (A.1) se toma en cuenta, la función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulativa se expresan de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{m}{\alpha} x^{m-1} \exp\left(-\frac{x^m}{\alpha}\right) \quad (\text{A.2})$$

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^m}{\alpha}\right) \quad (\text{A.3})$$

Tomando el logaritmo natural a ambos lados de la Ecuación (A.2) dos veces, se obtiene la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{1 - F(x)} = \exp\left(\frac{x^m}{\alpha}\right)$$

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right) = \frac{x^m}{\alpha}$$

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F(x)} \right) = m \ln x - \ln \alpha \quad (\text{A.4})$$

La Ecuación (A.4) es la línea recta cuya pendiente es m y cuya intersección con el eje Y es $\ln \alpha$. Cuando x es el índice de fisuración térmica I_{cr} y $F(I_{cr})$ es la probabilidad de fisuración térmica, se puede determinar tanto m como α . De esta manera puede obtenerse la relación entre la probabilidad de fisuración térmica y el índice de fisuración térmica basada en la función de distribución de Weibull. Aquí, el análisis de regresión que usa la función de distribución de Weibull se aplica a los datos basados en la frecuencia en cada división y luego se decide que las constantes m y α sean -4.29 y 1.43, respectivamente. Los resultados analizados se muestran en la Figura A-1.

Como se puede observar en la Figura A-1, existe una correlación muy alta entre la probabilidad de fisuración térmica y el índice de fisuración térmica, ambos expresados por el logaritmo natural en la Ecuación (A.4).

La ecuación para la relación entre la probabilidad de fisuración térmica y el índice de fisuración térmica se expresa de la siguiente manera:

$$F(I_{cr}) = 1 - e^{-\left(\frac{I_{cr}^{-4.29}}{1.43}\right)} \quad (\text{A.5})$$

Donde I_{cr} es el índice de fisuración térmica y $F(I_{cr})$ es la probabilidad de fisuración térmica.

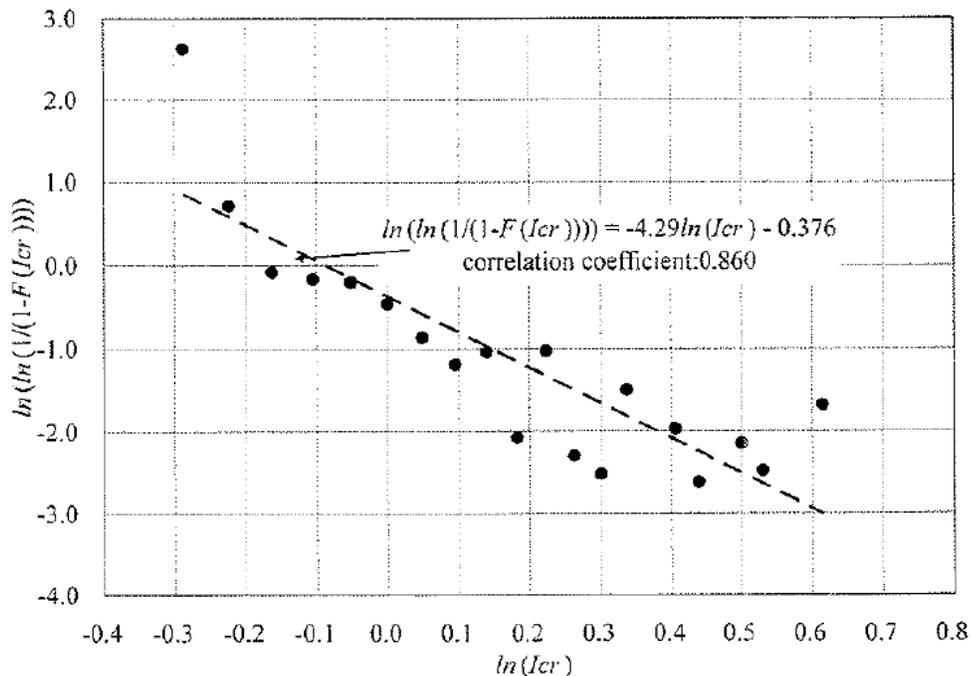


Figura A-1: Relación entre el índice de fisuración térmica y la probabilidad de fisuración térmica – Ambos ejes están expresados por el logaritmo natural –

ANEXO B ABAQUS

A continuación se muestran los pasos realizados en ABAQUS en la creación y análisis del modelo computacional. Cabe destacar que el objetivo de este anexo es que el lector tenga una idea general de cómo funciona el programa y cuáles son los pasos que se llevaron a cabo, pero su propósito no es servir como manual del software.

La Figura B-1 muestra la interfaz de ABAQUS donde se crea el modelo. En el espacio azul se crea la estructura o elemento y con las distintas opciones que se observan a la izquierda, se definen los materiales, condiciones de borde, cargas, etc., y se configura el análisis.

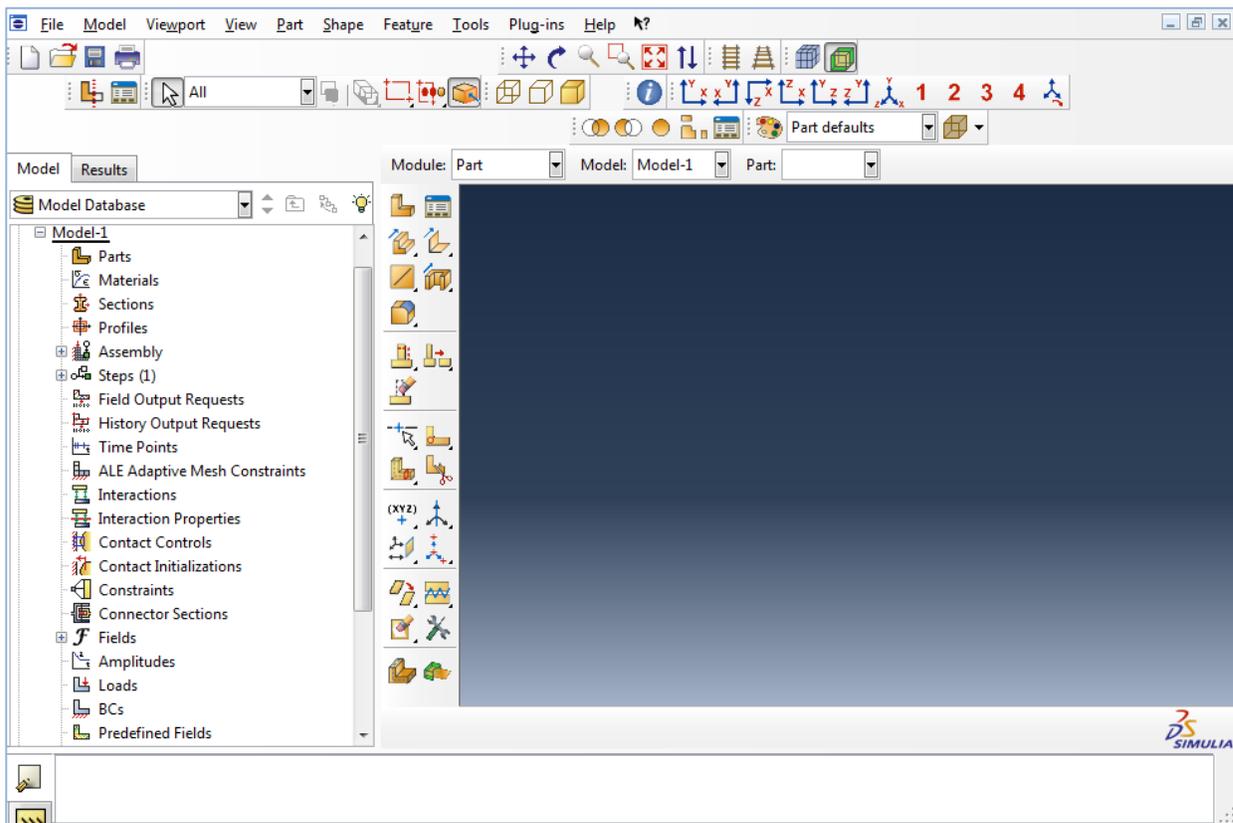


Figura B-1: Interfaz de ABAQUS

Análisis térmico

- **Creación de la parte**

Primero se crean la o las partes que formarán la estructura. En este caso se dibujó un cubo junto con las paredes de madera y de poliestireno. Se dibujan todas las partes por separado y luego se ensamblan tal como es el modelo en la realidad. En la Figura B-2 se pueden ver las partes ya ensambladas.

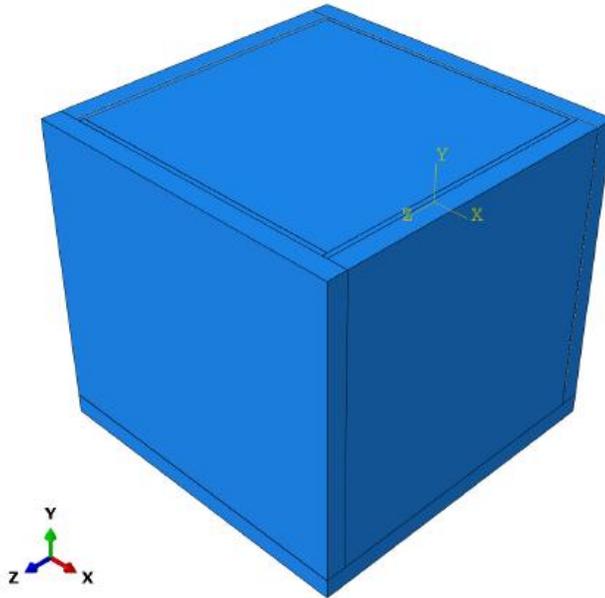


Figura B-2: Cubo de hormigón con encofrado de madera y aislación de poliestireno

- **Definición de los materiales**

Luego se deben definir el o los materiales involucrados en el modelo. En este caso: hormigón, madera y poliestireno. Se ingresan las propiedades de cada material dependiendo del análisis y se le asigna a cada parte, el material correspondiente. En la Figura B-3 se muestra el cuadro de edición de materiales, en este caso el del hormigón, donde se observan las distintas pestañas para agregar las propiedades que corresponda ya sean térmicas, mecánicas u otras.

