

Control de la temperatura en hormigón masivo para bloques de cimentación con simulación térmica em 2D: estudio de caso.

J. R. B. Penha^{1*} , S. Jesus² , A. C. R. Oliveira³ ,
P. Candido⁴ , L. A. Couto⁵ , E. J. Pazini Figueiredo⁶ 

*Autor de Contacto: jrbpenha@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1099>

Recibido: 04/03/2026 | Correcciones recibidas: 11/04/2026 | Aceptado: 14/05/2026 | Publicado: 01/09/2026

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar la viabilidad del hormigonado de bloques de cimentación en una o dos etapas mediante simulaciones térmicas en 2D con el software TSA. Se utilizó una mezcla fluida con sustitución total del agua por hielo, evaluando condiciones geométricas y parámetros técnicos. Los resultados indicaron que el control térmico permitió mantener temperaturas inferiores a 65 °C, reduciendo el riesgo de fisuración y formación de etringita tardía. Como limitación, el estudio se basa en simulaciones bidimensionales. La originalidad radica en el uso de hielo como estrategia de control térmico en hormigón masivo. Se concluye que la metodología es viable y contribuye a la durabilidad del hormigón.

Palabras clave: hormigón en masa; etringita tardía; estudio termodinámico; bloques de cimentación.

Citar como: Penha, J. R. Jesus, B., S., Oliveira, A. C. R., Candido, P., Couto, L. A., Pazini Figueiredo, E. J. (2026), “Control de la temperatura en hormigón masivo para bloques de cimentación con simulación térmica em 2D: estudio de caso.”, Revista ALCONPAT, 16 (3), pp. 585 – 602, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1099>

¹ Doutorado da Universidade Federal de Pelotas, Ciência e Engenharia dos Matérias, Pelotas-RS, Brasil.

² Mestre Administração e Diretor da Brasal Incorporações, Goiânia, Brasil.

³ Engenheiro Civil e Gerente de obras da Brasal Incorporações, Goiânia, Brasil.

⁴ Engenheiro Civil de obras da Brasal Incorporações, Goiânia, Brasil.

⁵ Engenheira Civil mestranda da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil.

⁶ Pesquisador do Mestrado em Construção Civil da UFMG y Professor do Programa de Mestrado em Engenharia Civil da UFCAT, Catalão, Goiás, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, la actividad de concebir la idea original contó con la contribución de J. R. B. Penha (70%) y E. J. Pazini Figueiredo (30%). En el desarrollo del modelo, participaron J. R. B. Penha (40%) y P. Candido (60%). S. Jesus (50%) y L. A. Couto (50%) participaron en la experimentación. La recogida de datos contó con la presencia de S. Jesus (50%), A. C. R. Oliveira (30%) y L. A. Couto (20%). En el análisis de los resultados, participaron J. R. B. Penha (35%), A. C. R. Oliveira (25%), P. Candido (20%) y E. J. Pazini Figueiredo (20%). El manuscrito fue escrito por J. R. B. Penha (70%) y S. Jesus (30%). La revisión del manuscrito contó con la participación de S. Jesus (40%) y A. C. R. Oliveira (60%). La supervisión general del estudio fue realizada por E. J. Pazini Figueiredo (100%). Finalmente, la revisión crítica del manuscrito fue realizada por E. J. Pazini Figueiredo (100%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2027.

Temperature control in massive concrete for foundation blocks with 2D thermal simulation: case study.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the feasibility of casting foundation blocks in one or two stages using 2D thermal simulations with TSA software. A fluid mix with total replacement of mixing water by ice was adopted, considering geometric and technical parameters. Results showed that thermal control kept temperatures below 65 °C, reducing the risk of cracking and delayed ettringite formation. As a limitation, the study is based on two-dimensional simulations. The originality lies in the use of ice as a thermal control strategy in mass concrete. It is concluded that the proposed methodology is feasible and contributes to concrete durability.

Keywords: mass concrete; late ettringite; thermodynamic study; foundation blocks.

Controle de temperatura em hormigón maciço para blocos de fundação com simulação térmica 2D: estudo de caso.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade da concretagem de blocos de fundação em uma ou duas etapas por meio de simulações térmicas em 2D com o software TSA. Utilizou-se uma mistura fluida com substituição total da água por gelo, considerando parâmetros geométricos e técnicos. Os resultados indicaram que o controle térmico manteve temperaturas abaixo de 65 °C, reduzindo o risco de fissuração e formação de etringita tardia. Como limitação, o estudo baseia-se em simulações bidimensionais. A originalidade está no uso do gelo como estratégia de controle térmico em hormigón massa. Conclui-se que a metodologia é viável e contribui para a durabilidade do hormigón.

Palavras-chave: hormigón massa; etringita tardia; estudo termodinâmico; blocos de fundação

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. TABLA DE NOMENCLATURA

Símbolo / Abreviación	Definición	Unidad
fck	Resistencia característica a compresión del hormigón	MPa
TSA	Thermal Structure Analysis (software de análisis térmico)	—
TSA-1D	Simulación térmica unidimensional	—
TSA-2D	Simulación térmica bidimensional	—
PCE	Éter policarboxilato (tipo de aditivo superplastificante)	—
CP IV 32 RS	Cemento Portland compuesto con adición puzolánica y resistencia a sulfatos	—
RA1	Aditivo reductor de agua tipo 1	—
RA2	Aditivo reductor de agua tipo 2	—
h ₀ , h ₁	Altura de las capas de hormigonado	m
°C	Grado Celsius (temperatura)	°C
kcal/kg·°C	Calor específico	kcal/kg·°C
m ² /día	Difusividad térmica	m ² /día

2. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la hidratación del cemento Portland ha sido ampliamente investigado en los últimos años. Este proceso resulta de reacciones superficiales entre el agua y el grano de cemento, las cuales implican mecanismos de disolución-precipitación o reacciones topoquímicas (hidratación en estado sólido), de naturaleza exotérmica (Metha y Monteiro, 2008; Taylor, 1997). Dichas reacciones químicas liberan calor, lo que puede provocar elevaciones significativas de temperatura, no solo en estructuras de hormigón masivo, sino también en estructuras convencionales, especialmente debido a las características de los hormigóns actuales, que presentan altos contenidos de cemento, resistencias características elevadas, dimensiones considerables, limitadas condiciones de disipación térmica y restricciones al movimiento.

A ello se suma el uso creciente de hormigóns especiales, que no necesariamente incorporan mayores cantidades de cemento en su composición, ya que las tendencias actuales en ingeniería de materiales buscan optimizar el desempeño mecánico y reológico mediante el uso de adiciones minerales y estrategias de dosificación más eficientes, con el fin de reducir la huella de carbono asociada al cemento (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020). En estos casos, el comportamiento acoplado termo-químico-mecánico de la estructura resulta determinante para su diseño.

Sin embargo, en el contexto actual de la construcción sostenible, el desarrollo de hormigóns especiales ha evolucionado hacia la optimización del contenido de cemento mediante el uso de materiales cementantes suplementarios (como cenizas volantes, escorias y filler calcáreo), con el objetivo de reducir la huella de carbono sin comprometer el desempeño mecánico y reológico (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Aun así, dependiendo de las condiciones de diseño y ejecución, estos hormigóns pueden presentar un comportamiento térmico significativo, especialmente en elementos de gran volumen, lo que mantiene la relevancia del análisis termo-químico-mecánico en este tipo de estructuras.

Según Mehta y Monteiro (2008), conocer la cantidad de calor liberado es fundamental, ya que puede ser tanto beneficioso como perjudicial. El hormigón genera calor desde el inicio de la hidratación del cemento y, en sus primeras edades, presenta un bajo módulo de elasticidad y comienza a ganar resistencia, precisamente mientras su temperatura se eleva. En este período, surgen tensiones de compresión que no causan fisuración. No obstante, una vez que la temperatura máxima de la estructura comienza a equilibrarse con la temperatura ambiente, dichas tensiones

compresivas tienden a disminuir hasta transformarse en tensiones de tracción. Como el hormigón presenta baja resistencia a la tracción, puede empezar a fisurarse si dichas tensiones superan su capacidad resistente a esa solicitación.

