



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

EVALUACIÓN DE MÉTODOS PREDICTIVOS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE
ELEMENTOS MASIVOS DE HORMIGÓN CONFECCIONADOS CON CEMENTOS DE
ORIGEN NACIONAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DANIELA PAZ LARA SAN MARTÍN

PROFESOR GUÍA:
DAVID SILVA SAAVEDRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: DANIELA PAZ LARA SAN MARTÍN
FECHA: 01 DE AGOSTO DE 2018
PROFESOR GUÍA: DAVID SILVA SAAVEDRA

EVALUACIÓN DE MÉTODOS PREDICTIVOS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE ELEMENTOS MASIVOS DE HORMIGÓN CONFECCIONADOS CON CEMENTOS DE ORIGEN NACIONAL

Los elementos masivos de hormigón se caracterizan por su particular comportamiento térmico en el cual la masividad del elemento y la baja conductividad térmica del material inducen una baja tasa de disipación del calor generado durante la hidratación del cemento, lo que provoca un excesivo aumento de temperatura en su interior.

Lo anterior, da origen a diferenciales de temperatura entre la superficie expuesta a las condiciones ambientales y el centro del elemento, los cuales pueden alcanzar una magnitud tal que induzcan estados tensionales a temprana edad del hormigón, que pueden resultar en agrietamientos que perjudiquen la funcionalidad y serviciabilidad del elemento. Bajo el mismo contexto, el centro del elemento es el punto que alcanza la mayor temperatura en la etapa de hidratación del cemento, ya que en ese lugar las reacciones se desarrollan bajo un estado semi-adiabático. Dicha temperatura puede alcanzar una magnitud tal que promueva la formación de etringita tardía, un compuesto potencialmente expansivo que puede provocar fisuras al interior del elemento.

En la actualidad, existen métodos que permiten estimar el desarrollo de temperatura al interior de un elemento masivo de hormigón. Sin embargo, muchos de estos métodos se basan en resultados empíricos obtenidos de mezclas confeccionadas con cementos que difieren en su composición y propiedades con los que hoy en día se emplean en Chile.

El objetivo de este trabajo es proponer un modelo característico que permita estimar la respuesta térmica del hormigón masivo confeccionado con cementos de origen nacional, particularmente aquellos con adiciones de puzolanas.

La metodología de trabajo consiste en evaluar las estimaciones del comportamiento térmico dadas por 4 métodos predictivos existentes, y contrastarlas con resultados empíricos obtenidos de bloques de 0,6 m de arista confeccionados en laboratorio, a los cuales se les monitoreó su temperatura interna durante 7 días.

Al analizar los resultados obtenidos, se identifica la incidencia del tipo y contenido de cemento en el comportamiento térmico de hormigones confeccionados con cementos puzolánicos. Además, se evalúa el nivel de ajuste de los métodos evaluados, proponiendo aquel que presenta estimaciones dentro de un rango aceptable para ser usado como un método característico de estimación del desarrollo térmico de hormigones masivos confeccionados con cementos puzolánicos chilenos. A modo de síntesis, como resultado de este trabajo se propone el método denominado CTK para la estimación de desarrollo de temperatura en hormigones masivos confeccionados con cementos nacionales. El modelo propuesto presentó, en la mayoría de los casos estudiados, desviaciones menores a 15% respecto a los valores experimentales, rango considerado aceptable para este trabajo.

A mi familia, la humana y la
perruna.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer, en primer lugar, a mis padres por el incondicional apoyo que me han brindado y la infinita paciencia que han tenido durante todo mi proceso de formación profesional. Sin ellos, esta travesía se habría hecho imposible. Son un pilar fundamental en mi vida. Los amo. Ahora se viene la compensación de todo lo postergado (prepara las maletas, madre).

Un especial agradecimiento a Ignacia, mi pareja, quien me ha entregado valiosos aprendizajes en el camino, y que sin su constante apoyo este trabajo no habría visto la luz. Tú me haces sentir que todo es posible, y que sólo se requiere la voluntad para lograr los objetivos propuestos, lo demás se va viendo en el camino. Durante estos casi 5 años juntas (saltito incluido) he aprendido a vivir mi vida sin temores irracionales, siendo auténtica y queriéndome a mí por sobre todas las cosas. Sin duda eres mi Pepe Grillo. (¡Recuerda, se vienen cosas buenas!)

Durante el desarrollo de este trabajo, en particular en su fase experimental, tuve la suerte de conocer y contar con el apoyo de personas como Don Luis Pulgar y Matías Figueroa de IDIEM, que siempre prestaron todo el soporte posible para poder llevar a cabo la confección de mis “pequeños” cubos. Infinitas gracias por la paciencia.

A los chiquillos del Laboratorio de Hormigones de Prueba de IDIEM, gracias por enseñarme cómo funcionan las cosas en un laboratorio de ese calibre, y lo importante que es compartir su realidad para el día de mañana enfrentar el mundo laboral con los pies bien puestos en la tierra. Ustedes son fundamentales para el funcionamiento del laboratorio. Gracias a todos los que de alguna u otra forma participaron en el proceso (Felipe, Eric, Bastián, Jorge, JP, José, Gonzalo).

Un agradecimiento también a la gente de Melón, en particular a Samuel Varas, quien facilitó el cemento para realizar la gran mayoría de los hormigones en el laboratorio, incluso apoyando con la logística de su traslado desde la planta al laboratorio.

A los funcionarios del Laboratorio de Incendios de IDIEM quienes facilitaron los medios necesarios para un seguro traslado de los cubos en Cerrillos y de la División de Hormigón Control de IDIEM, en particular a Daniel Carvajal y Carlos Valenzuela, por la ayuda en la realización de los ensayos sobre las probetas del estudio.

Especialmente, quisiera agradecer a los profesores Federico Delfín y Jacques Bornand, por entregar las guías necesarias para orientar el trabajo hacia sus objetivos en los momentos decisivos.

A mis amigos de la universidad, los Champis, gracias por apadrinarme en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, lugar donde redacté gran parte de este trabajo y sufrí gran parte de la carrera.

Por último, un tremendo agradecimiento a Kati, mi gran compañera de Ingeniería Civil que me apoyó en el eterno proceso de confección de los 12 cubos de hormigón, sin duda, una ayuda fundamental para el desarrollo de este trabajo. Jamás olvidaré los momentos “¿En qué minuto?!”.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	24
1.1. Antecedentes	24
1.2. Motivación	24
1.3. Objetivos del estudio	25
1.3.1. Objetivos generales.....	25
1.3.2. Objetivos específicos.....	25
1.4. Alcances.....	25
1.5. Metodología.....	26
1.5.1. Marco conceptual	26
1.5.2. Revisión de métodos empírico-teóricos	26
1.5.3. Trabajo experimental.....	26
1.5.4. Evaluación de métodos predictivos	26
1.5.5. Análisis comparativo	27
1.5.6. Análisis de sensibilidad	27
1.5.7. Conclusiones.....	27
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL.....	28
2.1. Calor de hidratación del cemento	28
2.2. Factores que afectan el calor de hidratación	32
2.2.1. Composición química del cemento	32
2.2.2. Finura del cemento	33
2.2.3. Relación agua/cemento.....	34
2.3. Tipos de cemento	35
2.3.1. Cementos Portland.....	36
2.3.2. Cementos puzolánicos	36
2.3.3. Cementos con adición de cenizas volantes.....	37
2.3.4. Cementos siderúrgicos.....	37
2.3.5. Cementos con agregado tipo A.....	38
2.3.6. Clasificación	39
2.4. Hormigón masivo	41
2.4.1. Definición	41
2.4.2. Aplicaciones	42
2.4.3. Diferencias con respecto al hormigón estructural	42
2.5. Comportamiento térmico y tensional del hormigón masivo.....	43
2.5.1. Gradientes térmicos	43
2.5.2. Cambio de volumen.....	44
2.5.3. Restricciones.....	46
2.5.4. Fisuración	46
2.6. Factores que inciden en el comportamiento térmico del hormigón.....	48
2.6.1. Composición del cemento	48

2.6.2.	Temperatura de colocación.....	49
2.6.3.	Condiciones ambientales	50
CAPÍTULO 3: PATOLOGÍAS EN HORMIGÓN MASIVO – CASOS HISTÓRICOS		52
3.1.	Represa Fontana, Estado Unidos, 1942	52
3.2.	Represa El Altazar, España, 1968.....	54
3.3.	Puente Deep Creek, Australia, 1981	55
3.4.	Fundaciones masivas (pile caps) de edificios, Brasil, 2016	56
CAPÍTULO 4: MÉTODOS PREDICTIVOS DE DESARROLLO DE TEMPERATURA		58
4.1.	Método PCA	58
4.2.	Método Gráfico.....	59
4.3.	Método de Schmidt.....	66
4.4.	Método Concrete Temperature & Cracking Risk®	69
4.5.	Conclusiones del capítulo	73
CAPÍTULO 5: TRABAJO EXPERIMENTAL		74
5.1.	Confección de bloques.....	74
5.1.1.	Procedimiento.....	74
5.1.2.	Características del bloque.....	75
5.1.3.	Materiales empleados en el hormigón	78
5.1.4.	Dosificación de hormigones	80
5.1.5.	Instrumentación del bloque	80
5.1.6.	Programa experimental.....	81
5.2.	Caracterización de materiales	83
5.2.1.	Cemento.....	83
5.2.2.	Hormigón.....	86
5.2.3.	Moldaje y aislación.....	95
5.3.	Resultados de temperatura en bloques.....	96
5.4.	Análisis de resultados del trabajo experimental.....	105
5.5.	Conclusiones del capítulo	110
CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DE MÉTODOS PREDICTIVOS		112
6.1.	Método PCA	112
6.1.1.	Consideraciones.....	112
6.1.2.	Parámetros de entrada.....	112
6.1.3.	Resultados.....	113
6.2.	Método Gráfico.....	113
6.2.1.	Consideraciones.....	113
6.2.2.	Parámetros de entrada.....	114
6.2.3.	Resultados.....	115
6.3.	Método de Schmidt.....	117
6.3.1.	Consideraciones.....	117

6.3.2.	Parámetros de entrada.....	118
6.3.3.	Resultados.....	121
6.4.	Método Concrete Temperature & Cracking Risk®	123
6.4.1.	Consideraciones.....	123
6.4.2.	Parámetros de entrada.....	124
6.4.3.	Resultados.....	126
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS		129
7.1.	Desarrollo de temperatura en el núcleo TN	130
7.1.1.	Temperatura máxima en el núcleo TN, max	136
7.1.2.	Tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo tTN, max	137
7.2.	Desarrollo de diferencial de temperatura ΔT5	139
7.2.1.	Diferencial máximo de temperatura ΔT5, max	145
7.2.2.	Tiempo al que se alcanza el diferencial máximo de temperatura.....	146
7.3.	Análisis por modelo predictivo.....	147
7.3.1.	Método PCA.....	147
7.3.2.	Método Gráfico	148
7.3.3.	Método de Schmidt.....	156
7.3.4.	Método CTK.....	160
CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS EN MÉTODO PROPUESTO 165		
8.1.	Coefficiente de convección, U	167
8.2.	Calor específico del hormigón, ce, h	169
8.3.	Dimensiones del elemento, L, W, H	171
8.4.	Análisis de sensibilidad en TN, max	173
8.5.	Análisis de sensibilidad en ΔT5, max	174
8.6.	Análisis de sensibilidad en tTN, max y tΔT5, max	175
8.7.	Influencia de la temperatura ambiente en el modelo	175
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES		178
9.1.	Conclusiones generales.....	178
9.1.1.	Comportamiento térmico del hormigón confeccionado con cementos de origen nacional 178	
9.1.2.	Influencia del contenido de cemento	179
9.1.3.	Influencia del tipo de cemento.....	180
9.1.4.	Validez de los modelos predictivos evaluados	181
9.1.5.	Modelo propuesto.....	183
9.2.	Recomendaciones y continuidad de estudios.....	183
GLOSARIO.....		185
BIBLIOGRAFÍA		187

ANEXO A	Curvas resultantes del trabajo experimental.....	190
ANEXO B	Curvas resultantes de la evaluación del método de Schmidt	202
ANEXO C	Interfaz y curvas resultantes de la evaluación del método CTK.....	208

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: componentes del clínker y sus características (Bornand, 2015) y (Bianchi, 1991).....	29
Tabla 2.2: finura y calor de hidratación de los tipos de cemento Portland según ASTM C 150 (ACI 207.2R, 2007)	33
Tabla 2.3: efecto de la relación a/c sobre los calores de hidratación en distintos tipos de cemento ASTM (cal/g) (Bianchi, 1991).....	35
Tabla 2.4: composición de un cemento Portland promedio (Bornand, 2015).....	36
Tabla 2.5: composición química típica de cementos Portland según ASTM C150 (ASTM C-150, 2007).....	36
Tabla 2.6: clasificación de cementos hidráulicos según ASTM C1157 (ASTM C-1157, 2003) ..	39
Tabla 2.7: clasificación cemento Portland según ASTM C150 (ASTM C-150, 2007).....	39
Tabla 2.8: clasificación de cementos con adiciones según ASTM C595 (ASTM C-595, 2003) ..	39
Tabla 2.9: requisitos químicos por clase de cemento según NCh 148 Of.68 (NCh 148, 1968)....	40
Tabla 2.10: grado de cementos según resistencia (NCh. 148 Of.68)	40
Tabla 2.11: conductividad térmica de materiales	43
Tabla 4.1: resumen comparativo de los métodos predictivos revisados.....	73
Tabla 5.1: dosificaciones consideradas en los bloques.....	74
Tabla 5.2: denominación de bloques según dosificación y tipo de cemento.....	74
Tabla 5.3: descripción de cementos empleados en la confección de bloques	78
Tabla 5.4: características de áridos empleados en hormigones	79
Tabla 5.5: dosificaciones de mezclas para confección de bloques.....	80
Tabla 5.6: bitácora de confección de bloques.....	81
Tabla 5.7: caracterización de cementos empleados en desarrollo experimental	84
Tabla 5.8: calor de hidratación por edad	85
Tabla 5.9: caracterización general de mezclas de hormigón confeccionadas	86
Tabla 5.10: coeficiente de difusión térmica de los hormigones a los 28 días	89
Tabla 5.11: calor específico de los componentes del hormigón según publicación.....	89
Tabla 5.12: calor específico de hormigones	90
Tabla 5.13: conductividad térmica de hormigones.....	91
Tabla 5.14: propiedades térmicas de encofrado y aislación (Lawrence, 2009).....	96

Tabla 5.15: principales resultados de monitoreo térmico de bloques según tipo de hormigón.....	98
Tabla 6.1: valores de parámetros de entrada considerados para la evaluación del método Gráfico	112
Tabla 6.2: resultados obtenidos en la evaluación del método PCA	113
Tabla 6.3: valores de parámetros de entrada considerados para la evaluación del método Gráfico	114
Tabla 6.4: resultados obtenidos en la evaluación de la ALTERNATIVA 1a del método gráfico.	115
Tabla 6.5: resultados obtenidos en la evaluación de la ALTERNATIVA 1b del método gráfico	116
Tabla 6.6: resultados obtenidos en la evaluación de la ALTERNATIVA 2a del método gráfico.	116
Tabla 6.7: resultados obtenidos en la evaluación de la ALTERNATIVA 2b del método gráfico	117
Tabla 6.8: valores de parámetros de entrada considerados para la evaluación del método de Schmidt	118
Tabla 6.9: paso del tiempo y números de pasos considerados en la evaluación del método de Schmidt.....	119
Tabla 6.10: desarrollo de los primeros 4 pasos del método de Schmidt	120
Tabla 6.11: resultados obtenidos en la evaluación del método de Schmidt	123
Tabla 6.12: valores de parámetros de entrada considerados para la evaluación del método CTK	124
Tabla 6.13: resultados obtenidos en la evaluación del método CTK	128
Tabla 7.1: comparación entre temperaturas máximas del núcleo estimadas en modelos predictivos con la obtenida experimentalmente para cada hormigón	136
Tabla 7.2: comparación entre tiempos a los que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo estimados en modelos predictivos con la obtenida experimentalmente para cada hormigón	138
Tabla 7.3: comparación entre máximos diferenciales de temperatura estimados en modelos predictivos con el obtenido experimentalmente para cada hormigón	145
Tabla 7.4: comparación entre tiempos a los que se alcanza el máximo diferencial de temperatura en modelos predictivos con el obtenido experimentalmente para cada hormigón	146
Tabla 7.5: comparación entre valores obtenidos por método PCA y resultados experimentales	148
Tabla 7.6: comparación entre valores obtenidos por Alternativa 1a del método Gráfico y resultados experimentales.....	153
Tabla 7.7: comparación entre valores obtenidos por Alternativa 1b del método Gráfico y resultados experimentales.....	154

Tabla 7.8: comparación entre valores obtenidos por Alternativa 2a del método Gráfico y resultados experimentales.....	155
Tabla 7.9: comparación entre valores obtenidos por Alternativa 2b del método Gráfico y resultados experimentales.....	156
Tabla 7.10: comparación entre valores obtenidos por método de Schmidt y experimentales.....	159
Tabla 7.11: comparación entre valores obtenidos por método CTK y experimentales.....	163
Tabla 8.1: datos de entrada del caso base empleado para el análisis de sensibilidad.....	165
Tabla 8.2: valores a evaluar en el análisis de sensibilidad	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: grado de hidratación en compuestos de cemento Portland (Tennis & Jennings, 2000)	30
Figura 2.2: esquema de las etapas que se desarrollan en la reacción de hidratación del C3S (Copeland, Kantro, & Verbeck, 1960)	31
Figura 2.3: efecto de la finura del cemento en la generación de calor en una pasta de cemento curada a 23,8°C (ACI 207.2R, 2007).....	34
Figura 2.4: Desarrollo de temperatura en el tiempo en el núcleo de un elemento de hormigón masivo (Delfín & Figueroa, 2009).....	44
Figura 2.5: Esquema de los cambios de volumen que experimenta un elemento masivo debido a los gradientes de temperatura.	45
Figura 2.6: diagrama de tensiones al interior del hormigón masivo (ACI 207.2R, 2007).	46
Figura 2.7: esquema que resume el comportamiento térmico y tensional del hormigón masivo (Bornand, 2015).....	47
Figura 2.8: (1) Fisuraciones superficiales de baja profundidad debidas a las tensiones inducidas por el gradiente térmico y las restricciones (internas y externas) del elemento. (2) Fisuraciones en el núcleo del elemento debidas al esfuerzo de compresión inducido por los gradientes térmicos, la restricción interna y/o la formación de etringita tardía.....	48
Figura 2.9: aumento de temperatura adiabática por encima de la temperatura inicial de un hormigón masivo que contiene 223 kg/m ³ de cemento, para los distintos tipos de cemento Portland según ASTM (ACI 207.2R, 2007).....	49
Figura 2.10: efecto de la temperatura de colocación en el aumento de temperatura adiabática de un hormigón masivo que contiene 223 kg/m ³ de cemento Portland (tipo I) (ACI 207.2R, 2007). .	50
Figura 3.1: represa Fontana, Carolina del Norte, Estado Unidos	52
Figura 3.2: esquema de la fisura detectada en la presa Fontana.....	53
Figura 3.3: represa El Altazar, comunidad de Madrid, España.....	54
Figura 4.1: efecto de la temperatura de colocación y de la relación volumen/superficie expuesta en la edad a la que se alcanza la máxima temperatura para un hormigón confeccionado con cemento Portland (tipo I) (ACI 207.2R, 2007)	60
Figura 4.2: flujo de calor entre el aire y el hormigón por las diferencias entre la temperatura de colocación y la temperatura ambiente (ACI 207.2R, 2007).....	61
Figura 4.3: aumento de temperatura en elementos de hormigón que contienen 223 kg/m ³ de cemento Portland (ASTM tipo I) para diferentes temperaturas de colocación (ACI 207.2R, 2007)	62

Figura 4.4: incremento de temperatura de un hormigón masivo que contiene 223 kg/m ³ para 4 tipos de cementos ASTM (ACI 207.2R, 2007)	63
Figura 4.5: tasa de generación de calor en función de la finura según Wagner (ASTM C115) para una pasta de cemento curada a 23,8°C (ACI 207.2R, 2007)	64
Figura 4.6: desarrollo de temperatura al interior de un elemento masivo de hormigón modelado con el método CTK	73
Figura 5.1: molde bloque (vista transversal y en planta).....	76
Figura 5.2: molde construido en laboratorio para confeccionar los bloques.....	76
Figura 5.3: ubicación de sondas y termocuplas (vista transversal y en planta).....	77
Figura 5.4: registro fotográfico del molde y la instalación de termocuplas en las sondas	77
Figura 5.5: ajuste granulométrico de áridos según NCh. 163 Of. 79	79
Figura 5.6: termocupla utilizada en desarrollo experimental	80
Figura 5.7: data logger empleado en desarrollo experimental.....	81
Figura 5.8: registro fotográfico del proceso de confección de uno de los bloques experimentales	82
Figura 5.9: registro fotográfico de bloque confeccionado en laboratorio	82
Figura 5.10: curvas del desarrollo del calor de hidratación para los 3 tipos de cementos estudiados	85
Figura 5.11: desarrollo de resistencia a la compresión en el tiempo de los hormigones confeccionados con cemento ME-EX	86
Figura 5.12: desarrollo de resistencia a la compresión en el tiempo de los hormigones confeccionados con cemento ME-PL.....	87
Figura 5.13: desarrollo de resistencia a la compresión en el tiempo de los hormigones confeccionados con cemento ME-ES	87
Figura 5.14: coeficiente de difusión térmica por edad para hormigones confeccionados con cemento ME-ES.....	88
Figura 5.15: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones confeccionados con cemento ME-EX	92
Figura 5.16: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones confeccionados con cemento ME-PL.....	93
Figura 5.17: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones confeccionados con cemento ME-ES	93

Figura 5.18: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones con contenido de cemento igual a 600 kg/m ³	94
Figura 5.19: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones con contenido de cemento igual a 500 kg/m ³	94
Figura 5.20: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones con contenido de cemento igual a 400 kg/m ³	95
Figura 5.21: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones con contenido de cemento igual a 300 kg/m ³	95
Figura 5.22: registro de temperatura de termocuplas instaladas en Sonda 1 del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500.....	96
Figura 5.23: registro de temperatura de termocuplas instaladas en Sonda 2 del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500.....	97
Figura 5.24: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques confeccionados con cemento ME-EX	98
Figura 5.25: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques confeccionados con cemento ME-PL	99
Figura 5.26: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques confeccionados con cemento ME-ES	99
Figura 5.27: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques que contienen 600 kg/m ³	100
Figura 5.28: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques que contienen 500 kg/m ³	100
Figura 5.29: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques que contienen 400 kg/m ³	101
Figura 5.30: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques que contienen 300 kg/m ³	101
Figura 5.31: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques confeccionados con cemento ME-EX	102
Figura 5.32: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques confeccionados con cemento ME-PL	102
Figura 5.33: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques confeccionados con cemento ME-ES	103
Figura 5.34: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques que contienen 600 kg/m ³	103
Figura 5.35: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques que contienen 500 kg/m ³	104
Figura 5.36: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques que contienen 400 kg/m ³	104

Figura 5.37: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques que contienen 300 kg/m ³	105
Figura 5.38: temperatura máxima alcanzada en el núcleo.....	107
Figura 5.39: tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo	108
Figura 5.40: diferencial máximo de temperatura.....	109
Figura 5.41: tiempo al que se alcanza el diferencial máximo de temperatura.....	110
Figura 6.1: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600.....	121
Figura 6.2: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600	122
Figura 6.3: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600	122
Figura 6.4: interfase del modelo para estimar el desarrollo de temperatura del hormigón ME-EX/600.....	125
Figura 6.5: imagen resultante al ingresar valores de entrada para el hormigón ME-EX/600	125
Figura 6.6: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600.....	126
Figura 6.7: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600	127
Figura 6.8: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600	127
Figura 7.1: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	130
Figura 7.2: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	130
Figura 7.3: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	131
Figura 7.4: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	131

Figura 7.5: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	132
Figura 7.6: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	132
Figura 7.7: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	133
Figura 7.8: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	133
Figura 7.9: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	134
Figura 7.10: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	134
Figura 7.11: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	135
Figura 7.12: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	135
Figura 7.13: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	139
Figura 7.14: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	139
Figura 7.15: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	140
Figura 7.16: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales.....	140

Figura 7.17: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	141
Figura 7.18: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	141
Figura 7.19: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	142
Figura 7.20: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	142
Figura 7.21: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	143
Figura 7.22: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	143
Figura 7.23: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	144
Figura 7.24: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales	144
Figura 7.25: resultados de temperatura máxima obtenidos con el método PCA.....	147
Figura 7.26: gráfico comparativo entre resultados obtenidos de temperatura máxima alcanzada por los hormigones confeccionados con cemento ME-EX, según alternativa evaluada y resultados experimentales	149
Figura 7.27: gráfico comparativo entre resultados obtenidos de temperatura máxima alcanzada por los hormigones confeccionados con cemento ME-PL, según alternativa evaluada y resultado experimentales	149
Figura 7.28: gráfico comparativo entre resultados obtenidos de temperatura máxima alcanzada por los hormigones confeccionados con cemento ME-ES, según alternativa evaluada y resultado experimentales	150
Figura 7.29: gráfico comparativo entre resultados obtenidos del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en los hormigones confeccionados con cemento ME-EX, según alternativa evaluada y resultado experimentales	151

Figura 7.30: gráfico comparativo entre resultados obtenidos del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en los hormigones confeccionados con cemento ME-PL, según alternativa evaluada y resultado experimentales	151
Figura 7.31: gráfico comparativo entre resultados obtenidos del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en los hormigones confeccionados con cemento ME-ES, según alternativa evaluada y resultado experimentales	152
Figura 7.32: gráfico comparativo entre los valores de temperatura máxima alcanzada en el núcleo según la estimación por el método de Schmidt, para cada hormigón estudiado	157
Figura 7.33: gráfico comparativo entre los valores del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo según la estimación por el método de Schmidt, para cada hormigón estudiado	157
Figura 7.34: gráfico comparativo entre los valores del diferencial de temperatura máximo alcanzado según la estimación por el método de Schmidt, para cada hormigón estudiado	158
Figura 7.35: gráfico comparativo entre los valores del tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura según la estimación por el método de Schmidt, para cada hormigón estudiado.....	159
Figura 7.36: gráfico comparativo entre los valores de temperatura máxima alcanzada en el núcleo según la estimación por el método CTK, para cada hormigón estudiado	161
Figura 7.37: gráfico comparativo entre los valores del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo según la estimación por el método CTK, para cada hormigón estudiado .	161
Figura 7.38: gráfico comparativo entre los valores del diferencial de temperatura máximo alcanzado según la estimación por el método CTK, para cada hormigón estudiado	162
Figura 7.39: gráfico comparativo entre los valores del tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura según la estimación por el método CTK, para cada hormigón estudiado	163
Figura 8.1: curvas resultantes de desarrollo de temperatura en el núcleo para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro U.....	167
Figura 8.2: curvas resultantes de desarrollo de diferencial de temperatura para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro U.....	168
Figura 8.3: curvas resultantes de desarrollo de temperatura en el núcleo para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro c_e, h	169
Figura 8.4: curvas resultantes de desarrollo de diferencial de temperatura para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro c_e, h	170
Figura 8.5: curvas resultantes de desarrollo de temperatura en el núcleo para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro L, W, H.....	171

Figura 8.6: curvas resultantes de desarrollo de diferencial de temperatura para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro L, W, H.....	172
Figura 8.7: análisis de sensibilidad de parámetros U, Ce, h y L, W, H en método CTK para resultados de temperatura máxima en el núcleo	173
Figura 8.8: análisis de sensibilidad de parámetros U, Ce, h y L, W, H en método CTK para resultados del diferencial máximo de temperatura	174
Figura 8.9: análisis de sensibilidad de parámetros U, Ce, h y L, W, H en método CTK para resultados del tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo y el máximo diferencial de temperatura	175
Figura 8.10: curvas resultantes del método CTK al evaluar el elemento confeccionado con hormigón ME-EX/600 (caso base), considerando temperatura ambiente variable	176
Figura 8.11: curvas resultantes del método CTK al evaluar el elemento confeccionado con hormigón ME-EX/600 (caso base), considerando temperatura ambiente constante.....	176
Figura A.1: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/600 durante 7 días	190
Figura A.2: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/600 durante 7 días	190
Figura A.3: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/500 durante 7 días	191
Figura A.4: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/500 durante 7 días	191
Figura A.5: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/400 durante 7 días	192
Figura A.6: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/400 durante 7 días	192
Figura A.7: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/300 durante 7 días	193
Figura A.8: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/300 durante 7 días	193
Figura A.9: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/600 durante 7 días	194
Figura A.10: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/600 durante 7 días	194
Figura A.11: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/500 durante 7 días	195
Figura A.12: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/500 durante 7 días	195

Figura A.13: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/400 durante 7 días	196
Figura A.14: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/400 durante 7 días	196
Figura A.15: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/300 durante 7 días	197
Figura A.16: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/300 durante 7 días	197
Figura A.17: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/600 durante 7 días	198
Figura A.18: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/600 durante 7 días	198
Figura A.19: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/500 durante 7 días	199
Figura A.20: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/500 durante 7 días	199
Figura A.21: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/400 durante 7 días	200
Figura A.22: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/400 durante 7 días	200
Figura A.23: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 1</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/300 durante 7 días	201
Figura A.24: registro de temperatura de termocuplas instaladas en <i>Sonda 2</i> del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/300 durante 7 días	201
Figura B.1: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600.....	202
Figura B.2: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500.....	202
Figura B.3: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400.....	203
Figura B.4: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300.....	203
Figura B.5: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600	204
Figura B.6: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500	204

Figura B.7: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400	205
Figura B.8: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300	205
Figura B.9: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600	206
Figura B.10: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500	206
Figura B.11: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400	207
Figura B.12: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300	207
Figura C.1: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600 en el programa desarrollado para el método CTK.....	208
Figura C.2: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-EX/600 dado por el programa desarrollado para el método CTK	208
Figura C.3: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500 en el programa desarrollado para el método CTK.....	209
Figura C.4: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-EX/500 dado por el programa desarrollado para el método CTK	209
Figura C.5: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400 en el programa desarrollado para el método CTK.....	210
Figura C.6: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-EX/400 dado por el programa desarrollado para el método CTK	210
Figura C.7: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300 en el programa desarrollado para el método CTK.....	211
Figura C.8: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-EX/300 dado por el programa desarrollado para el método CTK	211
Figura C.9: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600 en el programa desarrollado para el método CTK	212
Figura C.10: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-PL/600 dado por el programa desarrollado para el método CTK	212
Figura C.11: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500 en el programa desarrollado para el método CTK...	213
Figura C.12: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-PL/500 dado por el programa desarrollado para el método CTK	213

Figura C.13: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400 en el programa desarrollado para el método CTK...	214
Figura C.14: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-PL/400 dado por el programa desarrollado para el método CTK	214
Figura C.15: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300 en el programa desarrollado para el método CTK...	215
Figura C.16: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-PL/300 dado por el programa desarrollado para el método CTK	215
Figura C.17: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600 en el programa desarrollado para el método CTK...	216
Figura C.18: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-ES/600 dado por el programa desarrollado para el método CTK	216
Figura C.19: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500 en el programa desarrollado para el método CTK...	217
Figura C.20: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-ES/500 dado por el programa desarrollado para el método CTK	217
Figura C.21: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400 en el programa desarrollado para el método CTK...	218
Figura C.22: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-ES/400 dado por el programa desarrollado para el método CTK	218
Figura C.23: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300 en el programa desarrollado para el método CTK...	219
Figura C.24: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-ES/300 dado por el programa desarrollado para el método CTK	219
Figura C.25: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600.....	220
Figura C.26: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500.....	220
Figura C.27: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400.....	221
Figura C.28: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300.....	221
Figura C.29: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600	222
Figura C.30: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500	222
Figura C.31: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400	223

Figura C.32: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300	223
Figura C.33: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600	224
Figura C.34: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500	224
Figura C.35: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400	225
Figura C.36: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300	225

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El hormigón masivo se caracteriza por su comportamiento térmico durante la etapa inicial de fraguado, donde la masividad del elemento induce un excesivo aumento de temperatura en su interior, debido a una baja tasa de disipación del calor generado durante la hidratación del cemento, dadas las grandes dimensiones del elemento y la baja conductividad térmica del hormigón.

El hecho de que el calor al interior de un elemento masivo se disipe a una tasa menor a la de su generación, da origen a diferenciales de temperatura entre la superficie que sí disipa el calor con menor dificultad por encontrarse más expuesta a las condiciones ambientales, y el hormigón del núcleo. Estos diferenciales térmicos pueden alcanzar niveles suficientes para generar estados tensionales que no deben ser pasados por alto, ya que pueden provocar agrietamientos que perjudiquen la funcionalidad y serviciabilidad para el cual fue diseñado el elemento.

Debido al particular comportamiento térmico del hormigón en elementos masivos, se han desarrollado modelos predictivos que permiten estimar, en función de las características del hormigón, las temperaturas que se pueden alcanzar al interior del elemento, bajo las condiciones ambientales previstas. Dicha estimación resulta ser un parámetro fundamental para estimar el riesgo de agrietamiento del elemento por tensiones y sollicitaciones no contempladas por diseño, que pueden atentar a la funcionalidad de la estructura.

Los modelos predictivos del comportamiento térmico que actualmente se utilizan se basan en supuestos y condiciones que corresponden a hormigones confeccionados con cementos Portland, cuya composición y propiedades difieren de las de cementos empleados en las obras de construcción en Chile, los que consisten, en su mayoría, en cementos con adiciones.

En la actualidad no existe una normativa estandarizada sobre el control del comportamiento térmico de hormigones masivos, por lo que los proyectos que contemplan este tipo de elementos deben basarse en la experiencia y en el monitoreo de temperaturas in situ para tomar medidas necesarias si es que la temperatura desarrollada al interior del elemento masivo significa un riesgo para la estructura.

En cuanto a los estudios desarrollados en Chile, se destaca uno de 1991 donde Arturo Bianchi desarrolló un método para el cálculo de la tasa de generación de calor de hidratación en probetas de hormigón confeccionadas con cementos de origen nacional. Los resultados de su trabajo son comúnmente utilizados hoy en día en el análisis de hormigón masivo. A pesar de la gran contribución que este trabajo entregó en su momento, la composición de los cementos nacionales ha variado desde 1991, por lo que urge un estudio actualizado sobre la materia. A esto se suma la contribución del trabajo desarrollado por Paulina Babul el año 2013, quien determinó que las pautas japonesas para controlar la fisuración en hormigón masivo sí son aplicables en Chile. Ambos estudios sirven como base y precedente para el desarrollo del presente trabajo de título.

1.2. Motivación

De acuerdo con lo indicado en el punto anterior, el desarrollo de este trabajo de título está motivado por el hecho de que los modelos predictivos disponibles para estimar la temperatura alcanzada al

interior de elementos masivos no son representativos de la respuesta del desarrollo de temperatura en hormigones masivos confeccionados con cementos nacionales. Esto se debe a que la composición de los cementos que sustentan los modelos existentes (cementos Portland) difieren de la composición de los cementos empleados en Chile (cementos con adiciones). Por lo tanto, el calor de hidratación considerado en los modelos actuales no necesariamente coincide, en cuantía y velocidad de desarrollo, al generado en los elementos masivos confeccionados con cementos nacionales.

El hecho de que hoy en día existen escasos estudios sobre el desarrollo de temperatura y estados tensionales al interior de elementos de hormigón masivo confeccionados con cementos de origen nacional, motiva al desarrollo de esta tesis para intentar establecer un modelo predictivo característico que se ajuste de mejor manera a las consideraciones dadas por la particular composición de los cementos utilizados en obras de ingeniería en Chile.

1.3.Objetivos del estudio

1.3.1. Objetivos generales

El objetivo general es proponer un modelo característico que permita estimar la respuesta térmica del hormigón masivo confeccionado con cementos de origen nacional, ajustándose, de la mejor forma posible, en su diseño y especificación, para las condiciones impuestas por el tipo de componentes de los cementos que contempla la normativa nacional, particularmente aquellos con adiciones de puzolanas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar el comportamiento térmico del hormigón masivo confeccionado con cementos comerciales de uso en el país, particularmente aquellos con adiciones de puzolana.
- Evaluar la influencia de la dosis de cemento en el comportamiento térmico del hormigón.
- Evaluar la influencia del tipo de cemento en el comportamiento térmico del hormigón.
- Verificar experimentalmente la validez de algunos modelos predictivos del comportamiento térmico del hormigón en elementos masivos empleando dosificaciones típicas de cementos nacionales, particularmente aquellos con adiciones de puzolanas.
- Proponer un modelo característico ajustado, para la estimación de las temperaturas alcanzadas en elementos de hormigón masivo confeccionados con cementos chilenos, que dé pie a la calibración de un método predictivo de los estados tensionales de un elemento de las mismas características.

1.4.Alcances

A partir de este estudio se espera determinar un modelo característico que permita estimar el comportamiento térmico del hormigón masivo, y efectuar un análisis térmico del riesgo de fisuración en estructuras.

1.5. Metodología

La metodología contemplada para el desarrollo de este trabajo se detalla a continuación.

1.5.1. Marco conceptual

Se introducen conceptos y procesos asociados al calor de hidratación de los cementos, así como los factores que inciden en el proceso, y sus métodos de medición. Adicionalmente, se realiza una revisión de los distintos tipos de cementos existentes y sus clasificaciones según normativa nacional e internacional.

Se entrega una definición para considerar un elemento de hormigón como masivo, y se explican conceptualmente las causas y consecuencias del comportamiento térmico de los elementos de hormigón masivo, así como los factores que inciden en su desarrollo.

El objetivo de esta etapa es disponer de un contexto técnico necesario para una correcta comprensión de este estudio y un adecuado planteamiento del trabajo experimental.

1.5.2. Revisión de métodos empírico-teóricos

Se realiza una revisión del estado del arte respecto a métodos empírico-teóricos de evaluación, basados en el mecanismo de transferencia de calor, que permiten estimar el comportamiento térmico, y en algunos casos tensional, de elementos de hormigón masivo.

En esta etapa del estudio se identifican los métodos predictivos que se emplean actualmente para evaluar el comportamiento térmico del hormigón masivo, junto con los parámetros necesarios para su modelación.

1.5.3. Trabajo experimental

Se realiza el monitoreo del desarrollo de temperatura al interior de 12 bloques de hormigón de 0,6 m de arista, con aislación externa en sus caras, durante 7 días desde su confección.

El objetivo de esta etapa es estudiar la influencia de la dosis y del contenido de cemento y adiciones (puzolanas) en los hormigones en estudio.

1.5.4. Evaluación de métodos predictivos

Se lleva a cabo una evaluación de los métodos descritos en 1.5.2 considerando las propiedades características, en cuanto a comportamiento térmico, de los hormigones confeccionados en 1.5.3.

Esta etapa del estudio tiene como objetivo obtener una calibración de los métodos predictivos en estudio.

1.5.5. Análisis comparativo

Se contrastan los valores calculados en 1.5.4 con los registros de temperatura obtenidos en 1.5.3, y se analizan las desviaciones obtenidas entre los resultados teóricos y los experimentales.

A partir de esa contrastación de resultados se define la validez de cada método evaluado para ser aplicado en hormigones masivos con cementos nacionales, y se propone un método ajustado que permita estimar de forma más precisa el desarrollo de temperatura en elementos masivos confeccionados con los cementos de origen nacional.

1.5.6. Análisis de sensibilidad

Se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de algunas de las variables que participan en el desarrollo del método propuesto en 1.5.5.

En esta etapa del estudio se identifican posibles mejoras y ajustes al modelo propuesto en base a la sensibilidad de las variables evaluadas.

1.5.7. Conclusiones

En base a los resultados observados y analizados, se entregan conclusiones respecto a la precisión de las estimaciones dada por los métodos evaluados, y su validez para ser empleados como modelos predictivos del desarrollo térmico de hormigones masivos confeccionados con los cementos nacionales estudiados. Además, se propone como método válido aquel que mejor se ajusta a los resultados experimentales, entregando comentarios sobre posibles mejoras y ajustes al modelo en futuros estudios.

CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL

2.1. Calor de hidratación del cemento

Los cementos hidráulicos al hidratarse reaccionan con el agua desencadenando una serie de procesos fisicoquímicos que conducen al fraguado y endurecimiento del material cementante. El proceso de hidratación comienza en el momento en que el agua entra en contacto con las partículas de cemento. Cada partícula de cemento, al hidratarse, comienza a aumentar su superficie y se va extendiendo gradualmente hasta enlazarse con las otras partículas circundantes, dando consistencia a la pasta de cemento que aglomera los áridos del hormigón. La extensión y adherencia progresiva de la superficie del material cementante resulta en la rigidización, endurecimiento y desarrollo de resistencia del hormigón, mortero o pasta de cemento.

El proceso de hidratación del cemento continúa a medida que se disponga del espacio necesario para que sigan tomando lugar los productos de la hidratación y se tengan condiciones favorables de humedad y temperatura (tratamiento de curado).

Las reacciones químicas involucradas en la hidratación del cemento se desarrollan inicialmente con mayor velocidad, apreciándose una rigidización creciente entre las primeras horas y los primeros días desde que se inicia el contacto del agua con el cemento. Estas reacciones químicas son de tipo exotérmico, es decir, su ocurrencia provoca la liberación de energía en forma de calor. Por este motivo, el calor liberado debido a la reacción química del agua con el cemento es denominado “calor de hidratación” y se mide en calorías por unidad de masa (cal/g) o (kJ/kg) (Lamond & Pielert, 2006).

La cantidad de calor de hidratación generado depende principalmente de la composición química del cemento, ya que algunos de los componentes del clínker aportan más calor que otros al tratarse de compuestos químicos que liberan mayor cantidad de energía en las reacciones que se desencadenan en el proceso de hidratación. De esta forma se pueden distinguir aquellos compuestos del cemento que son los principales responsables del elevado desarrollo de calor en el proceso de hidratación, y su proporción en la composición del cemento determinará si son cementos de alto, moderado o bajo calor de hidratación.

Todos los cementos hidráulicos están compuestos principalmente por el clínker, que corresponde a un producto que se obtiene de la calcinación hasta fusión parcial de los minerales presentes en las materias primas que intervienen en la fabricación del cemento, éstas son: cal (CaO) y sílice (SiO_2) como elementos principales; alúmina (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3) en menor proporción (Bianchi, 1991).

En el clínker se distinguen los siguientes 4 compuestos químicos principales (los minerales de clínker):

- Silicato tricálcico
- Silicato bicálcico
- Aluminato tricálcico
- Ferro aluminato tetracálcico

Todos estos compuestos son anhidros, es decir, en contacto con el agua reaccionan a distinta velocidad y durante periodos de tiempo diferentes.

En la Tabla 2.1 se detallan las principales características de los minerales del clínker y su proporción en el cemento Portland.

Tabla 2.1: componentes del clínker y sus características (Bornand, 2015) y (Bianchi, 1991).

Nombre del compuesto	Composición óxidos	Abreviatura	Contenido en cemento Portland (%)	Evolución calor hidratación	Características y/o propiedades
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	42 - 60	Rápido	Endurecimiento rápido, alto calor de hidratación.
Silicato bicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	14 - 35	Lento	Endurecimiento lento, de crecimiento sostenido, bajo calor de hidratación.
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	6 - 13	Muy rápido	Endurecimiento y fraguado rápido, alto calor de hidratación, tendencia a la fisuración, sensibilidad a las aguas sulfatadas.
Ferro aluminato tetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3, Fe_2O_3$	C_4AF	5 - 10	Muy lento	Endurecimiento lento, poco calor de hidratación, poco valor aglomerante.

De acuerdo a Lamond & Pielert, existe un acuerdo general de que el aluminato tricálcico es el componente que más aporta a la velocidad de hidratación en los primeros minutos, seguido por el silicato tricálcico y el ferro aluminato tetracálcico en igual medida, siendo el silicato bicálcico el que presenta menor velocidad de reacción. En términos de la diferencia de velocidad de reacción entre los componentes, el orden de mayor a menor velocidad es como sigue:

$$C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$$

En la Figura 2.1 se muestran las tasas de hidratación para los componentes del clínker, sin embargo, la velocidad real de hidratación depende de la composición de cada cemento.

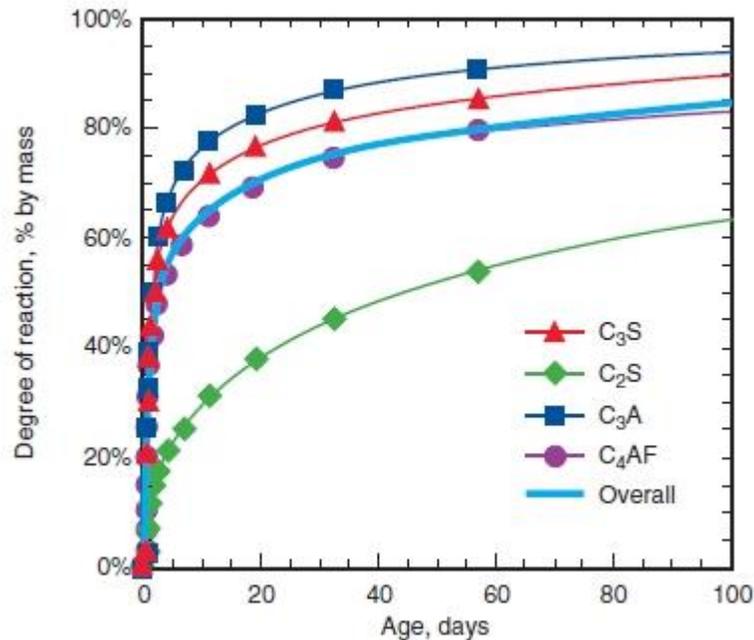
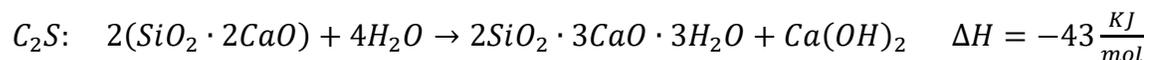


Figura 2.1: grado de hidratación en compuestos de cemento Portland (Tennis & Jennings, 2000)

Las reacciones químicas que describen la hidratación del cemento son bastantes complejas, por lo que se simplifica su explicación apuntando únicamente a las reacciones de hidratación de sus dos componentes principales (C_3S y C_2S), las cuales son de la siguiente forma:



Los dos componentes de silicato cálcico tienen un proceso de hidratación similar, sólo se diferencian por la cantidad de hidróxidos de calcio ($Ca(OH)_2$) que se forma y por la cantidad de calor de hidratación liberado durante las reacciones (ΔH).

El producto principal de la hidratación del cemento es un hidrato de silicato cálcico denominado C-S-H, que corresponde a un material no cristalino de composición variable (geliforme); mientras que el hidróxido de calcio, también producto de la reacción de hidratación, es un material cristalino.

La Figura 2.2 muestra la curva característica de la cinética de reacción del componente principal del cemento Portland que más rápido reacciona con el agua, el C_3S . En la figura se observan 5 etapas que describen el proceso de hidratación del cemento, basadas en la tasa de generación de calor.

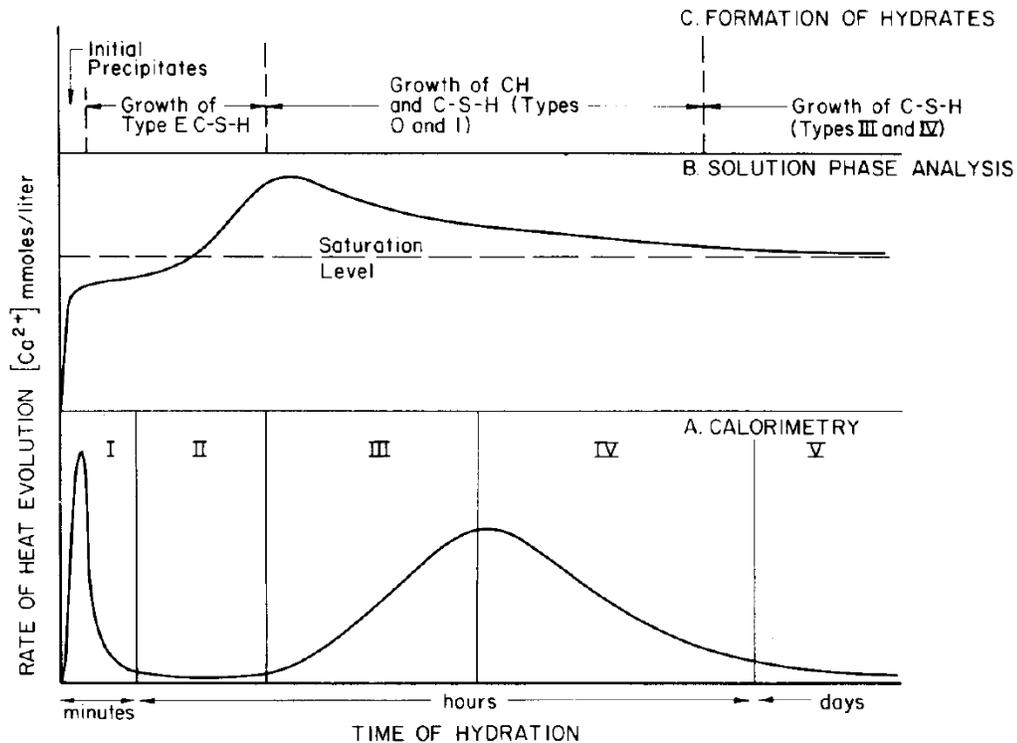


Figura 2.2: esquema de las etapas que se desarrollan en la reacción de hidratación del C_3S (Copeland, Kantro, & Verbeck, 1960)

- Etapa I: periodo de pre-inducción

En esta etapa se produce la hidrólisis inicial, se liberan iones y comienza la formación temprana de C-S-H. Existe una rápida evolución del calor, debido a que la reacción es rápida dado que hay mucha superficie del componente C_3A en contacto con el agua. La reacción desacelera pasado aproximadamente 15 minutos.

- Etapa II: periodo de inducción o durmiente

En esta etapa el consumo de agua y la cantidad de hidratos formados son leves, esto explica que durante este periodo el hormigón en base a cemento Portland es manejable y trabajable, presentando un estado plástico. Este periodo es causado por la necesidad de obtener una cierta concentración de iones en la solución antes que se formen núcleos de cristales que facilitan el crecimiento del producto de hidratación. En otras palabras, se produce una leve pausa a las rápidas reacciones que se venían produciendo en la etapa I. Esta etapa dura entre 1 y 3 horas.

- Etapa III: periodo de hidratación media

En esta etapa empieza la solidificación o el fraguado inicial del hormigón. El C_3S comienza a hidratarse rápidamente, tal como lo hacía el C_3A en la etapa I, ya que el $Ca(OH)_2$ empieza a cristalizar. Hacia el final del periodo, la velocidad de hidratación alcanza su máximo, correspondiendo con el máximo calor de hidratación alcanzado. Concluida esta etapa, el fraguado final ocurre y comienza el endurecimiento inicial. Este periodo comprende entre 2 y 8 horas.

- Etapa IV: periodo de desaceleración

Dada la hidratación del C_3S en la etapa anterior, se engrosa la capa de C-S-H en la superficie de los granos de cemento, siendo el movimiento a través de ella lo que determina la velocidad de la reacción. Por lo tanto, en esta etapa la hidratación queda controlada por la velocidad de difusión dentro de la capa, por lo que la velocidad de reacción comienza a disminuir hasta llegar a un estado estable, dando inicio a la etapa V. Este periodo dura entre 12 a 24 horas.

- Etapa V: periodo de difusión estacionario

En esta etapa la difusión es tan lenta que la velocidad de la reacción de hidratación está controlada únicamente por la velocidad de difusión. Como el producto de la hidratación sigue engrosando la capa de C-S-H, la velocidad de difusión, y por consecuencia la de reacción, continúa disminuyendo hasta que no queda más C_3S por hidratar.

2.2. Factores que afectan el calor de hidratación

A continuación, se describen los principales factores que influyen en el desarrollo del calor de hidratación de los cementos.

2.2.1. Composición química del cemento

Como se mencionó anteriormente, los componentes principales del cemento Portland (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) son los responsables de la generación de calor en el desarrollo del proceso de hidratación. Por lo tanto, la cantidad de calor generado dependerá principalmente de la composición química del cemento, siendo el C_3A y el C_3S los que más aportan calor durante el fraguado y endurecimiento del hormigón.

Como uno de los componentes que más calor libera en el proceso es el C_3S y, debido a que éste es el que se encuentra en mayor proporción en el cemento, se desprende que, dependiendo del contenido de cemento, se generará más o menos calor en un elemento de hormigón.

Además de depender de la proporción y contenido de cada compuesto base del cemento Portland, se debe considerar el contenido de adiciones al cemento para, entre otras cosas, lograr disminuir el calor de hidratación de la reacción del material cementante del hormigón.

Entre las adiciones activas más utilizadas, están las puzolanas naturales, puzolanas obtenidas por calcinación de arcillas, escorias de alto horno, nanosílice, microsílice y cenizas volantes. Los tipos de cementos con adiciones y su clasificación se detallan más adelante.

En el desarrollo de este trabajo se hace referencia específicamente a las puzolanas como la adición principal de los cementos estudiados. La puzolana al encontrarse finamente dividida reacciona con la Portlandita ($Ca(OH)_2$) y produce un compuesto secundario (C-S-H) con propiedades aglomerantes. Al agregar esta adición en los cementos se logra disminuir la cantidad de calor

generado en el proceso de hidratación y mejorar la calidad del hormigón. La cantidad de calor que se desarrolla en el proceso depende del tipo de puzolana, su finura, y su contenido porcentual dentro del material cementante, entre otros factores. De acuerdo a la PCA¹, la contribución de la puzolana al calor generado en un hormigón es del orden de 50% con respecto al que generaría la misma cantidad (en peso) de cemento.

2.2.2. Finura del cemento

La finura del cemento es un factor que influye directamente en el desarrollo de calor de hidratación. Más específicamente, la finura del cemento afecta en mayor medida a la tasa de generación de calor que al calor total generado, es decir, influye en la velocidad de las reacciones.

Dado que las reacciones de hidratación se producen en la superficie de las partículas, mientras más fino es el cemento, se tiene una mayor superficie específica expuesta, por ende, ocurre una hidratación más rápida y completa, generando un mayor calor de hidratación (Lamond & Pielert, 2006).

A modo de ejemplo, y para tener una noción de cuánto influye la finura en el calor de hidratación del cemento, la Tabla 2.2 muestra el calor liberado en la hidratación de los tipos de cemento Portland ASTM según su finura.

Tabla 2.2: finura y calor de hidratación de los tipos de cemento Portland según ASTM C 150 (ACI 207.2R, 2007)

Tipo de cemento Portland	Finura ASTM C115 (cm²/gr)	Calor de hidratación a los 28 días (cal/gr)
I	1790	87
II	1890	76
III	2030	105
IV	1910	60

Además, la Figura 2.3 muestra cómo varía el calor de hidratación en el tiempo en una pasta de cemento variando la finura del cemento que la compone; en ella se puede ver que además de aumentar el calor de hidratación en los cementos de mayor finura, la tasa a la que esto ocurre resulta mayor.

¹ Portland Cement Association

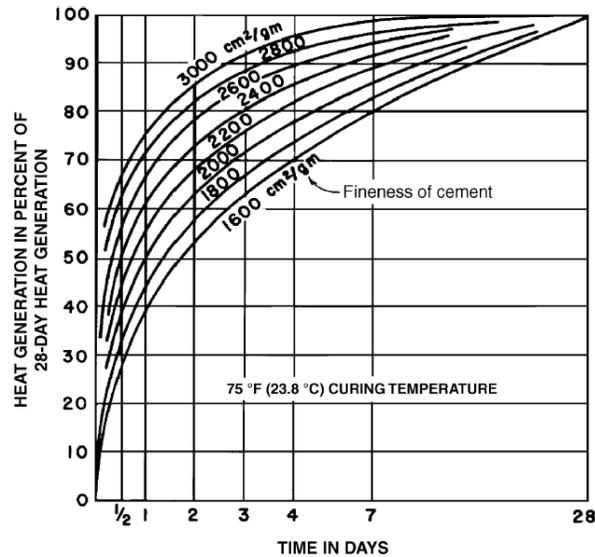


Figura 2.3: efecto de la finura del cemento en la generación de calor en una pasta de cemento curada a 23,8°C (ACI 207.2R, 2007).

2.2.3. Relación agua/cemento

La relación entre las proporciones en peso de agua y cemento (a/c) en una mezcla tienen un efecto significativo en la cantidad de calor generado a la edad de 3 o más días, observándose diferencias más considerables en los rangos de relación a/c entre 0,4 a 0,8 (Lamond & Pielert, 2006).

El producto que se genera de la hidratación del cemento suele aumentar su volumen de forma estable, llenando los capilares de los espacios vacíos de la pasta de cemento. Si los capilares son pequeños (baja relación a/c), el espacio disponible se llenará completamente con productos de la hidratación y la hidratación del cemento restante cesará. Mientras que, una alta relación a/c tiende a resultar en una hidratación más completa del material cementante incorporado a la mezcla y se desarrollará más calor (Copeland, Kantro, & Verbeck, 1960).

De acuerdo a un estudio desarrollado por Verbeck y Foster en 1950, en el cual se midieron los calores de hidratación de los distintos tipos de cementos a edades comprendidas desde los 3 días hasta 13 años, se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 2.3.

De acuerdo a los valores de la Tabla 2.3, una mayor relación agua/cemento significaría un aumento en el calor generado por la hidratación del cemento, sin embargo, este efecto es más significativo a largo plazo (a partir de los 3 días). Por el contrario, en las primeras horas desde confeccionada la mezcla, una relación a/c baja puede implicar una mayor cantidad de calor liberado en comparación a una alta relación a/c; esto se debe a que en el primer caso hay una mayor cantidad de partículas de cemento siendo hidratadas en comparación al segundo caso, por lo que el calor total liberado de las reacciones químicas será mayor en bajas relaciones de a/c.

Tabla 2.3: efecto de la relación a/c sobre los calores de hidratación en distintos tipos de cemento ASTM (cal/g)
(Bianchi, 1991)

Tipo de cemento	a/c	Edad						
		Días				Años		
		3	7	28	90	1	6,5	13
I	0,4	60,9 (64)	79,2 (83)	95,6 (100)	103,8 (109)	108,6 (114)	116,8 (122)	118,2 (124)
	0,6	65,8 (61)	87,7 (82)	107,1 (100)	114,7 (107)	120,0 (112)	123,1 (115)	
	0,8	66,3 (59)	89,4 (80)	111,6 (100)	119,5 (107)	122,2 (109)	125,0 (112)	
II	0,4	46,9 (59)	60,9 (77)	79,6 (100)	88,1 (111)	95,4 (120)	98,4 (124)	100,7 (127)
	0,6	49,6 (59)	61,3 (73)	83,5 (100)	94,8 (114)	102,1 (122)	104,6 (125)	
	0,8	49,3 (58)	64,3 (76)	84,7 (100)	99,2 (117)	106,8 (126)	106,1 (125)	
III	0,4	75,9 (75)	90,6 (89)	101,6 (100)	106,8 (105)	114,2 (112)	120,6 (119)	120,5 (119)
	0,6	86,1 (72)	103,6 (86)	119,9 (100)	124,4 (104)	127,3 (106)	127,2 (106)	
	0,8	86,7 (72)	105,0 (87)	121,0 (100)	126,3 (104)	130,0 (107)	130,6 (108)	
IV	0,4	40,9 (62)	50,1 (76)	65,6 (100)	74,4 (113)	80,6 (123)	85,3 (130)	87,3 (133)
	0,6	43,2 (65)	53,5 (80)	66,6 (100)	78,7 (118)	90,4 (136)	92,5 (139)	
	0,8	41,7 (60)	52,8 (76)	69,8 (100)	82,5 (118)	94,8 (136)	96,4 (138)	

(): porcentaje con respecto a los 28 días

2.3. Tipos de cemento

Los distintos tipos de cementos que existen se diferencian por la composición, tanto de sus materias primas, como de la proporción de cada una de ellas en el compuesto final. La variación en la composición de los cementos produce una variación en sus propiedades físicas y/o químicas, que permite modificar ciertas características para mejorar su desempeño, según su aplicación.

De acuerdo a la norma NCh. 148 Of.68, los cementos se clasifican en “clases” de acuerdo a su composición, y en “grados” según su resistencia. Por su parte, la normativa internacional clasifica los cementos según su composición y su desempeño, entre otras características.

A continuación, se describen los tipos de cemento según su composición y su clasificación según las diferentes normativas.

2.3.1. Cementos Portland

Corresponden al producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínker y yeso, y otras sustancias que no sean perjudiciales en contenidos que no superen un 3% en peso del cemento.

La composición de un cemento Portland promedio se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: composición de un cemento Portland promedio (Bornand, 2015)

Componentes	Contenido (% en peso)
<i>CaO</i>	60 – 70
<i>SiO₂</i>	17 – 25
<i>Al₂O₃</i>	3 – 8
<i>Fe₂O₃</i>	0,5 – 6
<i>MgO</i>	0,1 – 4
<i>SO₃</i>	1 – 3
Álcalis	0,2 – 1,3
Pérdida por calcinación (%)	2 – 3
Residuo insoluble (%)	0,5 – 0,75

Sus características dependen de la composición del clínker, es decir, si el clínker tiene un alto contenido de C_3S , el cemento Portland será de resistencias iniciales altas y tendrá un mayor calor de hidratación. En cambio, si tiene un mayor contenido de C_2S , el cemento Portland resultante tendrá buenas resistencias a largo plazo y un moderado calor de hidratación. Por otro lado, la resistencia a los sulfatos de un cemento Portland es inversamente proporcional al contenido de C_3A .

En base a lo anterior, la norma norteamericana ASTM C150 clasifica los cementos Portland en 5 tipos según su composición y desempeño (Tabla 2.5).

Tabla 2.5: composición química típica de cementos Portland según ASTM C150 (ASTM C-150, 2007)

Componente	I Corriente	II Moderado calor	III Alta resistencia inicial	IV Bajo calor	V Resistente a los sulfatos
C_3S	55	55	55	42	55
C_2S	18	19	17	32	22
C_3A	10	76	10	4	4
C_4AF	8	11	8	15	12
Yeso	6	5	6	4	4

2.3.2. Cementos puzolánicos

Corresponden a cementos que incluyen adiciones y son obtenidos por la molienda conjunta de clínker, puzolana y yeso, y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento.

La puzolana corresponde a una adición que se incorpora mediante molienda conjunta con el clínker y el yeso en el proceso de fabricación del cemento. Corresponde a un material sílico-aluminoso

que no es capaz de desarrollar propiedades aglomerantes por sí solo, pero que al estar finamente dividido y en presencia de agua sí las desarrolla gracias a la reacción química con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento a temperatura ambiente (NCh 148, 1968).

Entre las características que entrega la adición de puzolana al cemento se encuentran, la mayor resistencia química a los sulfatos, aumento de impermeabilidad, bajo calor de hidratación, y la inhibición de reacciones álcali-árido.

La cantidad de puzolana en los cementos de este tipo está limitada por norma al 50% en peso del producto final, ya que una mayor cantidad no tendría suficiente hidróxido de calcio para reaccionar.

Dependiendo de la dosis de puzolana, la norma NCh. 148 Of.68 distingue 2 tipos de cementos puzolánicos:

2.3.2.1. *Portland puzolánico*

Su composición incluye puzolana en una proporción no superior a 30% en peso del producto final.

2.3.2.2. *Puzolánico*

Su composición incluye puzolana en una proporción comprendida entre el 30% y 50% en peso del producto final.

2.3.3. Cementos con adición de cenizas volantes

Corresponden a cementos con adiciones que resultan de la molienda conjunta de clínker, ceniza volante y yeso, y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento.

Las cenizas volantes son polvos muy finos, arrastrados por los gases provenientes de una cámara de combustión de carbón pulverizado, utilizado para la generación de vapor en centrales termoeléctricas. Este tipo de adición es considerada una puzolana artificial, ya que tiene una composición y propiedades similares a las puzolanas.

2.3.4. Cementos siderúrgicos

Corresponden a cementos con adiciones que resultan de la molienda conjunta de clínker, escoria de alto horno y yeso, y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento.

La escoria de alto horno es el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento del mineral de hierro en alto horno. Esta adición tiene como constituyentes principales óxidos de calcio, sílice y aluminio, junto con óxidos de magnesio y fierro, y su composición química es tal que cumple con el siguiente requisito (NCh 148, 1968):

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1$$

Dependiendo de la dosis de escoria de alto horno, la norma NCh. 148 Of.68 distingue 2 tipos de cementos siderúrgicos:

2.3.4.1. *Portland siderúrgico*

Su composición incluye escoria de alto horno, enfriada bruscamente, en una proporción no superior a 30% en peso del producto final.

2.3.4.2. *Siderúrgico*

Su composición incluye escoria de alto horno, enfriada bruscamente, en una proporción comprendida entre el 30% y 75% en peso del producto final.

2.3.4.3. *Cementos siderúrgicos terciarios*

Corresponden a cementos con adiciones que resultan de la molienda conjunta de clínker, escoria de alto horno, puzolana y yeso, y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento.

2.3.5. **Cementos con agregado tipo A**

Corresponden a cementos con adiciones que resultan de la molienda conjunta de clínker, adición “tipo A” y yeso, y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento.

La adición tipo A corresponde a una mezcla de sustancias compuestas de un material calcáreo-arcilloso, y otros a base de óxidos de silicio, aluminio y hierro, que ha sido calcinado a una temperatura superior a 900°C. El contenido de calcio de la adición, expresado como *CaO* total, comprende como mínimo un 5% y como máximo un 30%.

Dependiendo de la dosis de adición tipo A, la norma NCh. 148 Of.68 distingue 2 tipos de cementos con agregados tipo A:

2.3.5.1. *Portland con agregado tipo A*

Su composición incluye adición tipo A en una proporción no superior a 30% en peso del producto final.

2.3.5.2. *Con agregado tipo A*

Su composición incluye adición tipo A en una proporción comprendida entre el 30% y 50% en peso del producto final.

2.3.6. Clasificación

En base a los tipos de cemento descritos anteriormente, se detalla la clasificación propia de cada normativa.

2.3.6.1. *Requisitos según normativa internacional*

Las normas ASTM tienen una clasificación general para los cementos hidráulicos, dentro de las cuales se distinguen clasificaciones propias de cada tipo de cemento, es decir, tienen una clasificación para los cementos Portland y otra para los cementos con adiciones

Respecto a los cementos hidráulicos, la norma ASTM C1157 los clasifica según como muestra la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: clasificación de cementos hidráulicos según ASTM C1157 (ASTM C-1157, 2003)

Tipo	Descripción
GU	De uso general
HE	Alta resistencia temprana
MS	Resistencia moderada a sulfatos
HS	Alta resistencia a sulfatos
MH	Moderado calor de hidratación
LH	Bajo calor de hidratación

Respecto a los cementos Portland, la norma ASTM C150 define 5 tipos que se resumen en la Tabla 2.7 según su composición y desempeño.

Tabla 2.7: clasificación cemento Portland según ASTM C150 (ASTM C-150, 2007)

Tipo	Descripción
I	Cemento Portland común, apto para toda obra que no requiera cementos con requisitos especiales.
II	Cemento Portland de moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos, con un contenido máximo de 8% de C_3A , y suma de $(C_3S + C_3A) < 58\%$.
III	Cemento Portland de alta resistencia inicial, con un contenido máximo de C_3A de 8%.
IV	Cemento Portland de bajo calor de hidratación, con contenidos máximos de 35% de C_3S y 7% de C_3A , y un contenido mínimo de C_2S de 40%.
V	Cemento Portland resistente a los sulfatos, con un contenido máximo de 5% de C_3A y la suma de $C_4AF + 2C_3A$, menor o igual a 20%.

Respecto a los cementos con adiciones, la norma ASTM C595 los clasifica como muestra la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: clasificación de cementos con adiciones según ASTM C595 (ASTM C-595, 2003)

Tipo	Descripción	Escoria de alto horno	Puzolana
ISM	Portland modificado con escoria de alto horno	hasta 25%	-
IS	Portland de escoria de alto horno	25% a 70%	-
IPM	Portland modificado con puzolana	-	hasta 15%
IP	Portland puzolánico	-	15% a 40%
S	Escoria	>70	-

2.3.6.2. Normativa nacional

La norma chilena NCh. 148 Of.68 clasifica los cementos según su clase y su grado de resistencia. En la Tabla 2.9 se muestran los requisitos químicos exigidos por la norma para cada clase de cemento.

Tabla 2.9: requisitos químicos por clase de cemento según NCh 148 Of.68 (NCh 148, 1968)

Clase	Cemento Portland	Cementos siderúrgicos		Cementos puzolánicos		Cementos con agregado tipo A	
		Portland siderúrgico	Siderúrgico	Portland Puzolánico	Puzolánico	Portland con agregado tipo A	Con agregado tipo A
Pérdida por calcinación máxima (%)	3,0	5,0	5,0	4,0	5,0	7,0	9,0
Residuo insoluble máximo (%)	1,5	3,0	4,0	30,0	50,0	21,0	35,0
Contenido de SO₃ máximo (%)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Contenido de MgO máximo (%)	5,0	-	-	-	-	-	-
Contenido de Mn₂O₃ máximo (%)	-	2,0	2,0	-	-	-	-

En cuanto a las propiedades físico-mecánicas, la norma establece 2 grados de cemento cuyos requisitos se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10: grado de cementos según resistencia (NCh. 148 Of.68)

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mínimo (min)	Final máximo (h)	7 días (kg/cm ²)	28 días (kg/cm ²)	7 días (kg/cm ²)	28 días (kg/cm ²)
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

2.4. Hormigón masivo

2.4.1. Definición

En la actualidad no existe consenso respecto a las características y propiedades que permiten calificar un elemento de hormigón como masivo. Sin embargo, algunos organismos reconocidos en el ámbito del hormigón entregan criterios que permiten reconocer las condiciones que determinan la calidad de masivo para un determinado elemento de hormigón.

De acuerdo al Comité 116 del American Concrete Institute (ACI), el hormigón masivo se define como “cualquier volumen de hormigón cuyas dimensiones son lo suficientemente grandes como para tomar medidas que hagan frente a la generación de calor debida a la hidratación del cemento y el consiguiente cambio de volumen para minimizar la fisuración”. Sin embargo, en el mismo organismo, en el Comité 211, se considera a un elemento de hormigón como 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 del hormigón excede 360 kg/m³”.

Por otro lado, el Japanese Concrete Institute (JCI) determina que se está en presencia de estructuras de hormigón masivo cuando existen elementos tales como “muros reforzados con espesores mayores a 50 cm restringidos en la base o losas de grandes superficies con espesores mayores a 80 cm”.

En cuanto a los criterios imperantes en Chile, la versión de la norma NCh 170 del año 1985 definía los elementos de hormigón masivo, como “elementos cuya menor dimensión excede los 80 cm”, Sin embargo, la norma fue modificada y actualizada el año 2016, proceso en el cual se eliminó dicha definición.

Actualmente, la Cámara Chilena de la Construcción (CChC) en conjunto con el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH), se encuentran elaborando un documento que detalla las especificaciones técnicas para el hormigón masivo estructural. En dicho documento se considera como hormigón masivo estructural a “cualquier volumen de hormigón armado que deba resistir y transmitir solicitaciones, en el cual la combinación de sus dimensiones, en conjunto con las condiciones ambientales y de borde, además de las características de la mezcla de hormigón, puedan conducir como consecuencia de elevadas temperaturas producidas por el calor de hidratación inducido en el hormigón, a gradientes térmicos que generen fisuración no controlada, reacciones químicas expansivas o a una reducción excesiva de la resistencia a largo plazo”.

De lo anterior se observa que no existe un consenso respecto a algún criterio único que permita denominar un hormigón como masivo, dando indicios de las muchas variables que participan en el singular comportamiento de este tipo de estructuras. Incluso las discrepancias entre definiciones son notorias al observar que algunos organismos prefieren definir el elemento masivo sólo por su dimensión mínima, pasando por alto el contenido de material cementante u otros factores que se podrían considerar más críticos a la hora de definir un elemento de hormigón masivo. Sin embargo,

el ACI, específicamente su comité 116, es uno de los que entrega la definición más completa, definiendo el hormigón masivo según su comportamiento, independiente de las dimensiones, señalando implícitamente que existen muchos factores que pueden llevar a un elemento de hormigón masivo a desarrollar comportamiento térmico significativo para el diseño de la estructura.

2.4.2. Aplicaciones

Los elementos de hormigón masivo suelen emplearse en obras de infraestructura de gran envergadura, las cuales se pueden clasificar en tres tipos comunes (U.S. Army Corps of Engineers, 1997):

- Estructuras gravitacionales: represas y muros de bloqueo
- Estructuras de casco grueso: represas en arco
- Estructuras de hormigón armado de grandes dimensiones: fundaciones masivas, pilotes de puentes y muelles, estaciones de bombeo, centrales nucleares, etc.

Su aplicación en obras de construcción no es reciente, y por lo mismo, la experiencia y la evidencia de fenómenos vistos sólo en este tipo de estructuras a lo largo de la historia han incentivado investigaciones y modelaciones respecto a su comportamiento térmico y tensional.

2.4.3. Diferencias con respecto al hormigón estructural

A comienzos del siglo XX la creciente necesidad de construcción de represas y canales para sistemas de riego, energía y suministro de agua; en conjunto con el desarrollo de la industria del cemento, motivaron diversos estudios del hormigón masivo al observar distintos comportamientos que lo diferenciaban del hormigón empleado en otro tipo de estructuras. Estos comportamientos incluían excesivas fisuraciones a edades tempranas, en conjunto con el desarrollo de altas temperaturas al interior de los elementos.

En un elemento estructural corriente de hormigón, el calor producido por la hidratación del cemento es disipado rápidamente y no se generan diferencias de temperatura considerables entre su interior y su superficie expuesta. En cambio, en los elementos de hormigón masivo se desarrollan grandes diferenciales de temperatura entre su interior y la superficie exterior dado que el calor del núcleo (centro del elemento) se disipa a un ritmo menor que el mismo calor generado en cercanías de su superficie exterior, debido a la baja difusividad térmica del hormigón. Dependiendo de la magnitud de estos diferenciales de temperatura, las restricciones al cambio de volumen del elemento y algunas propiedades del hormigón empleado, se pueden producir fisuraciones perjudiciales para la capacidad resistente de la estructura, su serviciabilidad o la apariencia del elemento

A diferencia de los otros tipos de estructuras de hormigón, en el diseño de estructuras de hormigón masivo suele considerarse la resistencia mecánica del material como una propiedad secundaria,

siendo más relevante la durabilidad, el comportamiento térmico y los aspectos económicos y tecnológicos de su construcción. De estas propiedades, las más relevantes y críticas en los elementos masivos se refieren a su comportamiento térmico (ACI 207.1R, 2005).

2.5.Comportamiento térmico y tensional del hormigón masivo

Como se mencionó anteriormente, lo que diferencia al hormigón en elementos masivos del de otros elementos de menor masividad, es su comportamiento térmico. El hormigón es un material que posee baja conductividad térmica, es decir, tiene una baja disipación térmica; por lo tanto, en un elemento masivo, el calor generado en su interior debido a la hidratación del cemento tarda más en disiparse que el calor generado en elementos de menor masividad que permiten una disipación del calor más rápida. Esta diferencia de velocidad de disipación entre el interior y el exterior del elemento, genera gradientes térmicos que pueden desencadenar estados tensionales de tracción en la superficie del elemento y fisuración en el hormigón en su etapa de endurecimiento, resultando perjudicial en la durabilidad y serviciabilidad del elemento.

La Tabla 2.11 muestra a modo de referencia la conductividad térmica de materiales de construcción típicos, de esta forma es posible contrastar la diferencia entre el hormigón y el resto respecto a esta propiedad.

Tabla 2.11: conductividad térmica de materiales

Material	Conductividad térmica (W/m*°C)
Hormigón	1,0 - 2,0
Acero	50 - 60
Hierro	70 - 80
Agua	0,58
Aluminio	200
Madera	0,10 - 0,21
Vidrio	0,6 - 1,0

A continuación, se describe el comportamiento térmico y tensional que experimenta el hormigón masivo producto de su dificultad para disipar el calor generado durante la hidratación del cemento.

2.5.1. Gradientes térmicos

El hormigón es un material compuesto por distintas proporciones de áridos, cemento (con o sin adiciones), agua, y aditivos. Al mezclarse estos componentes, la interacción entre el agua y el cemento producen una reacción química exotérmica, la cual lleva a una elevación de la temperatura de la mezcla, que dependerá de la velocidad de disipación propias de las características del elemento. En el caso del hormigón masivo a medida que aumenta el espesor del elemento, el aumento de temperatura en su interior (núcleo) se produce en un estado semi-adiabático debido a sus grandes dimensiones. Por otro lado, en los puntos más externos del elemento, el aumento de

temperatura debido a la hidratación del cemento es menor que en el núcleo debido a que se disipa el calor más rápidamente por estar más expuestos a las condiciones ambientales.

El enfriamiento lento del núcleo, en comparación al enfriamiento más rápido de las superficies expuestas al ambiente, se traduce en la aparición de un gradiente térmico en el espesor del elemento, en el cual la temperatura va disminuyendo a medida que se aproxima a la superficie expuesta al ambiente acorta la distancia a los bordes del elemento.

La magnitud del gradiente térmico desarrollado en el espesor de un elemento de hormigón masivo en un determinado momento depende de la temperatura inicial de colocación del hormigón, de sus propiedades (calor específico, conductividad térmica), temperatura ambiente, velocidad del viento, y tiempo transcurrido desde la colocación (Lawrence, 2009).

La Figura 2.4 muestra un gráfico típico de la evolución de la temperatura en el núcleo de un elemento masivo. En ella se señalan los siguientes parámetros:

T_0 : temperatura de colocación del hormigón a la descarga

$T_{m\acute{a}x}$: temperatura máxima en el núcleo

T_f : temperatura final de equilibrio en el núcleo

ΔT_1 aumento de temperatura semiadiabático

ΔT_2 : disminución de temperatura en el núcleo

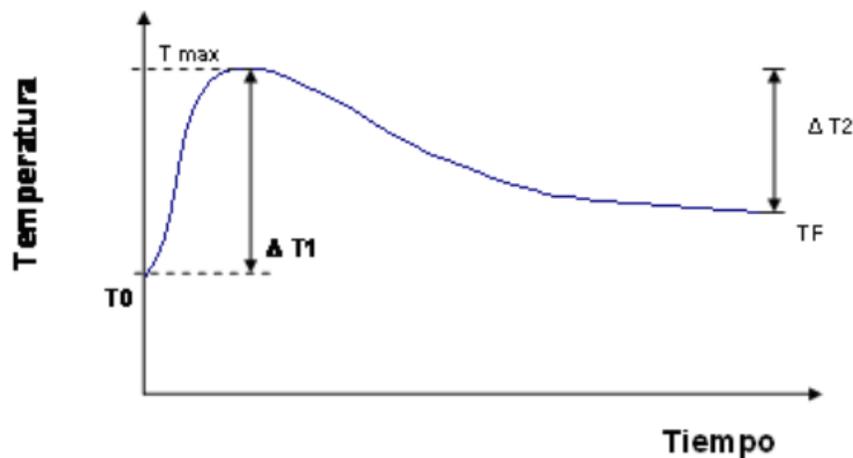


Figura 2.4: Desarrollo de temperatura en el tiempo en el núcleo de un elemento de hormigón masivo (Delfín & Figueroa, 2009).

2.5.2. Cambio de volumen

Los cambios de volumen en un elemento de hormigón se deben a las variaciones de humedad y temperatura ambiente, a las reacciones químicas de la mezcla (calor de hidratación), y a los esfuerzos producidos por cargas y reacciones externas aplicadas al elemento. Un cambio de volumen no controlado, en una estructura de hormigón es generalmente perjudicial para su serviciabilidad y/o durabilidad.

Todos los elementos y estructuras de hormigón están sometidos a cambios de volumen a lo largo de su vida útil. En algunos casos, estos cambios de volumen pueden ser uniformes, sin embargo, en el caso de elementos masivos de hormigón, los cambios de volumen no son uniformes debido a las grandes dimensiones del elemento (ACI 207.2R, 2007).

En un elemento de hormigón masivo, el aumento de temperatura debido al calor generado ruante la hidratación del cemento, bajo condiciones semi-adiabáticas, se produce un efecto de expansión en el núcleo, y el elemento tiende a dilatarse en esa zona. Por otro lado, en los sectores cercanos a los bordes, que se encuentran a temperaturas menores, cercanas a la temperatura ambiente, el hormigón impide la dilatación del hormigón del núcleo, generándose un estado tensional de tracción que alcanza hasta cierta profundidad del elemento.

Cabe destacar que las altas temperaturas alcanzadas en el núcleo del elemento también pueden resultar en una alteración de los compuestos hidratados, descomponiéndose la etringita para regenerarse en una etapa posterior cuando el hormigón se encuentra endurecido. Este compuesto denominado “etringita tardía”, o DEF (por sus siglas en inglés)², es significativamente más voluminoso (efecto expansivo), y tiende a tensionar y fisurar el elemento en su etapa de servicio.

La Figura 2.5 representa un esquema de los cambios volumétricos que experimenta un elemento de hormigón masivo debido a los gradientes de temperatura que se desarrollan desde su interior al exterior.

