



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

LUANA EDUARDA DA COSTA LIRA
GABRIEL FELIPE FERNANDES VIEIRA

**AVALIAÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DE CIMENTOS COM GELO PELO
MÉTODO DA GARRAFA DE LANGAVANT**

TUCURUÍ
2025

LUANA EDUARDA DA COSTA LIRA
GABRIEL FELIPE FERNANDES VIEIRA

**AVALIAÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DE CIMENTOS COM GELO PELO
MÉTODO DA GARRAFA DE LANGAVANT**

Trabalho de Conclusão de Curso (formato de ARTIGO) apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Dr(a). Fernanda Pereira Gouveia

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

L768a Lira, Luana Eduarda da Costa.
AVALIAÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DE
CIMENTOS COM GELO PELO MÉTODO DA GARRAFA DE
LANGAVANT / Luana Eduarda da Costa Lira, Gabriel Felipe
Fernandes Vieira . — 2025.
27 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Fernanda Pereira Gouveia
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Civil, Tucuruí, 2025.

1. Argamassa. 2. Concreto. 3. gelo. 4. Garrafa. 5.
Langavant. I. Título.

CDD 624

LUANA EDUARDA DA COSTA LIRA
GABRIEL FELIPE FERNANDES VIEIRA

AVALIAÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DE CIMENTOS COM GELO PELO MÉTODO DA GARRAFA DE LANGAVANT

Trabalho de Curso (formato de ARTIGO)
apresentado à Faculdade de Engenharia Civil,
do Campus Universitário de Tucuruí, da
Universidade Federal do Pará, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Data da aprovação: 28/02/2025

Conceito: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



FERNANDA PEREIRA GOUVEIA
Data: 09/04/2025 10:24:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora

Prof. Dr^a Fernanda Pereira Gouveia
Faculdade de Engenharia Civil/UFPA

Documento assinado digitalmente



GRAZIELLE TIGRE DE SOUZA
Data: 08/04/2025 19:02:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador interno

Prof. Me. Grazielle Tigre de Souza
Faculdade de Engenharia Civil/UFPA

Documento assinado digitalmente



REGIANA BARBOSA CARVALHO
Data: 08/04/2025 19:31:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador externo

Prof. Me. Regiana Barbosa Carvalho
Curso de Edificações/ IFPA

AGRADECIMENTOS

Luana Eduarda da Costa Lira.

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder forças, coragem e ânimo para concluir esta jornada. À minha mãe, Danúbia Costa, meu eterno reconhecimento pelo apoio incondicional e pelos incentivos nos momentos mais difíceis. Ao meu pai, Luciano Lira que, à sua maneira, sempre me encorajou a seguir em frente. À minha família, que esteve ao meu lado em todas as etapas, garantindo que eu pudesse continuar com fé e determinação. Expresso também meu carinho e profunda gratidão aos meus tios, tias e aos meus padrinhos, Aline e Alex Lira, que sempre encontraram formas de me apoiar e estender a mão quando mais precisei.

Sou imensamente grata à minha orientadora, Doutora Fernanda Gouveia, por sua dedicação e orientação essencial ao longo deste trabalho. Ao meu colega de TCC, Gabriel Vieira, pela parceria e empenho na continuidade desta pesquisa. À Técnica de Laboratório Francirene Bonfim, pelo comprometimento e paciência ao nos guiar nas etapas experimentais, e aos estagiários Marcos Oliveira e Natali Pinheiro, pelo auxílio nos momentos mais desafiadores.

À minha querida amiga Julia Barroso, que conheço há praticamente uma vida inteira, agradeço pela amizade constante, pelo incentivo de sempre e por estar presente em todos os momentos. À Iara Ferreira, minha gratidão pelos conselhos valiosos, que foram essenciais para minhas decisões e para meu crescimento pessoal e profissional. Aos amigos que fiz ao longo da graduação — Gabriel Barros, Luiza Mota e Bruna Santana —, agradeço por me incluírem nos projetos e trabalhos, e por todo o apoio durante a caminhada. Agradeço as professoras Grazielle Tigre, Carolina Coelho e Raisia Neves pelo apoio durante a graduação e aos projetos Engenheiro sem Fronteiras (ESF) e Programa Meninas e Mulheres nas Engenharias (PMME), que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e pessoal. A todos os funcionários do CAMTUC, por zelarem não apenas pela Universidade, mas também por nós alunos, com palavras de incentivo e gestos de cuidado.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, meu mais sincero e profundo agradecimento.

Gabriel Felipe Fernandes Vieira

Agradeço imensamente à minha família pelo apoio incondicional. Ao meu pai, Kleber Barcelos, e à minha mãe, Marlene Fernandes, pelo carinho, suporte emocional e financeiro. Ao meu irmão, Markle Vieira, que, além de tudo, me auxiliou com moradia.

Expresso minha profunda gratidão à minha orientadora, Doutora Fernanda Gouveia, por sua dedicação e atenção ao nosso trabalho, aspectos essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. À minha colega de Trabalho de Conclusão de Curso, Luana Lira, pela parceria e comprometimento na continuidade do estudo. À Técnica de Laboratório, Francirene Bonfim, pelo comprometimento e paciência ao nos guiar nas etapas experimentais. Também agradeço aos estagiários Marcos Oliveira e Natali Pinheiro pelo auxílio nos momentos mais desafiadores.

Registro, ainda, minha gratidão aos vigilantes e funcionários da limpeza, que zelam não apenas pelo laboratório, mas também por nós, oferecendo palavras de incentivo e apoio.

Aos meus amigos Evanilton Brito e João Paulo, sou imensamente grato por toda a ajuda prestada, tanto direta quanto indiretamente, seja por meio do auxílio nas pesquisas e no direcionamento do trabalho escrito, seja pelo apoio e amizade, que me deram forças para seguir em frente.

Por fim, agradeço à ex-coordenadora do curso de Engenharia Civil, Professora Grazielle Tigre, e à atual coordenadora, Professora Raisa Neves, pela constante disposição em ajudar, independentemente das dificuldades, e, acima de tudo, pela amizade e apoio ao longo desta jornada.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, meu mais sincero e profundo agradecimento.

