

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

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

* Autor de Contato: jrbpenha@gmail.com

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

Recebido: 04/03/2026 | Correções recebidas: 11/04/2026 | Aceito: 14/05/2026 | Publicado: 01/09/2026

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.

Citar como: Penha, J. R. B., Jesus, S., Oliveira, A. C. R., Candido, P., Couto, L. A., Pazini Figueiredo, E. J. (2026), "Controle de temperatura em hormigón maciço para blocos de fundação com simulação térmica 2D: estudo de caso.", Revista ALCONPAT, 16 (3), pp. 585 – 602, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1099>

¹ Doutorando 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.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a atividade de concepção da ideia original contou com a contribuição de J. R. B. Penha (70%) e E. J. Pazini Figueiredo (30%). No desenvolvimento do modelo participaram J. R. B. Penha (40%) e P. Candido (60%). Na experimentação participaram S. Jesus (50%) e L. A. Couto (50%). A coleta de dados contou com a participação de S. Jesus (50%), A. C. R. Oliveira (30%) e L. A. Couto (20%). Na análise dos resultados participaram J. R. B. Penha (35%), A. C. R. Oliveira (25%), P. Candido (20%) e E. J. Pazini Figueiredo (20%). A redação do manuscrito foi realizada por J. R. B. Penha (70%) e S. Jesus (30%). A revisão do manuscrito contou com a participação de S. Jesus (40%) e A. C. R. Oliveira (60%). A supervisão geral do estudo foi realizada por E. J. Pazini Figueiredo (100%). Por fim, a revisão crítica do manuscrito foi realizada por E. J. Pazini Figueiredo (100%).

Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2027, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 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.

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

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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. TABELA DE NOMENCLATURA

Símbolo / Abreviação	Definição	Unidade
fck	Resistência característica à compressão do concreto	MPa
TSA	Thermal Structure Analysis (software de análise térmica)	—
TSA-1D	Simulação térmica unidimensional	—
TSA-2D	Simulação térmica bidimensional	—
PCE	Éter policarboxilato (tipo de aditivo superplastificante)	—
CP IV 32 RS	Cimento Portland composto com adição pozzolânica e resistência a sulfatos	—
RA1	Aditivo redutor de água tipo 1	—
RA2	Aditivo redutor de água tipo 2	—
h ₀ , h ₁	Altura das camadas de concretagem	m
°C	Grau Celsius (temperatura)	°C
kcal/kg·°C	Calor específico	kcal/kg·°C
m ² /dia	Difusividade térmica	m ² /dia

2. INTRODUÇÃO

O fenômeno da hidratação do cimento Portland tem sido amplamente investigado nos últimos anos. Esse processo resulta de reações superficiais entre a água e o grão de cimento, as quais envolvem mecanismos de dissolução-precipitação ou reações topoquímicas (hidratação em estado sólido), de natureza exotérmica (Mehta e Monteiro, 2008; Taylor, 1997). Tais reações químicas liberam calor, o que pode provocar elevações significativas de temperatura, não apenas em estruturas de concreto massa, mas também em estruturas convencionais, especialmente devido às características dos concretos atuais, que apresentam elevados teores de cimento, altas resistências características, dimensões consideráveis, condições limitadas de dissipação térmica e restrições ao movimento.

A isso soma-se o uso crescente de concretos especiais, que não necessariamente incorporam maiores quantidades de cimento em sua composição, uma vez que as tendências atuais da engenharia de materiais buscam otimizar o desempenho mecânico e reológico por meio do uso de adições minerais e estratégias de dosagem mais eficientes, com o objetivo de reduzir a pegada de carbono associada ao cimento (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020). Nesses casos, o comportamento acoplado termoquímico-mecânico da estrutura torna-se determinante para o seu dimensionamento.

Entretanto, no contexto atual da construção sustentável, o desenvolvimento de concretos especiais tem evoluído para a otimização do teor de cimento por meio da utilização de materiais cimentícios suplementares (como cinzas volantes, escórias e filer calcário), com o objetivo de reduzir a pegada de carbono sem comprometer o desempenho mecânico e reológico (Scrivener et al., 2018; Habert et al., 2020).

Ainda assim, dependendo das condições de projeto e execução, esses concretos podem apresentar comportamento térmico significativo, especialmente em elementos de grande volume, o que mantém a relevância da análise termoquímico-mecânica nesse tipo de estrutura.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), conhecer a quantidade de calor liberado é fundamental, pois esse fenômeno pode ser tanto benéfico quanto prejudicial. O concreto gera calor desde o início da hidratação do cimento e, nas primeiras idades, apresenta baixo módulo de elasticidade e começa a ganhar resistência justamente enquanto sua temperatura se eleva. Nesse período, surgem tensões de compressão que não provocam fissuração. No entanto, uma vez que a temperatura máxima da estrutura começa a se equilibrar com a temperatura ambiente, essas tensões compressivas tendem

a diminuir até se transformarem em tensões de tração. Como o concreto apresenta baixa resistência à tração, pode começar a fissurar caso essas tensões superem sua capacidade resistente a essa solicitação.

As fissuras reduzem a capacidade resistente do elemento estrutural afetado e diminuem a durabilidade do concreto, uma vez que facilitam a entrada de agentes agressivos. No caso de blocos e sapatas, trata-se de elementos estruturais fundamentais, responsáveis por suportar toda a edificação e transmitir suas cargas aos elementos de fundação profunda. Portanto, o surgimento de fissuras pode comprometer seriamente a segurança estrutural e a estabilidade da edificação. Além disso, o reparo desses elementos críticos é complexo, o que reforça a importância da adoção de medidas preventivas.

O presente estudo tem como objetivo apresentar, de forma concisa e objetiva, a simulação térmica computacional de blocos e sapatas de fundação de grandes dimensões (volumes entre 30 m³ e 400 m³), com $f_{ck} > 50$ MPa, pertencentes a uma obra residencial localizada em Goiânia-GO. A simulação foi realizada pela empresa de consultoria JP Prime Engenharia e Consultoria.

3. PRESSUPOSTOS E DADOS DE ENTRADA

3.1 Preâmbulo.

O estudo térmico, também denominado cálculo térmico, tem como objetivo reduzir o risco de fissuração em elementos estruturais devido à dificuldade de dissipação do calor gerado durante a hidratação do cimento. Esse tipo de análise deve ser desenvolvido de forma específica para cada caso, uma vez que existem obras nas quais diferentes elementos estruturais requerem simulações independentes, considerando fatores como sua geometria particular e restrições construtivas.

A simulação térmica é realizada por meio de ferramentas computacionais, a partir de um conjunto de dados de entrada, dentre os quais se destacam: as dimensões do elemento (especialmente a espessura ou altura), sua geometria, o tipo de cimento (curva de liberação de calor por hidratação) e os agregados utilizados na mistura candidata (litologia), o tipo de fôrma, as condições de apoio do elemento, o método de cura adotado, a temperatura ambiente e a temperatura máxima de lançamento do concreto (por exemplo, com o uso de gelo em substituição à água de mistura).