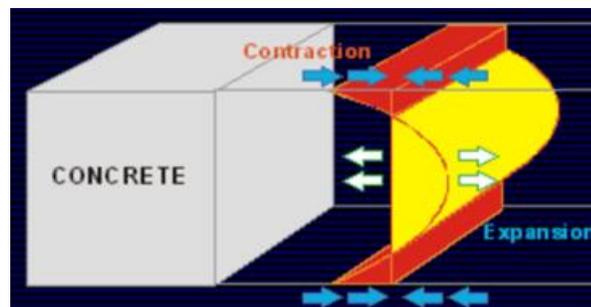


Figura 2.5: Esquema de los cambios de volumen que experimenta un elemento masivo debido a los gradientes de temperatura.

Los factores térmicos que influyen en la variación de volumen al colocar el hormigón son (ACI 207.2R, 2007):

- Temperatura inicial de colocación
- Fase de generación de calor
- Fase de enfriamiento o de disipación de calor

² Delayed ettringite formation

El control de estos factores al momento de confeccionar un elemento masivo resulta clave al momento de evitar un comportamiento térmico que perjudique la serviciabilidad o la vida útil de la estructura.

2.5.3. Restricciones

En el caso de los elementos de hormigón masivo se reconocen 2 tipos de restricciones (ACI 207.2R, 2007):

- **Restricción externa**

Es la restricción producida por el contacto entre elemento de hormigón y cualquier superficie de borde sobre la cual se colocó (terreno natural, fundación, elemento aledaño, etc.).

Este tipo de restricción impide la contracción de los bordes del elemento masivo producida por los gradientes térmicos.

- **Restricción interna**

Este tipo de restricción existe en elementos que experimentan cambios no uniformes de volumen al desarrollar una mayor temperatura en su interior que en sus bordes. Al dilatarse el núcleo y contraerse los bordes, se crea una restricción interna a lo largo de la superficie debido a los esfuerzos de compresión y tracción desarrollados en el núcleo y los bordes del elemento, respectivamente (Figura 2.6). La restricción interna se materializa como un límite entre la zona del elemento que sufre pérdida de calor más rápido y aquella donde se genera una condición semi-adiabática, siendo este límite la envolvente donde los esfuerzos son nulos.

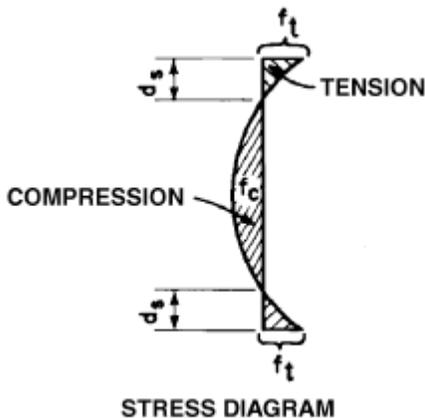


Figura 2.6: diagrama de tensiones al interior del hormigón masivo (ACI 207.2R, 2007).

2.5.4. Fisuración

Dado el desarrollo de gradientes térmicos en elementos masivos y su consecuente cambio volumétrico, sumado a las restricciones de la estructura, se inducen esfuerzos opuestos al interior del elemento. Todo esto se resume en la Figura 2.7.

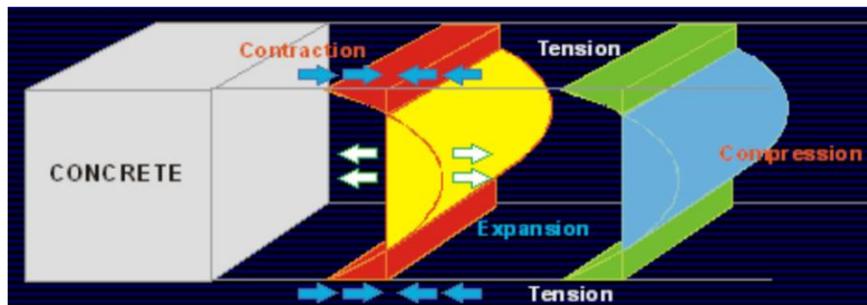


Figura 2.7: esquema que resume el comportamiento térmico y tensional del hormigón masivo (Bornand, 2015).

Durante edades tempranas (1 a 3 días) el hormigón tiene un comportamiento mayoritariamente elástico, por lo que no se presentan esfuerzos considerables cuando se alcanza la máxima temperatura en el elemento. Sin embargo, cuando comienza la etapa de enfriamiento, el hormigón comienza a ganar resistencia y rigidez rápidamente, lo que se traduce en una rápida pérdida de elasticidad. Bajo este escenario, si el elemento se encuentra restringido externamente, de tal forma que se impida su contracción, se producirán esfuerzos de tracción. Si los esfuerzos de tracción desarrollados superan la capacidad a la tracción del hormigón, se producirán fisuraciones en el elemento masivo (ACI 207.1R, 2005).

Dependiendo de la velocidad a la que se produce el descenso de temperatura en los sectores del elemento y la edad del hormigón, las fisuraciones producidas pueden resultar críticas provocando un debilitamiento en la resistencia del material afectando su resistencia final haciéndolo insuficiente para las cargas de diseño, o bien puede permitir la infiltración de compuestos que deterioran el hormigón y reducen su durabilidad.

Como se mencionó anteriormente, la condición semi-adiabática que se desarrolla en el núcleo del elemento masivo, debido al calor de hidratación del cemento, trae consigo un aumento descontrolado de temperatura que puede llevar a la formación de etringita tardía (DEF) que genera un efecto expansivo. Este efecto, sumado a la restricción interna del elemento, podría llegar a provocar fisuras en el núcleo, si es que los esfuerzos de compresión desarrollados superan a la resistencia del hormigón a temprana edad.

Como el hormigón tiene buen desempeño frente a los esfuerzos de compresión, pero baja resistencia a la tracción, es esperable que el desarrollo de fisuras inicie en la superficie cerca de los bordes y esquinas del elemento (Lawrence, 2009).

La Figura 2.8 muestra los dos tipos de fisuraciones que se pueden producir en un elemento de hormigón masivo.

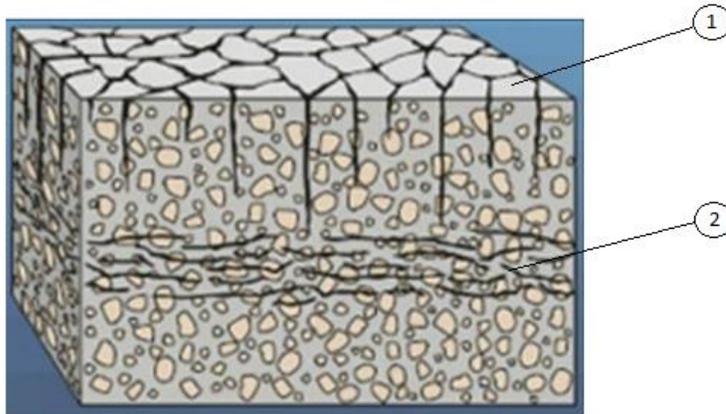


Figura 2.8: (1) Fisuraciones superficiales de baja profundidad debidas a las tensiones inducidas por el gradiente térmico y las restricciones (internas y externas) del elemento. (2) Fisuraciones en el núcleo del elemento debidas al esfuerzo de compresión inducido por los gradientes térmicos, la restricción interna y/o la formación de etringita tardía.

Lo anterior permite identificar dos parámetros que deben ser considerados a la hora de diseñar y construir estructuras de hormigón masivo:

- Gradientes de temperatura entre el núcleo y los bordes
- Temperatura máxima en el núcleo

2.6. Factores que inciden en el comportamiento térmico del hormigón

Como se explicó anteriormente en los elementos de hormigón masivo ocurren aumentos considerables de temperatura en su interior producto de que el calor generado en la hidratación del cemento es disipado lentamente, generando gradientes de temperatura en el elemento. A continuación, se describen alguno de los factores que inciden en el desarrollo de gradientes y diferenciales térmicos al interior del hormigón masivo.

2.6.1. Composición del cemento

Como ya se vio anteriormente, la composición del cemento influye en la cantidad de calor de hidratación generado, producto de las reacciones químicas del agua con el cemento y las adiciones cementantes.

Si se analizara el desarrollo del calor de hidratación en un escenario adiabático (sin pérdida de calor), entonces la temperatura máxima alcanzada sería la temperatura inicial de colocación sumada, únicamente, al aumento de temperatura producto del calor liberado en la hidratación de todo el material cementicio existente. Así, se obtendrían las curvas de mayor temperatura en los casos de los cementos que tienden a generar mayor calor de hidratación producto de la composición de su clinker y de las adiciones incorporadas en la fabricación del cemento (Capítulo 2.2).

Considerando que el núcleo de un elemento de hormigón masivo simula un escenario aproximadamente adiabático, su curva de desarrollo de temperatura correspondería al aumento de

temperatura debido únicamente al calor generado en la hidratación del cemento que, por la condición adiabática, no es disipado. La Figura 2.9 muestra el aumento de temperatura adiabática en un elemento de hormigón masivo para cada tipo de cemento Portland según la clasificación ASTM; en ella se observa que la curva que alcanza las mayores temperaturas corresponde a aquella del cemento Portland tipo III, seguida por la del cemento tipo I, tipo II y tipo IV. Si se compara la gráfica con los datos de calor de hidratación de la Tabla 2.2 se puede observar cómo la composición del cemento efectivamente puede incidir de forma considerable en el desarrollo de temperatura al interior de un elemento de hormigón masivo.

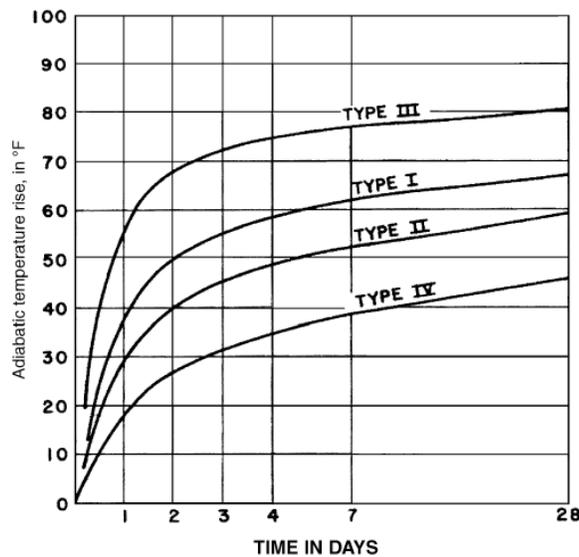


Figura 2.9: aumento de temperatura adiabática por encima de la temperatura inicial de un hormigón masivo que contiene 223 kg/m^3 de cemento, para los distintos tipos de cemento Portland según ASTM (ACI 207.2R, 2007)

2.6.2. Temperatura de colocación

La temperatura del hormigón recién mezclado está influenciada por la temperatura de cada uno de sus componentes, por sus calores específicos y por la proporción de cada uno de ellos en la mezcla (ACI 207.4R, 2005).

En una mezcla de hormigón, los áridos suelen ser el componente de mayor proporción, por lo que su temperatura en la mezcla influye en gran medida en la temperatura de colocación del hormigón. Por otro lado, la porción de cemento en una mezcla de hormigón suele ser pequeña, por lo que la influencia de su temperatura en la temperatura de colocación del hormigón no es de mayor relevancia.

Es común que una de las medidas de control de temperatura en estructuras de hormigón masivo sea controlar la temperatura de colocación mediante un enfriamiento previo de los áridos, o bien sustituyendo parte del agua líquida por hielo en escamas, teniendo la precaución de cumplir con la proporción dada por el diseño de la mezcla.

La Figura 2.10 muestra la influencia de la temperatura de colocación en el desarrollo de temperatura en condiciones adiabáticas para una mezcla con cemento Tipo I, donde se observa que,

a una mayor temperatura de colocación, se alcanzan mayores temperaturas luego de confeccionada la mezcla.

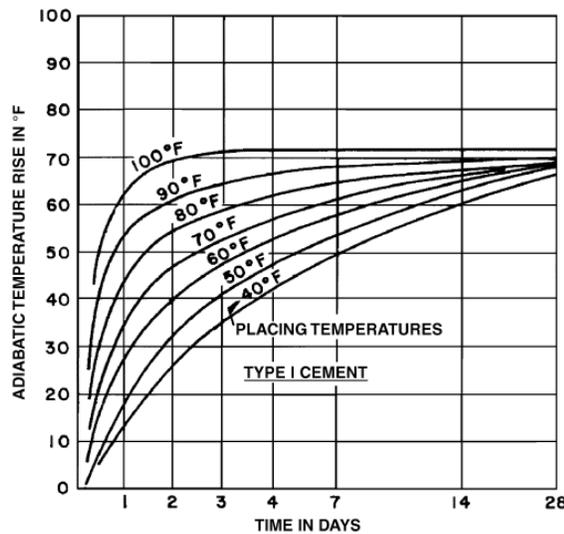


Figura 2.10: efecto de la temperatura de colocación en el aumento de temperatura adiabática de un hormigón masivo que contiene 223 kg/m^3 de cemento Portland (tipo I) (ACI 207.2R, 2007).

La temperatura de colocación del hormigón suele estimarse a un valor igual, o levemente superior ($\approx 6^\circ\text{C}$), a la temperatura ambiente. Las especificaciones técnicas y/o las normativas suelen limitar la temperatura máxima y mínima de colocación para hormigones bajo condiciones normales o extremas (ACI 207.2R, 2007).

2.6.3. Condiciones ambientales

El factor ambiental se relaciona con el factor de la temperatura de colocación, ya que bajo condiciones ambientales extremas se deben tomar precauciones para evitar temperaturas que puedan impedir cumplir con los requerimientos de temperatura máxima y con el diferencial de temperatura entre el núcleo y la superficie expuesta que establecen las especificaciones para hormigón masivo (normativa o especificaciones técnicas del proyecto).

Además de considerar las condiciones ambientales y la temperatura de colocación del hormigón, también se deben tomar medidas para implementar sistemas de aislación térmica durante la fase de curado y los primeros días desde la confección del hormigón, para controlar que no se supere el nivel de diferencial térmico especificado. Por ejemplo, si se hormigona un elemento masivo en la época de invierno, es necesario aislar el elemento de las condiciones ambientales para evitar altos gradientes de temperatura evitando un rápido descenso de la temperatura superficial del elemento; esto se logra cubriendo las superficies libres con planchas de aislapol y/o mantas térmicas.

En el documento ACI 207.4R-05 se entregan algunos lineamientos de sistemas y metodologías de pre-enfriamiento, de post-enfriamiento y aislación de superficies para el hormigón masivo considerando las condiciones ambientales.

Por su parte, el documento técnico ACI 305R-10 proporciona una guía de recomendaciones para hormigonado en tiempos calurosos; y lo propio hace el documento ACI 306R-10 para el hormigonado en tiempos fríos.

En definitiva, las condiciones ambientales durante el proceso constructivo son determinantes tanto para la temperatura de colocación, como para el desarrollo de gradientes de temperatura en un elemento de hormigón masivo, en sus primeros meses de vida.

CAPÍTULO 3: PATOLOGÍAS EN HORMIGÓN MASIVO – CASOS HISTÓRICOS

En este capítulo se describen algunos casos históricos donde se evidenciaron patologías en el hormigón debido al particular comportamiento térmico de elementos masivos que fue explicado en el capítulo anterior.

El objetivo de este capítulo es mostrar la experiencia que en la práctica han enfrentado estructuras masivas de hormigón, donde se ha lidiado con consecuencias y problemáticas asociadas al comportamiento térmico de las estructuras que involucran elementos de hormigón masivo

Los casos expuestos evidencian que el tema de control de temperatura en estructuras masivas de hormigón se viene tratando desde hace tiempo alrededor del mundo, independiente del origen de los materiales constituyentes del hormigón y de los climas bajo los cuales se construyen las estructuras.

3.1.Represa Fontana, Estado Unidos, 1942

Altura sobre cimientos: 146 m

Ancho de fundación: 114 m

Longitud de coronación: 721 m

Capacidad de embalse: 1.780 millones de m³

Volumen de hormigón: 2.152.222 m³



Figura 3.1: represa Fontana, Carolina del Norte, Estado Unidos

La represa Fontana corresponde a una presa gravitacional. Su construcción comenzó en 1942 y finalizó en 1944. Durante su construcción se implementaron juntas de contracción verticales que conectaban grandes secciones de la presa permitiendo su expansión y contracción.

La primera vez que se observó un patrón de fisuración fue el año 1949, cuando comenzó el movimiento aguas arriba. A finales de 1972, durante una inspección, se detectó una gran fisura longitudinal en una galería de servicio (Figura 3.2), lo que motivó a realizar una investigación destinada a describir las causas de la fisuración, valorar los daños y proponer medidas de rehabilitación. La investigación fue dirigida por la Universidad de Cornell y permitió aplicar las teorías de la mecánica de la fractura en régimen elástico y lineal a una gran estructura de hormigón.

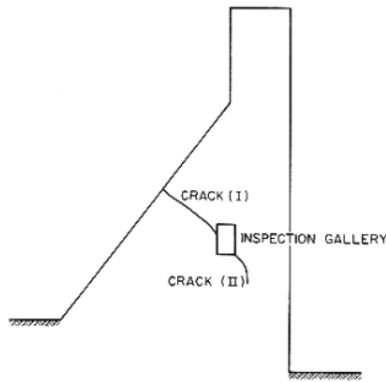


Figura 3.2: esquema de la fisura detectada en la presa Fontana

Como consecuencia de la investigación realizada, se detectaron dos causas principales de la fisuración: dilatación térmica y presencia de hormigón expansivo.

La orientación de la presa era tal que el paramento aguas abajo se orientaba hacia el sur, propiciando una considerable absorción de calor durante los meses de verano, generando dilataciones que generaban grandes esfuerzos longitudinales en el codo de la presa que tendían a volcarla hacia aguas arriba. Este movimiento generaba tracciones en el paramento aguas abajo capaces de iniciar la rotura del hormigón. Esta hipótesis fue confirmada tras la instalación de extensómetros para medir el movimiento de la fisura, comprobando en el verano de 1973 que la fisura se abría al aumentar la temperatura del hormigón. Además, tras modelaciones computacionales se demostró que los efectos térmicos eran dominantes en comparación con aquellos del peso propio y la hidrostática, y tendían a volcar la presa hacia aguas arriba.

La segunda causa de la fisuración se atribuyó a la dilatación del hormigón por reacción química entre los álcalis del cemento y la sílice activa de los áridos, la que genera un gel expansivo que al estar restringido genera fuertes presiones internas.

Tiempo después se descubrió una tercera causa de fisuración. Durante la construcción de la presa, se instalaron tuberías al interior del hormigón para reducir las altas temperaturas provocadas por la generación de calor en la hidratación del cemento y la baja capacidad de conducción térmica del hormigón masivo, siendo ésta una técnica común de post-enfriamiento en estructuras de hormigón masivo. Sin embargo, la reducción de temperatura al interior del hormigón de la presa Fontana fue excesivo y se tuvo que recalentar el interior de la estructura para lograr un equilibrio con la superficie exterior que se calentaba por efecto del sol. Estos diferenciales térmicos, que resultaron tener una dirección contraria al común de los elementos masivos (mayor temperatura al interior que el exterior), contribuyeron a la fisuración de la estructura.

Para contrarrestar la fisuración se tomaron varias medidas, unas de carácter temporal y otras definitivas o a largo plazo. Una de las medidas inmediatas, pero temporal, fue regar la zona afectada durante los meses calurosos, esto permitió que las tracciones se redujeran a la mitad y que el desplazamiento máximo de la coronación en dirección aguas arriba fuera 6 mm menor que el verano anterior.

Entre otras medidas se encuentran la costura de la fisura mediante tendones postensados y la realización de un corte vertical de 30 m de profundidad y 10 cm de ancho, para aliviar la zona fisurada del empuje horizontal. Siendo la última la más eficaz y duradera.

En 1976 concluyeron los trabajos de rehabilitación y, desde entonces, la presa fue monitoreada por el TVA (Tennessee Valley Authority), tomando lecturas semanales de la zona fisurada asegurando un control de su desarrollo. Hasta 1985 aún se evidenciaba que la presa seguía “creciendo”, existiendo un desplazamiento de 11,43 cm aguas arriba en la coronación.

(Elices, Llorca, & Ingraffea, 1985)

3.2.Represa El Altazar, España, 1968

Altura sobre cimientos: 134 m

Ancho de fundación: 52,3 m

Longitud de coronación: 400 m

Capacidad de embalse: 426 millones de m³

Cota máxima de llenado: 870 m.s.n.m.



Figura 3.3: represa El Altazar, comunidad de Madrid, España

La represa El Altazar corresponde a una presa de bóveda gruesa (en arco), de doble curvatura. Su construcción comenzó el año 1968, y su fase de hormigonado tuvo una duración de 4 años. A pesar de no concluir aun su etapa de hormigonado, el primer embalse parcial comenzó a finales de 1970, para el mes de marzo de 1971 la cota del embalse alcanzó una cota de 824 m.s.n.m., la que se mantuvo hasta el 31 de enero de 1972, momento en que se reanudó el llenado alcanzando una cota de 860 m.s.n.m. en abril de ese mismo año.

Durante la primera fase de llenado el comportamiento de la presa había estado dentro de los rangos considerados normales dada la envergadura del proyecto, sin embargo, en la fase de llenado comprendido entre las cotas 824 y 860, se comenzó a evidenciar un comportamiento anómalo acusando una asimetría en los movimientos de la presa, ocurriendo un mayor movimiento en el margen izquierdo de la estructura en comparación al margen derecho. Esta anomalía se podría considerar previsible, ya que el margen izquierdo de la presa se apoyaba en un tipo de suelo menos rígido y más deformable que aquel que sostenía el margen derecho, además, en el margen derecho se había construido un soporte que rigidizaba esa zona.

Entre los meses de enero y febrero de 1972, y coincidiendo con la etapa final de llenado, se abrió una fisura por el paramento aguas arriba en la cota 770 de la presa (a casi 30 m sobre la cimentación), la que fue sometida a un tratamiento con inyección de mortero e instalación de

drenes. Además, se detectó una familia de fisuras altas entre las cotas 800 y 845, que indudablemente se habían producido antes de comenzar el llenado del embalse y la inyección de juntas.

Desde abril de 1972 hasta diciembre de 1977 la presa había funcionado con normalidad y sus movimientos registrados correspondían al efecto combinado de las variaciones térmicas y las variaciones de la carga hidrostática.

Entre septiembre de 1977 y febrero de 1978 la presa no había sufrido variaciones en su nivel de llenado, sin embargo, la presa llegó a su máximo nivel de deformación hacia aguas abajo debido a la disminución de la temperatura ambiente, presentando nuevamente mayores deformaciones en su margen izquierdo respecto al derecho. Las lecturas de las deformaciones fueron registradas por péndulos ubicados en distintos bloques de la estructura. Cabe señalar que casi todo el año 1977 la fisura existente en el hastial aguas arribas escurría agua por los drenes instalados en 1972 que atravesaban la fisura. A finales de 1977 el caudal aforado en los drenes comenzó a ser considerable llegando a los 25 l/seg.

Durante el mes de enero y los primeros días de febrero de 1978, el embalse estaba en torno a los 864 m.s.n.m. En esos días las fuertes lluvias provocaron un aumento de la cota del embalse desde 864 (1 de febrero) hasta llegar a 868,72 (18 de febrero). Como consecuencia a este aumento de cota, se evidencia un aumento en la entrada de agua por la propia fisura existente y sus drenes de control, llegando a cerca de 150 l/seg. Además, se observa que la fisura se habría extendido a bloques aledaños, propagándose hasta casi 45 m hacia la izquierda y derecha de la estructura, siendo visible desde las galerías de inspección de la presa.

Dado lo anterior se procedió a regular inmediatamente la cota del embalse mediante el accionamiento de los desagües, reduciendo paulatinamente la cota hasta llegar a los 864,3 m.s.n.m., cota que, aparentemente, logró estabilizar la propagación de la fisura.

En 1979 se reparó la fisura evitando vaciar el embalse para evitar problemas de sequía en las ciudades que se abastecían del embalse, entre ellas Madrid.

En 1980 se alcanzó el máximo nivel de llenado (870 m.s.n.m.) sin mayores consecuencias.

A la fecha la presa continua en funcionamiento.

(Urbistondo & Yges, 1982)

3.3. Puente Deep Creek, Australia, 1981

El puente Deep Creek ubicado en la costa noreste de Australia fue construido el año 1981. Dada su ubicación, la estructura está sometida a un contacto permanente con agua salada.

A menos de 20 años desde su construcción, el puente comenzó a presentar daños visibles evidenciando un prematuro deterioro de sus elementos de hormigón. Los daños más severos

corresponden a fisuras verticales a lo largo de las columnas de las estructuras de soporte del puente (pier). De acuerdo a una inspección visual se sospechaba que la reacción álcali-árido y la corrosión de las barras de refuerzo eran los principales responsables de la formación de fisuras.

En un estudio que buscaba las causas del deterioro en los elementos del puente, se extrajeron 8 testigos desde las zonas fisuradas de las columnas y se confirmó la presencia de reacciones álcali-árido en el hormigón, producto de la composición de los áridos utilizados en las mezclas.

Las columnas en cuestión correspondían a elementos prefabricados de grandes dimensiones, con un diámetro de 950 mm, que pudieron estar expuestos a aumentos de temperaturas superiores a 80°C debido al calor de hidratación del cemento y la baja conductividad térmica del hormigón. Este comportamiento habría tenido como consecuencia el desarrollo de etringita tardía (DEF), generando un efecto expansivo al interior del hormigón, contribuyendo al desarrollo de grietas y aumentando el deterioro prematuro de la estructura.

Adicionalmente, los estudios realizados evidenciaron ataques de cloruros a las armaduras, generando su corrosión y un efecto expansivo al interior del elemento de hormigón armado. Se presume que el ataque de cloruros haya sido exacerbado por las microfisuras generadas por la reacción álcali-árido.

Si bien se cree que la fisuración inducida por el comportamiento térmico no fue la causa principal del deterioro de la estructura, se destaca el efecto combinado entre la reacción álcali-árido, ataque de cloruros y altas temperaturas en la mezcla que resultaron en los problemas de durabilidad que resultan ser críticos en estructuras ubicadas en ambientes agresivos, como el borde costero.

(Shayan & Morris, 2005)

3.4. Fundaciones masivas (pile caps) de edificios, Brasil, 2016

Existen diversos estudios sobre las causas que generaron el desarrollo de fisuras en fundaciones masivas en distintas localidades del mundo. La primera vez que se atribuyó el desarrollo de etringita tardía (DEF) como responsable del deterioro de un elemento de hormigón fue en Finlandia en 1987, evidenciando daños en durmientes prefabricados de las líneas férreas que habrían sido sometidos a un indebido tratamiento térmico y expuestos a humedad.

Además de Finlandia, existen varios casos reportados de deterioro y fisuración de elementos prefabricados, como por ejemplo en Inglaterra donde se atribuye la deformación de DEF a severos daños evidenciados en puentes en un periodo de 8 a 20 años después de su construcción. Otro ejemplo es Francia en los 1990's, donde se determinó que la causa de los daños evidenciados en un periodo entre 5 y 10 años después de finalizada la construcción, se atribuía más a la formación de DEF que a la reacción álcali-árido.

Todos estos casos tienen algunos factores en común, entre ellos se encuentra la época en que los elementos fueron confeccionados, correspondiendo al periodo de verano, exponiendo los

elementos a altas temperaturas; además, los elementos tenían un alto contenido de cemento (entre 420 kg/m^3 y 550 kg/m^3) y los áridos empleados en el hormigón tenían un alto contenido de álcali ($>4 \text{ kg/m}^3$). Todos los elementos afectados eran de grandes secciones, con una dimensión mínima de 60 cm, y su desarrollo de temperatura estimaba un máximo cercano a los 80°C .

Entre los estudios de casos que existen, se destaca la publicación realizada por Torres y Andrade (2016), donde se realiza un análisis de riesgo de formación de (DEF) en fundaciones masivas de edificios ubicados en la región metropolitana de Recife.

En su estudio, Torres y Andrade reportan la creciente preocupación por el aumento de casos de deterioro de muchas de estas estructuras de hormigón que, en primera instancia, se atribuían a la reacción álcali-árido. Sin embargo, estudios empíricos desarrollados en la publicación determinaron que la influencia de la formación de DEF, debido a las altas temperaturas alcanzadas en los elementos en cuestión, contribuyeron a la aparición de fisuras y consecuente deterioro de las estructuras.

Torres y Andrade confirman el riesgo que se desencadene la formación de DEF en fundaciones masivas, siendo las propiedades térmicas y la composición química del hormigón utilizado en la región de Recife los factores que otorgan las condiciones ideales para que se forme DEF al interior de los elementos masivos, y por consecuencia cause deterioro provocando problemas de durabilidad.

(Torres & Andrade, 2016)

CAPÍTULO 4: MÉTODOS PREDICTIVOS DE DESARROLLO DE TEMPERATURA

A continuación, se presentan los métodos predictivos del comportamiento térmico en elementos de hormigón masivos, que fueron evaluados en el presente trabajo de título para ser contrastados con los resultados obtenidos del desarrollo experimental.

4.1. Método PCA

En un texto de la Portland Cement Association (PCA) titulado “Diseño y Control de Mezclas de Hormigón” se entrega un método rápido y simple para estimar la temperatura máxima, en condiciones adiabáticas, que se desarrolla al interior de elementos de hormigón masivo. En dicho método, referido de aquí en adelante como PCA, se asume un aumento de 12°C por sobre la temperatura de colocación por cada 100 kg de cemento Portland sin adiciones (tipo I) que contempla la mezcla.

El método PCA es apropiado para mezclas de hormigón que contienen entre 300 y 600 kg/m³, y asume una dimensión mínima del elemento de 1,8 m. Sin embargo, en un trabajo publicado en el ACI Materials Journal se verificó que el método estimó de forma razonable la máxima temperatura alcanzada al interior de varios elementos que no cumplían con todos los requerimientos del método (Riding, Poole, Schindler, Juenger, & Folliard, 2006).

Este método considera todos los cementos tipo I de la ASTM C150 como iguales y no entrega consideraciones para cementos con adiciones, sin embargo, el ACI Committee 207 sugiere una modificación que sí considera la influencia de los materiales cementicios suplementarios (SCMs por sus siglas en inglés). El comité de la ACI sugiere que se considere el calor contribuido por las puzolanas como el 50% del calor que se habría generado por ese mismo peso en cemento Portland (tipo I).

La expresión dada por el método PCA, incluyendo la sugerencia del ACI Committee 207, se presenta a continuación:

$$T_{max} = T_i + \left(12 \cdot \frac{W_c}{100}\right) + \left(6 \cdot \frac{W_{scm}}{100}\right) \quad (\text{ec. 4.1})$$

Donde:

T_i : temperatura de colocación del hormigón, en °C.

W_c : peso de cemento Portland, en kg/m³.

W_{scm} : peso de materiales cementicios suplementarios, en kg/m³.

El método PCA no considera la influencia del tipo de cemento utilizado en la mezcla, no permite determinar el momento en que se alcanza la máxima temperatura, y no permite cuantificar diferenciales de temperatura.

A pesar de no ser un método predictivo adecuado para un proyecto de mayor relevancia, es una herramienta útil para rápidas estimaciones para verificar el efecto del contenido de cemento en el nivel de temperatura máxima alcanzado por un elemento (Riding, Poole, Schindler, Juenger, & Folliard, 2006).

4.2. Método Gráfico

El comité 207 del American Concrete Institute (ACI), en su reporte técnico sobre los efectos de fisuración que generan las variaciones térmicas y de volumen en hormigón masivo, entrega un método predictivo de desarrollo de temperatura al interior de elementos masivos de hormigón, basado en ábacos y ecuaciones determinados de forma empírica (de ahí su denominación de “método Gráfico”).

El método Gráfico de la ACI permite ajustes según el tamaño del elemento, condiciones de exposición, tipo de cemento, temperatura de colocación, y uso de adiciones (Riding, Poole, Schindler, Juenger, & Folliard, 2006).

La metodología de evaluación se basa en ábacos resultantes de desarrollos experimentales en los que se caracterizó el comportamiento térmico de un hormigón con un contenido de 223 kg/m^3 de cemento ASTM tipo I, con una superficie específica de $1.800 \text{ cm}^2/\text{gr}$, y con un coeficiente de difusión térmica de $0,11 \text{ m}^2/\text{día}$.

El resultado final que entrega el método es la temperatura máxima alcanzada al interior del elemento, el tiempo al que ésta es alcanzada y, de conocer la temperatura ambiente del lugar, estima el diferencial de temperatura entre el núcleo del elemento donde se desarrolla la temperatura máxima y la superficie del elemento que se encuentra expuesta a las condiciones ambientales.

Dado que los cementos han variado mucho en su composición desde que se efectuó la experimentación base para la confección de los ábacos utilizados en el método gráfico, tanto la tasa de generación de calor, como el calor total generado por los cementos actuales difieren considerablemente con lo indicado por esos ábacos (Riding, Poole, Schindler, Juenger, & Folliard, 2006).

Debido a lo anterior, se elige este modelo como uno de los métodos predictivos a evaluar en este trabajo, ya que siendo uno de los más utilizados, se precisa contrastar sus estimaciones de temperatura con aquellos resultados obtenidos con cementos que difieren en varias características con los cementos empleados en la elaboración de los ábacos, como es el caso de los cementos chilenos.

De acuerdo con lo indicado por el documento ACI 207.2R-95, el método se desarrolla como sigue:

a) Cálculo de la relación V/S

Corresponde a determinar la relación existente entre el volumen del elemento (V) y la superficie que se encuentra expuesta a las condiciones ambientales (S).

Para el cálculo del volumen se debe considerar que 25 mm de moldaje equivale a 500 mm de hormigón, con esto se considera una condición semi-adiabática dada por el moldaje del elemento.

En caso de querer modelar la temperatura de un hormigón de coeficiente de difusión térmica distinto al asumido en los ábacos ($0,11 \text{ m}^2/\text{día}$), el método entrega una alternativa que corrige el valor de la relación V/S por el valor del coeficiente de difusión térmica del hormigón estudiado. La corrección está dada por:

$$\left(\frac{V}{S}\right)^* = \frac{V}{S} \cdot \frac{0,11}{\alpha^2} \quad (\text{ec. 4.2})$$

Donde:

V : volumen del elemento, en m^3 .

S : superficie del elemento que se encuentra expuesta a las condiciones ambientales, en m^2 .

h^2 : coeficiente de difusión térmica del hormigón, en $\text{m}^2/\text{día}$.

b) Estimación del tiempo al que se alcanza la temperatura máxima (t_{peak})

Considerando la relación V/S previamente calculada y conociendo la temperatura de colocación del hormigón (T_{col}), se emplea el ábaco de la Figura 4.1 para determinar el momento en que se llega a la temperatura máxima (t_{peak}). De no tener información sobre la temperatura de colocación, esta se puede asumir como 6°C por sobre la temperatura ambiente promedio del lugar (T_{amb}). En este paso se asume un cemento tipo I, con un coeficiente de difusión térmica de $0,11 \text{ m}^2/\text{día}$, correspondiente al hormigón empleado en la elaboración de los ábacos.

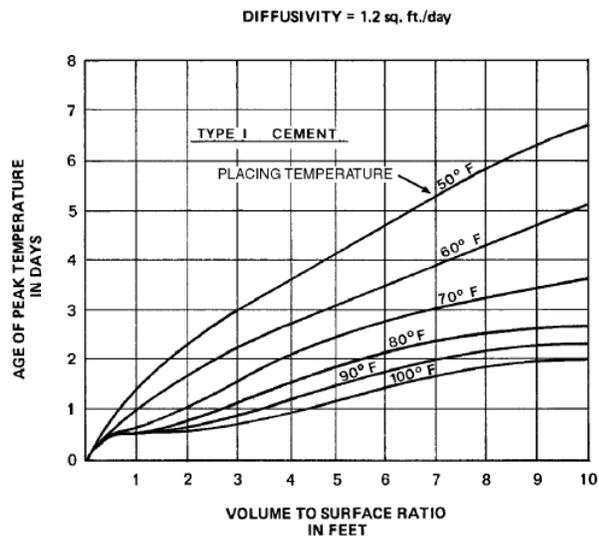


Figura 4.1: efecto de la temperatura de colocación y de la relación volumen/superficie expuesta en la edad a la que se alcanza la máxima temperatura para un hormigón confeccionado con cemento Portland (tipo I) (ACI 207.2R, 2007)

c) Determinación del porcentaje de calor disipado o absorbido ($\%C_{dis,abs}$)

El porcentaje de calor disipado o absorbido corresponde a la porción de calor generado por la hidratación del cemento que es disipado (si $T_{amb} < T_{col}$) o absorbido (si $T_{amb} > T_{col}$) hacia o desde el ambiente por el elemento de hormigón.

Para determinar este parámetro se emplea el ábaco de la Figura 4.2 considerando la relación V/S y la edad a la que se alcanza la temperatura máxima (t_{peak}), que ya fueron determinados. En este paso se asume un cemento con un coeficiente de difusión térmica de $0,11 \text{ m}^2/\text{día}$.

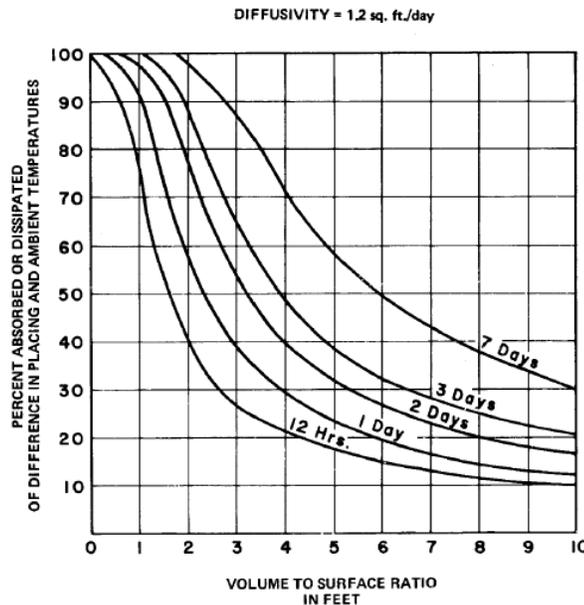


Figura 4.2: flujo de calor entre el aire y el hormigón por las diferencias entre la temperatura de colocación y la temperatura ambiente (ACI 207.2R, 2007)

d) Cálculo de la temperatura efectiva de colocación (T_{PL})

Conociendo el porcentaje de calor disipado o absorbido, la temperatura efectiva de colocación se calcula como sigue:

$$T_{PL} = T_{col} + \%C_{dis,abs} \cdot (T_{amb} - T_{col}) \quad (\text{ec. 4.3})$$

e) Determinación del incremento de temperatura para un cemento ASTM tipo I (ΔT_I)

Se determina el incremento de temperatura de un cemento tipo I empleando el ábaco de la Figura 4.3, considerando la relación V/S , la temperatura efectiva de colocación (T_{PL}) y el estado de humedad de la superficie expuesta (seca o húmeda). En este paso se asume un cemento tipo I, con un coeficiente de difusión térmica de $0,11 \text{ m}^2/\text{día}$.

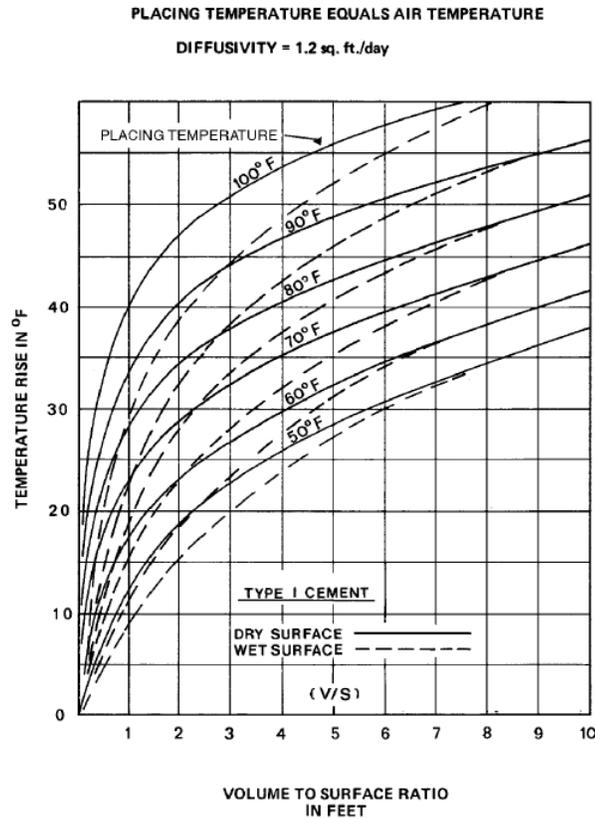


Figura 4.3: aumento de temperatura en elementos de hormigón que contienen 223 kg/m³ de cemento Portland (ASTM tipo I) para diferentes temperaturas de colocación (ACI 207.2R, 2007)

f) Corrección del incremento de temperatura por tipo de cemento o finura

Considerando que los valores obtenidos hasta este paso se determinaron en base a un cemento tipo I, se debe realizar una corrección que permita aproximar el incremento de temperatura determinado a la condición real de estudio. La corrección se realiza o por tipo de cemento o finura, pero no por ambos.

f.1) Corrección por tipo de cemento (T_C)

Se corrige el incremento de temperatura ΔT_I por el tipo de cemento de estudio, asociando este último al tipo de cemento ASTM que más se ajusta (tipo II, III o IV).

Una vez definido el tipo de cemento según la clasificación ASTM, se emplea el ábaco de la Figura 4.4 considerando el tiempo t_{peak} y el tipo de cemento correspondiente, para definir el término ΔT_C correspondiente al incremento de temperatura según el tipo de cemento empleado.

A su vez, empleando el mismo ábaco de la Figura 4.4 pero esta vez considerando un cemento tipo I y el t_{peak} , se define el término ΔT_I^* , correspondiente al incremento de temperatura para el cemento tipo I.

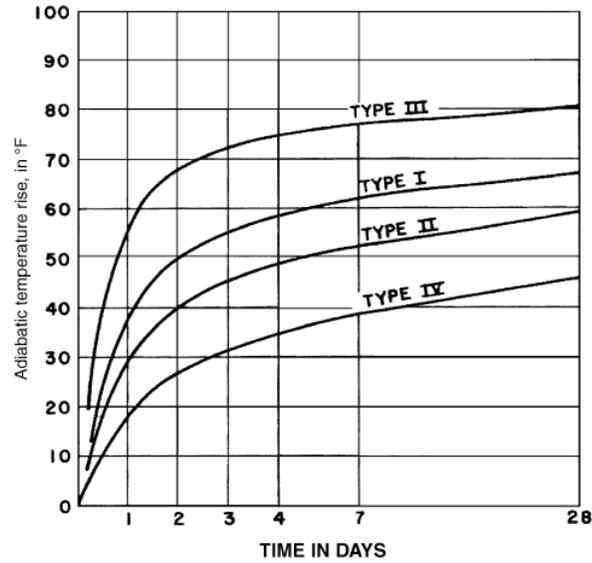


Figura 4.4: incremento de temperatura de un hormigón masivo que contiene 223 kg/m^3 para 4 tipos de cementos ASTM (ACI 207.2R, 2007)

Finalmente, el incremento de temperatura corregido por tipo de cemento se calcula como sigue:

$$T_C = \Delta T_I \cdot \left(\frac{\Delta T_C}{\Delta T_I^*} \right) \quad (\text{ec. 4.4})$$

Donde:

ΔT_C : incremento de temperatura según figura 2.1 para tipo de cemento empleado (tipo II, III o IV) y la edad a la que se alcanza la temperatura máxima (t_{peak}).

ΔT_I^* : incremento de temperatura según figura 2.1 para cemento tipo I y la edad a la que se alcanza la temperatura máxima (t_{peak}).

f.2) Corrección por finura del cemento (T_C^*)

Para corregir el incremento de temperatura ΔT_I se debe calcular un factor de corrección por finura (ΔH) de la siguiente forma:

$$\Delta H = \frac{H_R}{H_{1800}} \quad (\text{ec. 4.5})$$

Donde:

H_R : generación de calor de hidratación (en %), según ábaco de la Figura 4.5 para finura real del cemento, en cm^2/g y edad de temperatura máxima (t_{peak}).

H_{1800} : generación de calor de hidratación, según ábaco de la Figura 4.5 para finura base ($1800 \text{ cm}^2/\text{g}$) y edad a la que se alcanza la temperatura máxima (t_{peak}).

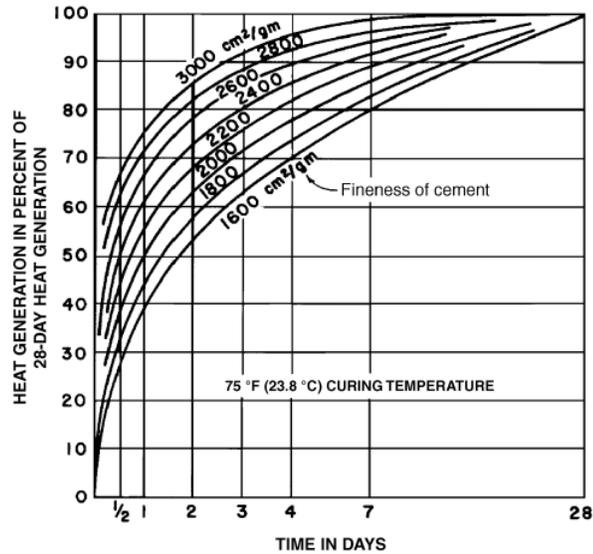


Figura 4.5: tasa de generación de calor en función de la finura según Wagner (ASTM C115) para una pasta de cemento curada a 23,8°C (ACI 207.2R, 2007)

Además de calcular el factor de corrección ΔH , se determinan un factor de corrección por calor de hidratación (ΔH_a) debido a que un cambio en la finura significa un cambio en el calor de hidratación del cemento. Dicho factor se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta H_a = 0,76 \cdot (h_g - h_l) \cdot \left(\frac{\Delta T_I^*}{H_{28}} \right) \quad (\text{ec. 4.6})$$

Donde:

h_g : calor de hidratación medido a 28 días para el cemento empleado según el ensayo ASTM C186, en cal/g .

h_l : calor de hidratación medido a 28 días para un cemento tipo I con una finura de $1.790 \text{ cm}^2/\text{gm}$, en cal/g .

H_{28} : incremento de temperatura según ábaco de la Figura 4.4 para cemento tipo I y una edad de 28 días.

Una vez definidos ambos factores de corrección, se calcula el factor global de corrección por finura (ΔT_F) según la siguiente expresión:

$$\Delta T_F = \Delta H \cdot (\Delta T_I^* + \Delta H_a) \quad (\text{ec. 4.7})$$

El término ΔT_I^* corresponde al mismo que fue definido en la Sección f.1.

Finalmente, se procede a calcular el incremento de temperatura corregido por finura como sigue:

$$T_C^* = \Delta T_F \cdot \left(\frac{\Delta T_I}{\Delta T_I^*} \right) \quad (\text{ec. 4.8})$$

g) Corrección por contenido de cemento (T_{C+F})

Además de corregir por tipo de cemento o finura, se debe realizar una corrección al incremento de temperatura debido al contenido de material cementante en la mezcla, ya que los ábacos empleados aplican para un contenido de 223 kg/m^3 de cemento Portland (ASTM tipo I).

Para realizar la corrección por contenido se debe calcular el contenido equivalente de cemento de la siguiente manera:

$$C_{eq} = C_c + \frac{C_a}{2} \quad (\text{ec. 4.9})$$

Donde:

C_{eq} : contenido equivalente real de cemento, en kg/m^3 .

C_c : contenido real de cemento Portland, en kg/m^3 .

C_a : contenido real de adiciones (puzolana natural, ceniza volante, escoria, microsílíce), en kg/m^3 .

Luego, con el valor del contenido equivalente y la corrección definida por tipo de cemento o finura, se calcula el incremento real de temperatura de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T_{C+F} = (T_c, T_c^*) \cdot \left(\frac{C_{eq}}{C_l} \right) \quad (\text{ec. 4.10})$$

h) Cálculo de la temperatura máxima del hormigón ($T_{m\acute{a}x}$)

Habiendo calculado la temperatura efectiva de colocación (T_{PL}) y el incremento de temperatura corregido (T_{C+F}), se calcula la temperatura máxima que alcanza el elemento en el tiempo t_{peak} de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T_{m\acute{a}x} = T_{PL} + T_{C+F} \quad (\text{ec. 4.11})$$

i) Cálculo de diferencial de temperatura entre interior y superficie del elemento (ΔT)

Se calcula la diferencia de temperatura entre la temperatura máxima estimada por el método predictivo y la temperatura asumida en la superficie expuesta del elemento según la expresión:

$$\Delta T = T_{m\acute{a}x} - T_{sup} \quad (\text{ec. 4.12})$$

Donde:

$$T_{sup} = T_{amb} + 15^\circ\text{C} \quad (\text{ec. 4.13})$$

Considerando el procedimiento descrito, se identifican las siguientes 4 alternativas de evaluación del método Gráfico:

- *Alternativa 1a*: no considera corrección por finura del cemento, ni por coeficiente de difusión térmica del hormigón.
- *Alternativa 1b*: considera corrección por finura del cemento, pero no por coeficiente de difusión térmica del hormigón.
- *Alternativa 2a*: no considera corrección por finura del cemento, pero sí por coeficiente de difusión térmica del hormigón.
- *Alternativa 2b*: considera corrección por finura del cemento, y por coeficiente de difusión térmica del hormigón.

4.3.Método de Schmidt

En 1920 Schmidt desarrolló un método numérico que permite solucionar la ley de Fourier que gobierna la transferencia de calor (Abeka, Adom, Osei, & Adinkrah-Appiah, 2015):

$$\frac{d}{dx} \left(k \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k \cdot \frac{dT}{dy} \right) + Q_{hid} = \rho_h \cdot c_{e,h} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (\text{ec. 4.14})$$

Donde:

Q_{hid} : término de la generación de calor, en W/m^3 .

ρ_h : densidad, en kg/m^3 .

$c_{e,h}$: calor específico, en $J/kg/^\circ C$.

T : temperatura, en $^\circ C$.

Este método corresponde a un método simplificado de diferencias finitas, donde las temperaturas son calculadas para nodos discretos predefinidos en pasos de tiempo discretos. El paso de tiempo se determina como sigue:

$$\Delta t = \frac{(\Delta x)^2}{2\alpha} \quad (\text{ec. 4.15})$$

Donde:

α : coeficiente de difusión térmica, en m^2/seg .

Δt : paso de tiempo utilizado, en seg .

Δx : espaciamiento entre nodos, en m .

De acuerdo al comité 207 de la ACI, el método de Schmidt se basa en el teorema de que, si el elemento en cuestión se divide en un número de elementos iguales, y si una serie de limitaciones físicas se satisfacen simultáneamente, entonces la temperatura para un incremento dado al final de un intervalo de tiempo es el promedio entre las temperaturas de dos elementos vecinos al inicio de ese intervalo. En términos matemáticos, si se consideran θ_p , θ_q y θ_r como las temperaturas de tres elementos sucesivos en el tiempo t , entonces al tiempo $t + \Delta t$ se tiene:

$$\theta_q + \Delta\theta_q = \frac{\theta_p + \theta_r}{2} \quad (\text{ec. 4.16})$$

El método de Schmidt es adaptable tanto a casos de estudio en 1, 2 y hasta 3-dimensiones, y se puede emplear para el estudio de estructuras masivas complejas, teniendo el alcance para evaluar la geometría del elemento, el comportamiento no lineal del hormigón, la interacción de la estructura con su fundación, relleno o cualquier material, los efectos de la secuencias constructiva, gradientes térmicos, incorporación de aislación, y fuerzas gravitacionales y superficiales (ACI 207.2R, 2007).

Para determinar la temperatura en cada nodo se emplea el desarrollo de temperatura adiabática en el tiempo del cemento en base a sus resultados de calorimetría. De esta forma, en cada paso de tiempo Δt_i la temperatura en un nodo se calcula como el promedio de las temperaturas de los nodos vecinos en el paso de tiempo anterior (Δt_{i-1}), sumado al desarrollo de temperatura adiabática en el paso de tiempo actual (Δt_i).

De acuerdo con lo indicado por el documento ACI 207.1R-96, el método se desarrolla como sigue:

a) Determinación del paso del tiempo

Se determina el paso del tiempo de acuerdo a la (ec. 4.15), ya que la relación entre el espaciamiento entre los nodos y el coeficiente de difusión térmica entregan un paso de tiempo que asegura una distribución continua de los resultados, considerando la tasa con la que se conduce el calor al interior del elemento en estudio.

b) Definición de las condiciones de borde

Los bordes del elemento y los tipos de materiales que lo rodean deben ser claramente definidos y modelados de forma tal que su interacción térmica con el hormigón sea representativa del escenario real al que será expuesto el elemento en estudio.

A modo de ejemplo, si el elemento de hormigón está en contacto con un cuerpo rocoso, se modela su incremento de temperatura como la mitad del incremento de temperatura adiabática del hormigón en el paso de tiempo dado, debido a que la roca no genera calor.

Otro caso posible es la presencia de una junta de hormigonado, en cuyo caso el incremento de temperatura a lo largo de la junta se determina como el promedio de temperatura adiabática entre las dos capas de hormigón, considerando que éstas generan calor a distinta tasa en todo momento.

Si uno de los bordes se encuentra aislado térmicamente, éste se puede modelar a través de la ampliación de la dimensión del elemento hasta lograr 1,5 veces su extensión original en dirección al borde aislado.

En cuanto a la superficie expuesta a las condiciones ambientales, se pueden considerar dos alternativas para su modelación. La primera es considerando que el incremento de temperatura

adiabática en toda la superficie es cero, ya que el calor se disipa tan rápido como se genera al interior del elemento. Mientras que la segunda alternativa es modelar la superficie expuesta considerando su coeficiente de transferencia de calor o coeficiente de convección, el cual cuantifica la influencia de las propiedades del aire, la superficie y el flujo cuando se produce transferencia de calor por convección con el medio exterior en contacto con el elemento (Babul, 2013).

Para modelar la condición descrita anteriormente, se considera el siguiente planteamiento propuesto por Rastrup en 1954:

Durante un paso del tiempo Δt , el hormigón libera calor al ambiente que se cuantifica según la siguiente relación:

$$Q_{dis} = U \cdot S \cdot (T_h - T_{amb}) \quad (\text{ec. 4.17})$$

Donde:

U : coeficiente de convección, en $kcal/m^2/h/^\circ C$.

S : superficie del elemento expuesta a condiciones ambientales, en m^2 .

T_h : temperatura del hormigón, en $^\circ C$.

T_{amb} : temperatura ambiente promedio del lugar, en $^\circ C$.

Durante el mismo paso de tiempo Δt , el elemento de hormigón desarrolla un calor de hidratación equivalente a:

$$Q_h = \Delta q \cdot C \cdot V \quad (\text{ec. 4.18})$$

Donde:

Δq : calor generado por la hidratación del cemento en el intervalo de tiempo Δt , en $kcal/kg$.

C : contenido de cemento en la mezcla, en kg/m^3 .

V : volumen del elemento de hormigón, en m^3 .

A su vez, durante el mismo intervalo de tiempo Δt , el elemento absorbe calor desde el exterior equivalente a:

$$Q_{abs} = V \cdot c_{e,h} \cdot \rho_h \cdot (T_h - T_{amb}) \quad (\text{ec. 4.19})$$

Donde:

$c_{e,h}$: calor específico del hormigón, en $kcal/kg/^\circ C$.

ρ : peso específico del hormigón, en kg/m^3 .

Luego, por equilibrio térmico se debe cumplir la siguiente condición:

$$Q_{dis} = Q_h - Q_{abs} \quad (\text{ec. 4.20})$$

Luego, considerando que T_o y q_o son la temperatura de colocación del hormigón y el calor de hidratación inicial del cemento, respectivamente, se reordena la ecuación y se obtiene:

$$T_h = T_o + \frac{C}{c_{e,h} \cdot \rho} \cdot (q - q_o) - \frac{U \cdot S}{V \cdot c_{e,h} \cdot \rho_h} \cdot (T_h - T_{amb}) \cdot \Delta t \quad (\text{ec. 4.21})$$

Conociendo los incrementos de temperatura adiabática determinados a partir el desarrollo de calor de hidratación del cemento (calorimetría); y considerando el paso del tiempo determinado en (a), la (ec. 4.21 se puede expresar como:

$$T_{h,n} = T_{h,n-1} + \Delta T_{ad,n} - \frac{U \cdot S}{V \cdot c_{e,h} \cdot \rho_h} \cdot (T_{h,n-1} - T_{amb}) \cdot \Delta t \quad (\text{ec. 4.22})$$

Donde:

$T_{h,n}$: temperatura del hormigón en el tiempo $t = n$, en °C.

T_{col} : temperatura de colocación del hormigón, en °C.

$\Delta T_{ad,n}$: incremento de temperatura adiabática del hormigón en el tiempo $t = n$, en °C.

$T_{h,n-1}$: temperatura del hormigón en el instante $t = n - 1$, en °C.

Δt : paso del tiempo, en hrs.

c) Cálculo de temperatura en nodos interiores del elemento

Para el primer paso de tiempo Δt_1 se calcula la temperatura de un nodo i como:

$$T_{i,1} = T_{col} + \Delta T_{ad,1} \quad (\text{ec. 4.23})$$

Luego, para determinar la temperatura de un nodo i al final de un intervalo de tiempo Δt_n se requiere desarrollar dos pasos:

- Promedio de temperaturas de nodos adyacentes: se calcula el promedio de las temperaturas de los nodos adyacentes en el intervalo de tiempo anterior.

$$(T_{i,n})_1 = \frac{T_{i-1,n-1} + T_{i+1,n-1}}{2}$$

- Suma de incremento de temperatura adiabática: al promedio de temperaturas de nodos adyacentes, se le suma el valor del incremento de temperatura adiabática calculado para el intervalo de tiempo actual según la curva de calor de hidratación del cemento.

$$(T_{i,n})_2 = (T_{i,n})_1 + \Delta T_{ad,n}$$

4.4. Método Concrete Temperature & Cracking Risk®

El método Concrete Temperature & Cracking Risk®, de aquí en adelante método CTK, fue creado por el Dr.-Ing. Luis Ebensperger, y actualmente se encuentra en fase de prueba.

El método CTK corresponde a un modelo químico-termo-mecánico para el estudio del agrietamiento térmico a temprana edad (hasta 7 días) en elementos de hormigón.

El objetivo del método es estimar el desarrollo de temperaturas y tensiones a temprana edad en el hormigón a través de un modelo simple uniaxial (1 dimensión), en el cual se consideran las variables asociadas a los procesos químicos (calor de hidratación del cemento), térmicos

(conductividad y transferencia de calor del hormigón) y mecánicos (desarrollo de resistencia y módulo de elasticidad).

La evaluación del modelo se realiza a través de la aplicación de un programa que entrega los resultados del historial de temperaturas y tensiones en el tiempo, al ingresar los datos de entrada que caracterizan el tipo de cemento y mezcla de hormigón, la condición del elemento a evaluar (geometría y grado de restricción) y las condiciones ambientales presentes durante la colocación y curado del elemento de hormigón.

El programa se basa en un análisis incremental que permite obtener el desarrollo de temperatura en el elemento de hormigón, tomando la condición más desfavorable de éste, es decir, la sección que se espera desarrolle las mayores temperaturas y que, a su vez, sea la que presente mayores condiciones de restricción externa.

El modelo se desarrolla según lo indicado a continuación (Ebensperger, 2018):

a) Determinación de la curva de temperatura adiabática

En base a los resultados obtenidos del ensayo de calor de hidratación del cemento (calorimetría de Langavant), y las propiedades de la mezcla a evaluar relacionadas a contenido de material cementicio, calor específico y densidad, se determina el aumento de temperatura adiabática del hormigón (ΔT_{hyd}) según la expresión:

$$\Delta T_{hyd}(t) = \frac{cem \cdot \Delta Q_{hyd}(t)}{c_{con} \cdot \rho_{con}} \quad (\text{ec. 4.24})$$

Donde:

cem : contenido de material cementicio, en kg/m^3 .

$\Delta Q_{hyd}(t)$: calor de hidratación en el tiempo, en kJ/kg .

c_{con} : calor específico del hormigón, en $kJ/kg/^\circ C$.

ρ_{con} : densidad del hormigón, en kg/m^3 .

b) Aplicación de índice de enfriamiento

A la curva adiabática determinada en (a) se le aplica un índice de enfriamiento (m) asociado a la velocidad con que se enfría la superficie de hormigón expuesta. Lo anterior se relaciona directamente con el coeficiente de convección o coeficiente de transferencia de calor (U) que describe la pérdida de calor de la superficie según el medio con el cual tiene contacto (aire) y las condiciones de viento imperantes.

La velocidad de enfriamiento de la superficie de hormigón expuesta se calcula según la siguiente expresión:

$$m = \frac{U \cdot S}{c_{con} \cdot \rho_{con} \cdot V} \quad (\text{ec. 4.25})$$

Donde:

U : coeficiente de transferencia de calor superficial del hormigón, en $\text{kJ}/\text{m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$.

S : superficie de hormigón expuesta al ambiente, en m^2 .

V : volumen del elemento de hormigón, en m^3 .

c) Cálculo de la temperatura en el núcleo del elemento

Se estima el desarrollo de temperatura en el núcleo según la siguiente expresión:

$$T_{N_c,i+1} = T_{a,i} + \Delta T_{hyd,i} + (T_{N_c,i} - T_{a,i}) \cdot \exp(-m \cdot \Delta t) \quad (\text{ec. 4.26})$$

Donde:

$T_{N_c,i+1}$: temperatura en el núcleo en el instante $t = i + 1$, en $^\circ\text{C}$.

$T_{N_c,i}$: temperatura en el núcleo en el instante $t = i$, en $^\circ\text{C}$.

$\Delta T_{hyd,i}$: incremento de temperatura adiabática en el instante $t = i$, en $^\circ\text{C}$.

$T_{a,i}$: temperatura del ambiente en el instante $t = i$, en $^\circ\text{C}$.

Δt : paso del tiempo considerado en el modelo.

d) Cálculo de la temperatura en la superficie del elemento

En primer lugar, se determina el número de Biot según la (ec. 4.27), el cual corresponde a un término adimensional que caracteriza el flujo interno de calor dentro del elemento de hormigón.

$$Bi = \frac{U \cdot L}{f_g \cdot \lambda} \quad (\text{ec. 4.27})$$

Donde:

L : espesor del elemento, en m .

λ : conductividad térmica del hormigón, en $\text{kJ}/\text{m}/\text{h}/^\circ\text{C}$.

f_g : factor geométrico adimensional que indica la cantidad de superficies de pérdida de calor.

$f_g = 2$; para muros

$f_g = 1$; para fundaciones

Luego, en cada instante de tiempo $t = i$, se calcula la temperatura superficial del hormigón según la expresión:

$$\frac{T_{N_c} - T_{S_c}}{T_{N_c} - T_a} = \frac{Bi}{Bi + 2} \quad (\text{ec. 4.28})$$

Donde:

T_{N_c} : temperatura calculada en el núcleo del elemento, en $^\circ\text{C}$.

T_{S_c} : temperatura calculada en la superficie del elemento, en $^\circ\text{C}$.

T_a : temperatura ambiente, en $^\circ\text{C}$.

Bi : número de Biot, adimensional.

e) Cálculo de diferenciales de temperatura

En base a los valores estimados para el núcleo y la superficie, se calculan dos diferenciales de temperatura en el elemento:

e.1) *Diferencial entre núcleo y superficie*

Denominado $\Delta T_{sección}$, se calcula como:

$$\Delta T_{sección} = T_{N_c} - T_{S_c} \quad (\text{ec. 4.29})$$

Permite determinar gradientes de temperatura según la distancia que existe entre el núcleo y la superficie, lo que permite determinar las tensiones en el borde del elemento de hormigón. Si las tensiones en el borde del elemento superan las tensiones de tracción máximas que resiste el hormigón en un momento determinado, se desarrollarán fisuras menores que tienden a cerrarse una vez alcanzado el equilibrio entre ambas temperaturas (rango elástico).

e.2) *Diferencial entre temperatura máxima y temperatura a 7 días*

Denominado ΔT_{axial} , se calcula como:

$$\Delta T_{axial} = T_{máx} - T_7 \quad (\text{ec. 4.30})$$

Donde:

$T_{máx}$: máxima temperatura estimada en el núcleo del elemento, en °C.

T_7 : temperatura estimada en el núcleo del elemento transcurridos 7 días desde su confección, en °C.

Es el gradiente que provoca la contracción del elemento y permite estimar las tensiones de tracción que se desarrollan en el elemento dada su restricción. Si las tensiones estimadas superan a las tensiones de tracción máximas resistidas por el hormigón, se desarrollarán grietas permanentes en el elemento (rango plástico de fisuración).

e.3) *Cálculo de temperatura a 5 cm de la cara expuesta*

De acuerdo a experiencias empíricas, se calcula la temperatura del elemento a 5 cm de la cara expuesta como la temperatura en la superficie más un porcentaje del gradiente de temperatura entre el núcleo y la superficie, como se muestra a continuación:

$$T_5 = T_{S_c} + 0,3 \cdot \Delta T_{sección} \quad (\text{ec. 4.31})$$

e.4) *Cálculo del diferencial de temperatura ΔT_5*

Se calcula el diferencial de temperatura entre la temperatura estimada en el núcleo (T_{N_c}) y la estimada a 5 cm de la cara expuesta (T_5) como se muestra a continuación:

$$\Delta T_5 = T_{N_c} - T_5 \quad (\text{ec. 4.32})$$

La Figura 4.6 muestra un gráfico de ejemplo del desarrollo de temperatura modelado mediante el método CTK. Cabe señalar que los resultados entregados por el método CTK se estiman para intervalos de 1 hora.

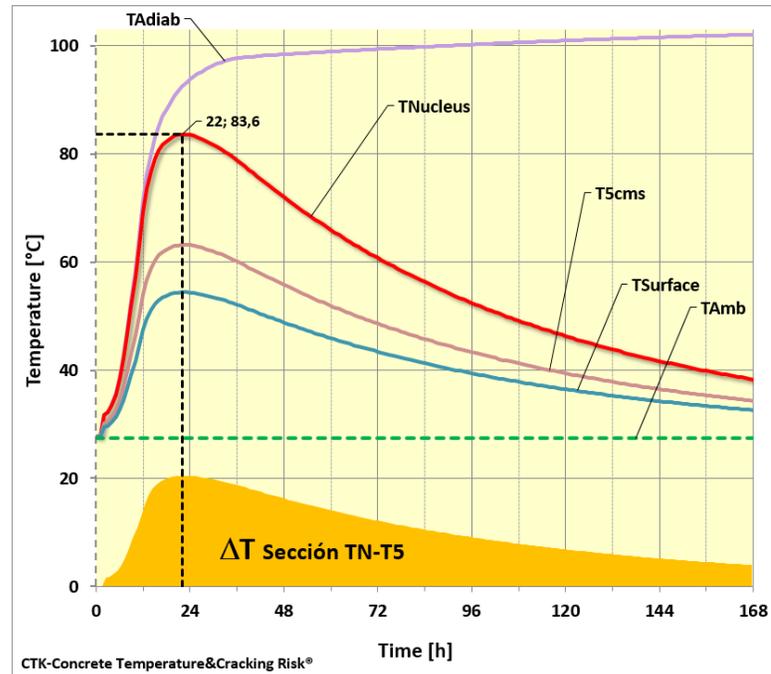


Figura 4.6: desarrollo de temperatura al interior de un elemento masivo de hormigón modelado con el método CTK

4.5. Conclusiones del capítulo

La Tabla 4.1 muestra un resumen comparativo entre los modelos predictivos estudiados, considerando los parámetros de interés que son capaces de estimar en relación al comportamiento térmico de los elementos masivos de hormigón.

Tabla 4.1: resumen comparativo de los métodos predictivos revisados

Método predictivo	Parámetro de interés que estima el método					
	Desarrollo de temperatura en el núcleo	Desarrollo del diferencial de temperatura	Temperatura máxima en el núcleo	Tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo	Diferencial máximo de temperatura	Tiempo al que se alcanza el diferencial máximo de temperatura
Método PCA			✓			
Método Gráfico			✓	✓		
Método de Schmidt	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Método CTK	✓	✓	✓	✓	✓	✓

De la tabla anterior, se observa que los métodos de Schmidt y CTK entregan toda la información necesaria para realizar un análisis térmico de elementos masivos de hormigón. Por su parte, los métodos Gráfico y PCA se centran en la estimación de los parámetros relacionados únicamente a la temperatura máxima en el núcleo del elemento.

CAPÍTULO 5: TRABAJO EXPERIMENTAL

5.1. Confección de bloques

5.1.1. Procedimiento

La etapa experimental del presente trabajo consistió en realizar un monitoreo continuo del desarrollo de la temperatura interna de un bloque cúbico de hormigón de 0,6 m de arista, durante 7 días desde su fecha de confección.

El estudio contempló 4 dosificaciones que se replicaron con 3 tipos diferentes de cemento de uso común en obras de construcción en Chile, obteniendo así un seguimiento de temperatura de 12 bloques distintos.

La Tabla 5.1 muestra las dosis de agua y cemento consideradas en la confección de los hormigones para los bloques.

Tabla 5.1: dosificaciones consideradas en los bloques

Cemento, c (kg)	300	400	500	600
Agua, a (kg)	204,25	204,25	204,25	204,25
a/c	0,68	0,51	0,41	0,34

La Tabla 5.2 muestra la denominación que se le dará de aquí en adelante a cada uno de los bloques confeccionados según su dosis y tipo de cemento empleado en la mezcla.

Tabla 5.2: denominación de bloques según dosificación y tipo de cemento

Bloque	Tipo de cemento	Dosis de cemento (kg/m ³)
ME-EX/600	ME-EX	600
ME-EX/500		500
ME-EX/400		400
ME-EX/300		300
ME-PL/600	ME-PL	600
ME-PL/500		500
ME-PL/400		400
ME-PL/300		300
ME-ES/600	ME-ES	600
ME-ES/500		500
ME-ES/400		400
ME-ES/300		300

Además de monitorear la temperatura de los bloques, a cada una de las 12 mezclas se le realizaron ensayos tanto en estado fresco, como en estado endurecido, para su clasificación y caracterización. Para cada una de las 12 mezclas, se confeccionaron 8 probetas cilíndricas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro.

Los ensayos efectuados corresponden a los siguientes:

- Asentamiento de cono de Abrams, según NCh. 1019.
- Contenido de aire, según NCh. 2184.
- Densidad en estado fresco, según NCh. 1564.
- Ensayo a compresión a 7, 14, 28 días, según NCh.1037.
- Ensayo de determinación de coeficiente de difusión térmica a 1, 2, 7, 14, 28 días, según el método de ensayo descrito en el documento CRD-C 36-73 del U.S. Army Corps of Engineers.

Por su parte, los 3 tipos de cemento empleados se caracterizaron en base a los parámetros de clasificación estipulados en la norma NCh. 148 Of. 68, los cuales corresponden a:

- Peso específico según NCh. 154.
- Superficie específica (Blaine) según NCh. 159.
- Tiempo de fraguado según NCh. 151 y NCh. 152.
- Resistencia Mecánica según NCh. 158.
- Análisis químico según NCh. 147.

Sumado a la caracterización anterior, a cada uno de los cementos se le realizó el ensayo de calor de hidratación semi-adiabático de Langavant, según el método indicado en la norma europea UNE 196-9:2010, para obtener sus propiedades de generación de calor.

Como resultado de la etapa experimental se obtienen las curvas de desarrollo de temperatura interna en el tiempo de cada bloque, y parámetros de clasificación y caracterización de cada hormigón confeccionado y de los cementos empleados en las mezclas.

5.1.2. Características del bloque

Para la confección del bloque se consideró un moldaje fabricado con madera de terciado estructural de 15 mm de espesor, el cual es forrado en su interior por polietileno y en su exterior por planchas de poliestireno expandido (aislapol) de 50 mm de espesor.

Tanto el molde como su aislación se montaron de forma tal que el bloque de hormigón se encontrara aislado en todas sus caras menos la superior (Figura 5.1), forzando así el flujo de calor por la cara expuesta al aire.

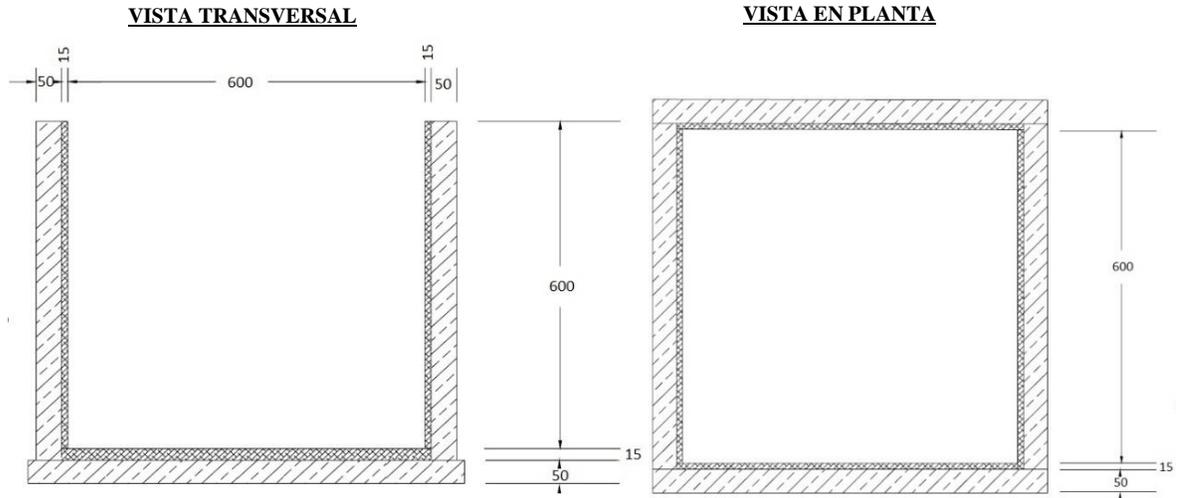


Figura 5.1: molde bloque (vista transversal y en planta)

En la Figura 5.2 se muestra un registro fotográfico de uno de los 12 moldes confeccionados en laboratorio para la elaboración de los bloques de prueba. Cabe señalar que el interior de los moldes fue forrado con polietileno para evitar pérdida de hormigón en las uniones.



Figura 5.2: molde construido en laboratorio para confeccionar los bloques

El registro de temperatura se realizó mediante la instalación de termocuplas tipo K en 7 puntos al interior del bloque y un punto fuera de él para el registro de temperatura ambiente.

Las 7 termocuplas instaladas al interior del bloque se distribuyeron en dos sondas (1 y 2), que correspondían a un tubo de PVC de ½" de diámetro al que se amarraban las termocuplas para asegurar que no se desplazaran durante la fase de hormigonado. La distribución de sondas y termocuplas al interior del bloque se muestra en la Figura 5.3.

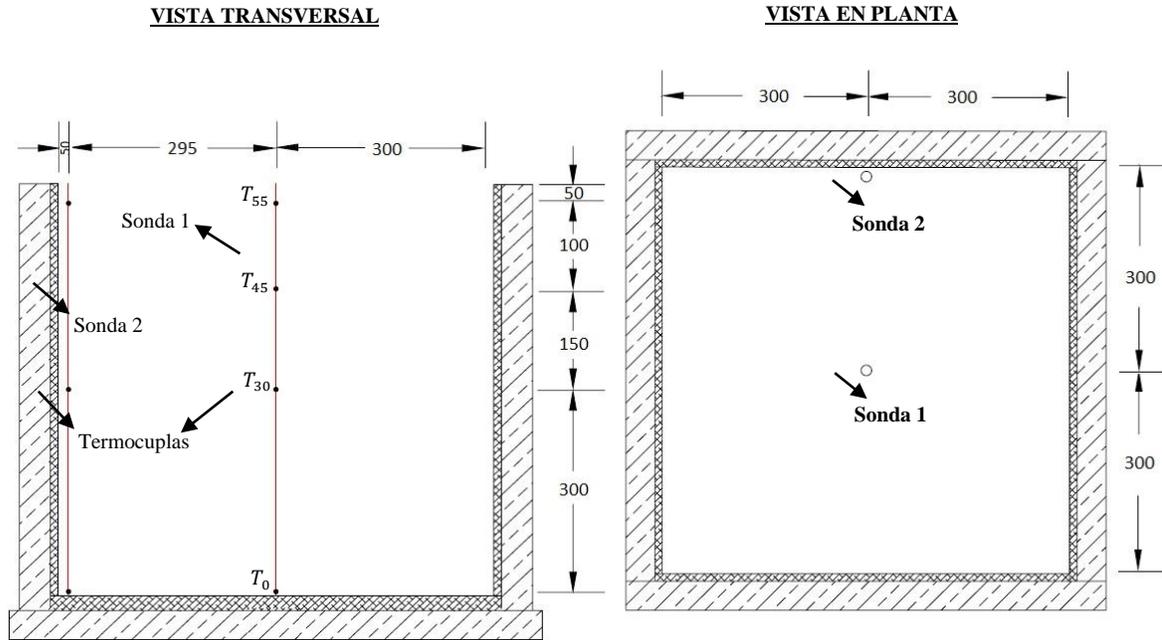


Figura 5.3: ubicación de sondas y termocuplas (vista transversal y en planta)

En la Figura 5.4 se muestra un registro fotográfico de las sondas instaladas al interior del molde, con las termocuplas situadas en las posiciones señaladas en la Figura 5.3.

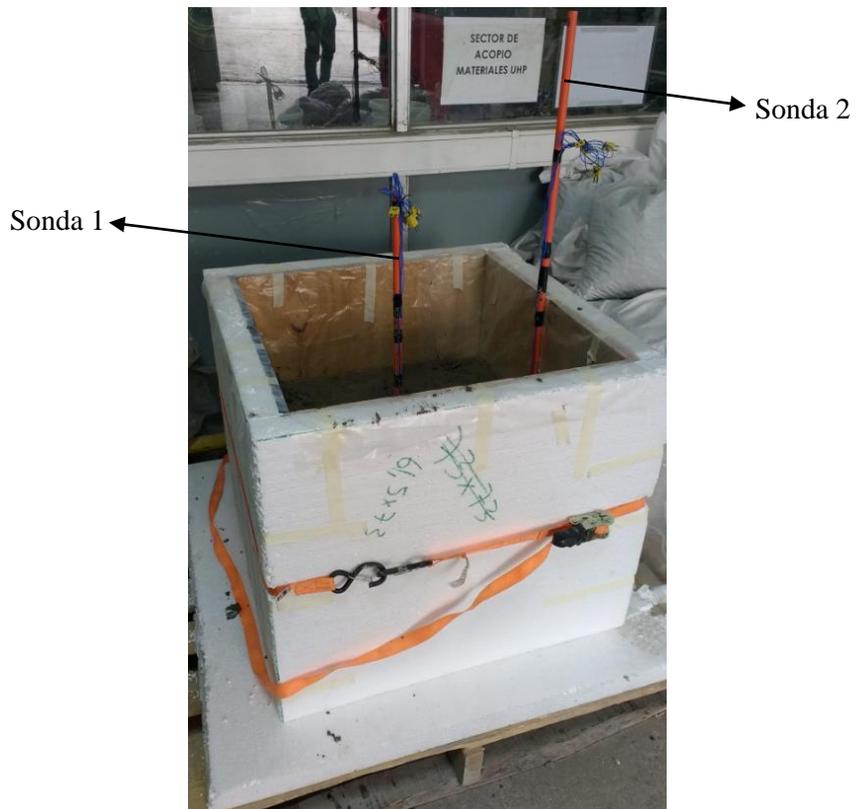


Figura 5.4: registro fotográfico del molde y la instalación de termocuplas en las sondas

5.1.3. Materiales empleados en el hormigón

5.1.3.1. *Cemento*

Los 12 bloques fueron confeccionados con tres tipos de cementos de la industria cementera chilena, particularmente de la empresa Melón S.A. Los cementos empleados difieren tanto en su composición química, como en propiedades físicas y mecánicas. En la Tabla 5.3 se entregan características generales de los tres cementos utilizados en la etapa experimental de este trabajo.

Tabla 5.3: descripción de cementos empleados en la confección de bloques

Cemento	Características generales
ME-EX	<ul style="list-style-type: none">• Tipo: cemento portland puzolánico.• Grado: alta resistencia.• Contenido de puzolanas: 10% - 12%.• Superficie específica: 5.000 cm²/g.• Calor de hidratación: sobre 70 cal/g.
ME-PL	<ul style="list-style-type: none">• Tipo: cemento portland puzolánico.• Grado: alta resistencia.• Contenido de puzolanas: 15% - 18%.• Superficie específica: 4.700 cm²/g.• Calor de hidratación: 60 – 70 cal/g.
ME-ES	<ul style="list-style-type: none">• Tipo: cemento puzolánico.• Grado: corriente.• Contenido de puzolanas: 35% - 40%.• Superficie específica: 4.100 cm²/g.• Calor de hidratación: bajo 70 cal/g.

5.1.3.2. *Áridos*

Los hormigones fueron confeccionados con dos tipos de áridos: fino y grueso. En el caso del árido fino, éste correspondió a una porción de arena fina procedente del Río Maipo, y una porción de arena semi-industrial proveniente de un pozo ubicado en San Bernardo. Por su parte el árido grueso correspondió a una gravilla también proveniente del pozo de San Bernardo.