RESUMO

Os concretos massa se caracterizam pela alta liberação de calor nas primeiras horas após a mistura, exigindo estratégias para minimizar fissuras térmicas. Uma alternativa eficaz é a substituição parcial da água por gelo, reduzindo a temperatura no lançamento do concreto. Para avaliar o desenvolvimento do calor de hidratação, estudos laboratoriais são fundamentais, sendo que normas brasileiras estabelecem ensaios específicos para monitorar as curvas térmicas do cimento e do concreto ao longo do tempo. Desta forma, a presente pesquisa teve como objetivo, avaliar o efeito de teores de gelo, no calor de hidratação de traços contendo cimentos de interesse de uma concreteira que visa a produção de elementos de fundação. O estudo experimental incluiu a moldagem de dois grupos de traços: três compostos por cimento CII F-40, areia, aditivo 0,2% (0,72 g) e gelo nos percentuais de 0%, 50% e 100%, e três contendo CIIV-32, areia, aditivo e gelo nas mesmas proporções. Os ensaios foram conduzidos conforme os procedimentos recomendados na ABNT NBR 12006:1990 (semi-adiabático). Os resultados indicaram que todos os traços com gelo apresentaram redução nas curvas de calor de hidratação em comparação ao traço sem gelo. O traço mais eficiente ao se fazer comparação entre os cimentos foi o CIIV-32 com 100% de gelo, seguido pelo CII F-40 com 100% e pelo CIIV-32 com 50%, resultando em reduções de calor de 0,31%, 29,14% e 0,31%, respectivamente. Os ensaios na Garrafa de Langavant conseguiram demonstrar o desempenho térmico dos traços contendo os cimentos de interesse da concreteira, possibilitando uma avaliação preliminar da empresa sobre a seleção dos materiais utilizáveis na dosagem do concreto, visando a redução do calor de hidratação de elementos de fundação de edifícios.

Palavras-chave: comportamento térmico, ensaio semi-adiabático, resfriamento do concreto, ensaios de calor.

ABSTRACT

Mass concretes are characterized by high heat release in the first hours after mixing, requiring strategies to minimize thermal cracking. An effective alternative is the partial replacement of water with ice, reducing the temperature at the time of concrete placement. To assess the heat of hydration development, laboratory studies are essential, and Brazilian standards establish specific tests to monitor the thermal curves of cement and concrete over time. Thus, this research aimed to evaluate the effect of different ice contents on the heat of hydration of mix designs containing cements of interest to a concrete supplier focused on the production of foundation elements. The experimental study included molding two groups of mixes: three composed of CII F-40 cement, sand, 0.2% admixture (0.72 g), and ice in proportions of 0%, 50%, and 100%, and three containing CIV-32 cement, sand, admixture, and ice in the same proportions. The tests were conducted following the procedures recommended in ABNT NBR 12006:1990 (semi-adiabatic). The results indicated that all mixes with ice showed a reduction in heat of hydration curves compared to the mix without ice. The most efficient mix, when comparing the cements, was CIV-32 with 100% ice, followed by CII F-40 with 100% and CIV-32 with 50%, resulting in heat reductions of 0.31%, 29.14%, and 0.31%, respectively. The tests using the Langavant Bottle successfully demonstrated the thermal performance of the mixes containing the cements of interest to the concrete supplier, allowing a preliminary evaluation by the company regarding the selection of materials for concrete mix design, aiming to reduce the heat of hydration in foundation elements of buildings.

Keywords: thermal behavior, semi-adiabatic test, concrete cooling, heat tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Figura 1: Fluxograma de métodos de ensaio	16
Figura 2 – Etapas da mistura da argamassa e moldagem das argamassas.....	19
Figura 3 – A) recipiente metálico; b) Garrafa de Langavant devidamente vedada	19
Figura 4 – Registro do ensaio de calor de hidratação do cimento.....	20
Gráfico 1 – Curva de calor de hidratação cimento pozolânico – CPZ-0, CPZ-50 e CPZ-100.....	22
Gráfico 2 – Curvas de calor de hidratação cimento fíler – CPF-0, CPF-50 e CPF-100	23
Gráfico 3 – Curvas de calor de hidratação cimento pozolânico – CPZ-0, CPZ-50 e CPZ-100; cimento fíler – CPF-0, CPF-50 e CPF-100)	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frações granulométricas da areia padrão.....	17
Tabela 2 – Propriedades dos Cimentos CP II F 40 e CP IV 32 RS.....	17
Tabela 3 – Composição química dos cimentos.....	18
Tabela 4 – Traços de argamassa analisados (Cimento pozolânico – CPZ-0, CPZ-50 e CPZ-100; Cimento fíler – CPF-0, CPF-50 e CPF-100)	18

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.1 MATERIAIS	16
2.2 MÉTODOS	18
2.2.1 Etapa de mistura e moldagem dos corpos de prova	18
2.2.2 Etapa de ensaio do calor de hidratação na garrafa de Langavant.....	20
2.2.3 Determinação do calor de hidratação do cimento	21
3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	21
4 CONCLUSÕES.....	26
REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

Em estruturas de concreto maciço, que utilizam grandes quantidades de aglomerante, o calor gerado durante a hidratação do cimento pode provocar tensões térmicas significativas. Essas tensões podem comprometer a integridade estrutural, a estanqueidade e a durabilidade da estrutura. Por isso, torna-se essencial realizar estimativas das tensões e fissuras térmicas presentes nesses elementos para evitar problemas futuros Chu *et al.* (2013).

Quanto maior o volume de concreto, maior o calor liberado pela mistura, que pode ser dissipado na atmosfera ou absorvido pela própria massa de concreto Gambale *et al.* (2023). Kuperman *et al.* (2005) reforçam a necessidade de adotar precauções para evitar fissuras decorrentes das variações de temperatura ao se utilizar esse tipo de concreto em uma estrutura.

Neville (2016) destaca também que o teor de cimento na mistura é um fator determinante no calor de hidratação, e sua redução, por meio da substituição parcial por adições, não só diminui o consumo de cimento como também reduz significativamente o calor gerado durante a hidratação.