Nesse contexto, buscou-se determinar, por meio de simulações computacionais, a viabilidade de concretar os blocos/sapatas analisados em uma única etapa, utilizando 100% de gelo como substituto da água de amassamento. Para isso, foi considerada a mistura fluida desenvolvida por meio de um estudo experimental de dosagem, realizado em 03/10/2024, bem como os condicionantes técnicos previamente mencionados.

A JP Prime Engenharia e Consultoria foi responsável pela realização das simulações térmicas, cujos resultados indicaram que não seria viável concretar todos os elementos de grande volume em uma única etapa, dado o conjunto de premissas e cenários analisados (considerando a combinação entre altura, volume e geometria do elemento).

Esse resultado evidencia a influência significativa das dimensões do elemento na dissipação térmica, indicando que, quanto maior o volume e a espessura, maior é o acúmulo de calor e, consequentemente, o risco de fissuração térmica.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos blocos/sapatas analisados (destacados em amarelo), a quantidade de camadas requeridas para sua execução e o número de termopares utilizados para o monitoramento térmico no interior do concreto. Ao todo, foram realizadas quatro simulações, focadas em elementos com elevado potencial de geração de calor, considerados críticos para o controle térmico. Observa-se que todos os elementos avaliados requereram concretagem em duas camadas, o que reforça a necessidade de segmentar o lançamento como estratégia de controle térmico.

Tabela 1. Quantidade de camadas e termopares por bloco (Empreendimento).

Projeto de referência: obra artesano reserva marista						
Bloco	Lado A (m)	Lado B (m)	H total (m)	Vol. Real (m ³)	n. camadas	n. termopares
Bloco de fundação	10,60	17,00	2,00	360,4	2	6
Sapata S14	4,00	9,00	1,45	66,38	2	6
Sapata S6+S31	7,00	7,00	2,00	98,00	2	6
Sapata S9+S36	7,00	7,00	2,00	98,00	2	6

Neste estudo, as restrições adotadas estabeleceram como limite uma temperatura máxima de 65 °C no interior de cada camada, com o objetivo de evitar tanto a fissuração térmica (resultado do desequilíbrio de tensões) quanto, principalmente, o fenômeno deletério conhecido como formação tardia de etringita. Da mesma forma, considerou-se fundamental não ultrapassar a temperatura máxima de lançamento do concreto no estado fresco, previamente definida nas simulações, a qual foi limitada a 24 °C.

Esses critérios permitiram estabelecer uma base de avaliação consistente para a comparação entre cenários de concretagem em uma e duas etapas.

Por fim, recomenda-se que todos os demais blocos/sapatas que não fazem parte do grupo 1 sejam concretados com a dosagem candidata apresentada no relatório de dosagem da JP Prime, reproduzido em uma seção posterior deste estudo, ou seja, sem o uso de gelo, conforme o traço analisado.

3.2 Características climáticas.

Um dos principais aspectos na simulação de tensões térmicas é a temperatura média ambiente, que serve de base para determinar a variação de temperatura à qual o elemento estrutural será submetido.

Nesse contexto, pode-se observar que a cidade de Goiânia apresenta temperaturas médias diárias de 24,6 °C e 24,2 °C durante os meses de novembro e dezembro, respectivamente, com máximas médias de 30,0 °C e 29,4 °C e mínimas médias de 18,5 °C e 17,0 °C (os meses em que as atividades de fundição do concreto provavelmente serão realizadas), segundo dados disponíveis no site do Centro Integrado de Informação Agrometeorológica (CIIAGRO) do Governo do Estado de São Paulo.

Esses valores indicam um cenário climático caracterizado por temperaturas elevadas, que podem intensificar o aumento de temperatura dentro do concreto, dificultando a dissipação de calor e aumentando o risco de rachaduras térmicas.

Esses dados são apresentados na Tabela 2 (destacada em vermelho) e graficamente na Figura 1, que resume as condições ambientais adotadas como referência para a simulação térmica.

Tabela 2. Temperaturas ambientais (média, máxima e mínima) em Goiânia, em °C.

Mês	Dias	Temperatura média diária (°C)	Temperatura máxima média (°C)	Temperatura mínima média (°C)
Janeiro	1550	24,3	28,9	18,0
Fevereiro	1412	24,5	28,5	19,5
Março	1550	24,6	28,4	18,5
Abril	1500	24,2	28,2	17,5
Maio	1522	22,4	27,0	13,0
Junho	1470	21,1	26,0	10,5
Julho	1519	21,1	27,0	11,0
Agosto	1519	23,1	29,2	13,5
Setembro	1470	25,1	30,5	14,0
Outubro	1519	25,2	31,0	18,0
Novembro	1470	24,6	30,0	18,5
Dezembro	1519	24,2	29,4	17,0

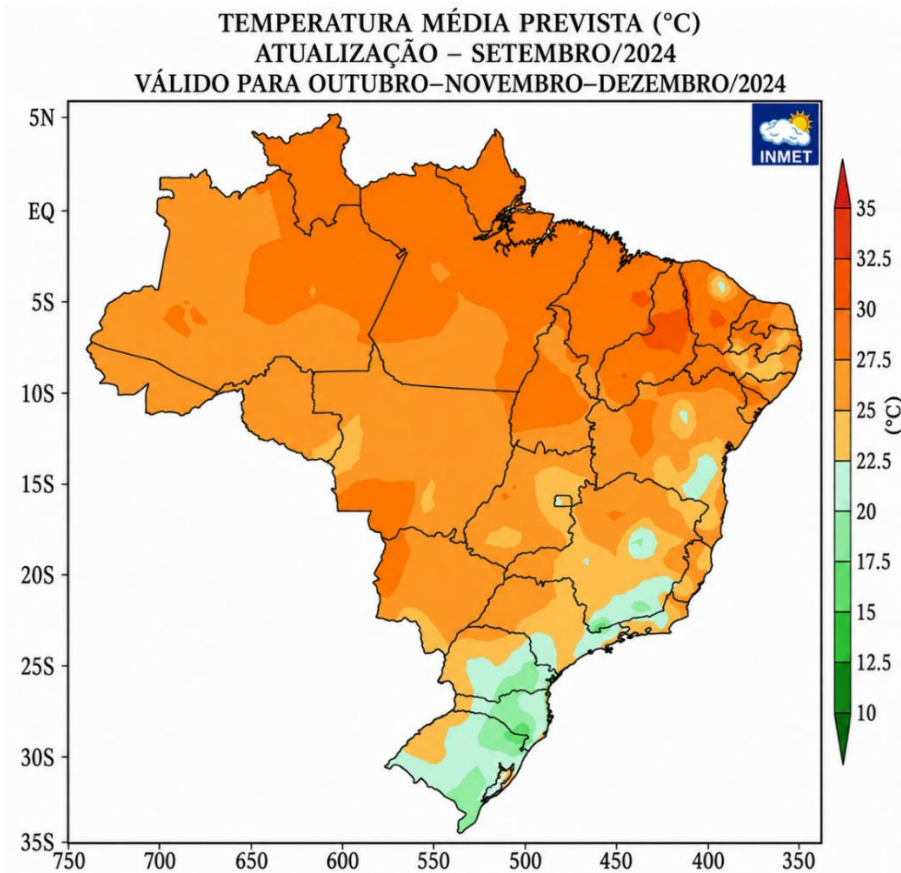


Figura 1. Temperaturas ambientais (méd., máx. e mín.) em Goiânia segundo o INMET, em °C.