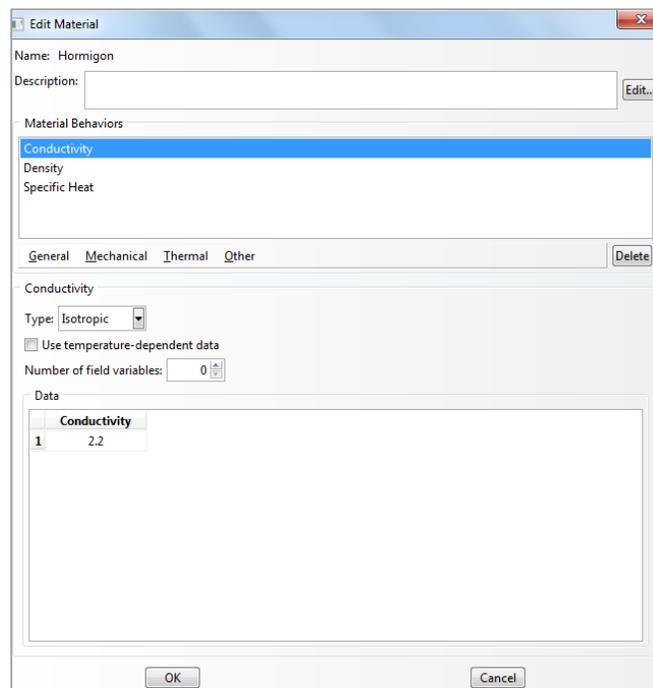


Figura B-3: Módulo de edición de materiales

- **Configuración del análisis**

El análisis consistirá de dos pasos: un paso inicial, creado automáticamente, en el cual se aplicarán las condiciones de borde y un paso de transferencia de calor, en el cual se desarrollan los cambios de temperatura de la estructura debido al calor de hidratación. Se configura el tipo de paso, tiempo de análisis y el tiempo de incrementación.

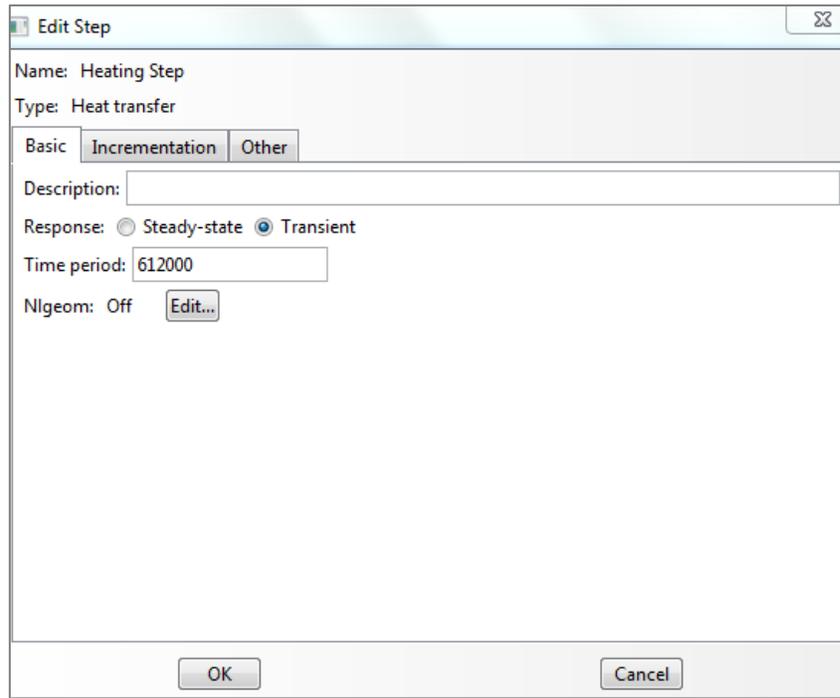


Figura B-4: Módulo de edición del paso de análisis

- **Campos predefinidos**

Dentro del módulo “campos predefinidos” en ABAQUS se debe establecer la temperatura de colocación del hormigón, la cual corresponderá a la temperatura de la estructura en el tiempo cero del análisis. La temperatura de colocación del hormigón influye de manera importante en la temperatura máxima que alcanzará el hormigón.

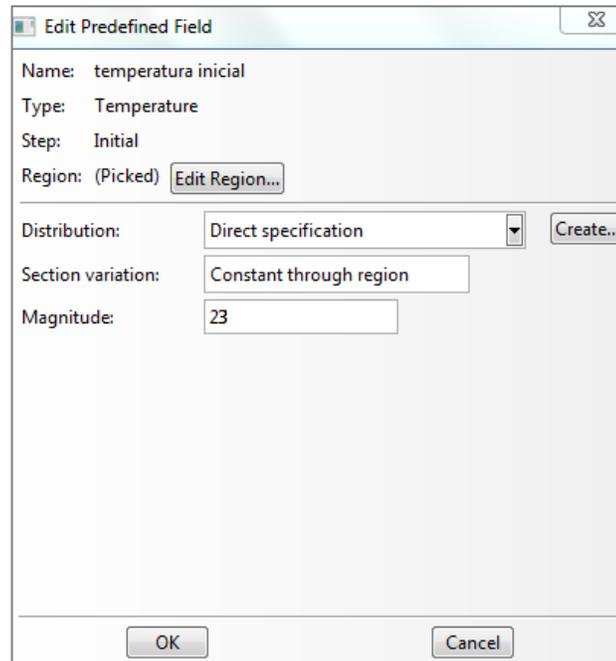


Figura B-5: Módulo de edición de campo predefinido

- **Carga**

La “carga” que se le aplica al modelo es el aumento de temperatura adiabática en el tiempo, pero como ABAQUS no permite introducir directamente este parámetro, se debe convertir a flujo de calor de cuerpo. En el Apéndice C se encuentra en detalle la conversión de aumento de temperatura adiabática a flujo de calor de cuerpo.

- **Interacciones**

En este caso existen dos tipos de interacciones térmicas. Dado estas interacciones es importante definir la temperatura ambiente a través de todo el tiempo de análisis.

- 1) Transferencia de calor por convección. En este caso se produce transferencia de calor por convección entre el ambiente y la cara superior expuesta, y entre la superficie exterior del poliestireno y el ambiente. Esta interacción se representa a través del coeficiente de transferencia de calor de superficie. Este coeficiente se mide en $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- 2) Contacto entre superficies. Hay que considerar el contacto que existe entre el hormigón y el encofrado de madera y entre la madera y el poliestireno, ya a través de dichos contactos se producirá una transferencia de calor que determinará cuán aislado está el bloque de hormigón del ambiente. Para ello se debe especificar en ABAQUS la densidad, calor específico y conductividad térmica tanto de la madera utilizada como del poliestireno.

- **Mallando el modelo**

Se utilizó una malla cuadrícula tanto para el bloque de hormigón como para los materiales aislantes. Para la malla se debe elegir la forma y también el tipo de análisis, en este caso, “transferencia de calor” (heat transfer).

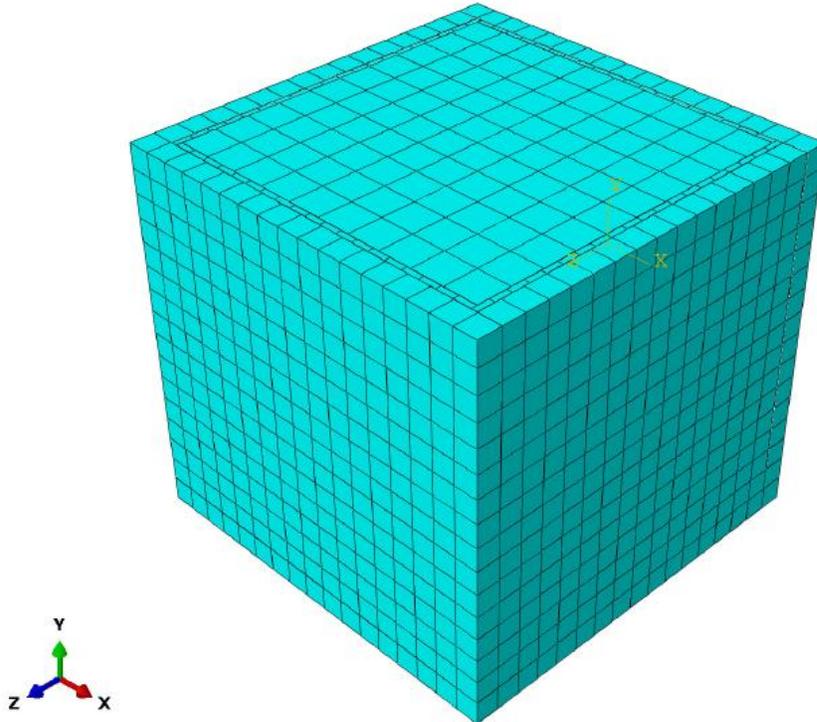


Figura B-6: Malla del bloque de hormigón y de los materiales que lo rodean

- **Crear y someter un trabajo de análisis**

Se debe ir al módulo “Job” para crear un trabajo que está asociado con el modelo y someter este trabajo al análisis. Se elige la opción “submit” en el trabajo creado para que comience el análisis.

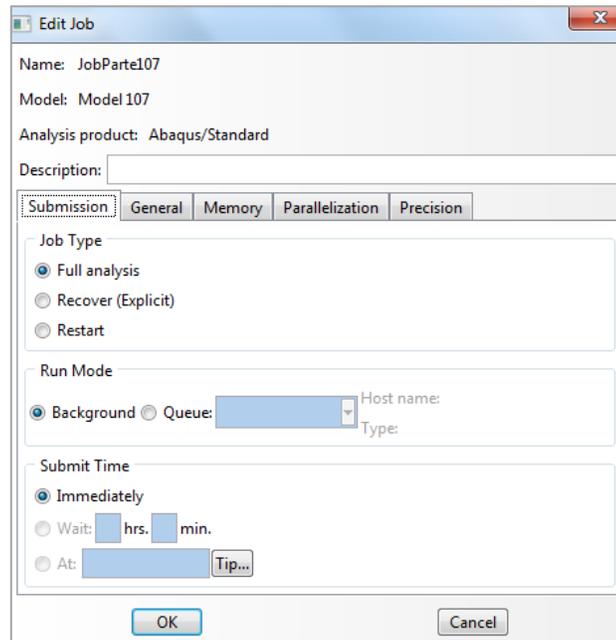


Figura B-7: Módulo de creación del trabajo

- **Visualizar los resultados**

Finalmente, se usa el módulo “Visualization” para leer la base de datos de salida que ABAQUS genera durante el análisis y para ver los resultados del mismo.

Se elige que se quiere ver la temperatura nodal en formato de contorno en la estructura. Así podemos ver los contornos de temperatura en la estructura en el intervalo de tiempo que se desee. En la Figura B-8 se muestra un ejemplo de eso y se observa el contorno de temperatura a las 35 horas.