La Tabla 5.4 muestra las principales características físicas y granulométricas de los áridos empleados en los hormigones.

Tabla 5.4: características de áridos empleados en hormigones

Parámetro	Gravilla	Arena semi-industrial	Arena fina
Tamaño máximo nominal (mm)	19	9,5	9,5
Módulo finura	6,77	3,08	2,06
Finos bajo malla 0,080 (%)	0,7	3,0	2,9
Densidad real seca (kg/m ³)	2701	2642	2586
Densidad real SSS (kg/m ³)	2729	2685	2636
Densidad neta (kg/m ³)	2777	2761	2723
Absorción (%)	1,0	1,6	1,9

Cabe señalar que, en base a la granulometría de los áridos, se definió su proporción en la mezcla de hormigón mediante un ajuste granulométrico basado en la norma NCh. 163 Of. 79 (Figura 5.5).

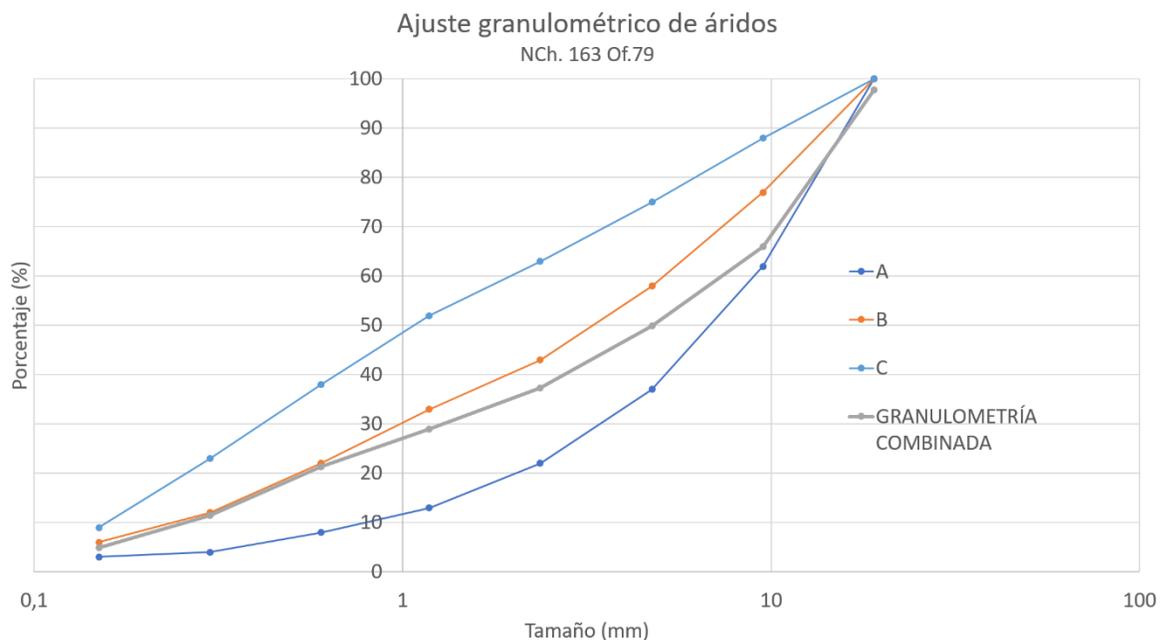


Figura 5.5: ajuste granulométrico de áridos según NCh. 163 Of. 79

El resultado del ajuste granulométrico anterior entregó una combinación de:

- 45% gravilla
- 45% arena semi-industrial
- 10% arena fina

5.1.3.3. *Aditivo*

En la confección de los hormigones, en particular de aquellos con alta dosis de cemento, se empleó un aditivo super-plastificante tipo F (según ASTM C494), denominado Viscocrete 40HSCL de Sika. El uso de este producto se debió a la necesidad de obtener un hormigón dócil para confeccionar los bloques.

5.1.4. Dosificación de hormigones

En la Tabla 5.5 se muestran las dosificaciones que fueron consideradas en la etapa experimental.

Tabla 5.5: dosificaciones de mezclas para confección de bloques

Cemento (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	A/C	Gravilla (kg/m ³)	Arena semi-industrial (kg/m ³)	Arena fina (kg/m ³)	Viscocrete (kg/m ³)
600	204,25	0,34	741	741	165	1,8
500	204,25	0,41	786	786	175	1,0
400	204,25	0,51	831	831	185	0,4
300	204,25	0,68	876	876	195	0,0

5.1.5. Instrumentación del bloque

Cada bloque fue instrumentado con 8 termocuplas que se mantuvieron conectadas a dos data-loggers de 4 canales cada uno, los cuales guardaron los registros de temperatura a una frecuencia de una lectura por minuto a lo largo de los 7 días de duración del estudio de cada bloque.

Las termocuplas (Figura 5.6) correspondían a cables termopar fabricados con níquel y cromo, y cubiertos con teflón, que en su extremo se conectaban a un enchufe mini macho tipo K acorde a los data-loggers. Cada termopar tenía un rango de capacidad máxima de 200°C de temperatura, una longitud de 0,9 m y un diámetro de 0,25 mm. La lectura de temperatura de las termocuplas se asociaba a un error de $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ según el fabricante.



Figura 5.6: termocupla utilizada en desarrollo experimental

Por su parte, cada data-logger empleado correspondía al equipo modelo AZ88598 del fabricante AZ Instruments. El equipo guardaba el registro de temperatura en formato .txt en la tarjeta de memoria SD que tenía incorporada. La resolución de lectura era de 0,1°C, con un rango de lectura entre -200°C y 1.370°C, siendo la precisión de lectura del equipo determinada como $\pm(0,3\% \cdot \text{lectura} + 1^{\circ}\text{C})$.



Figura 5.7: data logger empleado en desarrollo experimental

5.1.6. Programa experimental

Los bloques fueron confeccionados en el Laboratorio de Hormigones de Prueba de IDIEM entre los meses de noviembre de 2016 y agosto de 2017.

La Tabla 5.6 muestra la fecha y hora de confección de cada uno de los bloques. Esta información resulta relevante dado el efecto directo que la temperatura ambiente tiene sobre el comportamiento térmico del hormigón. Dado lo anterior, es importante señalar que el ambiente del laboratorio no fue controlado, y que los bloques se mantuvieron en una zona cubierta de la radiación solar, pero no aislados de las variaciones térmicas del día durante el monitoreo.

Tabla 5.6: bitácora de confección de bloques

Hormigón	Fecha confección	Hora confección
ME-EX/600	23-01-2017	23:00
ME-EX/500	24-11-2016	14:00
ME-EX/400	15-12-2016	13:30
ME-EX/300	26-12-2016	14:50
ME-PL/600	17-02-2017	22:00
ME-PL/500	01-03-2017	23:00
ME-PL/400	17-04-2017	12:45
ME-PL/300	27-04-2017	15:30
ME-ES/600	30-05-2017	16:00
ME-ES/500	07-07-2017	16:00
ME-ES/400	07-08-2017	16:00
ME-ES/300	18-08-2017	15:30

La Figura 5.8 muestra un registro fotográfico del proceso constructivo de los bloques.



Figura 5.8: registro fotográfico del proceso de confección de uno de los bloques experimentales

En la Figura 5.9 se muestra uno de los bloques resultantes luego de su confección en laboratorio.



Figura 5.9: registro fotográfico de bloque confeccionado en laboratorio

5.2. Caracterización de materiales

En esta sección se entregan los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales empleados en la confección de los bloques.

Los valores aquí presentados son relevantes para la siguiente etapa del trabajo correspondiente a la evaluación de modelos. Por esta misma razón, los parámetros característicos entregados corresponden, en general, a aquellos relacionados con el comportamiento térmico de los materiales.

Cabe señalar que la gran mayoría de los parámetros de caracterización aquí entregados fueron determinados mediante ensayos de laboratorio, sin embargo, algunos, como el calor específico, se calcularon según parámetros dados en la literatura.

5.2.1. Cemento

5.2.1.1. *Caracterización de cementos*

De acuerdo con lo exigido por la norma NCh. 148 Of. 68, se realizó una caracterización de cada cemento mediante ensayos físicos, químicos y mecánicos.

Debido a la cantidad de cemento empleado en el trabajo experimental, y dado que su adquisición fue parcializada en el tiempo, la caracterización de cada cemento se extrae de los ensayos de control efectuados por el Laboratorio Químico de IDIEM en los periodos comprendidos en la confección de los bloques.

Para los cementos ME-EX y ME-ES se promediaron los valores de la caracterización de 40 partidas de cada tipo, provenientes de la planta ubicada en La Calera; mientras que, para el cemento ME-PL, se promediaron los valores de la caracterización de 19 partidas, provenientes de la planta ubicada en Ventanas. Para los 3 tipos de cementos el periodo de caracterización correspondió a octubre 2016 – junio 2017.

En la Tabla 5.7 se muestran los valores promediados de los ensayos de control realizados a cada cemento.

Cabe señalar que, de los parámetros característicos dados en la Tabla 5.7, los más relevantes para los objetivos de este estudio corresponden a la superficie específica, que entrega el grado de finura del cemento, y el residuo insoluble que entrega un valor aproximado de la porción de puzolana contenida en el cemento en términos de porcentaje respecto al peso total del cemento.

Tabla 5.7: caracterización de cementos empleados en desarrollo experimental

Parámetro de caracterización	Tipo de cemento		
	ME-EX	ME-PL	ME-ES
Peso específico	3,01	2,96	2,77
Superficie Específica (cm²/g)	4996,25	4644,74	4901,25
Agua de consistencia normal (%)	31,79	31,64	33,32
Fraguado inicial (hrs:min)	2:07	3:28	2:54
Fraguado final (hrs:min)	3:03	5:06	4:01
Expansión en autoclave (%)	0,00	0,03	0,00
Resistencia mecánica - Flexión a 7 días (kgf/cm²)	69,40	64,11	42,43
Resistencia mecánica - Flexión a 28 días (kgf/cm²)	83,16	77,22	67,76
Resistencia mecánica - Compresión a 7 días (kgf/cm²)	432,18	378,32	220,20
Resistencia mecánica - Compresión a 28 días (kgf/cm²)	539,89	485,22	338,47
Pérdida por calcinación (%)	1,90	2,91	3,33
SO₃ (%)	3,33	2,86	2,94
Residuo insoluble (%)	11,21	15,57	36,20

5.2.1.2. *Calor de hidratación de cementos*

Mediante el ensayo semi-adiabático de Langavant ejecutado en el Laboratorio Químico de IDIEM, que fue descrito anteriormente, se obtienen las curvas de calor de hidratación bajo condiciones semi-adiabáticas para cada tipo de cemento.

Cabe señalar que la ejecución del ensayo tiene una duración de 7 días, tras los cuales es posible conocer el calor de hidratación característico de cada cemento en ese periodo.

La Tabla 5.8 muestra el calor de hidratación a ciertas edades características, de acuerdo a los ensayos ejecutados.

Tabla 5.8: calor de hidratación por edad

Edad (hrs)	q (kJ/kg)		
	ME-EX	ME-PL	ME-ES
12	203	120	64
24	278	249	127
72	294	277	174
120	304	276	182
168	314	277	187

Por su parte, la Figura 5.10 muestra el desarrollo del calor de hidratación a lo largo del tiempo de duración del ensayo. Como se observa, el cemento ME-EX posee el mayor calor de hidratación, seguido por el ME-PL, siendo el de menor calor de hidratación el cemento ME-ES.

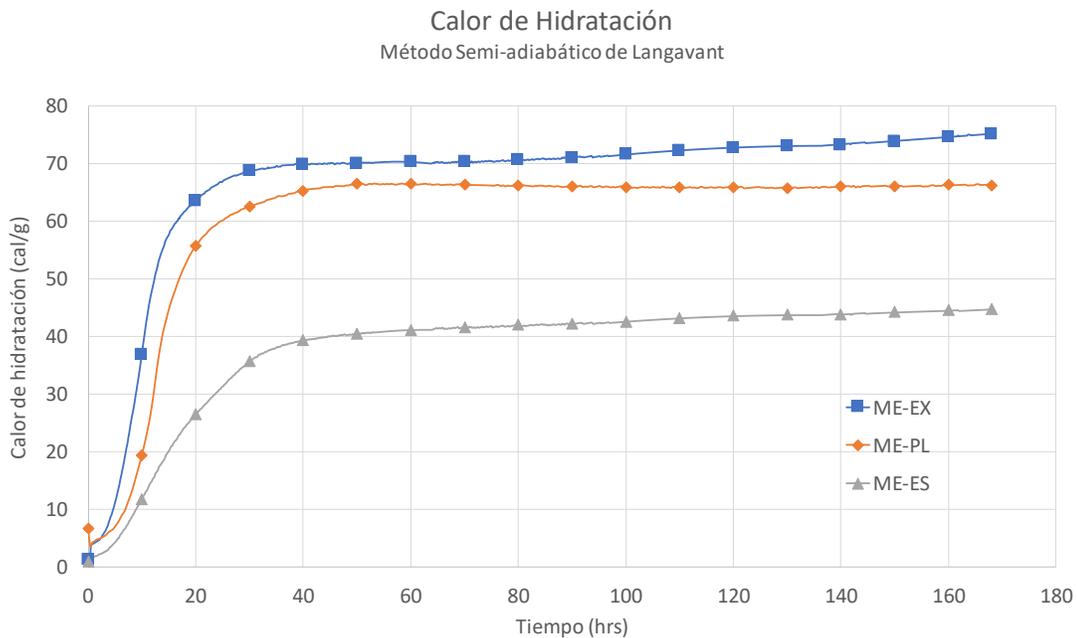


Figura 5.10: curvas del desarrollo del calor de hidratación para los 3 tipos de cementos estudiados

Tanto la caracterización de los cementos, como los resultados de los ensayos de calor de hidratación, permiten verificar el efecto de las puzolanas sobre el calor de hidratación de los cementos, y como se observa el cemento de mayor calor de hidratación es aquel que contiene alrededor de 11% de puzolanas (ME-EX), y el de menor calor de hidratación es aquel que contiene alrededor de 36% de puzolanas (ME-ES), ambos porcentajes en peso con respecto a cemento.

5.2.2. Hormigón

5.2.2.1. Caracterización general de hormigones

Al confeccionar la mezcla correspondiente a cada uno de los bloques, se midieron parámetros característicos del hormigón en estado fresco (docilidad, contenido de aire y densidad) y en estado endurecido (resistencia a la compresión). Para este último, se ensayaron cilindros a las edades de 7, 14 y 28 días (R7, R14 y R28, respectivamente).

La Tabla 5.9 presenta los parámetros característicos de cada hormigón, y la Figura 5.11 grafica el desarrollo de su resistencia a la compresión en el tiempo.

Tabla 5.9: caracterización general de mezclas de hormigón confeccionadas

Hormigón	Cono Abrams (cm)	Contenido de aire (%)	Densidad E° fresco (kg/m ³)	R7 (MPa)	R14 (MPa)	R28 (MPa)
ME-EX/600	6	1,7	2500	70,35	81,65	82,75
ME-EX/500	17	2,5	2461	54,75	61,8	70,3
ME-EX/400	17	1,8	2476	34,7	41,95	48,8
ME-EX/300	11,5	0,8	2504	19,75	24,1	29,65
ME-PL/600	10	2,0	2478	61,1	70,35	76,8
ME-PL/500	7	1,7	2484	48,5	54,85	62,85
ME-PL/400	18	2,1	2449	38,55	40,9	45,1
ME-PL/300	14	0,9	2497	20,05	24,5	27,95
ME-ES/600	20	1,6	2497	48,75	54,55	66,35
ME-ES/500	14	2,1	2471	38,2	42,3	53,3
ME-ES/400	13	1,6	2475	21,85	28,15	33,4
ME-ES/300	7	1,1	2503	11,55	15,2	19,5

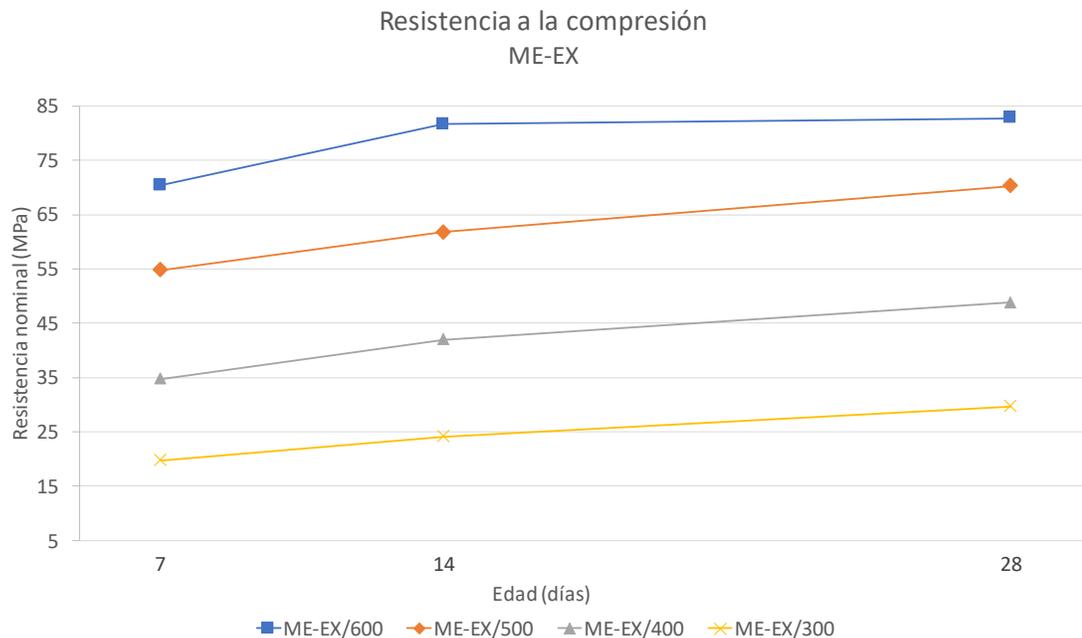


Figura 5.11: desarrollo de resistencia a la compresión en el tiempo de los hormigones confeccionados con cemento ME-EX

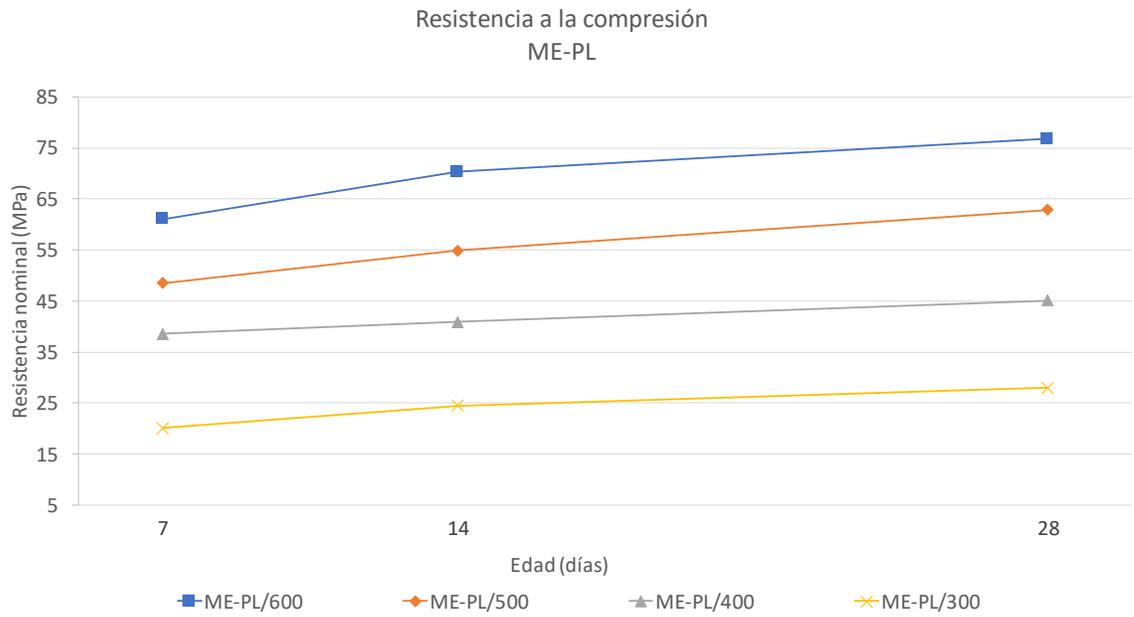


Figura 5.12: desarrollo de resistencia a la compresión en el tiempo de los hormigones confeccionados con cemento ME-PL

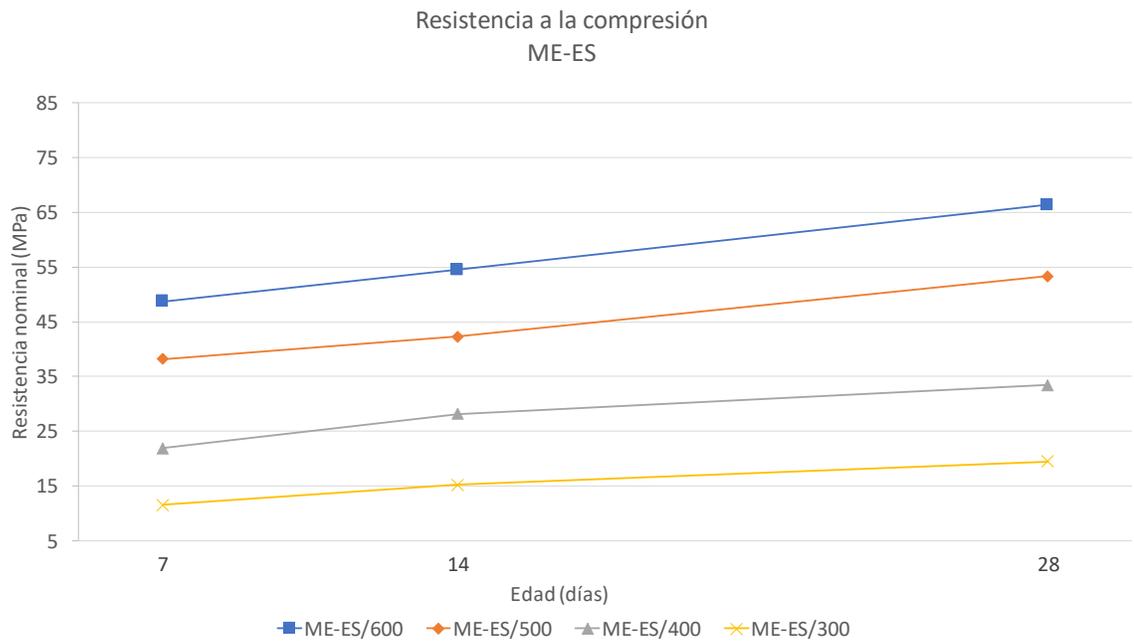


Figura 5.13: desarrollo de resistencia a la compresión en el tiempo de los hormigones confeccionados con cemento ME-ES

5.2.2.2. *Coefficiente de difusión térmica*

Además de los cilindros confeccionados para determinar la resistencia a compresión de los hormigones, se confeccionaron 2 cilindros por hormigón para someterlos a ensayo para determinar de su coeficiente de difusión térmica.

El método de ensayo corresponde al indicado en el documento CRD-C 36-73: “Method of test for thermal diffusivity of concrete” del U.S. Army Corps of Engineers.

El coeficiente de difusión térmica, al igual que varios otros parámetros del hormigón, varía con la edad de la mezcla. Por esto se ejecutó el ensayo de difusión térmica a las edades de 1, 2, 7, 14 y 28 días para observar cómo varía la propiedad en los hormigones confeccionados.

A modo de ejemplo, la Figura 5.14 muestra el desarrollo de la difusión térmica de los hormigones confeccionados con cemento ME-ES según lo obtenido tras la ejecución de los ensayos.

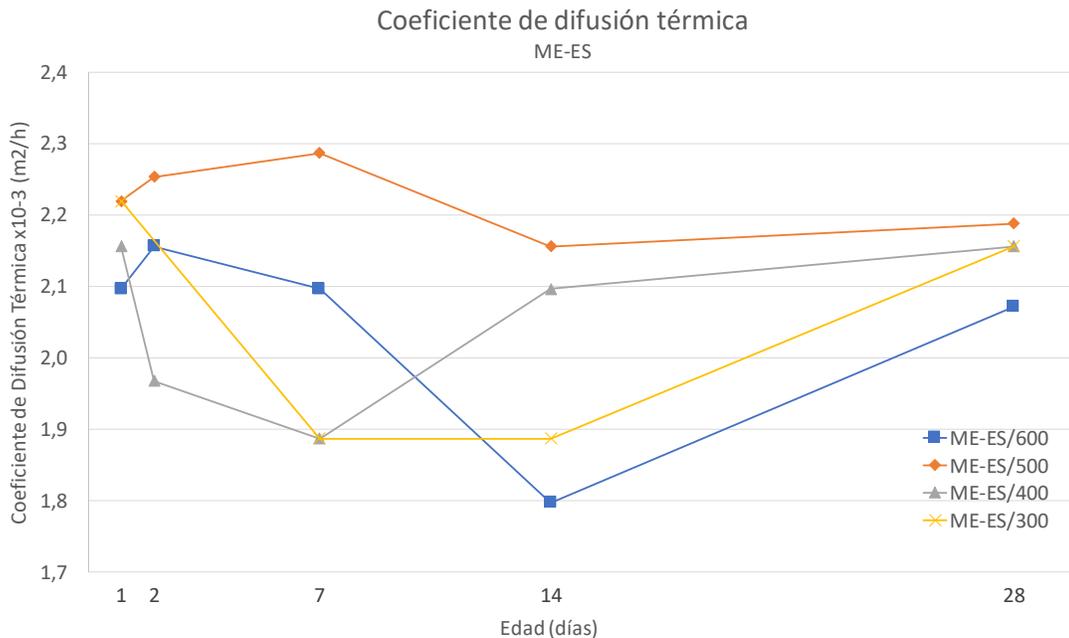


Figura 5.14: coeficiente de difusión térmica por edad para hormigones confeccionados con cemento ME-ES

Debido a la variación que sufre este parámetro en el tiempo, para la evaluación de los modelos que requerían el valor del coeficiente de difusión térmica como parámetro de entrada, se consideró el valor correspondiente a la edad de 28 días. La Tabla 5.10 muestra dicho valor para cada uno de los hormigones estudiados.

Tabla 5.10: coeficiente de difusión térmica de los hormigones a los 28 días

Hormigón	Coeficiente de difusión térmica (m ² /h)
ME-EX/600	0,00219
ME-EX/500	0,00204
ME-EX/400	0,00213
ME-EX/300	0,00210
ME-PL/600	0,00208
ME-PL/500	0,00215
ME-PL/400	0,00239
ME-PL/300	0,00249
ME-ES/600	0,00207
ME-ES/500	0,00219
ME-ES/400	0,00216
ME-ES/300	0,00207

5.2.2.3. *Calor específico*

El calor específico se define como la cantidad de calor que se requiere para aumentar en un grado de temperatura de una unidad de masa. En el caso del hormigón, el calor específico depende principalmente del tipo de árido y de la relación agua/cemento de la mezcla (Bianchi, 1991).

Dado que el calor específico de cada hormigón no fue determinado mediante ensayo de laboratorio, se emplea un método común para su determinación en base a valores del calor específico de los componentes del hormigón entregados por 3 publicaciones distintas (RILEM, ACI, Rastrup) (Bianchi, 1991). Además, se incluyó en el cálculo el calor específico de la puzolana de forma independiente, de tal forma que el cálculo fuera más representativo de los cementos empleados. El valor del calor específico de las puzolanas se extrae de la publicación de los autores Choktaweekarn, Saengsoy, Tangtermsirikul (2009).

La Tabla 5.11 muestra los valores a considerar en el cálculo del calor específico de los hormigones estudiados.

Tabla 5.11: calor específico de los componentes del hormigón según publicación

Material	Calor específico (kJ/kg/°C)		
	RILEM	ACI	Rastrup
Cemento Portland	0,80	0,88	0,84
Árido grueso	0,75	0,75	0,84
Arena	0,80	0,75	0,84
Agua	4,19	4,19	4,19
Puzolanas	Choktaweekarn, Saengsoy, Tangtermsirikul		
	0,419		

El método consiste en ponderar la contribución de los componentes del hormigón mediante la siguiente ecuación:

$$c_{e,h} = \frac{c_{e,w} \cdot W + c_{e,g} \cdot G + c_{e,c} \cdot C + c_{e,p} \cdot P}{\rho_h} \quad (\text{ec. 5.1})$$

Donde:

- $c_{e,h}$: calor específico del hormigón, en $\text{kJ/kg/}^\circ\text{C}$.
- $c_{e,w}$: calor específico del agua, en $\text{kJ/kg/}^\circ\text{C}$.
- $c_{e,g}$: calor específico del árido, en $\text{kJ/kg/}^\circ\text{C}$.
- $c_{e,c}$: calor específico del cemento Portland, en $\text{kJ/kg/}^\circ\text{C}$.
- $c_{e,p}$: calor específico de las puzolanas, en $\text{kJ/kg/}^\circ\text{C}$.
- W : dosis de agua, en kg/m^3 .
- G : dosis de áridos, en kg/m^3 .
- C : dosis de cemento, en kg/m^3 .
- P : dosis de puzolanas, en kg/m^3 .
- ρ_h : densidad húmeda del hormigón, en kg/m^3 .

Habiendo calculado el calor específico según los valores entregados por cada publicación, se obtiene el calor específico del hormigón mediante el promedio de los 3 valores calculados.

La Tabla 5.12 muestra los valores de calor específico obtenidos según el método de cálculo descrito, para cada mezcla de hormigón confeccionada en la etapa experimental.

Tabla 5.12: calor específico de hormigones

Hormigón	Calor específico (kJ/kg/°C)
ME-EX/600	1,013
ME-EX/500	1,029
ME-EX/400	1,023
ME-EX/300	1,012
ME-PL/600	1,018
ME-PL/500	1,016
ME-PL/400	1,031
ME-PL/300	1,012
ME-ES/600	0,989
ME-ES/500	1,004
ME-ES/400	1,006
ME-ES/300	1,000

5.2.2.4. *Conductividad térmica*

La conductividad térmica de un material se define como la cantidad de calor que fluye por unidad de área y tiempo entre dos caras paralelas de un sólido (Bianchi, 1991).

De acuerdo con el ACI 207.2R, la conductividad térmica se relaciona con el calor específico, el coeficiente de difusión y la densidad del hormigón según la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_{e,h} \cdot \rho_h} \quad (\text{ec. 5.2})$$

Donde:

α : coeficiente de difusión térmica del hormigón, en m^2/h .

λ : conductividad térmica del hormigón, en $kJ/kg/^\circ C$.

$c_{e,h}$: calor específico del hormigón, en $kJ/kg/^\circ C$.

ρ_h : densidad húmeda del hormigón, en kg/m^3 .

Evaluando la (ec. 5.2) con los valores ya obtenidos de difusión térmica (a los 28 días), calor específico y densidad de cada hormigón, se obtienen los valores de conductividad mostrados en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13: conductividad térmica de hormigones

Hormigón	Conductividad térmica (kJ/m/h/°C)
ME-EX/600	5,542
ME-EX/500	5,166
ME-EX/400	5,385
ME-EX/300	5,313
ME-PL/600	5,246
ME-PL/500	5,418
ME-PL/400	6,041
ME-PL/300	6,298
ME-ES/600	5,116
ME-ES/500	5,427
ME-ES/400	5,371
ME-ES/300	5,173

5.2.2.5. *Desarrollo adiabático de temperatura*

Con los resultados obtenidos a través de los ensayos de calor de hidratación de los cementos (Sección 5.2.1.2) es posible determinar la curva de desarrollo de temperatura adiabática en el tiempo de cada una de las mezclas de hormigón mediante el cálculo del incremento adiabático de temperatura, el cual es función del calor específico, contenido de cemento y peso específico de la mezcla. La expresión a evaluar es la siguiente:

$$\Delta T_{ad}(t) = \frac{C \cdot q_c(t)}{c_{e,h} \cdot \rho} \quad (\text{ec. 5.3})$$

Donde:

$\Delta T_{ad}(t)$: incremento adiabático de temperatura en el tiempo, en $^{\circ}C$.

$c_{e,h}$: calor específico del hormigón, en $kJ/kg/^{\circ}C$.

C : contenido de cemento, en kg/m^3 .

ρ_h : densidad húmeda del hormigón, en kg/m^3 .

$q_c(t)$: calor de hidratación del cemento en el tiempo, en kJ/kg .

De la Figura 5.15 a la Figura 5.17 se presentan las curvas de desarrollo de temperatura adiabática según el contenido de cemento, para cada tipo de cemento estudiado.

En las curvas se verifica que a un mayor contenido de cemento, mayor es la temperatura adiabática generada por la hidratación del cemento.

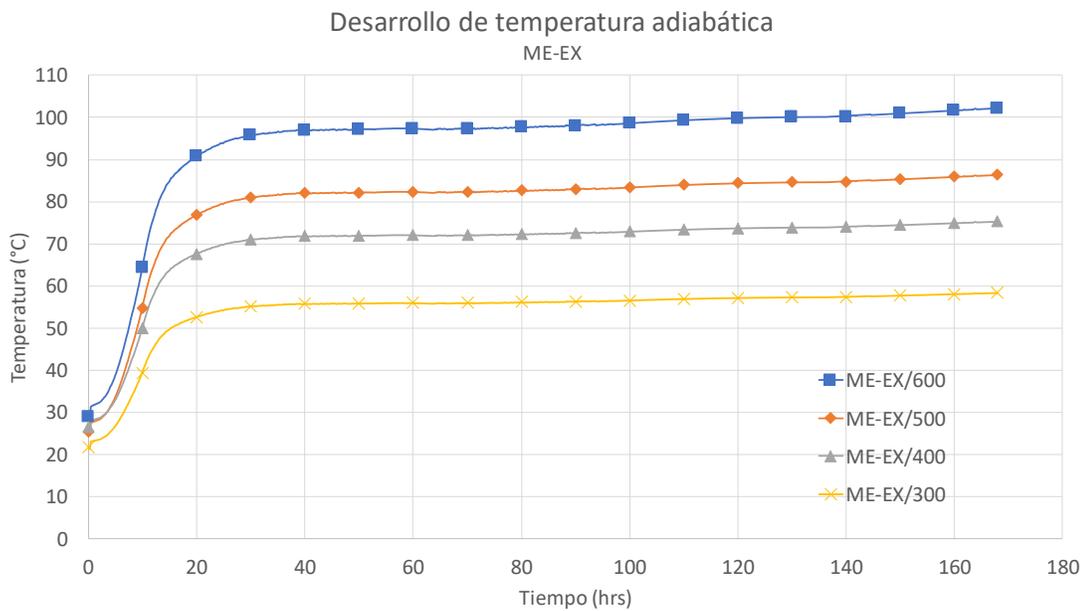


Figura 5.15: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones confeccionados con cemento ME-EX

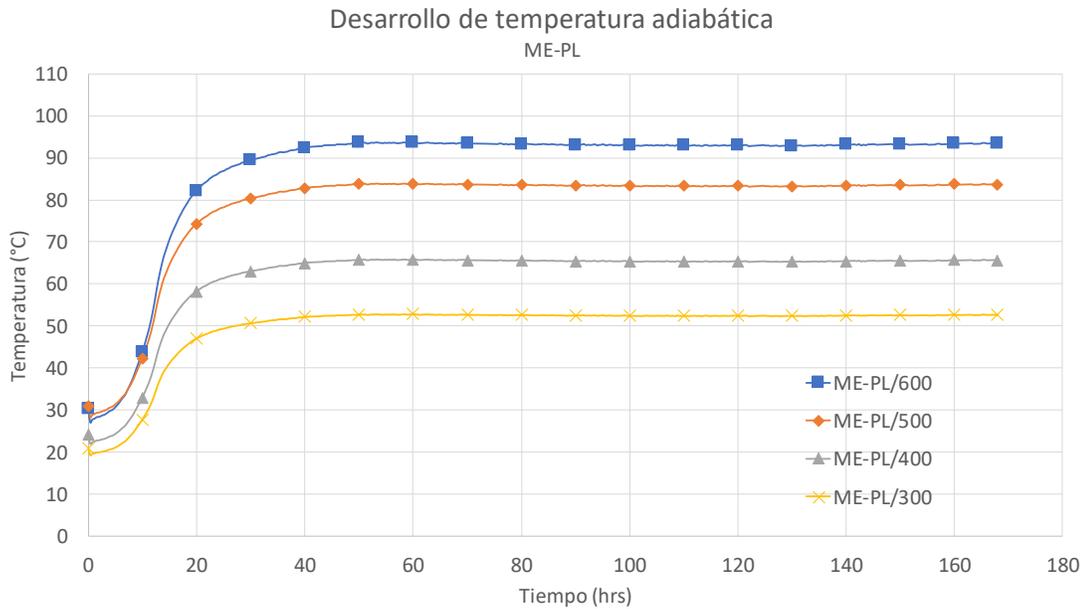


Figura 5.16: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones confeccionados con cemento ME-PL

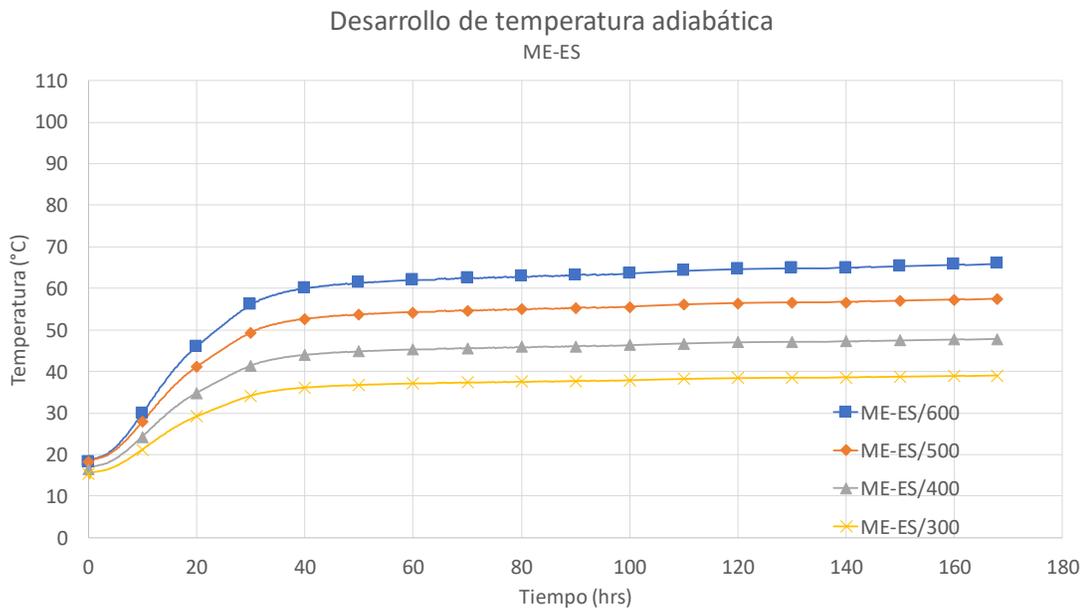


Figura 5.17: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones confeccionados con cemento ME-ES

De la Figura 5.18 a la Figura 5.21 se presentan las curvas de desarrollo de temperatura adiabática según el tipo de cemento, para cada contenido de cemento considerado en el trabajo experimental.

En las curvas se verifica que para los contenidos de 600 kg/m^3 , 500 kg/m^3 y 400 kg/m^3 , el cemento ME-EX es el que mayores temperaturas alcanza, seguido por el ME-PL, siendo el ME-ES el que menores temperaturas alcanza. En el caso del contenido de 500 kg/m^3 se observa que los cementos ME-EX y ME-PL alcanzan temperaturas similares, superando levemente éste último al cemento ME-EX en algunos instantes.

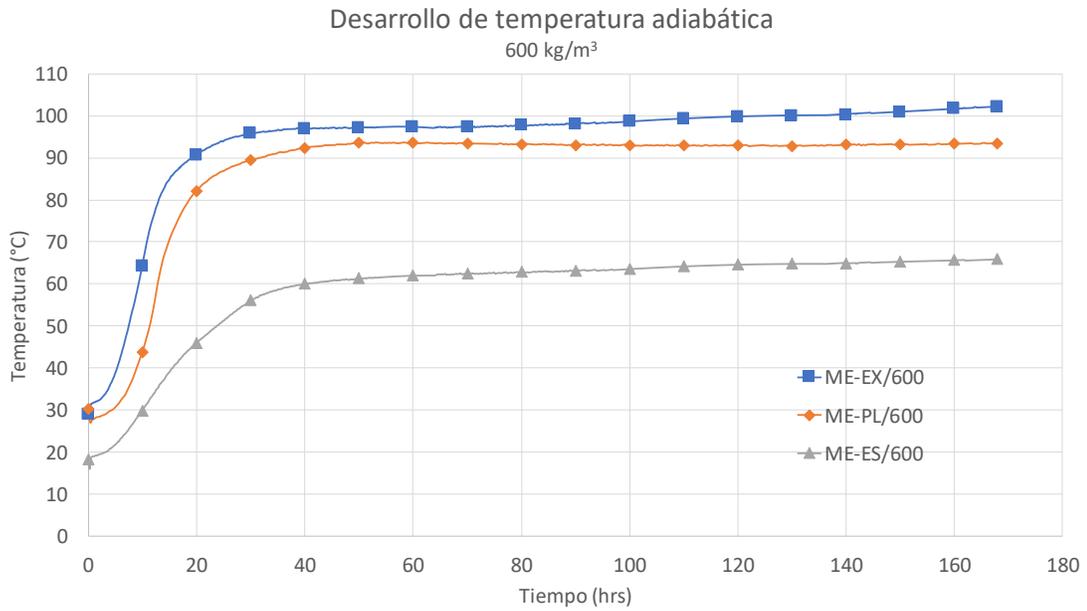


Figura 5.18: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones con contenido de cemento igual a 600 kg/m³

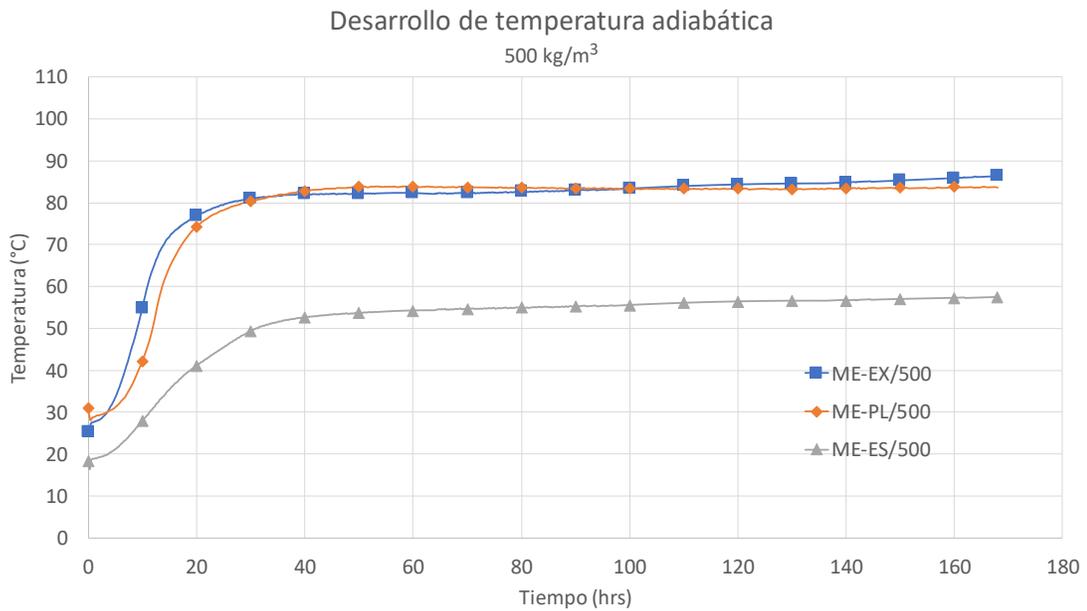


Figura 5.19: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones con contenido de cemento igual a 500 kg/m³

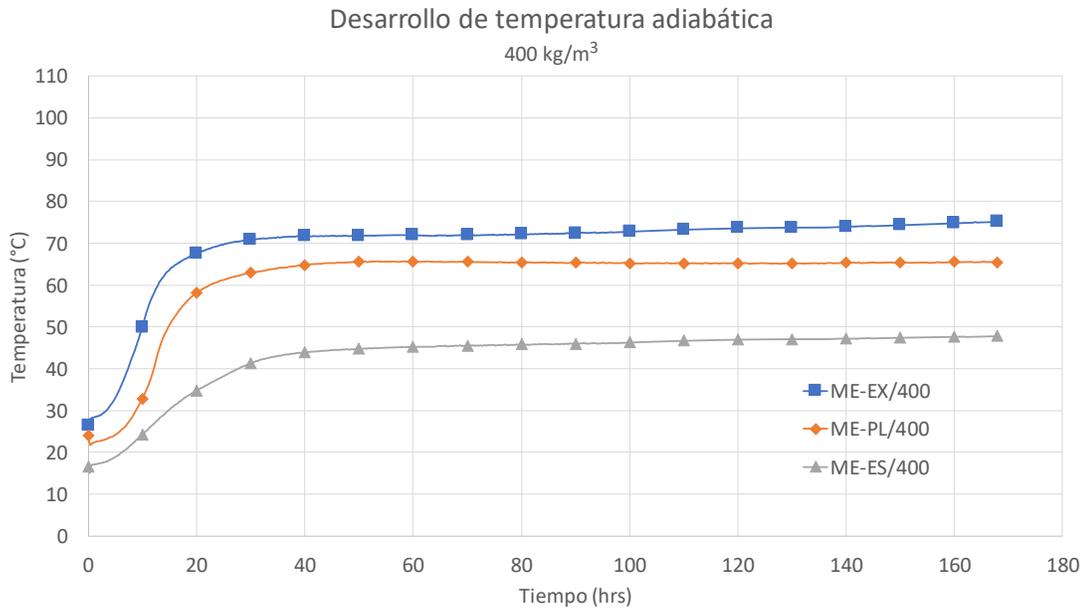


Figura 5.20: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones con contenido de cemento igual a 400 kg/m^3

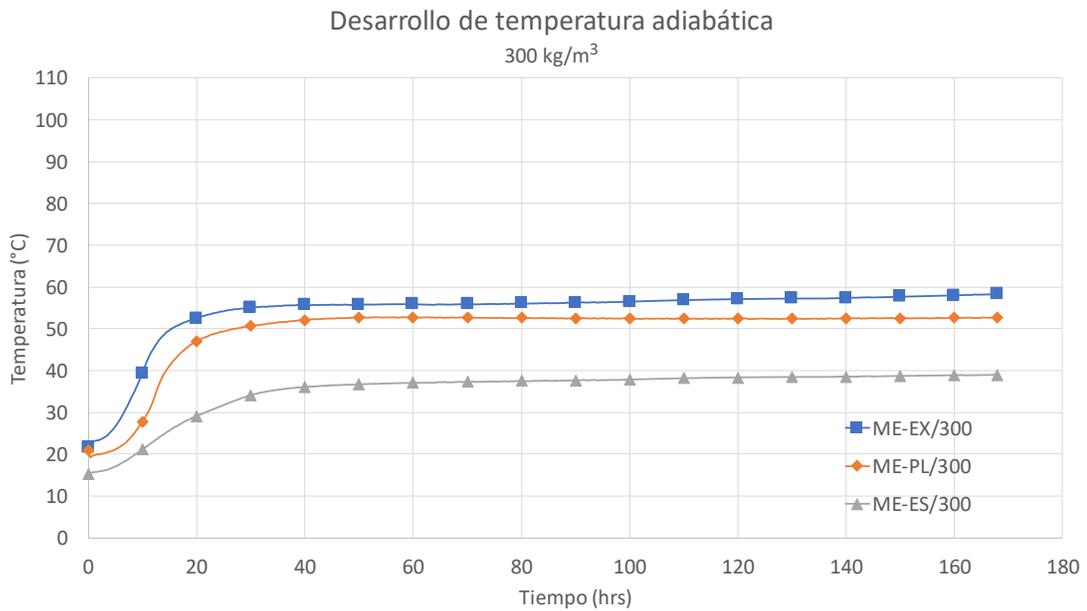


Figura 5.21: curva de desarrollo adiabático de temperatura para los hormigones con contenido de cemento igual a 300 kg/m^3

5.2.3. Moldaje y aislamiento

Para la caracterización de los materiales empleados en el encofrado y aislamiento del bloque (madera de terciado estructural y poliestireno expandido), se consideran valores característicos de sus propiedades térmicas de la literatura (Tabla 5.14).

Tabla 5.14: propiedades térmicas de encofrado y aislación (Lawrence, 2009)

Material	Conductividad térmica (kJ/m/h/°C)	Capacidad calórica (kJ/m ³ /°C)
Moldaje de madera	0,54	85,49
Aislación de poliestireno expandido	0,21	20,85

5.3.Resultados de temperatura en bloques

A continuación, se presentan los principales resultados de los monitoreos de temperatura realizados a cada uno de los 12 bloques de hormigón, durante 7 días desde su confección.

Cabe señalar que en el Anexo A se muestran gráficamente los historiales de temperatura registrados por las *Sondas* 1 y 2, y el sensor de temperatura ambiente para cada bloque confeccionado en laboratorio.

A modo de ejemplo, la Figura 5.22 y la Figura 5.23 muestran los registros obtenidos por las termocuplas instaladas en la *Sonda* 1 y *Sonda* 2, respectivamente, para el bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500.

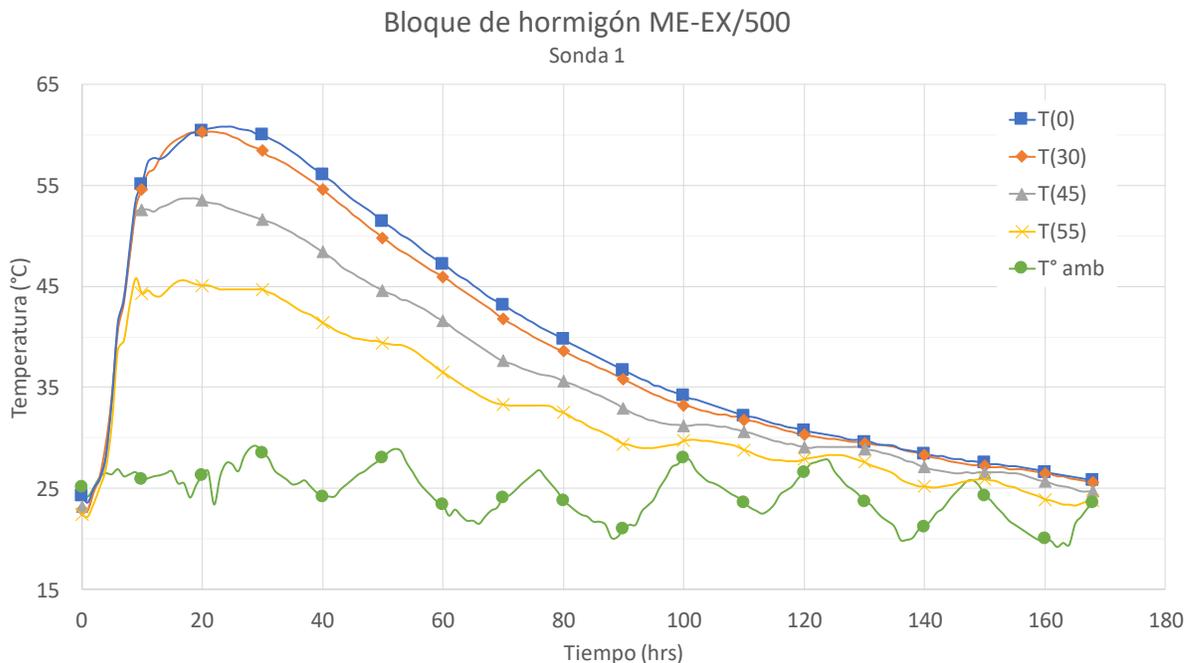


Figura 5.22: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda* 1 del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500

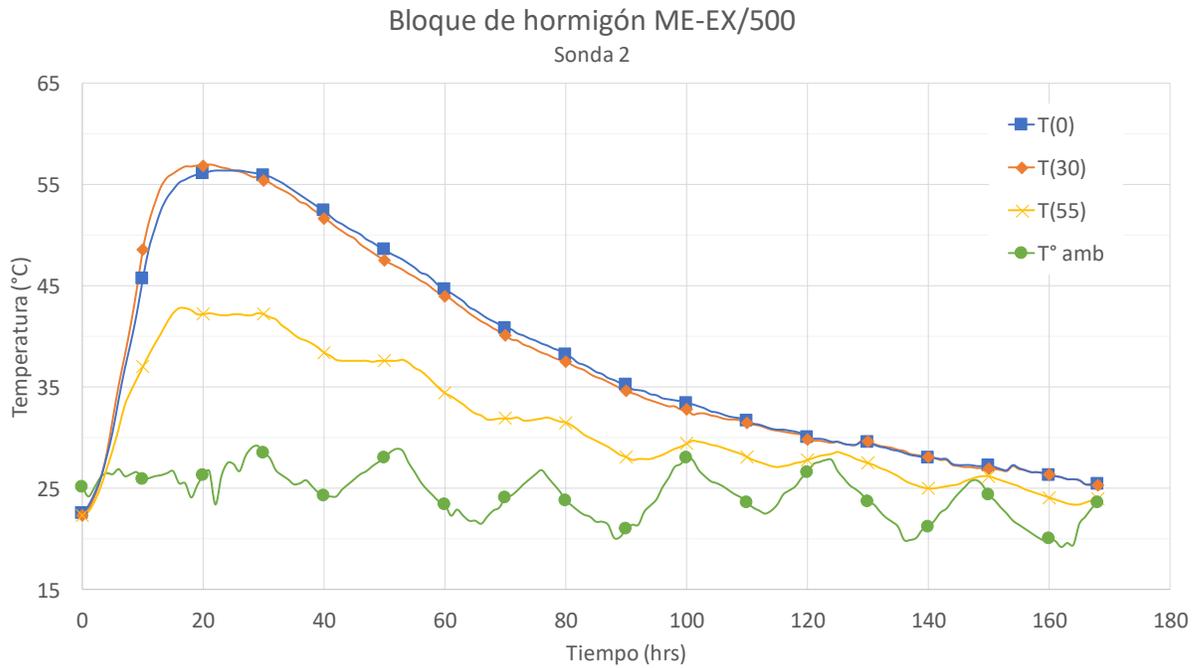


Figura 5.23: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500

Tanto en las figuras anteriores, como en las del Anexo A (Figura A.1 a la Figura A.24), se observa que los registros de temperatura en la base (T_0) y su núcleo (T_{30}) resultan ser similares, al igual que en los registros de termocuplas de distintas sondas ubicadas a la misma altura. Esto verifica el efecto esperado del sistema de aislación (*moldaje + aislapol*) que logra mantener un estado semi-adiabático en las caras del bloque que se encontraban cubiertas, forzando así el flujo de calor a través de la cara expuesta.

En la Tabla 5.15 se muestran los principales resultados del registro de temperatura de cada bloque. Los parámetros indicados corresponden a:

T_{amb} : temperatura ambiente promedio registrada por la termocupla ubicada al interior del laboratorio.

T_{col} : temperatura de colocación del hormigón.

$T_{N,max}$: temperatura máxima alcanzada en el núcleo de cada bloque.

$t_{T_{N,max}}$: tiempo al que se alcanza la temperatura $T_{N,max}$.

$\Delta T_{5,max}$: diferencial de temperatura máximo alcanzado entre el registro a 5 cm de la superficie expuesta (T_{55}) y el núcleo (T_{30}).

$t_{\Delta T_{5,max}}$: tiempo al que se alcanza el diferencial $\Delta T_{5,max}$.

Tabla 5.15: principales resultados de monitoreo térmico de bloques según tipo de hormigón

Hormigón	T_{amb} (°C)	T_{col} (°C)	$T_{N,max}$ (°C)	$t_{T_{N,max}}$ (hrs)	$\Delta T_{5,max}$ (°C)	$t_{\Delta T_{5,max}}$ (hrs)
ME-EX/600	27	28	79	17	18	26
ME-EX/500	24	24	60	20	16	23
ME-EX/400	26	26	58	17	10	23
ME-EX/300	25	21	44	20	9	18
ME-PL/600	25	23	73	22	18	35
ME-PL/500	22	25	63	21	16	12
ME-PL/400	18	19	49	21	12	21
ME-PL/300	17	17	40	30	9	21
ME-ES/600	12	17	48	25	13	20
ME-ES/500	11	17	45	24	13	19
ME-ES/400	12	16	41	28	10	37
ME-ES/300	12	15	35	31	10	40

De la Figura 5.24 a la Figura 5.26, se muestra el desarrollo de temperatura en el núcleo (T_N), correspondiente a la temperatura registrada por la termocupla T_{30} en la Sonda 1 de los bloques, según su contenido de cemento, para cada tipo de cemento empleado.

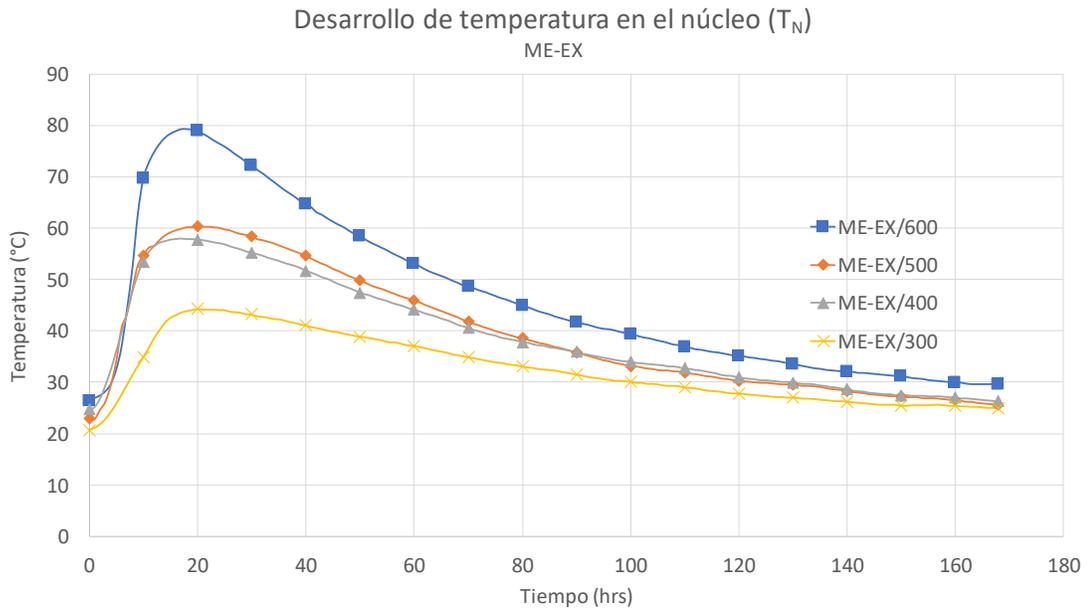


Figura 5.24: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques confeccionados con cemento ME-EX

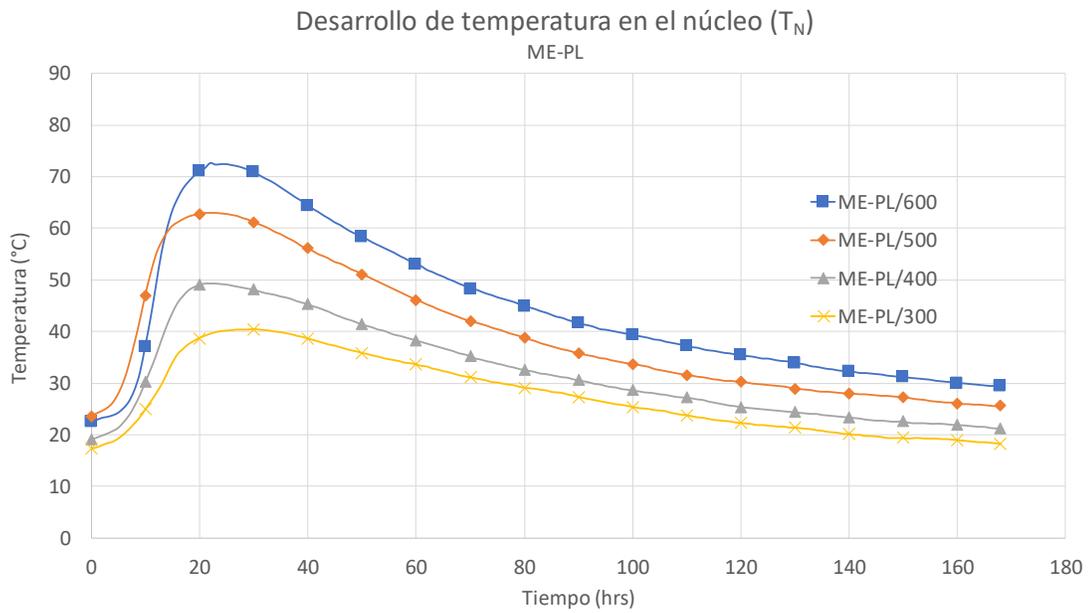


Figura 5.25: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques confeccionados con cemento ME-PL

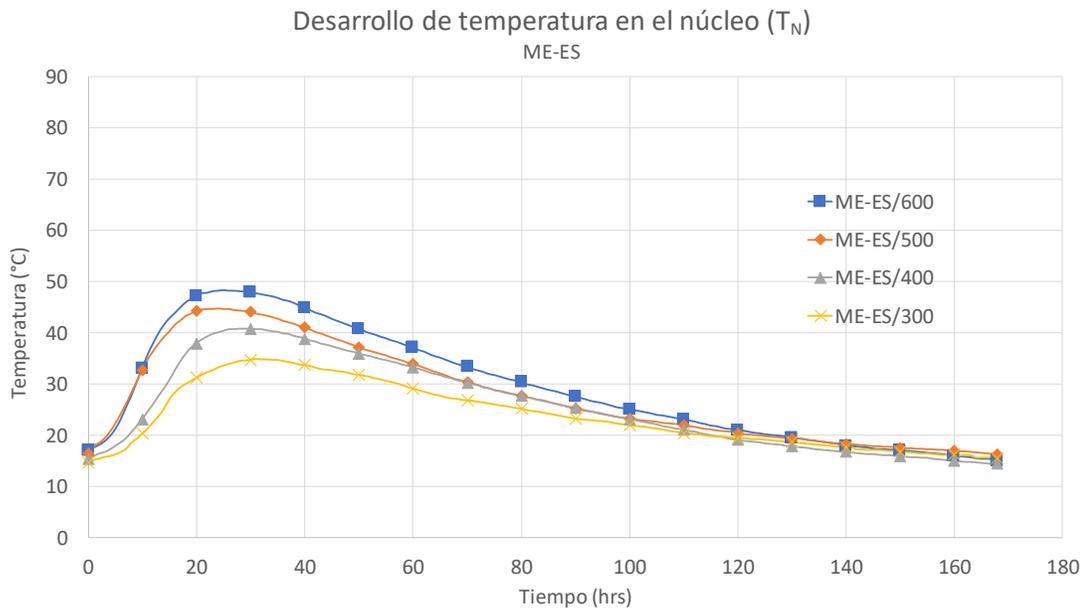


Figura 5.26: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques confeccionados con cemento ME-ES

Desde la Figura 5.27 a la Figura 5.30, se muestra el desarrollo de temperatura en el núcleo (T_N), correspondiente a la temperatura registrada por la termocupla T_{30} en la *Sonda 1*, de los bloques según el tipo de cemento con el que fueron confeccionados, para cada dosificación de prueba.

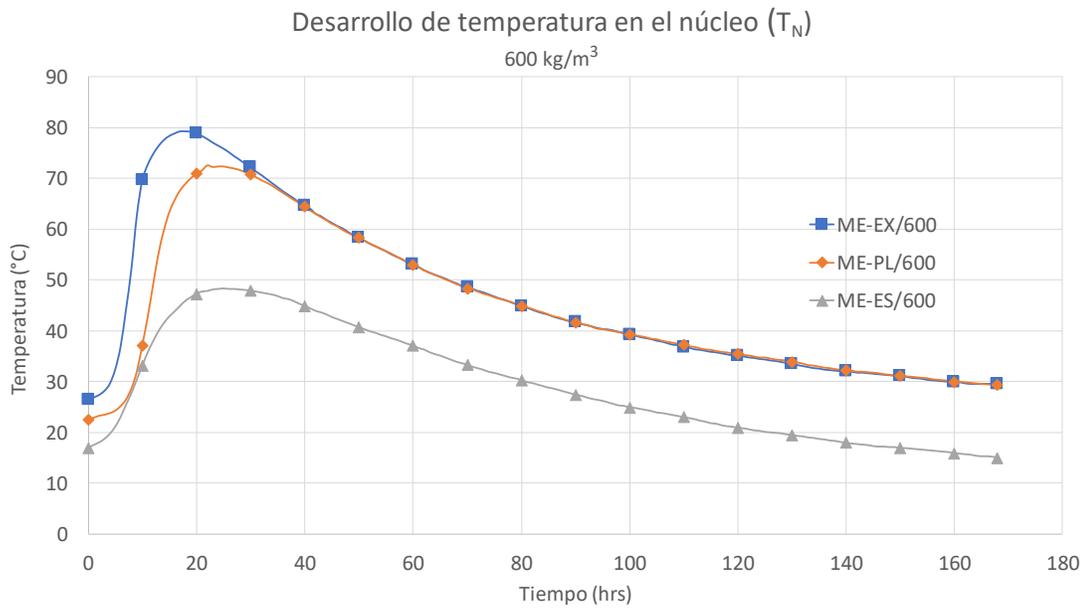


Figura 5.27: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques que contienen 600 kg/m^3

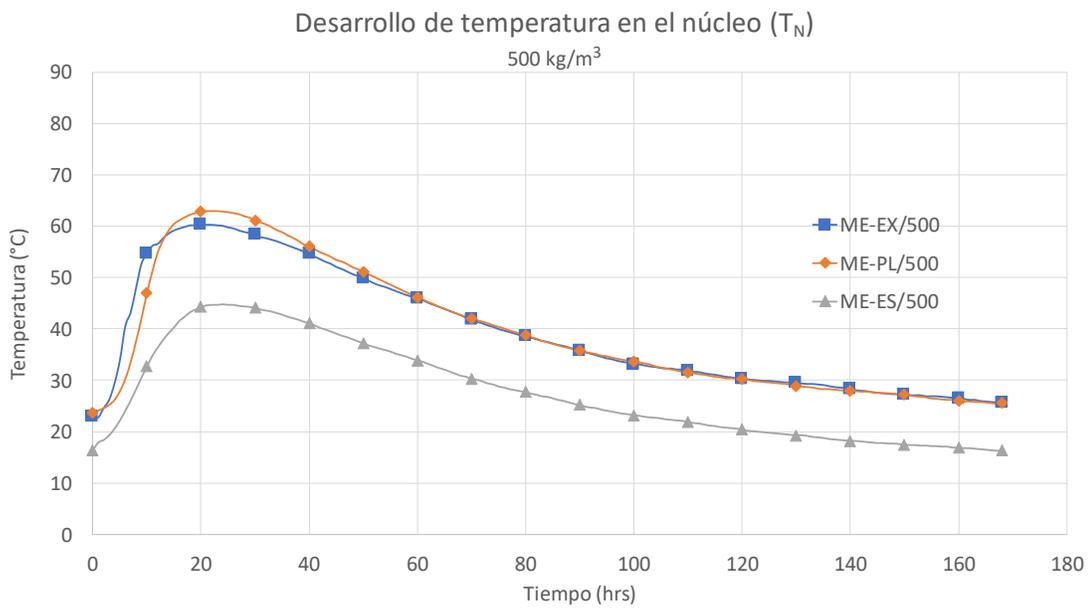


Figura 5.28: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques que contienen 500 kg/m^3

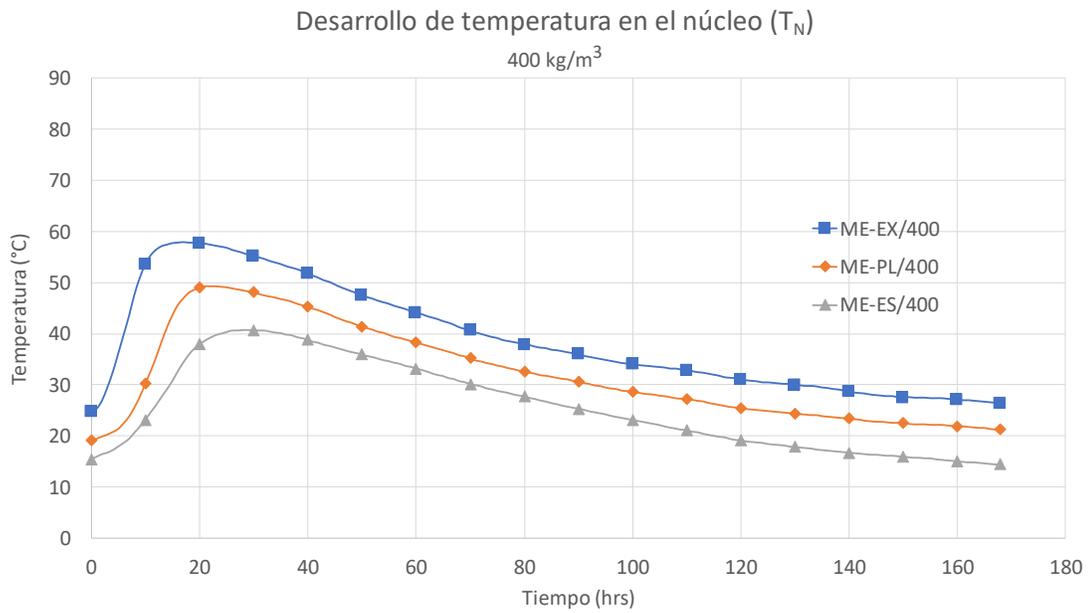


Figura 5.29: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques que contienen 400 kg/m³

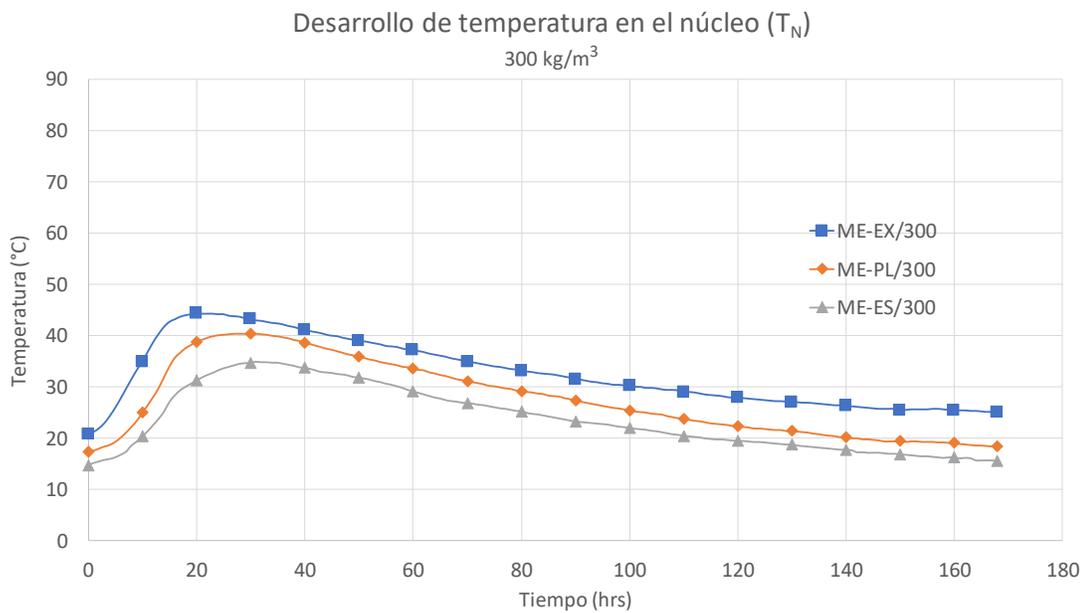


Figura 5.30: desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques que contienen 300 kg/m³

Por su parte, de la Figura 5.31 a la Figura 5.33, se muestra el desarrollo del diferencial de temperatura (ΔT_5) entre las termocuplas T_{30} y T_{55} ubicadas en la Sonda 1 de los bloques, según su contenido de cemento, para cada tipo de cemento empleado.

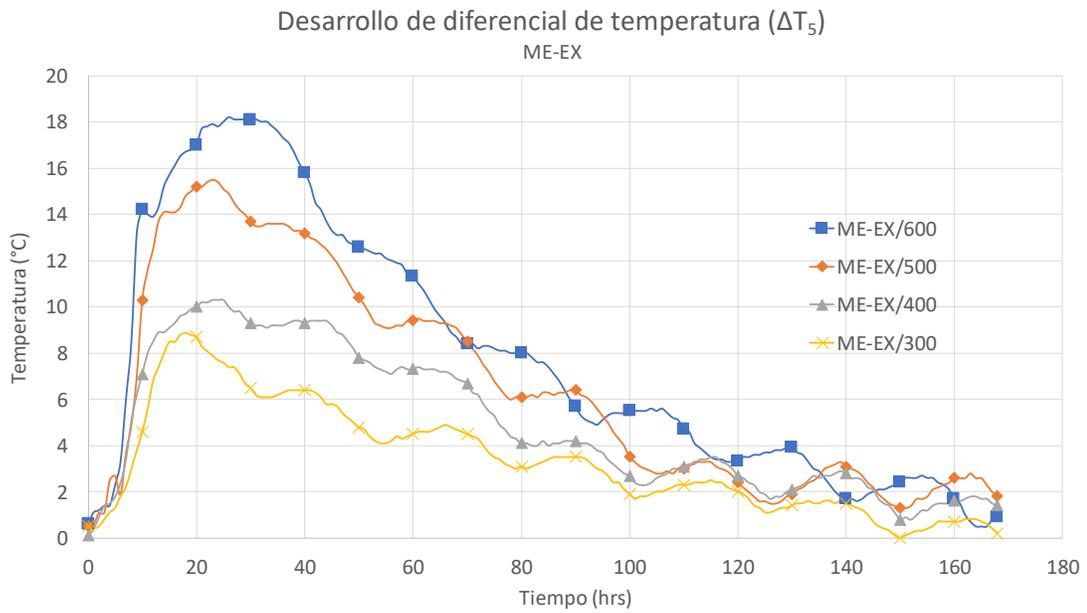


Figura 5.31: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques confeccionados con cemento ME-EX

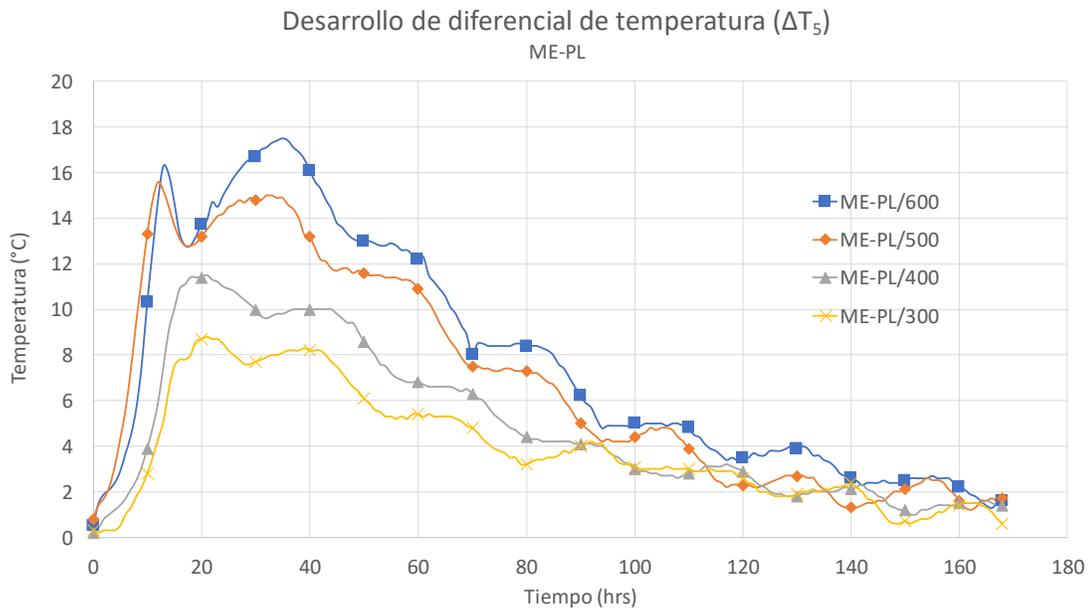


Figura 5.32: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques confeccionados con cemento ME-PL

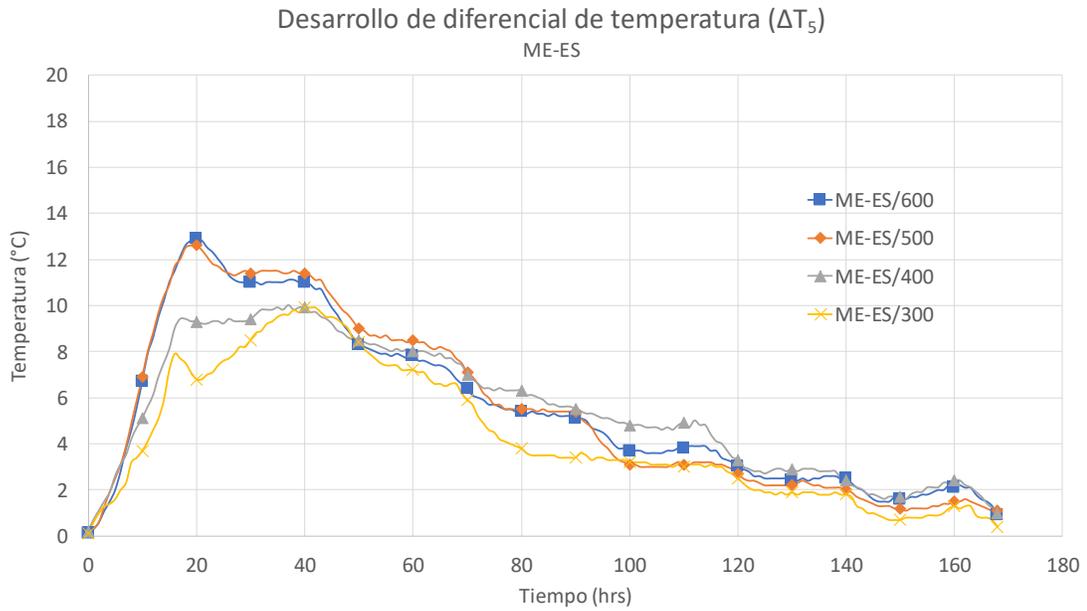


Figura 5.33: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques confeccionados con cemento ME-ES

Por su parte, de la Figura 5.34 a la Figura 5.37, se muestra el desarrollo del diferencial de temperatura (ΔT_5) entre las termocuplas T_{30} y T_{55} ubicadas en la *Sonda 1* de los bloques, según el tipo de cemento empleado en la confección de los bloques, para cada dosificación de prueba.