Las fisuras reducen la capacidad resistente del elemento estructural afectado y disminuyen la durabilidad del hormigón, ya que facilitan la entrada de agentes agresivos. En el caso de bloques y zapatas, se trata de elementos estructurales clave, responsables de soportar toda la edificación y de transmitir sus cargas a los elementos de cimentación profunda. Por tanto, la aparición de fisuras puede comprometer seriamente la seguridad estructural y la estabilidad del edificio. Además, la reparación de estos elementos críticos es compleja, lo que refuerza la importancia de medidas preventivas.

El presente estudio tiene por objetivo registrar, de forma concisa y objetiva, la simulación térmica computacional de bloques y zapatas de cimentación de grandes dimensiones (volúmenes entre 30 m³ y 400 m³) con $f_{ck} > 50$ MPa, correspondientes a una obra residencial ubicada en Goiânia-GO. La simulación fue realizada por la empresa consultora JP Prime Engenharia e Consultoria

3. SUPUESTOS Y DATOS DE ENTRADA

3.1 Preámbulo.

El estudio térmico, también denominado cálculo térmico, tiene como objetivo reducir el riesgo de fisuración en elementos estructurales debido a la dificultad de disipar el calor generado durante la hidratación del cemento. Este tipo de análisis debe desarrollarse de forma específica para cada caso, ya que existen obras en las que distintos elementos estructurales requieren simulaciones independientes, considerando factores como su geometría particular y restricciones constructivas. La simulación térmica se realiza mediante herramientas computacionales, a partir de un conjunto de datos de entrada, entre los cuales se destacan: las dimensiones del elemento (especialmente el espesor o altura), su geometría, el tipo de cemento (curva de liberación de calor por hidratación) y de agregados utilizados en la mezcla candidata (litología), el tipo de encofrado, las condiciones de apoyo del elemento, el método de curado adoptado, la temperatura ambiente y la temperatura máxima de vertido del hormigón (por ejemplo, con el uso de hielo en sustitución del agua de mezcla).

En este contexto, se buscó determinar, a través de simulaciones computacionales, la viabilidad de hormigonar los bloques/zapatas analizados en una sola etapa, utilizando 100 % de hielo como sustituto del agua de amasado. Para ello, se consideró la mezcla fluida desarrollada mediante un estudio experimental de dosificación, realizado el 03/10/2024, así como los condicionantes técnicos previamente mencionados.

JP Prime Engenharia e Consultoria fue responsable de la realización de las simulaciones térmicas, cuyos resultados indicaron que no sería viable hormigonar todos los elementos de gran volumen en una sola etapa, dado el conjunto de premisas y escenarios analizados (considerando la combinación entre altura, volumen y geometría del elemento).

Este resultado evidencia la influencia significativa de las dimensiones del elemento en la disipación térmica, indicando que, a mayor volumen y espesor, mayor es la acumulación de calor y, por tanto, el riesgo de fisuración térmica.

La tabla 1 presenta un resumen de los bloques/zapatas analizadas (resaltados en amarillo), la cantidad de capas requeridas para su ejecución y el número de termopares utilizados para el monitoreo térmico en el interior del hormigón. En total, se realizaron cuatro simulaciones, focalizadas en elementos con alto potencial de generación de calor, considerados críticos para el control térmico. Se observa que todos los elementos evaluados requirieron hormigonado en dos capas, lo que refuerza la necesidad de segmentar el vertido como estrategia de control térmico.

Tabla 1. Cantidad de capas y termopares por bloque (Emprendimiento)

Proyecto de referencia: Obra Artesano Reserva Marista						
Bloque	Lado A (m)	Lado B (m)	H total (m)	Vol. Real (m ³)	n. capas	n. termopares
Bloque de cimentación	10,60	17,00	2,00	360,4	2	6
Zapata S14	4,00	9,00	1,45	66,38	2	6
Zapata S6+S31	7,00	7,00	2,00	98,00	2	6
Zapata S9+S36	7,00	7,00	2,00	98,00	2	6

En este estudio, las restricciones adoptadas establecieron como límite una temperatura máxima de 65 °C en el interior de cada capa, con el fin de evitar tanto la fisuración térmica (resultado del desequilibrio de tensiones) como, principalmente, el fenómeno deletéreo conocido como formación tardía de etringita. Asimismo, se consideró fundamental no superar la temperatura máxima de vertido del hormigón en estado fresco, previamente definida en las simulaciones, la cual fue limitada a 24 °C.

Estos criterios permitieron establecer un marco de evaluación consistente para la comparación entre escenarios de hormigonado en una y dos etapas.

Por último, se recomienda que todos los demás bloques/zapatas que no forman parte del grupo 1 sean hormigonados con la dosificación candidata presentada en el informe de dosificación de JP Prime, reproducido en un apartado posterior de este estudio, es decir, sin el uso de hielo, conforme al diseño de mezcla analizado.

3.2 Características climáticas.

Uno de los principales aspectos para la simulación de tensiones térmicas consiste en el valor de la temperatura media ambiente, que servirá como base de cálculo para determinar la variación térmica a la que estará sometido el elemento estructural.

En este contexto, se observa que la ciudad de Goiânia presenta temperaturas medias diarias, durante los meses de noviembre y diciembre, de 24,6 °C y 24,2 °C, con máximas medias de 30,0 °C y 29,4 °C, y mínimas medias de 18,5 °C y 17,0 °C, respectivamente (meses en los que probablemente se llevarán a cabo las actividades de hormigonado), según datos disponibles en el sitio web del Centro Integrado de Informaciones Agrometeorológicas (CIIAGRO) del Gobierno del Estado de São Paulo.

Estos valores evidencian un escenario climático con temperaturas elevadas, lo que puede intensificar el incremento térmico en el interior del hormigón, dificultando la disipación de calor y aumentando el riesgo de fisuración térmica.

Dichos datos se presentan en la tabla 2 (resaltados en rojo), y gráficamente en la figura 1, la cual sintetiza las condiciones ambientales adoptadas como referencia para la simulación térmica.

Tabla 2. Temperaturas ambientales (media, máxima y mínima) en Goiânia, en °C.

Mes	Días	Temperatura media diaria (°C)	Temperatura máxima media (°C)	Temperatura mínima media (°C)
Enero	1550	24,3	28,9	18,0
Febrero	1412	24,5	28,5	19,5
Marzo	1550	24,6	28,4	18,5
Abril	1500	24,2	28,2	17,5
Mayo	1522	22,4	27,0	13,0
Junio	1470	21,1	26,0	10,5
Julio	1519	21,1	27,0	11,0
Agosto	1519	23,1	29,2	13,5
Septiembre	1470	25,1	30,5	14,0
Octubre	1519	25,2	31,0	18,0
Noviembre	1470	24,6	30,0	18,5
Diciembre	1519	24,2	29,4	17,0