Calmon (1995), identifica diversos parâmetros-chave que influenciam a análise da temperatura do concreto, entre os quais se destacam o tipo de cimento, as adições minerais, a temperatura de colocação do concreto, a geometria da estrutura e as propriedades térmicas do concreto. Bofang (2014) complementa que para minimizar o efeito do alto calor liberado, medidas técnicas devem ser adotadas, como o uso de matérias-primas mais frias, o pré-resfriamento com gelo, o resfriamento por meio de tubos, o isolamento térmico superficial e a aplicação de cimento Portland de baixo calor.

Os cimentos de baixo calor, como o CP IV, podem contribuir significativamente para o controle térmico do concreto, devido à presença de pozolana em sua composição. As pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos e reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água, formando compostos cimentantes que ocorrem durante a hidratação do cimento NBR 12653 (ABNT, 2014).

Gambale *et al.* (2023) demonstra bem essa influência em sua pesquisa, a partir de simulações térmicas unidirecionais para lançamentos em camadas de concreto com diferentes consumos de cimento (300, 350, 400 e 450 kg/m³) e temperaturas iniciais variando entre 15 °C, 25 °C e 35 °C, concluindo que o aumento do consumo de cimento e da temperatura inicial eleva significativamente a temperatura máxima alcançada pelo concreto.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a água de amassamento tem o maior efeito na temperatura do concreto por unidade de peso, sendo seu resfriamento ou a utilização de gelo uma estratégia eficaz para reduzir a temperatura da mistura. Além disso, Aniskin *et al.* (2020) relatam que existem muitas maneiras de reduzir a temperatura inicial das misturas de concreto, como diminuir a temperatura do agregado, usar nitrogênio líquido para reduzir a mistura de concreto, usar água fria ou usar gelo em vez de parte da água. Neste caso último caso, uma tarefa importante é determinar corretamente a quantidade necessária de gelo.

A utilização do gelo no concreto, no caso de centrais misturadoras, ou no balão do caminhão betoneira, quando são empregadas centrais dosadoras. Em grandes obras, como barragens, podem ser implantadas fábricas de gelo que produzem o material em escamas, e é dessa maneira que o material é adicionado. “Em outros casos, como em obras residenciais, comerciais e industriais, o gelo é comprado de fornecedores, e o ideal é que seja obtido na forma de escamas. Entretanto, o uso de gelo na forma de cilindros vazados ou cubos não é incomum e apenas implica um tempo maior de mistura no balão para a sua completa dissolução Kuperman (2016).

A elevação adiabática da temperatura do concreto pode ser determinada por meio de ensaios laboratoriais em calorímetros adiabáticos, que impedem trocas de calor com o meio externo. No entanto, devido à limitada disponibilidade de laboratórios capazes de realizar esse tipo de ensaio, essa propriedade geralmente é prevista com base nas características do cimento e nos traços do concreto especificados para a estrutura Gambale *et al.* (2023).

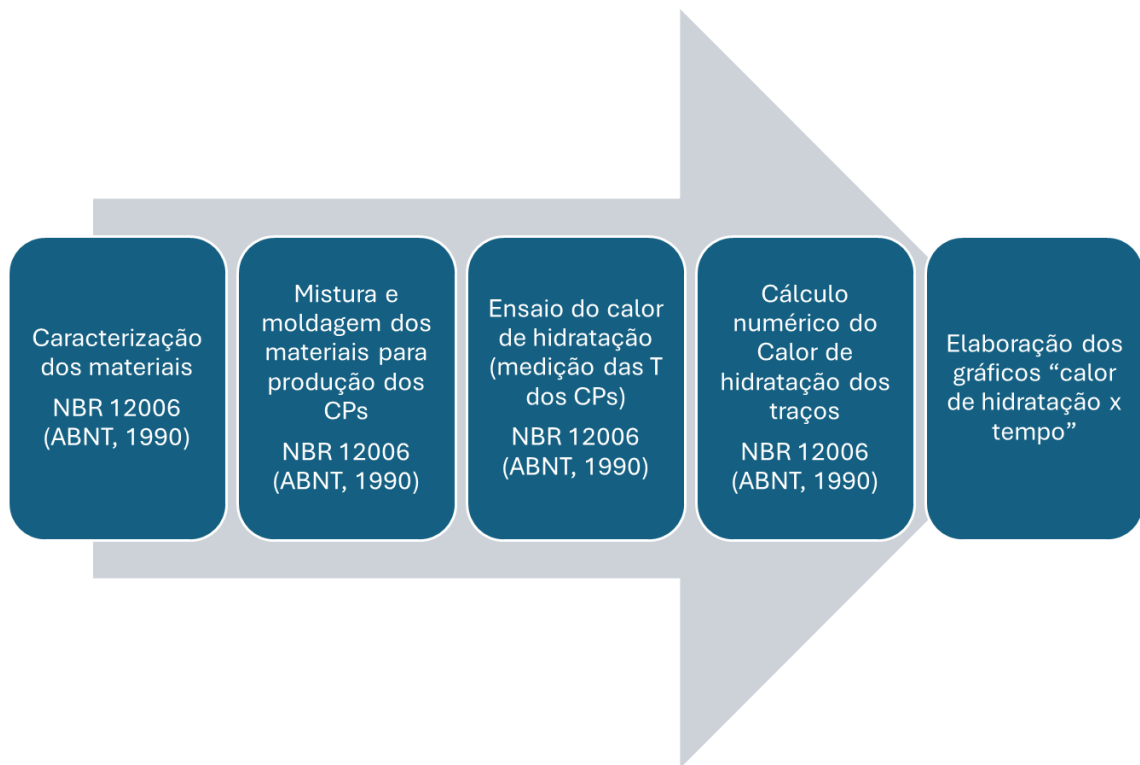
Devido às altas temperaturas da região metropolitana de Belém-PA e à necessidade de mitigar os efeitos térmicos em blocos de fundação de edifícios, uma empresa de concreto usinado busca estratégias para reduzir o calor de hidratação do concreto. Diante disso, torna-se fundamental avaliar a influência da adição de gelo em composições de cimentos usuais na região, a fim de otimizar a execução e a durabilidade das estruturas.