Para a simulação térmica, adotou-se uma temperatura ambiente constante de 30 °C, considerada representativa das condições mais desfavoráveis para o controle térmico durante o período analisado. Considerando que os dados apresentados correspondem a medições históricas consolidadas e representativas do clima local, optou-se por não incluir representações gráficas adicionais, priorizando a clareza e a objetividade na apresentação dos parâmetros adotados para a simulação térmica.

3.3 Concreto e insumos.

O concreto empregado na produção das sapatas/blocos objeto deste trabalho (Tabela 1) deve ser obtido mediante uma mistura enérgica e homogênea dos materiais disponíveis, de modo que atenda a uma resistência característica mínima especificada em projeto ($f_{ck} \geq 50$ MPa), apresente baixo calor de hidratação, boas condições de dissipação térmica e trabalhabilidade adequada aos meios de transporte, produtividade e lançamento do concreto.

Neste caso específico, foi dosado em laboratório um concreto especial, fluido, com 100% de gelo em substituição à água de amassamento, como estratégia para reduzir a temperatura inicial do concreto e, conseqüentemente, mitigar o incremento térmico durante a hidratação.

A empresa Ciplan, responsável pela produção desse concreto, foi consultada e forneceu as propriedades e características dos materiais a serem utilizados na mistura (insumos provenientes da unidade de Aparecida de Goiânia/GO), conforme detalhado a seguir.

3.3.1 Agregados:

- Brita 0 e 1 (Gnaiss), agregado graúdo, com dimensão máxima característica de 16,0 mm e módulo de finura igual a 10,43% para a Brita 1, e com dimensão máxima característica de 16,0 mm e módulo de finura igual a 8,43% para a Brita 0. Agregados provenientes da Pedreira Araguaia; calor específico adotado: 0,2 kcal/kg.°C.
- Areia natural fina quartzosa, agregado miúdo, com dimensão máxima característica de 4,8 mm e módulo de finura igual a 1,34%. Agregado proveniente do município de Israelândia de Goiás; calor específico adotado: 0,2 kcal/kg.°C.
- Areia britada tipo II (granítica), agregado miúdo, com dimensão máxima característica de 0,6 mm e módulo de finura igual a 3,25%. Agregado proveniente de Guaporé; calor específico adotado: 0,2 kcal/kg.°C.

3.3.2 Cimento:

- Cimento tipo CP IV 32 RS (proveniente da Ciplan Cimento Planalto S/A – Unidade de Brasília). Relatório de Ensaio identificado como nº 158184, amostra 262180, datado de 19 de março de 2024 (amostra coletada em 29/12/2023), disponível para consulta no Anexo G deste relatório.

3.3.3 Adição de sílica ativa:

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

3.3.4 Aditivo plastificante Mid-Range à base de Éter Policarboxilato (PCE) e polifuncional:

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

3.3.5 Água total (gelo em substituição à água de amassamento + umidade das areias):

- Gelo: calor específico adotado = 0,5 kcal/kg.°C.
- Água potável: calor específico = 1,0 kcal/kg.°C / calor latente = 80 kcal/kg.

3.3.6 Dosagem candidata (estudo experimental de dosagem)

Tabela 3. Dosagem candidata, em materiais secos, com fck de 50 MPa aos 28 dias de idade.

Parâmetro	Valor
Dosagem do concreto	
Consumo de cimento (CP IV 32 RS)	432 kg/m ³
Relação água/cimento	0,44
Adição de sílica ativa (Tecnosil)	48 kg/m ³
Água total	190 kg/m ³ (120 kg de gelo + 70 kg de umidade das areias)
Água efetiva	70 kg/m ³
Gelo real	120 kg/m ³
Teor de argamassa	55 %
Ar incorporado	2,0 %
Consistência (slump)	19,0 cm
Massa específica	2386 kg/m ³
Areia quartzosa fina	279 kg/m ³
Areia britada tipo II	430 kg/m ³
Brita 0 (gnaisse)	284 kg/m ³
Brita 1 (gnaisse)	717 kg/m ³
Aditivos (plastificante + polifuncional)	6,24 kg/m ³
Propriedades térmicas do concreto (segundo a literatura)	
Difusividade térmica	0,11 m ² /dia
Coeficiente de dilatação térmica	1×10^{-5} 1/°C
Calor específico	0,240 kcal/kg·°C

3.3.7 Quantidade de gelo para blocos e sapatas.

Por razões de praticidade, no que se refere à incorporação do gelo, definiu-se que seria substituída a totalidade da água de amassamento, descontando-se o teor de umidade presente nos agregados (considerando-se uma umidade de 4,9% para a areia fina natural e de 7,9% para a areia artificial, segundo informações fornecidas pelo laboratório da central de concreto). Com base nesses valores, estimou-se uma necessidade de aproximadamente 42 sacos de gelo de 20 kg por caminhão com carga de 7 m³ (válido exclusivamente para sacos de 20 kg). Esse procedimento permitiu reduzir significativamente a temperatura inicial do concreto, constituindo uma medida eficaz de controle térmico em elementos de grande volume.

Recomenda-se confirmar esses valores de umidade por meio da análise de dados históricos e de ensaios realizados na data do evento de concretagem, bem como verificar o volume real de carga do caminhão-betoneira e a massa exata de cada saco de gelo, a fim de evitar erros.

Segundo o balanço térmico realizado para a dosagem candidata (Tabela 2) e as simulações experimentais efetuadas em laboratório sob condições semelhantes às da obra, determinou-se que a temperatura máxima esperada do concreto ao chegar ao local não deve ultrapassar 24 °C (já considerando uma margem em relação ao aumento térmico decorrente do transporte).

Em ensaios realizados na central de concreto da Ciplan, a temperatura do concreto fresco registrada foi da ordem de 15,2 °C, considerando gelo a 0,9 °C, temperatura ambiente média de 25 °C e umidade relativa de 75%. Essa temperatura foi medida após 10 minutos de mistura na betoneira em movimento, representando um cenário bastante favorável. Além disso, a temperatura medida após 30 minutos de mistura não ultrapassou 18 °C (ver relatório fotográfico correspondente). Esses

resultados confirmam a eficiência do uso de gelo como estratégia para o controle térmico do concreto fresco.

A consultoria foi informada de que, em princípio, a central da Ciplan em Aparecida de Goiânia/GO seria responsável pelo fornecimento do concreto (localizada a aproximadamente 10,2 km de distância, com tempo estimado de percurso de 30 minutos em dias úteis). Nesse contexto, recomenda-se que a temperatura do gelo seja fixada em -5°C no momento da dosagem na central. Nessa condição, estima-se que a temperatura de trabalho do concreto será da ordem de 15°C , o que proporciona uma boa margem de segurança, evitando a necessidade de rejeitar caminhões exclusivamente por questões térmicas.