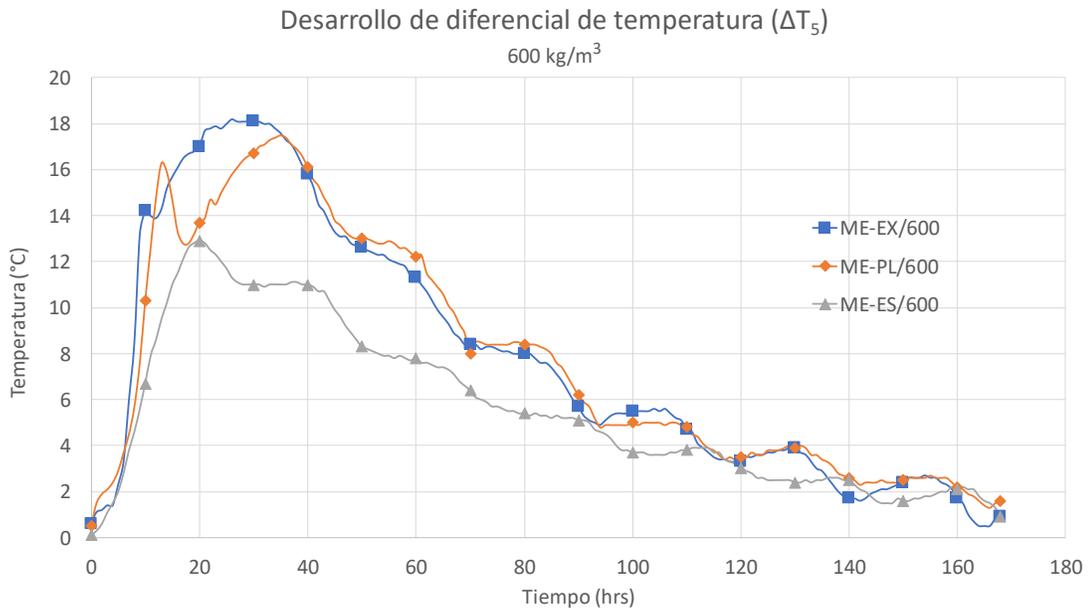


Figura 5.34: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques que contienen 600 kg/m³

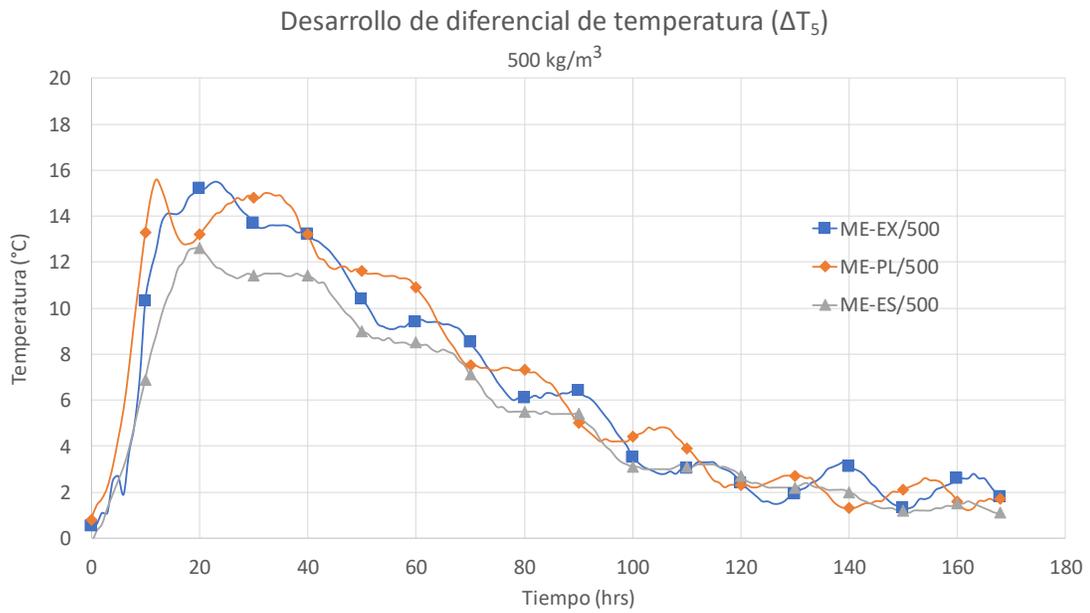


Figura 5.35: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques que contienen 500 kg/m³

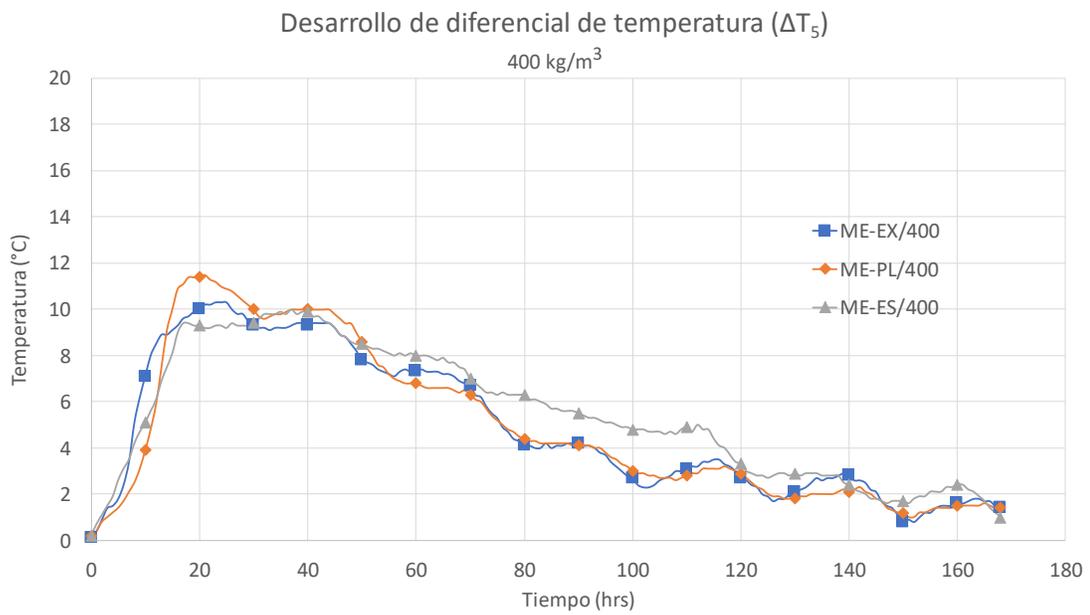


Figura 5.36: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques que contienen 400 kg/m³

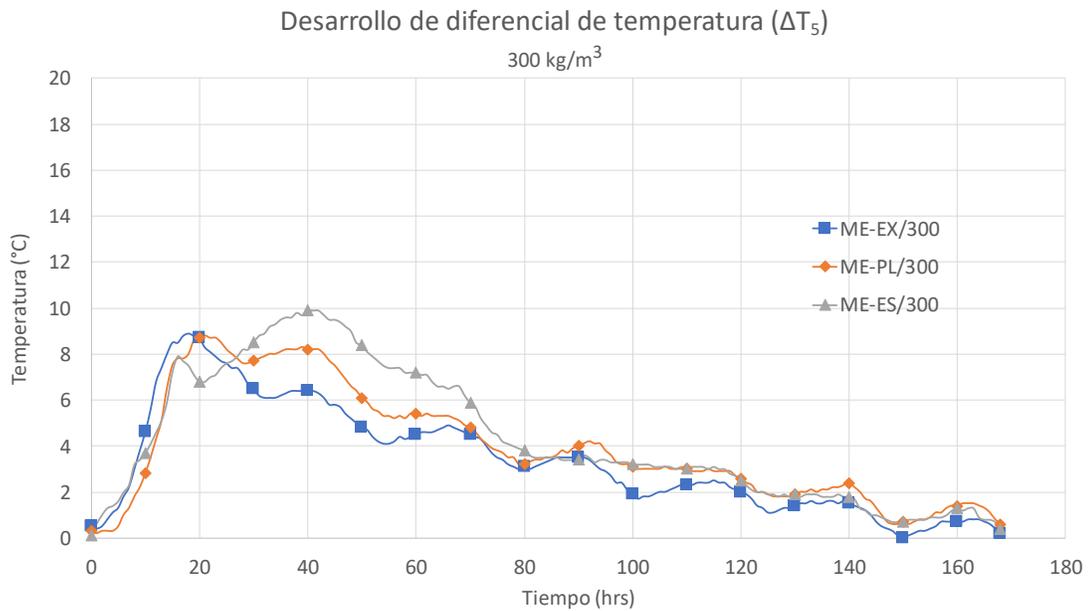


Figura 5.37: desarrollo de diferencial de temperatura de los bloques que contienen 300 kg/m^3

5.4. Análisis de resultados del trabajo experimental

De los resultados obtenidos se tiene lo siguiente:

- Tipo de cemento

De acuerdo a las curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo para cada contenido de cemento considerado en el trabajo experimental (Figura 5.27 a la Figura 5.30), se observa que los cementos ME-EX y ME-PL tienen un comportamiento térmico similar para contenidos de 600 kg/m^3 y 500 kg/m^3 . En el caso de 600 kg/m^3 , el cemento ME-EX alcanza mayores temperaturas en el núcleo, mientras que en el caso de 500 kg/m^3 , los bloques que contienen cemento ME-EX y ME-PL alcanzan una temperatura máxima similar, siendo la de ME-PL levemente mayor.

Para los contenidos de cemento iguales a 400 kg/m^3 y 300 kg/m^3 , se observa una diferencia en el comportamiento térmico de los 3 tipos de cemento, donde no existe intersección entre las curvas y hay una marcada tendencia del cemento ME-EX a generar mayores temperaturas, seguido por el ME-PL y, con temperaturas más bajas, se muestra el ME-ES.

Para las cuatro dosificaciones de prueba, los bloques con cementos ME-EX y ME-PL demuestran tener una similar tasa de generación de calor, evidenciado en la pendiente de la fase de aumento de temperatura; a diferencia de aquellos con cemento ME-ES, que muestran una pendiente más baja, y, por ende, se calientan a una menor tasa. En cuanto a la etapa de enfriamiento del núcleo, todos los bloques, independiente del contenido de cemento, disminuyen su temperatura a una tasa similar. Lo anterior se evidencia en que las curvas, luego de haber alcanzado la máxima temperatura en el núcleo, son paralelas.

En todos los casos, el cemento ME-ES es el que menor temperatura alcanza en el núcleo.

Debido a que el desarrollo de temperatura en el núcleo de un elemento masivo de hormigón se lleva a cabo en un ambiente semi-adiabático, las curvas presentadas desde la Figura 5.27 a la Figura 5.30, reflejan el efecto del calor de hidratación del cemento en el aumento de temperatura del hormigón, siendo este parámetro dependiente de la composición del cemento, como se vio anteriormente. De acuerdo a lo revisado en el marco conceptual, los cementos con mayor contenido de adiciones, como puzolanas, generan menos calor de hidratación que aquellos cementos sin adiciones, como el Portland. Lo anterior se evidencia en el trabajo experimental, donde, según los registros de temperatura de los bloques, se observa que aquellos confeccionados con el cemento que tiene un mayor contenido de puzolanas (ME-ES) son los que menor temperatura alcanzan en el núcleo del elemento.

Por otro lado, las curvas de desarrollo del diferencial de temperatura en los bloques (Figura 5.34 a la Figura 5.37) no presentan mayores diferencias según el tipo de cemento empleado en los hormigones. Lo anterior demuestra que este parámetro depende de factores distintos a la composición del cemento; en base a las curvas observada, uno de los principales factores podría ser la temperatura ambiente, ya que las curvas muestran oscilaciones que podrían deberse a la variación de la temperatura ambiente que afecta las lecturas de la termocupla más cercana a la superficie (T_{55}).

- Contenido de cemento

De las curvas presentadas desde la Figura 5.24 a la Figura 5.26, se observa que, para cada tipo de cemento, el contenido de cemento de la mezcla influye en el desarrollo de temperatura en el núcleo de los bloques. En general, para los tres tipos de cementos (ME-EX, ME-PL y ME-ES) las temperaturas alcanzadas en el núcleo aumentan a medida que se aumenta el contenido del cemento en la mezcla. Un caso particular se presenta en las curvas del cemento ME-EX (Figura 5.24), donde los contenidos de 500 kg/m^3 y 400 kg/m^3 registran un desarrollo de temperatura similar en el núcleo, siendo las temperaturas alcanzadas en el bloque de 500 kg/m^3 levemente mayores a las de 400 kg/m^3 .

En cuanto a las curvas de desarrollo de diferencial de temperatura presentadas desde la Figura 5.31 a la Figura 5.33, se evidencia una dependencia entre los valores alcanzados con el contenido de cemento del hormigón. En particular, para los cementos ME-EX y ME-PL, se observa que los bloques con mayor contenido de cemento presentaron un mayor diferencial de temperatura. Por su parte, los bloques confeccionados con cemento ME-ES muestran una leve diferencia entre los diferenciales de temperatura registrados, según el contenido de cemento de las mezclas; sin embargo, hasta alrededor de las 40 horas desde su confección, los bloques con mayor contenido de cemento ME-ES presentaron mayores diferenciales.

Lo anterior evidencia que el contenido de cemento de la mezcla de hormigón influye tanto en la temperatura alcanzada en el núcleo del elemento, como en los diferenciales de temperatura que se desarrollan.

- Temperatura máxima alcanzada en el núcleo

De los registros de temperatura obtenidos del núcleo de cada bloque, se obtuvieron los valores máximos alcanzados (Tabla 5.15). La Figura 5.38 muestra gráficamente los valores obtenidos según el tipo y contenido de cemento considerado en cada bloque.

Como se señaló anteriormente, y como se observa en la figura, los bloques con mayor contenido de cemento presentaron mayores temperaturas máximas, así como también aquellos con cementos con menor contenido de puzolanas.

Los bloques confeccionados con cementos ME-EX y ME-PL, aumentaron en más de 30°C la temperatura máxima alcanzada en el núcleo al pasar de un contenido de 300 kg/m^3 a uno de 600 kg/m^3 . Mientras que los bloques confeccionados con cemento ME-ES aumentaron alrededor de 15°C al variar su contenido desde 300 kg/m^3 a 600 kg/m^3 .

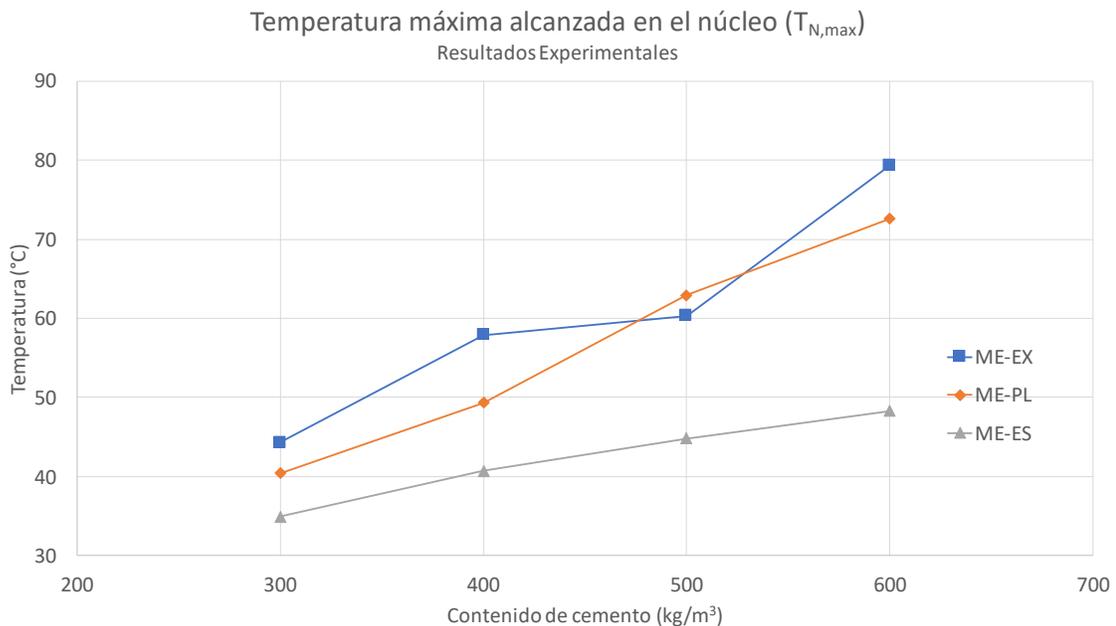


Figura 5.38: temperatura máxima alcanzada en el núcleo

Cabe señalar que dos de los bloques estudiados (ME-EX/600 y ME-EX/500) alcanzaron temperaturas máximas en el núcleo por sobre los 70°C , siendo éste un valor máximo recomendado en algunos documentos técnicos para evitar el desarrollo de etringita tardía en el núcleo de un elemento masivo.

- Tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo

De los resultados del trabajo experimental, se obtuvieron los registros del tiempo al que cada bloque alcanzó la máxima temperatura en el núcleo (Tabla 5.15). La Figura 5.39 muestra gráficamente estos valores, según el tipo y contenido de cemento empleado en cada bloque.

Como se observa en la figura, los bloques confeccionados con cemento ME-ES, independiente de su contenido, presentaron el mayor tiempo, seguidos por los bloques con cemento ME-PL y con menores tiempos se registraron los bloques con cemento ME-EX.

Las diferencias en los tiempos al que alcanzaron la temperatura máxima en el núcleo de los bloques se debe principalmente a la tasa de generación de calor que, como se demuestra en los resultados experimentales, es mayor para el cemento ME-EX y menor para el ME-ES, tal como se vio en la caracterización de los cementos, específicamente en sus curvas de desarrollo de calor de hidratación (Figura 5.10).

En cuanto al contenido de cemento, los bloques confeccionados con ME-PL muestran una diferencia de aproximadamente 10 horas al pasar de un contenido de 300 kg/m^3 a uno de 400 kg/m^3 , y luego se mantiene en un rango similar de tiempo para mayores dosis. Por su parte los bloques confeccionados con ME-PL tienden a disminuir el tiempo registrado, conforme aumenta el contenido de cemento, es decir, un mayor contenido de cemento promueve una mayor tasa de generación de calor. Por último, los bloques con cemento ME-EX, se mantienen dentro de un rango de tiempo de 17 y 20 horas, sin presentar una tendencia asociada al contenido de cemento.

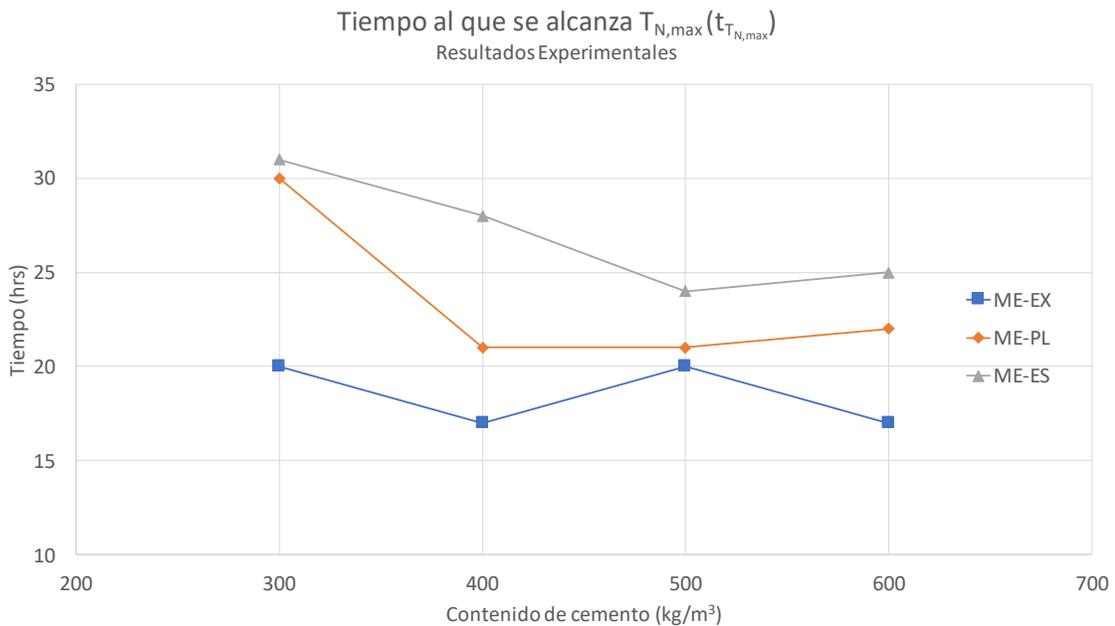


Figura 5.39: tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo

- Diferencial máximo de temperatura

De los registros de temperatura obtenidos en el núcleo de cada bloque y su correspondiente lectura a 5 cm de la superficie libre, se obtuvieron los valores del diferencial máximo alcanzado entre estos dos puntos para cada bloque (Tabla 5.15). La Figura 5.40 muestra gráficamente los valores obtenidos según el tipo y contenido de cemento considerado en cada bloque.

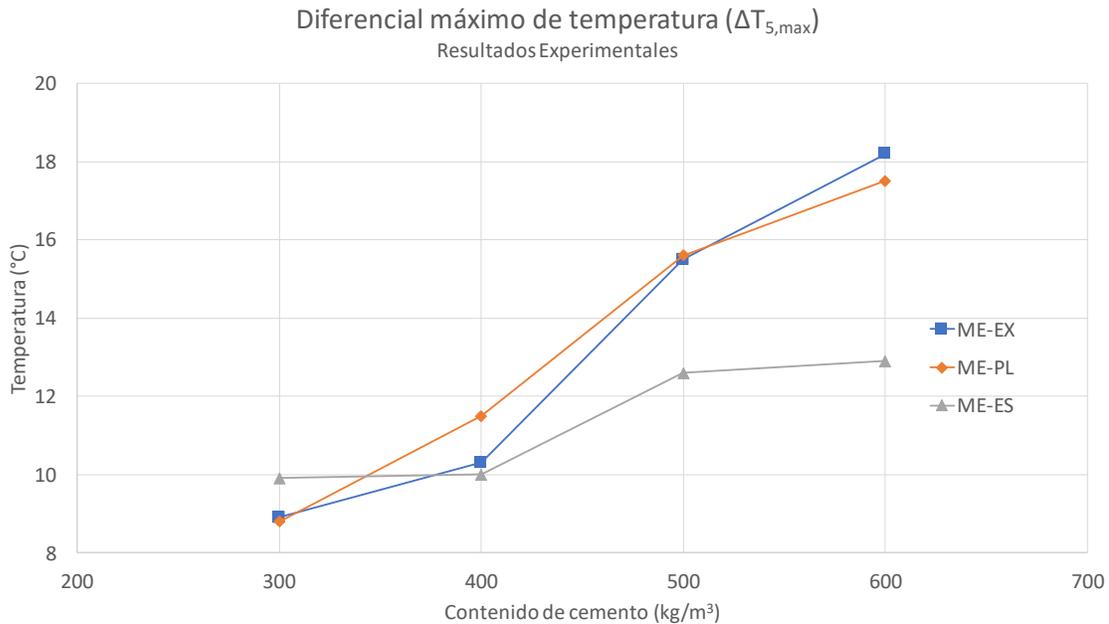


Figura 5.40: diferencial máximo de temperatura

Para los bloques confeccionados con cementos ME-EX y ME-PL se obtuvieron diferenciales que varían desde aproximadamente los 9°C hasta aproximadamente 18°C, mientras que los bloques confeccionados con cemento ME-ES registraron diferenciales que van desde los 10°C hasta alrededor de 13°C.

De acuerdo a lo anterior, en ningún caso se excedió el valor de diferencial de temperatura máximo recomendado por algunos documentos técnicos, correspondiente a 20°C, para evitar la fisuración de elementos masivos.

- Tiempo al que se alcanza el diferencial máximo de temperatura

De los resultados del trabajo experimental, se obtuvieron los registros del tiempo al que cada bloque alcanzó su máximo diferencial de temperatura (Tabla 5.15). La Figura 5.41 muestra gráficamente estos valores, según el tipo y contenido de cemento empleado en cada bloque.

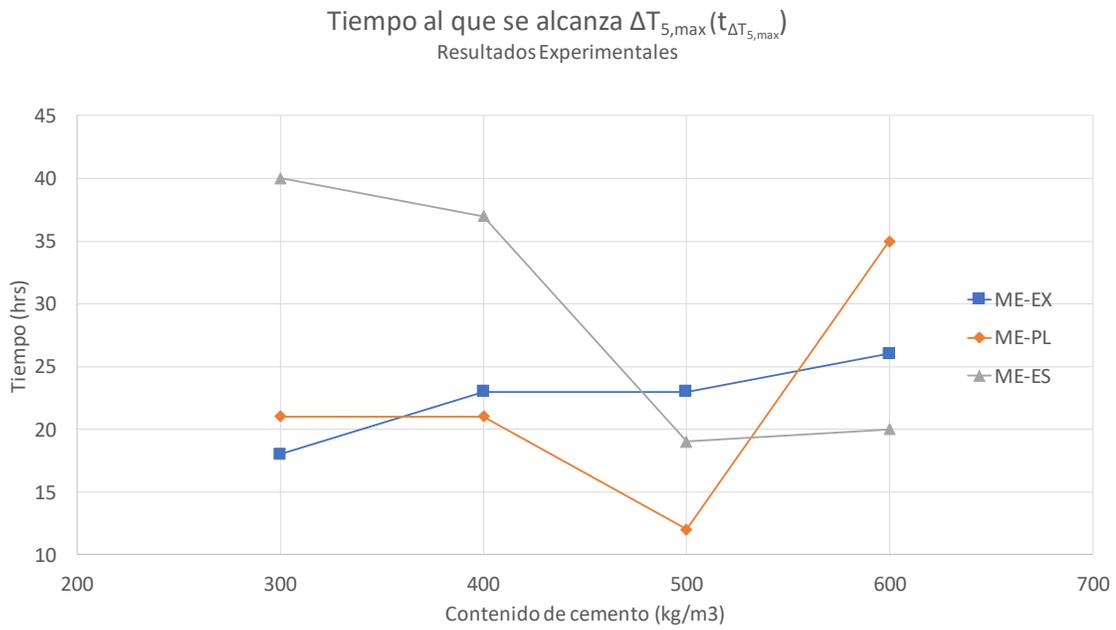


Figura 5.41: tiempo al que se alcanza el diferencial máximo de temperatura

De la gráfica anterior, se observa que los bloques confeccionados con cemento ME-EX y ME-ES, presentan una tendencia asociada al contenido de cemento en los resultados de los tiempos al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura; en el caso del ME-EX el tiempo es mayor para un mayor contenido de cemento, mientras que para ME-ES el tiempo disminuye conforme aumenta el contenido de cemento. Por su parte, los bloques confeccionados con cemento ME-PL no presentan una tendencia definida por el contenido de cemento en las mezclas estudiadas.

Como se observó en el análisis de los diferenciales de temperatura, existe una influencia de la temperatura ambiente en los valores de este parámetro, lo cual podría significar también una influencia en los valores del tiempo al que se alcanza el diferencial máximo en un bloque.

5.5. Conclusiones del capítulo

- El bloque que alcanzó la mayor temperatura en el núcleo fue el confeccionado con el hormigón ME-EX/600, mientras que el bloque que menor temperatura alcanzó en el núcleo del elemento fue el confeccionado con el hormigón ME-ES/300.
- Se verifica la influencia del tipo y contenido de cemento en el desarrollo de temperatura en el núcleo de un elemento masivo de hormigón. Mientras que, en el desarrollo del diferencial de temperatura, se observa una influencia directa del contenido de cemento en la mezcla, independiente de su tipo.
- Las formas de las curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo, comparadas con aquellas que describen el desarrollo del diferencial de temperatura ($T_{30} - T_{55}$) evidencian que el desarrollo de temperatura al interior del bloque, particularmente en su núcleo, no se ve afectado por la variación de la temperatura ambiente; mientras que el diferencial sí, ya

que la termocupla más cercana a la superficie libre registra lecturas con oscilaciones debidas a aquellas de la temperatura ambiente.

- Los resultados obtenidos en esta etapa del trabajo se condicen con lo señalado en el Capítulo 2, respecto a los factores que influyen en calor de hidratación del cemento y los factores que influyen en el desarrollo de temperatura al interior de un elemento masivo de hormigón.
- Los resultados del trabajo experimental entregan valores característicos de las mezclas estudiadas que permiten continuar con la siguiente etapa del trabajo, correspondiente a la evaluación de métodos predictivos de desarrollo de temperatura.

CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DE MÉTODOS PREDICTIVOS

En este capítulo se presentan las consideraciones particulares, parámetros de entrada y resultados de la evaluación de los métodos predictivos estudiados que permiten estimar parámetros relacionados al desarrollo de temperatura en elementos masivos de hormigón. Cabe señalar que gran parte de los valores de los parámetros de entrada considerados en cada método, fueron extraídos del trabajo experimental.

6.1. Método PCA

6.1.1. Consideraciones

Para la evaluación del método PCA se considera que las puzolanas aportan 50% de su peso como peso de cemento Portland, para efectos del calor de hidratación. Además, la temperatura de colocación se considera como el primer registro de temperatura obtenido desde la termocupla ubicada en el núcleo de cada bloque experimental.

6.1.2. Parámetros de entrada

El método PCA considera los siguientes parámetros de entrada para su evaluación:

- Contenido de cemento.
- Contenido de puzolana y/u otras adiciones.
- Temperatura de colocación del hormigón (T_{col}).

Para modelar la condición de los hormigones de estudio, se consideran los valores dados por la Tabla 6.1 para los parámetros de entrada.

Tabla 6.1: valores de parámetros de entrada considerados para la evaluación del método Gráfico

Hormigón	T_{col} (°C)	Residuo Insoluble (%p/p)	Puzolana (kg/m ³)	Cemento (kg/m ³)
ME-EX/600	27,7	11,21	67,24	532,76
ME-EX/500	24,3		56,03	443,97
ME-EX/400	25,6		44,83	355,18
ME-EX/300	21,1		33,62	266,38
ME-PL/600	23,2	15,57	93,44	506,56
ME-PL/500	25,1		77,87	422,13
ME-PL/400	19,4		62,29	337,71
ME-PL/300	17,4		46,72	253,28
ME-ES/600	17,2	36,20	217,20	382,80
ME-ES/500	17,4		181,00	319,00
ME-ES/400	15,9		144,80	255,20
ME-ES/300	14,9		108,60	191,40

6.1.3. Resultados

La Tabla 6.2 muestra los resultados de temperatura máxima que el método PCA estima para cada uno de los hormigones confeccionados.

Tabla 6.2: resultados obtenidos en la evaluación del método PCA

Hormigón	$T_{N,max}$ (°C)
ME-EX/600	96
ME-EX/500	81
ME-EX/400	71
ME-EX/300	55
ME-PL/600	90
ME-PL/500	80
ME-PL/400	64
ME-PL/300	51
ME-ES/600	76
ME-ES/500	67
ME-ES/400	55
ME-ES/300	44

6.2. Método Gráfico

6.2.1. Consideraciones

Para la evaluación del método Gráfico se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Volumen del elemento considerado: $0,216 m^3$
- Superficie expuesta del elemento: $0,36 m^2$
- Cementos ME-EX, ME-PL y ME-ES se corresponden con un cemento tipo II de la ASTM C150.
- Se consideran 7 días para el calor de hidratación por limitación del ensayo Langavant.
- Calor de hidratación a los 7 días, corresponde a un 80% del calor de hidratación medido a los 28 días.
- Calor de hidratación para cemento tipo I, según ACI 207.2R, es igual a $87 cal/gr$.
- No se considera efecto de moldaje, ni aislación en cálculo de V/S .
- Se considera que puzolanas aportan 50% de su peso como peso de cemento Portland para efectos del calor de hidratación.
- Se considera como temperatura ambiente el promedio de la temperatura registrada con termocupla en el laboratorio durante los 7 días de monitoreo de los bloques experimentales.
- Se considera como temperatura de colocación el primer valor registrado por la termocupla en el núcleo de los bloques experimentales.
- Debido a que los ensayos de caracterización de los cementos evalúan la finura de Blaine, se calcula la finura de Wagner según la siguiente relación:

$$S_W = S_B \cdot 0,56$$

Donde:

S_W : superficie específica de Wagner, en m^2/kg .

S_B : superficie específica de Blaine, en m^2/kg .

6.2.2. Parámetros de entrada

El método Gráfico considera los siguientes parámetros de entrada para su evaluación:

- Volumen del elemento.
- Superficie expuesta del elemento.
- Temperatura de colocación (T_{col}).
- Tipo de cemento según ASTM C150 (I, II, III o IV).
- Finura del cemento (Blaine).
- Contenido de cemento.
- Contenido de puzolana y/u otras adiciones.
- Temperatura ambiente promedio (T_{amb}).
- Coeficiente de difusión térmica del hormigón (α).
- Calor de hidratación de los cementos a los 7 días ($q_{hid,7}$).

Para modelar la condición de los hormigones de estudio, se consideran los valores dados por la Tabla 6.3 para los parámetros de entrada.

Tabla 6.3: valores de parámetros de entrada considerados para la evaluación del método Gráfico

Hormigón	T_{amb} (°C)	T_{col} (°C)	Finura [Blaine] (cm^2/g)	$q_{hid,7}$ (kJ/kg)	Residuo Insoluble (% p/p)	Puzolana (kg/m^3)	Cemento (kg/m^3)	α (m^2/h)
ME-EX/600	27,4	27,7	4996	314	11,21	67,24	532,76	0,00219
ME-EX/500	23,82	24,3				56,03	443,97	0,00204
ME-EX/400	25,62	25,6				44,83	355,18	0,00213
ME-EX/300	25,28	21,1				33,62	266,38	0,00210
ME-PL/600	24,91	23,2	4645	277	15,57	93,44	506,56	0,00208
ME-PL/500	21,97	25,1				77,87	422,13	0,00215
ME-PL/400	18,21	19,4				62,29	337,71	0,00239
ME-PL/300	16,53	17,4				46,72	253,28	0,00249
ME-ES/600	11,73	17,2	4901	187	36,20	217,20	382,80	0,00207
ME-ES/500	10,63	17,4				181,00	319,00	0,00219
ME-ES/400	11,73	15,9				144,80	255,20	0,00216
ME-ES/300	12,19	14,9				108,60	191,40	0,00207

6.2.3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del método Gráfico para cada alternativa evaluada.

6.2.3.1. Alternativa 1a

Considerando el procedimiento descrito en el Capítulo 4, la *Alternativa 1a* no considera corrección por finura del cemento, ni corrección por coeficiente de difusión térmica del hormigón.

La Tabla 6.4 muestra los resultados de temperatura máxima en el núcleo ($T_{N,máx}$), tiempo al que se alcanza dicha temperatura ($t_{T_{N,max}}$), y diferencial de temperatura entre el núcleo y la superficie del elemento al momento que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo ($\Delta T_{t_{T_{N,max}}}$).

Tabla 6.4: resultados obtenidos en la evaluación de la *ALTERNATIVA 1a* del método gráfico

ALTERNATIVA 1a: <u>sin</u> corrección por finura, <u>sin</u> corrección por coeficiente de difusión térmica			
Hormigón	$T_{N,max}$ (°C)	$t_{T_{N,max}}$ (hrs)	$\Delta T_{t_{T_{N,max}}}$ (°C)
ME-EX/600	65	18	22
ME-EX/500	54	21	15
ME-EX/400	50	19	10
ME-EX/300	41	24	1
ME-PL/600	60	22	20
ME-PL/500	52	19	15
ME-PL/400	37	30	4
ME-PL/300	30	36	-1
ME-ES/600	35	36	8
ME-ES/500	30	36	4
ME-ES/400	26	41	0
ME-ES/300	23	43	-4

6.2.3.2. Alternativa 1b

Considerando el procedimiento descrito en el Capítulo 4, la *Alternativa 1b* sí considera corrección por finura del cemento, pero no por coeficiente de difusión térmica del hormigón.

La Tabla 6.5 muestra los resultados de temperatura máxima en el núcleo ($T_{N,máx}$), tiempo al que se alcanza dicha temperatura ($t_{T_{N,max}}$), y diferencial de temperatura entre el núcleo y la superficie del elemento al momento que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo ($\Delta T_{t_{T_{N,max}}}$).

Tabla 6.5: resultados obtenidos en la evaluación de la *ALTERNATIVA 1b* del método gráfico

ALTERNATIVA 1b: <u>con</u> corrección por finura, <u>sin</u> corrección por coeficiente de difusión térmica			
Hormigón	$T_{N,max}$ (°C)	$t_{T_{N,max}}$ (hrs)	$\Delta T_{t_{T_{N,max}}}$ (°C)
ME-EX/600	112	18	69
ME-EX/500	90	21	51
ME-EX/400	82	19	41
ME-EX/300	62	24	22
ME-PL/600	89	22	49
ME-PL/500	78	19	41
ME-PL/400	52	30	18
ME-PL/300	40	36	9
ME-ES/600	41	36	14
ME-ES/500	35	36	9
ME-ES/400	30	41	4
ME-ES/300	26	43	-1

6.2.3.3. *Alternativa 2a*

Considerando el procedimiento descrito en el Capítulo 4, la *Alternativa 2a* no considera corrección por finura del cemento, pero sí por coeficiente de difusión térmica del hormigón.

La Tabla 6.6 muestra los resultados de temperatura máxima en el núcleo ($T_{N,máx}$), tiempo al que se alcanza dicha temperatura ($t_{T_{N,max}}$), y diferencial de temperatura entre el núcleo y la superficie del elemento al momento que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo ($\Delta T_{t_{T_{N,max}}}$).

Tabla 6.6: resultados obtenidos en la evaluación de la *ALTERNATIVA 2a* del método gráfico

ALTERNATIVA 2a: <u>sin</u> corrección por finura, <u>con</u> corrección por coeficiente de difusión térmica			
Hormigón	$T_{N,max}$ (°C)	$t_{T_{N,max}}$ (hrs)	$\Delta T_{t_{T_{N,max}}}$ (°C)
ME-EX/600	75	36	33
ME-EX/500	61	48	22
ME-EX/400	57	41	16
ME-EX/300	41	55	1
ME-PL/600	67	50	27
ME-PL/500	59	43	22
ME-PL/400	43	55	10
ME-PL/300	34	60	3
ME-ES/600	47	65	20
ME-ES/500	39	62	14
ME-ES/400	33	65	7
ME-ES/300	29	70	2

6.2.3.4. *Alternativa 2b*

Considerando el procedimiento descrito en el Capítulo 4, la *Alternativa 2b* considera tanto corrección por finura del cemento, como por coeficiente de difusión térmica del hormigón.

La Tabla 6.7 muestra los resultados de temperatura máxima en el núcleo ($T_{N,max}$), tiempo al que se alcanza dicha temperatura ($t_{T_{N,max}}$), y diferencial de temperatura entre el núcleo y la superficie del elemento al momento que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo ($\Delta T_{t_{T_{N,max}}}$).

Tabla 6.7: resultados obtenidos en la evaluación de la *ALTERNATIVA 2b* del método gráfico

ALTERNATIVA 2b: <u>con</u> corrección por finura, <u>con</u> corrección por coeficiente de difusión térmica			
Hormigón	$T_{N,max}$ (°C)	$t_{T_{N,max}}$ (hrs)	$\Delta T_{t_{T_{N,max}}}$ (°C)
ME-EX/600	123	36	80
ME-EX/500	93	48	54
ME-EX/400	87	41	46
ME-EX/300	58	55	18
ME-PL/600	93	50	53
ME-PL/500	81	43	44
ME-PL/400	57	55	24
ME-PL/300	43	60	12
ME-ES/600	50	65	23
ME-ES/500	43	62	17
ME-ES/400	35	65	9
ME-ES/300	30	70	3

6.3. Método de Schmidt

6.3.1. Consideraciones

Para la evaluación del método de Schmidt se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se consideran los valores de desarrollo adiabático de temperatura determinados en la Sección 5.2.2.5.
- Se considera un elemento de dos dimensiones de 0,6 m x 0,6 m.
- Flujo de calor se considera en una sola dirección.
- Borde inferior del elemento se encuentra aislado térmicamente.
- Superficie expuesta del elemento se considera en equilibrio con temperatura ambiente.
- Se considera como temperatura ambiente el promedio de la temperatura registrada con termocupla en el laboratorio, en los 7 días de monitoreo de los bloques experimentales.
- Se considera como temperatura de colocación el primer valor registrado por la termocupla en el núcleo de los bloques experimentales.

6.3.2. Parámetros de entrada

El método de Schmidt considera los siguientes parámetros de entrada para su evaluación:

- Dimensiones del elemento.
- Temperatura de colocación (T_{col}).
- Temperatura ambiente promedio (T_{amb}).
- Coeficiente de difusión térmica del hormigón (α).
- Desarrollo adiabático de temperatura del hormigón por 7 días.

Para modelar la condición de los hormigones de estudio, se consideran los valores dados por la Tabla 6.8 para los parámetros de entrada.

Tabla 6.8: valores de parámetros de entrada considerados para la evaluación del método de Schmidt

Hormigón	T_{amb} (°C)	T_{col} (°C)	α (m ² /h)
ME-EX/600	27,4	27,7	0,00219
ME-EX/500	23,8	24,3	0,00204
ME-EX/400	25,6	25,6	0,00213
ME-EX/300	25,3	21,1	0,00210
ME-PL/600	24,9	23,2	0,00208
ME-PL/500	22,0	25,1	0,00215
ME-PL/400	18,2	19,4	0,00239
ME-PL/300	16,5	17,4	0,00249
ME-ES/600	11,7	17,2	0,00207
ME-ES/500	10,6	17,4	0,00219
ME-ES/400	11,7	15,9	0,00216
ME-ES/300	12,2	14,9	0,00207

Considerando el procedimiento descrito en el Capítulo 4, en particular la ecuación (ec. 4.15), y el tiempo de evaluación considerado (7 días), el paso del tiempo (Δt) y el número de pasos a considerar en cada hormigón, se muestran en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9: paso del tiempo y números de pasos considerados en la evaluación del método de Schmidt

Hormigón	Δt (hrs)	N° total de pasos
ME-EX/600	0,57	294
ME-EX/500	0,61	274
ME-EX/400	0,59	285
ME-EX/300	0,60	281
ME-PL/600	0,60	279
ME-PL/500	0,58	288
ME-PL/400	0,52	321
ME-PL/300	0,50	334
ME-ES/600	0,60	278
ME-ES/500	0,57	294
ME-ES/400	0,58	289
ME-ES/300	0,60	277

A modo de ejemplo, la Tabla 6.10 muestra el desarrollo de los primeros 4 pasos del método de Schmidt; en ella se observa la condición de borde considerada para la superficie expuesta (*posición* = 0,60 m), donde ésta se encuentra en equilibrio con la temperatura ambiente ($\Delta T = 0$).

Tabla 6.10: desarrollo de los primeros 4 pasos del método de Schmidt

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Tiempo	0	Δt		$2 \cdot \Delta t$		$3 \cdot \Delta t$		$4 \cdot \Delta t$
2	$(\Delta T_{ad})x \text{ paso}$		$\Delta T_{ad,\Delta t}$		$\Delta T_{ad,2\Delta t}$		$\Delta T_{ad,3\Delta t}$		$\Delta T_{ad,4\Delta t}$
3	$(\Delta T_{ad})acum$		C3		C3 + E2		E3 + G2		G3 + I2
4	N° de paso	0	1	2		3		4	
5	Posición (m)								
6	0,60	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,55	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C6 + C8}{2}$	$E2 + D7$	$\frac{E6 + E8}{2}$	$G2 + F7$	$\frac{G6 + G8}{2}$	$I2 + H7$
8	0,50	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C7 + C9}{2}$	$E2 + D8$	$\frac{E7 + E9}{2}$	$G2 + F8$	$\frac{G7 + G9}{2}$	$I2 + H8$
9	0,45	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C8 + C10}{2}$	$E2 + D9$	$\frac{E8 + E10}{2}$	$G2 + F9$	$\frac{G8 + G10}{2}$	$I2 + H9$
10	0,40	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C9 + C11}{2}$	$E2 + D10$	$\frac{E9 + E11}{2}$	$G2 + F10$	$\frac{G9 + G11}{2}$	$I2 + H10$
11	0,35	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C10 + C12}{2}$	$E2 + D11$	$\frac{E10 + E12}{2}$	$G2 + F11$	$\frac{G10 + G12}{2}$	$I2 + H11$
12	0,30	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C11 + C13}{2}$	$E2 + D12$	$\frac{E11 + E13}{2}$	$G2 + F12$	$\frac{G11 + G13}{2}$	$I2 + H12$
13	0,25	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C12 + C14}{2}$	$E2 + D13$	$\frac{E12 + E14}{2}$	$G2 + F13$	$\frac{G12 + G14}{2}$	$I2 + H13$
14	0,20	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C13 + C15}{2}$	$E2 + D14$	$\frac{E13 + E15}{2}$	$G2 + F14$	$\frac{G13 + G15}{2}$	$I2 + H14$
15	0,15	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C14 + C16}{2}$	$E2 + D15$	$\frac{E14 + E16}{2}$	$G2 + F15$	$\frac{G14 + G16}{2}$	$I2 + H15$
16	0,10	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C15 + C17}{2}$	$E2 + D16$	$\frac{E15 + E17}{2}$	$G2 + F16$	$\frac{G15 + G17}{2}$	$I2 + H16$
17	0,05	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C16 + C18}{2}$	$E2 + D17$	$\frac{E16 + E18}{2}$	$G2 + F17$	$\frac{G16 + G18}{2}$	$I2 + H17$
18	0,00	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C17 + C19}{2}$	$E2 + D18$	$\frac{E17 + E19}{2}$	$G2 + F18$	$\frac{G17 + G19}{2}$	$I2 + H18$
19	-0,05	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C18 + C20}{2}$	$E2 + D19$	$\frac{E18 + E20}{2}$	$G2 + F19$	$\frac{G18 + G20}{2}$	$I2 + H19$
20	-0,10	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C19 + C21}{2}$	$E2 + D20$	$\frac{E19 + E21}{2}$	$G2 + F20$	$\frac{G19 + G21}{2}$	$I2 + H20$
21	-0,15	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C20 + C22}{2}$	$E2 + D21$	$\frac{E20 + E22}{2}$	$G2 + F21$	$\frac{G20 + G22}{2}$	$I2 + H21$
22	-0,20	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C21 + C23}{2}$	$E2 + D22$	$\frac{E21 + E23}{2}$	$G2 + F22$	$\frac{G21 + G23}{2}$	$I2 + H22$
23	-0,25	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C22 + C24}{2}$	$E2 + D23$	$\frac{E22 + E24}{2}$	$G2 + F23$	$\frac{G22 + G24}{2}$	$I2 + H23$
24	-0,30	0	$T_{col} + C2$	$\frac{C23 + C25}{2}$	$E2 + D24$	$\frac{E23 + E25}{2}$	$G2 + F24$	$\frac{G23 + G25}{2}$	$I2 + H24$
25	-0,35	0	0	0	0	0	0	0	0
26	-0,40	0	0	0	0	0	0	0	0
27	-0,45	0	0	0	0	0	0	0	0
28	-0,50	0	0	0	0	0	0	0	0
29	-0,55	0	0	0	0	0	0	0	0
30	-0,60	0	0	0	0	0	0	0	0

6.3.3. Resultados

El método de Schmidt entrega como resultado una estimación del historial del desarrollo de temperatura en el tiempo.

Las curvas resultantes de desarrollo de temperatura en el núcleo del elemento, (T_N), y 5 cm bajo la superficie expuesta a las condiciones ambientales, (T_5), para los 12 casos de estudio, se presentan en el ANEXO B.

A modo de ejemplo, desde la Figura 6.1 a la Figura 6.3, se muestran las curvas resultantes para los casos de estudio correspondientes a los hormigones con un contenido de cemento de 600 kg/m^3 , para los 3 tipos de cementos considerados.

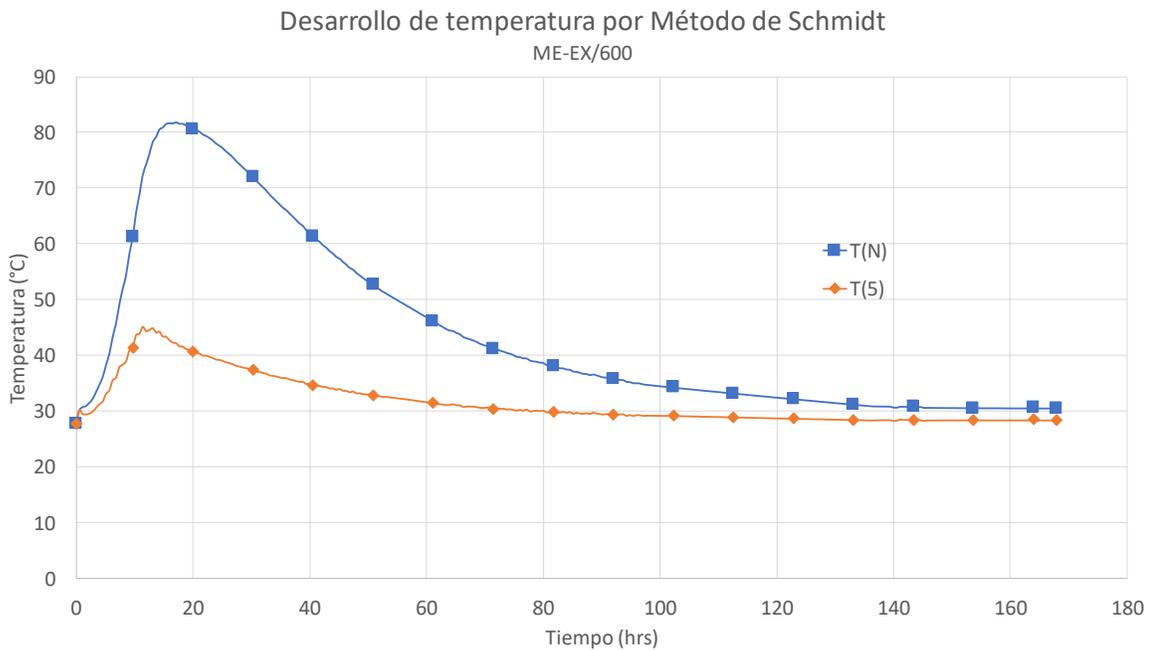


Figura 6.1: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600

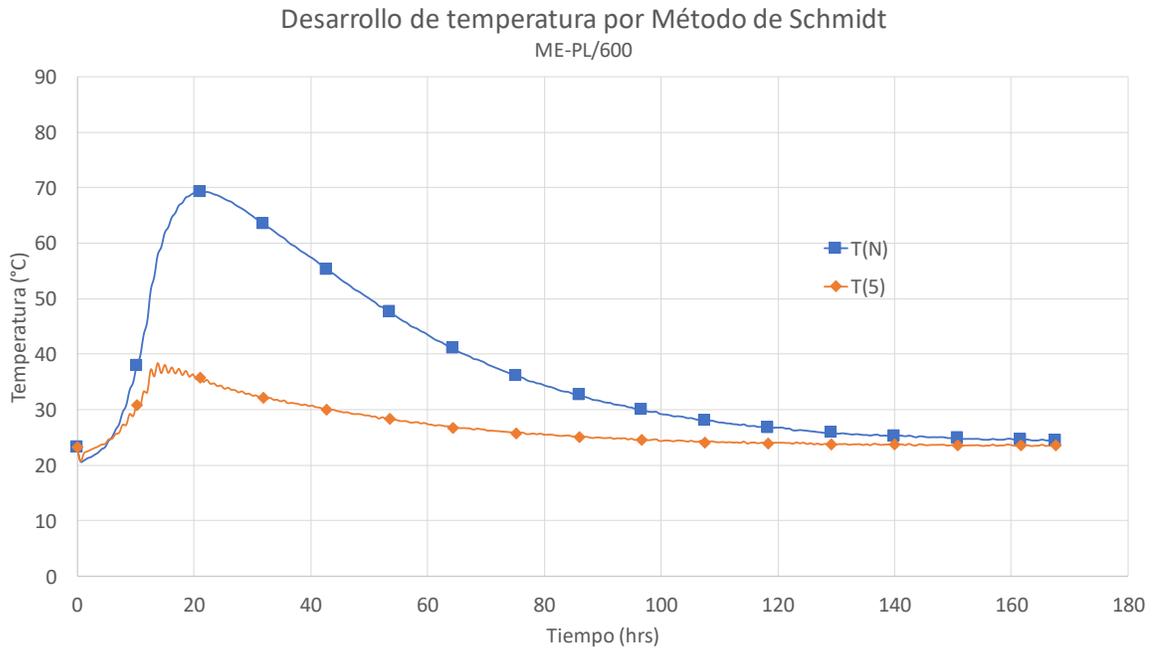


Figura 6.2: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600

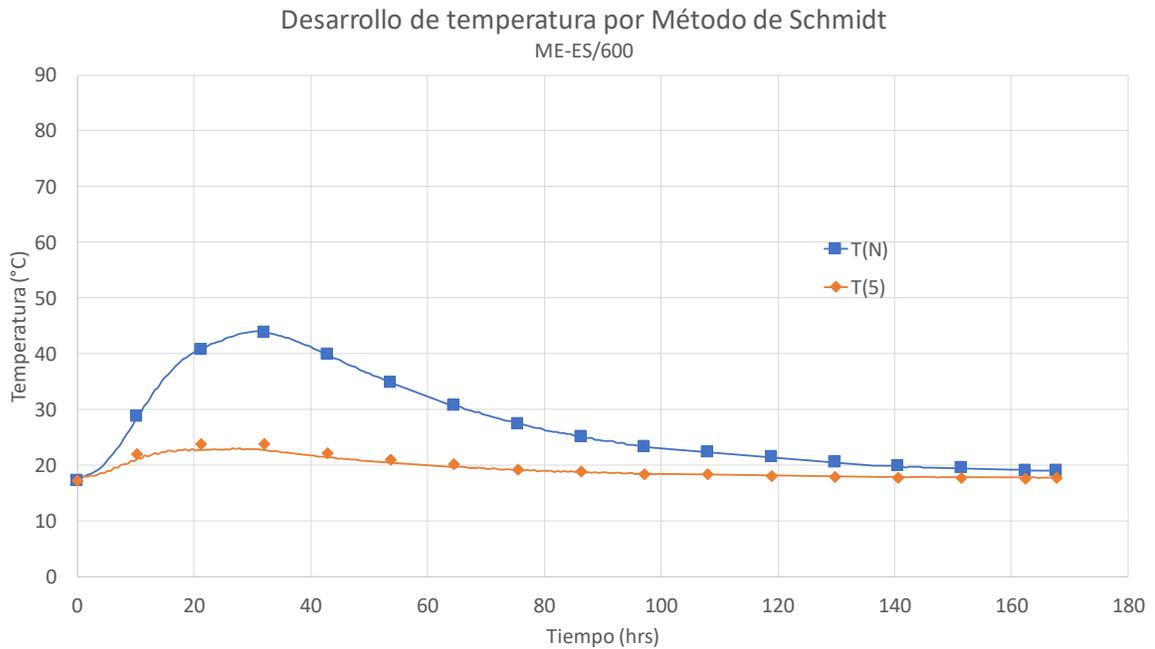


Figura 6.3: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600

La Tabla 6.11 muestra los resultados de temperatura máxima en el núcleo del elemento ($T_{N,max}$), tiempo al que se alcanza dicha temperatura máxima ($t_{T_{N,max}}$), máximo diferencial de temperatura entre el núcleo y 5 cm bajo la superficie expuesta ($\Delta T_{5,max}$), y el tiempo al que se alcanza dicho diferencial ($t_{\Delta T_{5,max}}$), para todos los hormigones estudiados.

Tabla 6.11: resultados obtenidos en la evaluación del método de Schmidt

Hormigón	$T_{N,max}$ (°C)	$t_{T_{N,max}}$ (hrs)	$\Delta T_{5,max}$ (°C)	$t_{\Delta T_{5,max}}$ (hrs)
ME-EX/600	82	17	40	19
ME-EX/500	70	17	34	20
ME-EX/400	62	16	27	19
ME-EX/300	49	16	21	19
ME-PL/600	69	21	34	23
ME-PL/500	63	22	29	23
ME-PL/400	49	21	22	22
ME-PL/300	40	20	17	22
ME-ES/600	44	31	20	33
ME-ES/500	39	30	17	31
ME-ES/400	34	30	13	32
ME-ES/300	29	31	10	31

6.4. Método Concrete Temperature & Cracking Risk®

6.4.1. Consideraciones

El método CTK consta de dos procesos simultáneos de cálculo. El primero orientado a determinar el desarrollo de la temperatura en el elemento de hormigón, y el segundo a la determinación del riesgo de agrietamiento del elemento.

En este trabajo, y de acuerdo a sus objetivos, para la evaluación del método CTK se considera únicamente la primera parte de éste. En este desarrollo se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se considera un elemento de 3 dimensiones, donde cada una de ellas es de 0,6 m.
- Se consideran los valores de calor de hidratación de los cementos por 7 días determinados mediante Calorimetría de Langavant.
- El flujo de calor se considera en una sola dirección.
- Se considera que el borde inferior del elemento se encuentra aislado térmicamente.
- Temperatura ambiente se considera constante y equivalente al promedio de la temperatura registrada con termocupla en el laboratorio durante los 7 días de monitoreo de los bloques experimentales.
- Se considera como temperatura de colocación el primer valor registrado por la termocupla en el núcleo de los bloques experimentales.
- Se considera pérdida de calor por convección en la superficie expuesta del elemento.
- El coeficiente de convección considerado entre el hormigón y el aire es

$$U = 20 \frac{kJ}{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C}$$

6.4.2. Parámetros de entrada

Para la sección del método CTK que permite la estimación del desarrollo de temperatura en un elemento de hormigón, se consideran los siguientes parámetros de entrada:

- Dimensiones del elemento.
- Temperatura de colocación (T_{col}).
- Temperatura ambiente promedio (T_{amb}).
- Coeficiente de difusión térmica del hormigón (α).
- Conductividad térmica del hormigón (λ).
- Coeficiente de convección hormigón-aire (U).
- Contenido de cemento.
- Relación agua/cemento (a/c).
- Calor específico del hormigón ($c_{e,h}$).
- Densidad húmeda del hormigón (ρ_h).
- Calor de hidratación del cemento a los 7 días ($q_{hid,7}$).
- Desarrollo del calor de hidratación de los cementos durante 7 días.

Para modelar la condición de los hormigones de estudio, se consideran los valores dados por la Tabla 6.12 para los parámetros de entrada.

Tabla 6.12: valores de parámetros de entrada considerados para la evaluación del método CTK

Hormigón	Contenido de cemento	α $\left(\frac{m^2}{h}\right)$	$c_{e,h}$ $(kJ/kg/^\circ C)$	λ $(kJ/m/h/^\circ C)$	ρ $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	a/c	$q_{hid,7}$ $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	T_{amb} $(^\circ C)$	T_{col} $(^\circ C)$
ME-EX/600	600	0,00219	1,013	5,542	2500	0,340	314	27,4	27,7
ME-EX/500	500	0,00204	1,029	5,166	2461	0,409	314	23,8	24,3
ME-EX/400	400	0,00213	1,023	5,385	2476	0,511	314	25,6	25,6
ME-EX/300	300	0,00210	1,012	5,313	2504	0,681	314	25,3	21,1
ME-PL/600	600	0,00208	1,018	5,246	2478	0,340	277	24,9	23,2
ME-PL/500	500	0,00215	1,016	5,418	2484	0,409	277	22,0	25,1
ME-PL/400	400	0,00239	1,031	6,041	2449	0,511	277	18,2	19,4
ME-PL/300	300	0,00249	1,012	6,298	2497	0,681	277	16,5	17,4
ME-ES/600	600	0,00207	0,989	5,116	2497	0,340	187	11,7	17,2
ME-ES/500	500	0,00219	1,004	5,427	2471	0,409	187	10,6	17,4
ME-ES/400	400	0,00216	1,006	5,371	2475	0,511	187	11,7	15,9
ME-ES/300	300	0,00207	1,000	5,173	2503	0,681	187	12,2	14,9

El modelo se evalúa en una planilla programada por su creador, en la cual se ingresan los valores de los parámetros de entrada (Figura 6.4). Como resultado se obtiene el historial de temperatura estimada en los puntos del elemento que considera el modelo, acompañado de un gráfico arrojado por el mismo programa (Figura 6.5).

En el ANEXO C se muestran imágenes de la interfase del programa y las curvas arrojadadas por el modelo para todos los casos estudiados.

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®			
MIX DESIGN			
Cement Type	ME-EX	Qtot 7d	314 [kg/kg]
T Adiab	93,2 [°C]	Cement Content	600 [kg/m³]
t(TAdiab)	22,0 [h]	w/c	0,340 [-]
		Concrete Density	2.500 [kg/m³]
CONCRETE THERMAL PROPERTIES		SURFACE HEAT TRANSFER TO AIR	
Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]	Given Value	yes
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	or	Calculated value f(wind)
Concrete Specific Heat	1,013 [kJ/(kg·K)]	U1	Plastic Cover 50mm air
Concrete Conductivity	5,542 [kJ/(m·h·K)]	Wind	21,41 [kJ/(m²·h·K)]
Concrete Difusivity	0,00219 [m²/h]	Demoulding time	1,0 [m/s] {1-10}
		Exposed Concrete Surface	168 [h] {0-->168}
		U2	29,54 [kJ/(m²·h·K)]
PLACEMENT CONDITIONS		TEMPERATURE RESULTS	
Fresh Concrete Temperature	27,7 [°C]	T ^{max}	83,6 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T ^{max})	22,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T ^{sur}	54,4 [°C]
Mean T ^o - Constant T ^o	27,4 [°C]	t(T ^{sur})	22,0 [h]
Daily ΔT ^o	7 [°C]	dif T N-Sur	29,2 [°C]
t(T ^{max})	15 [h]	dif T N-Scms	20,5 [°C]
CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS			
Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m²]

Figura 6.4: interfase del modelo para estimar el desarrollo de temperatura del hormigón ME-EX/600

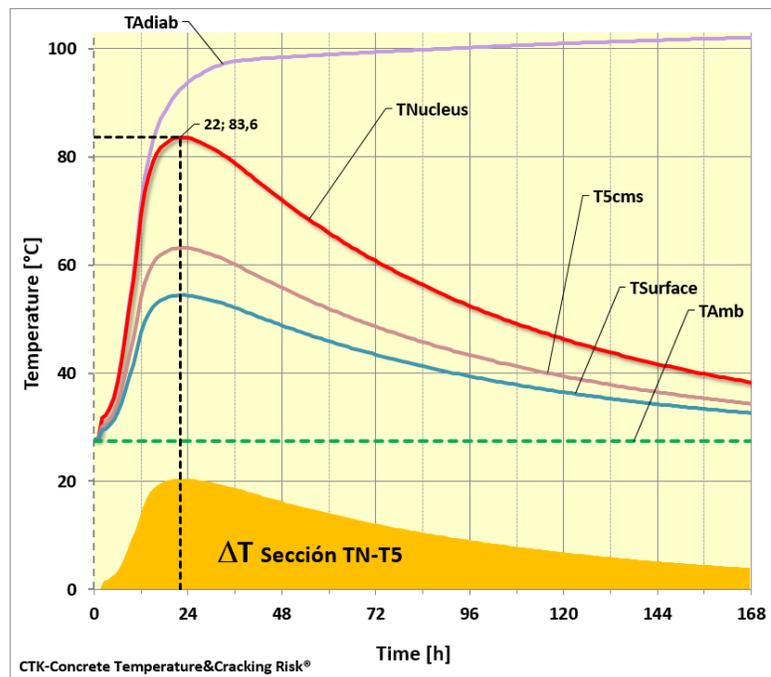


Figura 6.5: imagen resultante al ingresar valores de entrada para el hormigón ME-EX/600

6.4.3. Resultados

El método CTK entrega como resultado una estimación del historial del desarrollo de temperatura en el tiempo. Cabe señalar que los resultados se estiman para intervalos de 1 hora.

Las curvas resultantes de desarrollo de temperatura en el núcleo del elemento, (T_N), y 5 cm bajo la superficie expuesta a las condiciones ambientales, (T_5), para los 12 casos de estudio, se presentan en el ANEXO C.

A modo de ejemplo, desde la Figura 6.1 a la Figura 6.3, se muestran las curvas resultantes para los casos de estudio correspondientes a los hormigones con un contenido de cemento de 600 kg/m^3 , para los 3 tipos de cementos considerados.

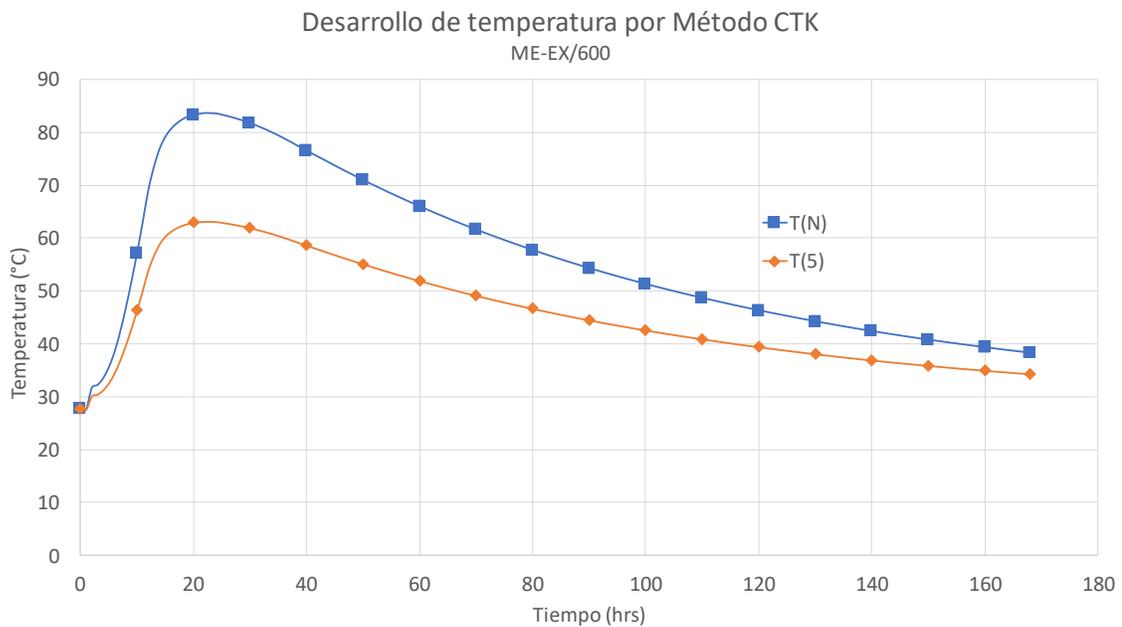


Figura 6.6: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600

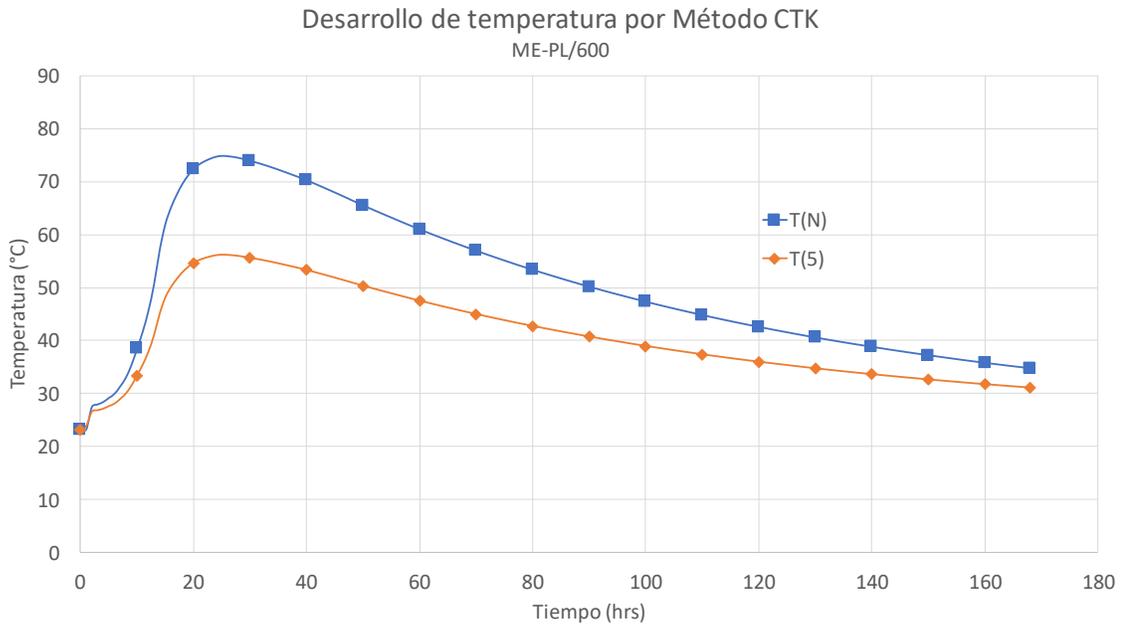


Figura 6.7: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600

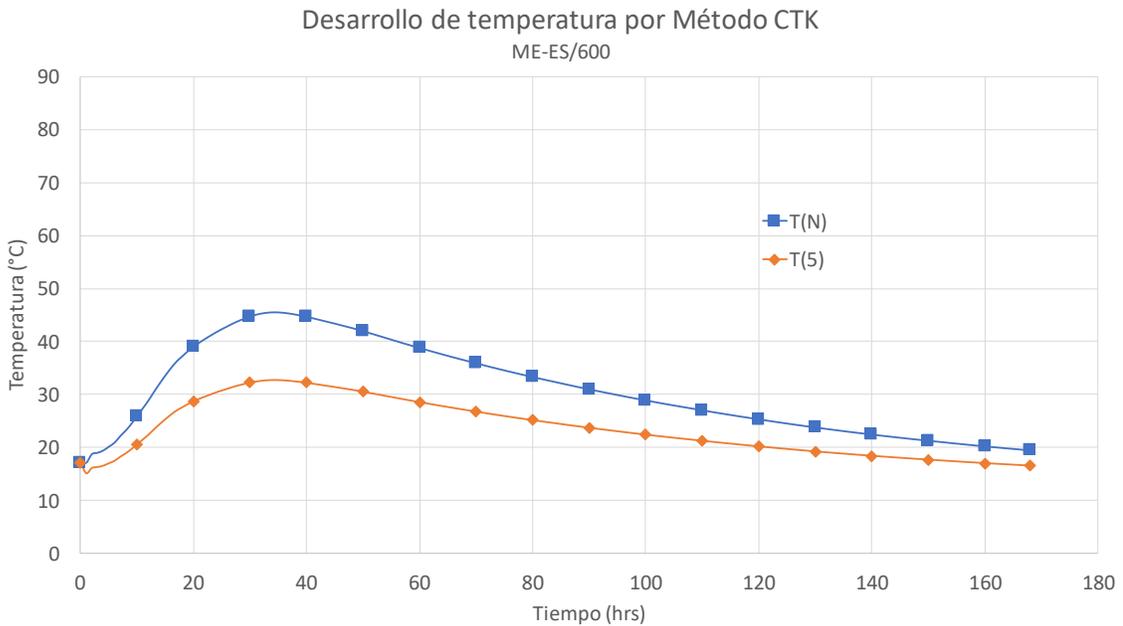


Figura 6.8: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600

La Tabla 6.13 muestra los resultados de temperatura máxima en el núcleo del elemento ($T_{N,max}$), tiempo al que se alcanza dicha temperatura máxima ($t_{T_{N,max}}$), máximo diferencial de temperatura entre el núcleo y 5 cm bajo la superficie expuesta ($\Delta T_{5,max}$), y el tiempo al que se alcanza dicho diferencial ($t_{\Delta T_{5,max}}$), para todos los hormigones estudiados.

Tabla 6.13: resultados obtenidos en la evaluación del método CTK

Hormigón	$T_{N,max}$ (°C)	$t_{T_{N,max}}$ (hrs)	$\Delta T_{5,max}$ (°C)	$t_{\Delta T_{5,max}}$ (hrs)
ME-EX/600	84	22	21	22
ME-EX/500	71	22	18	22
ME-EX/400	63	22	14	22
ME-EX/300	50	24	9	24
ME-PL/600	75	25	19	25
ME-PL/500	67	25	17	25
ME-PL/400	53	25	12	25
ME-PL/300	43	25	9	25
ME-ES/600	46	34	13	34
ME-ES/500	40	34	11	34
ME-ES/400	34	34	8	34
ME-ES/300	29	34	6	34

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se realiza un análisis de los resultados obtenidos en la evaluación de métodos predictivos de desarrollo de temperatura en elementos masivos, descrita en el capítulo anterior.

El análisis considera una comparación entre los valores obtenidos por cada método de los principales parámetros a considerar en el estudio de desarrollo de temperatura en el hormigón masivo, los cuales, como se mencionó anteriormente, corresponden a:

- Desarrollo de temperatura en el núcleo
 - Temperatura máxima en el núcleo
 - Tiempo al que se alcanza la máxima temperatura en el núcleo
- Desarrollo del diferencial de temperatura en el núcleo
 - Máximo diferencial de temperatura
 - Tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura

Cabe aclarar que al hablar de “diferencial de temperatura” se refiere a la diferencia entre las temperaturas de un punto ubicado en el núcleo del elemento y uno ubicado al interior del elemento, a 5cm de la superficie expuesta a condiciones ambientales (cara no aislada).

Además, se realiza un análisis de cada método evaluado y sus resultados obtenidos, verificando si existe alguna relación con el tipo y/o contenido de cemento en los valores estimados de cada parámetro.

Finalmente, se entregan conclusiones del capítulo en las que se propone uno de los métodos evaluados como aquel que mayores ventajas ofrece al utilizarlo, y aquel que mejor se ajusta a los resultados experimentales, entre los métodos evaluados.

Para efectos del análisis de resultados de los principales parámetros de estudio, en la etapa de contraste entre valores estimados por métodos predictivos y valores obtenidos en el trabajo experimental, la estimación se considera “aceptable” de cumplirse los siguientes criterios:

- *Valor evaluado sobreestima el valor obtenido experimentalmente*: al tratarse de parámetros que buscan ser estimados en una fase de diseño, o previa a la construcción del elemento, y que se obtienen de una modelación y/o evaluación matemática, que el parámetro de estudio sea sobreestimado en lugar de subestimado implica un factor de seguridad en la modelación.
- *Desviación del valor estimado respecto al experimental es igual o menor a un 15%*: este criterio busca uniformizar el análisis y acotar la variabilidad de los métodos dentro de un rango adecuado.

7.1. Desarrollo de temperatura en el núcleo (T_N)

De la Figura 7.1 a la Figura 7.12 se presenta el contraste entre las curvas resultantes del desarrollo de temperatura en el núcleo de cada bloque, según los resultados obtenidos por la evaluación del método de Schmidt, método CTK y del trabajo experimental.

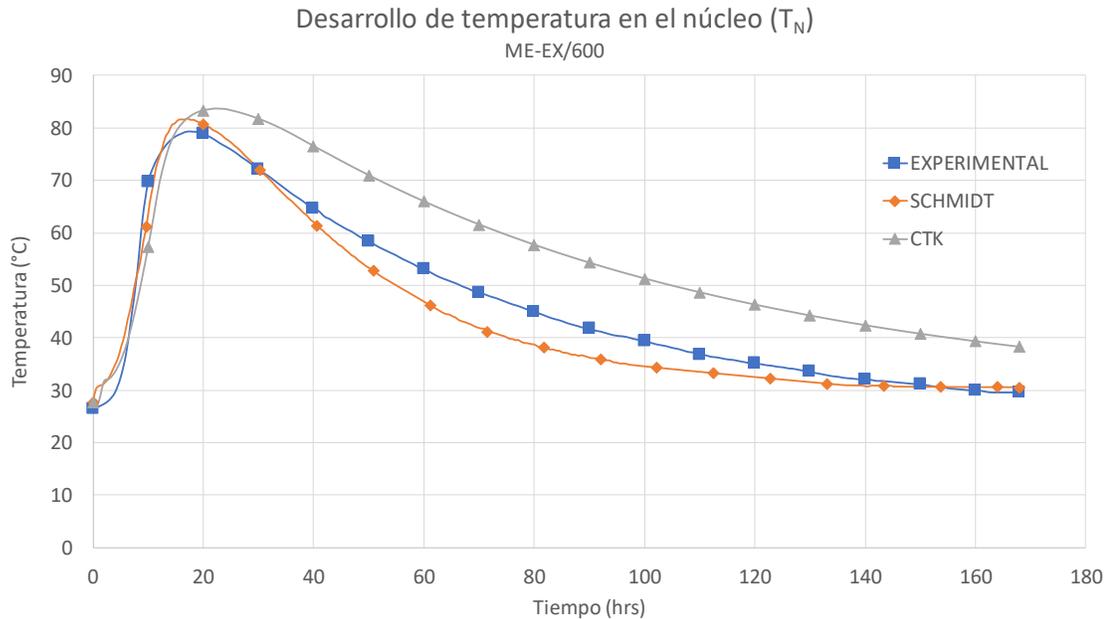


Figura 7.1: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

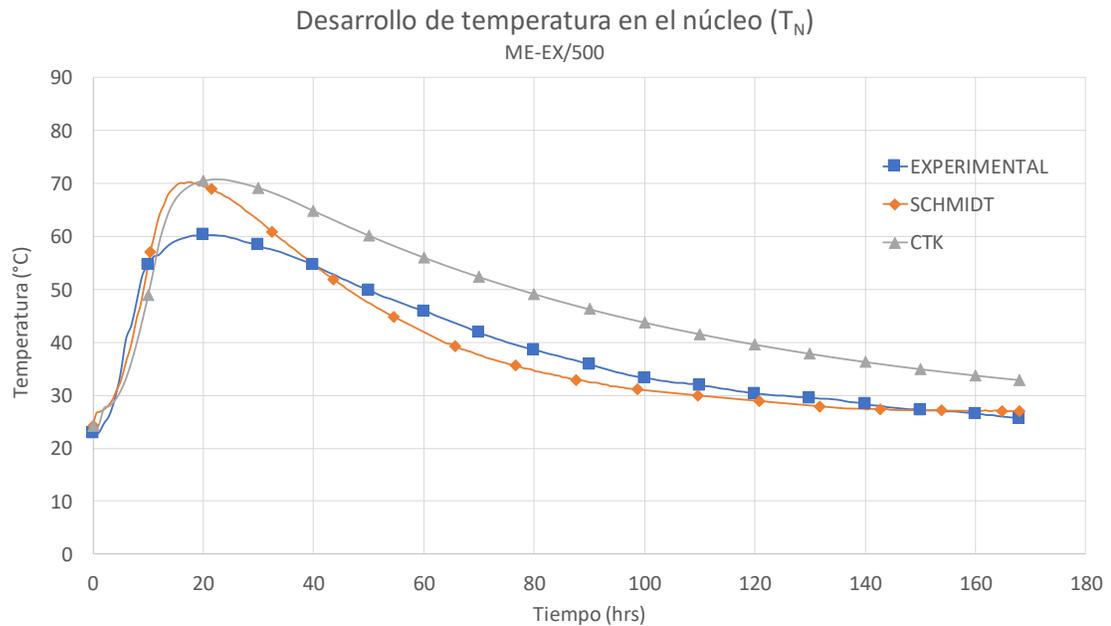


Figura 7.2: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

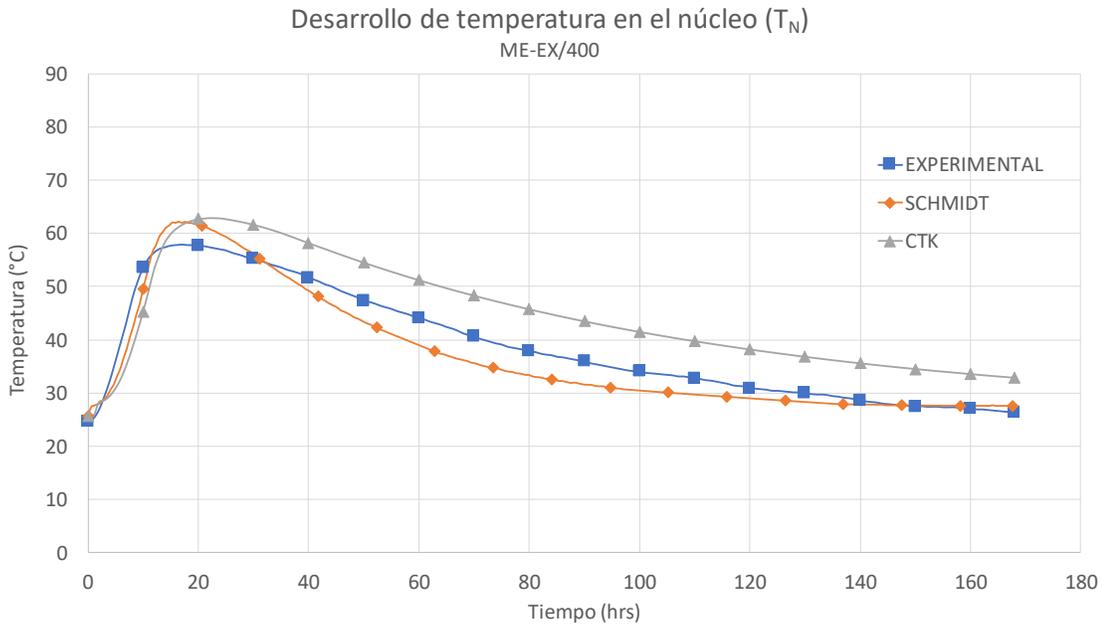


Figura 7.3: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

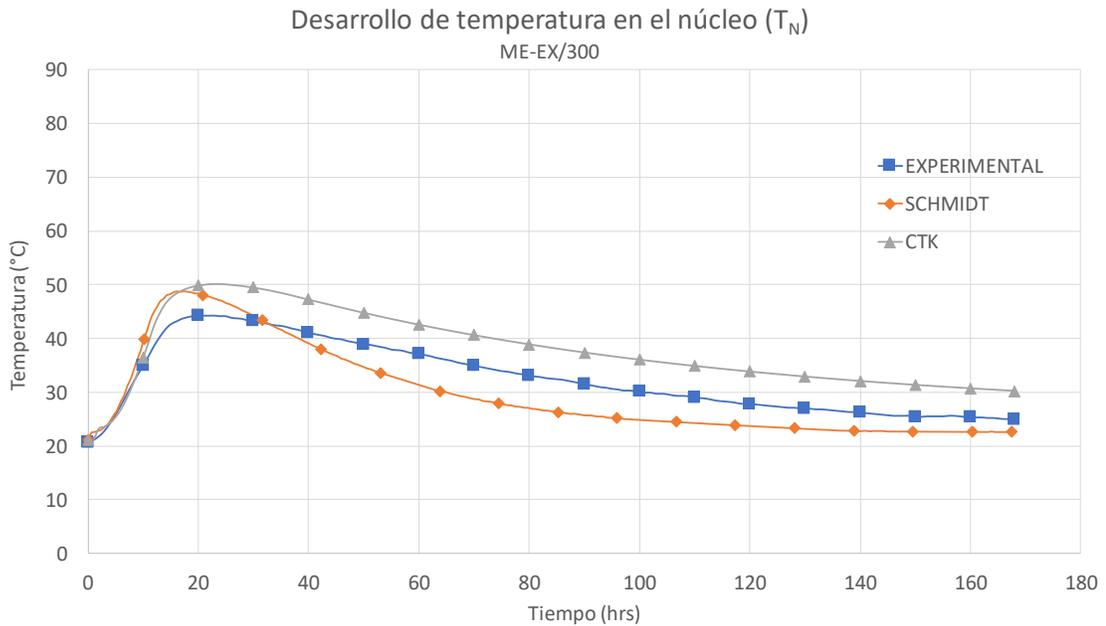


Figura 7.4: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

En las figuras anteriores, correspondientes al cemento ME-EX, se observa que para las 4 dosificaciones de estudio, los métodos CTK y de Schmidt sobreestiman los valores de temperatura hasta al menos el momento en que se alcanza la máxima temperatura en el núcleo (peak de las curvas). En cuanto a la fase de enfriamiento (pasado el peak), para todos los contenidos de cementos estudiados, el método de Schmidt pasa a subestimar las temperaturas dadas por la curva experimental, denotando una velocidad de enfriamiento más alta. En cambio, el método CTK

mantiene la tendencia de sobreestimar las temperaturas y además describe una velocidad de enfriamiento similar a la curva experimental, lo cual se verifica por el hecho de que las curvas se mantienen paralelas en esa fase.