Avaliar a eficiência da adição de gelo na redução do calor de hidratação do cimento produzido com cimentos usuais na região metropolitana de Belém-PA, utilizando o calorímetro semi-diabático pelo método da Garrafa de Langavant. Para isso, foram realizados ensaios com materiais fornecidos pela concreteira, com a adição de gelo e o uso de aditivo retardador de pega, conforme definido pela empresa. Os testes foram conduzidos no Laboratório de Engenharia Civil do campus de Tucuruí-PA.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental da pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil no setor das argamassas. Os materiais e método utilizado neste estudo segue as diretrizes da NBR 12006 (ABNT, 1990) para a determinação do calor de hidratação do cimento. Primeiramente foi feita a caracterização dos cimentos, após isto é iniciado o processo contendo quatro etapas principais, conforme ilustrado na Figura 1. Inicialmente, realiza-se a mistura e moldagem dos corpos de prova (CPs). Em seguida, procede-se ao ensaio de calor de hidratação, no qual são registradas as variações de temperatura ao longo do tempo. Com os dados obtidos, realiza-se o cálculo numérico do calor de hidratação dos traços estudados. Por fim, elabora-se a representação gráfica da evolução do calor de hidratação em função do tempo, permitindo a análise do comportamento térmico do material durante a hidratação.

Figura 1 - Fluxograma de métodos de ensaio.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores do trabalho.

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a elaboração dos traços foram, cimento Portland II F- 40; cimento Portland IV- 32; a areia padrão, conforme as frações granulométricas definidas na NBR 7214 (ABNT, 2015) (Tabela 1), água destilada fornecida pelo laboratório e gelo em escamas

disponível no comércio local. Além disso foi adicionado aditivo retardador de pega inibidor de hidratação, na forma de líquido verde, com dosagem recomendada entre 0,1% e 1,0% e massa específica variando de 1,100 a 1,014 g/cm³, sendo o mesmo usualmente utilizado pela usina.

Tabela 1: Frações Granulométricas da areia padrão.

DENOMINAÇÃO DA FRAÇÃO	AREIA RETIDA ENTRE AS PENEIRAS ABERTURA NOMINAL (MM)
16	2,4 e 1,2
30	1,2 e 0,6
50	0,6 e 0,3
100	0,3 e 0,15

Fonte: NBR 7214 (ABNT, 2015).

Os ensaios para determinação das propriedades físicas e mecânicas dos cimentos CP II F 40 e CP IV 32 RS foram realizados conforme os requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018). A área específica foi determinada pelo método de permeabilidade ao ar (Blaine), enquanto os tempos de pega foram avaliados seguindo os procedimentos padronizados para a verificação do início e fim da pega. A resistência à compressão aos 28 dias foi obtida a partir de ensaios realizados conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), garantindo a conformidade dos cimentos com as exigências normativas para suas respectivas classes, apresentados na Tabela 2. Vale ressaltar que as informações referentes à composição química dos cimentos foram disponibilizadas pelo fabricante, conforme os padrões de transparência exigidos para a caracterização dos materiais, apresentados na Tabela 3.

Tabela 2: Propriedades dos Cimentos CP II F 40 e CP IV 32 RS.

PROPRIEDADES FÍSICAS, TÉRMICAS E MECÂNICAS					
	Cimento CP II F 40		Cimento CP IV 32 RS		
Área específica Blaine (cm ² /g)	4845	≥ 2800	6632	≥ 2800	
Tempo de pega	Início (min)	231	≥ 60	259	≥ 60
	Fim (min)	296	≤ 600	330	≤ 600
Massa específica (kg/dm ³)	3,06	Não aplicável	2,95	Não aplicável	
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	46,1	≥ 40	50,5	≥ 40	

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Tabela 3: Composição química dos cimentos.

Composição química do cimento	Cimento CP II F 40		Cimento CP IV 32 RS	
	Resultados (%)	Limites da NBR 16697	Resultados (%)	Limites da NBR 16697
CaO	59,65	Não aplicável	57,43	Não aplicável
MgO	3,65	≤ 6,5	2,48	≤ 6,5
SO ₃	3,04	≤ 4,5	2,75	≤ 4,5
SiO ₂	20,35	Não aplicável	21,58	Não aplicável
Al ₂ O ₃	6,23	Não aplicável	4,86	Não aplicável
Fe ₂ O ₃	3,54	Não aplicável	2,87	Não aplicável
Na ₂ O	0,48	Não aplicável	0,35	Não aplicável
K ₂ O	0,82	Não aplicável	0,62	Não aplicável
Perda ao fogo	7,66	≤ 12,5	6,85	≤ 12,5
CaO livre	1,36	Não aplicável	1,25	Não aplicável
Resíduos insolúveis	3,74	≤ 7,5	3,06	≤ 7,5

Fonte: Fabricante (2024).

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Etapa de mistura e moldagem dos corpos de prova

A etapa de mistura dos materiais realizada com base nos procedimentos da NBR 12006 (ABNT, 1990). Na Tabela 4 verifica-se os traços analisados e seus respectivos consumos, atendendo aos quantitativos recomendados na norma, sendo realizada a substituição de água por gelo, nos seguintes percentuais (0%, 50%, 100%). O aditivo retardador foi adicionado com o teor adotado pela usina de concreto (0,2% em relação à massa de cimento).

Tabela 4: Traços de argamassa analisados cimento pozolânico – CPZ-0, CPZ-50 e CPZ-100; cimento fíler – CPF-0, CPF-50 e CPF-100.

Cimentos	Sigla utilizada	Cimento (g)	Areia padrão (g)	Gelo em escamas	Água (ml)	Aditivo retardador de pega (g)
Cimento Pozolânico	CPZ-0	360	1.080	0	180	0
	CPZ-50			90	90	0,72
	CPZ-100			180	0	0,72
Cimento fíler	CPF-0			0	180	0
	CPF-50			90	90	0,72
	CPF-100			180	0	0,72

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a produção e confecção da argamassa foi feita mistura por 10 minutos, iniciando com areia e cimento em velocidade baixa por 30 segundos, seguida da adição de água até 1 minuto e finalizada em velocidade alta por mais 1 minuto. No momento em que a água entrou em contato com os materiais, registrou-se o início da reação química, anotando-se o horário

correspondente (Figura 2 – a). Após a etapa de preparação da argamassa, esta foi inserida no recipiente metálico e após o transbordamento, procedeu-se a um adensamento manual por meio de 10 quedas de uma altura de 3 cm sobre uma base emborrachada, a fim de acomodar a argamassa no recipiente a (Figura 2 – b). Em seguida, um tubo de ensaio, contendo 3 ml de óleo mineral (Figura 2 – c) foi adicionado no centro da argamassa (Figura 2 – d).