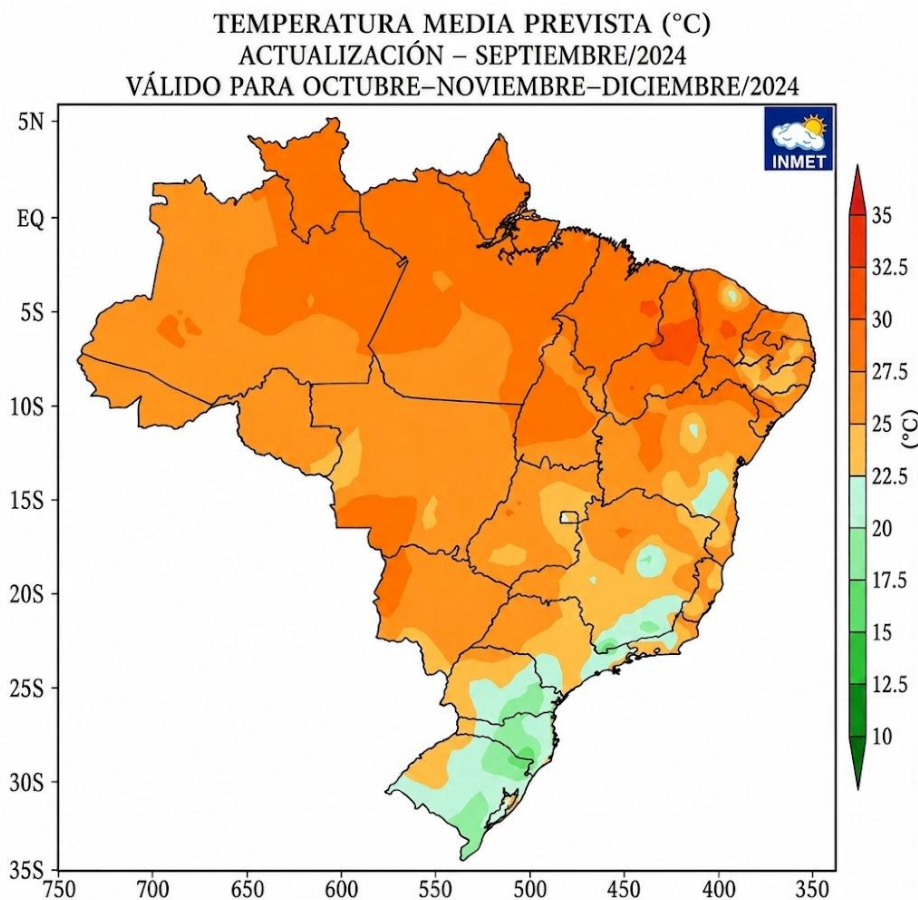


Figura 1. Temperaturas ambientales (med., máx. y mín.) en Goiânia según el INMET, en °C.

Para la simulación térmica, se adoptó una temperatura ambiente constante de 30 °C, considerada representativa de las condiciones más desfavorables para el control térmico durante el periodo analizado. Considerando que los datos presentados corresponden a mediciones históricas consolidadas y representativas del clima local, se optó por no incluir representaciones gráficas adicionales, priorizando la claridad y objetividad en la presentación de los parámetros adoptados para la simulación térmica.

3.3 Hormigón e insumos

El hormigón empleado en la producción de las zapatas/bloques objeto de este trabajo (tabla 1) debe obtenerse mediante una mezcla enérgica y homogénea de los materiales disponibles, de modo que cumpla con una resistencia característica mínima especificada en el proyecto ($f_{ck} \geq 50$ MPa), emita bajo calor de hidratación, presente buenas condiciones de disipación térmica y ofrezca una trabajabilidad adecuada a los medios de transporte, productividad y colocación del hormigón.

En este caso específico, se dosificó en laboratorio un hormigón especial, fluido, con un 100 % de hielo en sustitución del agua de amasado, como estrategia para reducir la temperatura inicial del hormigón y, en consecuencia, mitigar el incremento térmico durante la hidratación.

La empresa Ciplan, responsable por la producción de este hormigón, fue consultada y proporcionó las propiedades y características de los materiales a utilizar en la mezcla (insumos procedentes de la unidad de Aparecida de Goiânia/GO), conforme se detalla a continuación.

2.3.1 Agregados:

- Piedra triturada 0 y 1 (Gneis), agregado grueso, con dimensión máxima característica de 16,0 mm y módulo de fineza igual a 10,43 % para la Piedra 1, y con dimensión máxima característica de 16,0 mm y módulo de fineza igual a 8,43 % para la Piedra 0. Agregados provenientes de la cantera Pedreira-Araguaia; Calor específico adoptado: 0,2 kcal/kg.°C.
- Arena natural fina cuarzosa, agregado fino, con dimensión máxima característica de 4,8 mm y módulo de fineza igual a 1,34 %. Agregado proveniente del municipio de Israelândia de Goiás; Calor específico adoptado: 0,2 kcal/kg.°C.
- Arena triturada tipo II (granítica), agregado fino, con dimensión máxima característica de 0,6 mm y módulo de fineza igual a 3,25 %. Agregado proveniente de Guapó; Calor específico adoptado: 0,2 kcal/kg.°C.

2.3.2 Cemento:

- Cemento tipo CP IV 32 RS (procedente de Ciplan Cimento Planalto S/A – Unidad de Brasília). Informe de Ensayo identificado como N.º 158184, muestra 262180, fechado el 19 de marzo de 2024 (muestra recolectada el 29/12/2023), disponible para consulta en el Anexo G de este informe.

2.3.3 Adición de sílice activa:

- Tecnosil, calor específico adoptado = 1 kcal/kg.°C.

2.3.4 Aditivo plastificante Mid-Range a base de Éter Policarboxilato (PCE) y polifuncional:

- MasterGlenium® 358, BASF, calor específico adoptado = 1 kcal/kg.°C.

2.3.5 Agua total (hielo en sustitución del agua de amasado + humedad de las arenas):

- Hielo: calor específico adoptado = 0,5 kcal/kg.°C
- Agua potable: calor específico = 1,0 kcal/kg.°C / calor latente = 80 kcal/kg

2.3.6 Dosificación candidata (estudio experimental de dosificación)

Tabla 3. Dosificación candidata, en materiales secos, con fck de 50 MPa a los 28 días de edad.

Parámetro	Valor
Dosificación del hormigón	
Consumo de cemento (CP IV 32 RS)	432 kg/m ³
Relación agua/cemento	0,44
Adición de sílice activa (Tecnosil)	48 kg/m ³
Agua total	190 kg/m ³ (120 kg de hielo + 70 kg de humedad de las arenas)
Agua efectiva	70 kg/m ³
Hielo real	120 kg/m ³
Contenido de mortero	55 %
Aire atrapado	2,0 %
Consistencia (slump)	19,0 cm
Masa específica	2386 kg/m ³
Arena cuarzosa fina	279 kg/m ³
Arena triturada tipo II	430 kg/m ³
Piedra triturada 0 (gneis)	284 kg/m ³
Piedra triturada 1 (gneis)	717 kg/m ³
Aditivos (plastificante + polifuncional)	6,24 kg/m ³
Propiedades térmicas del hormigón (según literatura)	
Difusividad térmica	0,11 m ² /día
Coeficiente de dilatación térmica	1×10 ⁻⁵ 1/°C
Calor específico	0,240 kcal/kg·°C

2.3.7 Cantidad de hielo para bloques y zapatas

Por razones de practicidad, en lo que respecta a la incorporación del hielo, se definió que se sustituiría la totalidad del agua de amasado, descontando el contenido de humedad presente en los agregados (considerándose una humedad del 4,9 % para la arena fina natural y del 7,9 % para la arena artificial, según información proporcionada por el laboratorio de la planta de hormigón). Con base en estos valores, se estimó un requerimiento de aproximadamente 42 bolsas de hielo de 20 kg por camión con carga de 7 m³ (válido exclusivamente para bolsas de 20 kg). Este procedimiento permitió reducir significativamente la temperatura inicial del hormigón, constituyendo una medida efectiva de control térmico en elementos de gran volumen.

Es recomendable confirmar estos valores de humedad mediante el análisis de datos históricos y ensayos realizados en la fecha del evento de hormigonado, así como verificar el volumen de carga real del camión mezclador y la masa exacta de cada bolsa de hielo, con el fin de evitar errores.