Desse modo, estabelece-se um limite máximo de aceitação da temperatura do concreto entregue por cada caminhão individual de 23°C , com tolerância de até 1°C para os caminhões correspondentes ao segundo evento de concretagem/segunda camada do elemento estrutural (em caso de concretagens em duas etapas). Em outras palavras, não poderão ser aceitos caminhões com temperatura superior a 24°C , exceto nas condições da segunda camada, nas quais se aceita até 25°C . Em eventos de concretagem única, o limite permanece em 24°C .

4. ESTUDO TÉRMICO

4.1 Preâmbulo.

O estudo térmico foi realizado computacionalmente por meio do método dos elementos finitos, utilizando o software TSA – 1D e TSA – 2D, que permite simular o histórico de temperaturas e as tensões geradas pelas diferenças térmicas no interior do elemento estrutural a ser concretado. O software TSA (*Thermal Structure Analysis*) é uma ferramenta computacional baseada no método dos elementos finitos, desenvolvida para a simulação da evolução térmica em estruturas de concreto massa. Sua aplicação permite prever com precisão os picos de temperatura internos, a distribuição térmica ao longo do tempo e os riscos de fissuração térmica, sendo amplamente utilizado em projetos de infraestrutura e edificações de grande porte. Neste estudo, foi utilizado nas versões TSA-1D e TSA-2D, com o objetivo de modelar diferentes geometrias e cenários construtivos de sapatas e blocos de fundação.

Para a estimativa da resistência à tração, o software já fornece os valores de referência conforme os padrões normativos, segundo o estabelecido na norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2023).

A modelagem foi simulada tanto em uma única etapa quanto em duas etapas e, caso as temperaturas internas ultrapassassem 65°C ou houvesse desequilíbrio de tensões, a alternativa restante seria dividir o elemento em três ou mais camadas (último recurso), uma vez que a dosagem candidata já estava definida (com consumo mínimo de cimento e a máxima quantidade possível de gelo por metro cúbico, ou seja, parâmetros já fixados).

Os modelos computacionais consideraram a interação do bloco com o solo, bem como a discretização do domínio por meio de uma malha refinada de elementos finitos, o que permitiu uma representação adequada dos gradientes térmicos no interior do elemento. A partir dessa modelagem, foram realizadas simulações térmicas unidimensionais (TSA-1D) e bidimensionais (TSA-2D), com o objetivo de analisar a evolução temporal da temperatura e os gradientes térmicos no interior do bloco de fundação.

Nas Figuras 2 e 3, apresenta-se o cálculo térmico do bloco e a modelagem em duas camadas (com interação com o solo), bem como a malha refinada de elementos finitos adotada para o bloco principal e a sapata S14.

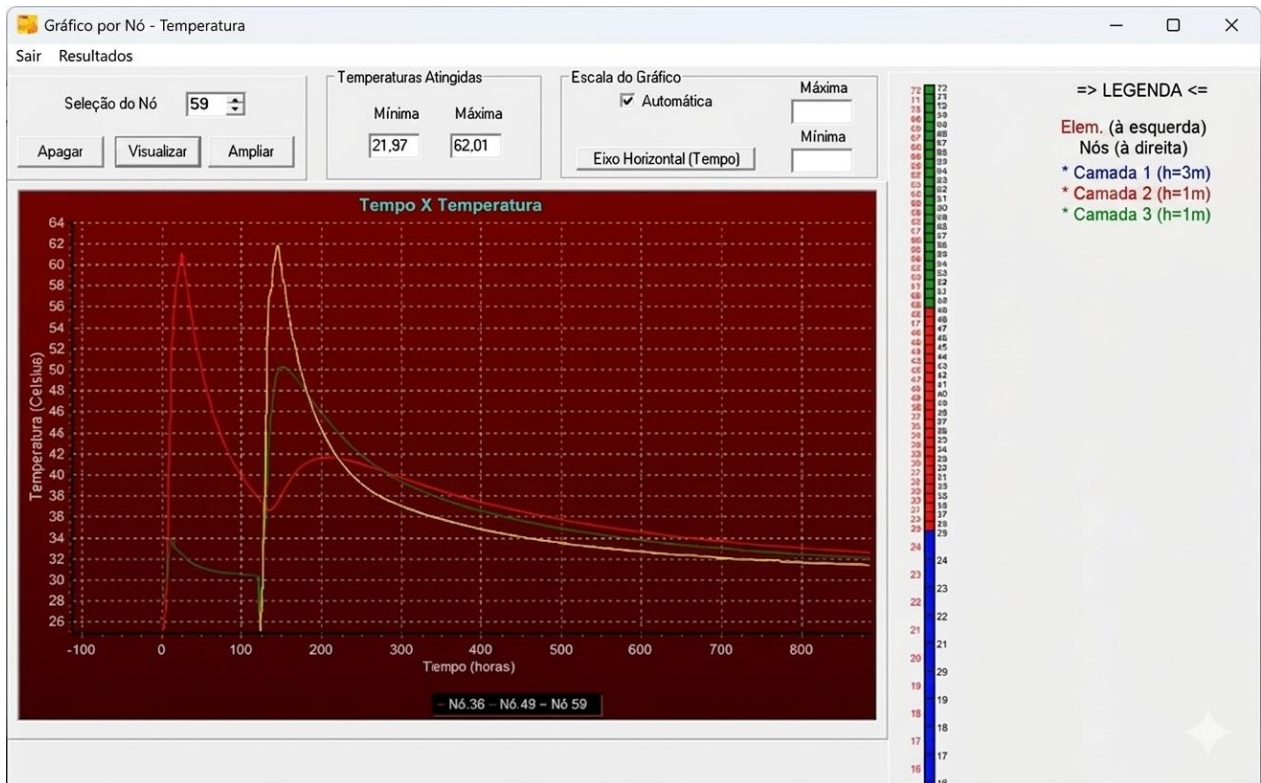


Figura 2. Cálculo térmico do Bloco $17,00 \times 10,60 \times 1,00$ m (TSA-1D).