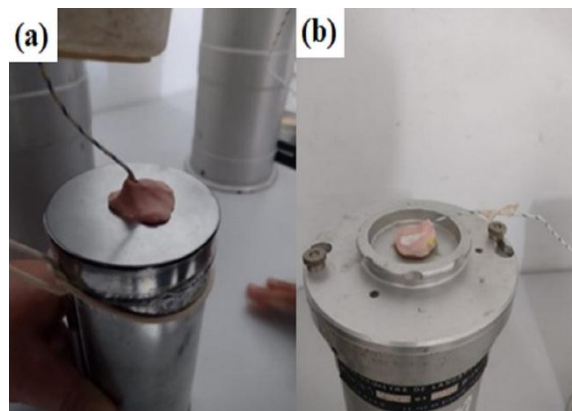
Figura 2 - Etapas da mistura da argamassa e moldagem das argamassas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em seguida foi fechando o recipiente e vedando a tampa com uma fita crepe. Em seguida, o recipiente foi pesado, obtendo-se a massa total do conjunto. O termopar foi inserido no tubo de ensaio e fixado por meio de massa de modelar à tampa do recipiente (Figura 3 - a). Por fim, o recipiente foi inserido na garrafa de Langavant, fixando-se a espera do termopar com massa modelar (Figura 3 – b).

Figura 3 - A) recipiente metálico vedado; b) Garrafa de Langavant devidamente vedada.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2.2 Etapa de ensaio do calor de hidratação na garrafa de Langavant

Após a montagem do ensaio foi iniciado o processo de leitura das temperaturas das garrafas, com o auxílio de dois termopares, totalizando cinco sensores para a leitura das quatro garrafas com os traços experimentados e um para a leitura da garrafa contendo o CP de referência. Conforme a NBR 12006 (ABNT, 1990), as leituras devem ser realizadas da seguinte forma: nas primeiras 5 horas, após a leitura inicial, devem ocorrer medições a cada 1 hora. Depois, as leituras devem ser feitas a cada 2 horas até atingir a temperatura máxima, garantindo no mínimo cinco medições diárias em intervalos regulares, sendo obrigatória a leitura em 72 horas.

A leitura final indicada na norma deve alcançar 168h (7 dias). No entanto, foi adotado três dias de ensaio, devido a logística dos pesquisadores, no que se refere a dedicação exclusiva para o controle do ambiente. O controle do laboratório, visando atender os parâmetros normativos de temperatura e umidade do ar ($T = 23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) e ($h \geq 50\%$.) só foi garantido até 48h, ocorrendo após este período, controle deficiente de ajuste do ambiente, implicando em curvas de calor incoerentes. Diante disso, a análise dos resultados considerou apenas 3 dias de ensaio, revelando dados importantes para a pesquisa. A Figura 4 apresenta um registro do esquema de ensaio de calor de hidratação, composto pelas garrafas, termopares e o higrômetro digital.

Figura 4 - Registro do ensaio de calor de hidratação do cimento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2.3 Determinação do calor de hidratação do cimento

O calor de hidratação dos cimentos foi determinado como base a NBR 12006 (ABNT, 1990), que apresentou a seguinte equação:

$$Q_t = \frac{M}{c} * \theta_t + \frac{1}{c} \int_0^t \alpha * \theta_t dt \quad (1)$$

Onde:

Q_t (J.g-1 de cimento): calor de hidratação total no instante t;

θ_t (°C): diferença de temperatura entre a argamassa de ensaio e a argamassa de referência no instante t ($\theta_1 - \theta_2$);

α (J.h-1°C-1): coeficiente de perda calorífica: constante do aparelho que varia em função da temperatura θ desenvolvida no interior da garrafa;

c (g): massa do cimento contida na argamassa;

M (J.°C-1): capacidade calorífica total do calorímetro e da amostra.

Após a obtenção dos resultados do cálculo de calor perdido foi feita uma verificação dos valores, com o auxílio da ferramenta Autocad (Autodesk, 2024), para confirmar os resultados encontrados. Em seguida foram elaborados os gráficos para cada grupo de cimento, foi realizada uma análise comparativa entre as curvas entre os cimentos pozolânicos (CPZ-0, CPZ – 50 e CPZ -100) e cimento com fíler (CPF-0, CPF-50 e CPF-100).

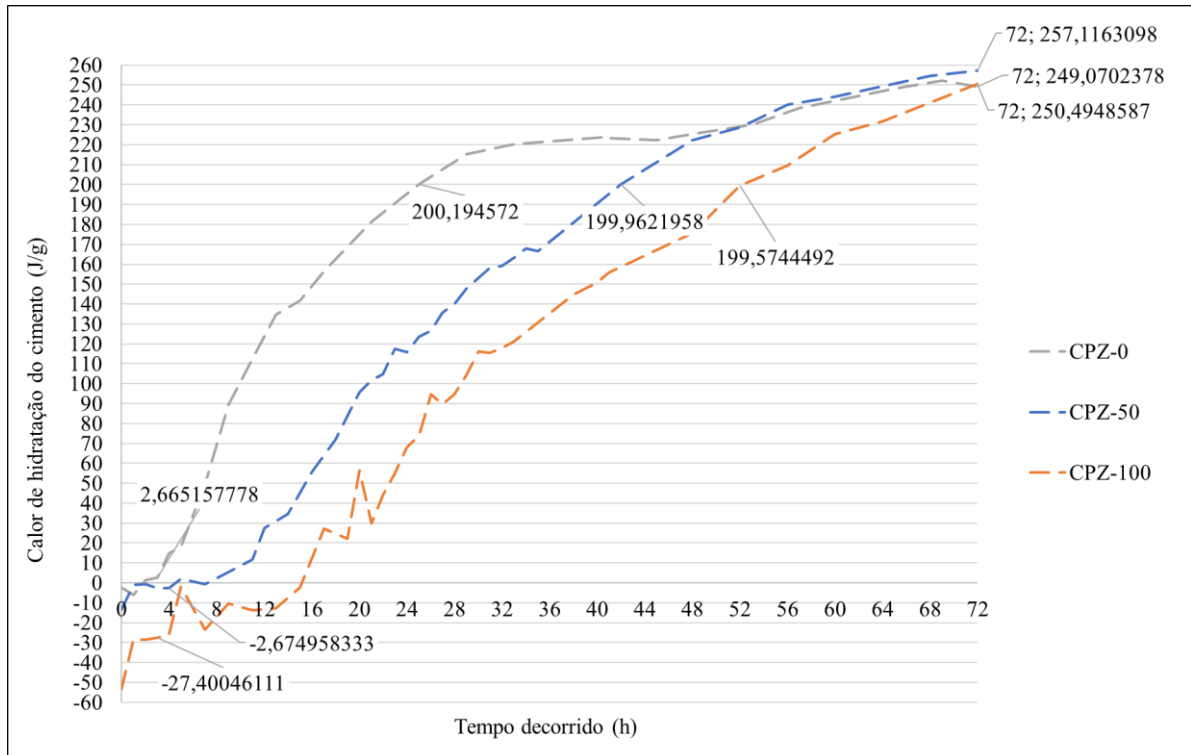
3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As análises foram conduzidas com o objetivo de verificar a redução do calor de hidratação dos cimentos de forma separada, considerando traços com cimento pozolânico e traços com cimento contendo fíler. Dessa forma, buscou-se avaliar a influência da substituição parcial e total da água por gelo na dinâmica de hidratação de cada tipo de cimento, analisando individualmente e fazendo comparação entre os cimentos verificando a variação térmica e a eficiência desse método na modulação do calor liberado nos três primeiros dias de hidratação.