Según el balance térmico realizado para la dosificación candidata (tabla 2) y las simulaciones experimentales efectuadas en laboratorio bajo condiciones similares a las de obra, se determinó que la temperatura máxima esperada del hormigón al llegar al sitio no debe superar los 24 °C (ya considerando una holgura con respecto al aumento térmico por transporte).

En pruebas realizadas en la planta de hormigón de Ciplan, la temperatura del hormigón fresco registrada fue del orden de 15,2 °C, considerando hielo a 0,9 °C, temperatura ambiente media de 25 °C y humedad relativa del 75 %. Esta temperatura fue medida tras 10 minutos de mezcla en la hormigonera en movimiento, representando un escenario bastante favorable. Además, la temperatura medida tras 30 minutos de mezcla no superó los 18 °C (véase el informe fotográfico correspondiente). Estos resultados confirman la eficiencia del uso de hielo como estrategia para el

control térmico del hormigón fresco.

La consultora fue informada de que, en principio, la planta de Ciplan en Aparecida de Goiânia/GO sería responsable del suministro del hormigón (ubicada a aproximadamente 10,2 km de distancia, con un tiempo estimado de recorrido de 30 minutos en días laborables). En este contexto, se recomienda que la temperatura del hielo se fije en -5°C en el momento de la dosificación en planta. Con esta condición, se estima que la temperatura de trabajo del hormigón será del orden de 15°C , lo que proporciona una buena margen de seguridad, evitando la necesidad de rechazar camiones únicamente por cuestiones térmicas.

De este modo, se establece un límite máximo de aceptación de temperatura del hormigón entregado por cada camión individual de 23°C , con una tolerancia de hasta 1°C para las mezcladoras correspondientes al segundo evento de hormigonado/segunda capa del elemento estructural (en caso de hormigonados en dos etapas). En otras palabras, no se podrán aceptar camiones con temperatura superior a 24°C , salvo en las condiciones de segunda capa, en las que se acepta hasta 25°C . En eventos de hormigonado único, el límite sigue siendo 24°C .

4. ESTUDIO TÉRMICO

4.1 Preámbulo.

El estudio térmico fue realizado computacionalmente mediante el método de elementos finitos, utilizando el software TSA – 1D y TSA – 2D, que permite simular el historial de temperaturas y las tensiones generadas por las diferencias térmicas dentro del elemento estructural a ser hormigonado. El software TSA (*Thermal Structure Analysis*) es una herramienta computacional basada en el método de los elementos finitos, desarrollada para la simulación de la evolución térmica en estructuras de hormigón masivo. Su aplicación permite prever con precisión los picos de temperatura internos, la distribución térmica a lo largo del tiempo y los riesgos de fisuración térmica, siendo ampliamente utilizado en proyectos de infraestructura y edificaciones de gran porte. En este estudio, se utilizó en las versiones TSA–1D y TSA–2D, con el objetivo de modelar diferentes geometrías y escenarios constructivos de zapatas y bloques de cimentación.

Para la estimación de la resistencia a la tracción, el software ya proporciona los valores de referencia conforme a los estándares normativos, según lo establecido en la norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2023).

La modelación fue simulada tanto en una única etapa como en dos etapas y, en caso de que las temperaturas internas superaran los 65°C o hubiera desequilibrio de tensiones, la alternativa restante sería dividir el elemento en tres o más capas (último recurso), ya que la dosificación candidata ya estaba definida (con consumo mínimo de cemento y la máxima cantidad posible de hielo por metro cúbico, es decir, parámetros ya fijados).

Los modelos computacionales consideraron la interacción del bloque con el suelo, así como la discretización del dominio mediante una malla de elementos finitos refinada, lo que permitió una representación adecuada de los gradientes térmicos en el interior del elemento. A partir de esta modelación, se realizaron simulaciones térmicas unidimensionales (TSA–1D) y bidimensionales (TSA–2D), con el objetivo de analizar la evolución temporal de la temperatura y los gradientes térmicos en el interior del bloque de cimentación.

En las Figuras 2 y 3, se presenta el cálculo térmico del bloque y la modelación en dos capas (con interacción con el suelo), así como la malla refinada de elementos finitos adoptada para el bloque mayor y la zapata S14.

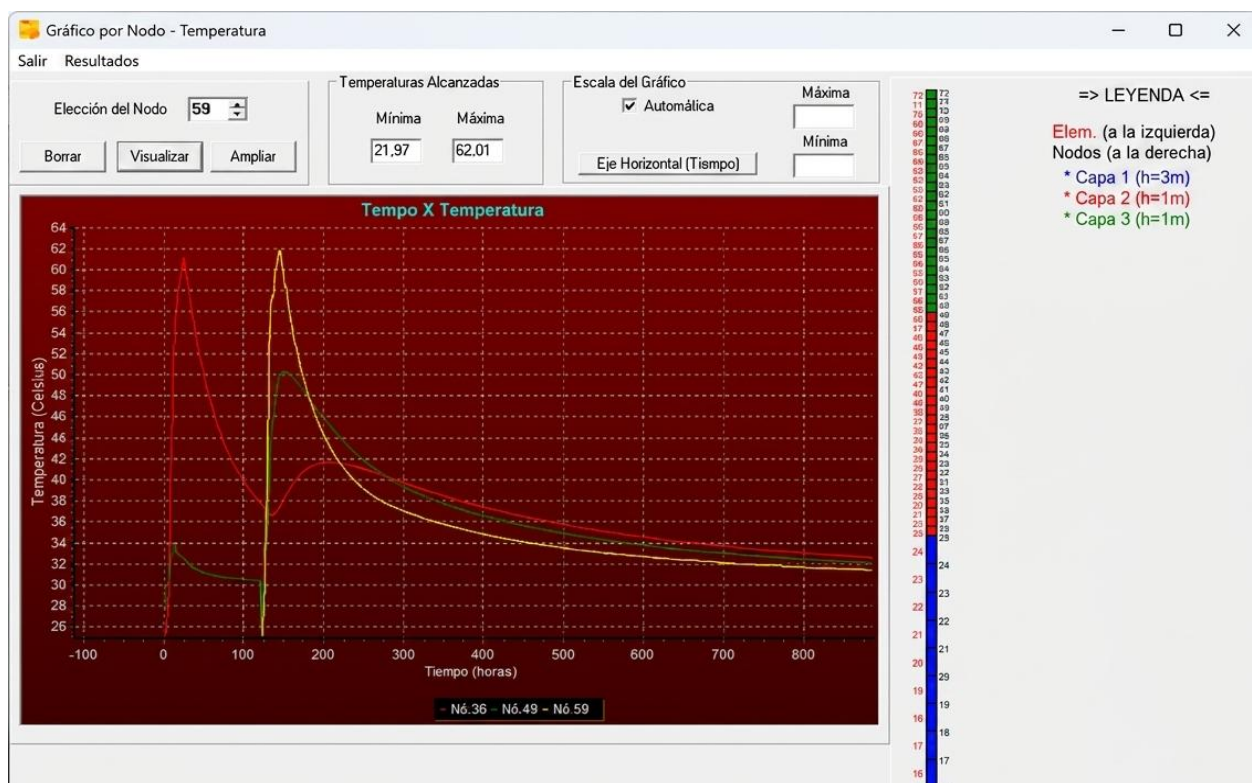


Figura 2. Cálculo térmico del Bloque $17,00 \times 10,60 \times 1,00$ m (TSD-1D)