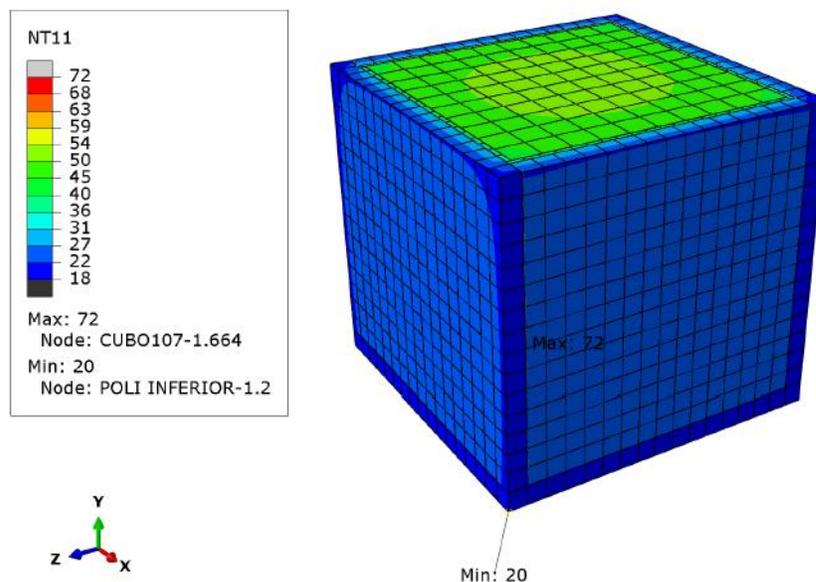


Figura B-8: Contorno de temperatura a 35 horas del comienzo del análisis

Pero también se puede graficar la temperatura versus el tiempo de cualquier nodo. Por ejemplo la Figura B-9 muestra la temperatura en el tiempo del centro del bloque de hormigón.

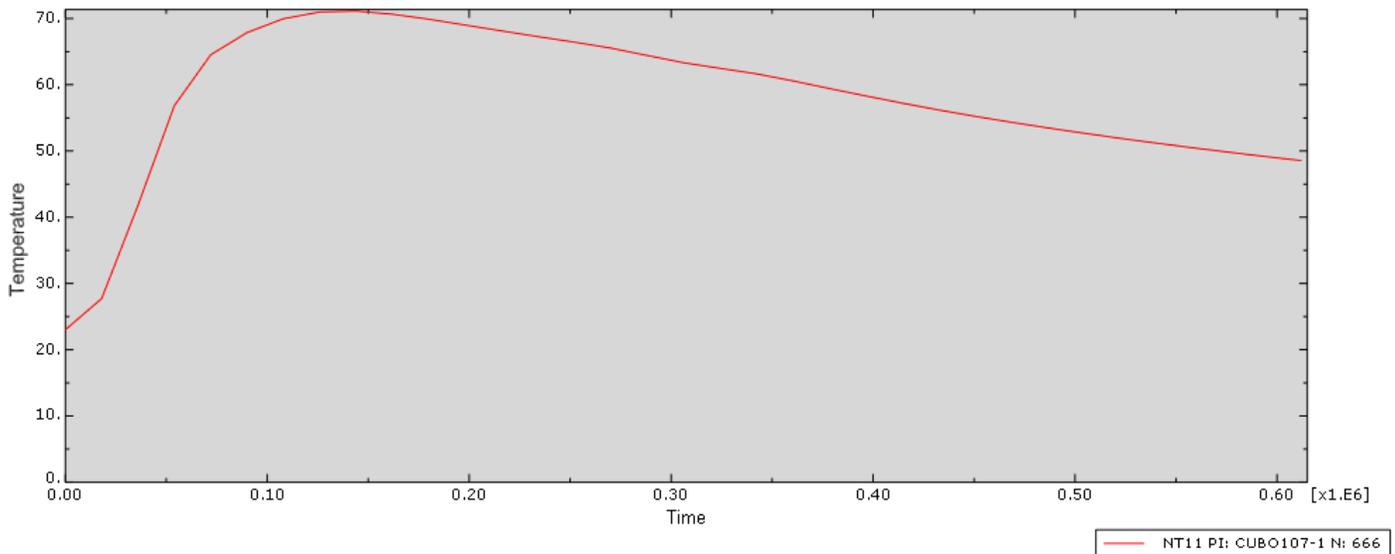


Figura B-9: Temperatura (°C) versus Tiempo (segundos) en el centro del bloque de hormigón

Análisis de esfuerzo

- **Creación de la parte**

En el análisis de esfuerzo sólo influyen los resultados térmicos y las restricciones que existan sobre la estructura o elemento, por lo que sólo se analizará el bloque de hormigón sin considerar los materiales aislantes ya que éstos sólo contribuían en el aspecto térmico.

- **Definición de los materiales**

Se edita el mismo material hormigón usado en el análisis térmico, pero se le ingresan las propiedades necesarias para el análisis de esfuerzo, es decir, propiedades mecánicas.

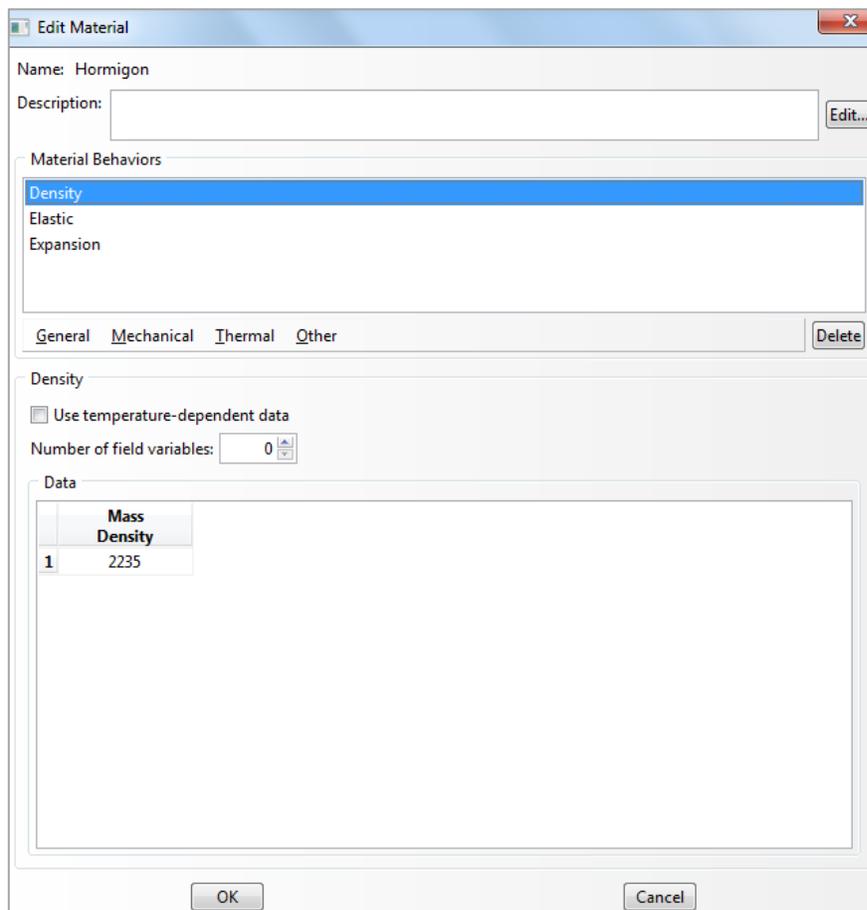


Figura B-10: Módulo de edición de materiales

- **Configuración del análisis**

A igual que en el análisis térmico, el análisis de esfuerzo consiste de dos pasos, el paso inicial, y un paso en el cual se desarrollan las tensiones en la estructura. Se configura el tipo de paso, tiempo de análisis y el tiempo de incrementación. El tipo de paso utilizado en este análisis, fue “dinámico implícito”.

Como se mencionó anteriormente, se tuvo que ingresar el módulo de elasticidad por tramos (17 tramos), dónde el módulo aumentaba en cada tramo según lo obtenido experimentalmente. Para hacer eso posible se debieron crear 17 pasos, además del paso inicial, para que a cada paso le correspondiera un valor de módulo de elasticidad. Esto se muestra en la Figura B-11 donde se observan los 17 pasos creados, a los cuales se les asignó una duración de 10 horas (36000 segundos) a cada uno para así sumar un total de 170 horas, que corresponde a la duración del período de análisis.

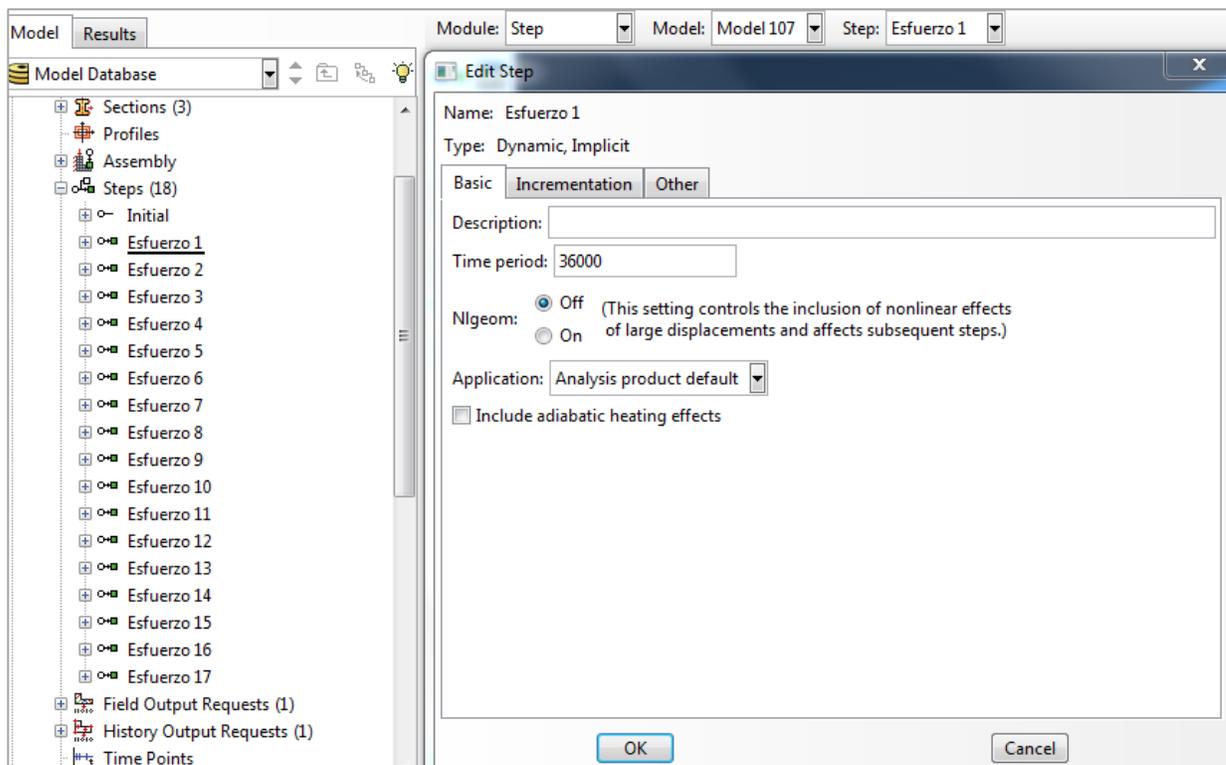


Figura B-11: A la derecha se observa el módulo de edición de los pasos, y a la izquierda los 17 pasos creados.

- **Campos predefinidos**

La temperatura de la estructura en el tiempo obtenida del análisis térmico es leída en el análisis de esfuerzo como un campo predefinido, se denomina predefinido porque no varía con la solución obtenida del análisis de esfuerzo.