De las 4 dosificaciones estudiadas para el cemento ME-EX, aquella de 500 kg/m^3 (Figura 7.2) es la que presenta la mayor desviación entre las curvas modeladas por Schmidt y CTK en contraste con las obtenidas experimentalmente.

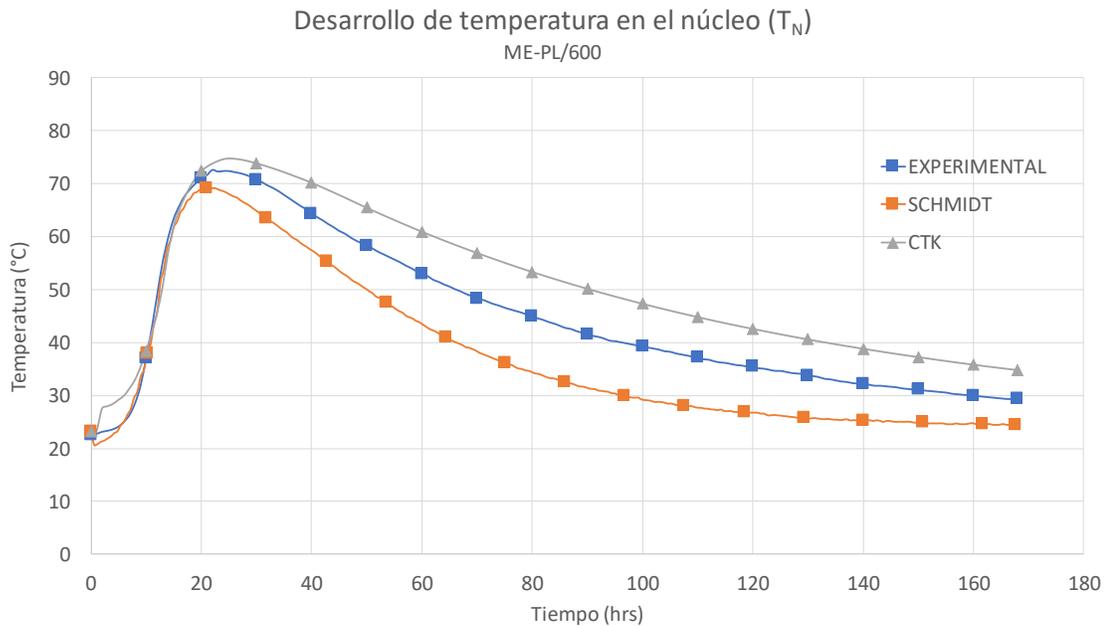


Figura 7.5: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

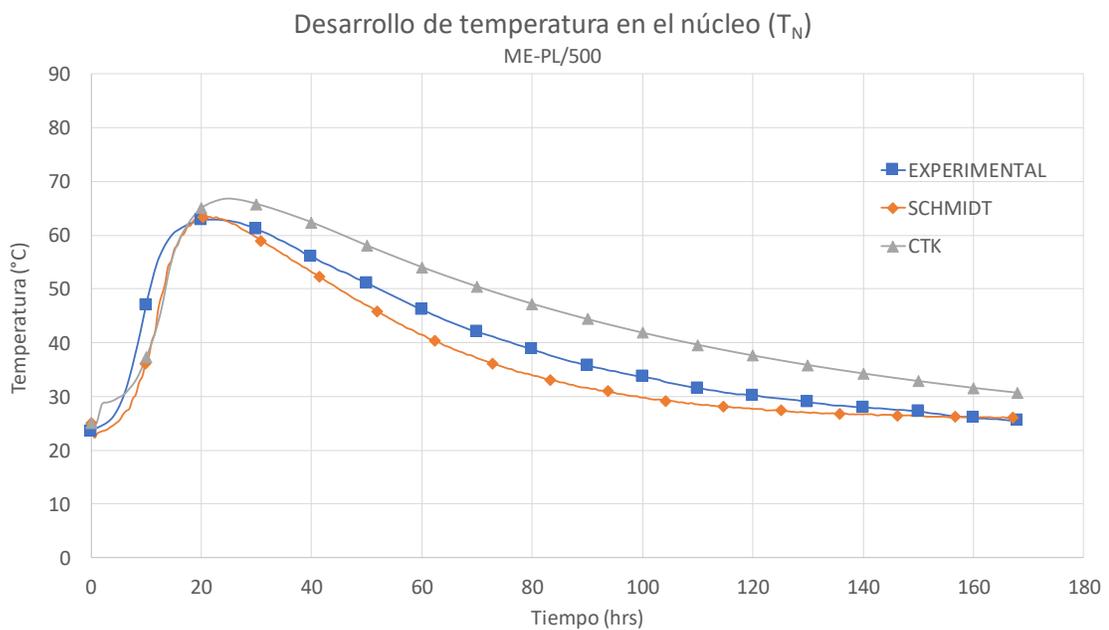


Figura 7.6: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

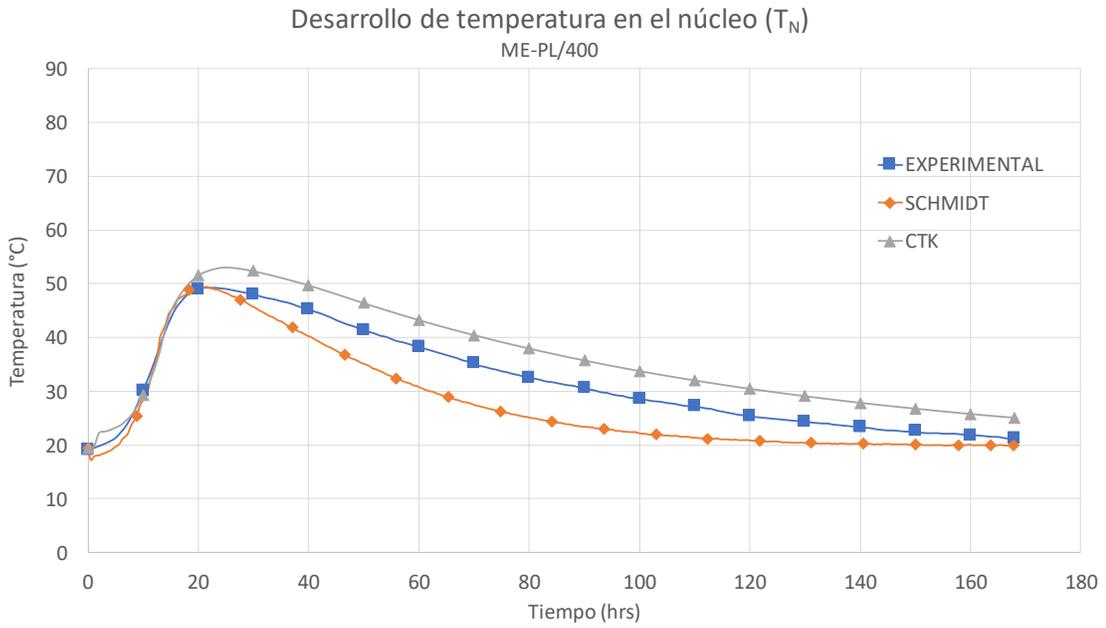


Figura 7.7: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

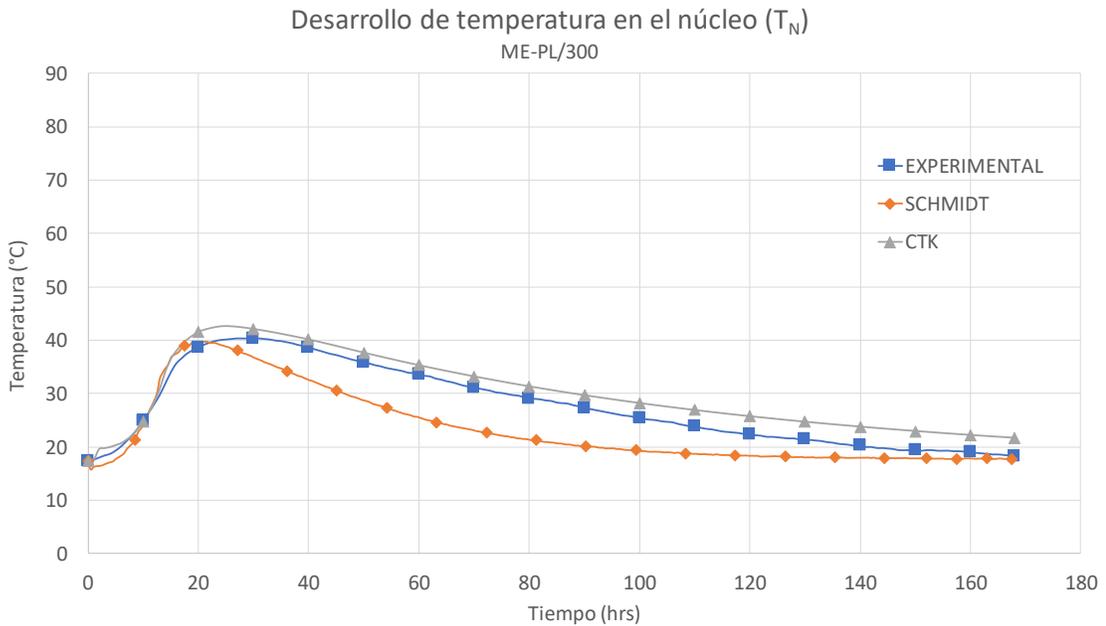


Figura 7.8: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

De las curvas obtenidas para el cemento ME-PL, se observa que para las 4 dosificaciones estudiadas el método CTK estima de forma bastante precisa la fase de aumento de temperatura hasta llegar al peak, lo mismo ocurre con la curva dada por el método de Schmidt, a excepción del caso del contenido de cemento igual a 500 kg/m^3 (Figura 7.6), donde los valores estimados por Schmidt sobreestiman al experimental.

En la fase de enfriamiento, pasado el peak, ocurre el mismo fenómeno visto en ME-EX, donde las curvas de CTK sobreestiman las curvas experimentales, en todos los contenidos evaluados, y modelan un decaimiento de la temperatura similar al registrado por el trabajo experimental, siendo el caso de mejor ajuste el de 300 kg/m^3 (Figura 7.8). Par la misma fase, las curvas de Schmidt subestiman los valores experimentales en todos los casos estudiados para el cemento ME-PL.

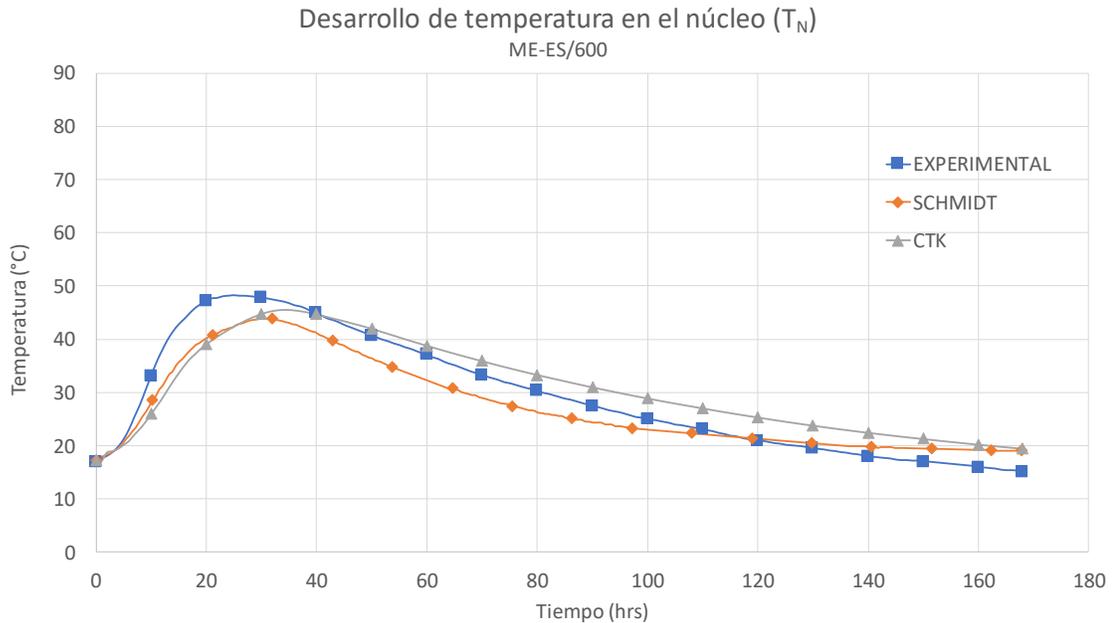


Figura 7.9: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

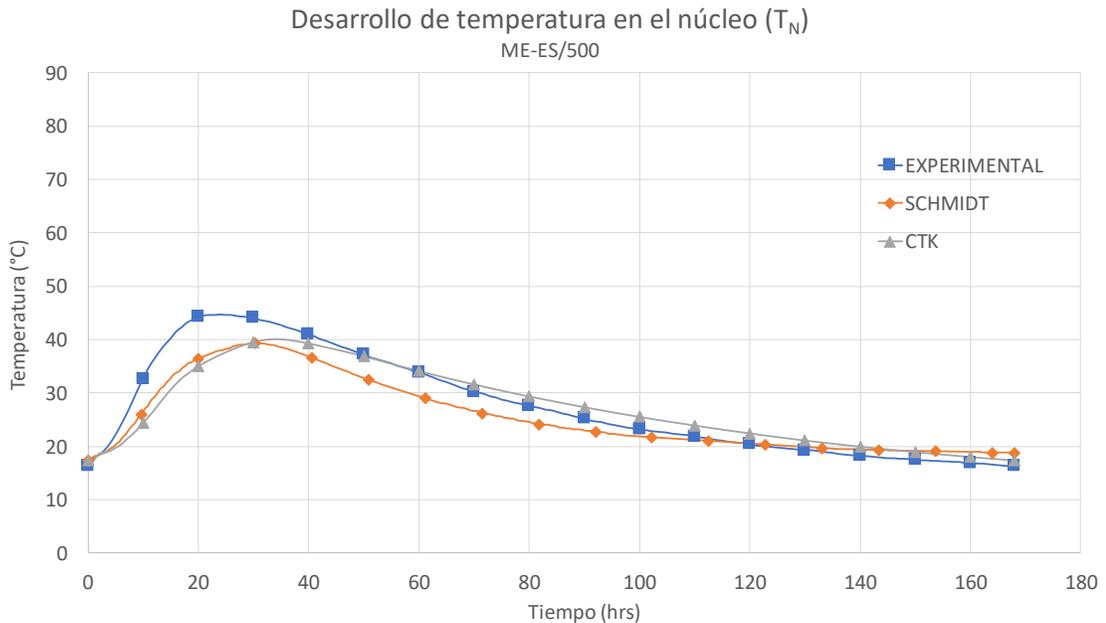


Figura 7.10: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

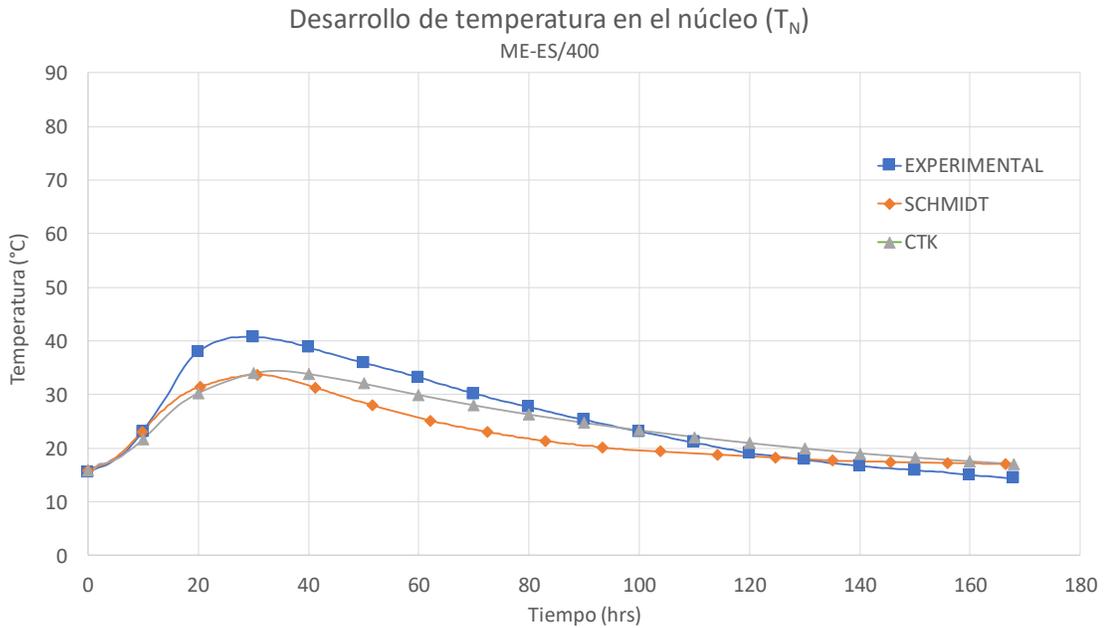


Figura 7.11: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

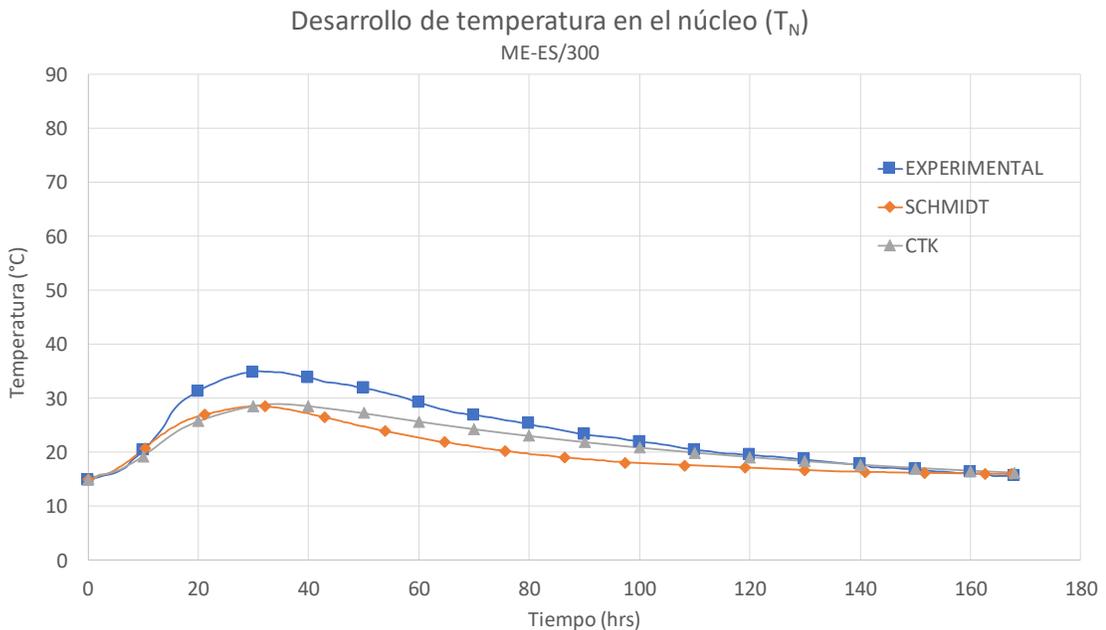


Figura 7.12: Contraste entre curvas de desarrollo de temperatura en el núcleo de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

En las curvas resultantes del cemento ME-ES, se observa que ambos métodos evaluados (Schmidt y CTK) subestiman los valores experimentales en la totalidad de los casos estudiados, la única excepción se da para los contenidos de 600 kg/m^3 y 500 kg/m^3 donde en un tramos acotado, el modelo CTK sobreestima los valores experimentales, sin embargo esto se da en un periodo que no es relevante para el parámetro de estudio (temperatura máxima en el núcleo).

7.1.1. Temperatura máxima en el núcleo ($T_{N,max}$)

Con los resultados obtenidos en la evaluación de modelos, se contrastan las temperaturas máximas estimadas en el núcleo del elemento con aquellas obtenidas experimentalmente (Tabla 5.15). La Tabla 7.1 muestra un análisis comparativo de las desviaciones que existen entre los valores de temperatura máxima en el núcleo obtenidos por medio de los modelos predictivos, con aquellos valores obtenidos de forma experimental.

Para efecto del análisis, se considera como 100% al valor obtenido experimentalmente.

Tabla 7.1: comparación entre temperaturas máximas del núcleo estimadas en modelos predictivos con la obtenida experimentalmente para cada hormigón

Hormigón	Desviación relativa a $T_{N,max}$ experimental (%)						
	PCA	Gráfico				Schmidt	CTK
		Alternativa 1a	Alternativa 1b	Alternativa 2a	Alternativa 2b		
ME-EX/600	121%	81%	141%	95%	155%	103%	105%
ME-EX/500	134%	90%	149%	101%	155%	116%	117%
ME-EX/400	122%	87%	141%	98%	150%	107%	109%
ME-EX/300	124%	93%	140%	93%	132%	110%	113%
ME-PL/600	123%	82%	123%	92%	128%	95%	103%
ME-PL/500	128%	83%	124%	93%	129%	101%	106%
ME-PL/400	129%	75%	105%	88%	116%	100%	108%
ME-PL/300	125%	75%	99%	85%	107%	99%	106%
ME-ES/600	158%	72%	85%	97%	104%	91%	94%
ME-ES/500	149%	66%	77%	88%	95%	88%	90%
ME-ES/400	136%	65%	74%	82%	87%	83%	85%
ME-ES/300	127%	66%	74%	82%	86%	82%	83%
PROMEDIO	131%	78%	111%	91%	120%	98%	102%
DESV. EST.	11%	10%	29%	6%	25%	11%	11%

De la tabla anterior se observa que, en el método PCA ninguna de las estimaciones está dentro del rango aceptable (15%), obteniendo en todos los casos resultados que sobreestiman la temperatura máxima alcanzada en el núcleo por un 31%, en promedio.

Por su parte, ninguna de las alternativas del método Gráfico se ajusta de forma aceptable a los resultados experimentales, siendo la *Alternativa 1a* la menos idónea para la estimación de la temperatura máxima en el núcleo, ya que subestima la totalidad de los casos. El resto de las alternativas del método (*1b*, *2a*, *2b*) cumplen con los criterios de aceptabilidad en 1 o 2 casos, cada uno.

El método de Schmidt estima de forma aceptable 4 de los 12 casos de estudio, entregando valores sobreestimados con una desviación menor a 15%, sin embargo, en 6 de los 12 casos subestima los valores de la temperatura máxima en el núcleo.

Finalmente, el método CTK se ajusta de forma aceptable a los valores experimentales, ya que en 8 de los 12 casos de estudio sobreestima la temperatura máxima en el núcleo, siendo en 7 de los 8 casos por una desviación menor al 15%.

De acuerdo a lo anterior, el método predictivo que mejor estima los valores obtenidos para la temperatura máxima alcanzada en el núcleo es el método CTK. Si bien la magnitud de la desviación es la misma entre los métodos de Schmidt y CTK, incluyendo la desviación estándar, el primero, en promedio, subestima la temperatura; mientras que el segundo la sobreestima.

7.1.2. Tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo

$$(t_{T_{N,max}})$$

Con los resultados obtenidos en la evaluación de modelos, se contrastan los tiempos a los que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo del elemento con aquellos obtenidos experimentalmente (Tabla 5.15). La Tabla 7.2 muestra un análisis comparativo de las desviaciones que existen entre los valores de estos tiempos obtenidos por medio de los modelos predictivos, con aquellos valores obtenidos de forma experimental.

Como el método PCA no entrega este tipo de parámetro, se omite en el análisis.

Cabe señalar que las Alternativas 1a y 1b del método Gráfico entregan el mismo resultado de tiempo, independiente de la corrección que se haga; lo mismo ocurre con las alternativas 2a y 2b. Debido a lo anterior, en el análisis se presentan dos tipos de resultados para el método Gráfico, aquellos obtenidos para las Alternativas 1a y 1b (Alternativa 1), y aquellos obtenidos para las Alternativas 2a y 2b (Alternativa 2).

Para efecto del análisis, se considera como 100% al valor obtenido experimentalmente.

Tabla 7.2: comparación entre tiempos a los que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo estimados en modelos predictivos con la obtenida experimentalmente para cada hormigón

Hormigón	Desviación relativa a $t_{T_{N,max}}$ experimental (%)			
	Gráfico		Schmidt	CTK
	Alternativa 1	Alternativa 2		
ME-EX/600	106%	212%	101%	129%
ME-EX/500	105%	240%	86%	110%
ME-EX/400	113%	240%	97%	129%
ME-EX/300	120%	276%	80%	120%
ME-PL/600	98%	229%	96%	114%
ME-PL/500	91%	206%	103%	119%
ME-PL/400	143%	263%	102%	119%
ME-PL/300	120%	200%	65%	83%
ME-ES/600	144%	259%	123%	136%
ME-ES/500	150%	260%	126%	142%
ME-ES/400	146%	231%	108%	121%
ME-ES/300	139%	225%	99%	110%
PROMEDIO	123%	237%	99%	119%
DESV. EST.	21%	24%	17%	15%

De acuerdo a la tabla anterior, del método Gráfico, la *Alternativa 1* es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales, sin embargo, no entrega resultados aceptables en 10 de los 12 casos de estudio. Por su parte, la *Alternativa 2* sobreestima en más del doble el valor del tiempo $t_{T_{N,max}}$ en la totalidad de los casos.

En cuanto al método de Schmidt, en 4 de los 12 casos de estudio se obtienen resultados aceptables que sobreestiman el valor experimental por no más del 15%, mientras que en la mitad de los casos lo subestiman.

Finalmente, el método CTK estima de forma aceptable en 3 de los 12 casos de estudio, mientras que en uno de los casos subestima el valor del parámetro de estudio.

Como ninguno de los métodos estima, en promedio, de forma aceptable el parámetro que señala el tiempo al que se alcanza la máxima temperatura en el núcleo, no es posible afirmar con certeza qué método es mejor en la estimación de este parámetro. Sin embargo, el método de Schmidt tiene, en promedio, la menor desviación (1%), aunque ésta corresponde a una subestimación. En cuanto al criterio de sobreestimación, el método CTK es el más favorable, ya que sobreestima el valor experimental en 11 de los 12 casos, aunque, en promedio, la desviación respecto a los valores experimentales es de 19%.

7.2. Desarrollo de diferencial de temperatura (ΔT_5)

De la Figura 7.13 a la Figura 7.24 se presenta el contraste entre las curvas resultantes del desarrollo del diferencial de temperatura de cada bloque, según los resultados obtenidos por la evaluación del método de Schmidt, método CTK y del trabajo experimental.

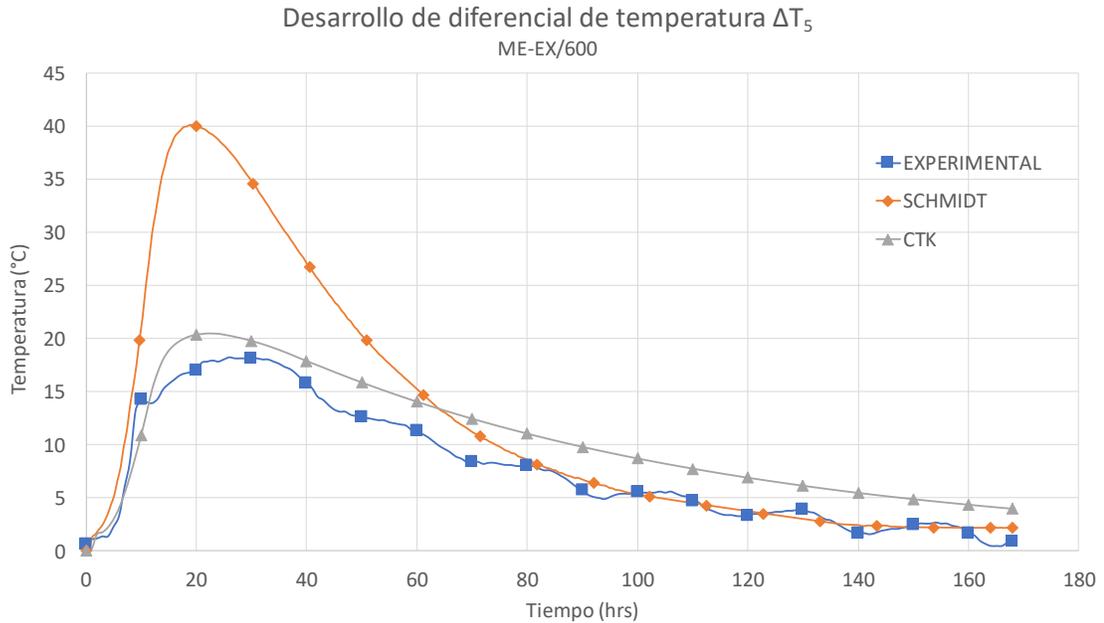


Figura 7.13: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

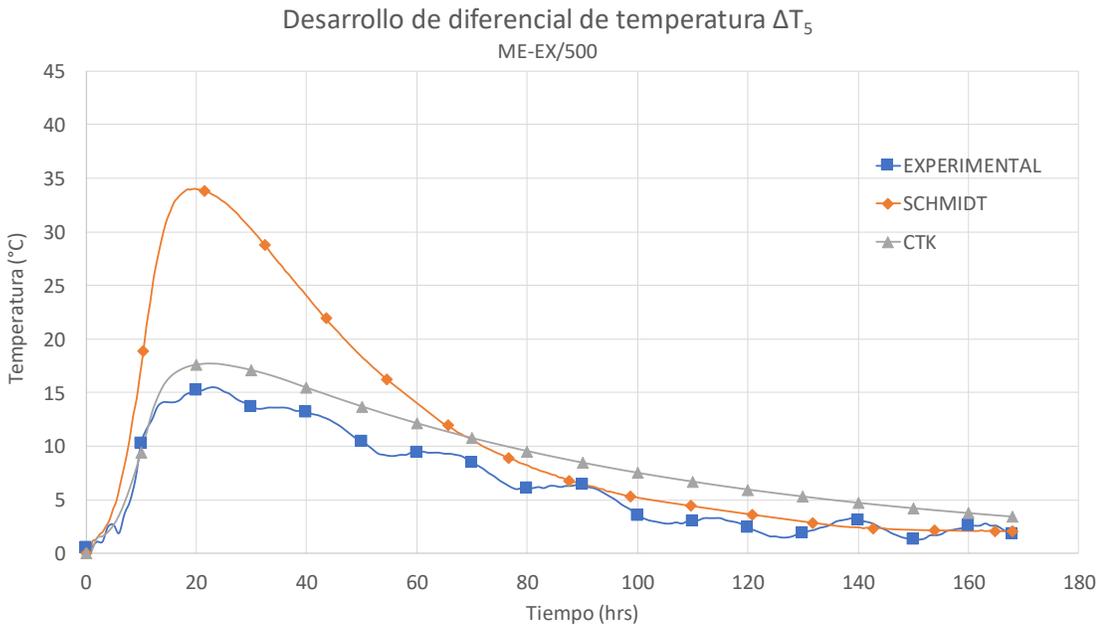


Figura 7.14: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

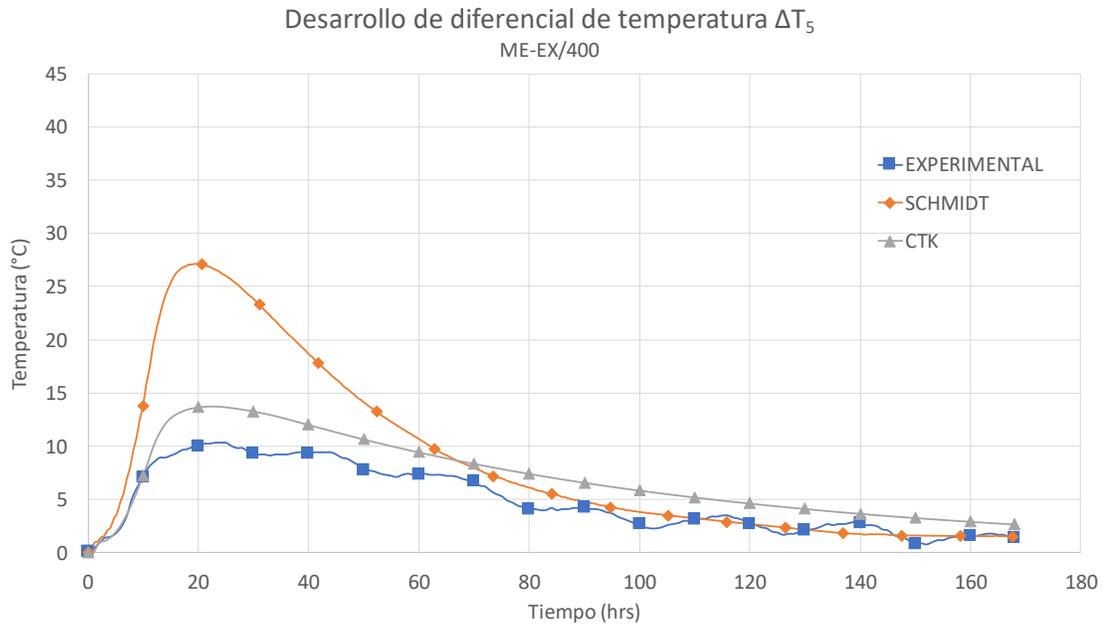


Figura 7.15: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

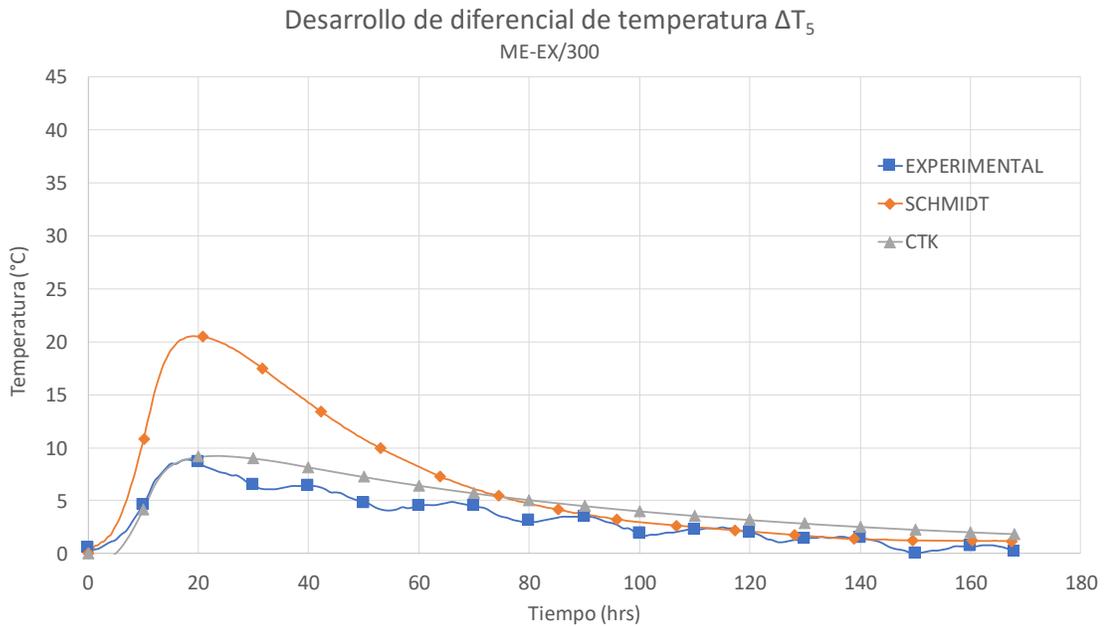


Figura 7.16: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

En las figuras anteriores, correspondientes a las curvas obtenidas para el cemento ME-EX, se observa que, en la totalidad de los casos, las estimaciones del método de Schmidt sobreestiman por más del doble los valores experimentales, hasta transcurridas al menos alrededor de 70 horas, periodo tras el cual pasa a subestimar los valores experimentales.

Por su parte, las curvas estimadas por el método CTK para el cemento ME-EX, sobreestiman las curvas experimentales en la totalidad de los casos y durante todo el periodo de estudio; además, mantienen una tasa de decaimiento del diferencial de temperatura similar a la mostrada por las curvas experimentales.

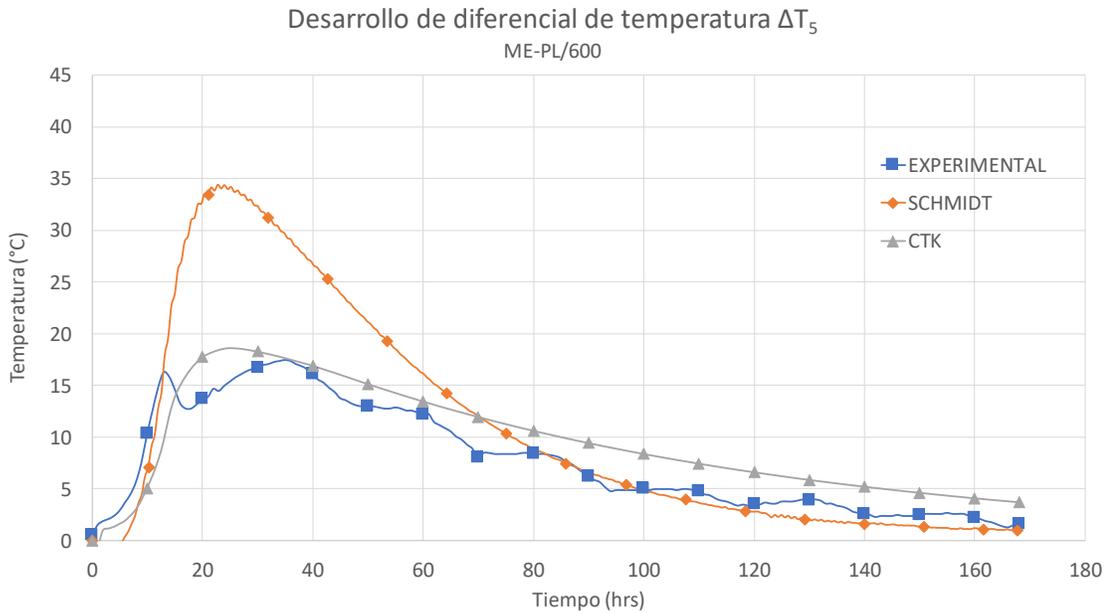


Figura 7.17: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

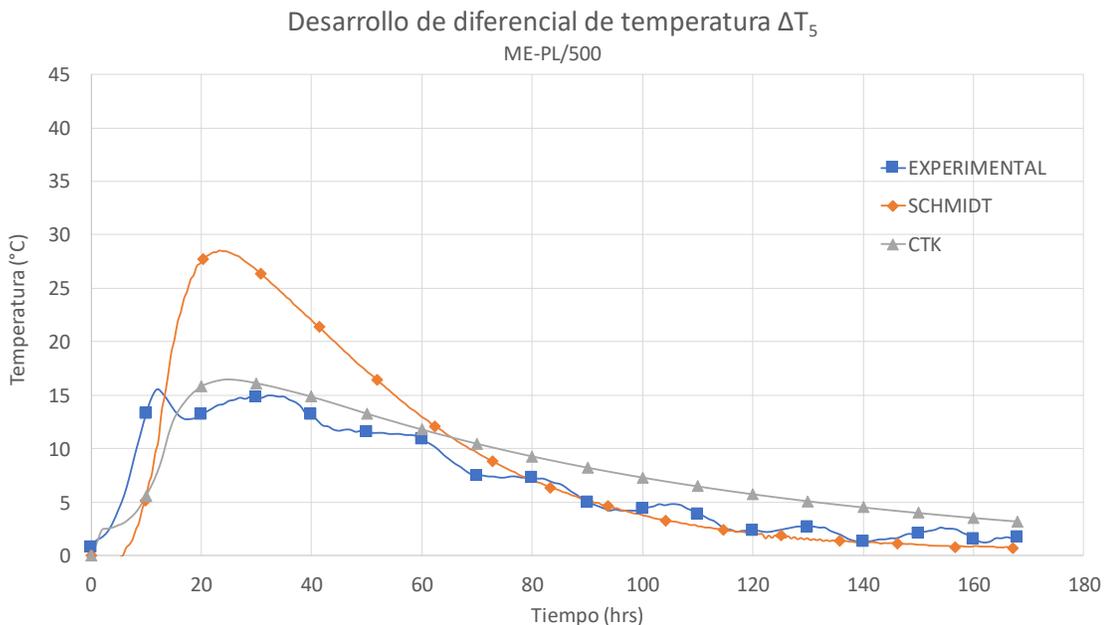


Figura 7.18: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

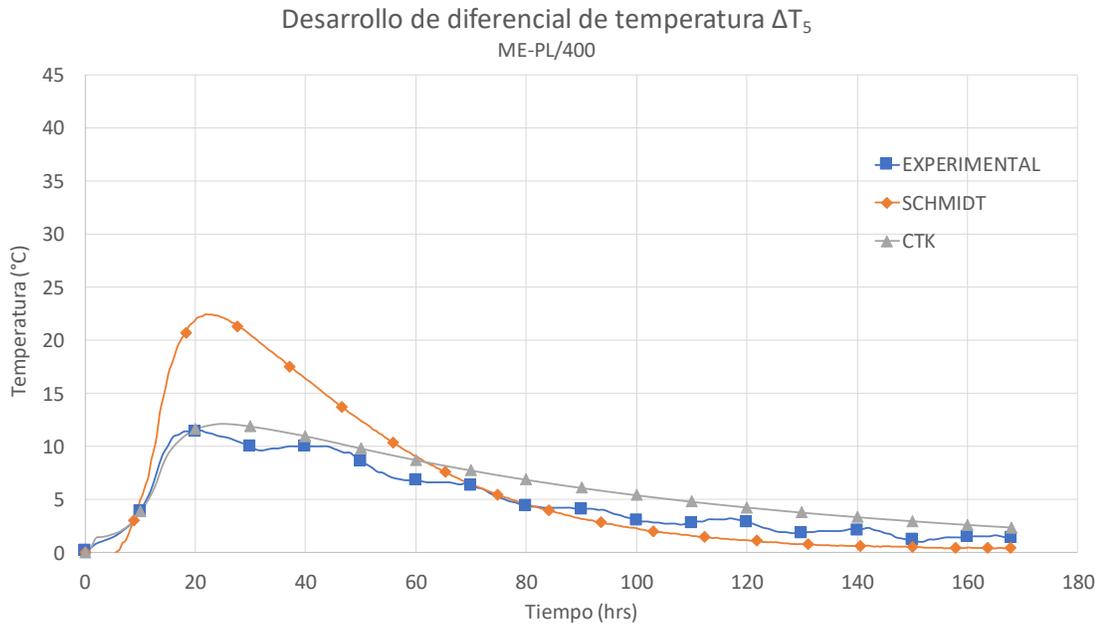


Figura 7.19: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

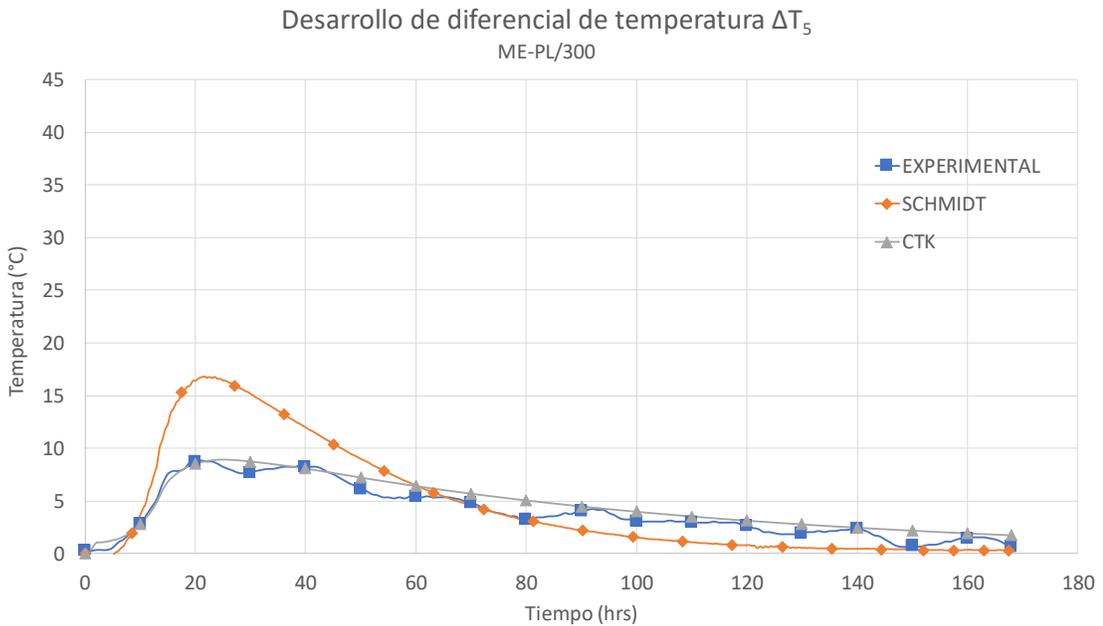


Figura 7.20: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

Para las curvas anteriores, correspondientes a los contenidos de cemento ME-PL, se observan tendencias de las curvas CTK y de Schmidt idénticas a las vistas en el caso de ME-EX, donde la primera sobreestima los resultados experimentales y tiene un similar decaimiento que las curvas empíricas; y el segundo sobreestima en gran medida las curvas experimentales hasta transcurrido cierto tiempo (alrededor de 60 horas en este caso).

A excepción de lo visto en las curvas de ME-EX, en los casos de los hormigones con contenidos de 600 kg/m^3 y 500 kg/m^3 de cemento ME-PL (Figura 7.17 y Figura 7.18), en las curvas experimentales se observa un peak temprano que, en el primer caso, está bien estimada por el método de Schmidt, pero subestimada por el CTK; mientras que en el segundo caso, el peak experimental queda por sobre las curvas modeladas.

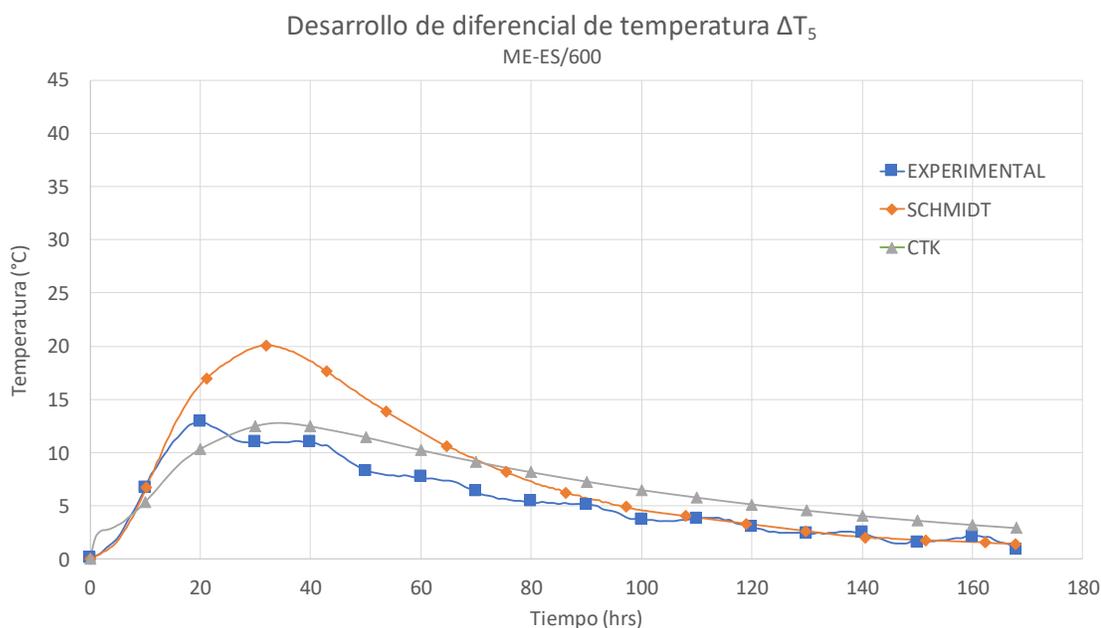


Figura 7.21: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

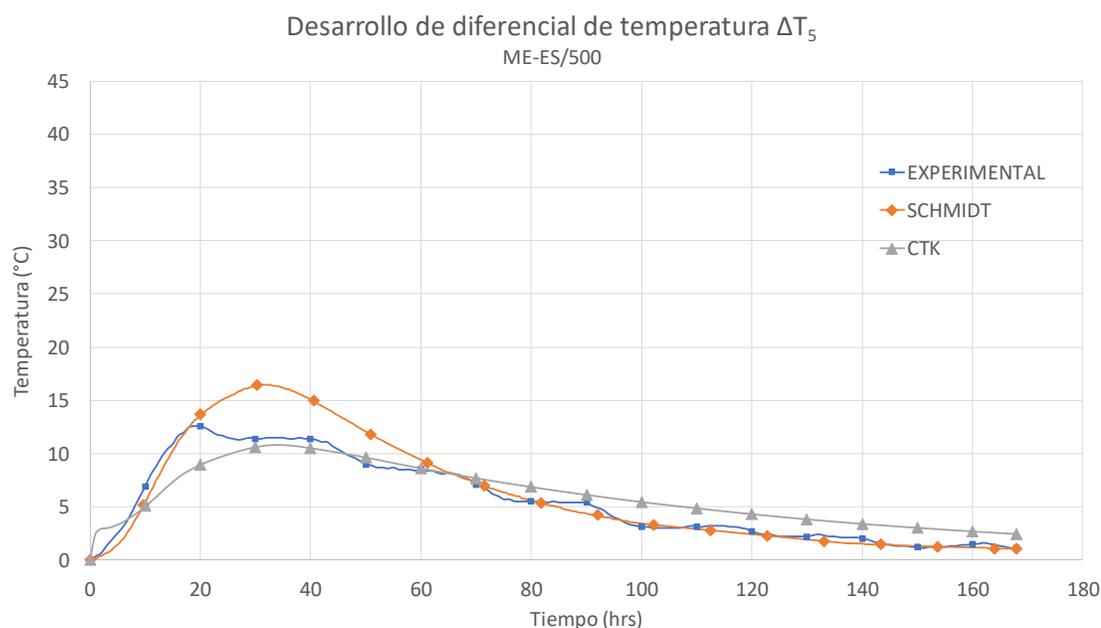


Figura 7.22: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

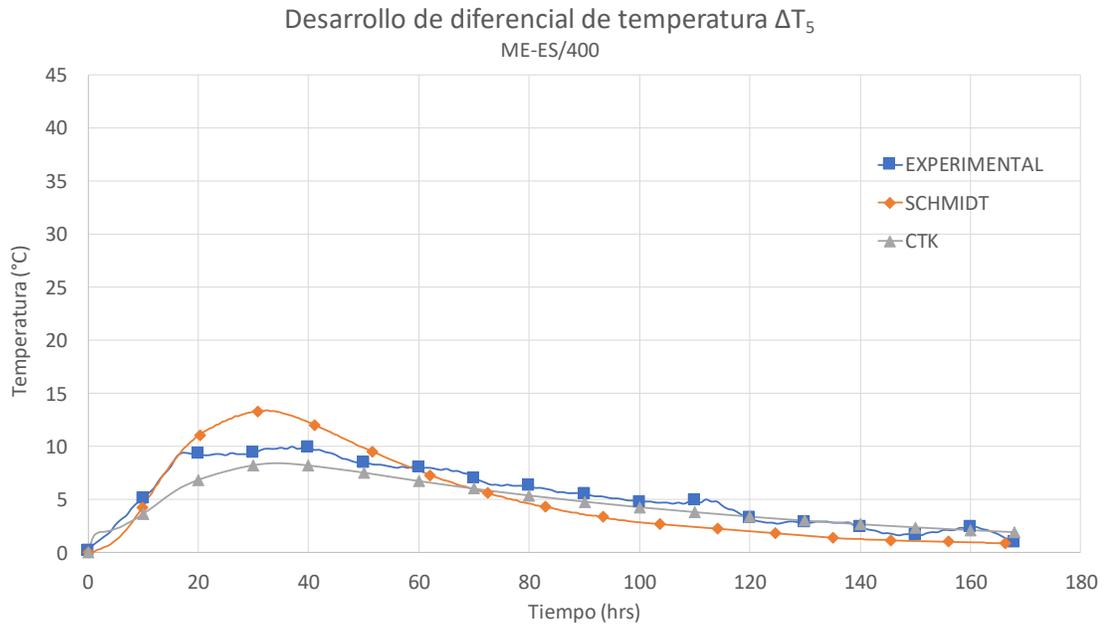


Figura 7.23: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

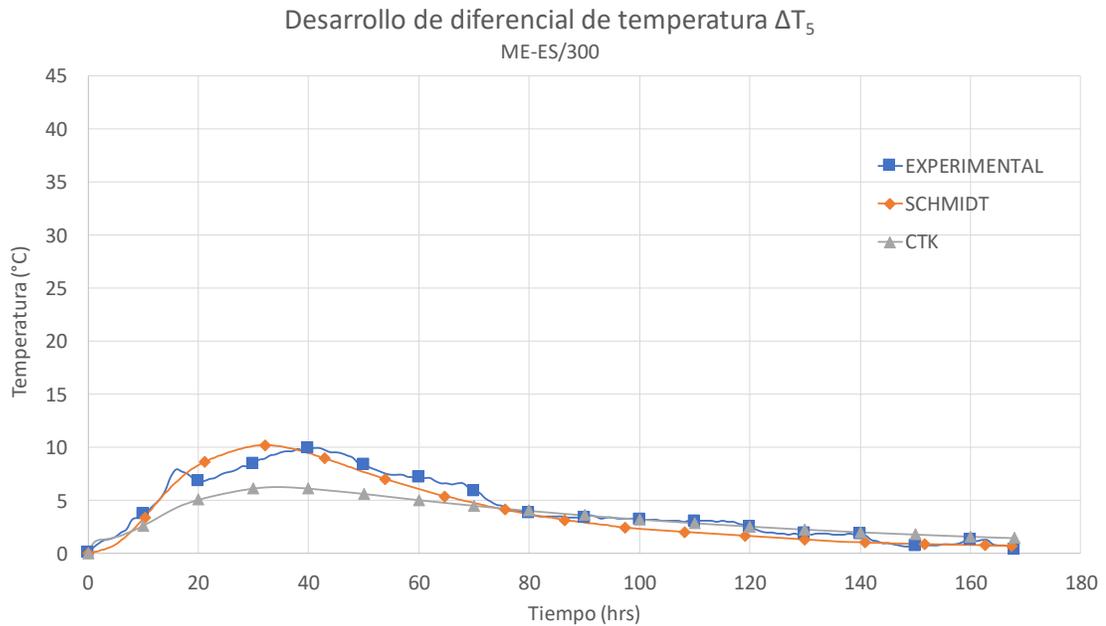


Figura 7.24: Contraste entre curvas de desarrollo de diferencial de temperatura de bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300 según método de Schmidt, método CTK y resultados experimentales

En cuanto a las curvas obtenidas para los hormigones que contienen cemento ME-ES, se observa que en el periodo de interés, correspondiente a cuando se presenta el peak de máximo diferencial, las curvas dadas por el método CTK subestiman los valores experimentales en la totalidad de los casos, mientras que aquellas dadas por el método de Schmidt los sobreestima; en particular la curva de Schmidt para la dosificación de 300 kg/m^3 llega a un peak similar a la curva experimental, pero lo hace aproximadamente 10 horas antes que el experimental.

7.2.1. Diferencial máximo de temperatura ($\Delta T_{5,max}$)

Con los resultados obtenidos en la evaluación de modelos, se contrastan los diferenciales máximos de temperatura estimados, correspondientes a la máxima diferencia de temperatura obtenida entre el núcleo del elemento y 5 cm por debajo de la superficie expuesta, con aquellos obtenidos experimentalmente (Tabla 5.15). La Tabla 7.3 muestra un análisis comparativo de las desviaciones que existen entre los valores del máximo diferencial de temperatura obtenidos por medio de los modelos predictivos, con aquellos valores obtenidos de forma experimental.

Como los métodos PCA y Gráfico no entregan este tipo de parámetro, se omiten en el análisis. Cabe señalar que en el caso del método Gráfico sí se entrega un diferencial de temperatura, pero éste es entre la temperatura máxima estimada en el núcleo del elemento y la temperatura en un punto sobre la superficie expuesta, en el mismo instante, situación que no fue evaluada en el trabajo experimental.

Para efecto del análisis, se considera como 100% al valor obtenido experimentalmente.

Tabla 7.3: comparación entre máximos diferenciales de temperatura estimados en modelos predictivos con el obtenido experimentalmente para cada hormigón

Hormigón	Desviación relativa a $\Delta T_{5,max}$ experimental (%)	
	Schmidt	CTK
ME-EX/600	220%	113%
ME-EX/500	220%	114%
ME-EX/400	264%	134%
ME-EX/300	231%	104%
ME-PL/600	197%	106%
ME-PL/500	183%	106%
ME-PL/400	195%	106%
ME-PL/300	191%	101%
ME-ES/600	156%	99%
ME-ES/500	131%	86%
ME-ES/400	134%	84%
ME-ES/300	103%	64%
PROMEDIO	185%	101%
DESV. EST.	47%	18%

De la tabla anterior, se tiene que el método de Schmidt sobrestima el parámetro de estudio en la totalidad de los casos, sin embargo, sólo en uno de los 12 casos de estudio se obtiene una desviación menor al 15%.

Por su parte, el método CTK sobreestima el máximo diferencial de temperatura alcanzado en el elemento en 8 de los 12 casos de estudio, encontrándose 7 de ellos en el rango aceptable.

Tanto por las desviaciones promedio y estándar, como por la cantidad de estimaciones aceptables, el método CTK resulta ser el que mejor estima los valores del máximo diferencial de temperatura alcanzado en el elemento masivo.

7.2.2. Tiempo al que se alcanza el diferencial máximo de temperatura

Con los resultados obtenidos en la evaluación de modelos, se contrastan los tiempos estimados a los que se alcanza el máximo diferencial de temperatura, con aquellos obtenidos experimentalmente (Tabla 5.15). La Tabla 7.4 muestra un análisis comparativo de las desviaciones que existen entre los valores del tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura obtenidos por medio de los modelos predictivos, con aquellos valores obtenidos de forma experimental.

Como los métodos PCA y Gráfico no entregan este tipo de parámetro, se omiten en el análisis.

Para efecto del análisis, se considera como 100% al valor obtenido experimentalmente.

Tabla 7.4: comparación entre tiempos a los que se alcanza el máximo diferencial de temperatura en modelos predictivos con el obtenido experimentalmente para cada hormigón

Hormigón	Desviación relativa a $t_{\Delta T_{5,max}}$ experimental (%)	
	Schmidt	CTK
ME-EX/600	73%	85%
ME-EX/500	85%	96%
ME-EX/400	84%	96%
ME-EX/300	106%	133%
ME-PL/600	65%	71%
ME-PL/500	194%	208%
ME-PL/400	105%	119%
ME-PL/300	103%	119%
ME-ES/600	163%	170%
ME-ES/500	165%	179%
ME-ES/400	88%	92%
ME-ES/300	79%	85%
PROMEDIO	109%	121%
DESV. EST.	42%	43%

De acuerdo con la tabla anterior, el método de Schmidt sobreestima el parámetro de estudio en 6 de los 12 casos, encontrándose 3 de ellos en el rango aceptable.

El método CTK, por su parte, también sobreestima el parámetro en 6 de los 12 casos de estudio, sin embargo, ninguno de ellos se encuentra en el rango aceptable.

Cabe señalar que las desviaciones estándar de las comparaciones de ambos métodos son similares, lo que implica una alta variabilidad de resultados.

En promedio, el método que mejor se ajusta a la estimación del tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura es el método de Schmidt, sin embargo, la alta variabilidad de los resultados obtenidos en la contrastación (desviación estándar) no lo posiciona como un método confiable para la estimación de este parámetro.

7.3. Análisis por modelo predictivo

A continuación, se analizan los resultados obtenidos según cada método predictivo y su contrastación con los resultados experimentales. Además, se analiza el comportamiento de cada modelo evaluado ante el tipo y dosificación de cemento en las mezclas de hormigón estudiadas.

7.3.1. Método PCA

Considerando los resultados presentados en la Tabla 6.2, la Figura 7.25 presenta gráficamente los resultados de temperatura máxima obtenidos por medio del método PCA, según el tipo y contenido de cemento de cada hormigón estudiado.

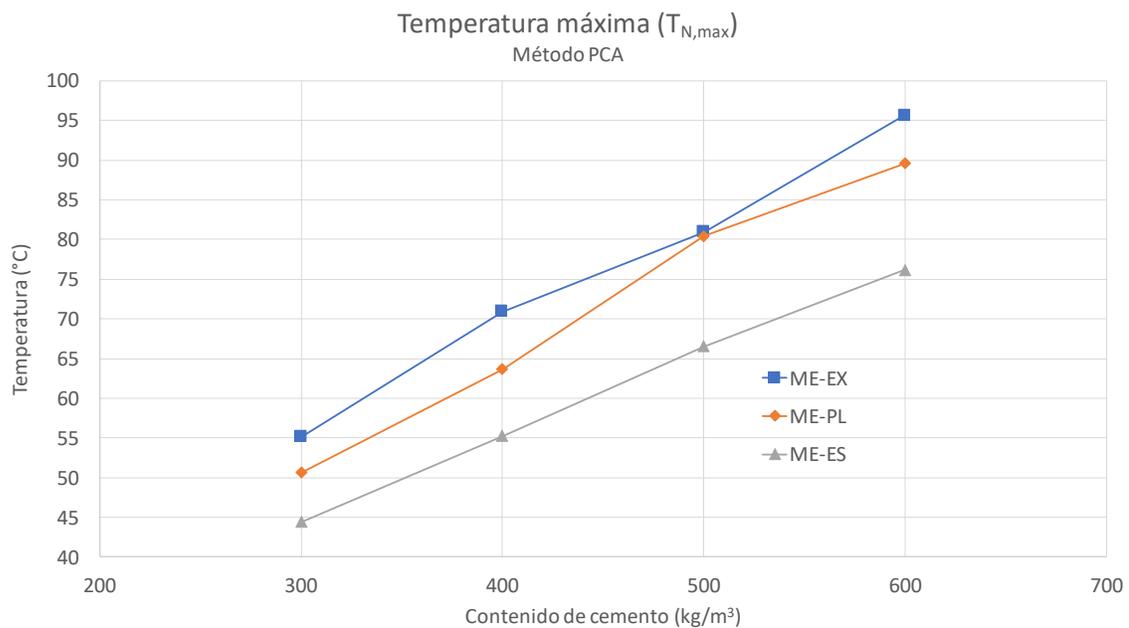


Figura 7.25: resultados de temperatura máxima obtenidos con el método PCA

Del gráfico anterior se observa que el método estima mayores temperaturas para los hormigones que contienen cemento ME-EX, y además estima mayores temperatura conforme de aumenta el contenido de cemento de la mezcla. Lo anterior evidencia que el método hace una correcta interpretación en cuanto a tipo y contenido de cemento, como se vio en los resultados experimentales y la teoría, es decir, estima mayores temperaturas para hormigones que contienen

con bajo contenido de puzolanas, y además estima mayores temperaturas para hormigones que consideran dosis más altas de cemento.

La Tabla 7.5 muestra la desviación de los resultados de temperatura máxima alcanzada por el hormigón, en contraste con aquellas efectivamente alcanzadas en el núcleo de los bloques experimentales.

Tabla 7.5: comparación entre valores obtenidos por método PCA y resultados experimentales

Hormigón	Desviación relativa a $T_{N,max}$ experimental (%)	
	Por hormigón	Por cemento
ME-EX/600	121%	125%
ME-EX/500	134%	
ME-EX/400	122%	
ME-EX/300	124%	
ME-PL/600	123%	126%
ME-PL/500	128%	
ME-PL/400	129%	
ME-PL/300	125%	
ME-ES/600	158%	142%
ME-ES/500	149%	
ME-ES/400	136%	
ME-ES/300	127%	

De la contrastación de resultados para el método PCA con los experimentales, se observa que existe una mayor desviación de los resultados en los casos que contienen cemento ME-ES, siendo ésta aproximadamente un 17% mayor que en los casos que contemplan cementos ME-EX y ME-PL.

Lo anterior evidencia que el método se ajusta mejor a los hormigones que consideran cementos con bajo contenido de puzolanas. Esto se condice con el origen del método, que fue concebido originalmente para estimar temperaturas en hormigones confeccionados con cemento Portland.

En cuanto a la incidencia del contenido de cemento en la mezcla, independiente del tipo de cemento, no se observa una tendencia que permita interpretar una dependencia de este parámetro en la desviación respecto a los resultados obtenidos experimentalmente.

7.3.2. Método Gráfico

Considerando los resultados presentados desde la Tabla 6.4 a la Tabla 6.7, entre la Figura 7.26 y la Figura 7.28 se muestra una comparación gráfica entre los valores de temperatura máxima estimados en cada alternativa del método, y los valores experimentales del mismo parámetro.

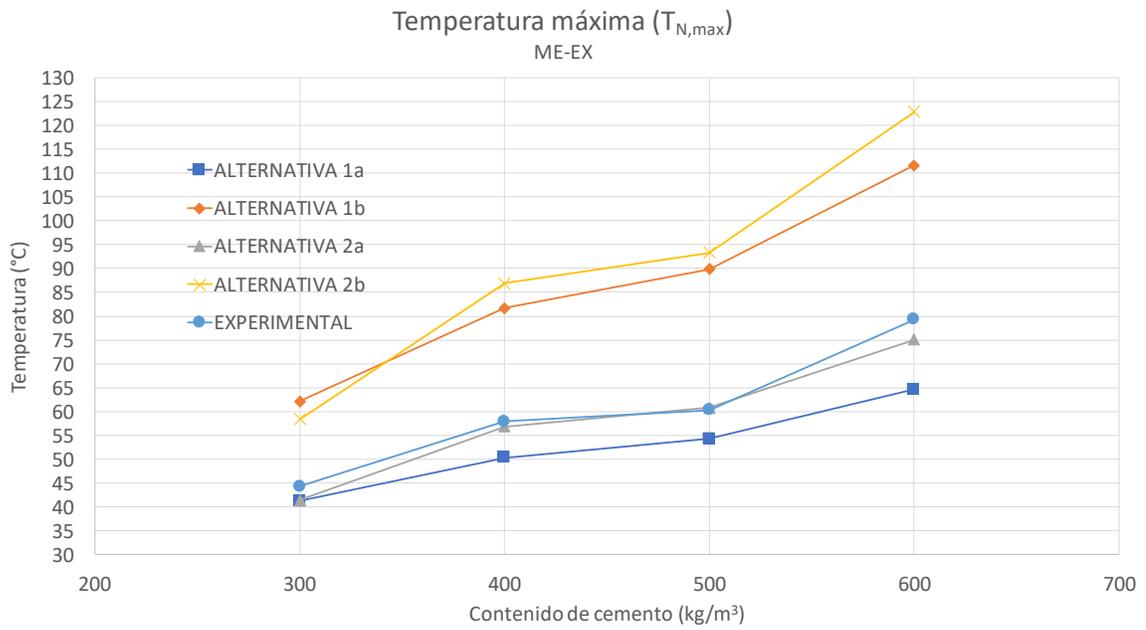


Figura 7.26: gráfico comparativo entre resultados obtenidos de temperatura máxima alcanzada por los hormigones confeccionados con cemento ME-EX, según alternativa evaluada y resultados experimentales

Del gráfico anterior, se observa que la Alternativa 2a es la que mejor estima las temperaturas máximas para los hormigones confeccionados con cemento ME-EX.

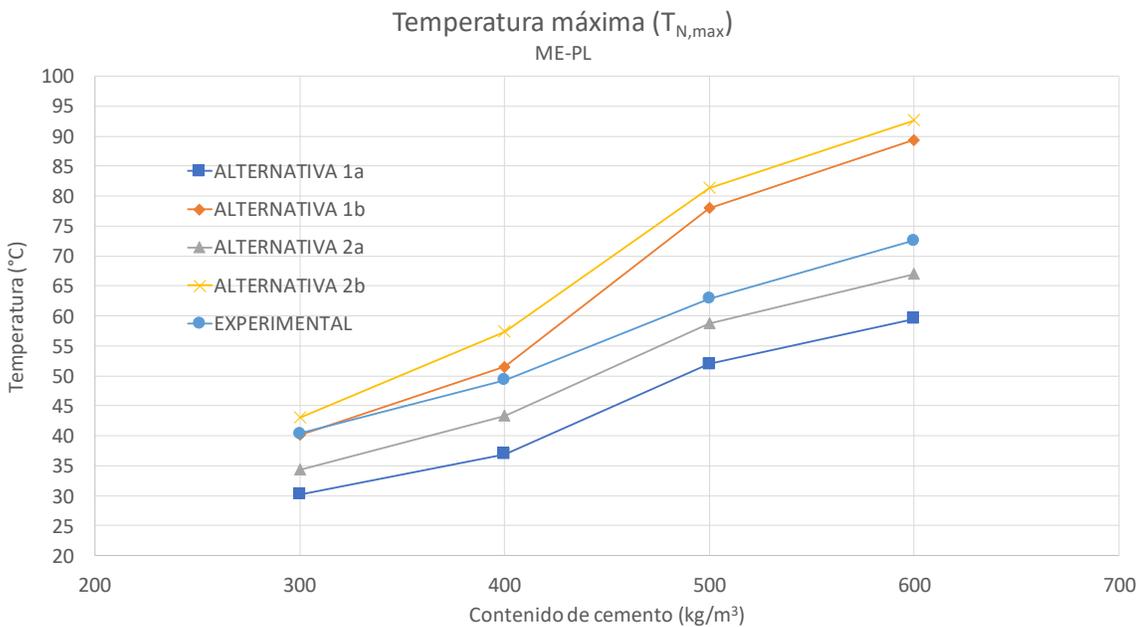


Figura 7.27: gráfico comparativo entre resultados obtenidos de temperatura máxima alcanzada por los hormigones confeccionados con cemento ME-PL, según alternativa evaluada y resultado experimentales

Del gráfico anterior, se observa que, en general, la Alternativa 1b es la que mejor estima las temperaturas máximas para los hormigones confeccionados con cemento ME-PL.

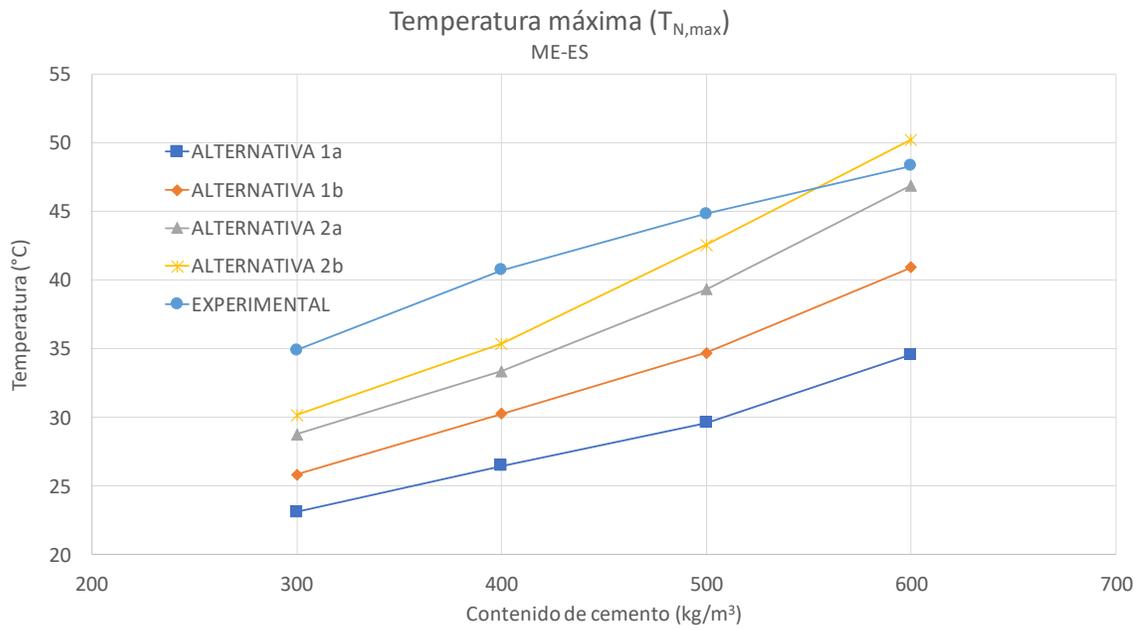


Figura 7.28: gráfico comparativo entre resultados obtenidos de temperatura máxima alcanzada por los hormigones confeccionados con cemento ME-ES, según alternativa evaluada y resultado experimentales

Del gráfico anterior, se observa que la Alternativa 2b es la que mejor estima las temperaturas máximas para los hormigones confeccionados con cemento ME-ES.

Además, de los 3 gráficos anteriores, se observa que independiente de la alternativa evaluada, las temperaturas máximas alcanzadas por los hormigones son mayores al aumentar el contenido de cemento.

Considerando nuevamente los resultados presentados desde la Tabla 6.4 a la Tabla 6.7, entre la Figura 7.29 y la Figura 7.31 se muestra una comparación gráfica entre los valores del tiempo al que se alcanza la temperatura máxima estimados en cada alternativa del método, y los valores experimentales del mismo parámetro.

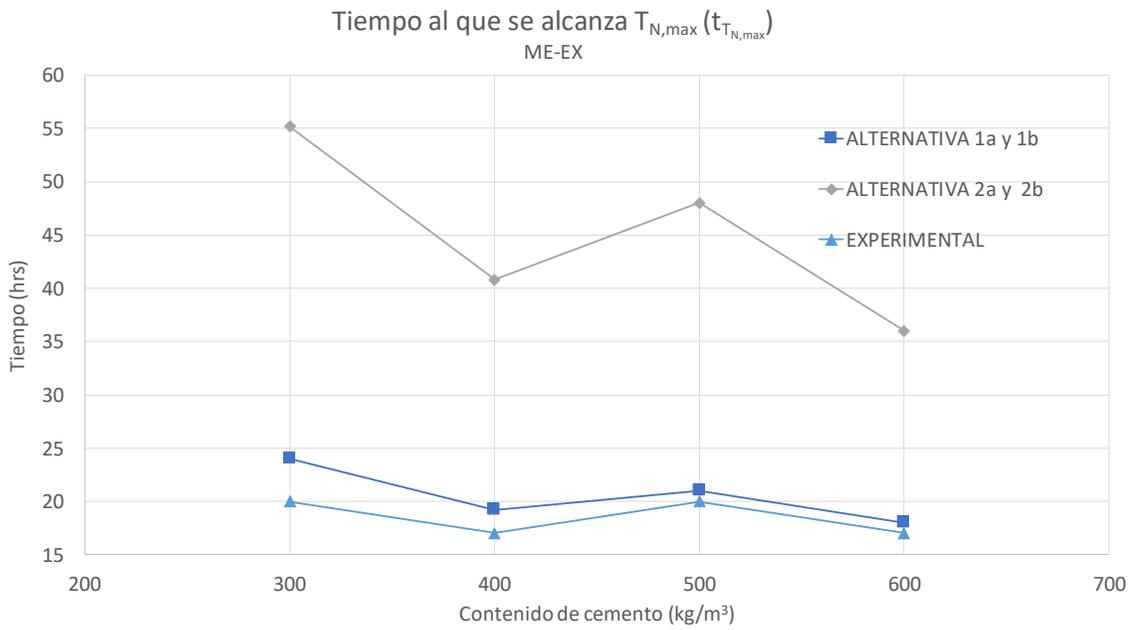


Figura 7.29: gráfico comparativo entre resultados obtenidos del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en los hormigones confeccionados con cemento ME-EX, según alternativa evaluada y resultado experimentales

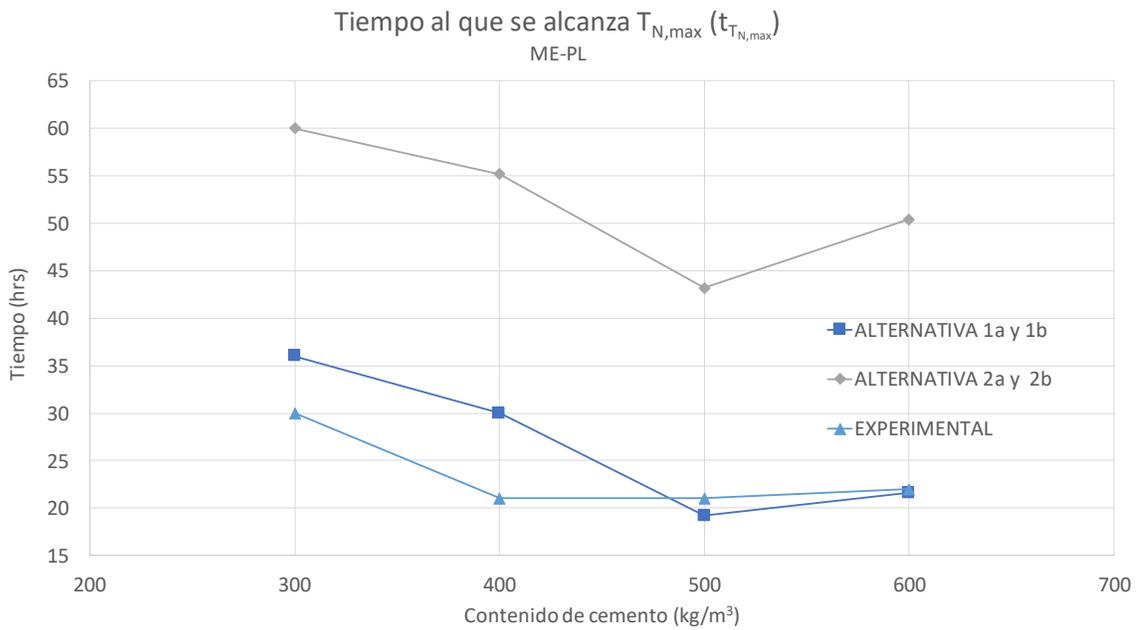


Figura 7.30: gráfico comparativo entre resultados obtenidos del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en los hormigones confeccionados con cemento ME-PL, según alternativa evaluada y resultado experimentales

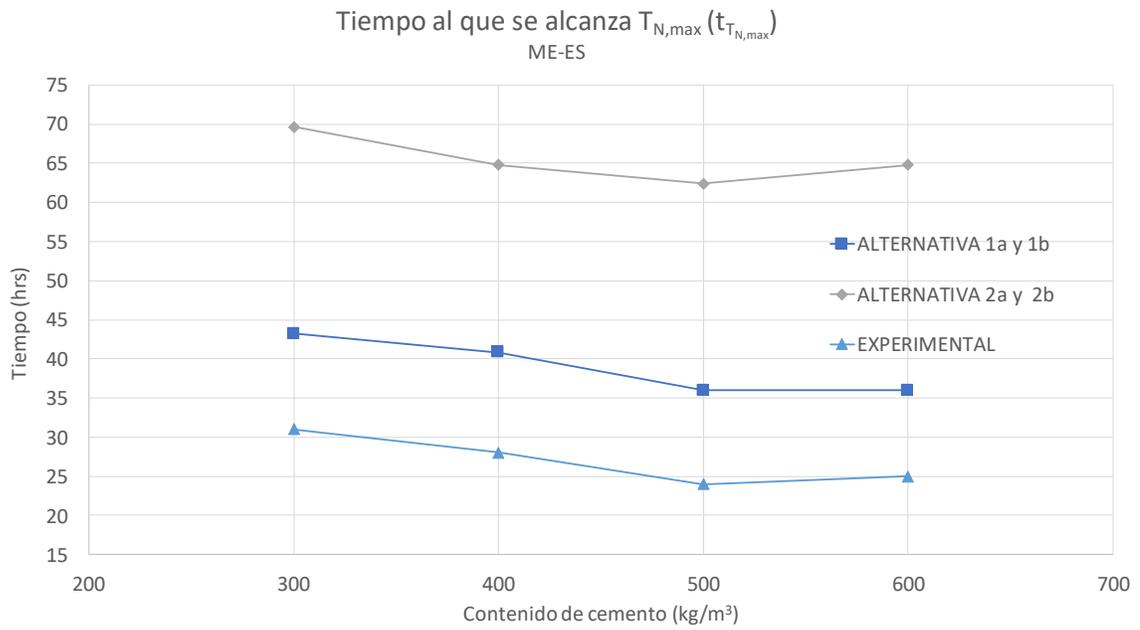


Figura 7.31: gráfico comparativo entre resultados obtenidos del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en los hormigones confeccionados con cemento ME-ES, según alternativa evaluada y resultado experimentales

De los 3 gráficos anteriores, se observa que la Alternativa 1 es la que entrega mejores estimaciones del tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en los hormigones, independiente del tipo de cemento considerado.

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en la evaluación de cada alternativa del método Gráfico.