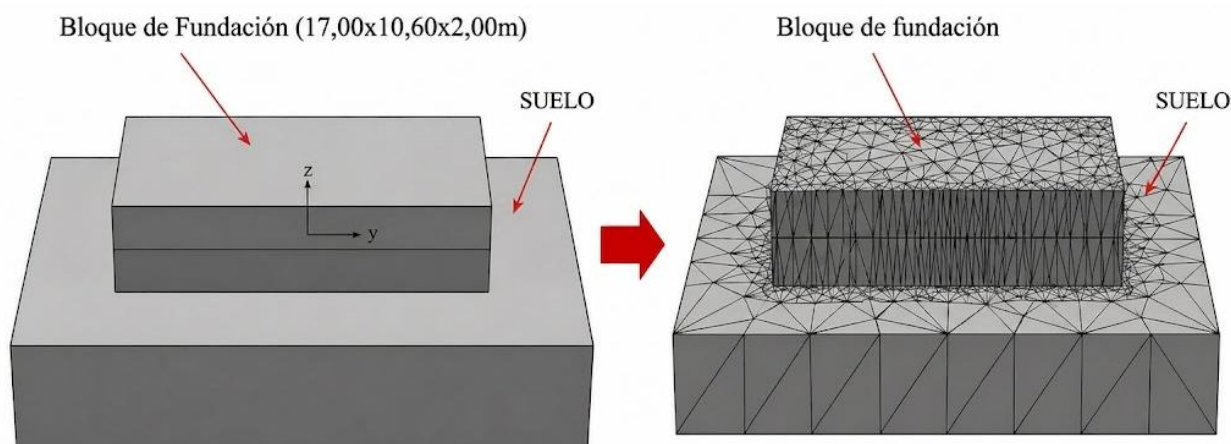


Figura 3. Modelación adoptada en dos capas para el Bloque mayor $17,00 \times 10,60 \times 2,00$ m

En el análisis unidimensional (TSA-1D), correspondiente al bloque de dimensiones $17,00 \times 10,60 \times 1,00$ m, se obtuvieron las curvas de temperatura en función del tiempo para distintos puntos representativos del elemento. Los resultados indicaron una temperatura máxima del orden de 62°C , alcanzada en edades tempranas del hormigón, seguida de una fase de disipación térmica progresiva. Este resultado se aproxima al límite crítico adoptado (65°C), evidenciando la necesidad de estrategias de control térmico para evitar patologías asociadas.

En el análisis bidimensional (TSA-2D), se evaluó la distribución espacial de la temperatura mediante la generación de mapas de isocontornos térmicos (isotermas) (Figura 4). Se observó que las temperaturas más elevadas se concentran en la región central del bloque, donde la disipación de calor es más limitada, mientras que las zonas próximas a la superficie presentan menores temperaturas debido al intercambio térmico con el medio externo.

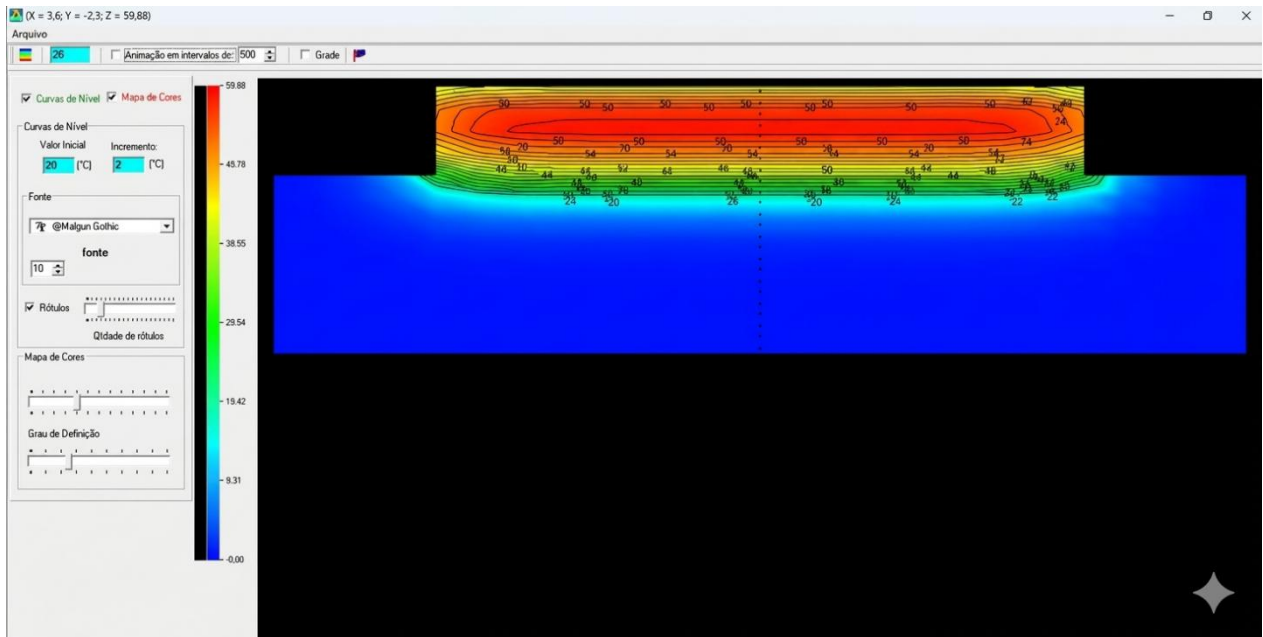


Figura 4. Modelación de isocores del bloque 17,00 × 10,60 × 1,00 m (TSD-2D con refinamiento).

Adicionalmente, la modelación en capas permitió simular el comportamiento térmico del hormigón considerando la secuencia constructiva del elemento (Figura 5).

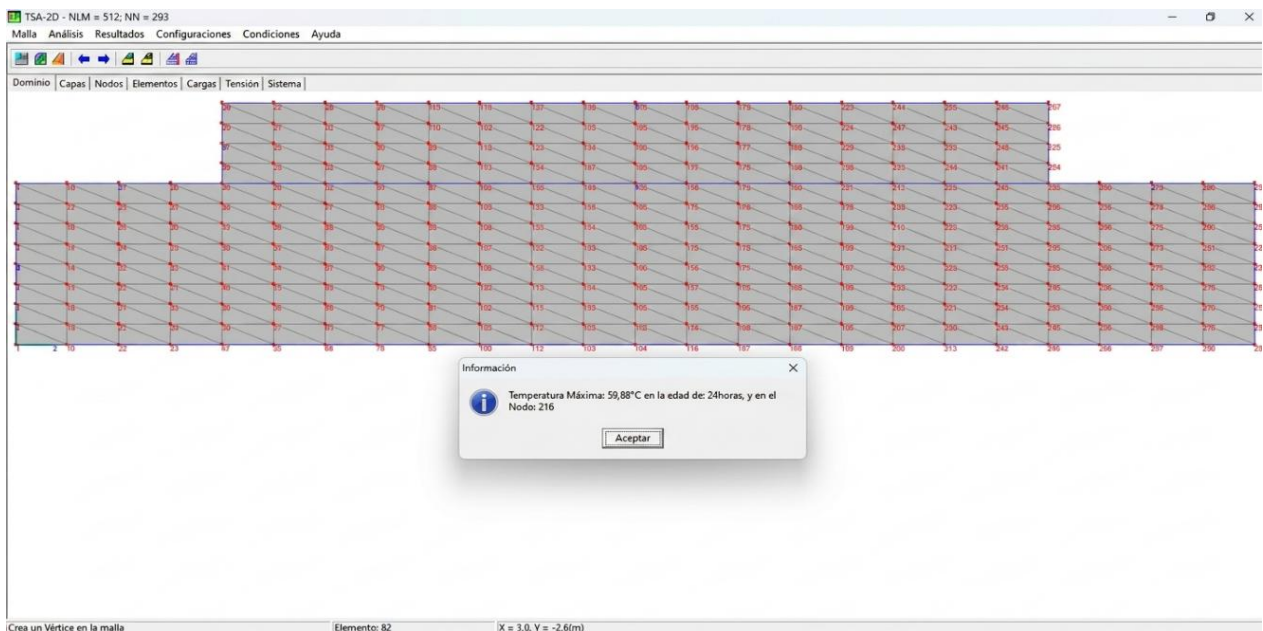


Figura 5. Modelación por capas del bloque 17,00 × 10,60 × 1,00 m (TSD-2D con refinamiento).