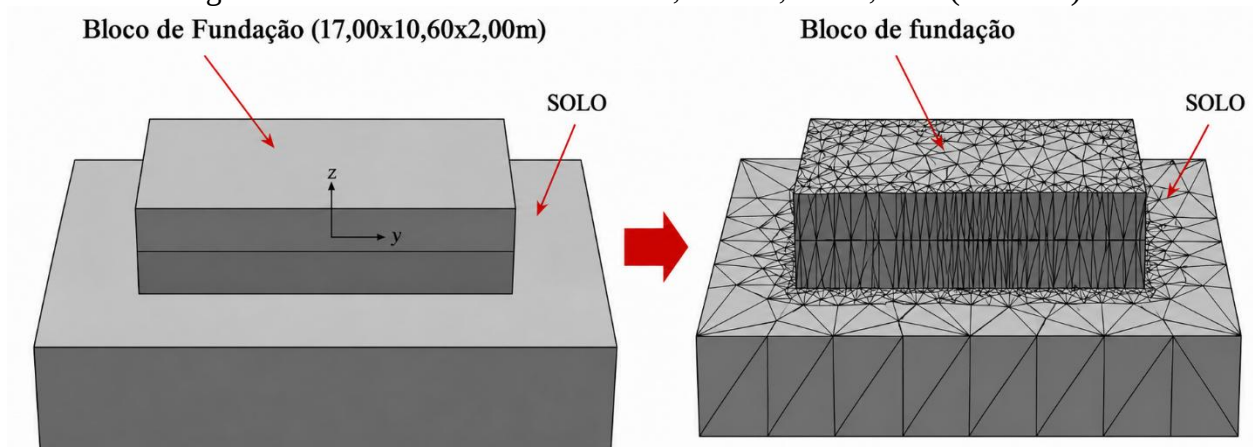


Figura 3. Modelagem adotada em duas camadas para o bloco principal $17,00 \times 10,60 \times 2,00$ m. Na análise unidimensional (TSA-1D), correspondente ao bloco de dimensões $17,00 \times 10,60 \times 1,00$ m, foram obtidas curvas de temperatura em função do tempo para diferentes pontos representativos do elemento. Os resultados indicaram uma temperatura máxima da ordem de 62°C , alcançada em idades iniciais do concreto, seguida por uma fase de dissipação térmica progressiva. Esse resultado aproxima-se do limite crítico adotado (65°C), evidenciando a necessidade de estratégias de controle térmico para evitar patologias associadas.

Na análise bidimensional (TSA-2D), foi avaliada a distribuição espacial da temperatura por meio da geração de mapas de isocontornos térmicos (isotermas) (Figura 4). Observou-se que as temperaturas mais elevadas se concentram na região central do bloco, onde a dissipação de calor é mais limitada, enquanto as zonas próximas à superfície apresentam temperaturas menores devido à troca térmica com o meio externo.

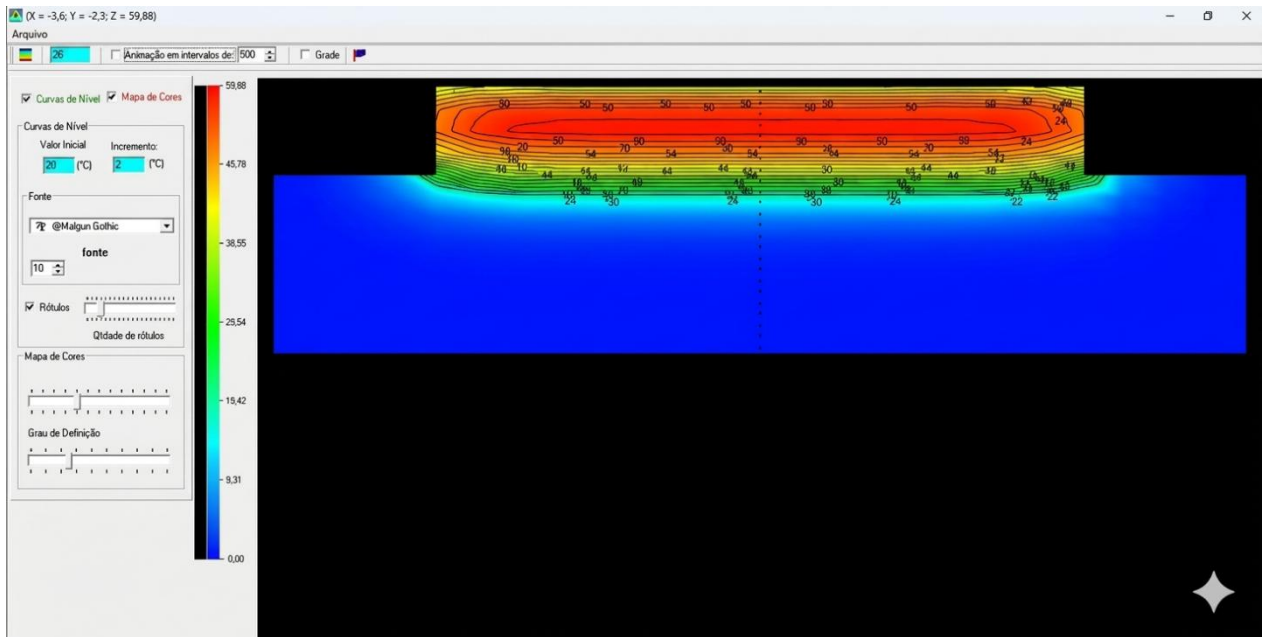


Figura 4. Modelagem de isocontornos do bloco $17,00 \times 10,60 \times 1,00$ m (TSA-2D com refinamento).

Adicionalmente, a modelagem em camadas permitiu simular o comportamento térmico do concreto considerando a sequência construtiva do elemento (Figura 5).

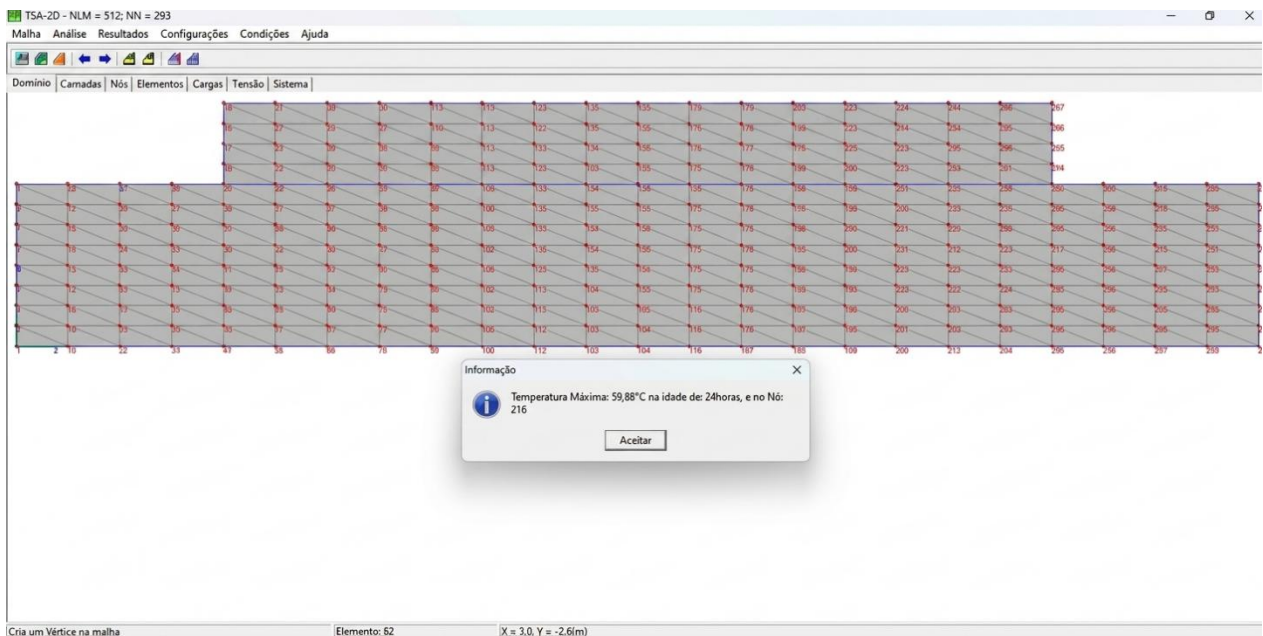


Figura 5. Modelagem em camadas do bloco $17,00 \times 10,60 \times 1,00$ m (TSA-2D com refinamento).