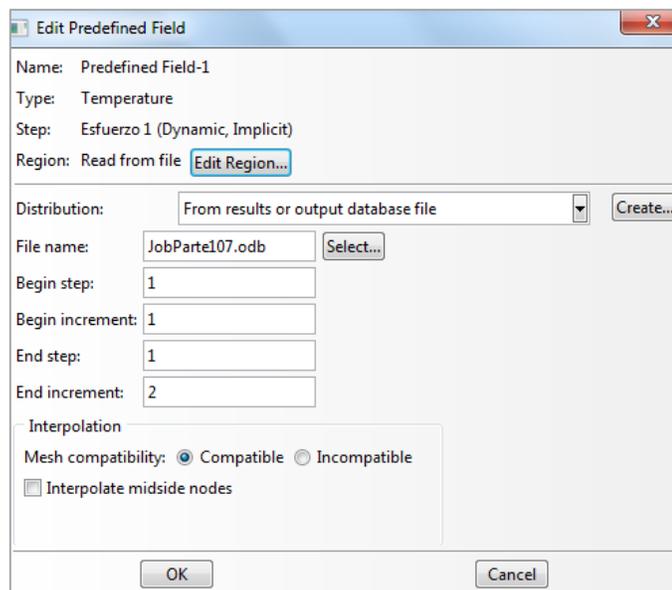


Figura B-12: Módulo de edición de campos predefinidos

- **Carga**

A este análisis no se le ingresa ningún tipo de “carga” ya que lo que hará que el hormigón se expanda, serán los resultados del análisis térmico que son ingresados en el análisis de esfuerzo como campo predefinido.

- **Condiciones de borde**

La condición de borde en el análisis de esfuerzo es la que le da la restricción al bloque. En este caso el cubo está colocado en un soporte fijo, por lo tanto se impone la condición de borde de que la cara inferior del cubo tiene restringido los desplazamientos a lo largo de los 3 ejes.

Se selecciona la cara inferior y en el módulo de condiciones de borde se elige la opción “Pinned $U1=U2=U3=0$ ” que significa que los desplazamiento de esa cara en las 3 direcciones, son cero.

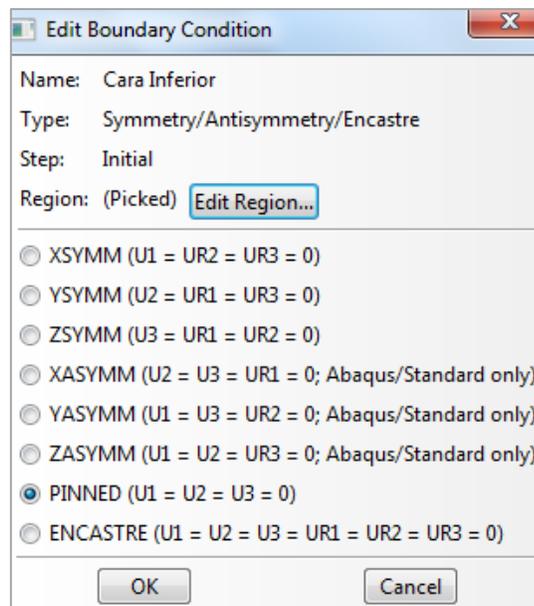


Figura B-13: Módulo de edición de condiciones de borde

- **Mallando el modelo**

Se utiliza la misma malla que en el análisis de esfuerzo pero se le cambia en tipo de análisis, en este caso es “Tensión 3D” (3D Stress).

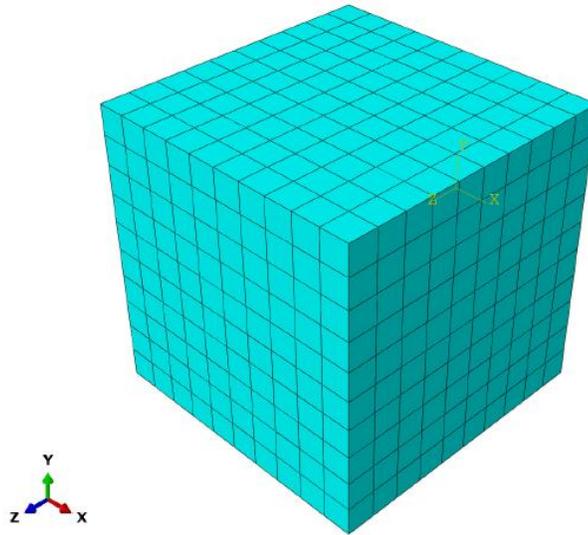


Figura B-14: Malla del bloque de hormigón, la misma utilizada que en el análisis térmico

- **Crear y someter un trabajo de análisis**

Al igual que en el análisis térmico, se debe ir al módulo “Job” para crear un trabajo que está asociado con el modelo y someter este trabajo al análisis. Se elige la opción “submit” en el trabajo creado para que comience el análisis.

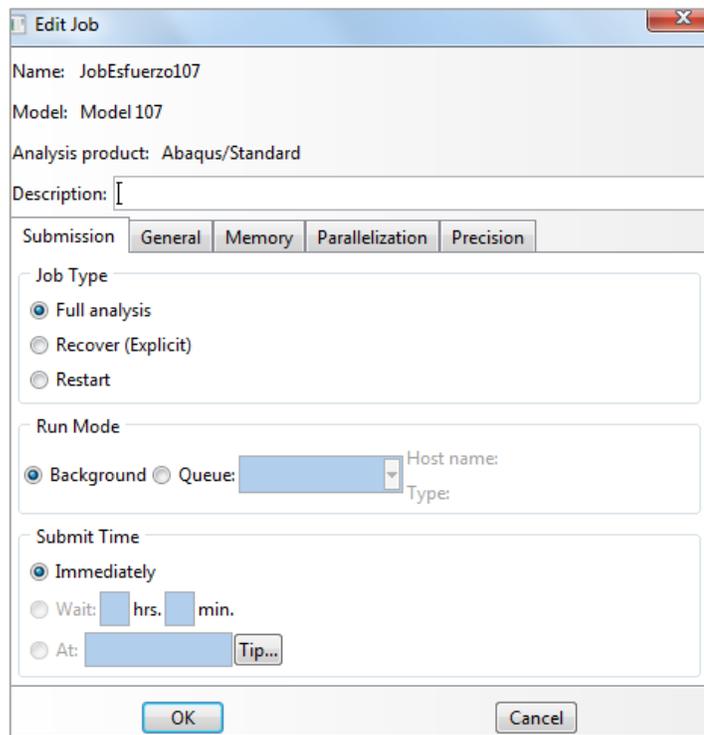


Figura B-15: Módulo de edición del trabajo

- **Visualizar los resultados**

Se usa el módulo “Visualization” para leer la base de datos de salida que ABAQUS genera durante el análisis y para ver los resultados del mismo.

Se elige que se quieren ver las tensiones en formato de contorno en la estructura. Así podemos ver los contornos de las tensiones en la estructura en el intervalo de tiempo que se desee. En la Figura B-16 se muestra un ejemplo de eso y se observa el contorno de tensiones a las 40 horas.

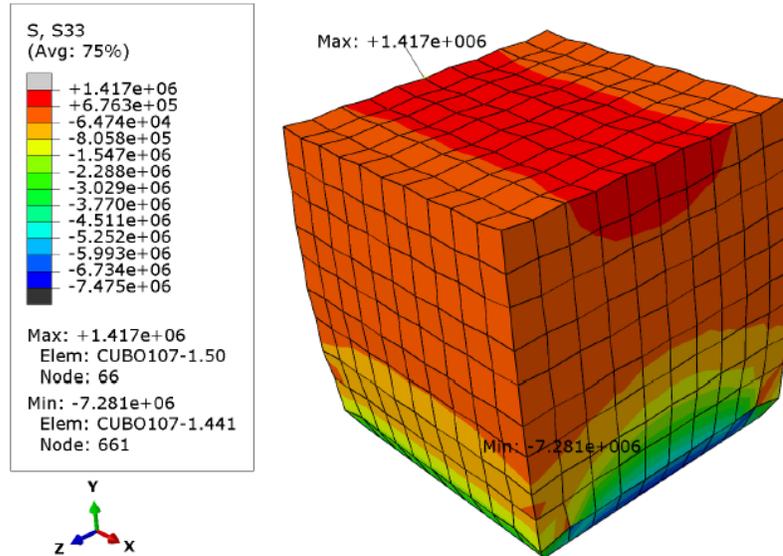


Figura B-16: Contorno de tensiones en el bloque de hormigón después de 40 horas del inicio del análisis

Pero también se puede graficar la tensión versus el tiempo en cualquier lugar de la estructura. Por ejemplo la Figura B-17 muestra la tensión en el centro de la cara superior del bloque de hormigón.

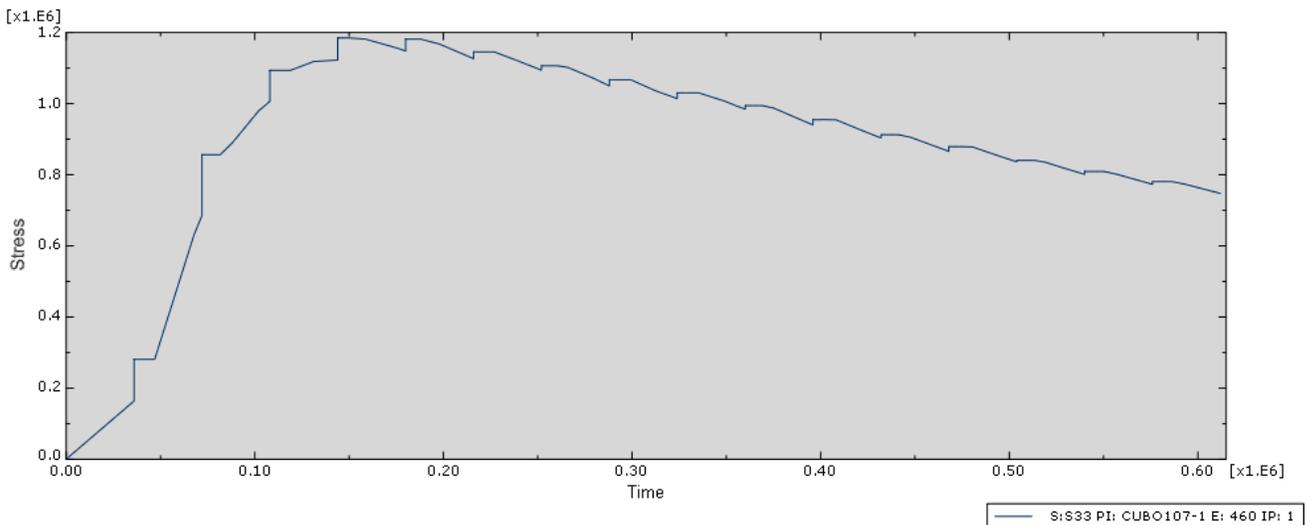


Figura B-17: Tensión (Pa) versus Tiempo (segundos) en el centro de la cara superior del bloque de hormigón

ANEXO C Propiedades bloque de hormigón

A continuación se muestra cómo se determinaron las propiedades térmicas y mecánicas del bloque experimental de hormigón analizado por Lawrence (2009), las cuales se utilizaron para las calibraciones en ABAQUS en este trabajo de título, junto con otras características del modelo.