Los resultados mostraron que la ejecución por capas contribuye a reducir los gradientes térmicos internos, favoreciendo una disipación más uniforme del calor y disminuyendo el riesgo de fisuración térmica. En este sentido, la estrategia constructiva se muestra como un factor determinante en el control térmico de elementos masivos.

La discretización del dominio mediante una malla de elementos finitos refinada permitió capturar adecuadamente los gradientes térmicos, garantizando la precisión de los resultados obtenidos en las simulaciones.

3.2 Zapata de hormigón S14 (Simulación 1, en dos capas)

Se desarrolló la modelación de la zapata S14 del proyecto, considerando el hormigonado en dos etapas, con capas (equivalentes) de igual altura $h_0 = 1,45$ m y $h_1 = 1,45$ m, y control de la temperatura interna del hormigón mediante termopares, conforme se especifica más adelante.

También se asumió un intervalo de 5 días entre las dos capas, el uso de encofrado de madera contrachapada de 20 mm, mantenido por al menos 5 días, y la aplicación de curado continuo con agua durante el mismo período. Se recomienda que el curado se realice mediante el método de “piscina” en el caso de los bloques P5, P8, P10A y P10B, con una lámina de agua de al menos 10 cm, para que las condiciones reales de curado sean equivalentes al modelo numérico adoptado, reduciendo así el riesgo de elevación excesiva de la temperatura por hidratación. En los demás casos de zapatas, se deben mantener los encofrados durante 5 días con el uso de mantas saturadas permanentemente con agua sobre ellos.

En función del tipo de hormigón (agregados y cemento/curva de liberación de calor por hidratación), la temperatura de vertido establecida en 20 °C, las condiciones ambientales y las restricciones del terreno, el método de curado y el procedimiento de vertido en dos etapas, el programa simula el historial de temperaturas generadas por el calor de hidratación dentro del elemento a hormigonar.

Los resultados de la simulación evidencian un comportamiento térmico crítico, con picos de temperatura próximos al límite máximo adoptado (65 °C), lo que refuerza la necesidad de control térmico en este tipo de elementos masivos.

El pico de temperatura de la primera capa se produce 30 horas después del inicio del vertido, alcanzando 61 °C. Esta figura también ilustra el pico de la segunda capa, que ocurre 145 horas después del inicio de los trabajos (es decir, 115 horas después del segundo vertido), con un valor de 62 °C.

Se observa que, aunque la ejecución en dos capas permite cierto control de la evolución térmica, los valores máximos registrados permanecen elevados, indicando que la disipación de calor sigue siendo limitada en el interior del elemento.

Además, el desfase temporal entre los picos térmicos de cada capa contribuye a la reducción de gradientes térmicos abruptos, lo que puede disminuir el riesgo de fisuración en comparación con un hormigonado en una sola etapa.

3.3 Bloque de prueba 1,5 × 1,5 × 1,5 m (Simulación en una sola capa)

Se llevó a cabo el hormigonado de un bloque de prueba, con el objetivo de verificar la modelación y el estudio realizado. Este ensayo experimental permitió comparar los resultados obtenidos mediante simulación numérica con mediciones reales en obra, validando así el modelo adoptado. La temperatura máxima obtenida en la simulación numérica fue de 62,54 °C a las 24 horas (Figura 6).

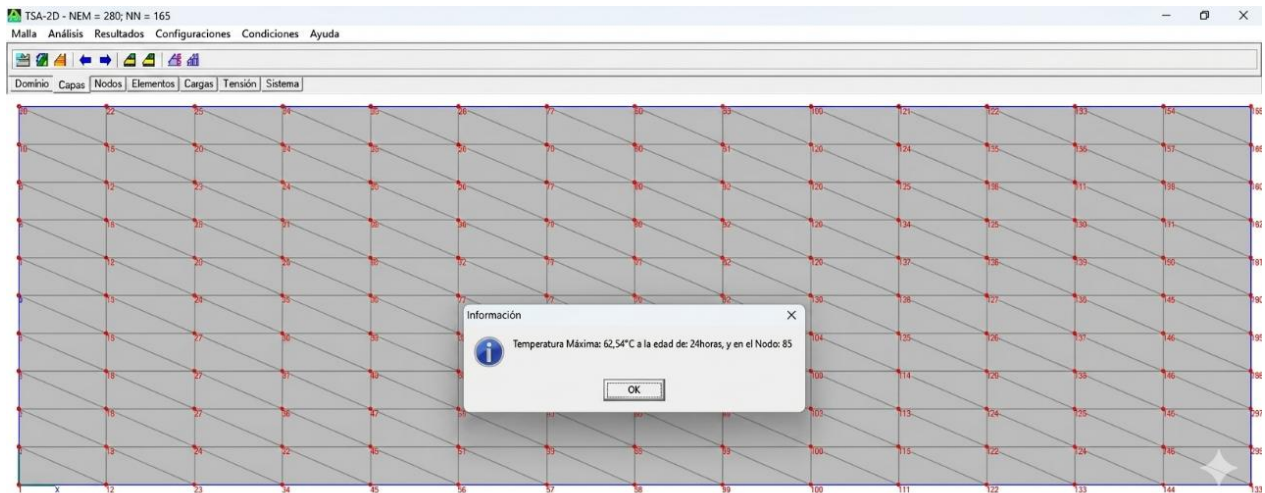


Figura 6. Pico máximo de T 62,54 °C del bloque de prueba (TSD-2D).

Tras el vertido, se realizó un seguimiento por 24 horas y la temperatura registrada en obra fue de 59,4 °C (Figura 7).



Figura 7. Registro con T 59,4 °C a las 24 horas del bloque de prueba.

Se puede afirmar que los resultados se encuentran dentro del margen de seguridad previsto para hormigón masivo. Asimismo, se observó una reducción progresiva de la temperatura a lo largo del tiempo, alcanzando valores del orden de 45 °C a las 72 horas, lo que confirma el comportamiento esperado de disipación térmica (Figuras 8 y 9).



Figura 8. Registro del bloque de prueba a las 72 horas.



Figura 9. Registro con T 45,0 °C a las 72 horas del bloque de prueba.

Es fundamental que todas las variables estén cuidadosamente controladas en obra, tales como: la cantidad de hielo aplicada el día del hormigonado, el tiempo de transporte, y la temperatura máxima de vertido de 24 °C, con la tolerancia previamente mencionada (Figura 10).