No Gráfico 1 constam os resultados do CPZ, no período selecionado para análise. A presença do gelo foi eficaz na redução do calor, promovendo uma modulação na cinética de hidratação, observando-se que quanto maior o percentual de gelo, menor a liberação de calor. Fazendo análise em relação aos picos o CPZ-50 apresentou redução de 0,11% no calor de

hidratação em comparação ao traço CPZ-0. Já o traço CPZ-100 apresentou uma redução mais maior, com valor 0,31%, em relação ao CPZ – 0.

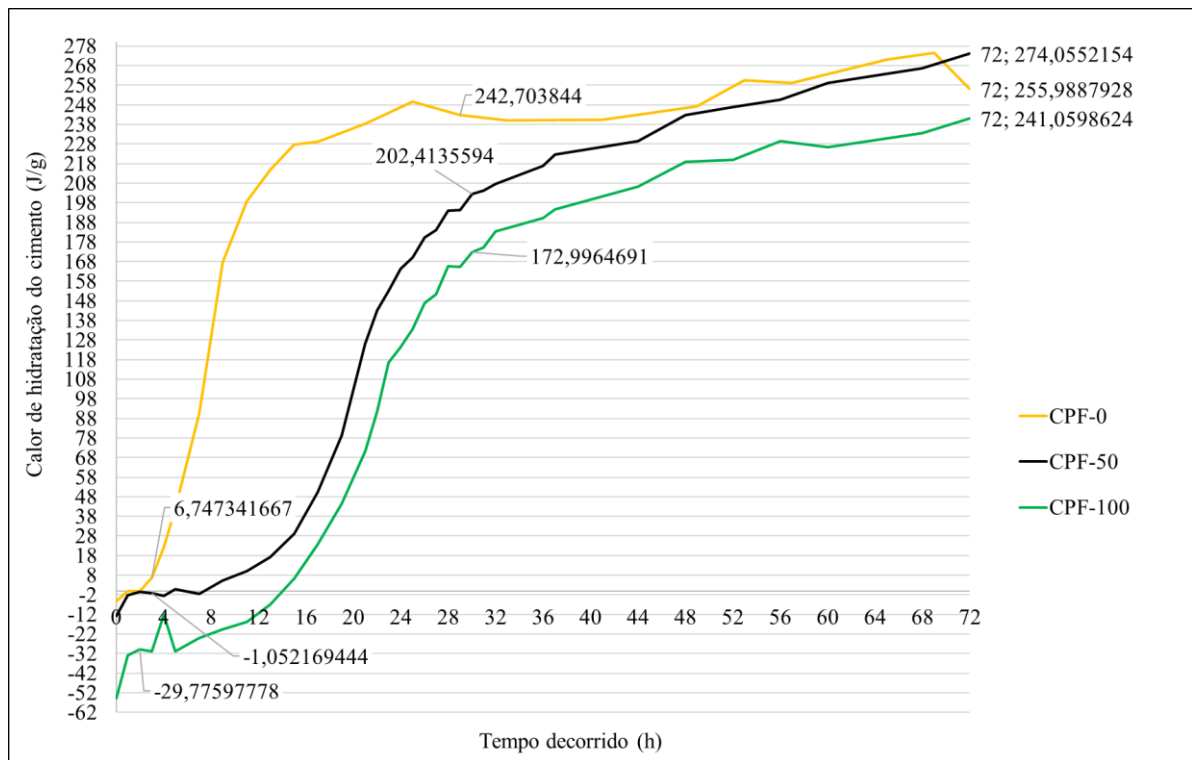
Gráfico 1- Curva de calor de hidratação cimento pozolânico – CPZ-0, CPZ-50 e CPZ-100.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O Gráfico 2 apresenta os resultados das curvas do CPF. Os valores demonstraram que à medida que o gelo substituiu a água, ocorreu a redução do calor. Fazendo análise em relação aos picos o traço CPF-50, registrou uma redução de 16,60% em comparação à CPF - 0. Por sua vez, a amostra com 100% de gelo apresentou uma redução maior do calor de hidratação, com uma variação de 29,14%, em relação ao traço sem gelo.

Gráfico 2 - Curvas de calor de hidratação cimento fíler – CPF-0, CPF-50 e CPF-100.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise dos gráficos demonstra que a utilização de gelo como substituição parcial e total da água de amassamento influenciou diretamente a redução da temperatura inicial das argamassas, resultando em um menor desenvolvimento do calor de hidratação ao longo do tempo. Esse efeito é consistente com os achados de Guilge *et al.* (2023), que destacam a eficácia dessa técnica na redução da temperatura máxima da mistura, minimizando os gradientes térmicos e seus impactos negativos.