- **Diseño de la mezcla de hormigón**

La razón agua/cemento de la mezcla usada en el experimento es de 0.5 para permitir la compatibilidad con la prueba de calorimetría isotérmica que fue usada para determinar el calor de hidratación en la mezcla de hormigón. El cemento utilizando en la mezcla de hormigón era 100% Cemento Portland Tipo I.

En la Tabla C-1 se muestra la composición exacta de la mezcla.

Tabla C-1: Composición hormigón

Material	Cantidad (kg/m ³)
Cemento	404
Agua	202
Agregados Finos	650
Agregados Gruesos	979
Densidad	2235

- **Geometría del bloque**

Las dimensiones del bloque de hormigón son 1.07m × 1.07m × 1.07m, como se muestra en la Figura C-1. Las caras laterales están rodeadas por un encofrado de madera contrachapada de 1.9 centímetros de espesor y la base del cubo está rodeada por una capa de 3.8 centímetros de ese mismo material. Rodeando a la madera se colocó una capa aislante térmica de poliestireno expandido de 7.6 centímetros de espesor, como se muestra en la Figuras C-2 y C-3, mientras que la cara superior se dejó descubierta y expuesta a las condiciones del entorno.

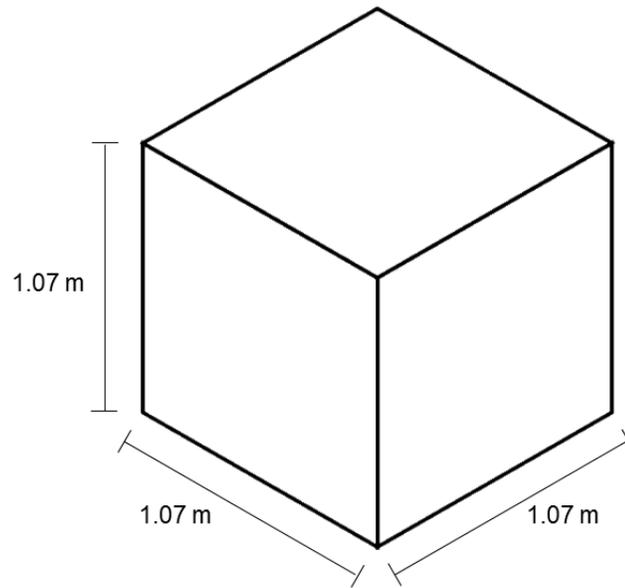


Figura C-1: Dimensiones del bloque de hormigón

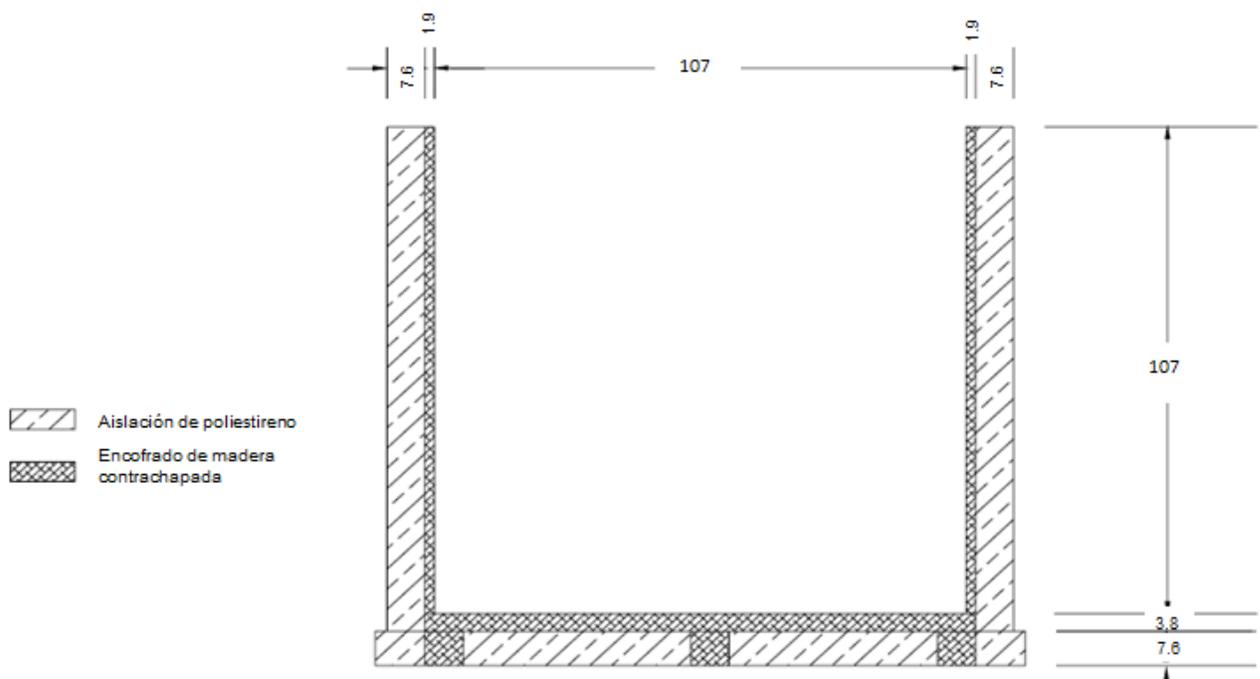


Figura C-2: Vista en corte del bloque de hormigón con el encofrado y la aislación térmica (Unidades en centímetros)



Figura C-3: Bloque de hormigón terminado, con el encofrado de madera contrachapada y la capa de poliestireno.

- **Instrumentación**

Se colocó instrumentación en el bloque de hormigón para el monitoreo de la temperatura y deformación en determinadas ubicaciones. El equipo de obtención de datos consistía en termopares Tipo K con una precisión de $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ y medidores de deformación.

La distribución de los termopares y de los medidores de deformación se muestra en la Figuras C-4 y C-5. Los datos de temperatura y deformación fueron registrados con el fin calibrar el modelo computacional 3D, ajustando los parámetros, y así poder modelar el comportamiento a edad temprana del hormigón.

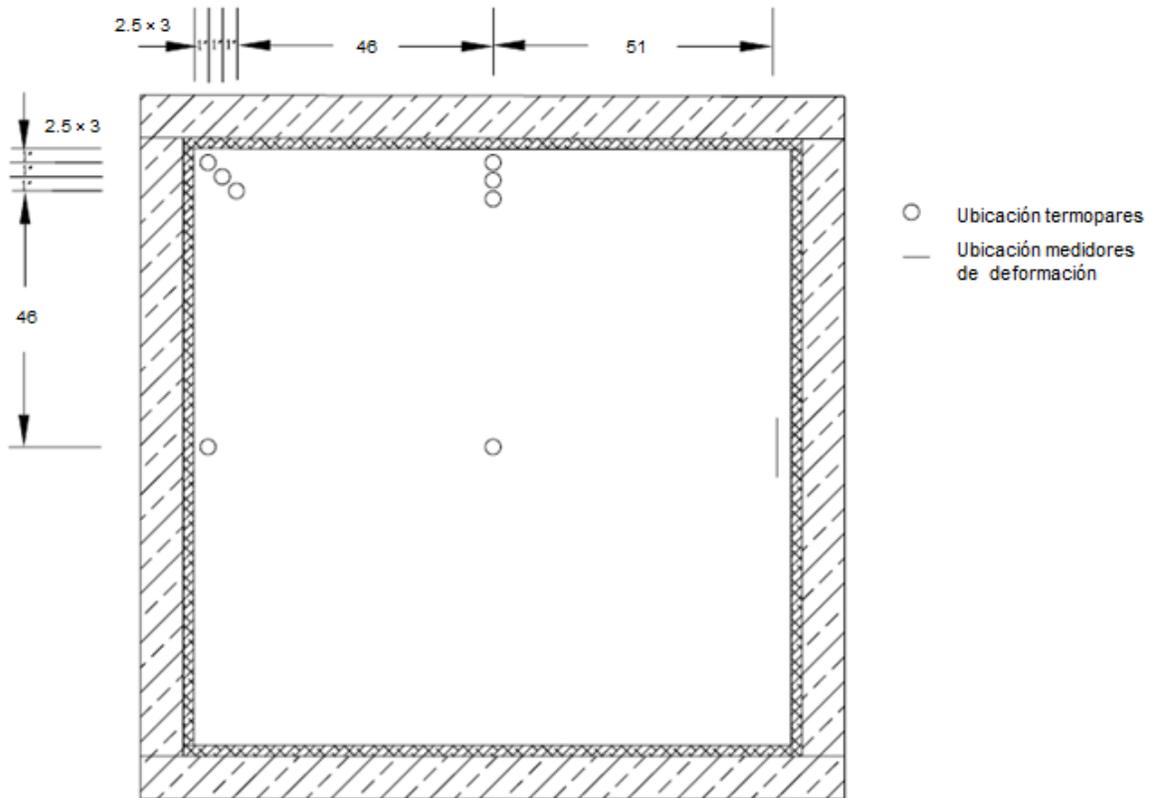


Figura C-4: Vista en planta del cubo con la ubicación de los sensores de temperatura y deformación (Unidades en centímetros)