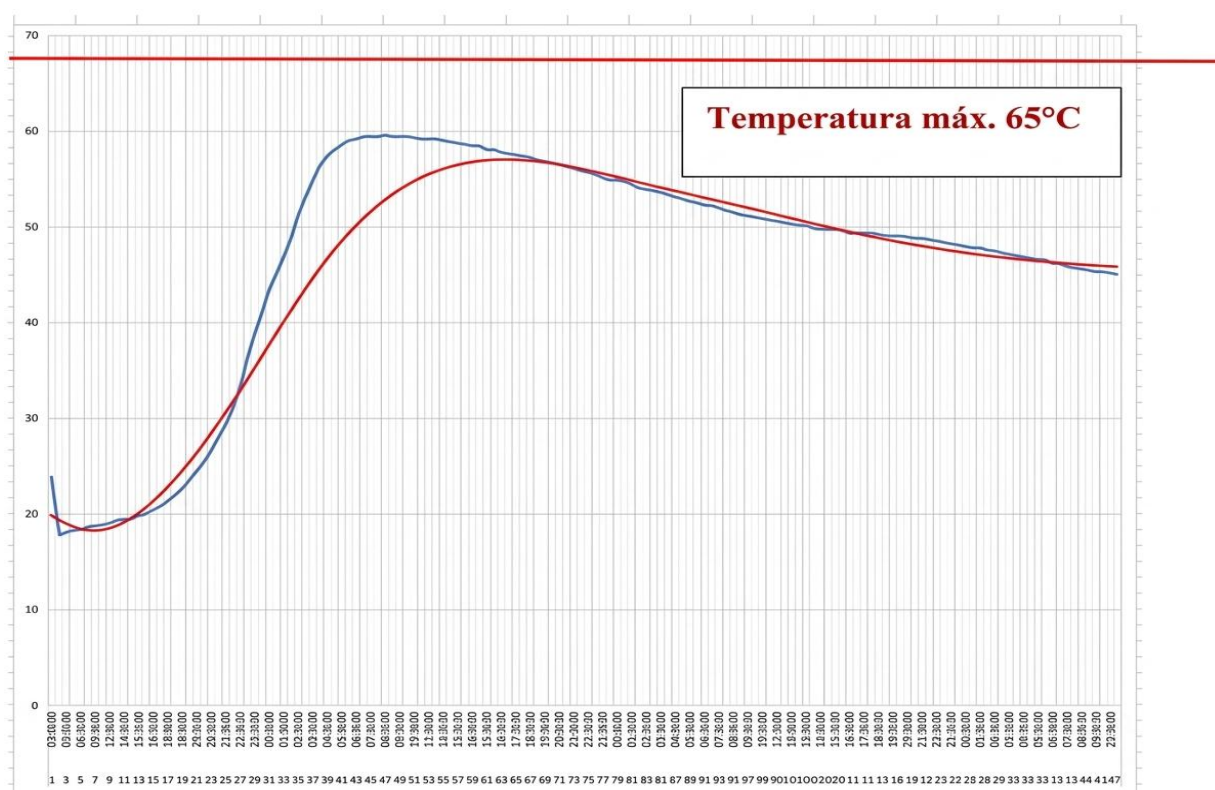


Figura 10. Registro con T 59,5 °C a las 72 horas del bloque de prueba (concretado).

Estos resultados confirman la efectividad de la estrategia adoptada (uso de hielo y control de temperatura de vertido) para limitar el incremento térmico en elementos de hormigón masivo. Finalmente, se recomienda también colocar 3 termopares en el bloque, en el plano central, en las posiciones indicadas para obtener valores promedio más precisos y representativos. Los termopares estarán situados en el eje del bloque, a 8,5 m de la cara lateral. La altura de la

Control de la temperatura en hormigón masivo para bloques de cimentación con simulación térmica em 2D: estudio de caso.

primera capa es de 1,00 metro, y verticalmente los tres (3) termopares estarán ubicados a 20,0 cm de altura del hormigón de limpieza, 50 cm y 80 cm, respectivamente, como se ilustra en la Figura 11.

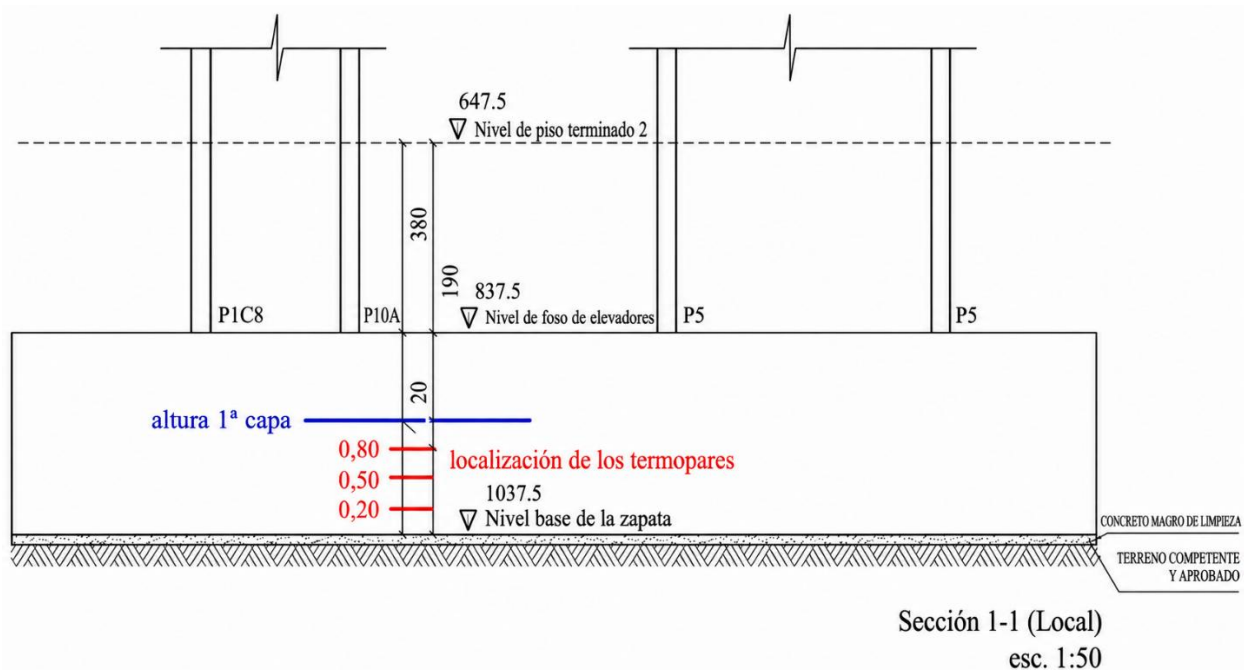


Figura 11. Mapa de ubicación de los termopares

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos confirman que el control térmico en elementos de hormigón masivo constituye un aspecto crítico para garantizar la integridad estructural y la durabilidad de fundaciones de gran volumen. La literatura reciente señala que la fisuración a edades tempranas está directamente relacionada con el calor de hidratación del cemento y con los gradientes térmicos generados en elementos de gran espesor, siendo la simulación numérica mediante elementos finitos una herramienta ampliamente utilizada para la predicción de estos fenómenos (Klemczak et al., 2024).

En el presente estudio, las simulaciones indicaron picos térmicos del orden de 62 °C en los elementos analizados, valores inferiores al límite de 65 °C adoptado como criterio de seguridad. Este resultado es relevante, ya que demuestra que la estrategia empleada permitió mantener la temperatura máxima dentro de un rango aceptable, aunque próximo al umbral crítico. En términos prácticos, ello indica que el control térmico no elimina completamente el riesgo, sino que lo mantiene bajo condiciones seguras siempre que las variables de ejecución sean estrictamente controladas, como la temperatura de vertido, el curado y el tiempo de transporte (Pessoa et al., 2024). Estudios previos han demostrado que la evolución del calor de hidratación y su interacción con las condiciones de contorno influyen directamente en la aparición de tensiones de tracción capaces de inducir fisuración en hormigón masivo (Gambale, 2017).

La distribución térmica observada en las simulaciones bidimensionales, con temperaturas más elevadas en la región central del bloque, es consistente con lo reportado en estudios recientes, que identifican el núcleo de elementos masivos como la zona más susceptible a la acumulación de calor debido a la limitada disipación térmica (Wang y Song, 2024). Por otro lado, las superficies presentan temperaturas más bajas, lo que favorece la generación de gradientes térmicos y, en consecuencia, de tensiones de tracción potencialmente fisurantes. En este sentido,

el uso de modelos bidimensionales permitió representar de forma más realista este comportamiento térmico.

Otro aspecto relevante es la influencia de la secuencia constructiva en el control térmico. Los resultados mostraron que la ejecución en dos capas contribuye a una reducción de los gradientes térmicos internos, debido al desfase temporal entre los picos de temperatura de cada capa. Este comportamiento ha sido reportado en investigaciones recientes, las cuales destacan que el control térmico en hormigón masivo depende de la combinación de múltiples estrategias, incluyendo la secuencia de hormigonado, el curado y el control de la temperatura inicial del material (Tran et al., 2023).