Os resultados mostraram que a execução em camadas contribui para reduzir os gradientes térmicos internos, favorecendo uma dissipação mais uniforme do calor e diminuindo o risco de fissuração térmica. Nesse sentido, a estratégia construtiva mostra-se um fator determinante no controle térmico de elementos massivos.

A discretização do domínio por meio de uma malha refinada de elementos finitos permitiu captar adequadamente os gradientes térmicos, garantindo a precisão dos resultados obtidos nas simulações.

4.2 Sapata de concreto S14 (Simulação 1, em duas camadas).

Foi desenvolvida a modelagem da sapata S14 do projeto, considerando a concretagem em duas etapas, com camadas (equivalentes) de mesma altura $h_0 = 1,45$ m e $h_1 = 1,45$ m, e controle da temperatura interna do concreto por meio de termopares, conforme especificado adiante.

Também foi considerado um intervalo de 5 dias entre as duas camadas, o uso de fôrma de madeira compensada de 20 mm, mantida por pelo menos 5 dias, e a aplicação de cura contínua com água durante o mesmo período. Recomenda-se que a cura seja realizada pelo método de “piscina” no caso dos blocos P5, P8, P10A e P10B, com uma lâmina de água de pelo menos 10 cm, para que as condições reais de cura sejam equivalentes ao modelo numérico adotado, reduzindo assim o risco de elevação excessiva da temperatura por hidratação. Nos demais casos de sapatas, as fôrmas devem ser mantidas por 5 dias com o uso de mantas permanentemente saturadas com água sobre elas.

Em função do tipo de concreto (agregados e cimento/curva de liberação de calor por hidratação), da temperatura de lançamento estabelecida em 20 °C, das condições ambientais e das restrições do terreno, do método de cura e do procedimento de lançamento em duas etapas, o programa simula o histórico de temperaturas geradas pelo calor de hidratação no interior do elemento a ser concretado.

Os resultados da simulação evidenciam um comportamento térmico crítico, com picos de temperatura próximos ao limite máximo adotado (65 °C), o que reforça a necessidade de controle térmico nesse tipo de elemento massivo.

O pico de temperatura da primeira camada ocorre 30 horas após o início do lançamento, atingindo 61 °C. Esta figura também ilustra o pico da segunda camada, que ocorre 145 horas após o início dos trabalhos (ou seja, 115 horas após o segundo lançamento), com valor de 62 °C. Observa-se que, embora a execução em duas camadas permita certo controle da evolução térmica, os valores máximos registrados permanecem elevados, indicando que a dissipação de calor continua limitada no interior do elemento.

Além disso, o defasamento temporal entre os picos térmicos de cada camada contribui para a redução de gradientes térmicos abruptos, o que pode diminuir o risco de fissuração em comparação com uma concretagem realizada em etapa única.

4.3 Bloco de prova 1,5 × 1,5 × 1,5 m (Simulação em camada única).

Foi realizada a concretagem de um bloco de prova com o objetivo de verificar a modelagem e o estudo realizados. Esse ensaio experimental permitiu comparar os resultados obtidos por meio da simulação numérica com medições reais em obra, validando assim o modelo adotado.

A temperatura máxima obtida na simulação numérica foi de 62,54 °C após 24 horas (Figura 6).

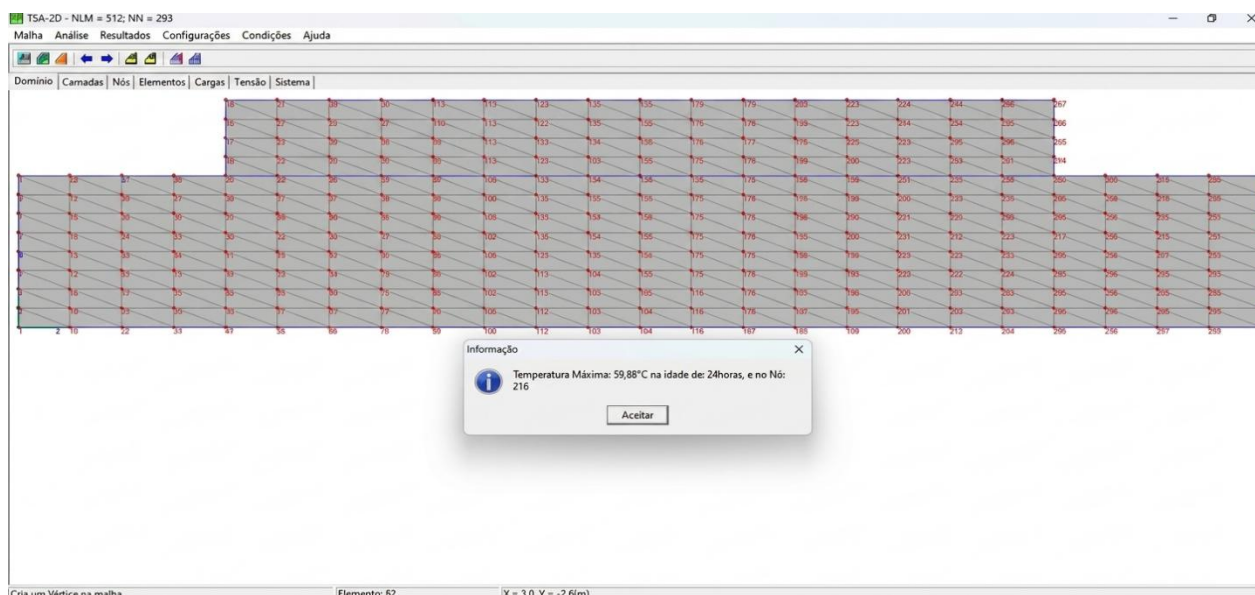


Figura 6. Pico máximo de T 62,54 °C del bloque de prueba (TSD-2D).

Após o lançamento, foi realizado um monitoramento durante 24 horas e a temperatura registrada em obra foi de 59,4 °C (Figura 7).



Figura 7. Registro com T = 59,4 °C após 24 horas do bloco de prova.

Pode-se afirmar que os resultados se encontram dentro da margem de segurança prevista para concreto massa. Da mesma forma, observou-se uma redução progressiva da temperatura ao longo do tempo, atingindo valores da ordem de 45 °C após 72 horas, o que confirma o comportamento esperado de dissipação térmica (Figuras 8 e 9).