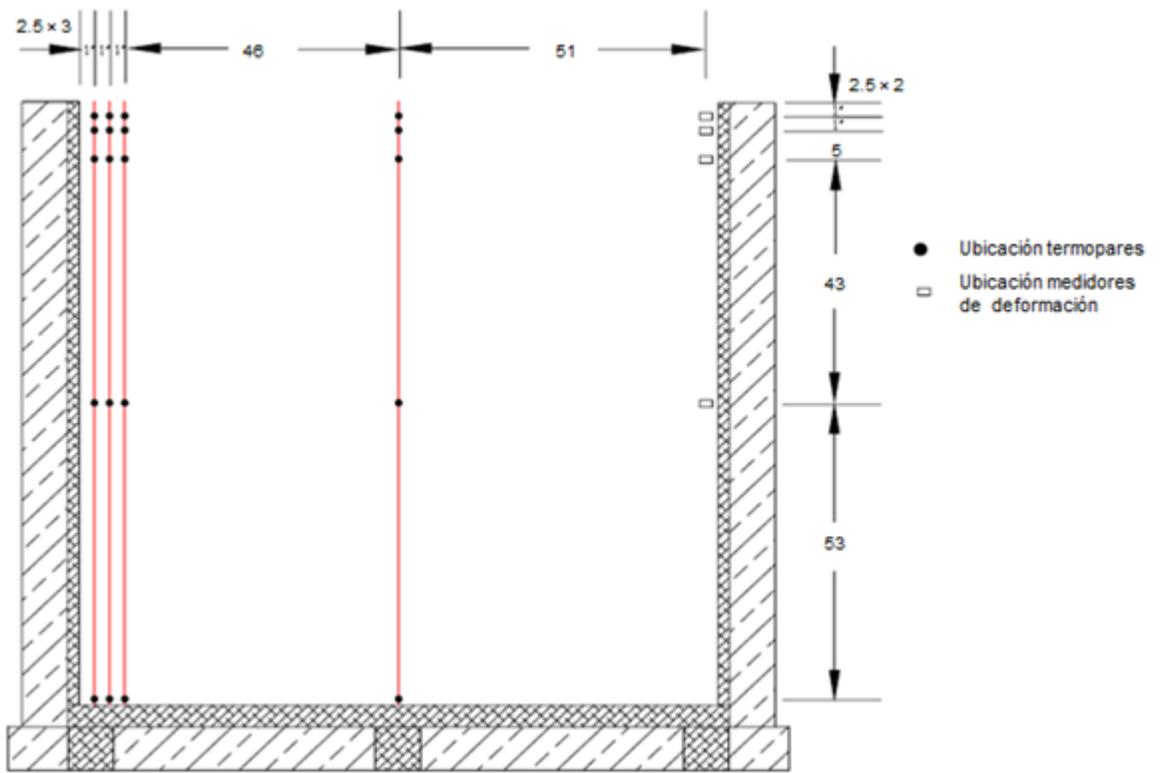


Figura C-5: Vista en corte del cubo con la ubicación de los sensores de temperatura y deformación (Unidades en centímetros)

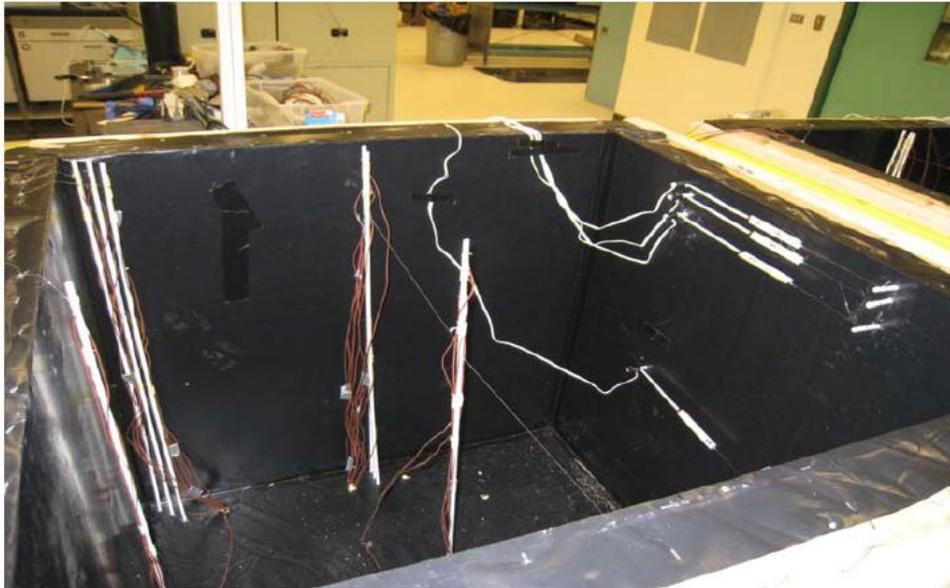


Figura C-6: Distribución de la instrumentación en el bloque experimental

- **Perfiles de temperatura**

Las ubicaciones de los termopares en el bloque fueron escogidas para capturar la diferencia de temperatura entre el centro del cubo y la superficie expuesta al entorno, así como para monitorear el gradiente de temperatura cerca de la superficie para determinar si existe riesgo de fisuración térmica del hormigón. Los termopares de los lados y la parte inferior del bloque fueron colocados para validar la efectividad de la aislación y por extensión, las condiciones de bordes térmicas que serán usadas en el modelo computacional.

- **Determinación de las propiedades del hormigón**

A continuación se describen los métodos experimentales utilizados por el trabajo mencionado para determinar los valores de las distintas propiedades del hormigón. Los resultados de estas pruebas son los parámetros de entrada ingresados en el modelo de elementos finitos.

- a. Calor de hidratación**

La determinación del calor generado durante la hidratación del hormigón la propiedad básica que determina su comportamiento térmico a edades tempranas. En el trabajo estudiado utilizaron el método estándar de calorimetría isotérmica (Método de ensayo estándar ASTM C1702).

Calorimetría de conducción isotérmica

La calorimetría de conducción isotérmica es un método de prueba muy útil para la determinación del calor generado a partir de la hidratación de un material cementoso a través del tiempo. Provee una medición directa del calor generado por el espécimen, evitando errores asociados con los métodos que utilizan análisis químicos. Los datos obtenidos del sensor de flujo de calor en el calorímetro es una señal de voltaje (del orden de mili-voltios) que es proporcional a la energía térmica de la muestra. La integral de la energía térmica sobre el tiempo de la prueba es el calor de hidratación del espécimen a la edad correspondiente.

Para esa investigación, se extrajeron muestras relativamente pequeñas (6 gramos) del material cementoso utilizado en el bloque de hormigón masivo, las cuales luego fueron ensayadas en el calorímetro isotérmico. Las muestras fueron ensayadas a temperaturas de 15°C, 23°C, 38°C y 49°C. Las curvas de energía obtenidas en el ensayo para cada temperatura fueron representadas como incremento de energía versus tiempo, como se presenta en la Figura C-7.

Este gráfico muestra una tendencia del aumento de energía con respecto al tiempo, siendo significativamente mayor a medida que la temperatura del ensayo se incrementa. Sin embargo la Figura C-8 indica que a pesar de la temperatura de ensayo, los valores del aumento de energía respecto a la edad equivalente son virtualmente iguales. Por lo tanto, desde esta observación se puede obtener la relación entre el aumento de energía y el aumento de edad equivalente, la cual luego puede ser usada como parámetro de entrada en el modelo de elementos finitos.

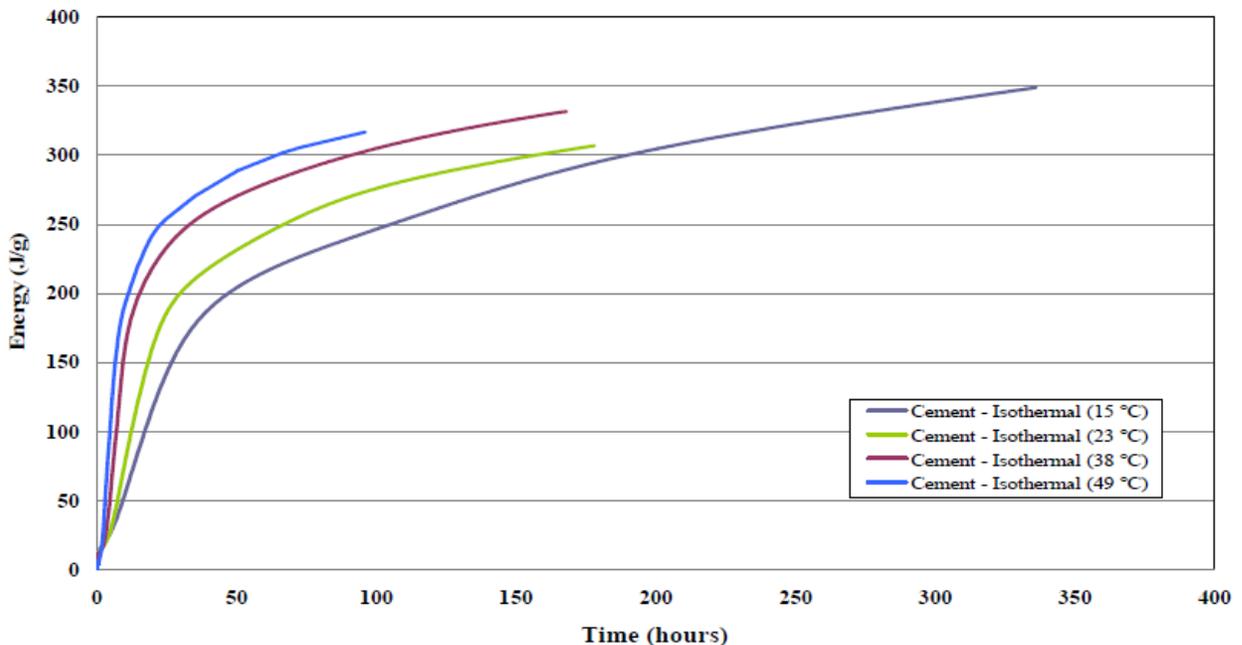


Figura C-7: Curvas calorimétricas isotérmicas resultantes representando energía versus tiempo

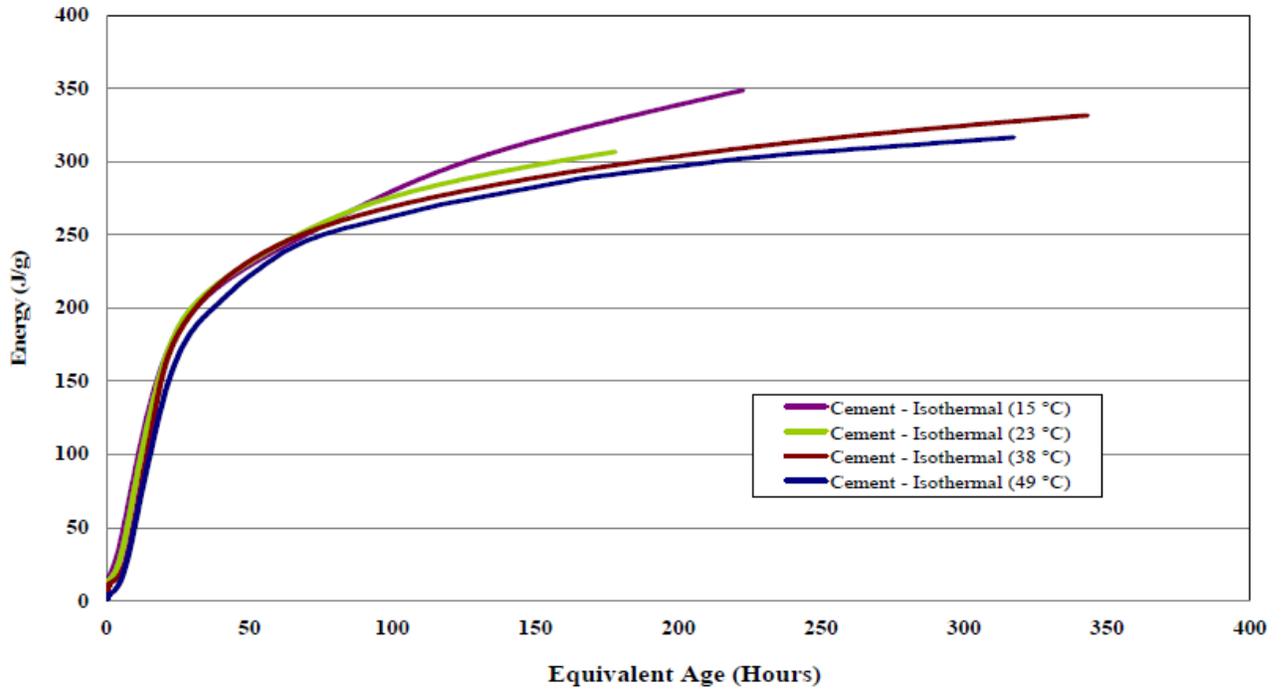


Figura C-8: Curvas calorimétricas isotérmicas resultantes representando energía versus madurez

b. Capacidad de calor específico

La capacidad de calor específico, o simplemente calor específico, es la cantidad de calor que hay que suministrar a una unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en un grado (Kelvin o Celsius).