7.3.2.1. *Alternativa 1a*

La *Alternativa 1a* del método Gráfico corresponde a aquella que no considera una corrección por finura del cemento, ni por difusión térmica del hormigón estudiado. La Tabla 7.6 muestra la desviación de los resultados de temperatura máxima alcanzada en el núcleo de los bloques y del tiempo al que ésta se alcanza, en contraste con los resultados de los mismos parámetros obtenidos de forma experimental.

Tabla 7.6: comparación entre valores obtenidos por *Alternativa 1a* del método Gráfico y resultados experimentales

Hormigón	Desviación relativa a resultados experimentales (%)			
	$T_{N,max}$		$t_{T_{N,max}}$	
	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento
ME-EX/600	81%	88%	106%	111%
ME-EX/500	90%		105%	
ME-EX/400	87%		113%	
ME-EX/300	93%		120%	
ME-PL/600	82%	79%	98%	113%
ME-PL/500	83%		91%	
ME-PL/400	75%		143%	
ME-PL/300	75%		120%	
ME-ES/600	72%	67%	144%	145%
ME-ES/500	66%		150%	
ME-ES/400	65%		146%	
ME-ES/300	66%		139%	

De la tabla anterior, se observa que los resultados de los parámetros $T_{N,max}$ y $t_{T_{N,max}}$ obtenidos al evaluar la Alternativa 1a del método Gráfico, tienen una menor desviación para los hormigones con cementos ME-EX y ME-PL, en comparación con aquellas obtenidas para los que contienen cemento ME-ES. En particular, para la temperatura máxima estimada en el núcleo, las desviaciones disminuyen aproximadamente en 10% al pasar de un cemento de mayor contenido de puzolanas a uno de menor.

Todas las estimaciones obtenidas para la temperatura máxima subestiman el valor de los resultados experimental.

Lo anterior evidencia que el método se ajusta mejor a los hormigones que consideran cementos con bajo contenido de puzolanas. Esto se condice con el origen del método, que se desarrolla en base a ábacos confeccionados con resultados empíricos obtenidos con hormigones que contenían cemento Portland.

Ninguno de los parámetros estudiados presenta una relación entre el contenido de cemento y la desviación, en el análisis comparativo con los resultados experimentales.

7.3.2.2. *Alternativa 1b*

La *Alternativa 1b* del método Gráfico corresponde a aquella que sí considera una corrección por finura del cemento, pero no por difusión térmica del hormigón estudiado. La Tabla 7.7 muestra la desviación de los resultados estimados de temperatura máxima alcanzada en el núcleo de los bloques y del tiempo al que ésta se alcanza, en contraste con los resultados de los mismos parámetros obtenidos de forma experimental.

Tabla 7.7: comparación entre valores obtenidos por *Alternativa 1b* del método Gráfico y resultados experimentales

Hormigón	Desviación relativa a resultados experimentales (%)			
	$T_{N,max}$		$t_{T_{N,max}}$	
	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento
ME-EX/600	141%	143%	106%	111%
ME-EX/500	149%		105%	
ME-EX/400	141%		113%	
ME-EX/300	140%		120%	
ME-PL/600	123%	113%	98%	113%
ME-PL/500	124%		91%	
ME-PL/400	105%		143%	
ME-PL/300	99%		120%	
ME-ES/600	85%	78%	144%	145%
ME-ES/500	77%		150%	
ME-ES/400	74%		146%	
ME-ES/300	74%		139%	

De la tabla anterior, se observa que los resultados de $T_{N,max}$ obtenidos al evaluar la Alternativa 1b del método Gráfico, tienen una menor desviación para los hormigones con cementos ME-PL, seguidos por aquellos con cemento ME-ES, siendo el de mayor desviación los con cemento ME-EX. Lo anterior evidencia que al corregir por finura, se pierde la tendencia del método a estimar mejor las temperaturas máximas para hormigones que contienen cemento con bajas adiciones de puzolanas, como ocurrió en la Alternativa 1a.

En cuanto al parámetro $t_{T_{N,max}}$, la tendencia es la misma que en la Alternativa 1a, como ya se mencionó anteriormente.

Esta alternativa entrega la mejor estimación de temperatura máxima alcanzada para el cemento ME-PL, estando ésta dentro del rango aceptable.

Ninguno de los parámetros estudiados presenta una relación entre el contenido de cemento y la desviación, en el análisis comparativo con los resultados experimentales.

7.3.2.3. *Alternativa 2a*

La *Alternativa 2a* del método Gráfico corresponde a aquella que no considera una corrección por finura del cemento, pero sí por difusión térmica del hormigón estudiado. La Tabla 7.8 muestra la desviación de los resultados de temperatura máxima alcanzada en el núcleo de los bloques y del tiempo al que ésta se alcanza, en contraste con los resultados de los mismos parámetros obtenidos de forma experimental.

Tabla 7.8: comparación entre valores obtenidos por *Alternativa 2a* del método Gráfico y resultados experimentales

Hormigón	Desviación relativa a resultados experimentales (%)			
	$T_{N,m\acute{a}x}$		$t_{T_{N,m\acute{a}x}}$	
	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento
ME-EX/600	95%	97%	212%	242%
ME-EX/500	101%		240%	
ME-EX/400	98%		240%	
ME-EX/300	93%		276%	
ME-PL/600	92%	90%	229%	224%
ME-PL/500	93%		206%	
ME-PL/400	88%		263%	
ME-PL/300	85%		200%	
ME-ES/600	97%	87%	259%	244%
ME-ES/500	88%		260%	
ME-ES/400	82%		231%	
ME-ES/300	82%		225%	

En la tabla anterior se observa que, al igual que la Alternativa 1a, la estimación de la temperatura máxima alcanzada tiene una menor desviación para los hormigones confeccionados con cementos de menor contenido de puzolanas. Sin embargo, a diferencia de la Alternativa 1a, las desviaciones son menores, mejorando las estimaciones en los 3 tipos de cemento.

A pesar de obtener una mejora en el parámetro de temperatura máxima, el relacionado al tiempo en que ésta se alcanza sobreestima por más del doble el valor experimental, sin existir una tendencia relacionada al tipo de cemento.

Esta alternativa entrega la mejor estimación de temperatura máxima alcanzada para el cemento ME-EX, sin embargo, ésta queda fuera del rango aceptable, ya que se trata de una subestimación.

Ninguno de los parámetros estudiados presenta una relación entre el contenido de cemento y la desviación, en el análisis comparativo con los resultados experimentales.

7.3.2.4. *Alternativa 2b*

La *Alternativa 2b* del método Gráfico corresponde a aquella que considera tanto una corrección por finura del cemento, como por difusión térmica del hormigón estudiado. La Tabla 7.9 muestra la desviación de los resultados de temperatura máxima alcanzada en el núcleo de los bloques y del tiempo al que ésta se alcanza, en contraste con los resultados de los mismos parámetros obtenidos de forma experimental.

Tabla 7.9: comparación entre valores obtenidos por *Alternativa 2b* del método Gráfico y resultados experimentales

Hormigón	Desviación relativa a resultados experimentales (%)			
	$T_{N,máx}$		$t_{T_{N,max}}$	
	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento
ME-EX/600	155%	148%	212%	242%
ME-EX/500	155%		240%	
ME-EX/400	150%		240%	
ME-EX/300	132%		276%	
ME-PL/600	128%	120%	229%	224%
ME-PL/500	129%		206%	
ME-PL/400	116%		263%	
ME-PL/300	107%		200%	
ME-ES/600	104%	93%	259%	244%
ME-ES/500	95%		260%	
ME-ES/400	87%		231%	
ME-ES/300	86%		225%	

De la tabla anterior, se observa que las desviaciones de temperatura máxima estimada, en contraste con los resultados experimentales, aumentan en aproximadamente 5% respecto a las desviaciones obtenidas en la Alternativa 1b. Lo anterior implica un aumento en la sobreestimación de este parámetro para los cementos ME-EX y ME-PL.

Esta alternativa entrega la mejor estimación de temperatura máxima alcanzada para el cemento ME-ES, sin embargo, ésta queda fuera del rango aceptable, ya que se trata de una subestimación.

En cuanto al parámetro $t_{T_{N,max}}$, la tendencia es la misma que en la Alternativa 2a, como ya se mencionó anteriormente.

Ninguno de los parámetros estudiados presenta una relación entre el contenido de cemento y la desviación, en el análisis comparativo con los resultados experimentales.

7.3.3. Método de Schmidt

Considerando los resultados presentados en la Tabla 6.11, para cada hormigón estudiado, la Figura 7.32 grafica el valor estimado de temperatura máxima alcanzada en el núcleo, según el método de Schmidt, mientras que la Figura 7.33 grafica el tiempo estimado al que se alcanza dicha temperatura máxima; por su parte, la Figura 7.34 grafica el valor estimado del máximo diferencial de temperatura alcanzado, mientras que la Figura 7.35 grafica el tiempo estimado al que se alcanza dicho parámetro.

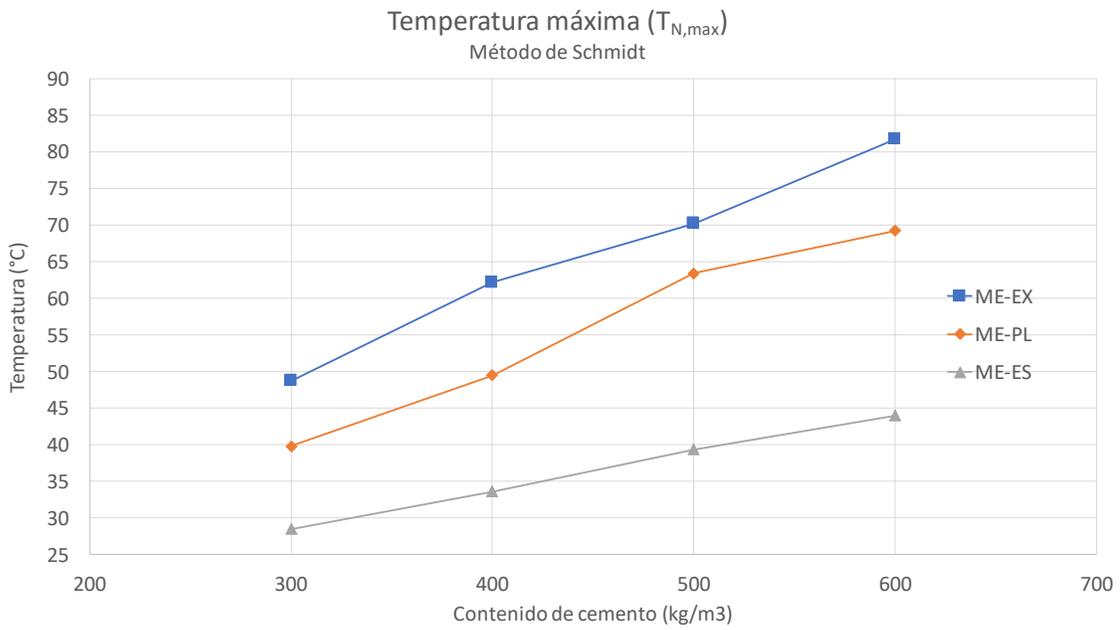


Figura 7.32: gráfico comparativo entre los valores de temperatura máxima alcanzada en el núcleo según la estimación por el método de Schmidt, para cada hormigón estudiado

De la Figura 7.32, se observa que las temperaturas máximas alcanzadas en el núcleo del elemento modelado aumentan conforme aumenta el contenido de cemento en el hormigón, en los 3 tipos de cemento. Además, se ve un aumento más pronunciado en los casos del cemento ME-EX y ME-PL, en comparación con el ME-ES, siendo este último el que menores temperaturas alcanza en el núcleo, seguido por el ME-PL, y finalmente por el ME-EX con las mayores temperaturas estimadas.

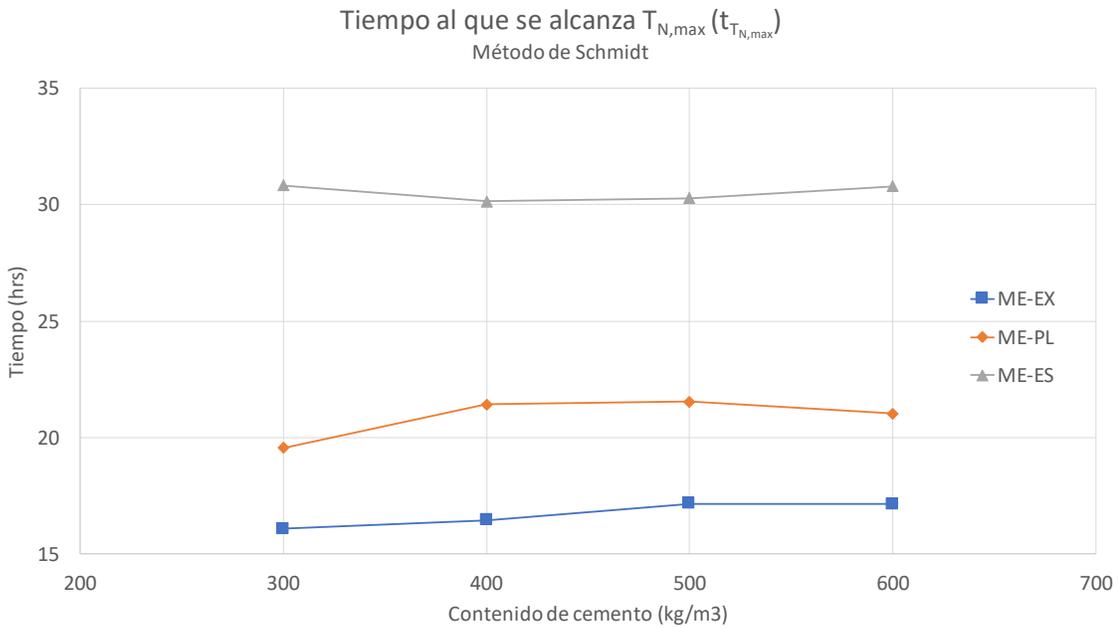


Figura 7.33: gráfico comparativo entre los valores del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo según la estimación por el método de Schmidt, para cada hormigón estudiado

De la Figura 7.33, se observa que no existe una influencia del contenido de cemento en los tiempos a los que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo. Sin embargo, sí existe una relación entre el tipo de cemento y los tiempos estimados, la cual evidencia que los tiempos son mayores en los casos de los hormigones que consideran un mayor contenido de puzolanas, siendo mayores los tiempos estimados para el cemento ME-ES, y menores para el ME-EX.

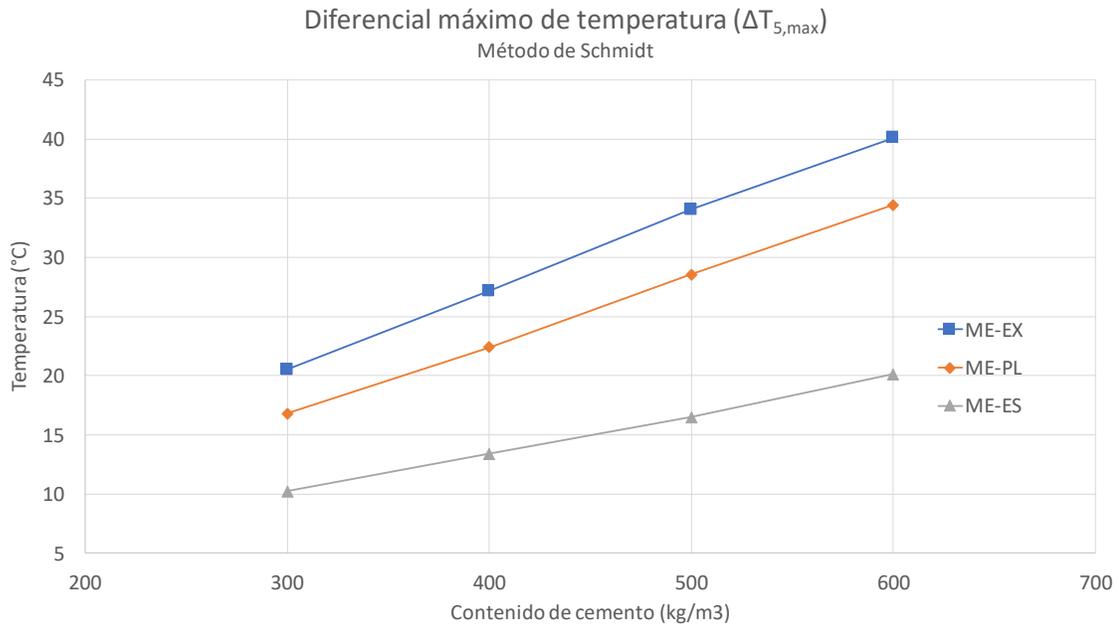


Figura 7.34: gráfico comparativo entre los valores del diferencial de temperatura máximo alcanzado según la estimación por el método de Schmidt, para cada hormigón estudiado

De la Figura 7.34, se observa una influencia similar a la descrita en el gráfico de temperatura máxima en el núcleo (Figura 7.32), es decir, a mayor contenido de cemento se alcanzan mayores diferenciales de temperatura. Además, los hormigones confeccionados con cemento ME-ES alcanzan menores diferenciales de temperatura, seguido por el ME-PL, y finalmente por el ME-EX con los mayores diferenciales de temperatura estimados.

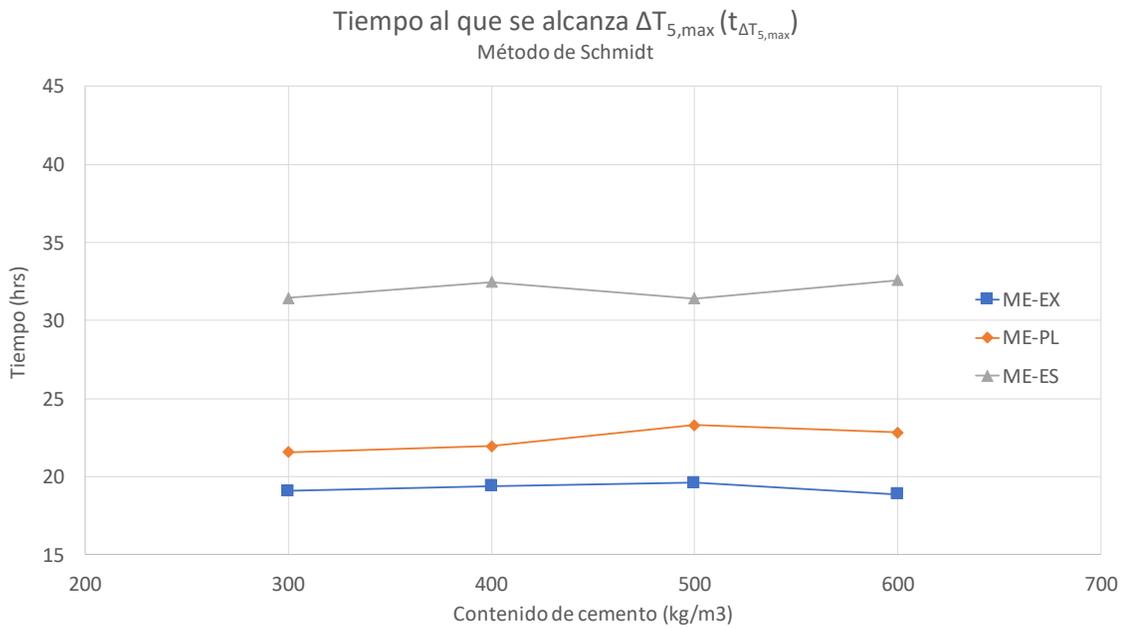


Figura 7.35: gráfico comparativo entre los valores del tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura según la estimación por el método de Schmidt, para cada hormigón estudiado

De la Figura 7.35, se observa una relación similar entre el tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura y el tipo de cemento a la descrita en la Figura 7.33, es decir, los tiempos estimados son mayores en los casos de los hormigones que consideran un mayor contenido de puzolanas, siendo mayores los tiempos estimados para el cemento ME-ES, y menores para el ME-EX.

Tabla 7.10: comparación entre valores obtenidos por método de Schmidt y experimentales

Hormigón	Desviación relativa a resultados experimentales (%)							
	$T_{N,max}$		$t_{T_{N,max}}$		$\Delta T_{5,max}$		$t_{\Delta T_{5,max}}$	
	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento
ME-EX/600	103%	109%	101%	91%	220%	234%	73%	87%
ME-EX/500	116%		86%		220%		85%	
ME-EX/400	107%		97%		264%		84%	
ME-EX/300	110%		80%		231%		106%	
ME-PL/600	95%	99%	96%	91%	197%	191%	65%	117%
ME-PL/500	101%		103%		183%		194%	
ME-PL/400	100%		102%		195%		105%	
ME-PL/300	99%		65%		191%		103%	
ME-ES/600	91%	86%	123%	114%	156%	131%	163%	124%
ME-ES/500	88%		126%		131%		165%	
ME-ES/400	83%		108%		134%		88%	
ME-ES/300	82%		99%		103%		79%	

De la tabla anterior, se observa que los valores estimados de temperatura máxima alcanzada en el núcleo tienen una menor desviación respecto a los resultados experimentales para los casos de hormigones que consideran cemento ME-PL; sin embargo, las estimaciones obtenidas para los hormigones con ME-EX son aceptables en la totalidad de los casos. Por su parte, los hormigones que contienen cemento ME-ES subestiman el valor experimental en más de un 15%, en promedio.

En cuanto a la estimación del tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo, los hormigones que consideran cemento ME-ES son los que estiman de forma aceptable el parámetro, de acuerdo a su contrastación con los valores experimentales. En el caso de los cementos ME-EX y ME-PL, existe una subestimación del parámetro.

Sobre el máximo diferencial de temperatura alcanzado en el elemento modelado, los casos de los cementos ME-EX y ME-PL sobreestiman por aproximadamente el doble el valor del parámetro estudiado, mientras que los hormigones que consideran el tipo de cemento ME-ES son los que mejores estimaciones alcanzan, sobreestimando en promedio un 31% más que el valor experimental.

Finalmente, el tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura es subestimado por más del 15% para los hormigones que consideran cemento ME-EX, mientras que para los hormigones con cementos ME-ES y ME-PL, el parámetro se sobreestima en 24% y 17% por sobre el resultado experimental.

Cabe señalar que no se observa una relación entre los valores estimados por el método de Schmidt y el contenido de cemento, al realizar el análisis comparativo con los resultados experimentales.

7.3.4. Método CTK

Considerando los resultados presentados en la Tabla 6.13, para cada hormigón estudiado, la Figura 7.36 grafica el valor estimado de temperatura máxima alcanzada en el núcleo, según el método de Schmidt, mientras que la Figura 7.37 grafica el tiempo estimado al que se alcanza dicha temperatura máxima; por su parte, la Figura 7.38 grafica el valor estimado del máximo diferencial de temperatura alcanzado, mientras que la Figura 7.39 grafica el tiempo estimado al que se alcanza dicho parámetro.

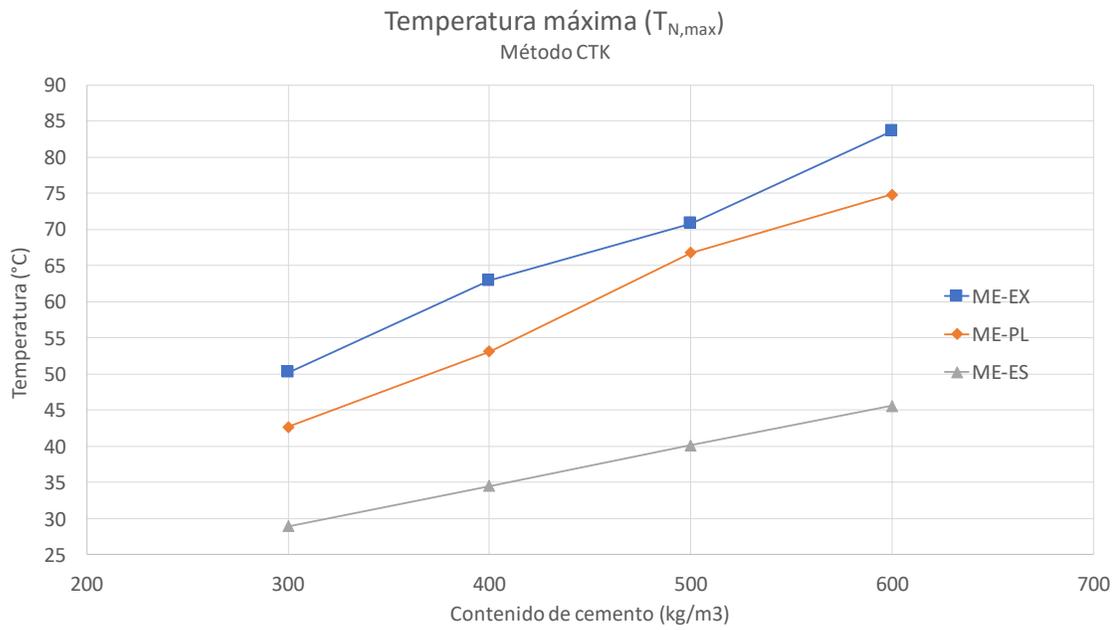


Figura 7.36: gráfico comparativo entre los valores de temperatura máxima alcanzada en el núcleo según la estimación por el método CTK, para cada hormigón estudiado

De la Figura 7.36, se observa que las temperaturas máximas alcanzadas en el núcleo del elemento modelado aumentan conforme aumenta el contenido de cemento en el hormigón, en los 3 tipos de cemento. Además, se ve un aumento más pronunciado en los casos del cemento ME-EX y ME-PL, en comparación con el ME-ES, siendo este último el que menores temperaturas alcanza en el núcleo, seguido por el ME-PL, y finalmente por el ME-EX con las mayores temperaturas estimadas.

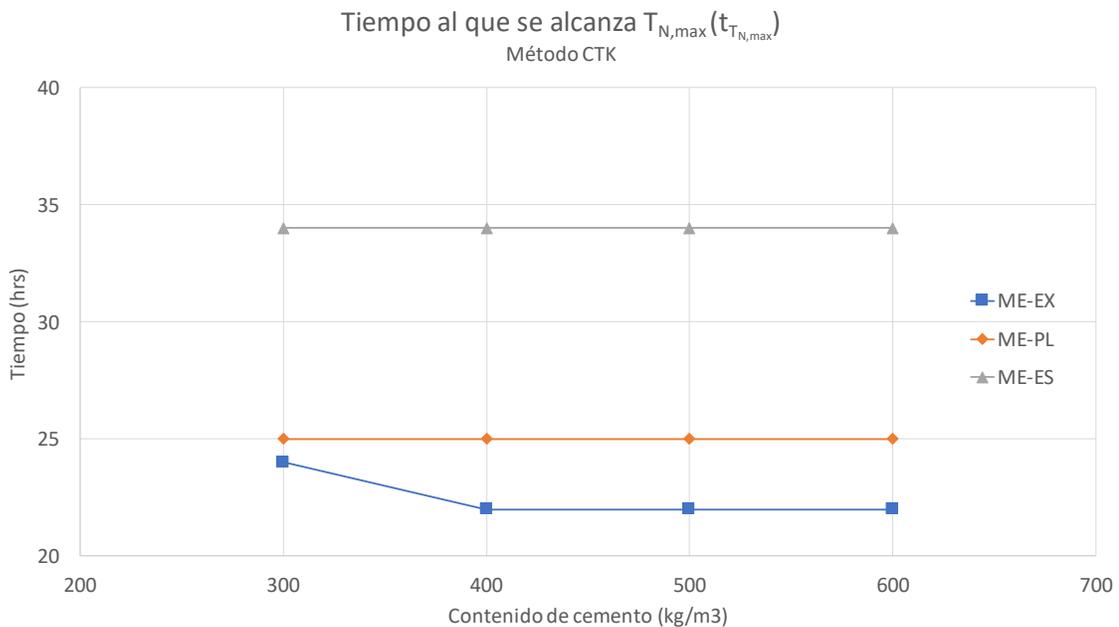


Figura 7.37: gráfico comparativo entre los valores del tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo según la estimación por el método CTK, para cada hormigón estudiado

De la Figura 7.37, se observa que no existe una influencia del contenido de cemento en los tiempos a los que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo. Sin embargo, sí existe una relación entre el tipo de cemento y los tiempos estimados, la cual evidencia que los tiempos son mayores en los casos de los hormigones que consideran un mayor contenido de puzolanas, siendo mayores los tiempos estimados para el cemento ME-ES, y menores para el ME-EX.

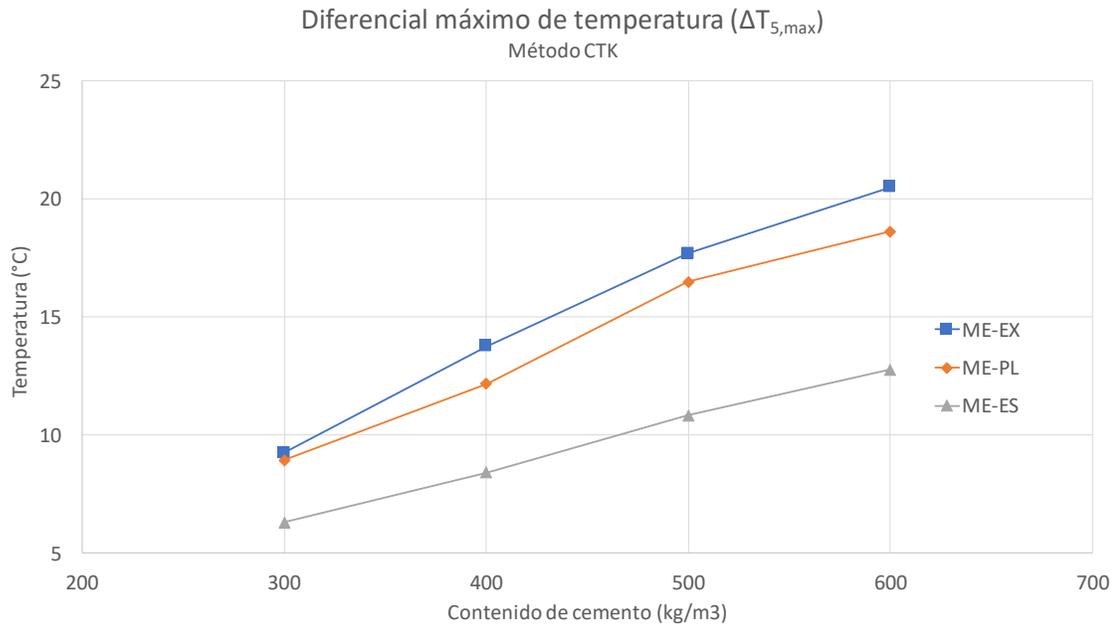


Figura 7.38: gráfico comparativo entre los valores del diferencial de temperatura máximo alcanzado según la estimación por el método CTK, para cada hormigón estudiado

De la Figura 7.38, se observa una influencia similar a la descrita en el gráfico de temperatura máxima en el núcleo (Figura 7.36), es decir, a mayor contenido de cemento se alcanzan mayores diferenciales de temperatura. Además, los hormigones confeccionados con cemento ME-ES alcanzan menores diferenciales de temperatura, seguido por el ME-PL, y finalmente por el ME-EX con los mayores diferenciales de temperatura estimados.

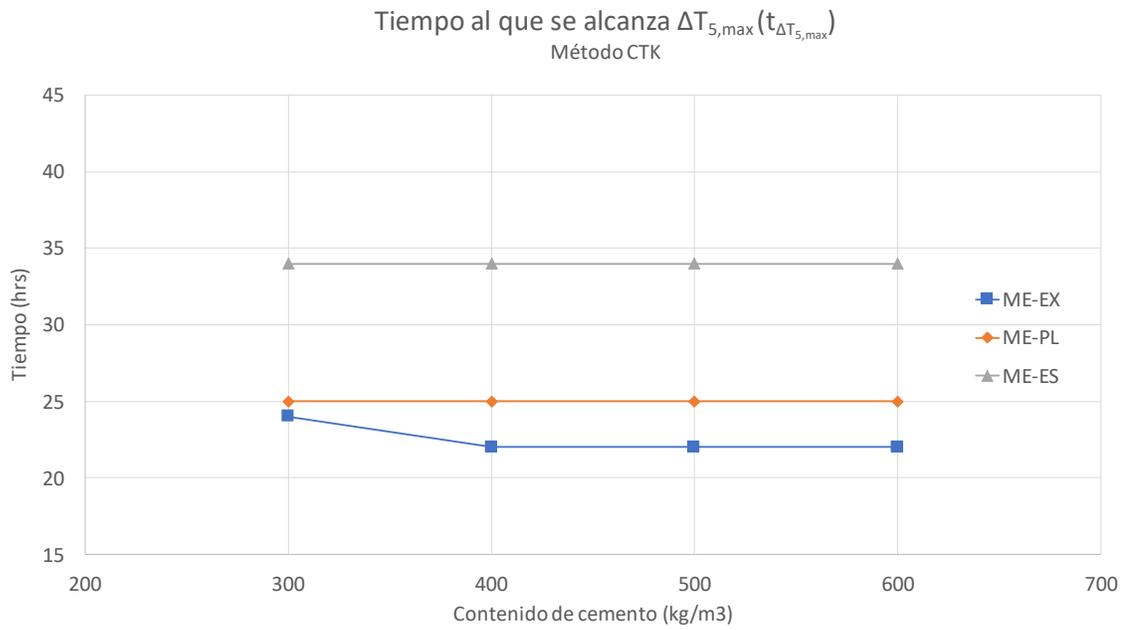


Figura 7.39: gráfico comparativo entre los valores del tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura según la estimación por el método CTK, para cada hormigón estudiado

De la Figura 7.39, se observa una relación similar entre el tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura y el tipo de cemento a la descrita en la Figura 7.37, es decir, los tiempos estimados son mayores en los casos de los hormigones que consideran un mayor contenido de puzolanas, siendo mayores los tiempos estimados para el cemento ME-ES, y menores para el ME-EX.

Tabla 7.11: comparación entre valores obtenidos por método CTK y experimentales

Hormigón	Desviación relativa a resultados experimentales (%)							
	$T_{N,max}$		$t_{T_{N,max}}$		$\Delta T_{5,max}$		$t_{\Delta T_{5,max}}$	
	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento	Por hormigón	Por cemento
ME-EX/600	105%	111%	129%	122%	113%	116%	85%	102%
ME-EX/500	117%		110%		114%		96%	
ME-EX/400	109%		129%		134%		96%	
ME-EX/300	113%		120%		104%		133%	
ME-PL/600	103%	106%	114%	109%	106%	105%	71%	129%
ME-PL/500	106%		119%		106%		208%	
ME-PL/400	108%		119%		106%		119%	
ME-PL/300	106%		83%		101%		119%	
ME-ES/600	94%	88%	136%	127%	99%	83%	170%	131%
ME-ES/500	90%		142%		86%		179%	
ME-ES/400	85%		121%		84%		92%	
ME-ES/300	83%		110%		64%		85%	

De la tabla anterior, se observa que las estimaciones de temperatura máxima alcanzada en el núcleo están dentro del rango aceptable tanto para el caso de los hormigones que contienen cemento ME-EX, como aquellos que contienen cemento ME-PL, mientras que los hormigones con cemento ME-ES subestiman la temperatura máxima por un 12% en promedio.

En cuanto a la estimación del tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo, los hormigones que consideran cemento ME-PL son lo que, en promedio, estiman el parámetro dentro de un rango aceptable, de acuerdo a su contrastación con los valores experimentales. En el caso de los cementos ME-EX y ME-ES, existe una sobreestimación del parámetro por más del 20%.

Sobre el máximo diferencial de temperatura alcanzado en el elemento modelado, los casos de los cementos ME-EX y ME-PL alcanzan desviaciones dentro del rango aceptable al contrastar sus estimaciones con los valores experimentales, mientras que los hormigones con cemento ME-ES subestiman el parámetro por un 17% en promedio.

Finalmente, el valor del tiempo al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura es estimado dentro del rango aceptable para el caso de los hormigones que consideran cemento ME-EX; mientras que para los cementos ME-PL y ME-ES, el parámetro es sobreestimado por aproximadamente un 30%.

Cabe señalar que no se observa una relación entre el contenido de cemento y los valores de desviación obtenidos al contrastar las estimaciones obtenidas por el método CTK con los resultados experimentales.

CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS EN MÉTODO PROPUESTO

En este capítulo se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo propuesto según el análisis realizado en el Capítulo 7.

Los parámetros elegidos para el análisis de sensibilidad corresponden a aquellos que fueron estimados según valores dados en la literatura, y no fueron determinados empíricamente en el desarrollo del trabajo experimental. Estos corresponden al calor específico del hormigón y el coeficiente de convección entre el aire y el hormigón. Además, se incluye en este análisis la sensibilidad del parámetro asociado a las dimensiones del elemento a modelar para observar el comportamiento del método frente a cambios en este parámetro, considerando que este método estima curvas de temperatura para elementos masivos de hormigón.

Los parámetros a evaluar en el análisis de sensibilidad del modelo propuesto (CTK) son:

- Coeficiente de convección aire-hormigón, U
- Calor específico del hormigón, $c_{e,h}$
- Dimensiones, (L, W, H)

Para el análisis de sensibilidad de los parámetros de estudio se considera un caso base, cuyos resultados arrojados por el modelo son comparados con los obtenidos tras modificar el parámetro de estudio en un cierto porcentaje respecto al considerado en el caso base.

El conjunto de datos de entrada que se consideran como caso base se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: datos de entrada del caso base empleado para el análisis de sensibilidad

Hormigón	ME-EX/600
Coeficiente de difusión térmica (m^2/h)	0,00219
Calor específico ($kJ/kg/^\circ C$)	1,013
Conductividad térmica ($kJ/m/h/^\circ C$)	5,542
Densidad húmeda (kg/m^3)	2500
a/c	0,340
$q_{hid,7}$ (kJ/kg)	314
T_{amb} ($^\circ C$)	27,4
T_{col} ($^\circ C$)	27,7
U ($kJ/m^2/h/^\circ C$)	20
L (m)	0,60
W (m)	0,60
H (m)	0,60

Los parámetros se evalúan para los casos en que sus valores corresponden a un 60%, 80%, 120% y 140% del valor del caso base.

De esta forma, los valores a evaluar en el modelo para analizar la sensibilidad de este frente a los resultados que entrega se muestran en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2: valores a evaluar en el análisis de sensibilidad

Parámetro de estudio	Valor considerado	% con respecto al valor del caso base
U ($\text{kJ}/\text{m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$)	12	60%
	16	80%
	20*	100%
	24	120%
	28	140%
Calor específico ($\text{kJ}/\text{kg}/^\circ\text{C}$)	0,608	60%
	0,811	80%
	1,013*	100%
	1,216	120%
	1,419	140%
L, W, H (m)	0,36	60%
	0,48	80%
	0,60*	100%
	0,72	120%
	0,84	140%
* valor del parámetro considerado en el caso base		

Cabe señalar que, en el caso del calor específico, hay una segunda variable que se ve afectada por su variación, ésta corresponde a la conductividad eléctrica del hormigón. La variación de este parámetro también se considera para el análisis de sensibilidad de la variable $c_{e,h}$.

8.1. Coeficiente de convección, U

La Figura 8.1 muestra las curvas resultantes para los valores estimados de desarrollo de temperatura en el núcleo del elemento, según el valor del parámetro U considerado.

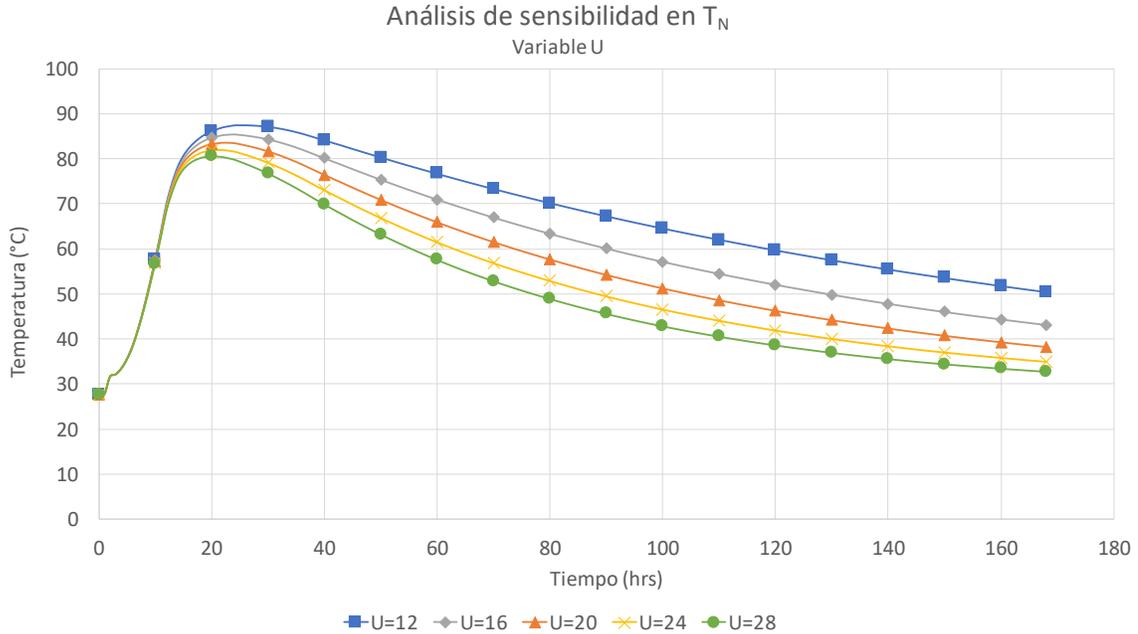


Figura 8.1: curvas resultantes de desarrollo de temperatura en el núcleo para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro U

En la figura anterior se observa que en la fase de aumento de temperatura (antes del peak), las curvas son prácticamente idénticas, diferenciándose entre ellas poco tiempo antes de alcanzar el peak respectivo. A medida que se desarrolla la fase de enfriamiento las curvas se van separando, siendo la de mayor desviación la correspondiente al valor $U = 12$.

Se observa una tendencia a obtener valores más bajos de temperatura en el núcleo que los del caso base a medida que el valor de U es mayor al considerado en dicho caso; mientras que al ser menor el valor de U , las temperaturas en el núcleo tienden a aumentar. Lo anterior se condice con el concepto del parámetro U , que denota la velocidad a la que pierde calor el hormigón en contacto con el aire.

La Figura 8.2 muestra las curvas resultantes para los valores estimados de desarrollo de diferencial de temperatura en el elemento, según el valor del parámetro U considerado.

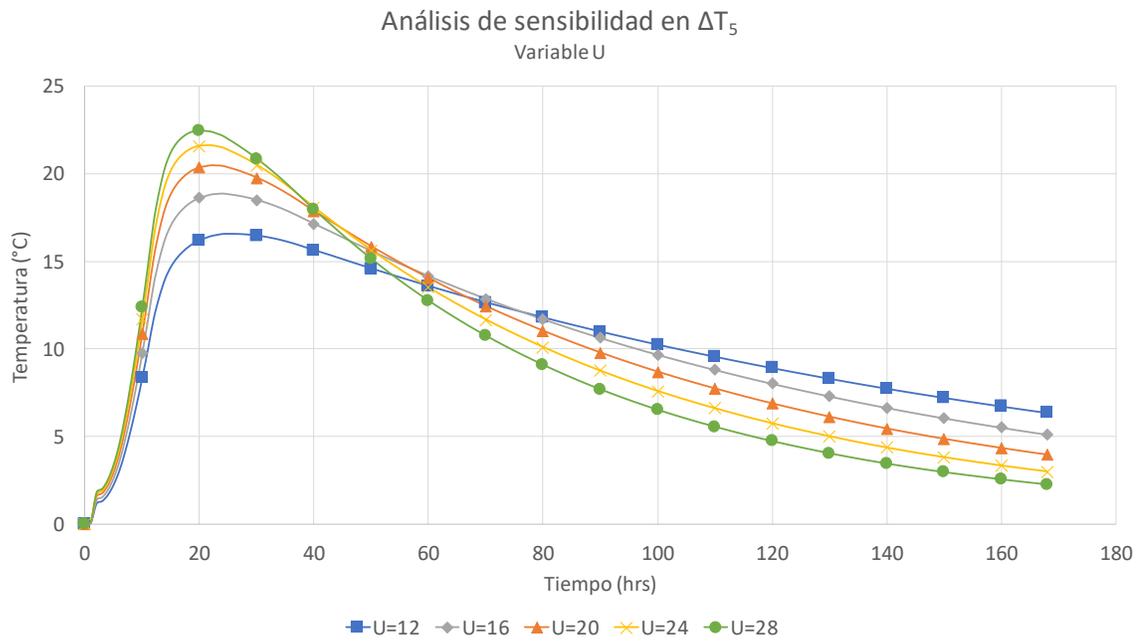


Figura 8.2: curvas resultantes de desarrollo de diferencial de temperatura para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro U

En cuanto al desarrollo del diferencial de temperatura, la figura anterior muestra que las curvas comienzan a distanciarse transcurridas alrededor de 10 horas, siendo las que consideran un menor valor de U las que se distancian más del caso base.

En el peak, la curva con mayor U alcanza el mayor diferencial de temperatura, y la de menor valor de U alcanza el menor registro.

Transcurridas alrededor de 60 horas se invierte el sentido de desviación respecto a la curva del caso base, es decir, la curva de mayor U registra los menores diferenciales de temperatura, y los de menor U resulta ser la con más altos valores de diferencial.

8.2. Calor específico del hormigón, $c_{e,h}$

La Figura 8.3 muestra las curvas resultantes para los valores estimados de desarrollo de temperatura en el núcleo del elemento, según el valor del parámetro $c_{e,h}$ considerado.

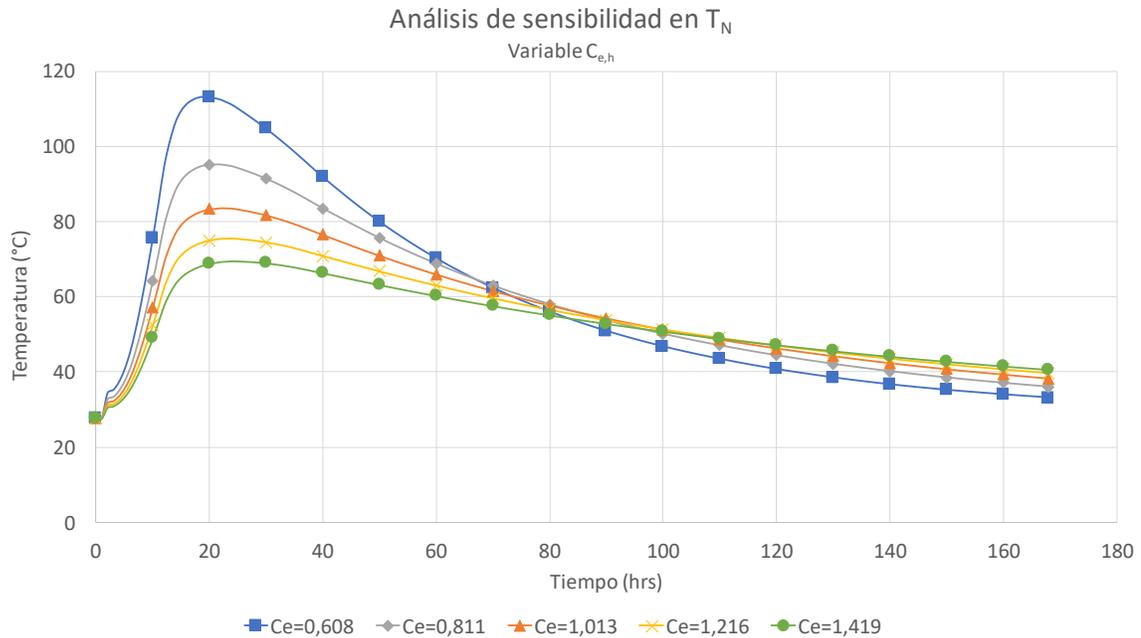


Figura 8.3: curvas resultantes de desarrollo de temperatura en el núcleo para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro $c_{e,h}$

En el desarrollo de la temperatura en el núcleo, la figura anterior muestra que las curvas comienzan a distanciarse desde un principio, siendo las que consideran un menor valor de $c_{e,h}$ las que se distancian más del caso base.

Hasta alrededor de las 80 horas, se observa una tendencia a obtener valores más bajos de temperatura en el núcleo que los del caso base a medida que el valor de $c_{e,h}$ es mayor al considerado en dicho caso; mientras que al ser menor el valor de $c_{e,h}$, las temperaturas en el núcleo tienden a aumentar. Al pasar ese periodo, las curvas invierten esa tendencia.

La Figura 8.4 muestra las curvas resultantes para los valores estimados de desarrollo de diferencial de temperatura en el elemento, según el valor del parámetro $c_{e,h}$ considerado.

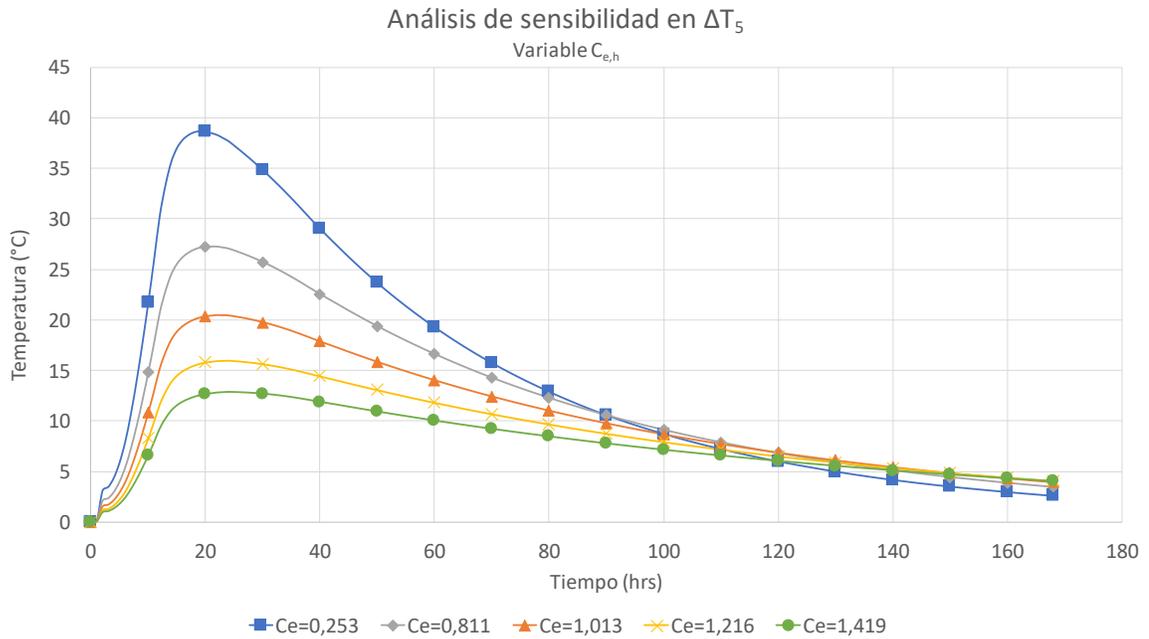


Figura 8.4: curvas resultantes de desarrollo de diferencial de temperatura para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro $c_{e,h}$

En cuanto al desarrollo del diferencial de temperatura, la figura anterior muestra que las curvas comienzan a distanciarse desde un principio, siendo las que consideran un menor valor de $c_{e,h}$ las que se distancian más del caso base.

Hasta alrededor de las 120 horas, se observa una tendencia a obtener valores más bajos de diferencial de temperatura que los del caso base a medida que el valor de $c_{e,h}$ es mayor al considerado en dicho caso; mientras que al ser menor el valor de $c_{e,h}$, los diferenciales de temperatura tienden a aumentar. Al pasar ese periodo, las curvas invierten esa tendencia.

8.3. Dimensiones del elemento, (L, W, H)

La Figura 8.5 muestra las curvas resultantes para los valores estimados de desarrollo de temperatura en el núcleo del elemento, según los valores de los parámetros (L, W, H) considerados.

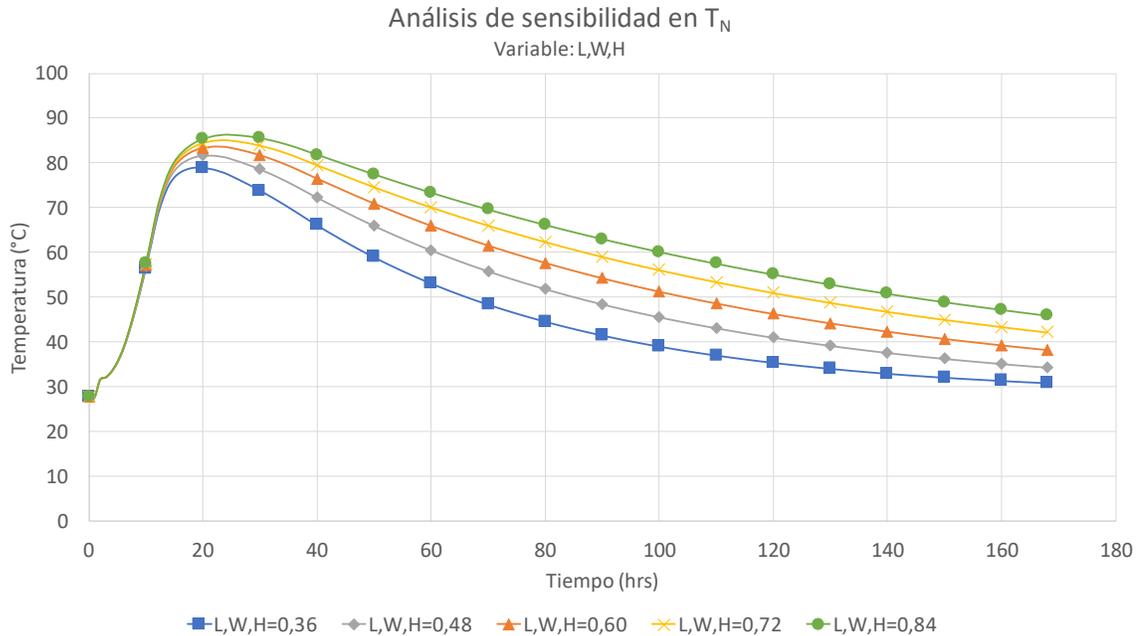


Figura 8.5: curvas resultantes de desarrollo de temperatura en el núcleo para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro (L, W, H)

En la figura anterior se observa que en la fase de aumento de temperatura, las curvas son prácticamente idénticas, diferenciándose entre ellas poco tiempo antes de alcanzar el peak respectivo. A medida que se desarrolla la fase de enfriamiento las curvas se van separando, de forma aproximadamente equidistante respecto a la curva base, siendo la que presenta una mayor desviación la correspondiente al valor $(L, W, H) = 0,36$.

Se observa una tendencia a obtener valores más bajos de temperatura en el núcleo que los del caso base a medida que los valores de (L, W, H) son menores al considerado en dicho caso; mientras que al ser mayores, las temperaturas en el núcleo tienden a aumentar. Lo anterior se condice con el fenómeno térmico observado en los elementos masivos de hormigón, en el cual, a una mayor dimensión del elemento, mayor dificultad se presenta para disipar el calor generado por la hidratación del cemento.

La Figura 8.6 muestra las curvas resultantes para los valores estimados de desarrollo de diferencial de temperatura en el elemento, según los valores de los parámetros (L, W, H) considerados.

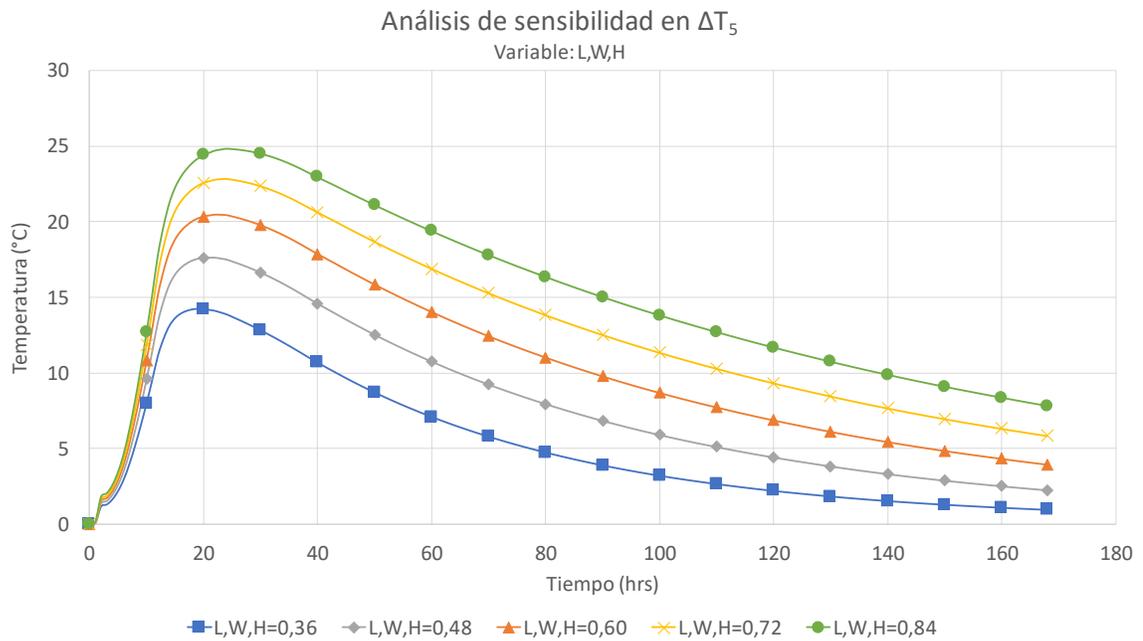


Figura 8.6: curvas resultantes de desarrollo de diferencial de temperatura para los casos de estudio del análisis de sensibilidad del parámetro (L, W, H)

En cuanto al desarrollo del diferencial de temperatura, la figura anterior muestra que las curvas que describen este parámetro tienen un comportamiento similar a las vistas en la Figura 8.5, donde se observa una tendencia a obtener valores más bajos de diferenciales de temperatura que los del caso base a medida que los valores de (L, W, H) son menores al considerado en dicho caso; mientras que al ser mayores, los diferenciales tienden a aumentar.

A diferencia del desarrollo de la temperatura en el núcleo, en el desarrollo de los diferenciales de temperatura las curvas se diferencian entre ellas desde un principio, y las desviaciones son mayores, aunque se mantienen aproximadamente equidistantes respecto a la curva base.

8.4. Análisis de sensibilidad en $T_{N,max}$

La Figura 8.7 presenta una gráfica comparativa entre los valores obtenidos para la máxima temperatura en el núcleo, según el parámetro estudiado y sus valores evaluados.

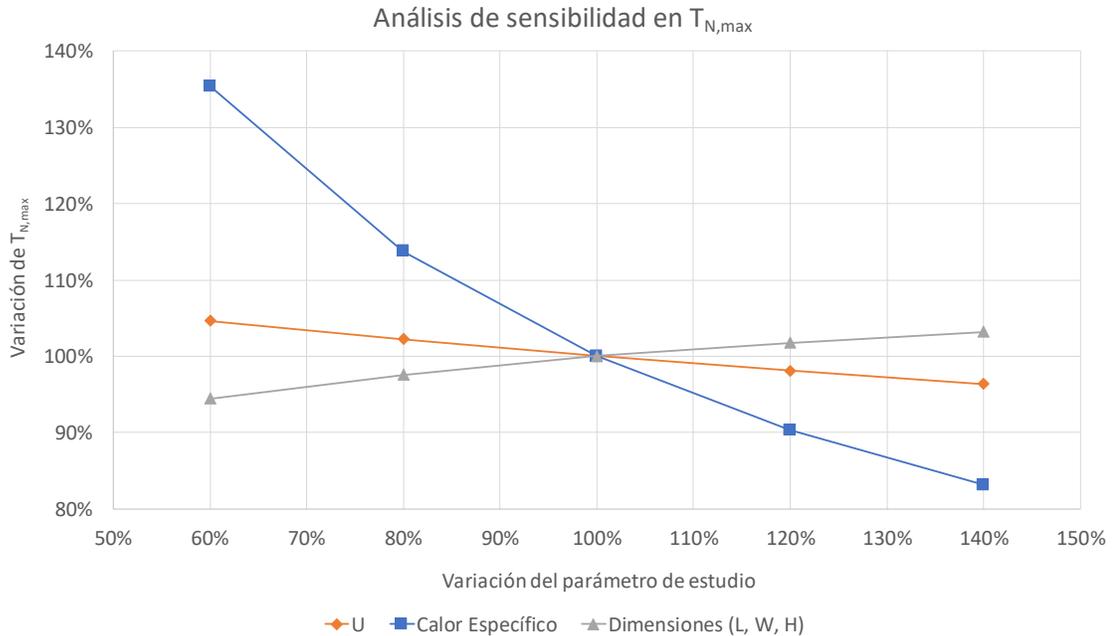


Figura 8.7: análisis de sensibilidad de parámetros U , $c_{e,h}$ y (L, W, H) en método CTK para resultados de temperatura máxima en el núcleo

En la figura anterior se observa que el parámetro correspondiente al calor específico del hormigón presenta una mayor sensibilidad en el modelo al momento de definir la temperatura máxima alcanzada en el núcleo, en comparación con los parámetros correspondientes al coeficiente de convección (U) y a las dimensiones del elemento (L, W, H), los cuales muestran aproximadamente la misma magnitud de sensibilidad entre ellos.

En cuanto a la magnitud de la sensibilidad, al disminuir el parámetro $c_{e,h}$ a un 60% del valor considerado en el caso base, aumenta en aproximadamente 35% el valor de temperatura máxima en el núcleo alcanzado en el caso base; mientras que al aumentar el parámetro en 40% del caso base, la temperatura máxima en el núcleo disminuye aproximadamente un 18% del obtenido en tal caso.

Por otro lado, los parámetros correspondientes al coeficiente de convección entre el aire y el hormigón, y las dimensiones del elemento, experimentan variaciones menores al 10% al evaluar los valores considerados en el análisis, en contraste con el valor de temperatura máxima en el núcleo obtenida para el caso base.

8.5. Análisis de sensibilidad en $\Delta T_{5,max}$

La Figura 8.8 presenta una gráfica comparativa entre los valores obtenidos para el máximo diferencial de temperatura, según el parámetro estudiado y sus valores evaluados.

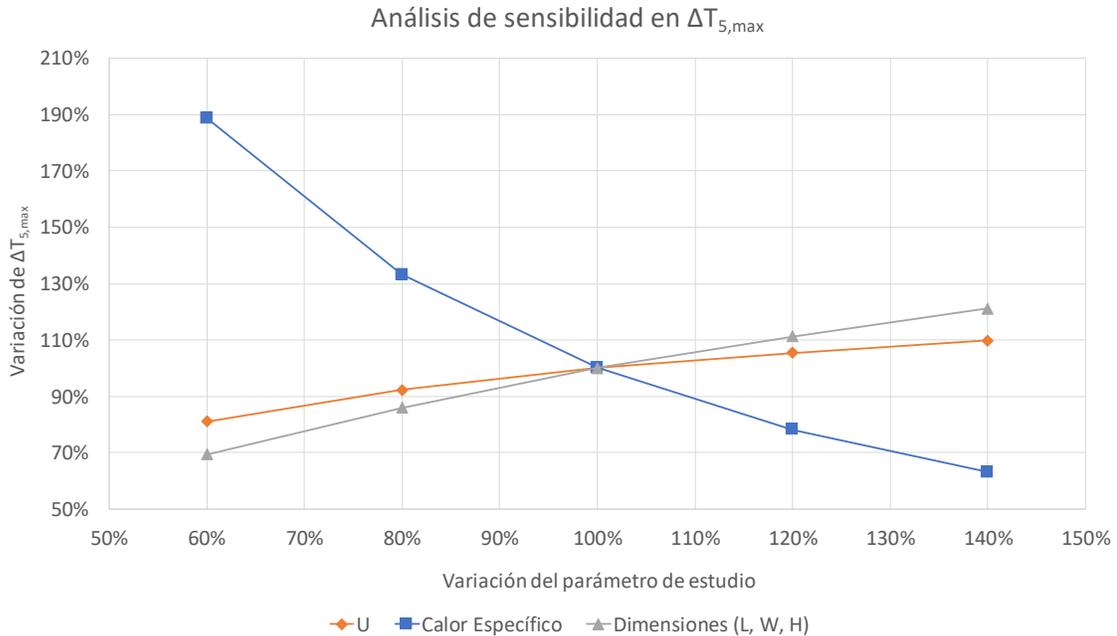


Figura 8.8: análisis de sensibilidad de parámetros U , $c_{e,h}$ y (L, W, H) en método CTK para resultados del diferencial máximo de temperatura

Al igual que en el caso de la temperatura máxima alcanzada en el núcleo, en la Figura 8.8 se observa que el parámetro de mayor sensibilidad es el calor específico del hormigón, en contraste con los otros dos parámetros evaluados.

En cuanto a la magnitud de la sensibilidad, al disminuir el parámetro $c_{e,h}$ a un 60% del valor considerado en el caso base, se obtiene aproximadamente el doble del valor de diferencial de temperatura máximo alcanzado en el caso base; mientras que al aumentar el parámetro en 40% del caso base, se obtiene un diferencial de temperatura máximo cercano a la mitad del obtenido en tal caso.

Por su parte, los parámetros correspondientes al coeficiente de convección entre el aire y el hormigón, y las dimensiones del elemento modelado, experimentan una disminución de 20% y 30%, respectivamente, en el valor del diferencial máximo de temperatura cuando se disminuye el parámetro de estudio a un 60% del valor considerado en el caso base. Mientras que al aumentar el valor de los parámetros en 40%, aumenta el valor del diferencial máximo alcanzado en un 10% y 20%, para los parámetros U y (L, W, H) , respectivamente.

8.6. Análisis de sensibilidad en $t_{T_{N,max}}$ y $t_{\Delta T_{5,max}}$

La Figura 8.9 presenta una gráfica comparativa entre los valores obtenidos para el tiempo al que se alcanzan la temperatura máxima en el núcleo, y el máximo diferencial de temperatura, según el parámetro estudiado y sus valores evaluados.

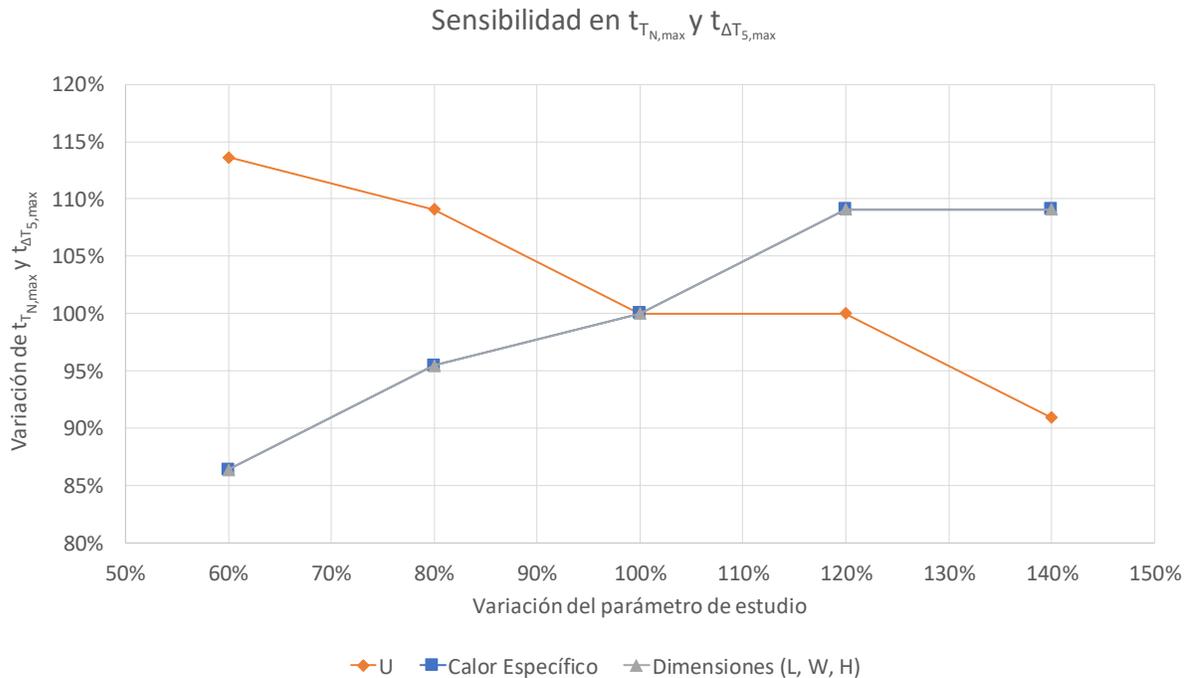


Figura 8.9: análisis de sensibilidad de parámetros U , $C_{e,h}$ y (L, W, H) en método CTK para resultados del tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo y el máximo diferencial de temperatura

Para los valores del tiempo al que se alcanza la máxima temperatura en el núcleo y el máximo diferencial en el elemento, la magnitud de la sensibilidad de los parámetros estudiados es la misma; la única diferencia que se observa en la figura anterior es que la relación de las desviaciones es inversa para el caso del calor específico del hormigón, en relación a aquellas obtenidas para los parámetros U y (L, W, H) .

8.7. Influencia de la temperatura ambiente en el modelo

A lo largo del trabajo, el método CTK se evaluó considerando la temperatura ambiente como constante e igual a la temperatura promedio registrada por una termocupla en el laboratorio. Sin embargo, el modelo también permite su evaluación considerando la temperatura ambiente variable. Para evaluar la influencia de estas alternativas en el modelo se realizó la evaluación del método CTK, para el hormigón ME-EX/600, considerando la lectura registrada cada 1 hora en la termocupla del laboratorio.

La Figura 8.10 muestra las curvas resultantes de la evaluación del método CTK para el caso base (ME-EX/600), considerando la temperatura ambiente variable según el registro experimental.

Mientras que la Figura 8.11 presenta las curvas resultantes de la evaluación del método CTK para el caso base (ME-EX/600), considerando la temperatura ambiente constante.

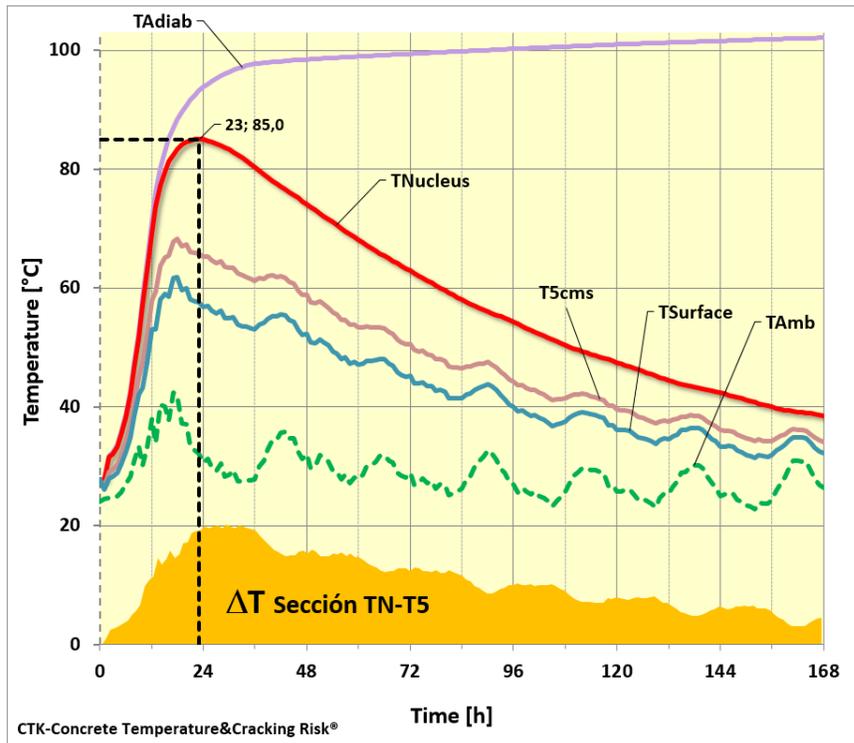


Figura 8.10: curvas resultantes del método CTK al evaluar el elemento confeccionado con hormigón ME-EX/600 (caso base), considerando temperatura ambiente variable

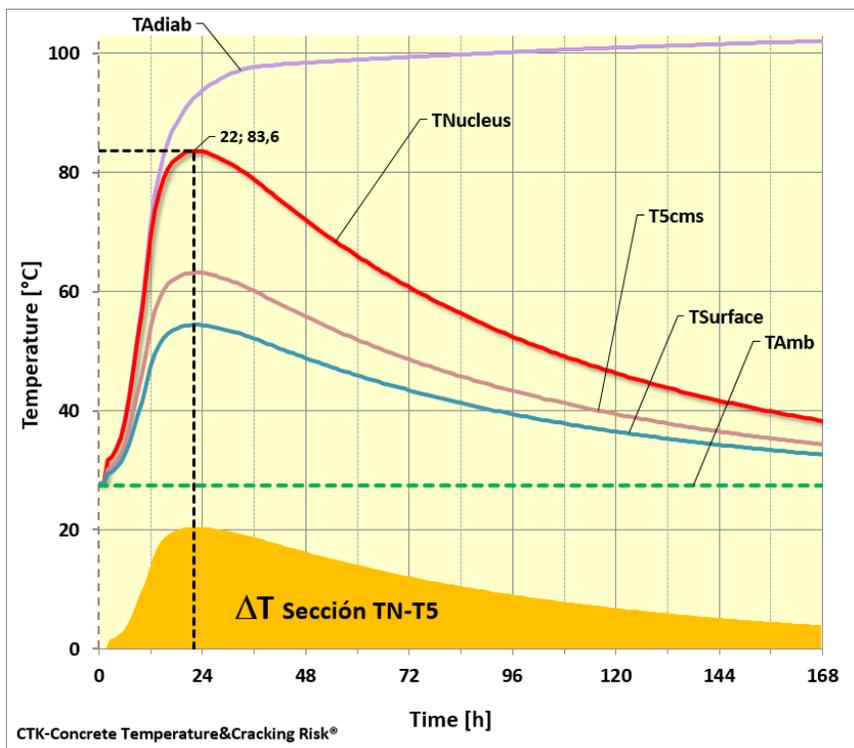


Figura 8.11: curvas resultantes del método CTK al evaluar el elemento confeccionado con hormigón ME-EX/600 (caso base), considerando temperatura ambiente constante

Comparando la Figura 8.10 con la Figura 8.11, se evidencia una alteración en el desarrollo de las temperaturas estimadas cerca de la superficie expuesta, lo que conlleva a una variación en el desarrollo del diferencial de temperatura en el elemento.

Lo anterior implica que la temperatura ambiente, y la forma en que ésta se considere en el modelo, afectan el desarrollo del diferencial de temperatura, pudiendo variar su valor máximo, e incluso pudiendo verse afectado el tiempo al que éste se alcanza.

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES

9.1. Conclusiones generales

A continuación, se presentan las principales conclusiones del trabajo en base a los resultados obtenidos en su desarrollo.

9.1.1. Comportamiento térmico del hormigón confeccionado con cementos de origen nacional

De los resultados obtenidos en el trabajo experimental, se concluye lo siguiente:

1. De los cementos evaluados, los correspondientes al ME-EX y ME-PL presentan una mayor tasa de generación de calor a edades tempranas, en contraste con el cemento tipo ME-ES.
2. Dada la mayor tasa de generación de calor de los cementos ME-EX y ME-PL, éstos alcanzan la temperatura máxima en el núcleo antes que los bloques que contienen cemento ME-ES.
3. Los bloques confeccionados con cemento ME-EX registraron las mayores temperaturas en el núcleo de los elementos. Mientras que los bloques confeccionados con cemento ME-ES registraron los menores valores del mismo parámetro.
4. Los diferenciales máximos de temperatura alcanzados en los bloques no difieren significativamente entre los tipos de cemento, sin embargo, en los resultados se observa una influencia de la temperatura ambiente a la que se expone el elemento.
5. Sólo 2 bloques, de los 12 estudiados, superan los 70°C en el núcleo del elemento.
6. Ninguno de los bloques estudiados supera los 20°C de diferencial de temperatura entre el núcleo y un punto ubicado al interior del elemento, a 5 cm de la superficie expuesta.
7. La mayor temperatura registrada en el núcleo de los bloques fue de 73°C en el hormigón ME-EX/600; mientras que la menor fue de 35°C en el hormigón ME-ES/300.
8. El mayor diferencial de temperatura fue de 18°C registrado en los hormigones ME-EX/600 y ME-PL/600; mientras que el menor fue de 9°C registrado en los hormigones ME-EX/300 y ME-PL/300.
9. El registro de tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo difiere como máximo en 13 horas con respecto al tiempo al que se alcanza el máximo diferencial en el mismo elemento. Siendo éste el caso del hormigón ME-PL/600.

9.1.2. Influencia del contenido de cemento

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación de los métodos predictivos y la experiencia del trabajo experimental, se tienen las siguientes conclusiones respecto a la influencia del contenido de cemento en el desarrollo de temperatura al interior de un elemento masivo de hormigón:

1. De los resultados experimentales se obtuvo que los hormigones con mayor contenido de cemento desarrollaron mayores temperaturas en el núcleo del elemento (Figura 5.24, Figura 5.25, Figura 5.26). Lo anterior implica que se alcanzaron mayores temperaturas máximas en el núcleo, en los hormigones con mayor contenido de cemento (Figura 5.38).
2. Respecto a los desarrollos de diferenciales de temperatura, éstos resultaron ser más altos en los bloques experimentales con mayor contenido de cemento (Figura 5.31, Figura 5.32, Figura 5.33). Lo anterior implica que se alcanzaron mayores diferenciales máximos de temperatura en los hormigones con mayor contenido de cemento (Figura 5.40).
3. De los resultados obtenidos en la evaluación de métodos predictivos, los métodos PCA (Figura 7.25), Gráfico (Figura 7.26, Figura 7.27, Figura 7.28), de Schmidt (Figura 7.32) y CTK (Figura 7.36) presentan un aumento en la temperatura máxima alcanzada en el núcleo, al aumentar el contenido de cemento.
4. De los resultados obtenidos en la evaluación de métodos predictivos, los métodos de Schmidt (Figura 7.34) y CTK (Figura 7.38) presentan un aumento en el diferencial máximo de temperatura, al aumentar el contenido de cemento.
5. En relación a los tiempos en que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo y al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura en el elemento, los registros obtenidos en el trabajo experimental no indican una tendencia relacionada al contenido de cemento (Figura 5.39, Figura 5.41). Lo mismo ocurre con los resultados obtenidos en la evaluación de los métodos Gráfico (Figura 7.29, Figura 7.30, Figura 7.31), de Schmidt (Figura 7.33, Figura 7.35) y CTK (Figura 7.37, Figura 7.39).
6. Los resultados obtenidos mediante la evaluación de métodos predictivos y el trabajo experimental se condicen con lo que indica la teoría, respecto a un aumento de temperatura bajo condiciones semi-adiabáticas al existir la presencia de una mayor cantidad de cemento que reacciona con el agua y libera calor en el proceso.
7. El contenido de cemento es un factor que incide directamente en la magnitud del desarrollo de temperatura en el núcleo, y la magnitud del desarrollo del diferencial de temperatura en el elemento. Sin embargo, no influye en los tiempos a los que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo y al que se alcanza el máximo diferencial de temperatura en el elemento.
8. Los resultados experimentales coinciden con los resultados de la evaluación de métodos predictivos, en relación a la influencia del contenido de cemento en la totalidad de los parámetros estudiados.

9.1.3. Influencia del tipo de cemento

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación de los métodos predictivos y la experiencia del trabajo experimental, se tienen las siguientes conclusiones respecto a la influencia del tipo de cemento en el desarrollo de temperatura al interior de un elemento masivo de hormigón:

1. De los resultados experimentales se obtuvo que los hormigones confeccionados con cementos que contienen una menor cantidad de adiciones puzolánicas, desarrollaron mayores temperaturas en el núcleo del elemento (Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29, Figura 5.30). Lo anterior implica que se alcanzaron mayores temperaturas máximas en el núcleo, en los hormigones confeccionados con cementos que contienen una menor cantidad de adiciones puzolánicas (Figura 5.38).
2. Respecto a los desarrollos de diferenciales de temperatura, éstos no evidencian una tendencia definida en los bloques experimentales según el tipo de cemento empleado (Figura 5.34, Figura 5.35, Figura 5.36, Figura 5.37).
3. De los resultados obtenidos en la evaluación de métodos predictivos, los métodos PCA (Figura 7.25), Gráfico (Figura 7.26, Figura 7.27, Figura 7.28), de Schmidt (Figura 7.32) y CTK (Figura 7.36) presentan un aumento en la temperatura máxima alcanzada en el núcleo, al evaluar hormigones que contienen cementos con menor cantidad de adiciones puzolánicas.
4. De los resultados obtenidos en la evaluación de métodos predictivos, los métodos de Schmidt (Figura 7.34) y CTK (Figura 7.38) presentan un aumento en el diferencial máximo de temperatura, al evaluar hormigones que contienen cementos con menor cantidad de adiciones puzolánicas.
5. En relación al tiempo en que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo, los registros obtenidos en el trabajo experimental resultan ser menores para los hormigones que contienen cementos con menor cantidad de adiciones puzolánicas (Figura 5.39). Lo mismo ocurre con los resultados obtenidos en la evaluación de los métodos Gráfico (Figura 7.29, Figura 7.30, Figura 7.31), de Schmidt (Figura 7.33) y CTK (Figura 7.37).
6. En relación al tiempo en que se alcanza el máximo diferencial de temperatura en el elemento, los registros obtenidos en el trabajo experimental no indican una tendencia relacionada al tipo de cemento (Figura 5.41). Sin embargo, en los resultados obtenidos en la evaluación de los métodos de Schmidt (Figura 7.35) y CTK (Figura 7.39), se observa la tendencia a obtener menores valores de tiempo para los hormigones que contienen cementos con menor cantidad de adiciones puzolánicas.
7. Los resultados obtenidos mediante la evaluación de métodos predictivos y el trabajo experimental se condicen con lo que indica la teoría, respecto a un aumento de temperatura bajo condiciones semi-adiabáticas bajo la presencia de un cemento de bajo contenido de adiciones puzolánicas.