A redução desses gradientes térmicos é um aspecto crítico, pois, conforme apontado por ACI 207.2R (2007) e Bobko *et al.* (2014), quanto maior a variação térmica, maior a probabilidade de ocorrer retratação térmica, resultando em tensões internas elevadas e maior risco de fissuramento. Embora esses estudos se apliquem no concreto, os mesmos princípios podem ser aplicados à argamassa, especialmente quando utilizada como meio de análise do comportamento do cimento durante a hidratação.

Desta forma, Guilge *et al.* (2022), destacam o uso de gelo em escamas – mais recomendado – ou em cubos – menos recomendado – como procedimento eficiente para o controle térmico, resultando em uma redução de temperatura na faixa de 11°C a 12°C. Como

afirmar Funahashi Jr. *et al.* (2022) analisaram diferentes alternativas de controle térmico e verificaram que, nos casos em que foi utilizado apenas gelo, a temperatura máxima do concreto variou entre 65°C e 74°C, mantendo-se dentro de limites aceitáveis para minimizar o risco de fissuração térmica.

A pesquisa de Shen *et al.* (2022) aponta que concretos com 0%, 30% e 60% de substituição de água por gelo apresentaram comportamentos térmicos distintos nas primeiras 24 horas, mas as curvas tenderam a convergir após esse período. No presente estudo, a análise foi estendida para um período de 72 horas. Durante esse período, as curvas de temperatura dos traços analisados apresentaram um padrão estável, sem variações significativas entre os diferentes percentuais de gelo, como apresentado nos Gráficos 1 e 2, também é possível visualizar que ao final da análise os valores de calor de hidratação dos cimentos se aproximam.

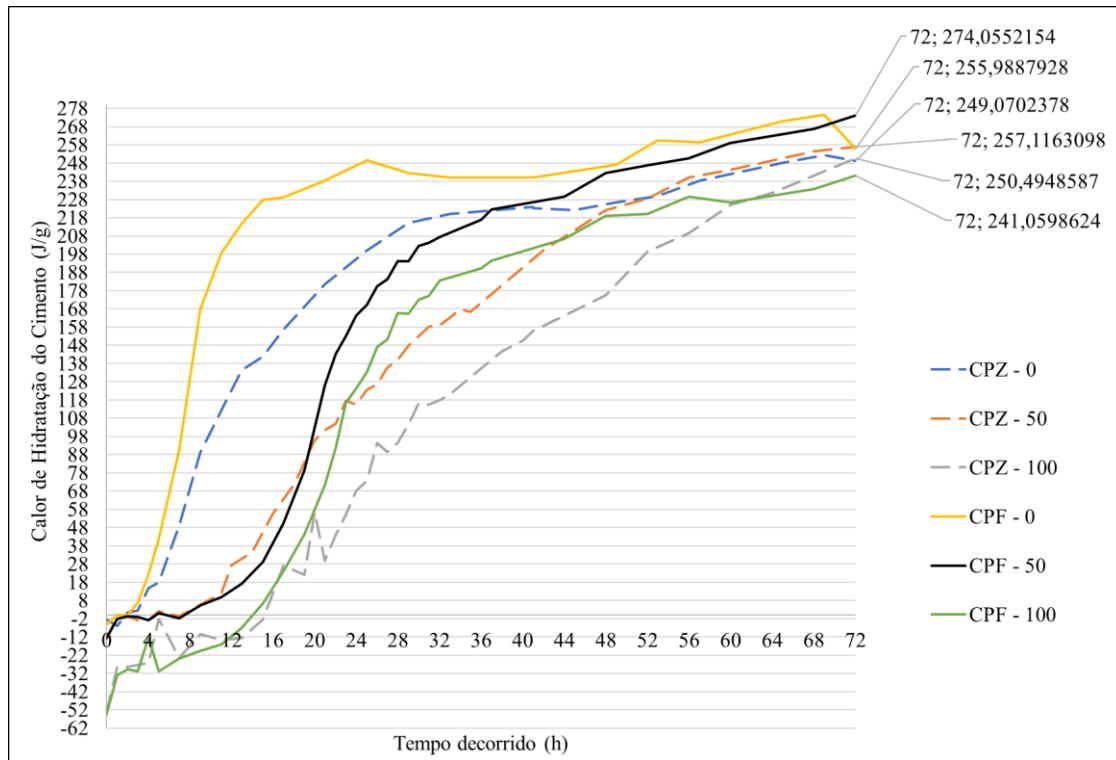
Dessa forma, os resultados reforçam a eficácia do uso de gelo na mitigação do calor de hidratação, reduzindo os picos térmicos na fase inicial da hidratação. No entanto, no estudo de Shen *et al.* (2022), o acompanhamento da temperatura ao longo dos dias subsequentes sugere que a influência do gelo se torna menos expressiva conforme o processo de hidratação avança.

Além disso foi avaliado as primeiras três horas de cada traço. Tendo em vista que a temperatura de lançamento do concreto exerce um papel fundamental nas primeiras horas de concretagem, influenciando diretamente o processo de hidratação. Foi realizada uma análise nas primeiras três horas, apresentados no Gráficos 1 e 2, que demonstrou que a reação do CPZ-0 liberou 2,66 J/g, caracterizando um processo exotérmico com dissipação de calor. Com a substituição parcial da água por gelo, observou-se uma diminuição na liberação térmica. O CPZ-50 apresentou um valor negativo de -2,67 J/g, sugerindo um resfriamento inicial moderado. Já na composição com 100% de gelo, essa redução foi ainda mais acentuada, com o CPZ-100 atingindo -27,40 J/g, evidenciando um efeito significativo na contenção da elevação térmica da argamassa.

De maneira semelhante, a análise do CPF nas primeiras três horas revelou que o CPF-0 dissipou 6,74 J/g, indicando uma reação exotérmica com considerável liberação de calor. Com a introdução parcial de gelo na mistura, constatou-se uma atenuação desse fenômeno. O CPF-50 apresentou um valor negativo de -1,05 J/g, demonstrando um resfriamento inicial mais sutil. Já na substituição total por gelo, essa redução tornou-se ainda mais expressiva, com o CPF-100 atingindo -29,77 J/g, evidenciando um impacto marcante na contenção do aumento térmico do

concreto fresco. Conforme destacado por Funahashi Jr. *et al.* (2024), o controle da temperatura do concreto no momento da sua aplicação é essencial para evitar fissuração térmica. Assim, manter a temperatura dentro de limites recomendados contribui para a redução de fissuras térmicas.