La prueba de calor específico que se realizó en el trabajo mencionado fue realizada con un calorímetro similar al aparato usado por De Schutter y Taerwe (1995), mostrado en la Figura C-9. Contiene un baño interior de aceite y un baño exterior de glicol de polipropileno. Estos líquidos fueron escogidos por su habilidad de transferir calor rápidamente.

Un flujo conocido de energía térmica (E_1) es suministrado al baño interior que contiene aceite y como consecuencia se observa un aumento de temperatura ($\Delta\theta_1$). La paleta para revolver se usa para distribuir el calor uniformemente a través del baño interior. La muestra de hormigón ensayada es luego añadida al baño de aceite y nuevamente se suministra energía (E_2) al baño. El cambio de temperatura resultante de la muestra ensayada ($\Delta\theta_2$) es la temperatura final menos la temperatura inicial de la muestra ensayada al momento de introducirlo en el baño. El calor específico de la muestra es luego calculado usando la Ecuación (C.1).

$$C = \frac{1}{m_c} \left(\frac{E_2}{\Delta\theta_2} - \frac{E_1}{\Delta\theta_1} \right) \quad (C.1)$$

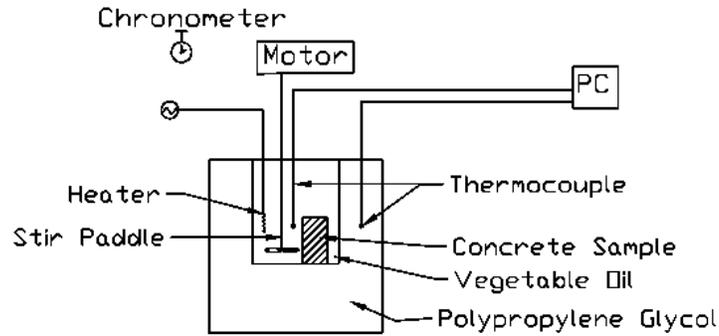


Figura C-9: Esquema del calorímetro de calor específico

c. Resistencia a tracción por hendimiento

El ensayo de resistencia a tracción por hendimiento fue llevado a cabo en cilindros de 4x8 pulgadas (10.16 x 20.32 cm) de acuerdo a la norma ASTM C496. El montaje de la prueba se muestra en la Figura C-10. Los ensayos se llevaron a cabo a las edades de 1, 2, 3, 7, 14 y 28 días y los resultados se muestran en la Figura C-11 donde se observa el desarrollo de la resistencia a tracción por hendimiento del hormigón a través del tiempo.

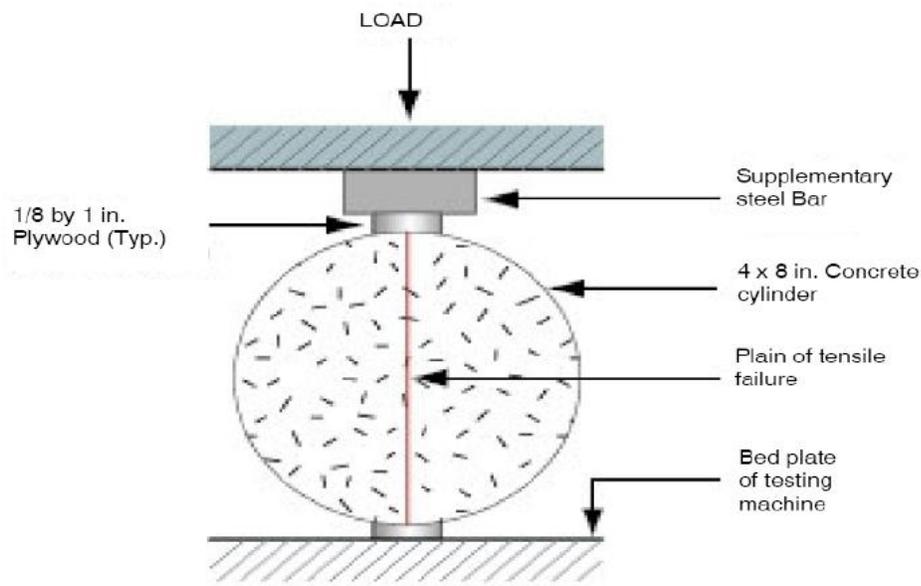


Figura C-10: Disposición esquemática del test ASTM C496 de resistencia a tracción por hendimiento

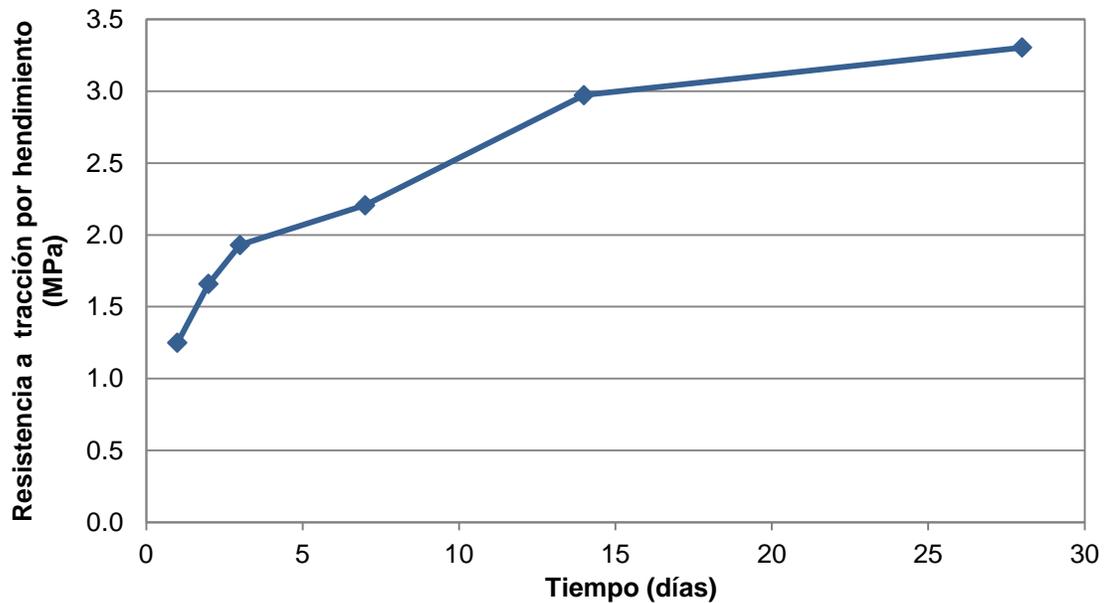


Figura C-11: Resistencia a tracción por hendimiento del hormigón utilizado.

d. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

El módulo de elasticidad a compresión y el coeficiente de Poisson del hormigón fueron determinados en dicho estudio usando método de ensayo estándar ASTM C469. La tasa de desarrollo del módulo de elasticidad en el tiempo, obtenida del testeo a compresión de los cilindros de 10.16 × 20.32 cm, se muestra en la Figura C-12.

La relación esfuerzo-deformación obtenida del centro de la tercera sección de las vigas durante los ensayos de flexión descritos previamente, fue usada para calcular el módulo de elasticidad de tracción de la mezcla. Esta relación se muestra en la Figura C-13. Esto fue realizado porque la fisuración en el hormigón masivo es principalmente un fenómeno debido a la tracción, lo cual es también el modo de falla de las vigas sometidas a la prueba de flexión.

El módulo de compresión, el cual es el mayor de los dos tipos de módulos de elasticidad, fue usado en el análisis de elementos finitos por ser la descripción más conservadora de la relación esfuerzo-deformación del hormigón.