8. Se demuestra, mediante resultados experimentales, que el tipo de cemento es un factor que incide directamente en la magnitud del desarrollo de temperatura en el núcleo y en el tiempo al que se alcanza la máxima temperatura en el núcleo; pero no incide en la magnitud del desarrollo del diferencial de temperatura en el elemento, ni en el tiempo al que se alcanza el máximo diferencial.
9. Los resultados experimentales no coinciden con los resultados de la evaluación de métodos predictivos, en relación a la influencia del tipo de cemento en los parámetros correspondientes al desarrollo del diferencial de temperatura en el elemento, y el tiempo al que se alcanza el máximo diferencial. Sin embargo, sí coinciden en relación a la influencia del tipo de cemento sobre los parámetros correspondientes al desarrollo de temperatura en el núcleo, y el tiempo al que ésta llega a ser máxima.

9.1.4. Validez de los modelos predictivos evaluados

De la contrastación realizada entre los valores obtenidos en la evaluación de los métodos y los valores obtenidos en el trabajo experimental, se concluye lo siguiente:

1. Método PCA

- No hay estimaciones de temperatura máxima que se consideren aceptables según los criterios del análisis.
- Desviación promedio de resultados estimados en relación a resultados experimentales, según el parámetro de estudio:
 - $T_{N,max}$: 131%
- Desviación estándar entre resultados estimados por el método, según el parámetro de estudio:
 - $T_{N,max}$: 11%

2. Método Gráfico

- Corrección por finura mejora estimación de temperatura máxima de cementos ME-PL y ME-ES, pero empeora la de ME-EX. No influye en la estimación de tiempo al que se alcanza temperatura máxima en el núcleo.
- Corrección por difusión térmica mejora estimación de temperatura máxima en los 3 tipos de cemento, pero empeora estimación del tiempo en que ésta se logra.
- *Alternativa 1* otorga la mejor estimación de tiempo al que se alcanza la temperatura máxima.
- Las desviaciones de los resultados del método, en contraste con los valores experimentales, presentan tendencias relacionadas al tipo de cemento, pero no a su contenido.

- Mejor estimación de temperatura máxima según el tipo de cemento:
 - ME-EX: *Alternativa 2a*
 - ME-PL: *Alternativa 1b*
 - ME-ES: *Alternativa 2b*
- Desviación promedio de resultados estimados en relación a resultados experimentales, según el parámetro de estudio, para la alternativa del método que mejor se ajusta:
 - $T_{N,max}$: 91% (*ALTERNATIVA 2a*)
 - $t_{T_{N,max}}$: 123% (*ALTERNATIVA 1*)
- Desviación estándar entre resultados estimados por el método, según el parámetro de estudio, para la alternativa del método que mejor se ajusta:
 - $T_{N,max}$: 6% (*ALTERNATIVA 2a*)
 - $t_{T_{N,max}}$: 21% (*ALTERNATIVA 1*)

3. Método de Schmidt

- Las desviaciones de los resultados del método, en contraste con los valores experimentales, presentan tendencias relacionadas al tipo de cemento, pero no a su contenido.
- Desviación promedio de resultados estimados en relación a resultados experimentales, según el parámetro de estudio:
 - $T_{N,max}$: 98%
 - $t_{T_{N,max}}$: 99%
 - $\Delta T_{5,max}$: 185%
 - $t_{\Delta T_{5,max}}$: 109%
- Desviación estándar entre resultados estimados por el método, según el parámetro de estudio:
 - $T_{N,max}$: 11%
 - $t_{T_{N,max}}$: 17%
 - $\Delta T_{5,max}$: 47%
 - $t_{\Delta T_{5,max}}$: 42%

4. Método CTK

- Las desviaciones de los resultados del método, en contraste con los valores experimentales, presentan tendencias relacionadas al tipo de cemento, pero no a su contenido.
- Desviación promedio de resultados estimados en relación a resultados experimentales, según el parámetro de estudio:

- $T_{N,max}$: 102%
 - $t_{T_{N,max}}$: 119%
 - $\Delta T_{5,max}$: 101%
 - $t_{\Delta T_{5,max}}$: 121%
- Desviación estándar entre resultados estimados por el método, según el parámetro de estudio:
 - $T_{N,max}$: 11%
 - $t_{T_{N,max}}$: 15%
 - $\Delta T_{5,max}$: 18%
 - $t_{\Delta T_{5,max}}$: 43%

9.1.5. Modelo propuesto

1. En base a los resultados globales obtenidos, y el análisis realizado, se propone el método CTK como el método predictivo característico para estimar el desarrollo de temperatura de elementos masivos de hormigón confeccionados con cementos de origen nacional.
2. De los resultados del análisis de sensibilidad de parámetros, se concluye que el método CTK tiene una alta sensibilidad al parámetro correspondiente al calor específico del hormigón. Mientras que los otros parámetros estudiados (coeficiente de convección y dimensiones del elemento), presentan una baja sensibilidad en el modelo.
3. Dada la sensibilidad del parámetro relacionado al calor específico en el modelo, es recomendable determinar empíricamente su valor para lograr una mayor precisión de los resultados estimados por el modelo.
4. Modelar mediante el método CTK considerando la temperatura ambiente constante, en lugar de variable, puede influir en los resultados estimados que se relacionan con el desarrollo del diferencial de temperatura en el elemento.

9.2.Recomendaciones y continuidad de estudios

1. Para modelar las temperaturas alcanzadas en hormigones masivos mediante métodos simplificados, sin recurrir a la modelación por elementos finitos, se recomienda optar por uno que sobreestime los valores de temperatura máxima y diferenciales de temperatura de forma de otorgar un factor de seguridad propio del método a las estimaciones que significarán un control de temperatura en obra, u otras acciones que busquen evitar la fisuración del elemento por estados tensionales térmicos. La magnitud de cuánto debe sobreestimar los valores podría ser un parámetro que se incluya en una futura normativa nacional que busque estandarizar el diseño y el proceso de confección de elementos de hormigón masivo.

2. Para complementar el presente estudio, se propone la realización de la caracterización mecánica de los mismos hormigones considerados en este trabajo, que contemple la determinación de propiedades como módulo elástico, coeficiente de expansión térmica, módulo de Poisson, desarrollo de resistencia a la tracción en el tiempo, entre otros, con el objetivo de evaluar métodos de estimación de estados tensionales asociados a los parámetros térmicos del hormigón masivo, para lograr complementar los resultados con los obtenidos en este trabajo de título, y así poder definir un método predictivo de riesgo de fisuración en elementos de hormigón masivo confeccionados con cementos de origen nacional.
3. Considerando que la modelación en elementos finitos es el método más preciso, pero a la vez más complejo de desarrollar, para estimar desarrollos de temperatura y estados tensionales en elementos de hormigón, se propone realizar un análisis dual (térmico-tensional) mediante alguno de los softwares de elementos finitos disponibles, que permitan contrastar los resultados obtenidos en la evaluación de métodos predictivos de desarrollo de temperatura (el presente trabajo de título) y métodos predictivos de estados tensionales (estudio propuesto) para validar sus resultados.

GLOSARIO

a) **Cemento o cemento hidráulico**

Material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo agua como en el aire (NCh 148, 1968).

b) **Cemento con adiciones**

Tipo de cemento hidráulico que se obtiene de la molienda conjunta de clínker, yeso y adiciones hidráulicas o potencialmente hidráulicas.

c) **Cemento Portland**

Tipo de cemento hidráulico que se obtiene de la molienda conjunta de clínker y yeso, sin adiciones.

d) **Clínker**

Producto constituido principalmente por silicatos cálcicos; se obtiene por calentamiento de una mezcla homogénea finamente molida, en proporciones adecuadas, formada principalmente por óxidos de calcio (CaO) y silicio (SiO_2) y, en menor proporción, por óxidos de aluminio (Al_2O_3) y fierro (Fe_2O_3) (NCh 148, 1968).

e) **Yeso**

Mineral compuesto de sulfato de calcio hidratado. Se utiliza como componente del cemento para regular los tiempos de fraguado.

f) **Adiciones**

Materiales minerales finamente molidos utilizados en el hormigón con el fin de mejorar ciertas propiedades o conferirle propiedades especiales (NCh 170, 2016).

Se pueden incorporar directamente a la mezcla de componentes del hormigón, o pueden venir premezcladas con el cemento (cemento con adiciones).

g) **Hormigón**

Material constituido por la mezcla de cemento, áridos y agua, con o sin la incorporación de aditivos y adiciones, que desarrolla sus propiedades por hidratación del cemento (NCh 170, 2016).

h) **Mortero**

Material constituido por la mezcla de cemento hidráulico, áridos finos y agua, con o sin la incorporación de aditivos y adiciones, que desarrolla sus propiedades mecánicas por hidratación del cemento.

i) Pasta de cemento

Material constituido por la mezcla de cemento hidráulico y agua, con o sin la incorporación de aditivos y adiciones, que desarrolla sus propiedades por hidratación del cemento.

j) Aditivos

Material distinto del agua, los áridos y del cemento hidráulico, utilizado en pequeñas cantidades, para modificar las propiedades del hormigón en el estado fresco y/o endurecido por acciones de tipo química, física o físico-química, durante la etapa de fraguado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abeka, H., Adom, M., Osei, J., & Adinkrah-Appiah, K. (2015). Temperature prediction models in mass concrete state of the art literature review. *Conference Paper*.
- ACI 116R. (2000 [reapproved 2005]). *Cement and concrete terminology*. American Concrete Institute.
- ACI 207.1R. (2005). *Guide to mass concrete*. American Concrete Institute.
- ACI 207.2R. (2007). *Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete*. American Concrete Institute.
- ACI 207.3R. (1994 [reapproved 2008]). *Practices for evaluation of concrete in existing massive structures for service conditions*. American Concrete Institute.
- ACI 207.4R. (2005). *Cooling and insulating systems for mass concrete*. American Concrete Institute.
- ACI 318. (2008). Requisitos y reglamento para concreto estructural.
- ASTM C-1157. (2003). *Standard performance specification for hydraulic cement*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM C-150. (2007). *Standard specification for Portland cement*. American Society for Testing Materials.
- ASTM C-595. (2003). *Standard specification for blended hydraulic cements*. American Society for Testing and Materials.
- Babul, P. (2013). Memoria para optar al título de ingeniera civil. *Análisis de aplicabilidad en Chile de la guía "Pautas para el control de fisuración en hormigón masivo 2008 - Instituto del Concreto de Japón"*. Santiago, Chile.
- Bianchi, A. (1991). Memoria para optar al título de ingeniero civil. *Cálculo indirecto de la tasa de generación de calor de hidratación en hormigones*. Santiago, Chile.
- Bornand, J. (2015). Apunte curso CI5503-1: Tecnología del Hormigón, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. *Hormigón masivo*.
- Cámara Chilena de la Construcción. (2016). *Proyecto de especificación para hormigón masivo estructural*.
- Copeland, L., Kantro, D., & Verbeck, G. (1960). *Chemistry of Hydration of Portland Cement*.

- Delfín, F., & Figueroa, M. (2009). Seminario Internacional de Hormigones Estructurales Masivos. *Experiencia del IDIEM en el control y seguimiento de obras de hormigón masivo*. Santiago, Chile.
- Ebensperger, L. (2018). "A simplified 1D Stress Approach for Cracking Risk Prediction", accepted in *SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete*.
- Elices, M., Llorca, J., & Ingrassia, A. (1985, julio). Fractura del hormigón en régimen elástico y lineal. Un ejemplo: la presa Fontana. *Informes de la Construcción*, Vol.37, n°372, 19-33.
- Japan Concrete Institute. (2008). *JCI Guidelines for control of cracking of mass concrete*.
- Kosmatka, S., & Wilson, M. (2011). *Design and control of concrete mixtures*. Portland Cement Association.
- Lamond, J., & Pielert, J. (2006). *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*.
- Lawrence, A. M. (2009). A dissertation presented to the graduate school of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. *A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete*. Miami, Florida, U.S.A.
- NCh 1018. (2009). *Hormigón - Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio*. Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 1019. (2009). *Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams*. Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 1037. (2009). *Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*. Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 148. (1968). *Terminología, clasificación y especificaciones generales*. Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 163. (1979). *Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales*. Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 170. (2016). *Hormigón - Requisitos generales*. Instituto Nacional de Normalización.
- Riding, K., Poole, J., Schindler, A., Juenger, M., & Folliard, K. (2006). Evaluation of temperature prediction methods for mass concrete members. *ACI Materials Journal*.

- RILEM STAR TC 254-CMS. (2018). *A simplified 1D Stress Approach for Cracking Risk Prediction*", *Cracking Risk and Regulations, Chapter 8 in "Thermal Cracking of massive Concrete Structures*. Ed. Springer.
- Shayan, A., & Morris, H. (2005). Combined deterioration problems in a coastal bridge in NSW, Australia. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 477-493.
- Tennis, P., & Jennings, H. (2000). *A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes*. *Cement and Concrete Research*, 30(6), 855-863.
- Torres, F., & Andrade, T. (2016). Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil. *IBRACON Structures and Materials Journal*.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1997). *Thermal studies of mass concrete structures*. Washington D.C.
- UNE-EN 196-9. (2011). *Métodos de Ensayo de Cementos; Parte 9: determinación del calor de hidratación; Método Semi-adiabático*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Urbistondo, R., & Yges, L. (1982, Abril-Mayo). Presa de El Altazar: Tratamiento de fisuras del paramento de aguas arriba. *Revista de Obras Públicas*, 257-268.
- Verbeck, G., & Foster, X. (1950). Long time study of cement performance in concrete. *ASTM v50*.

ANEXO A Curvas resultantes del trabajo experimental

A continuación se presentan las curvas resultantes del monitoreo realizado a los 12 bloques de hormigón contemplados en el trabajo experimental.

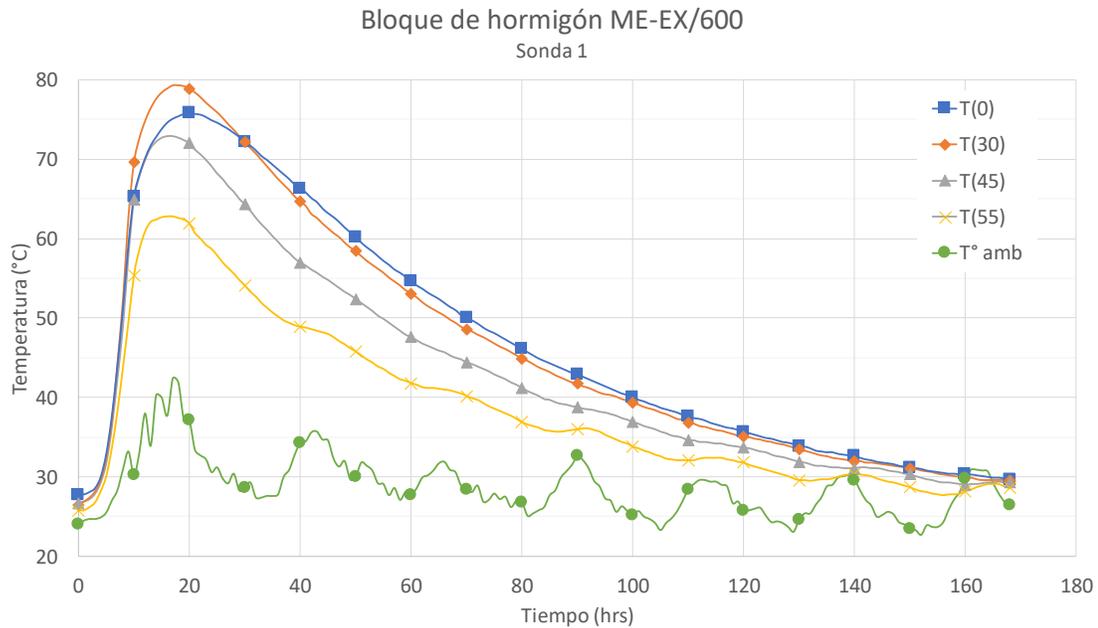


Figura A.1: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/600 durante 7 días

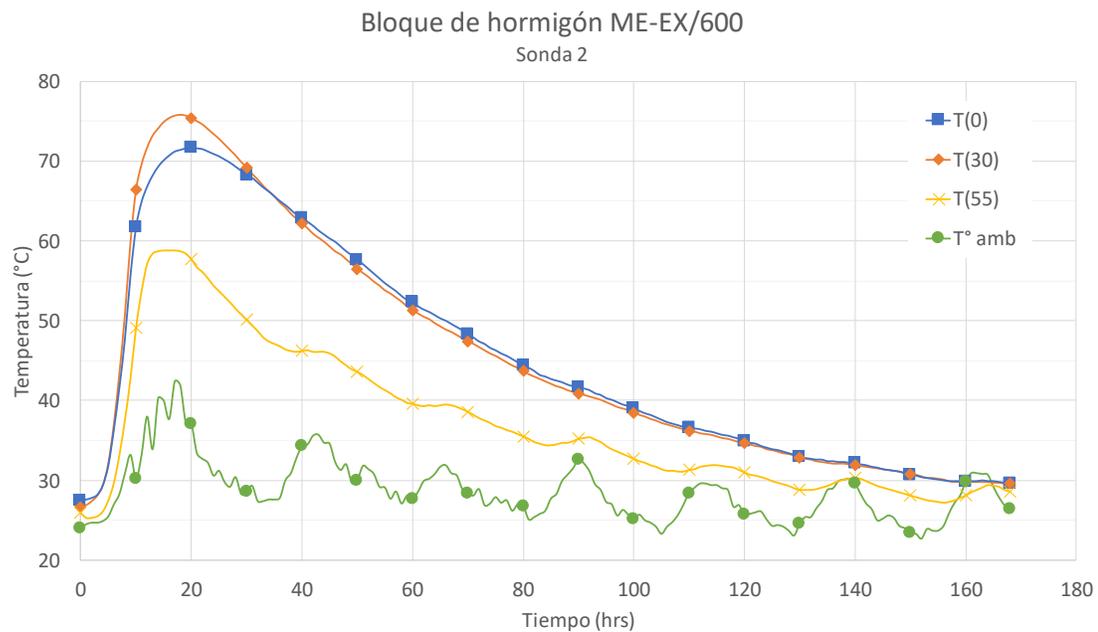


Figura A.2: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/600 durante 7 días

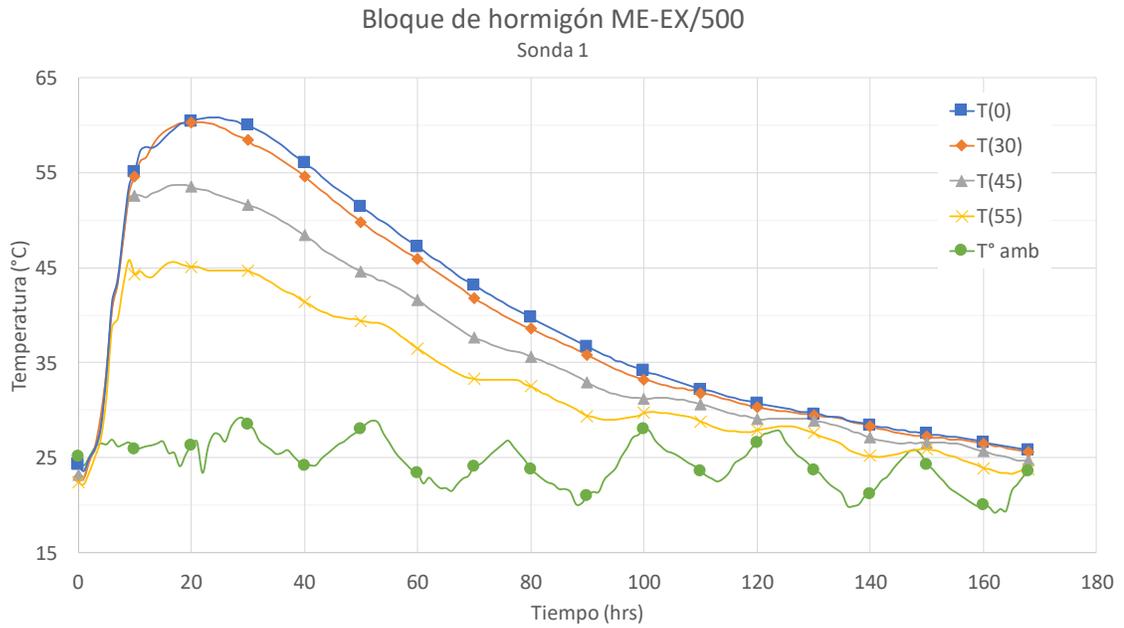


Figura A.3: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/500 durante 7 días

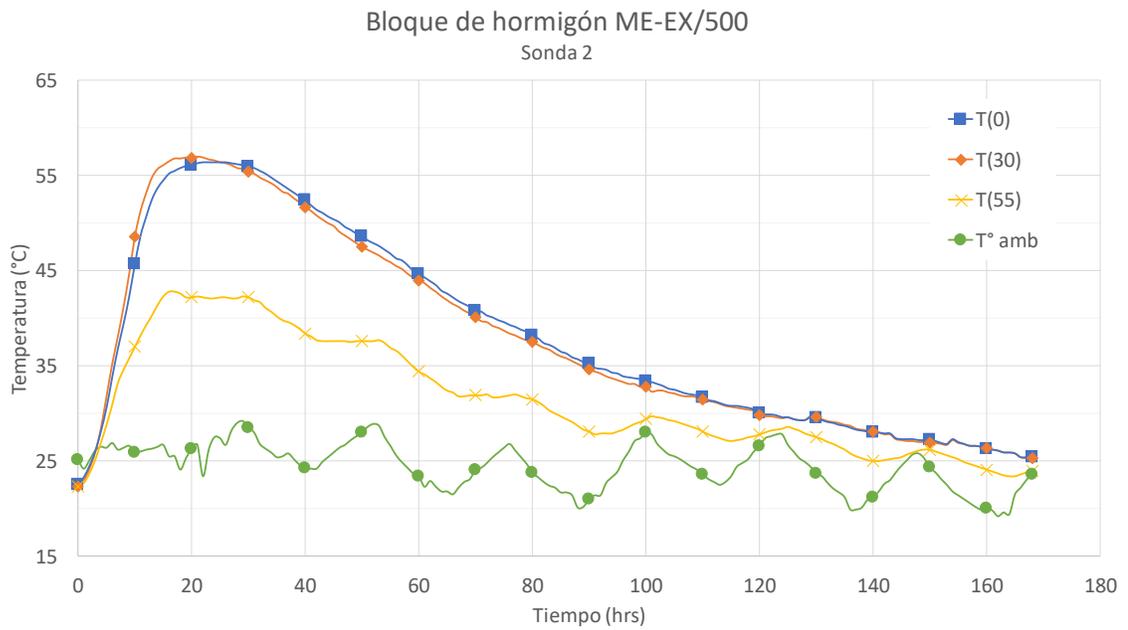


Figura A.4: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/500 durante 7 días

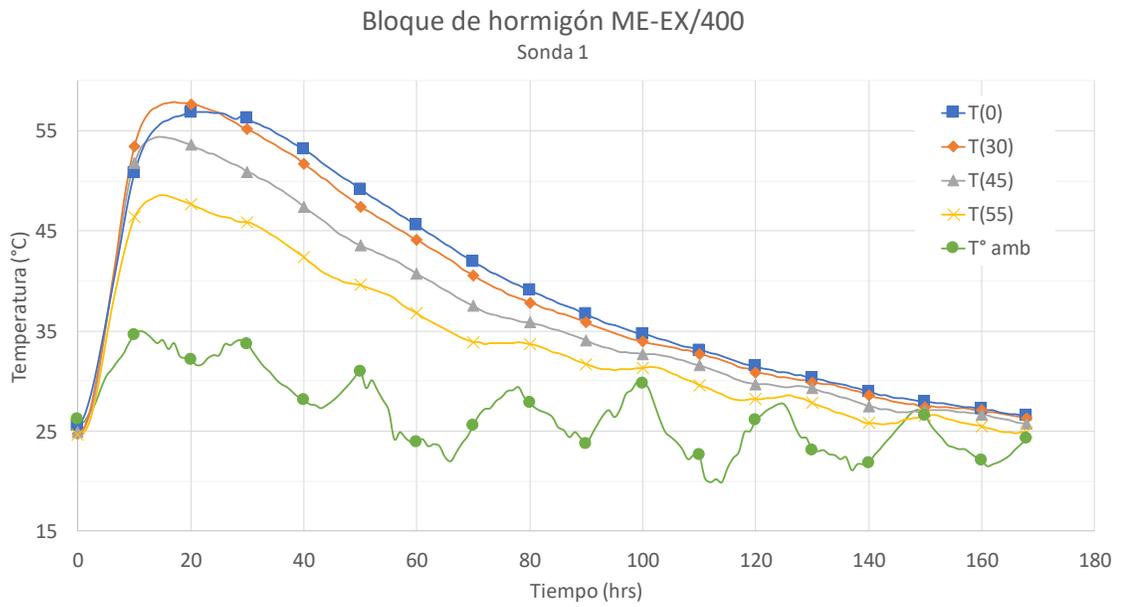


Figura A.5: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/400 durante 7 días

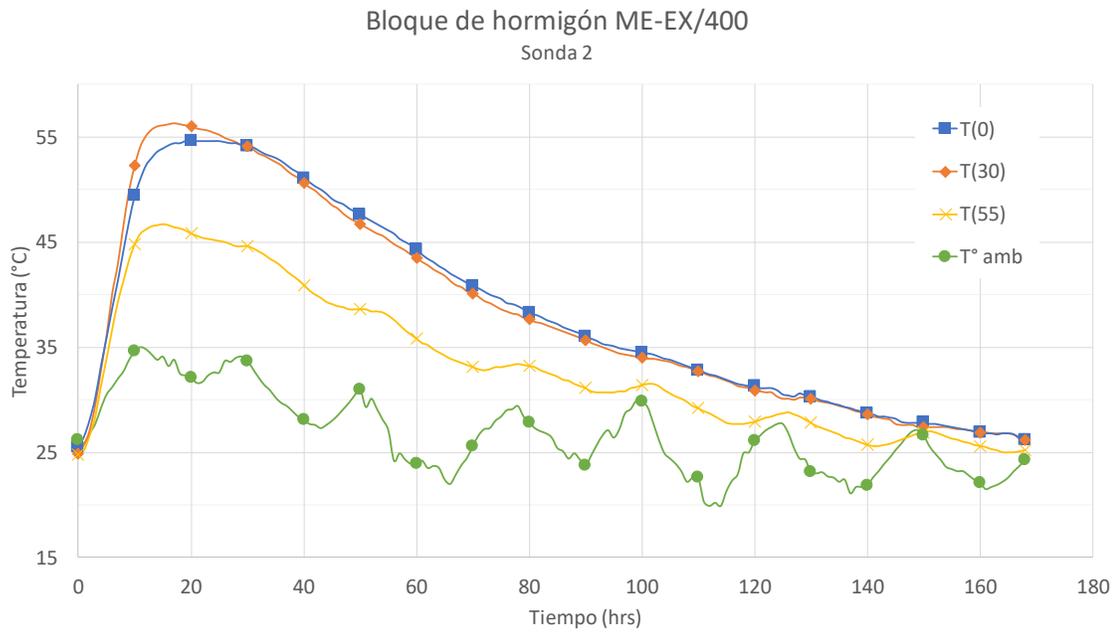


Figura A.6: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/400 durante 7 días

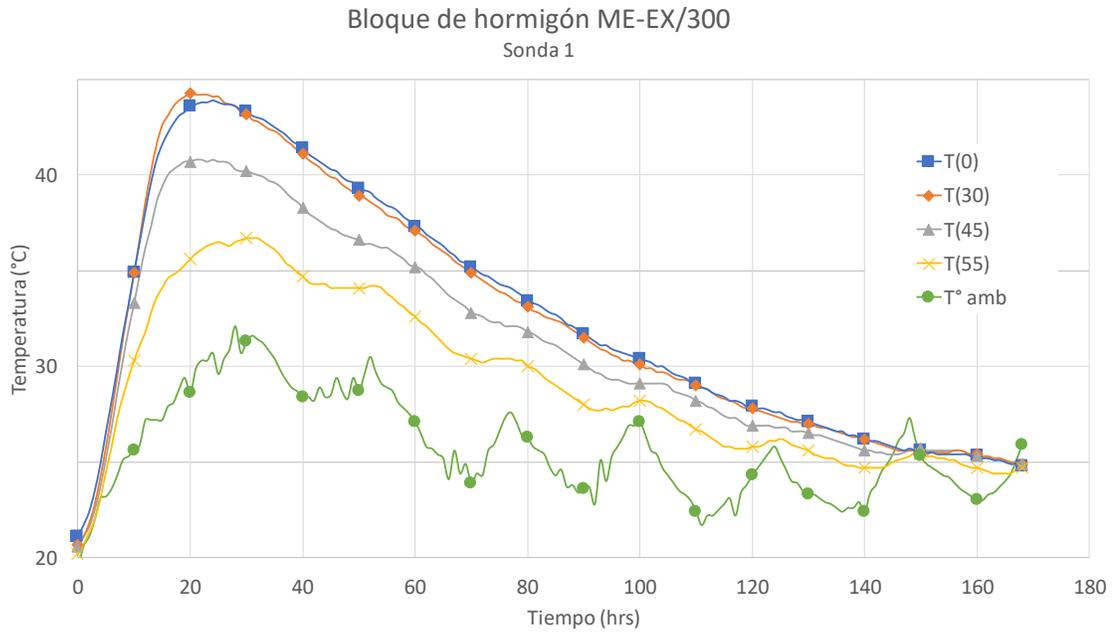


Figura A.7: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/300 durante 7 días

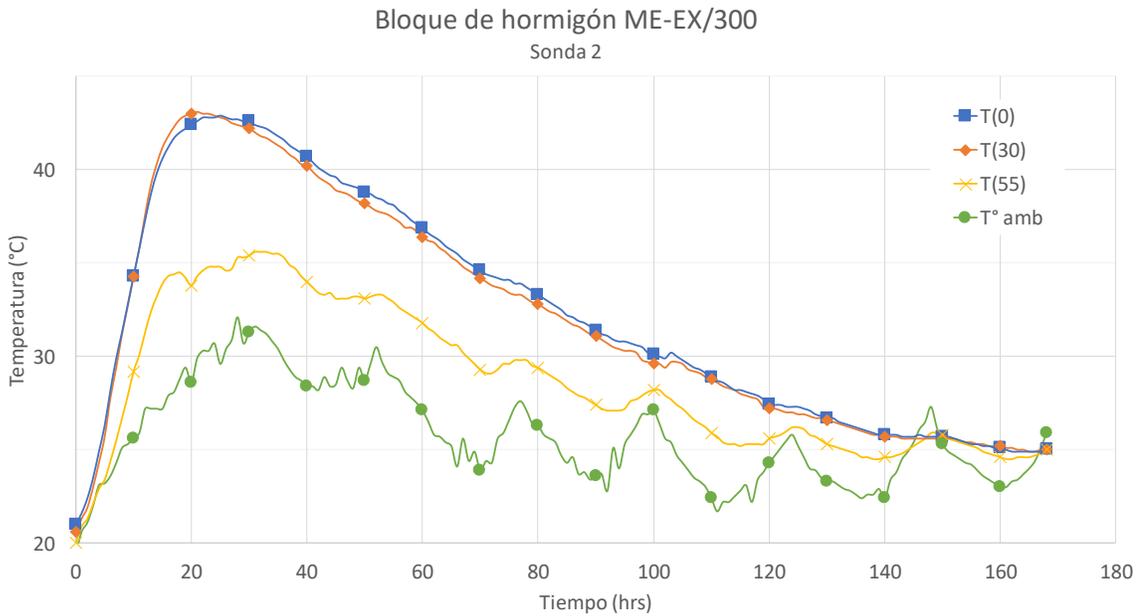


Figura A.8: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-EX/300 durante 7 días

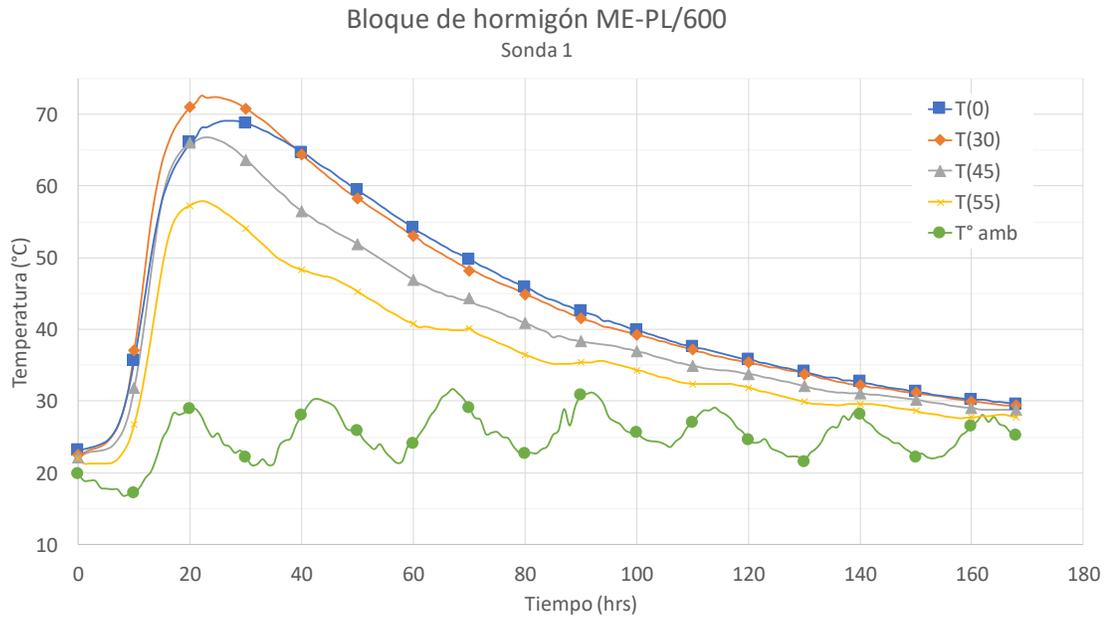


Figura A.9: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/600 durante 7 días

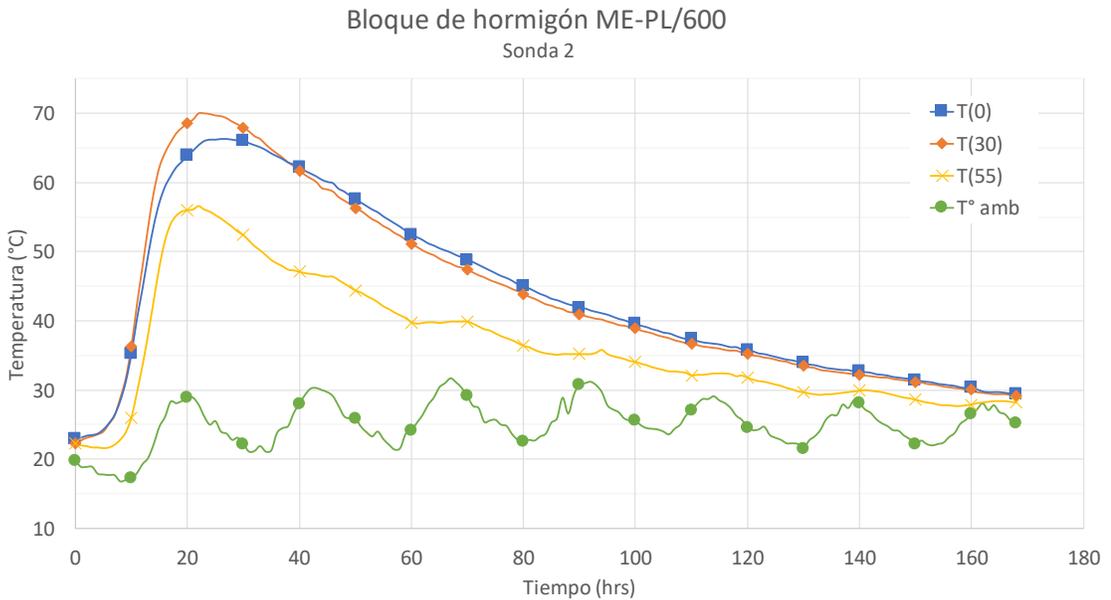


Figura A.10: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/600 durante 7 días

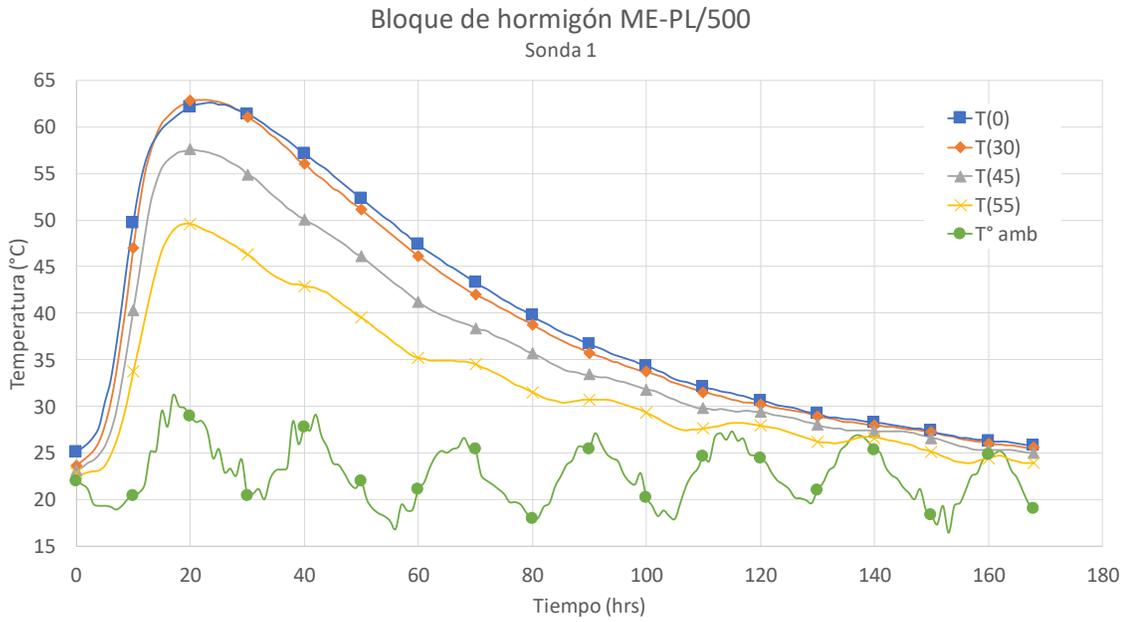


Figura A.11: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/500 durante 7 días

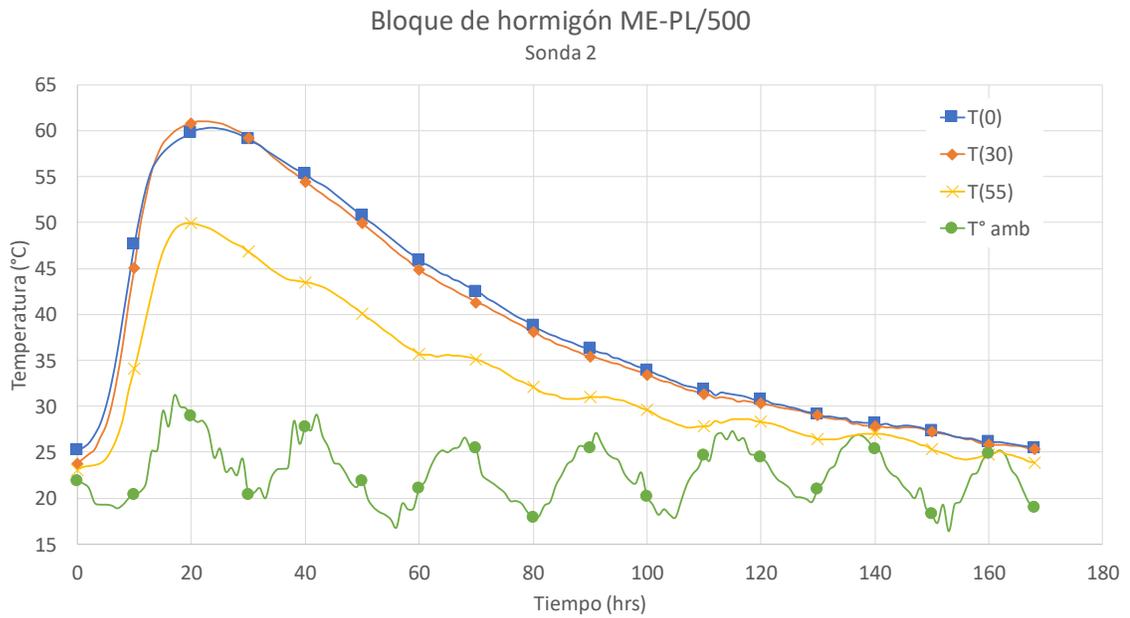


Figura A.12: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/500 durante 7 días

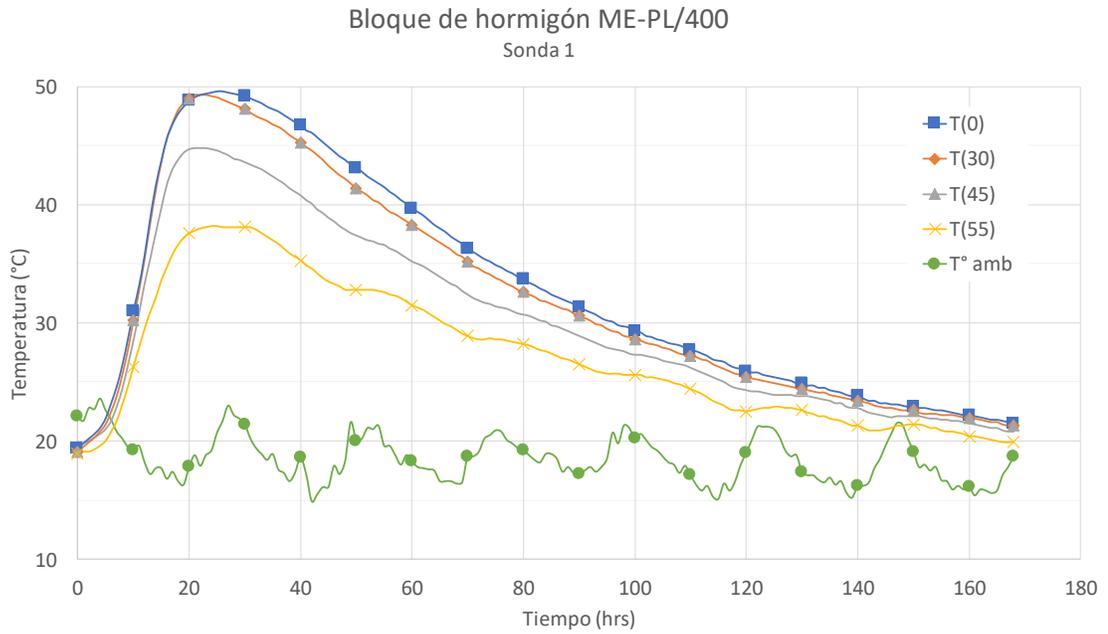


Figura A.13: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/400 durante 7 días

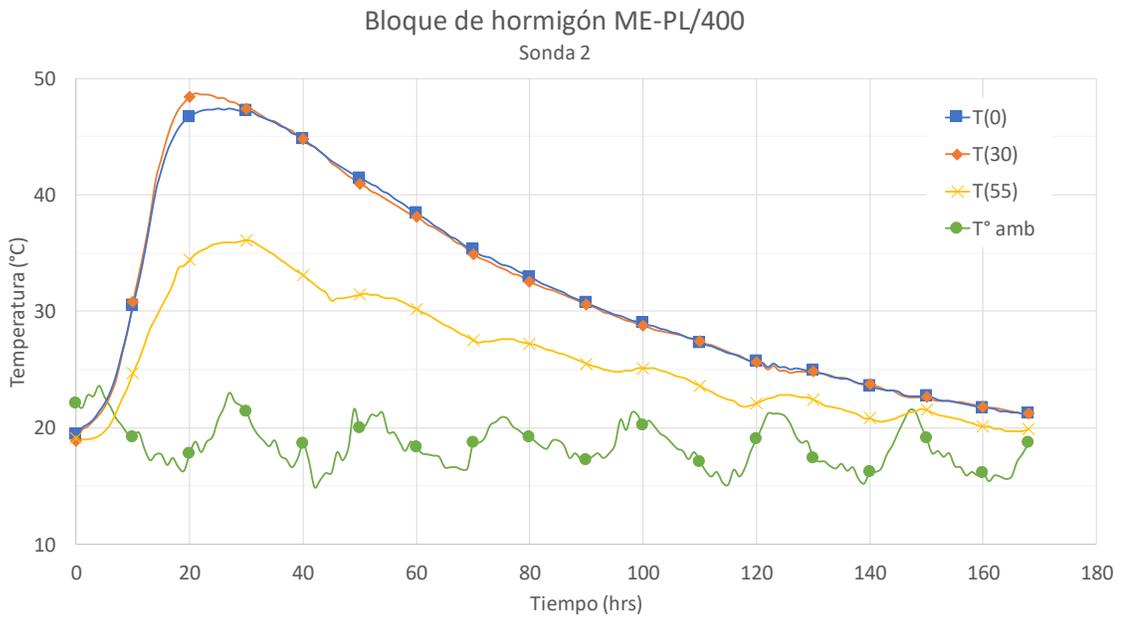


Figura A.14: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/400 durante 7 días

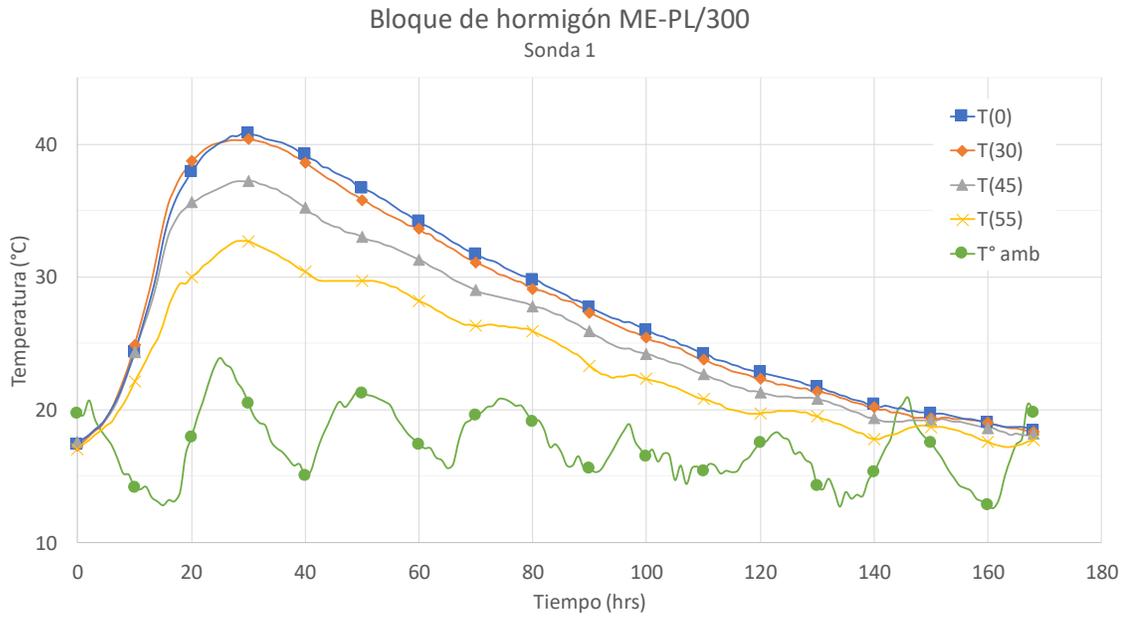


Figura A.15: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/300 durante 7 días

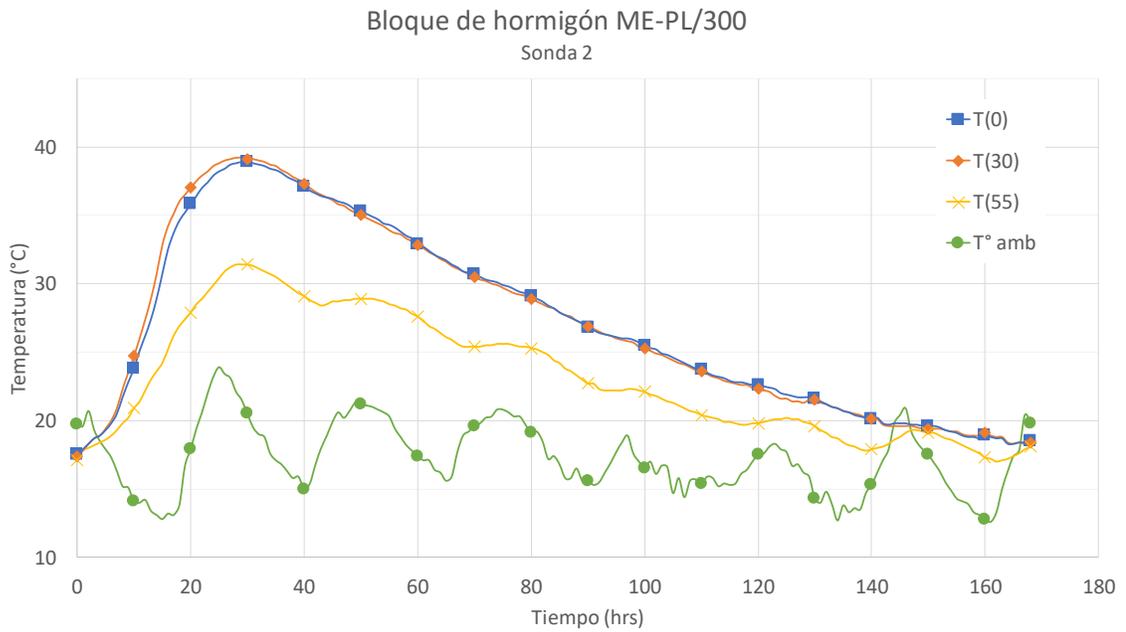


Figura A.16: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-PL/300 durante 7 días

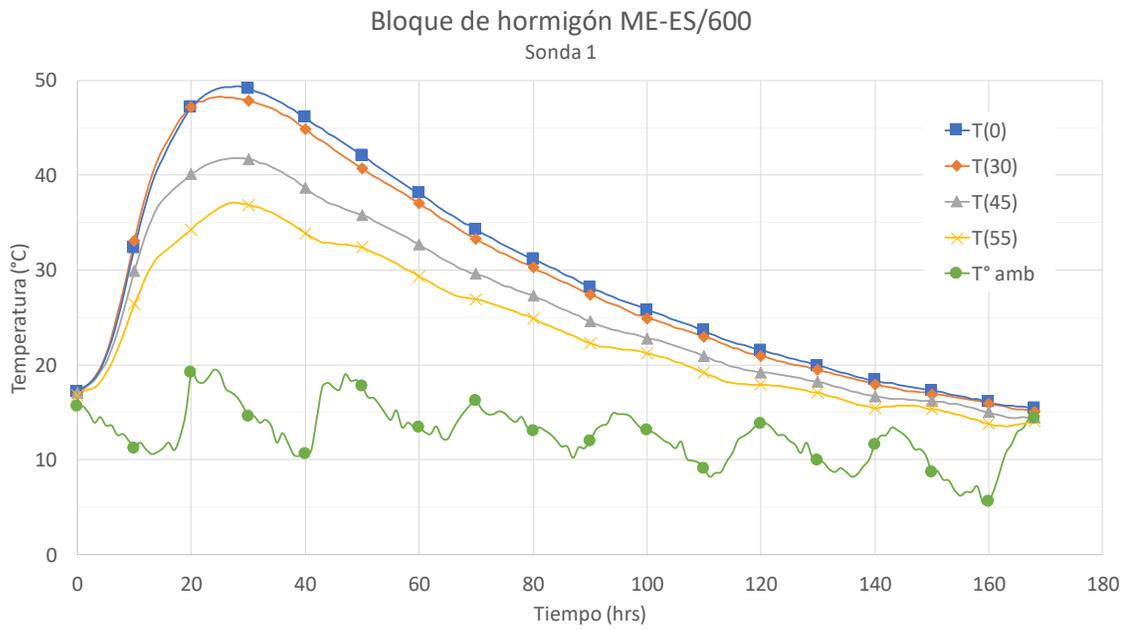


Figura A.17: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/600 durante 7 días

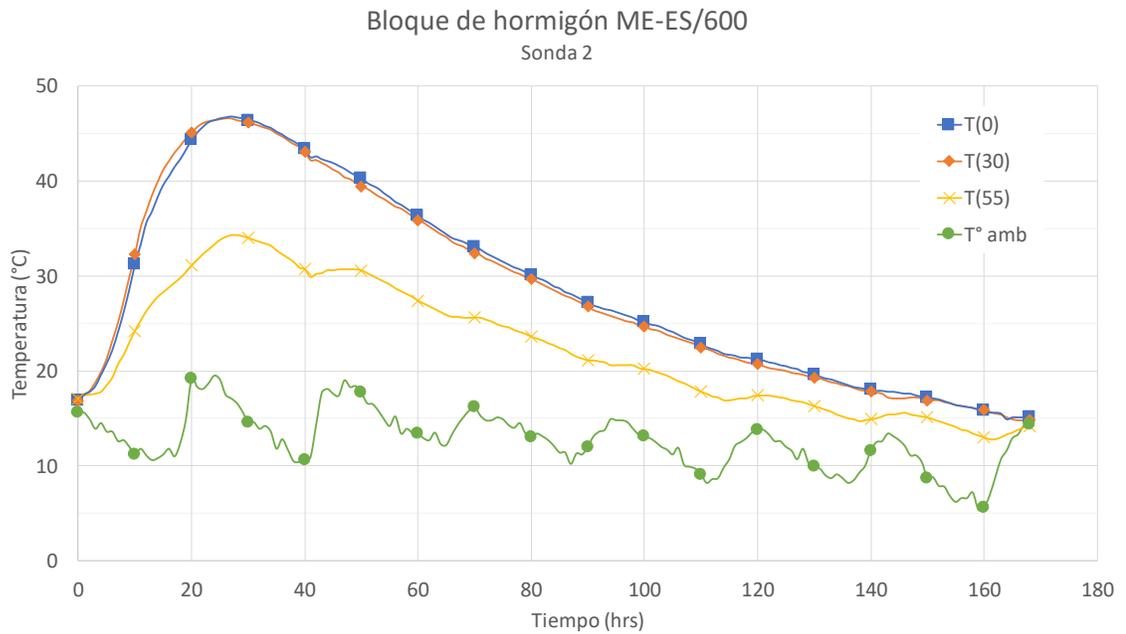


Figura A.18: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/600 durante 7 días

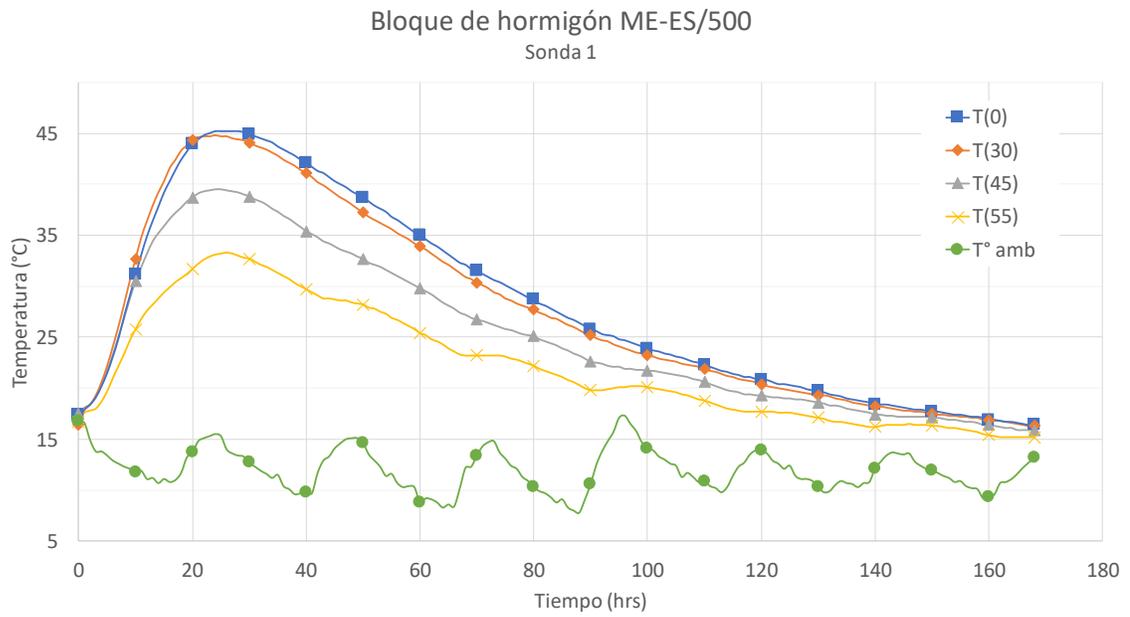


Figura A.19: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/500 durante 7 días

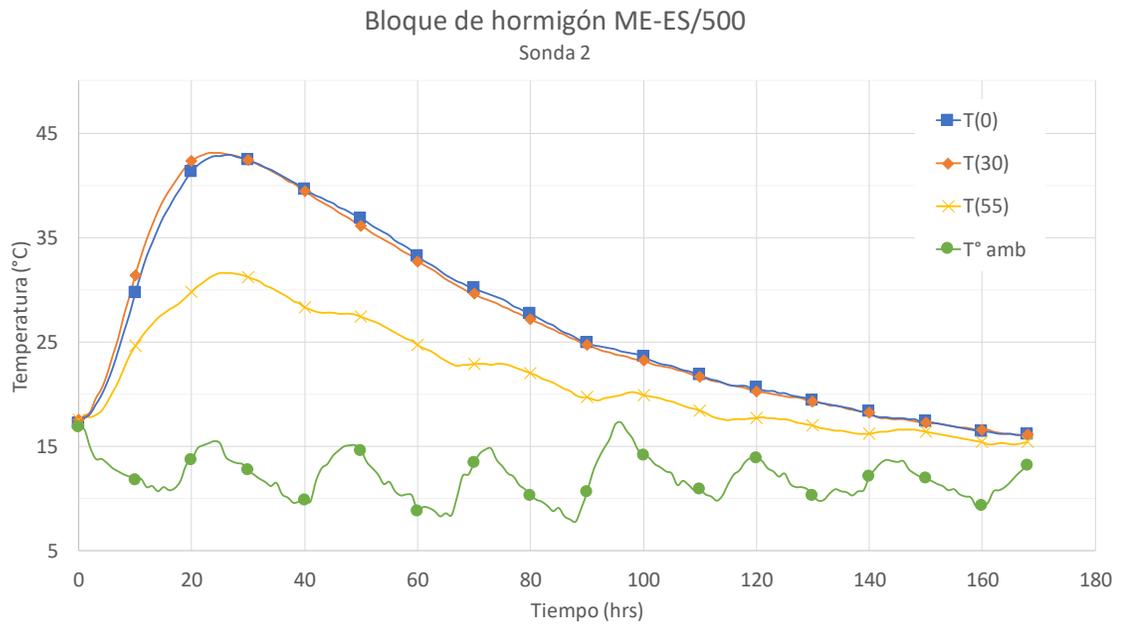


Figura A.20: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/500 durante 7 días

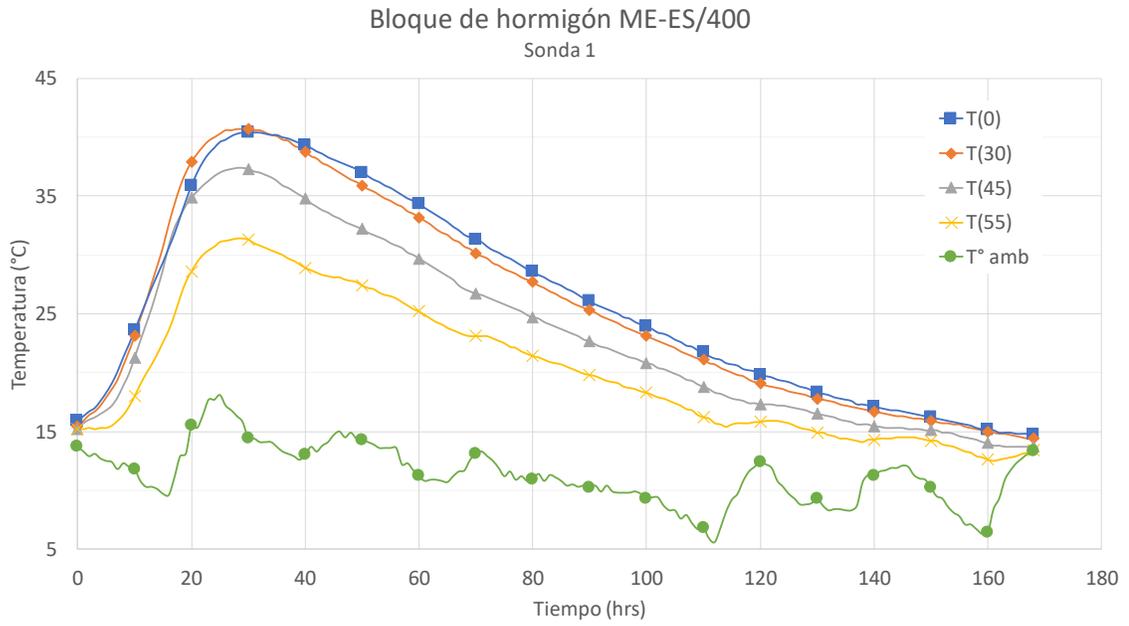


Figura A.21: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/400 durante 7 días

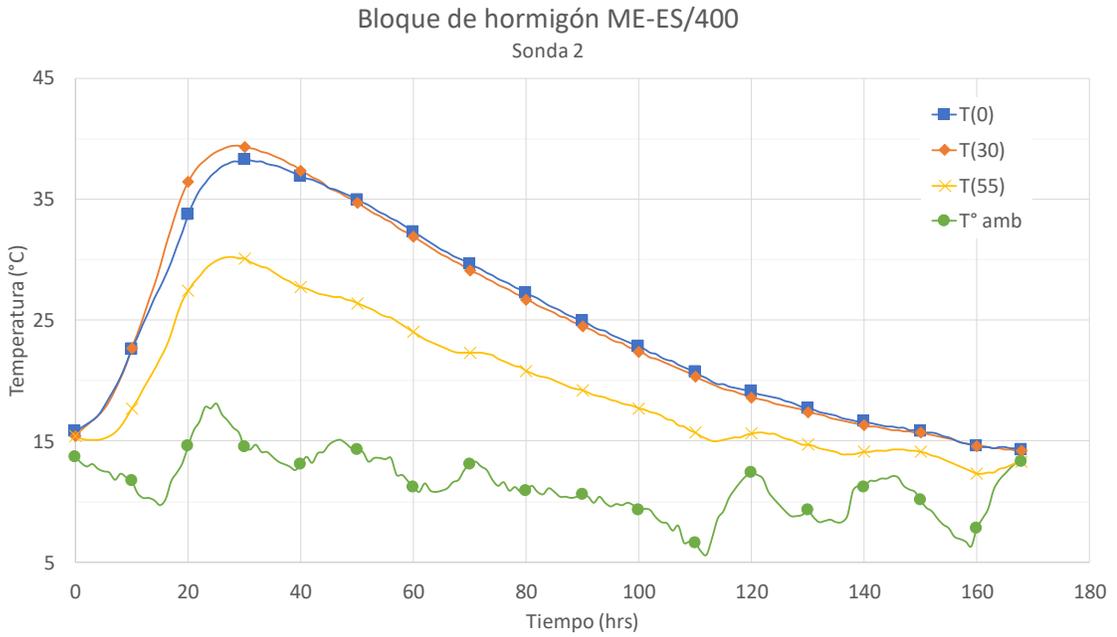


Figura A.22: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/400 durante 7 días

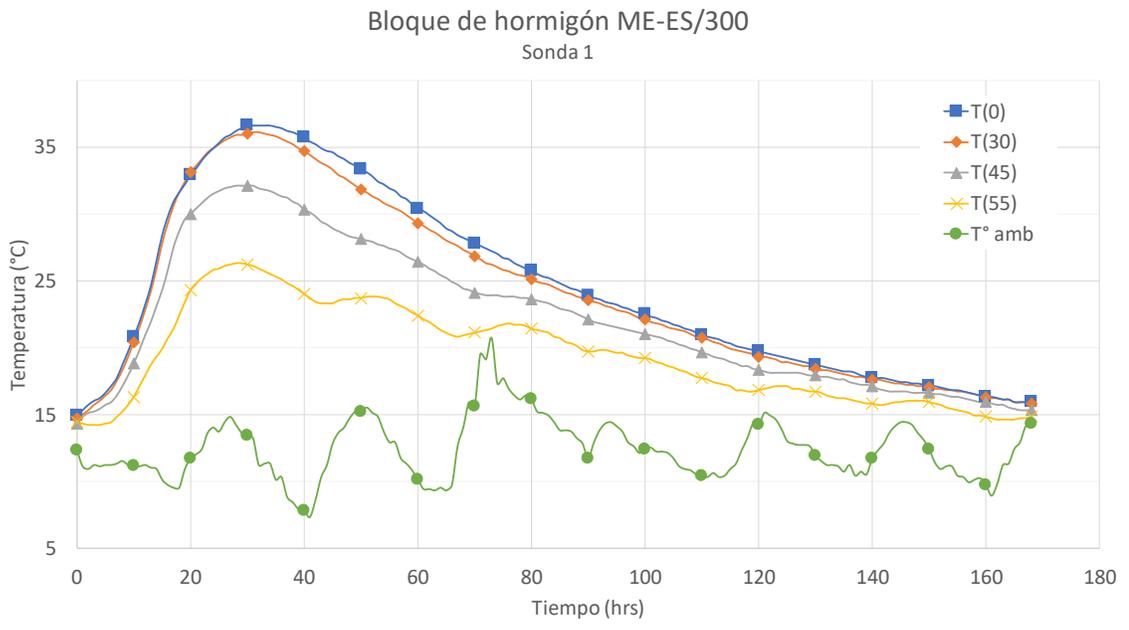


Figura A.23: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 1* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/300 durante 7 días

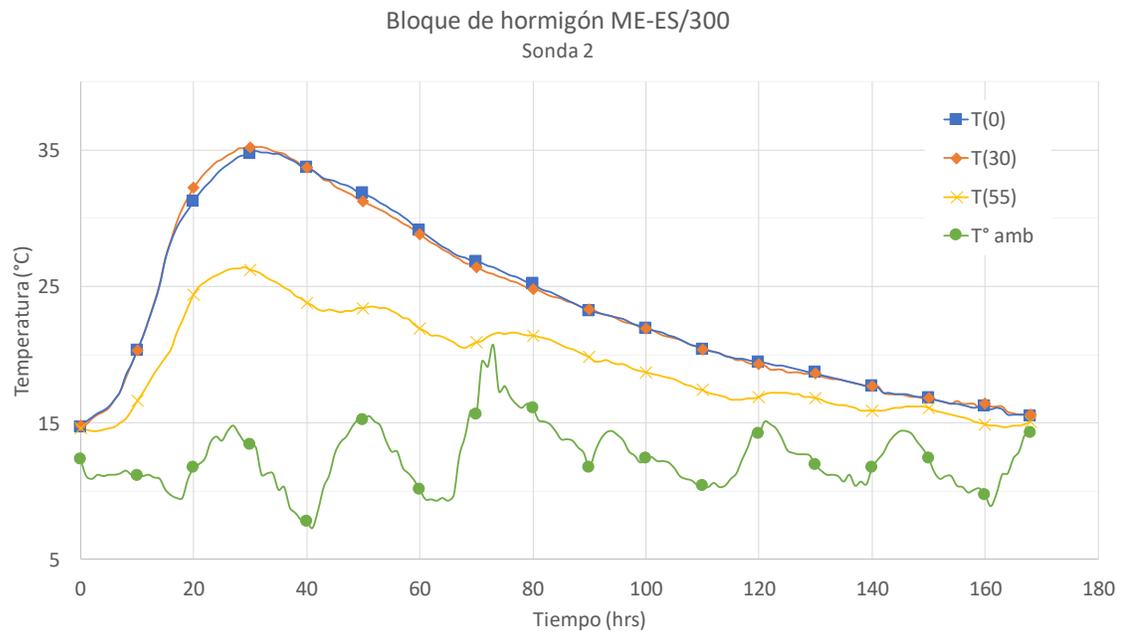


Figura A.24: registro de temperatura de termocuplas instaladas en *Sonda 2* del bloque experimental confeccionado con hormigón ME-ES/300 durante 7 días

ANEXO B Curvas resultantes de la evaluación del método de Schmidt de Schmidt

A continuación se presentan las curvas resultantes de la evaluación del método de Schmidt para los 12 casos de estudio.