Figura 8. Registro do bloco de prova após 72 horas.



Figura 9. Registro com $T = 45,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ após 72 horas do bloco de prova.

É fundamental que todas as variáveis sejam cuidadosamente controladas em obra, tais como: a quantidade de gelo aplicada no dia da concretagem, o tempo de transporte e a temperatura máxima de lançamento de $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, com a tolerância previamente mencionada (Figura 10).

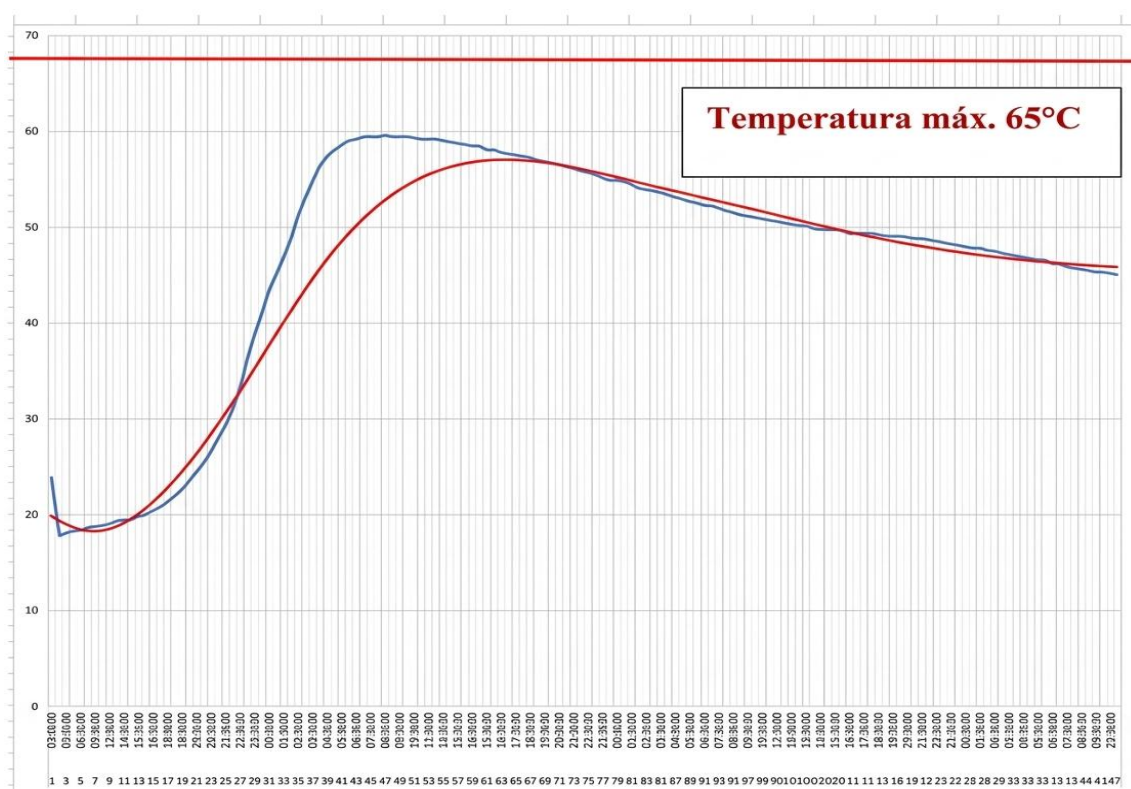


Figura 10. Registro com $T = 59,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ após 72 horas do bloco de prova (concretado).

Esses resultados confirmam a efetividade da estratégia adotada (uso de gelo e controle da temperatura de lançamento) para limitar o incremento térmico em elementos de concreto massa. Por fim, recomenda-se também a instalação de 3 termopares no bloco, no plano central, nas posições indicadas, para obtenção de valores médios mais precisos e representativos.

Os termopares estarão situados no eixo do bloco, a 8,5 m da face lateral. A altura da primeira camada é de 1,00 metro e, verticalmente, os três (3) termopares estarão localizados a 20,0 cm de

altura do concreto de limpeza, 50 cm e 80 cm, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 11.

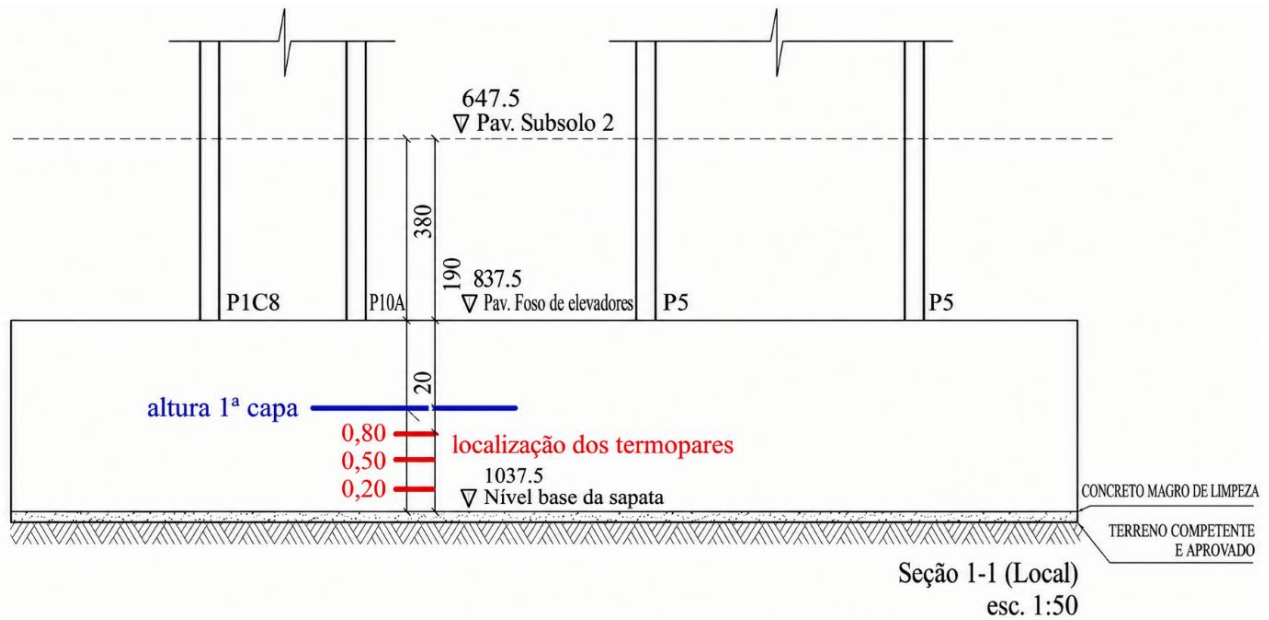


Figura 11. Mapa de localização dos termopares.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos confirmam que o controle térmico em elementos de concreto massa constitui um aspecto crítico para garantir a integridade estrutural e a durabilidade de fundações de grande volume. A literatura recente aponta que a fissuração em idades iniciais está diretamente relacionada ao calor de hidratação do cimento e aos gradientes térmicos gerados em elementos de grande espessura, sendo a simulação numérica por meio do método dos elementos finitos uma ferramenta amplamente utilizada para a previsão desses fenômenos (Klemczak et al., 2024).