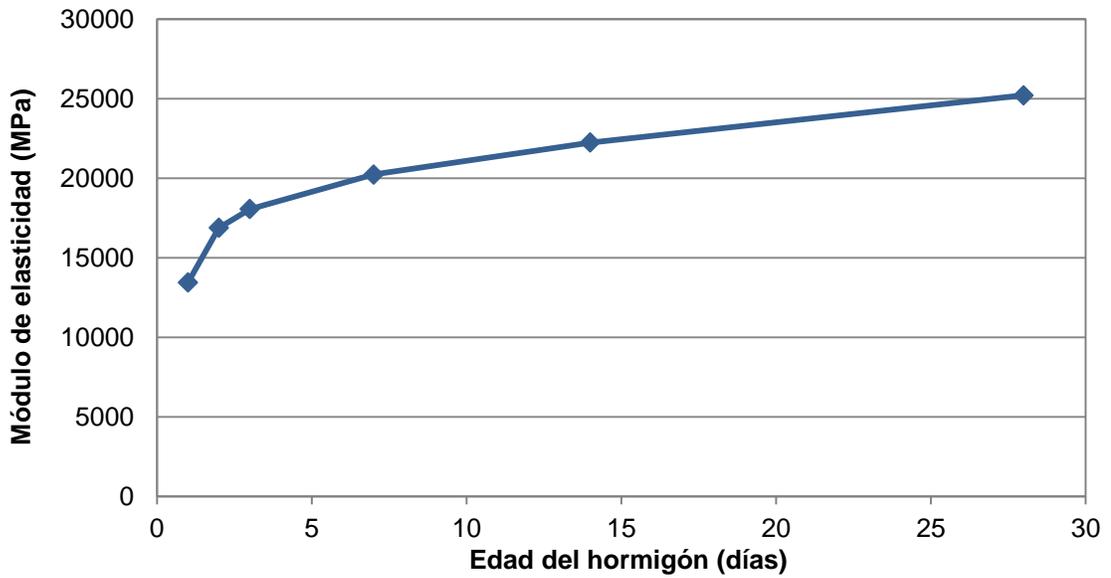


Figura C-12: Módulo de elasticidad de compresión versus edad del hormigón

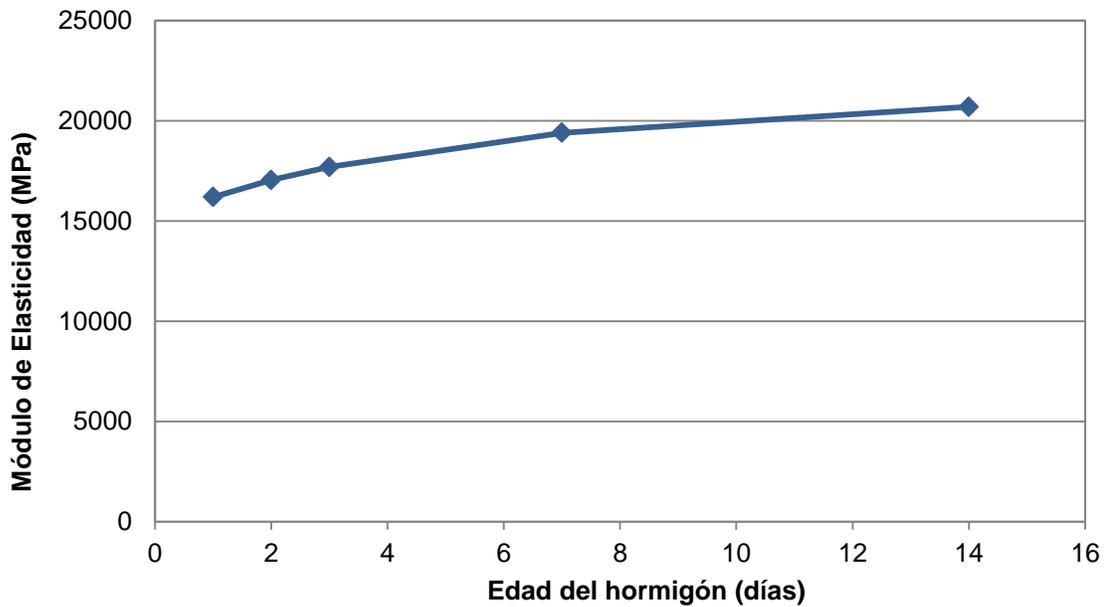


Figura C-13: Módulo de elasticidad a tracción por hendimiento versus edad del hormigón

e. Coeficiente de expansión térmica

Los resultados de la prueba para determinar el coeficiente de expansión térmica del hormigón realizada por la investigación que sirve de base para este estudio se muestran en la Figura C-14. Esta propiedad se mantuvo constante durante los primeros 7 días, lo cual es la duración del análisis del modelo de elementos finitos. Por lo tanto

se decidió que un valor de entrada constante para el coeficiente de expansión térmica para el modelo del bloque era suficiente para el análisis.

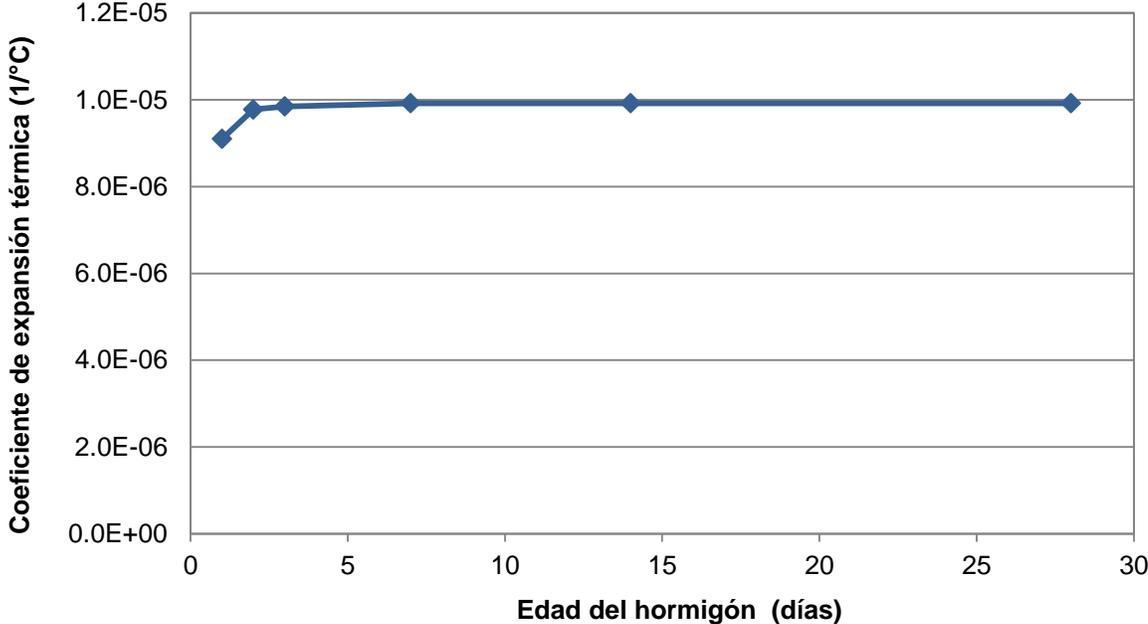


Figura C-14: Coeficiente de expansión térmica versus edad del hormigón

ANEXO D Aumento de temperatura adiabática como flujo de calor de cuerpo

La generación de calor y el aumento de temperatura en una muestra de hormigón, curada bajo condiciones adiabáticas donde no hay transferencia de calor al ambiente, pueden ser determinados por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_H}{\rho \cdot c_p} = \frac{\partial H}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho \cdot c_p} \right) \quad (D.1)$$

Donde:

- T : Temperatura del hormigón ($^{\circ}C$)
- ρ : Densidad del hormigón (kg/m^3)
- c_p : Calor específico del hormigón ($J/kg \cdot ^{\circ}C$)
- Q_H : Tasa de generación de calor ($J/día \cdot m^3$)
- H : Calor de hidratación del hormigón (J/m^3)

De la ecuación anterior, el flujo de calor de cuerpo $\partial H/\partial t$ puede ser calculado como:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} (\rho \cdot c_p) \quad (D.2)$$

Usando el $\partial H/\partial t$ de la ecuación (D.2), se calcula el flujo de calor de cuerpo y luego es ingresado en ABAQUS en forma tabular, dependiente del tiempo. La transformación paso a paso, se muestra a continuación.

Dada la densidad, calor específico y aumento de temperatura adiabática en función del tiempo, el flujo de calor de cuerpo puede ser calculado de la siguiente manera.

1. Primero se calcula el aumento de temperatura adiabática para cada intervalo de tiempo, obteniendo como resultado la tercera columna de la Tabla D-1.
2. Se calcula el calor de hidratación:

$$\text{Calor de hidratación} = \text{Aumento de } T^{\circ} \text{ adiabática} \times \text{Densidad} \\ \times \text{Calor específico}$$

3. Calcular la diferencia de tiempo entre los períodos de tiempo, obteniendo así la quinta columna. En este caso la diferencia de tiempo entre períodos es constante.

4. Finalmente calcular el flujo de calor de cuerpo:

$$\text{Flujo de calor de cuerpo} = \frac{\text{Calor de hidratación}}{\text{Diferencia de tiempo}}$$

5. Por último se transforma el flujo de calor de cuerpo de $J/m^3 \cdot \text{día}$ a $J/m^3 \cdot s$ para que quede de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades para ingresar estos valores a ABAQUS.

La tabla y gráfico que se muestran a continuación están confeccionados con los valores experimentales de temperatura adiabática del ensayo de calorimetría isotérmica realizado por Lawrence (2009). El resultado del flujo de calor de cuerpo obtenido fue ingresado como dato de entrada en el análisis térmico realizado en ABAQUS.

Tabla D-1: Flujo de calor de cuerpo del hormigón

Tiempo (días)	Temperatura adiabática (°C)	Aumento T° adiabática (°C)	Calor de hidratación (J/m ³)	Diferencia de tiempo (días)	Flujo de calor de cuerpo (J/m ³ ·día)	Flujo de calor de cuerpo (J/m ³ ·seg)
0.00	23	0.0	0	0.000	0	0.00
0.42	61	38.0	101669703	0.417	244007287	2824.16
0.83	71	10.0	26755185	0.417	64212444	743.20
1.25	77	6.0	16053111	0.417	38527466	445.92
1.67	80	3.0	8026556	0.417	19263733	222.96
2.08	82	2.0	5351037	0.417	12842489	148.64
2.50	84	2.0	5351037	0.417	12842489	148.64
2.92	86	2.0	5351037	0.417	12842489	148.64
3.33	87	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32
3.75	89	2.0	5351037	0.417	12842489	148.64
4.17	90	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32
4.58	91	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32
5.00	92	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32
5.42	93	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32
5.83	94	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32
6.25	95	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32
6.67	96	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32
7.08	97	1.0	2675519	0.417	6421244	74.32

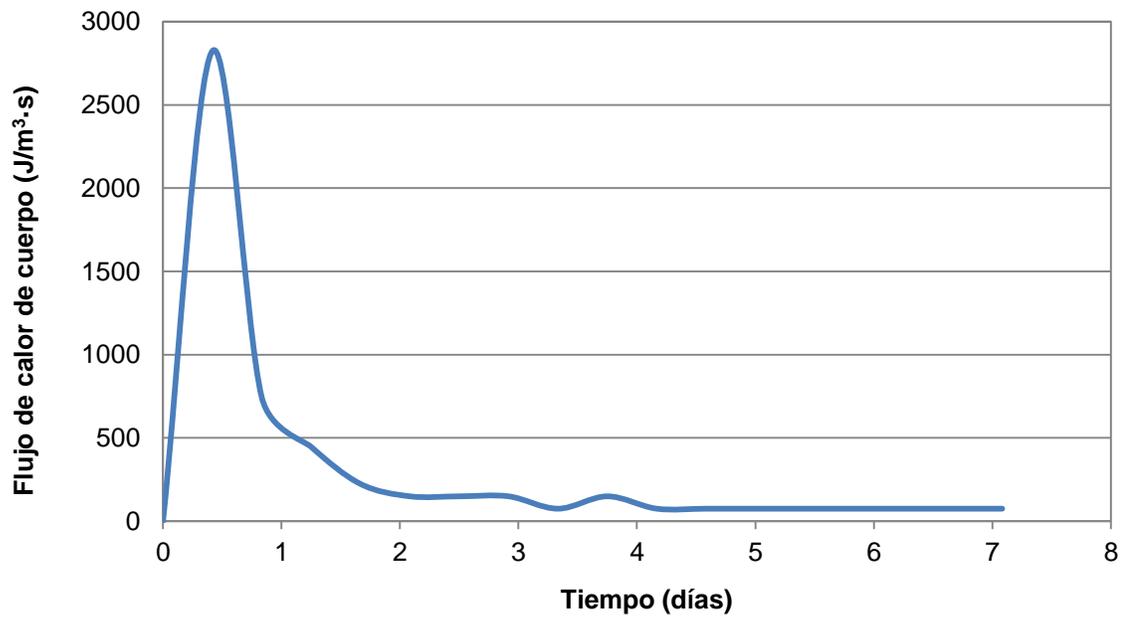


Figura D-1: Flujo de calor de cuerpo en el tiempo