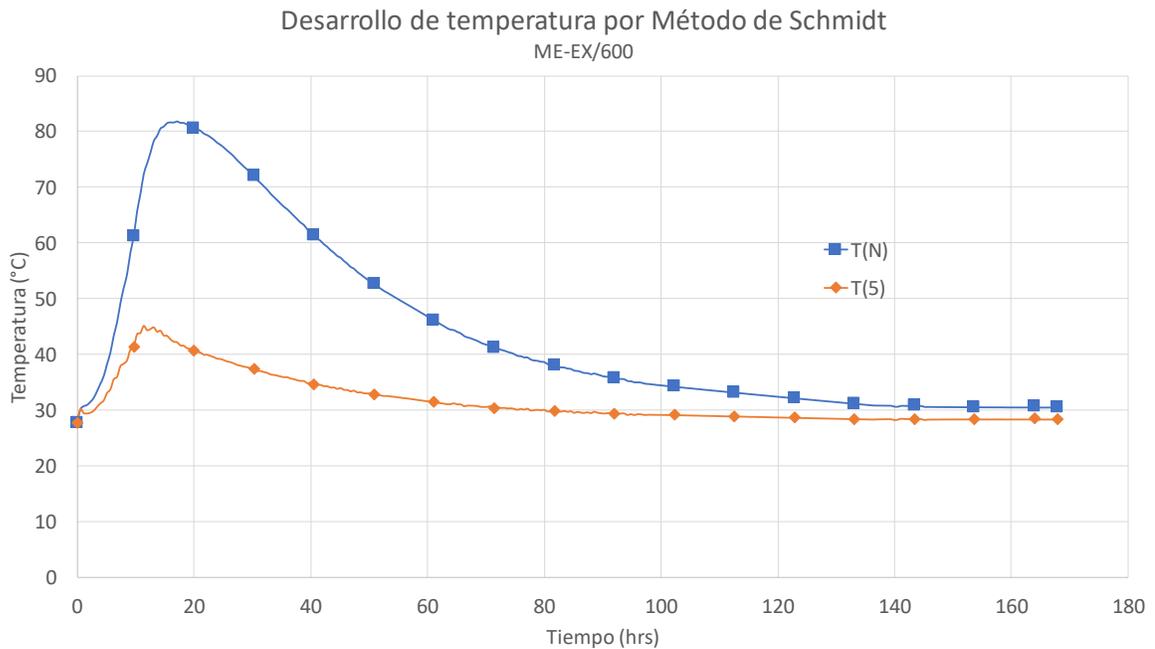


Figura B.1: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600

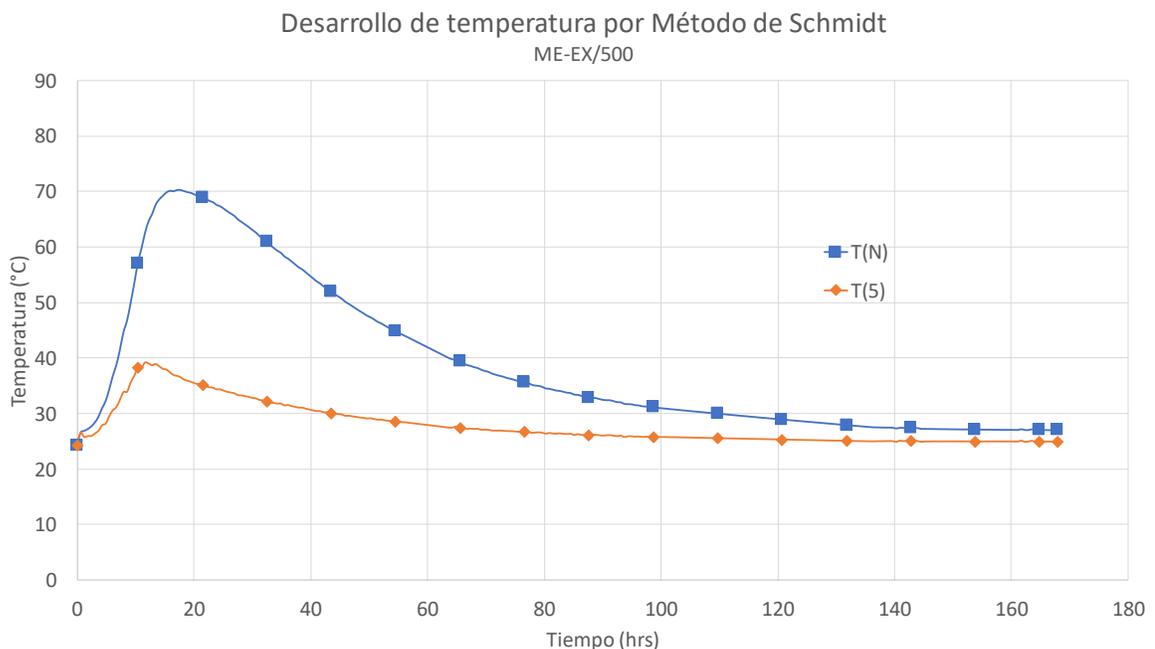


Figura B.2: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500

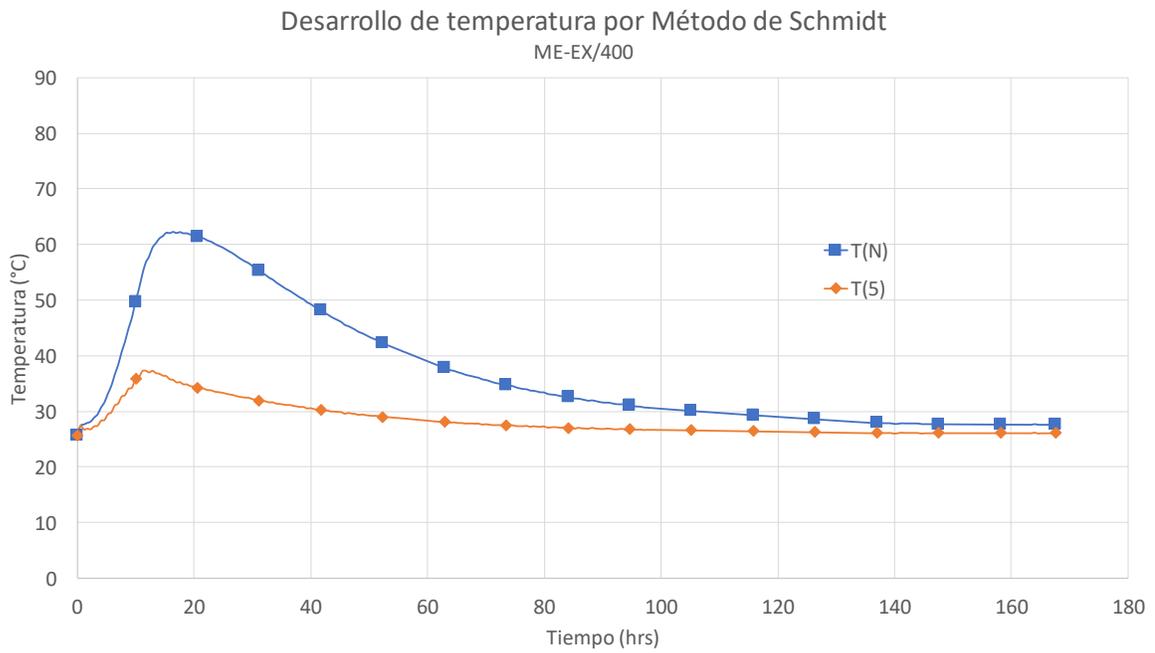


Figura B.3: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400

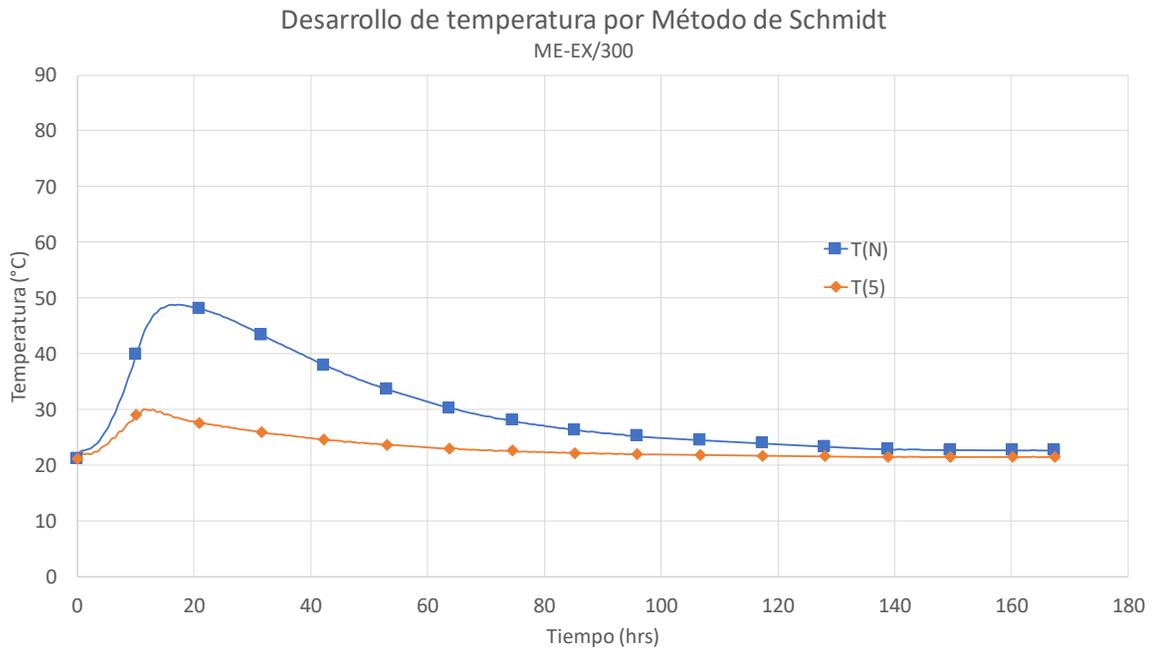


Figura B.4: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300

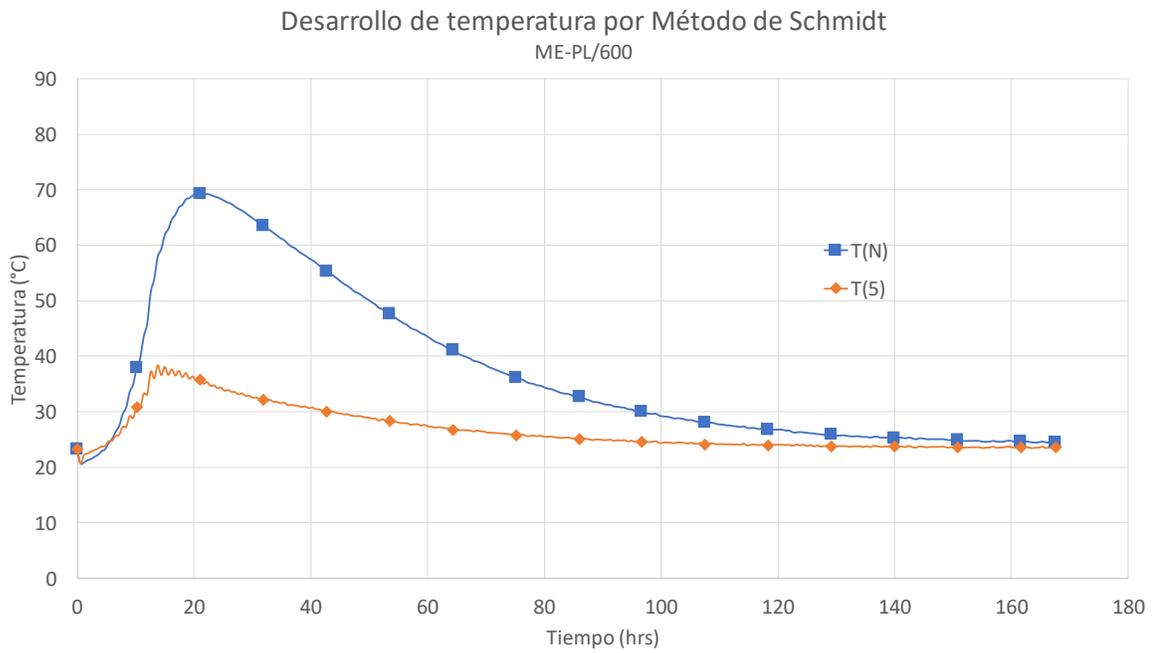


Figura B.5: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600

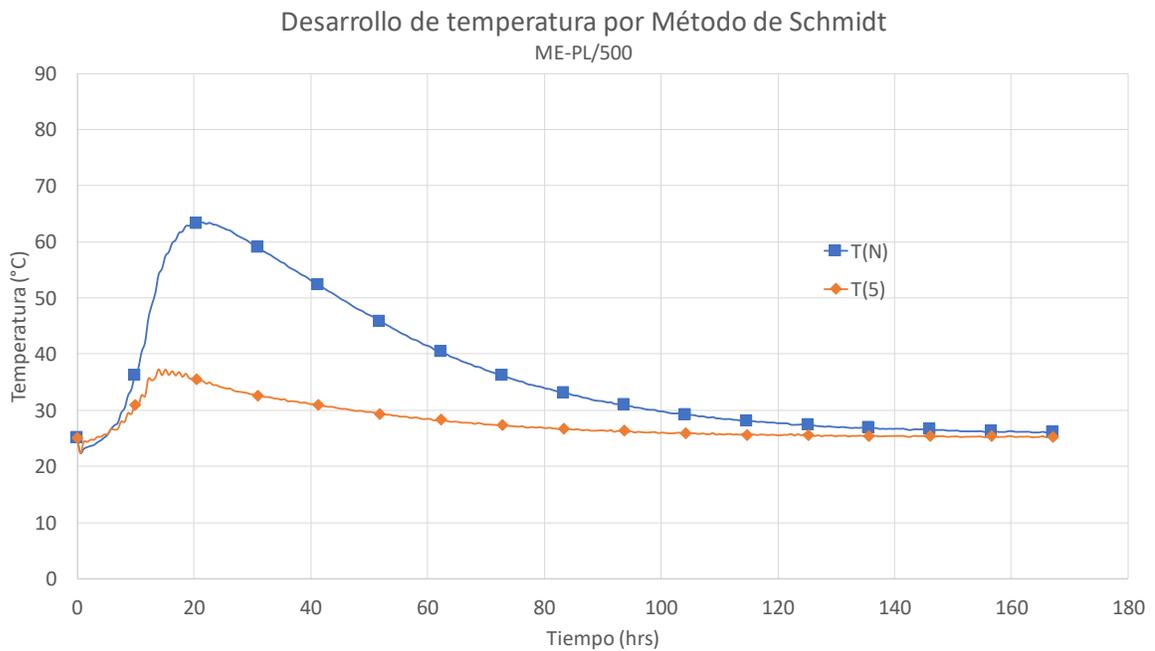


Figura B.6: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500

Desarrollo de temperatura por Método de Schmidt
ME-PL/400

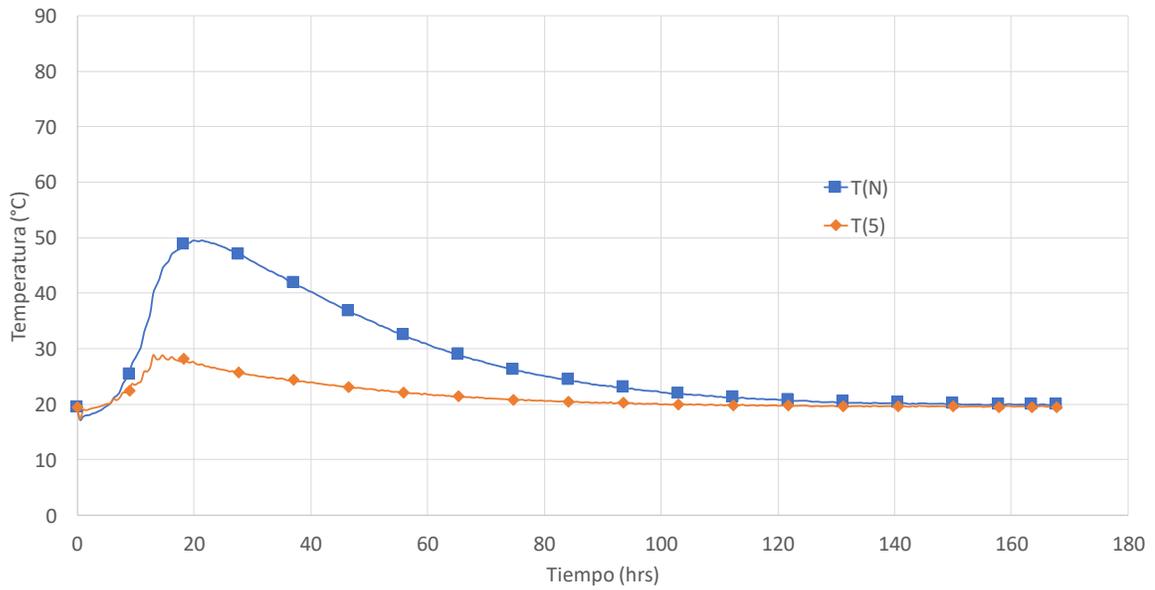


Figura B.7: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400

Desarrollo de temperatura por Método de Schmidt
ME-PL/300

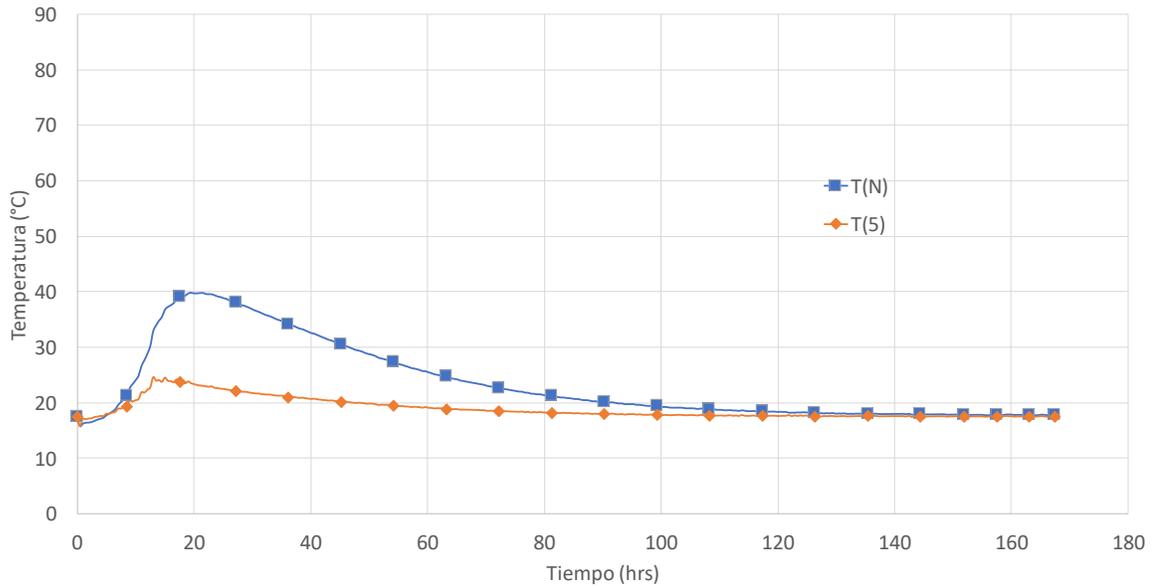


Figura B.8: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300

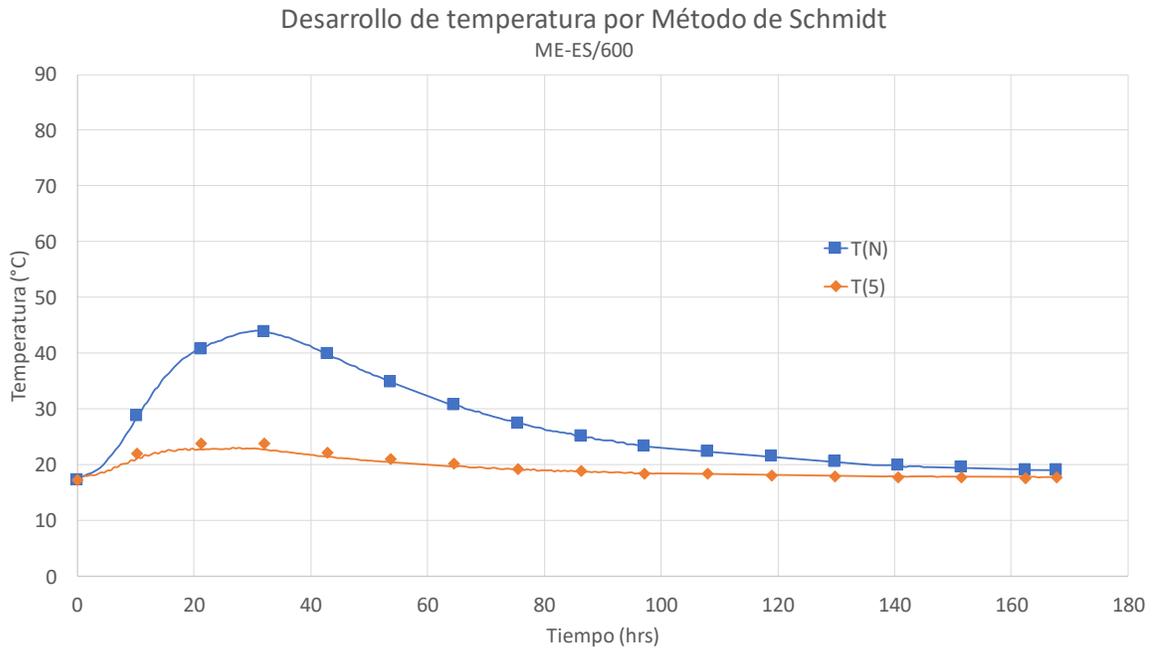


Figura B.9: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600

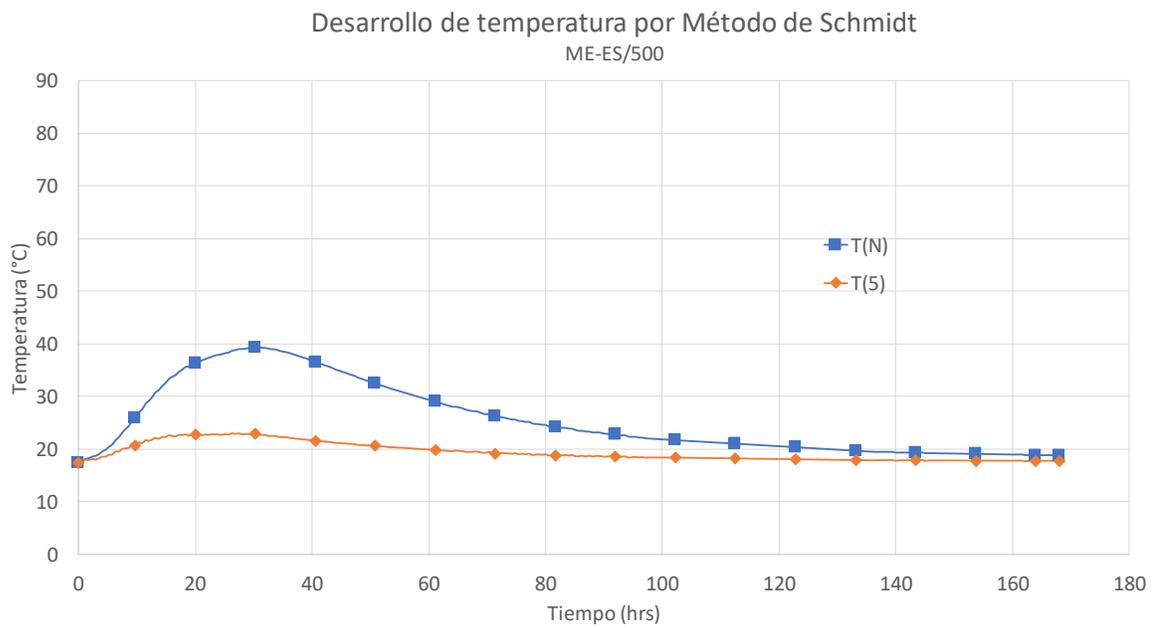


Figura B.10: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500

Desarrollo de temperatura por Método de Schmidt
ME-ES/400

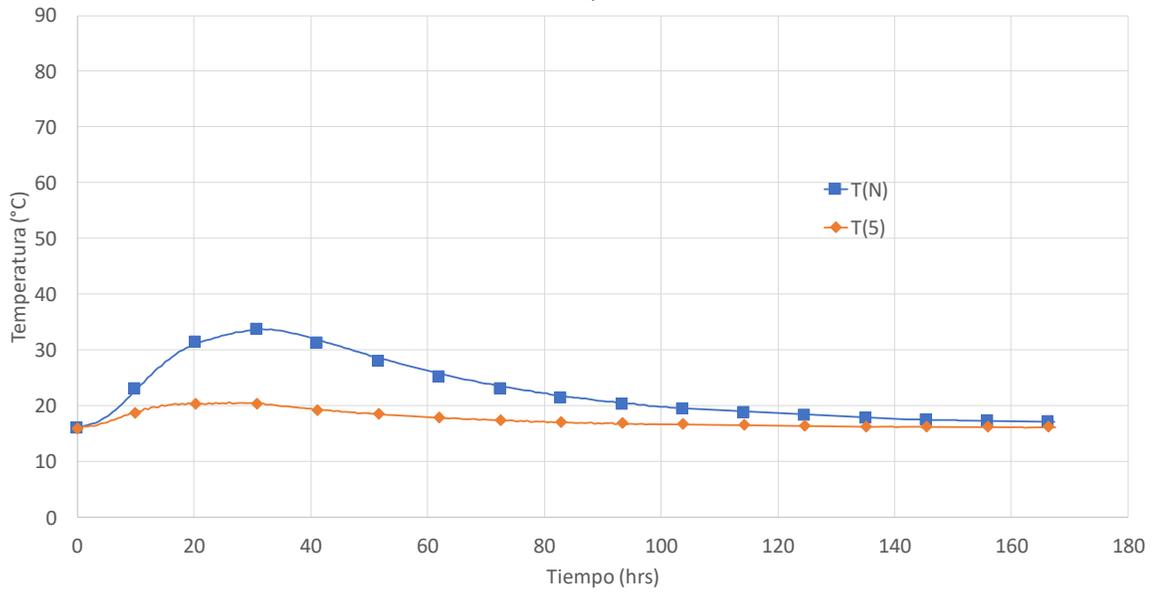


Figura B.11: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400

Desarrollo de temperatura por Método de Schmidt
ME-ES/300

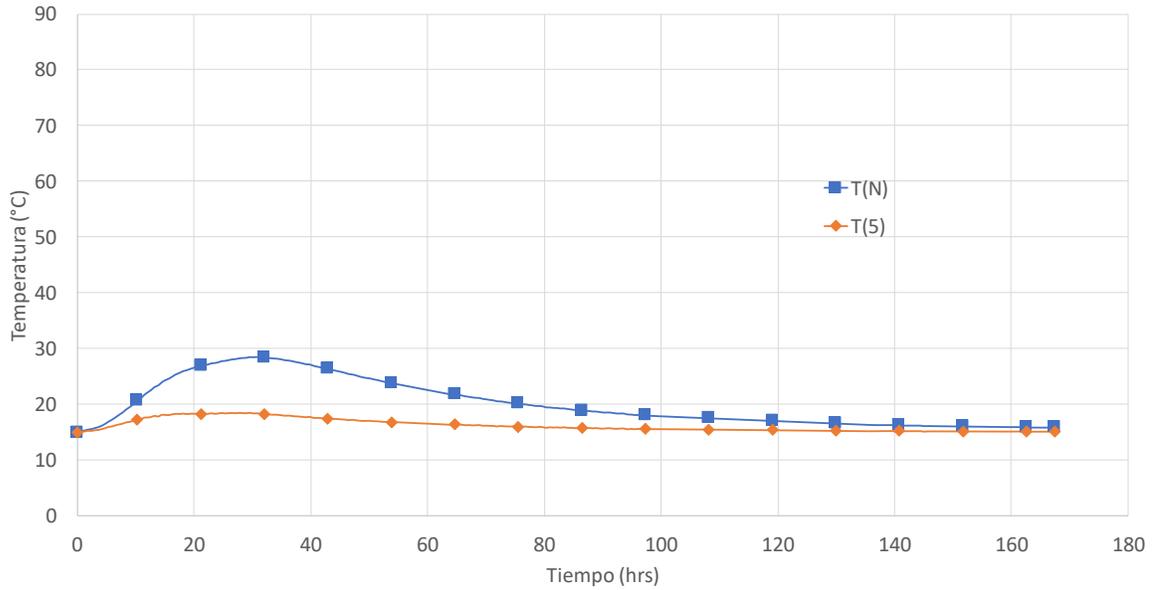


Figura B.12: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método de Schmidt para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300

ANEXO C Interfaz y curvas resultantes de la evaluación del método CTK

A continuación, se presentan imágenes de la interfaz del programa desarrollado para la evaluación del método CTK y sus curvas resultantes, para los 12 casos estudiados.

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN	
Cement Type	ME-EX
T Adiab	93,2 [°C]
t(T Adiab)	22,0 [h]
Qtot 7d	314 [kJ/kg]
Cement Content	600 [kg/m³]
w/c	0,340 [-]
Concrete Density	2.500 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES	SURFACE HEAT TRANSFER TO AIR
Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]
Concrete Specific Heat	1,013 [kJ/(kg·K)]
Concrete Conductivity	5,542 [kJ/(m·h·K)]
Concrete Difusivity	0,00219 [m²/h]
Given Value	yes
Calculated value f(wind)	Plastic Cover+50mm air
U1	20,00
U1	21,41 [kJ/(m²·h·K)]
Wind	1,0 [m/s] [1-10]
Demoulding time	168 [h] [0-->168]
Exposed Concrete Surface	20,00
U2	29,54 [kJ/(m²·h·K)]

PLACEMENT CONDITIONS	TEMPERATURE RESULTS
Fresh Concrete Temperature	27,7 [°C]
Pouring Time	12 [h]
Ambient Temperature	Constant
Mean T° - Constant T	27,4 [°C]
Daily ΔT	7 [°C]
t(Tmax)	15 [h]
T°max	83,6 [°C]
t(T°max)	22,0 [h]
T°sur	54,4 [°C]
t(T°sur)	22,0 [h]
TScms	63,2 [°C]
t(TScms)	22,0 [h]
diff T N-Sur	29,2 [°C]
diff T N-Scms	20,5 [°C]

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS	
Foundation - Slab	L/H
L = Length	0,60 [m]
W = Width	0,60 [m]
H = Height	0,60 [m]
L/H	1,00 [-]
Concrete Volumen	0,22 [m³]
Exposed Surface	0,36 [m²]
Exposed Perimeter	2,40 [m²]

Figura C.1: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600 en el programa desarrollado para el método CTK

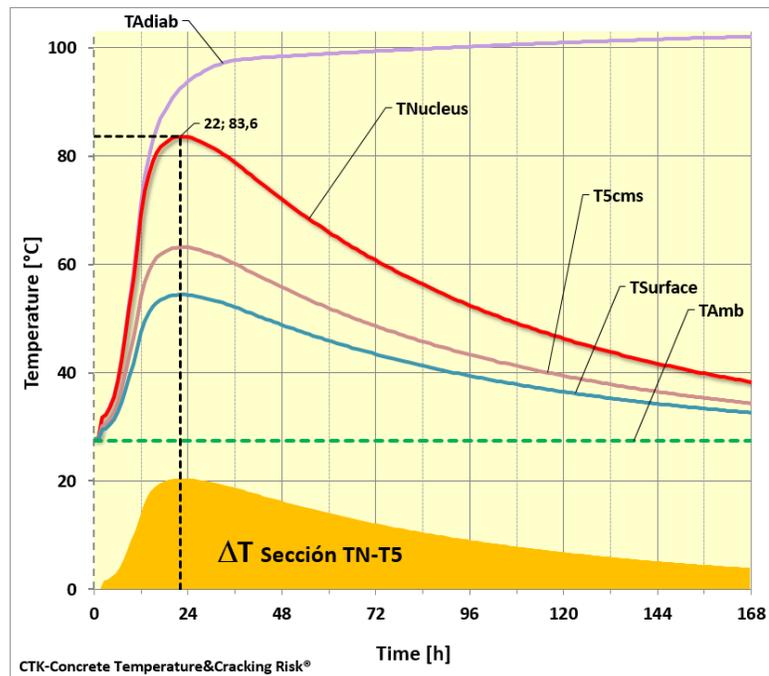


Figura C.2: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-EX/600 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-EX	Qtot 7d	314 [kJ/kg]
T Adiab	78,9 [°C]	Cement Content	500 [kg/m³]
t(T Adiab)	22,0 [h]	w/c	0,409 [-]
		Concrete Density	2.461 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]	Given Value	yes	or	Calculated value f(wind)
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	U1	20,00		Plastic Cover+50mm air
Concrete Specific Heat	1,029 [kJ/(kg°K)]	Wind	1,0 [m/s] [1-10]		
Concrete Conductivity	5,166 [kJ/(mh°K)]	Demoulding time	168 [h] [0-->168]		
Concrete Difusivity	0,00204 [m²/h]	U2	20,00		Exposed Concrete Surface
					29,54 [kJ/(m²h°K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	24,3 [°C]	T*max	70,8 [°C]	T5cms	53,2 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T*max)	22,0 [h]	t(T5cms)	22,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T*sur	45,6 [°C]	dif T N-Sur	25,3 [°C]
Mean T* - Constant T*	23,8 [°C]	t(T*sur)	22,0 [h]	dif T N-5cms	17,7 [°C]
Daily ΔT*	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.3: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500 en el programa desarrollado para el método CTK

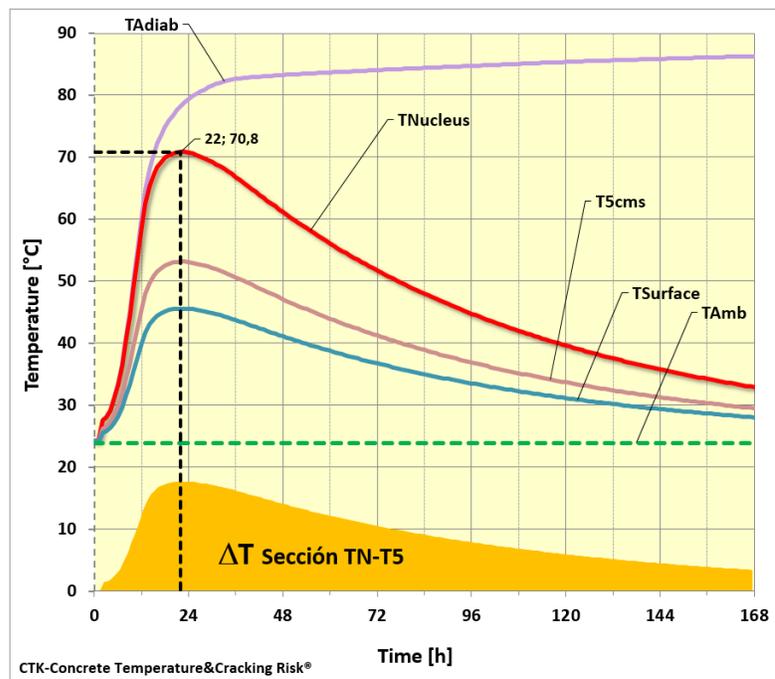


Figura C.4: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-EX/500 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-EX	Qtot 7d	314 [kJ/kg]
T Adiab	69,3 [°C]	Cement Content	400 [kg/m³]
t(T Adiab)	22,0 [h]	w/c	0,511 [-]
		Concrete Density	2,476 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]	Given Value	yes	or	Calculated value f(wind)
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	U1	20,00		Plastic Cover+50mm air
Concrete Specific Heat	1,023 [kJ/(kg°K)]	Wind	1,0 [m/s] [1-10]		21,41 [kJ/(m²h°K)]
Concrete Conductivity	5,385 [kJ/(mh°K)]	Demoulding time	168 [h] [0-->168]		
Concrete Difusivity	0,00213 [m²/h]	U2	20,00		Exposed Concrete Surface
					29,54 [kJ/(m²h°K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	25,6 [°C]	T*max	62,9 [°C]	T5cms	49,2 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T*max)	22,0 [h]	t(T5cms)	22,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T*sur	43,3 [°C]	dif T N-Sur	19,7 [°C]
Mean T* - Constant T*	25,6 [°C]	t(T*sur)	22,0 [h]	dif T N-5cms	13,8 [°C]
Daily ΔT*	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.5: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400 en el programa desarrollado para el método CTK

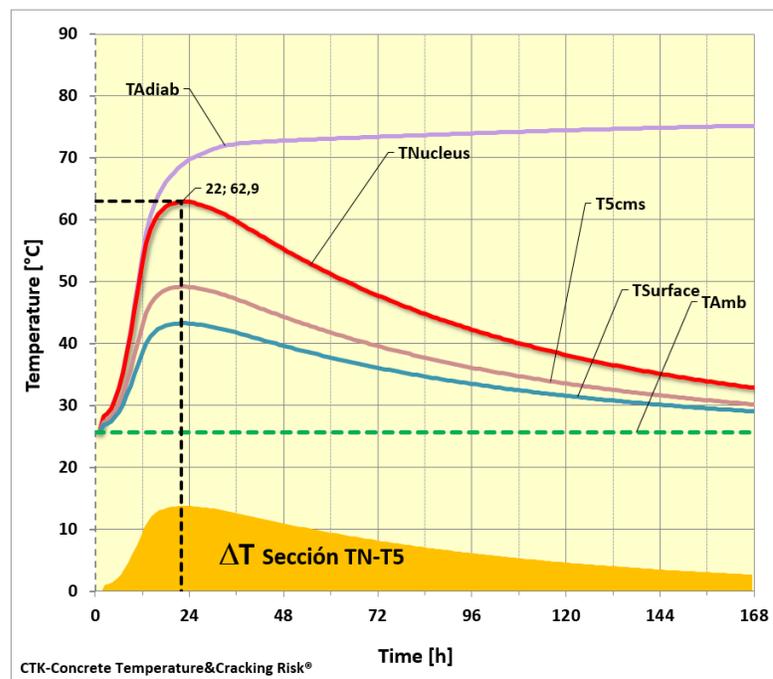


Figura C.6: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-EX/400 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-EX	Qtot 7d	314 [kJ/kg]
T Adiab	54,4 [°C]	Cement Content	300 [kg/m³]
t(T Adiab)	24,0 [h]	w/c	0,681 [-]
		Concrete Density	2.504 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]	Given Value	yes	or	Calculated value f(wind)
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	U1	20,00		Plastic Cover+50mm air
Concrete Specific Heat	1,012 [kJ/(kg°K)]	Wind	1,0 [m/s] [1-10]		21,41 [kJ/(m²h°K)]
Concrete Conductivity	5,313 [kJ/(mh°K)]	Demoulding time	168 [h] [0->168]		
Concrete Difusivity	0,00210 [m²/h]	U2	20,00		Exposed Concrete Surface
					29,54 [kJ/(m²h°K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	21,1 [°C]	T*max	50,2 [°C]	T5cms	40,9 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T*max)	24,0 [h]	t(T5cms)	24,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T*sur	37,0 [°C]	dif T N-Sur	13,2 [°C]
Mean T* - Constant T*	25,3 [°C]	t(T*sur)	24,0 [h]	dif T N-5cms	9,3 [°C]
Daily ΔT*	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.7: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300 en el programa desarrollado para el método CTK

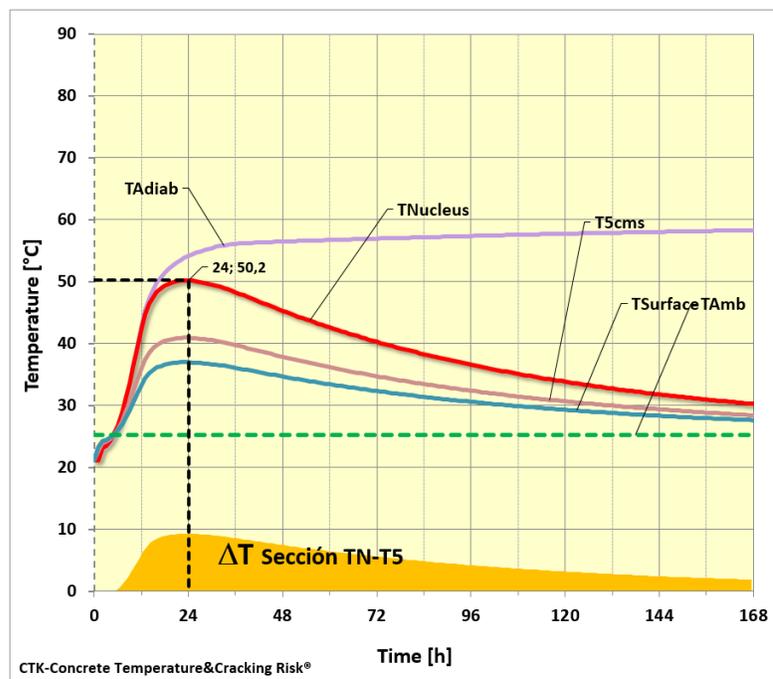


Figura C.8: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-EX/300 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-PL	Q _{tot} 7d	277 [kJ/kg]
T _{Adiab}	83,3 [°C]	Cement Content	600 [kg/m³]
t(T _{Adiab})	25,0 [h]	w/c	0,340 [-]
		Concrete Density	2,478 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy E _a	33,500 [kJ/mol]	Given Value	or	Calculated value f(wind)		
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	yes		Plastic Cover+50mm air		
Concrete Specific Heat	1,018 [kJ/(kg·K)]	20,00		U1	21,41 [kJ/(m²·h·K)]	
Concrete Conductivity	5,246 [kJ/(mh·K)]			Wind	1,0 [m/s] [1-10]	
Concrete Difusivity	0,00208 [m²/h]			Demoulding time	168 [h] [0--> 168]	
		20,00		Exposed Concrete Surface	U2	25,54 [kJ/(m²·h·K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	23,2 [°C]	T [*] max	74,8 [°C]	T _{5cms}	56,2 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T [*] max)	25,0 [h]	t(T _{5cms})	25,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T [*] sur	48,2 [°C]	dif T N-Sur	26,6 [°C]
Mean T [*] - Constant T [*]	24,9 [°C]	t(T [*] sur)	25,0 [h]	dif T N-5cms	18,6 [°C]
Daily ΔT [*]	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.9: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600 en el programa desarrollado para el método CTK

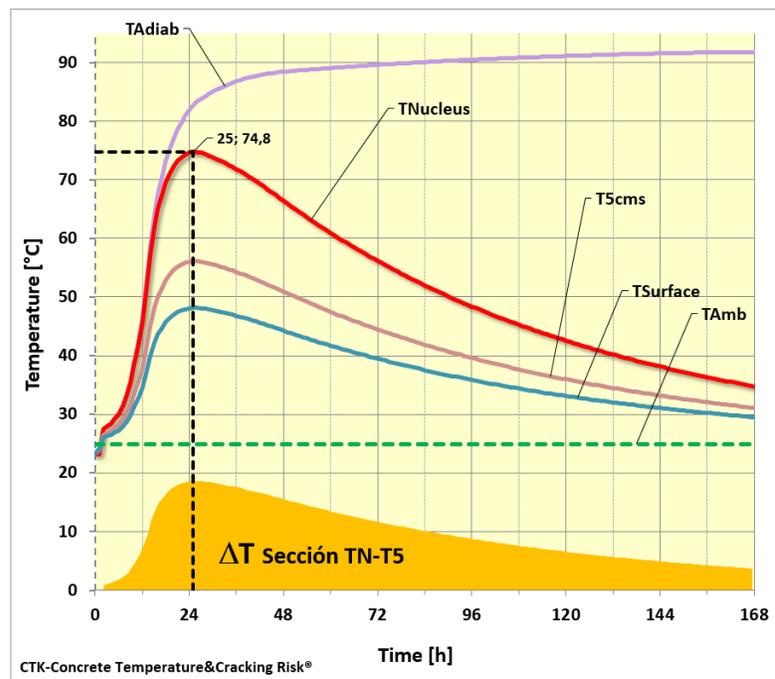


Figura C.10: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-PL/600 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-PL	Qtot 7d	277 [kJ/kg]
T Adiab	75,2 [°C]	Cement Content	500 [kg/m³]
t(T Adiab)	25,0 [h]	w/c	0,409 [-]
		Concrete Density	2.484 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]	Given Value	or	Calculated value f(wind)		
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	yes		Plastic Cover+50mm air		
Concrete Specific Heat	1,016 [kJ/(kg°K)]	20,00		U1	21,41 [kJ/(m²h°K)]	
Concrete Conductivity	5,418 [kJ/(mh°K)]			Wind	1,0 [m/s] [1-10]	
Concrete Difusivity	0,00215 [m²/h]			Demoulding time	168 [h] [0-->168]	
		20,00		Exposed Concrete Surface	U2	25,54 [kJ/(m²h°K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	25,1 [°C]	T*max	66,8 [°C]	T5cms	50,3 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T*max)	25,0 [h]	t(T5cms)	25,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T*sur	43,2 [°C]	dif T N-Sur	23,6 [°C]
Mean T* - Constant T*	22,0 [°C]	t(T*sur)	25,0 [h]	dif T N-5cms	16,5 [°C]
Daily ΔT*	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.11: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500 en el programa desarrollado para el método CTK

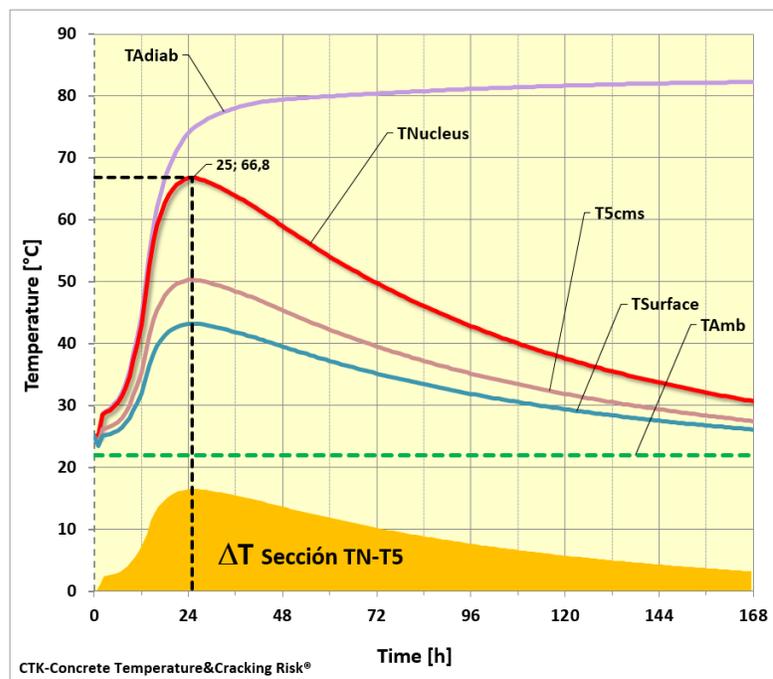


Figura C.12: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-PL/500 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-PL	Qtot 7d	277 [kJ/kg]
T Adiab	59,4 [°C]	Cement Content	400 [kg/m³]
t(T Adiab)	25,0 [h]	w/c	0,511 [-]
		Concrete Density	2,449 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]	Given Value	or	Calculated value f(wind)		
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	yes		Plastic Cover+50mm air		
Concrete Specific Heat	1,031 [kJ/(kg°K)]	20,00		U1	21,41 [kJ/(m²h°K)]	
Concrete Conductivity	6,041 [kJ/(mh°K)]			Wind	1,0 [m/s] [1-10]	
Concrete Difusivity	0,00239 [m²/h]			Demoulding time	168 [h] [0-->168]	
		20,00		Exposed Concrete Surface	U2	25,54 [kJ/(m²h°K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	19,4 [°C]	T*max	53,1 [°C]	T5cms	40,9 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T*max)	25,0 [h]	t(T5cms)	25,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T*sur	35,7 [°C]	dif T N-Sur	17,4 [°C]
Mean T* - Constant T*	18,2 [°C]	t(T*sur)	25,0 [h]	dif T N-5cms	12,2 [°C]
Daily ΔT*	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.13: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400 en el programa desarrollado para el método CTK

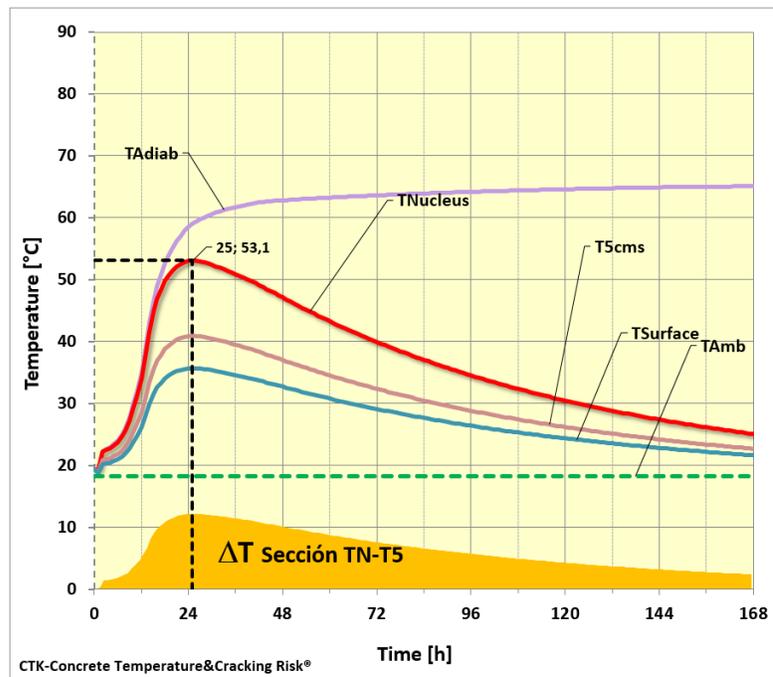


Figura C.14: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-PL/400 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-PL	Q _{tot} 7d	277 [kJ/kg]
T _{Adiab}	47,4 [°C]	Cement Content	300 [kg/m ³]
t(T _{Adiab})	25,0 [h]	w/c	0,681 [-]
		Concrete Density	2,497 [kg/m ³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy E _a	33,500 [kJ/mol]	Given Value	or	Calculated value f(wind)		
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	yes		Plastic Cover+50mm air		
Concrete Specific Heat	1,012 [kJ/(kg°K)]	20,00		U1	21,41 [kJ/(m ² h°K)]	
Concrete Conductivity	6,298 [kJ/(mh°K)]			Wind	1,0 [m/s] [1-10]	
Concrete Difusivity	0,00249 [m ² /h]			Demoulding time	168 [h] [0-->168]	
		20,00		Exposed Concrete Surface	U2	25,54 [kJ/(m ² h°K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	17,4 [°C]	T [*] max	42,7 [°C]	T _{5cms}	33,7 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T [*] max)	25,0 [h]	t(T _{5cms})	25,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T [*] sur	29,9 [°C]	dif T N-Sur	12,8 [°C]
Mean T [*] - Constant T [*]	16,5 [°C]	t(T [*] sur)	25,0 [h]	dif T N-5cms	8,9 [°C]
Daily ΔT [*]	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m ³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m ²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.15: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300 en el programa desarrollado para el método CTK

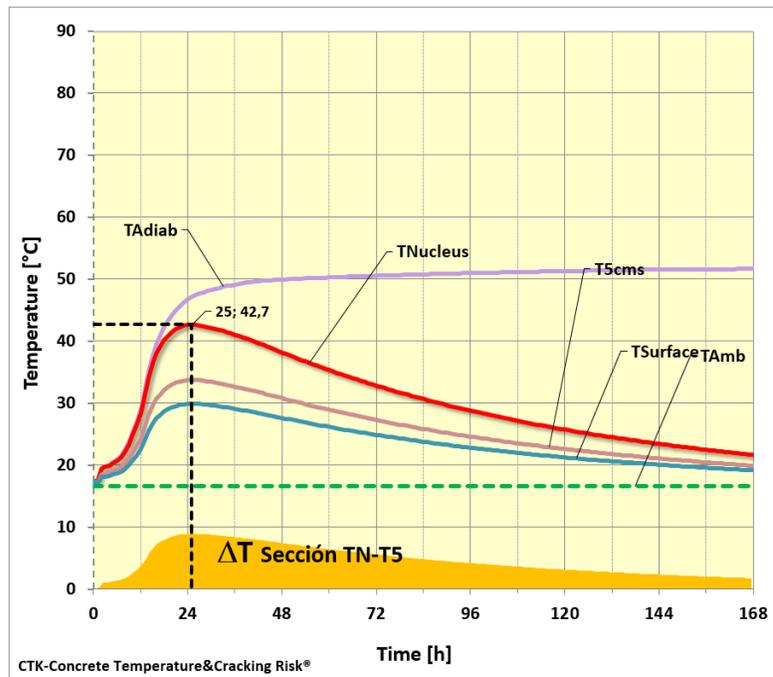


Figura C.16: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-PL/300 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-ES	Q _{tot} 7d	187 [kJ/kg]
T _{Adiab}	55,7 [°C]	Cement Content	600 [kg/m ³]
t(T _{Adiab})	34,0 [h]	w/c	0,340 [-]
		Concrete Density	2,497 [kg/m ³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy E _a	33,500 [kJ/mol]	Given Value	or	Calculated value f(wind)		
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	yes		Plastic Cover+50mm air		
Concrete Specific Heat	0,989 [kJ/(kg°K)]	20,00		U1	21,41 [kJ/(m ² h°K)]	
Concrete Conductivity	5,116 [kJ/(mh°K)]			Wind	1,0 [m/s] [1-10]	
Concrete Difusivity	0,00207 [m ² /h]			Demoulding time	168 [h] [0-->168]	
		20,00		Exposed Concrete Surface	U2	25,54 [kJ/(m ² h°K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	17,2 [°C]	T [*] max	45,5 [°C]	T _{5cms}	32,8 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T [*] max)	34,0 [h]	t(T _{5cms})	34,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T [*] sur	27,3 [°C]	dif T N-Sur	18,2 [°C]
Mean T [*] - Constant T [*]	11,7 [°C]	t(T [*] sur)	34,0 [h]	dif T N-5cms	12,8 [°C]
Daily ΔT [*]	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m ³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m ²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.17: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600 en el programa desarrollado para el método CTK

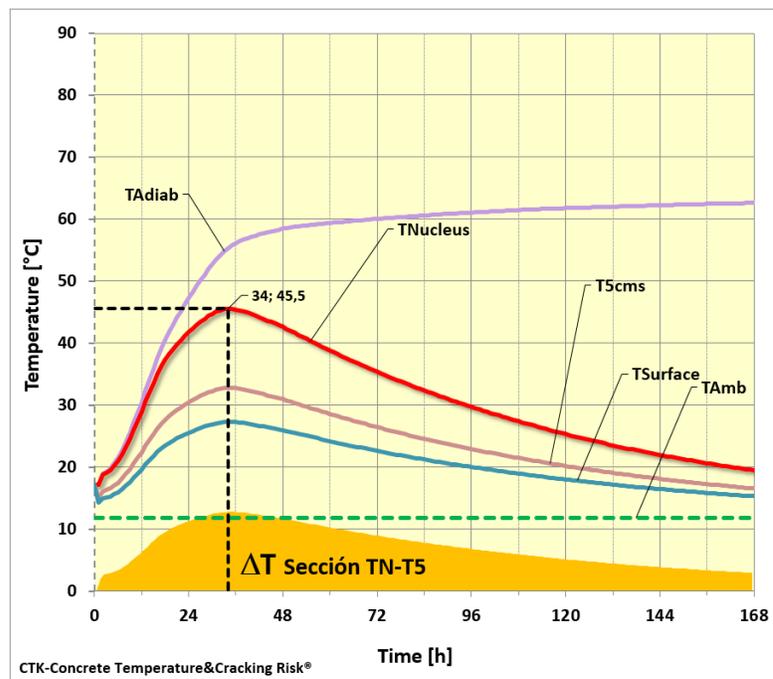


Figura C.18: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-ES/600 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-ES	Qtot 7d	187 [kJ/kg]
T Adiab	49,4 [°C]	Cement Content	500 [kg/m³]
t(T Adiab)	34,0 [h]	w/c	0,409 [-]
		Concrete Density	2,471 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]	Given Value	yes	or	Calculated value f(wind)
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	U1	20,00		Plastic Cover+50mm air
Concrete Specific Heat	1,004 [kJ/(kg°K)]	Wind	1,0 [m/s] [1-10]		
Concrete Conductivity	5,427 [kJ/(mh°K)]	Demoulding time	168 [h] [0-->168]		
Concrete Difusivity	0,00219 [m²/h]	U2	20,00		Exposed Concrete Surface
					29,54 [kJ/(m²h°K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	17,4 [°C]	T*max	40,1 [°C]	T5cms	29,3 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T*max)	34,0 [h]	t(T5cms)	34,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T*sur	24,6 [°C]	dif T N-Sur	15,5 [°C]
Mean T* - Constant T*	10,6 [°C]	t(T*sur)	34,0 [h]	dif T N-5cms	10,8 [°C]
Daily ΔT*	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.19: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500 en el programa desarrollado para el método CTK

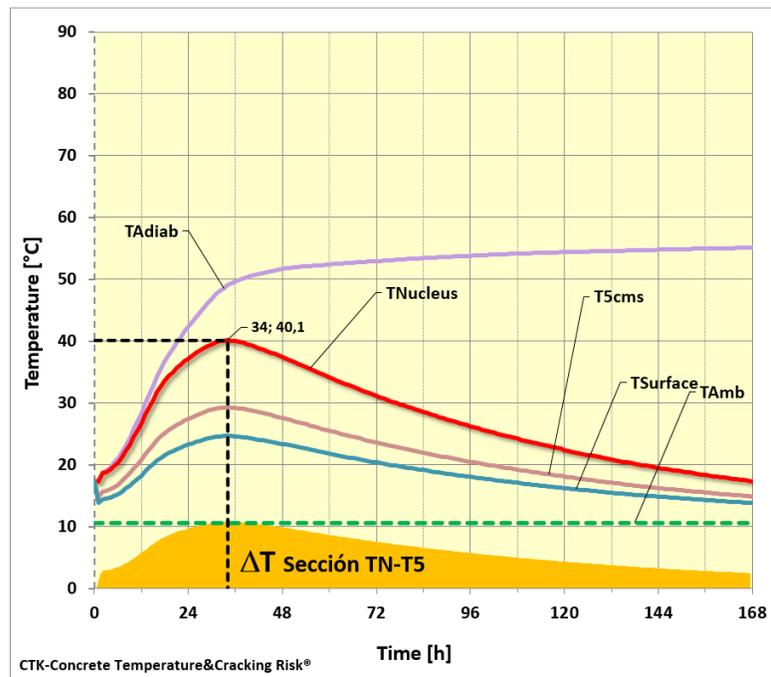


Figura C.20: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-ES/500 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-ES	Q _{tot} 7d	187 [kJ/kg]
T _{Adiab}	41,4 [°C]	Cement Content	400 [kg/m ³]
t(T _{Adiab})	34,0 [h]	w/c	0,511 [-]
		Concrete Density	2,475 [kg/m ³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy E _a	33,500 [kJ/mol]	Given Value	or	Calculated value f(wind)
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	yes		Plastic Cover+50mm air
Concrete Specific Heat	1,006 [kJ/(kg·K)]	20,00		U1
Concrete Conductivity	5,371 [kJ/(m·h·K)]			Wind
Concrete Difusivity	0,00216 [m ² /h]			Demoulding time
		20,00		U2

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	15,9 [°C]	T [*] max	34,5 [°C]	T5cms	26,1 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T [*] max)	34,0 [h]	t(T5cms)	34,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T [*] sur	22,5 [°C]	dif T N-Sur	12,0 [°C]
Mean T [*] - Constant T [*]	11,7 [°C]	t(T [*] sur)	34,0 [h]	dif T N-5cms	8,4 [°C]
Daily ΔT [*]	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m ³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m ²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.21: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400 en el programa desarrollado para el método CTK

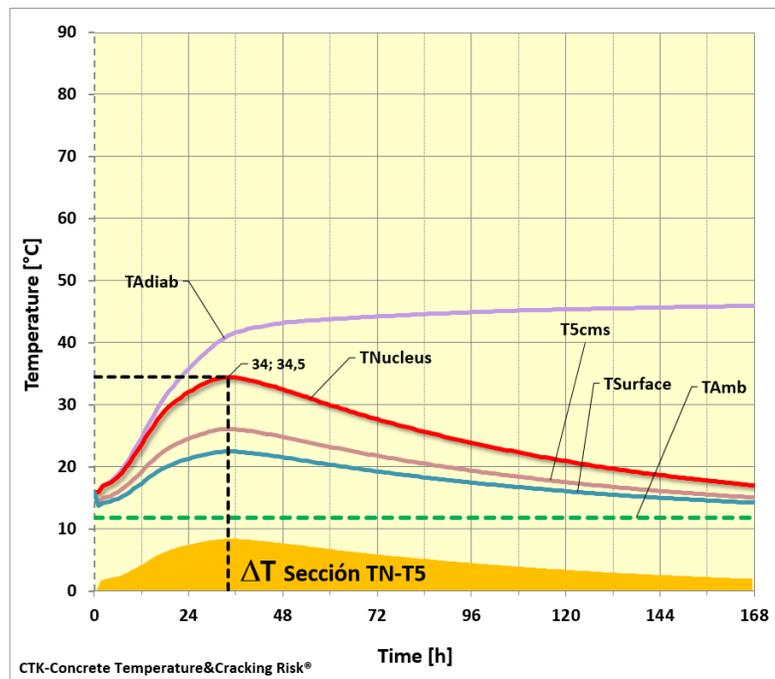


Figura C.22: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-ES/400 dado por el programa desarrollado para el método CTK

CTK - Concrete Temperature & Cracking Risk R7®

MIX DESIGN

Cement Type	ME-ES	Qtot 7d	187 [kJ/kg]
T Adiab	33,9 [°C]	Cement Content	300 [kg/m³]
t(T Adiab)	34,0 [h]	w/c	0,681 [-]
		Concrete Density	2.503 [kg/m³]

CONCRETE THERMAL PROPERTIES

Activation Energy Ea	33,500 [kJ/mol]	Given Value	or	Calculated value f(wind)	
Coef. Thermal Expansion CTE	10,00 [10 ⁻⁶ /°C]	yes		Plastic Cover+50mm air	
Concrete Specific Heat	1,000 [kJ/(kg·K)]	20,00		U1	21,41 [kJ/(m²·h·K)]
Concrete Conductivity	5,173 [kJ/(mh·K)]			Wind	1,0 [m/s] [1-10]
Concrete Difusivity	0,00207 [m²/h]			Demoulding time	168 [h] [0-->168]
		20,00		U2	29,54 [kJ/(m²·h·K)]

PLACEMENT CONDITIONS

Fresh Concrete Temperature	14,9 [°C]	T*max	28,9 [°C]	T5cms	22,6 [°C]
Pouring Time	12 [h]	t(T*max)	34,0 [h]	t(T5cms)	34,0 [h]
Ambient Temperature	Constant [°C]	T*sur	19,9 [°C]	dif T N-Sur	9,0 [°C]
Mean T* - Constant T*	12,2 [°C]	t(T*sur)	34,0 [h]	dif T N-5cms	6,3 [°C]
Daily ΔT*	7 [°C]				
t(Tmax)	15 [h]				

TEMPERATURE RESULTS

CONCRETE ELEMENT DIMENSIONS

Foundation - Slab		L/H	1,00 [-]
L = Length	0,60 [m]	Concrete Volumen	0,22 [m³]
W = Width	0,60 [m]	Exposed Surface	0,36 [m²]
H = Height	0,60 [m]	Exposed Perimeter	2,40 [m]

Figura C.23: ingreso de los datos de entrada que describen las condiciones del bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300 en el programa desarrollado para el método CTK

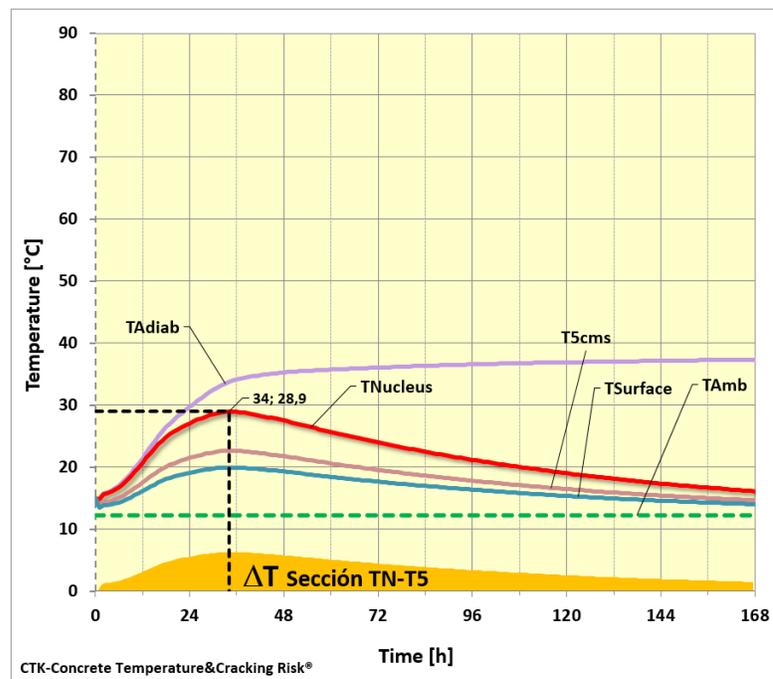


Figura C.24: gráfico resultante al evaluar las condiciones del bloque de hormigón ME-ES/300 dado por el programa desarrollado para el método CTK

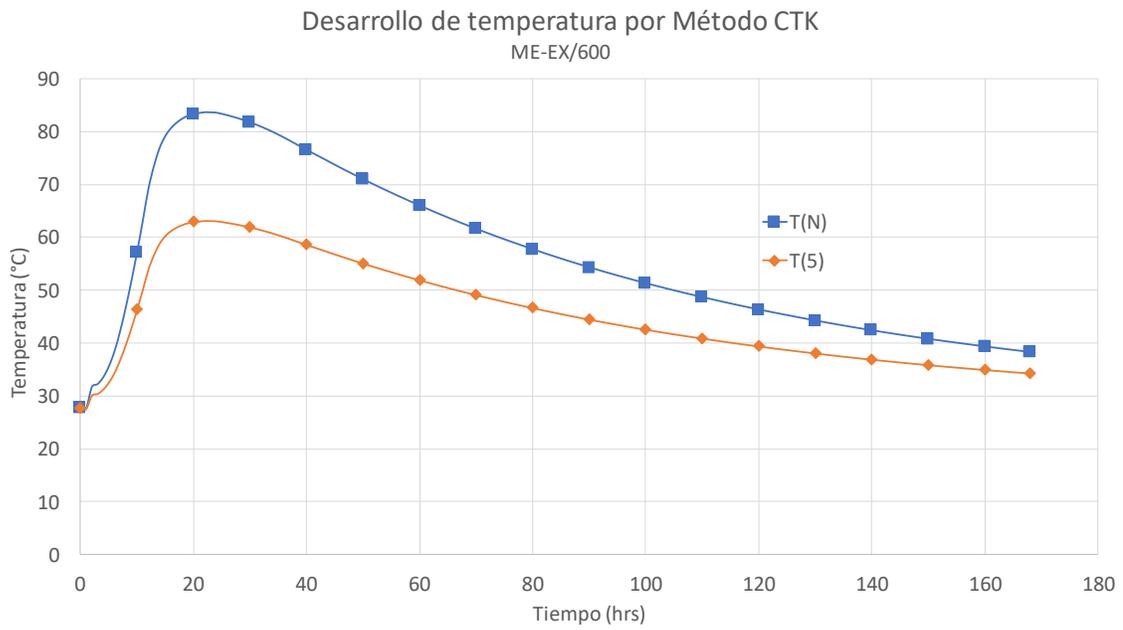


Figura C.25: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/600

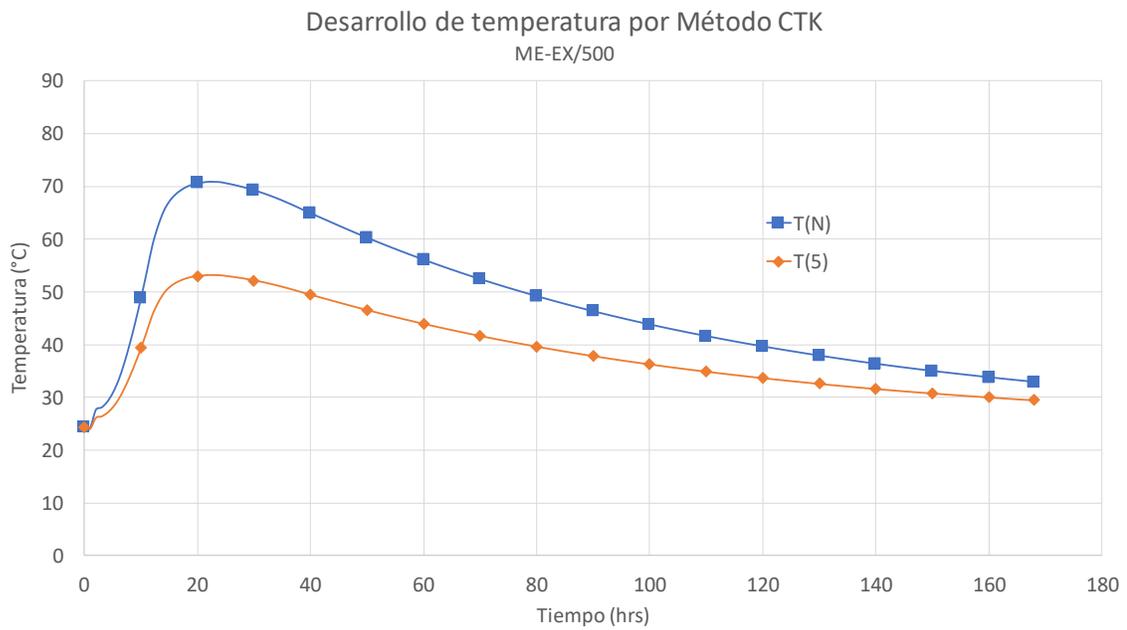


Figura C.26: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/500

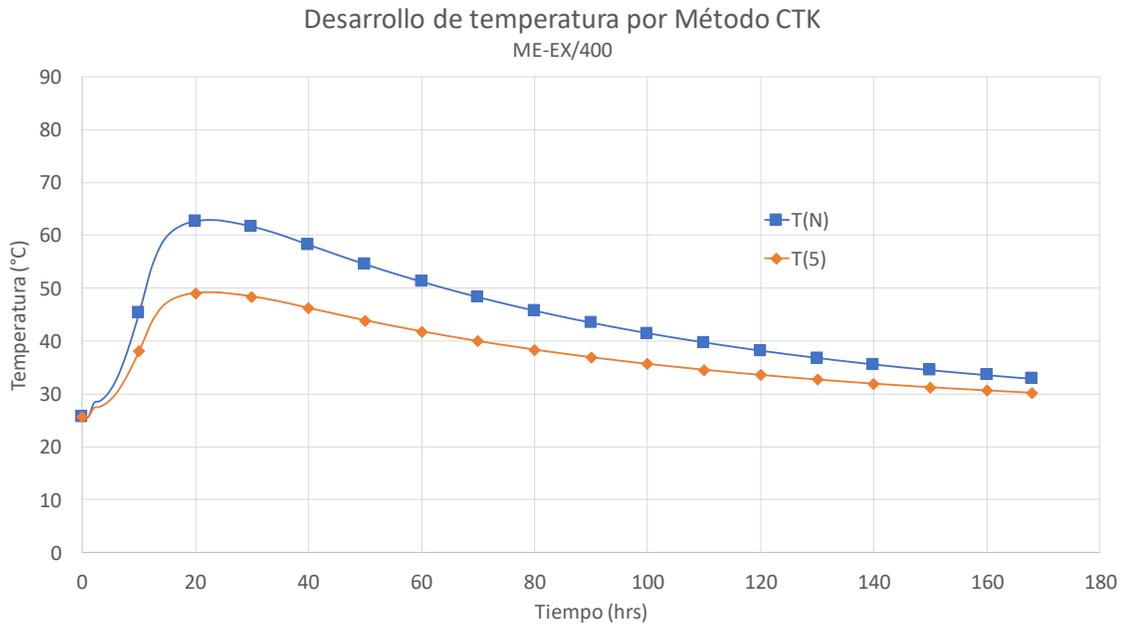


Figura C.27: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/400

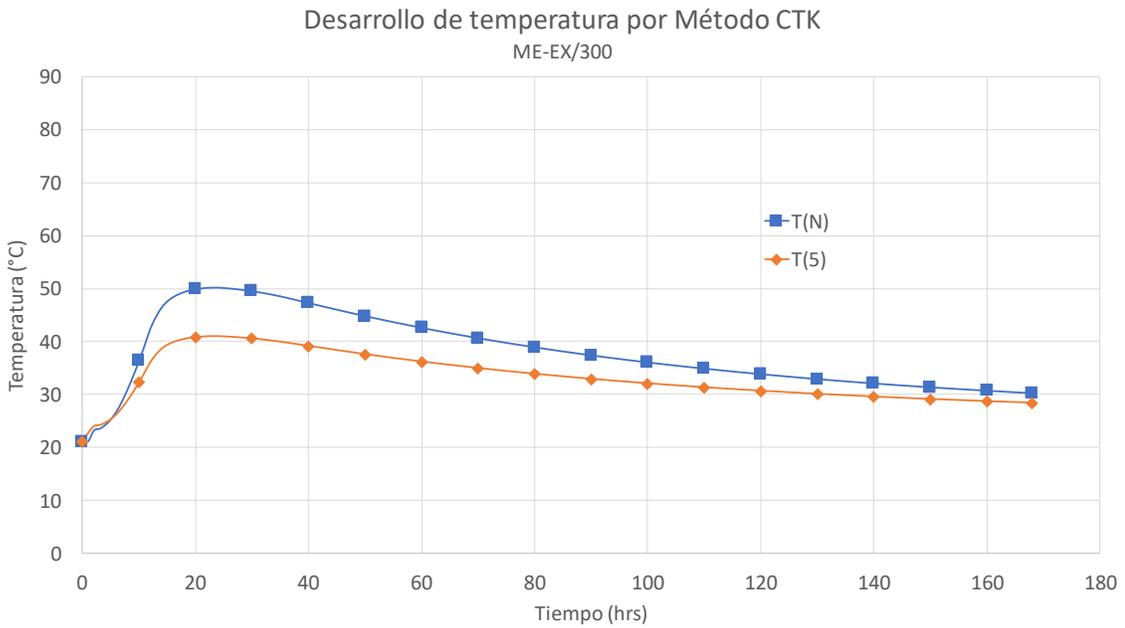


Figura C.28: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-EX/300

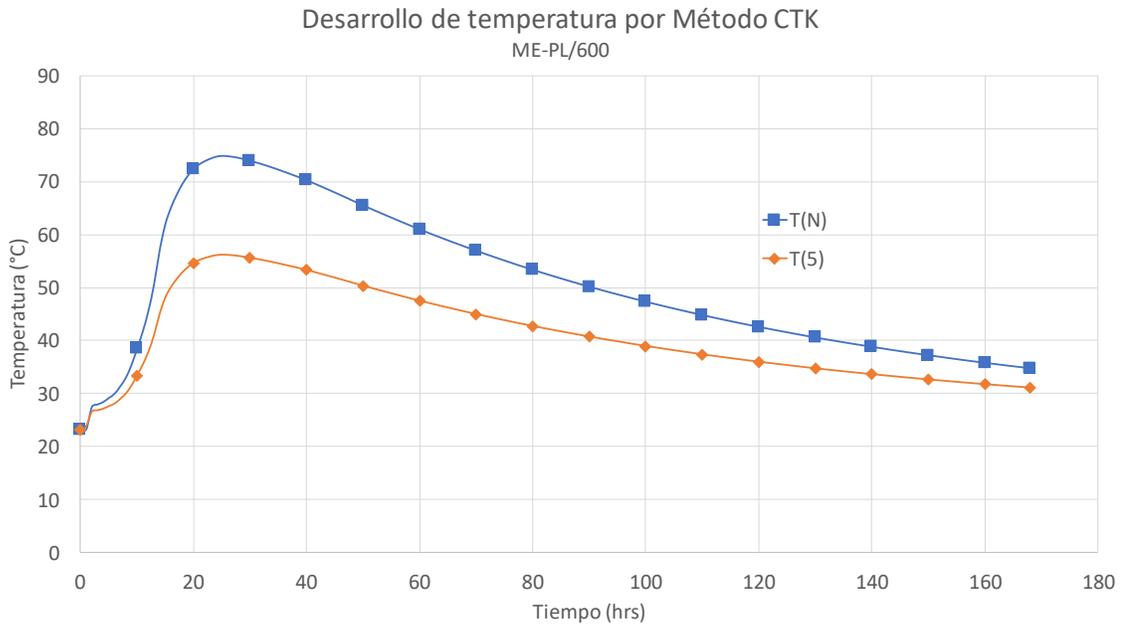


Figura C.29: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/600

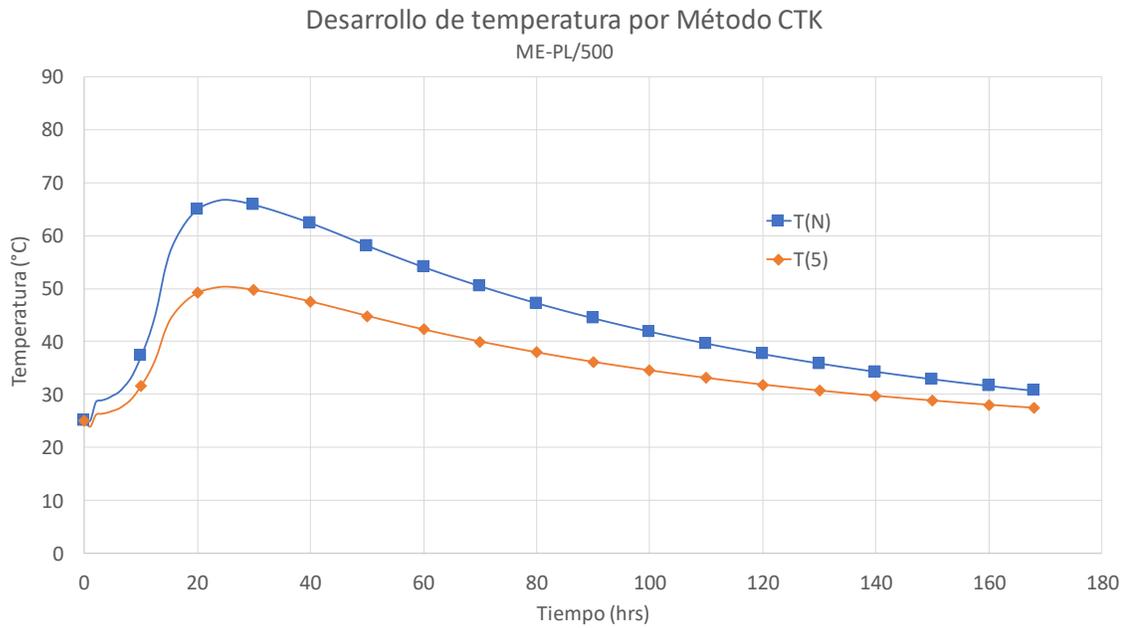


Figura C.30: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/500

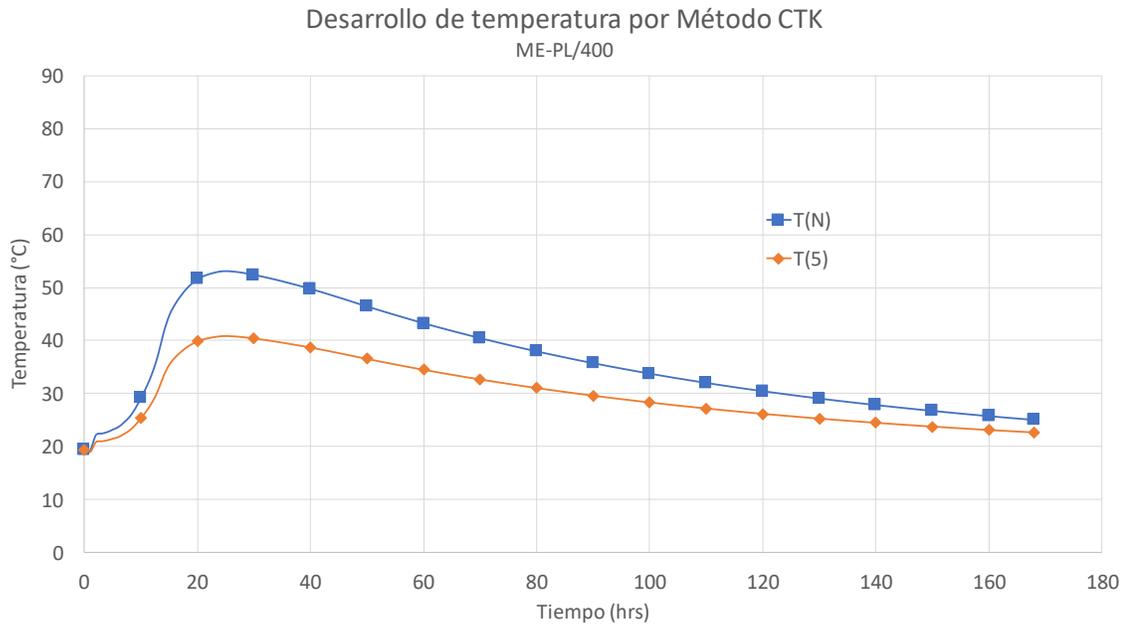


Figura C.31: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/400

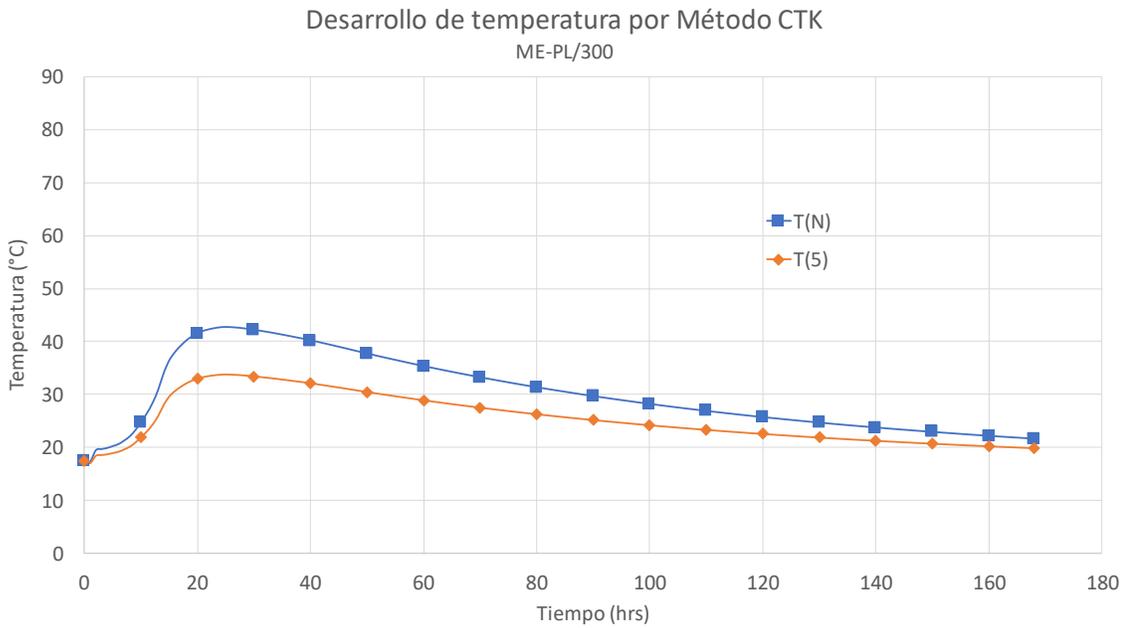


Figura C.32: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-PL/300

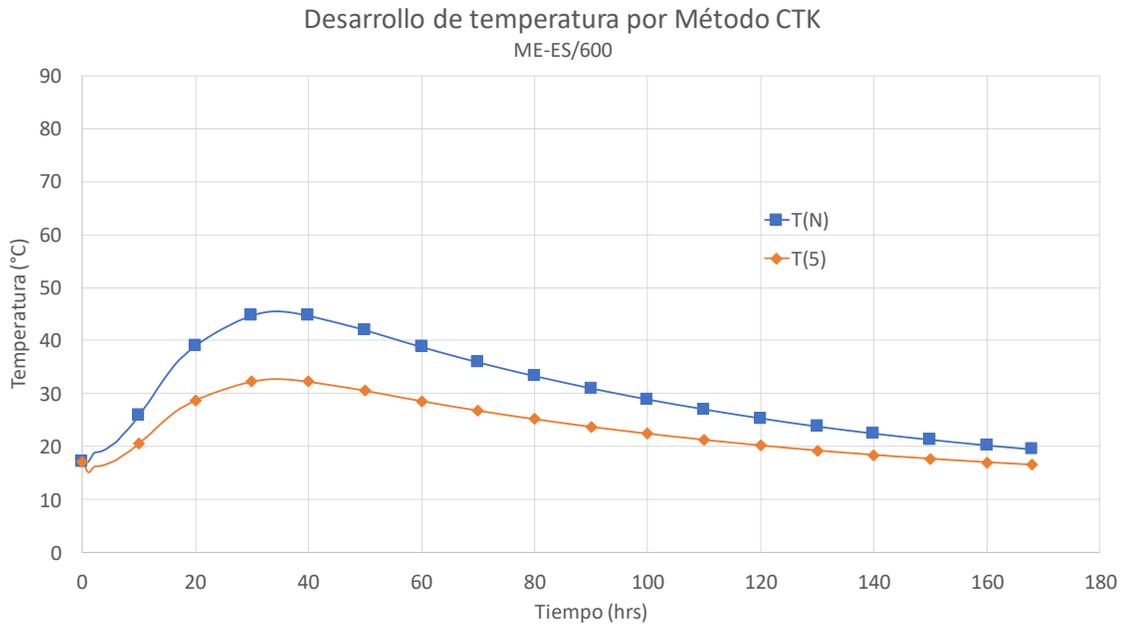


Figura C.33: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/600

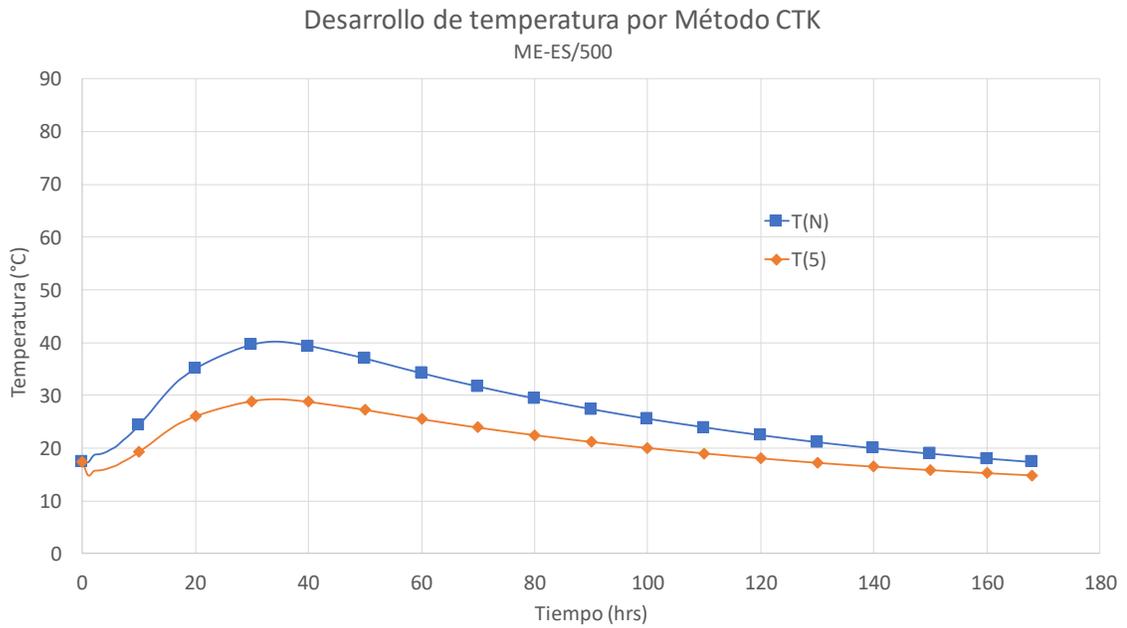


Figura C.34: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/500

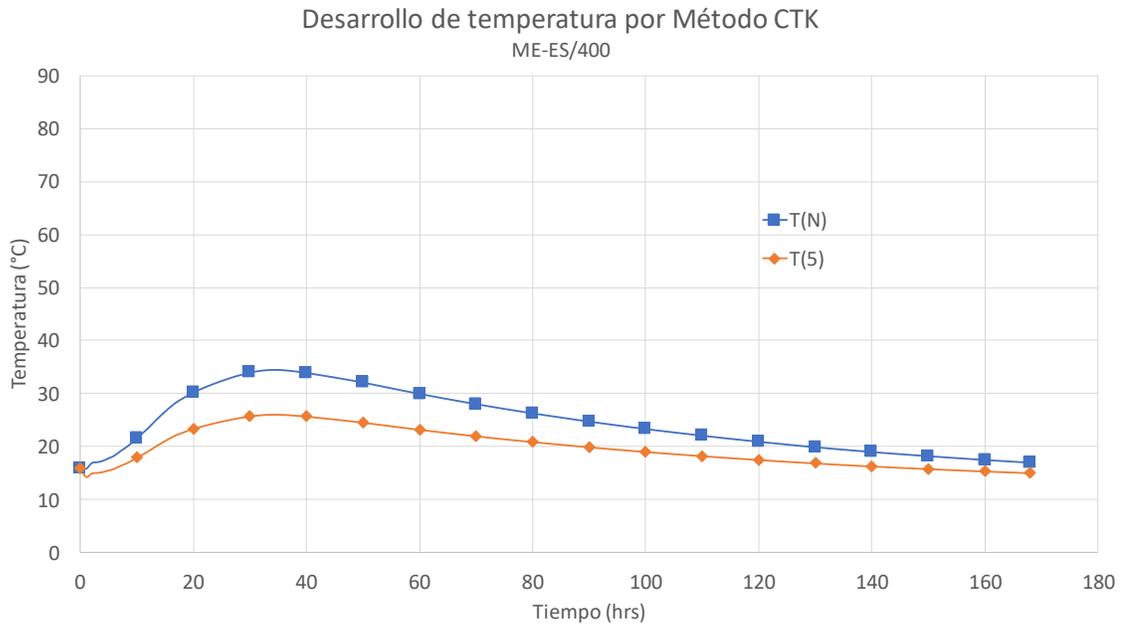


Figura C.35: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/400

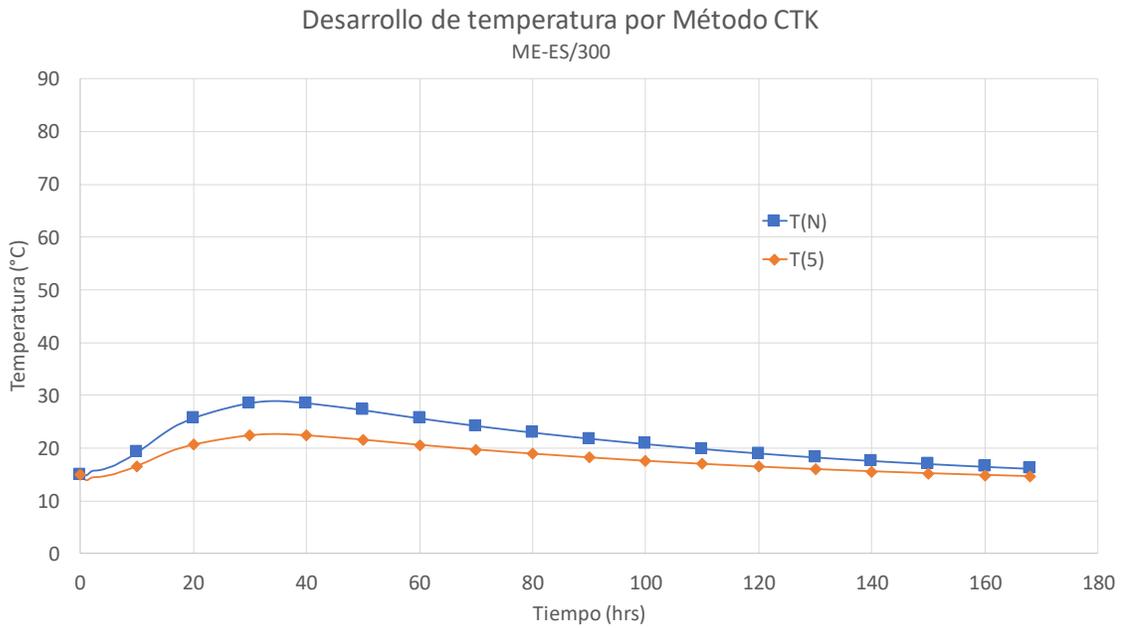


Figura C.36: curvas resultantes de desarrollo de temperatura según método CTK para bloque confeccionado con hormigón ME-ES/300