La validación experimental mediante el bloque de prueba refuerza la confiabilidad del modelo adoptado. La diferencia inferior al 5 % entre la temperatura máxima simulada (62,54 °C) y la medida en obra (59,4 °C a las 24 horas) indica una buena concordancia entre el modelo numérico y el comportamiento real del hormigón. Este resultado está en línea con estudios recientes que resaltan la importancia de validar los modelos térmicos mediante monitoreo en campo para garantizar su aplicabilidad en condiciones reales (Klemczak et al., 2024).

En relación con la estrategia de preenfriamiento, el uso de hielo en sustitución total del agua de amasado se mostró efectivo para reducir la temperatura inicial del hormigón y, en consecuencia, limitar el incremento térmico posterior. Este enfoque es consistente con lo descrito en la literatura, donde se señala que la reducción de la temperatura inicial es una de las medidas más eficientes para controlar el calor de hidratación en estructuras masivas (Aniskin et al., 2021). Sin embargo, los resultados también evidencian que esta estrategia, por sí sola, no es suficiente para garantizar un control térmico completo en elementos de gran volumen.

En este sentido, el comportamiento térmico del hormigón masivo depende de múltiples factores, incluyendo la composición del material, el contenido de cemento, el uso de adiciones minerales, la geometría del elemento y las condiciones de curado. Estudios recientes destacan que el uso de materiales cementantes suplementarios y estrategias combinadas de control térmico son fundamentales para reducir tanto el pico de temperatura como los gradientes térmicos internos (Danfour et al., 2024).

Desde el punto de vista de la durabilidad, el mantenimiento de la temperatura por debajo de 65 °C resulta particularmente relevante para minimizar el riesgo de formación tardía de etringita, fenómeno asociado a expansiones internas y deterioro progresivo del hormigón. Investigaciones recientes han demostrado que exposiciones térmicas elevadas a edades tempranas pueden favorecer alteraciones microestructurales que comprometen el desempeño a largo plazo del material (Mohr et al., 2024).

En síntesis, los resultados obtenidos evidencian que la combinación de simulación térmica, control de la temperatura de vertido, uso de hielo, curado adecuado y ejecución en capas constituye una estrategia eficaz para el control térmico en bloques y zapatas de hormigón masivo. La principal contribución de este estudio radica en la validación de estas estrategias mediante un caso real instrumentado, demostrando que la modelación numérica puede ser utilizada como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en obra, en concordancia con las tendencias actuales en el diseño y control de estructuras de hormigón masivo (Pessoa et al., 2024; Wang y Song, 2024).

6. CONCLUSIÓN

Este estudio presenta las directrices técnicas y operativas para la ejecución y el control del hormigonado de bloques y zapatas de cimentación de gran volumen (entre 30 m³ y 400 m³), con resistencia característica $f_{ck} > 50$ MPa, aplicadas en la obra Artesano Reserva Marista, ubicada en Goiânia-GO, Brasil.

Se adoptó como criterio general una temperatura máxima de colocación del hormigón de 24 °C

(con excepciones debidamente justificadas) y un límite de temperatura interna de 65 °C, considerando los efectos del calor de hidratación del cemento y el equilibrio entre tensiones inducidas y tensiones admisibles. Estos parámetros se establecieron con el objetivo de mitigar el riesgo de fisuración térmica y prevenir fenómenos deletéreos, como la formación tardía de etringita.

Las especificaciones de dosificación, junto con los procedimientos ejecutivos y de control del hormigón masivo fluido con uso de hielo, fueron desarrolladas específicamente para los elementos estructurales analizados en este estudio, considerando las condiciones particulares del proyecto, los materiales disponibles y las restricciones constructivas.

Los resultados obtenidos durante la implementación del plan de control térmico demostraron que las temperaturas máximas internas se mantuvieron por debajo del límite establecido de 65 °C, y que las temperaturas de colocación cumplieron los criterios definidos. Asimismo, se verificó un comportamiento térmico coherente con las simulaciones numéricas, evidenciando una adecuada disipación del calor y ausencia de gradientes térmicos críticos capaces de inducir fisuración.

La validación experimental, mediante el monitoreo en obra, confirmó la confiabilidad del modelo térmico adoptado, evidenciada por la proximidad entre los valores simulados y los medidos. Además, se constató la adecuada homogeneidad del hormigón, sin indicios de segregación ni variaciones térmicas significativas entre los puntos de control.

En este contexto, se concluye que la estrategia adoptada — basada en la combinación de modelación numérica, control de la temperatura de vertido, uso de hielo, ejecución en capas y curado adecuado — resultó eficaz para garantizar el control térmico del hormigón masivo, contribuyendo al desempeño estructural y a la durabilidad de los elementos de cimentación.

Finalmente, se destaca que la metodología empleada puede ser replicada en proyectos similares de hormigón masivo, constituyendo una herramienta técnica relevante para la planificación y el control de obras que involucren elementos de gran volumen.

7. REFERENCIAS

ABNT (2023), *NBR 6118: Projeto de estruturas de hormigón*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 242 p.

Aniskin, N., Nguyen, T. C., Bui, A. K. (2021), *The use of ice to cool the concrete mix in the construction of massive structures*. E3S Web of Conferences, 264:02047. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402047>

ASTM International. (2003), *ASTM C231/C231M-17a Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. https://doi.org/10.1520/C0231_C0231M-17A

ASTM International. (2017), *ASTM C1702-17 Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cement*. <https://doi.org/10.1520/C1702-17>

Comisión Permanente del Hormigón, EHE. (2008), *Instrucción de Hormigón Estructural*. Ministerio de Obras Públicas e Urbanismo, Madrid, España.

Danfour, A., et al. (2024), *Numerical study of potential delayed ettringite formation in cement-based materials*. Sustainability, 16(1):389. <https://doi.org/10.3390/su16010389>

Gaitán, R. M. (2016), *Análisis del comportamiento térmico del hormigón masivo en grandes elementos estructurales*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, p. 98.

Gambale, P. G. (2017), *Estudo do calor de hidratação do hormigón massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, p. 120. 2017.

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., Scrivener, K. L. (2020), *Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries*. Nature Reviews Earth & Environment, 1:559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>

Control de la temperatura en hormigón masivo para bloques de cimentación con simulación térmica em 2D: estudio de caso.

Penha, J. R. B., Jesus, S., Oliveira, A. C. R., Candido, P., Couto, L. A., Pazini Figueiredo, E. J.

- Klemczak, B., Batog, M., Pilch, M. (2024), *Multi-step procedure for predicting early-age thermal cracking risk in mass concrete structures*. *Materials*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ma17153700>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008), *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3ª ed. McGraw-Hill, New York, USA, p.659.
- Mohr, B. J., Islam, M. S., Bryant, L. (2024), *Long-term behavior of mortars experiencing delayed ettringite formation*. *Cement and Concrete Composites*, 145:100104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.100104>
- Pessoa, B. S., et al. (2024), *Assessment of thermal stress risk in mass concrete elements: use of expedited diagrams*. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 17(4):e17412. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000400012>
- Rejón, S. (2000), *Efectividad de imprimaciones al refuerzo del concreto bajo diferentes condiciones superficiales*. Masters Thesis, Universidad Autónoma de Yucatán, p. 35.
- Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2018), *Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry*. *Cement and Concrete Research*, 114:2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Taylor, H. F. W. (1997), *Cement Chemistry*. 2ª ed. Thomas Telford Publishing, London, UK, 459 p.
- Tran, M. V., Chau, V. N., Nguyen, P. H. (2023), *Prediction and control of temperature rise of massive reinforced concrete elements*. *Case Studies in Construction Materials*, 18:e01817. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01817>
- Wang, B., Song, Y. (2024), *Study on the hydration heat effect and pipe cooling system of a mass concrete pile cap*. *Buildings*, 14(8):2413. <https://doi.org/10.3390/buildings14082413>