No presente estudo, as simulações indicaram picos térmicos da ordem de 62 °C nos elementos analisados, valores inferiores ao limite de 65 °C adotado como critério de segurança. Esse resultado é relevante, pois demonstra que a estratégia empregada permitiu manter a temperatura máxima dentro de uma faixa aceitável, embora próxima ao limiar crítico. Em termos práticos, isso indica que o controle térmico não elimina completamente o risco, mas o mantém sob condições seguras desde que as variáveis de execução sejam rigorosamente controladas, como a temperatura de lançamento, a cura e o tempo de transporte (Pessoa et al., 2024). Estudos anteriores demonstraram que a evolução do calor de hidratação e sua interação com as condições de contorno influenciam diretamente o surgimento de tensões de tração capazes de induzir fissuração em concreto massa (Gambale, 2017).

A distribuição térmica observada nas simulações bidimensionais, com temperaturas mais elevadas na região central do bloco, é consistente com o relatado em estudos recentes, que identificam o núcleo de elementos massivos como a zona mais suscetível ao acúmulo de calor devido à limitada dissipação térmica (Wang e Song, 2024). Por outro lado, as superfícies apresentam temperaturas mais baixas, favorecendo a geração de gradientes térmicos e, consequentemente, de tensões de tração potencialmente fissurantes. Nesse sentido, o uso de modelos bidimensionais permitiu representar de forma mais realista esse comportamento térmico.

Outro aspecto relevante é a influência da sequência construtiva no controle térmico. Os resultados mostraram que a execução em duas camadas contribui para a redução dos gradientes

térmicos internos, em razão do defasamento temporal entre os picos de temperatura de cada camada. Esse comportamento tem sido relatado em pesquisas recentes, as quais destacam que o controle térmico em concreto massa depende da combinação de múltiplas estratégias, incluindo a sequência de concretagem, a cura e o controle da temperatura inicial do material (Tran et al., 2023).

A validação experimental por meio do bloco de prova reforça a confiabilidade do modelo adotado. A diferença inferior a 5% entre a temperatura máxima simulada (62,54 °C) e a medida em obra (59,4 °C após 24 horas) indica uma boa concordância entre o modelo numérico e o comportamento real do concreto. Esse resultado está em consonância com estudos recentes que ressaltam a importância da validação dos modelos térmicos por meio de monitoramento em campo para garantir sua aplicabilidade em condições reais (Klemczak et al., 2024).

Em relação à estratégia de pré-resfriamento, o uso de gelo em substituição total à água de amassamento mostrou-se eficaz para reduzir a temperatura inicial do concreto e, conseqüentemente, limitar o incremento térmico posterior. Essa abordagem é consistente com o descrito na literatura, na qual se destaca que a redução da temperatura inicial constitui uma das medidas mais eficientes para controlar o calor de hidratação em estruturas massivas (Aniskin et al., 2021). Entretanto, os resultados também evidenciam que essa estratégia, isoladamente, não é suficiente para garantir um controle térmico completo em elementos de grande volume.

Nesse sentido, o comportamento térmico do concreto massa depende de múltiplos fatores, incluindo a composição do material, o teor de cimento, o uso de adições minerais, a geometria do elemento e as condições de cura. Estudos recentes destacam que a utilização de materiais cimentícios suplementares e estratégias combinadas de controle térmico são fundamentais para reduzir tanto o pico de temperatura quanto os gradientes térmicos internos (Danfour et al., 2024). Do ponto de vista da durabilidade, a manutenção da temperatura abaixo de 65 °C revela-se particularmente relevante para minimizar o risco de formação tardia de etringita, fenômeno associado a expansões internas e à deterioração progressiva do concreto. Pesquisas recentes demonstraram que exposições térmicas elevadas em idades iniciais podem favorecer alterações microestruturais capazes de comprometer o desempenho do material em longo prazo (Mohr et al., 2024).

Em síntese, os resultados obtidos evidenciam que a combinação de simulação térmica, controle da temperatura de lançamento, uso de gelo, cura adequada e execução em camadas constitui uma estratégia eficaz para o controle térmico em blocos e sapatas de concreto massa. A principal contribuição deste estudo reside na validação dessas estratégias por meio de um caso real instrumentado, demonstrando que a modelagem numérica pode ser utilizada como ferramenta de apoio à tomada de decisão em obra, em consonância com as tendências atuais de projeto e controle de estruturas de concreto massa (Pessoa et al., 2024; Wang e Song, 2024).

6. CONCLUSÃO

Este estudo apresenta as diretrizes técnicas e operacionais para a execução e o controle da concretagem de blocos e sapatas de fundação de grande volume (entre 30 m³ e 400 m³), com resistência característica $f_{ck} > 50$ MPa, aplicadas na obra Artesano Reserva Marista, localizada em Goiânia–GO, Brasil.

Adotou-se como critério geral uma temperatura máxima de lançamento do concreto de 24 °C (com exceções devidamente justificadas) e um limite de temperatura interna de 65 °C, considerando os efeitos do calor de hidratação do cimento e o equilíbrio entre tensões induzidas e tensões admissíveis. Esses parâmetros foram estabelecidos com o objetivo de mitigar o risco de fissuração térmica e prevenir fenômenos deletérios, como a formação tardia de etringita.

As especificações de dosagem, juntamente com os procedimentos executivos e de controle do concreto massa fluido com uso de gelo, foram desenvolvidas especificamente para os elementos

estruturais analisados neste estudo, considerando as condições particulares do projeto, os materiais disponíveis e as restrições construtivas.

Os resultados obtidos durante a implementação do plano de controle térmico demonstraram que as temperaturas máximas internas permaneceram abaixo do limite estabelecido de 65 °C e que as temperaturas de lançamento atenderam aos critérios definidos. Da mesma forma, verificou-se um comportamento térmico coerente com as simulações numéricas, evidenciando adequada dissipação do calor e ausência de gradientes térmicos críticos capazes de induzir fissuração.

A validação experimental, por meio do monitoramento em obra, confirmou a confiabilidade do modelo térmico adotado, evidenciada pela proximidade entre os valores simulados e os medidos. Além disso, constatou-se adequada homogeneidade do concreto, sem indícios de segregação nem variações térmicas significativas entre os pontos de controle.

Nesse contexto, conclui-se que a estratégia adotada, baseada na combinação de modelagem numérica, controle da temperatura de lançamento, uso de gelo, execução em camadas e cura adequada, mostrou-se eficaz para garantir o controle térmico do concreto massa, contribuindo para o desempenho estrutural e para a durabilidade dos elementos de fundação.

Por fim, destaca-se que a metodologia empregada pode ser replicada em projetos semelhantes de concreto massa, constituindo uma ferramenta técnica relevante para o planejamento e o controle de obras que envolvam elementos de grande volume.

7. REFERÊNCIAS

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>

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*

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

- 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*. 2^a 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>