Gráfico 3 - Curvas de calor de hidratação cimento pozolânico – CPZ-0, CPZ-50 e CPZ-100; cimento fíler – CPF-0, CPF-50 e CPF-100.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Comparando todos os traços ao longo do período de 3 dias (Figura 7), observa-se que a substituição da água por gelo resultou em uma redução da hidratação para ambos os cimentos. Embora a diminuição observada no CPF de forma individual mostrou-se maior, ao se fazer comparação com o CPZ, fica evidente que este apresenta os menores valores de hidratação, considerando que CPZ-0 e CF-0 tiveram as curvas de hidratação mais elevadas em comparação com os traços com gelo, sendo o traço CPZ-100 o de maior influência na redução do calor do cimento, devido a presença da pozolana. Estudos como o de Matos *et al.* (2019) já demonstraram que a adição de pozolanas reduz o calor de hidratação. Eles analisaram concretos com diferentes classes de resistência e substituições parciais de cimento por cinza volante (0%, 15%, 30% e 45%). O uso da cinza volante, como pozolana, provocou um retardo no aumento da temperatura dos concretos, conforme medido em calorímetro adiabático.

Han *et al.* (2017) investigaram a evolução do calor de hidratação de pozolanas em pastas que foram medidos pelo calorímetro a 25 °C, 45 °C e 60 °C, e concluíram que os calores totais de hidratação por adição pozolânica, de cinza volante, foram de 285 J. Nos traços contendo cimento com fíler, verificou-se desenvolvimentos menos expressivos na redução do calor, em comparação com os traços de cimento pozolânico, o que é coerente. O efeito do fíler de calcário é preencher os vazios entre as partículas de clínquer, melhorando o empacotamento de grãos do cimento e dispersando as partículas de clínquer Ellerbrock *et al.* (1990), ou seja, o efeito destes materiais não está relacionado a redução de calor de hidratação do cimento.

Em suma, o desenvolvimento do calor de todos os traços com gelo foi mais tardio, o que é fundamental para as etapas de lançamento de grandes volumes, pois permite produções de elementos com menor potencial de manifestações de fissuras. No entanto, o uso de gelo implica na adoção de infraestrutura apropriada para a conservação das escamas, sendo um ponto de avaliação de custo *versus* benefício, por parte da empresa construtora.

4 CONCLUSÕES

O ensaio da garrafa de Langavant permitiu evidenciar os efeitos do gelo no calor de hidratação dos cimentos analisados, possibilitando a avaliação do comportamento das curvas dos CPs ao longo de três dias. No entanto, a análise concentrou-se nas primeiras 48 horas, período considerado mais confiável pelos pesquisadores, pois as condições ambientais (temperatura e umidade) foram mantidas controladas durante esse intervalo, conforme exigido pela norma ABNT NBR 12006 (ABNT, 1990).

Os traços contendo cimento pozolânico (CPZ-100) demonstraram maior eficiência na redução do calor de hidratação em comparação aos traços com cimento contendo fíler (CPF-100). Esse comportamento está alinhado com as expectativas para cimentos de baixo calor de hidratação. Especificamente, o traço CPZ-100 apresentou uma redução de 0,11%, enquanto o CPZ-50 obteve 0,31%, ambos em relação ao CPZ-0. De forma semelhante, o traço contendo fíler (CPF-100) resultou em uma redução significativa de 29,14% em relação ao CPF-0. Esses resultados indicam que o CPF-100 pode ser uma alternativa viável para aplicações que demandam menor geração de calor, especialmente em contextos onde o cimento pozolânico não esteja disponível.

As curvas obtidas demonstraram que, ao final das medições (72 horas), os traços apresentaram uma tendência de convergência no calor de hidratação, evidenciando o

comportamento adiabático do sistema, uma vez que o teor de cimento permaneceu constante. No entanto, para tornar o estudo mais rigoroso, recomenda-se a realização dos ensaios em ambientes com controle automatizado de temperatura e umidade. Além disso, seria ideal que as temperaturas dos CPs fossem registradas por um período de até sete dias, conforme indicado na norma.

Por fim, a pesquisa forneceu dados relevantes sobre o desenvolvimento do calor de hidratação nos traços analisados, tanto com quanto sem a presença de gelo, caracterizando-se como um estudo preliminar. Embora não represente uma inovação na área de análises térmicas do cimento, os resultados obtidos poderão servir de suporte para a seleção de materiais na dosagem do concreto, com foco em sua aplicação em blocos de fundação de edifícios. Dessa forma, o estudo contribuiu diretamente para o aprimoramento das práticas utilizadas na usina de concretagem que serviu como estudo de caso.

REFERÊNCIAS

Chu I, Lee Y, Amin MN, Jang B, Kim J (2013) **Application of a thermal stress device for the prediction of stresses due to hydration heat in mass concrete structure**. *Construction and Building Materials* 45:192-198, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013. 03.056.

GAMBALE, E. A.; FARIAS, L. A.; GAMBALE, P. G. “**Metodologia para análise paramétrica do fenômeno térmico do concreto massa de uma fundação de torre eólica**”. *Revista Concreto & Construções*. 2023. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2023.109.0001>

KUPERMAN, S.C. **Concreto massa convencional e compactado com rolo para barragens**. In: ISAIA, G.C. *Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações*, Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. Vol II, cap.41, p.1260-1295. São Paulo, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

CALMON, J.L.N. “**Estudio Termico y Tensional en Estructuras Macivas de Hormigon. Aplicacion a Las Presas Durante la etapa de Construccion**”. Tesis Doctoral dirigida por Mirambell Arrizabalaga, Barcelona, mayo de 1995, 649p.

Z. Bofang, **Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete**, first ed., Oxford, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653: materiais pozolânicos — requisitos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

Aniskin N A, Nguyen T C 2020 *Vestnik MGSU* 15(3) 380–398.

KUPERMAN, S. **Resfriamento do concreto com gelo evita a formação de trincas**. 17 out. 2016. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/>. Acesso em: [02/12/2024].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7214: Cimento Portland - Determinação do calor de hidratação**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12006:1990 – Cimento Portland – Determinação do calor de hidratação – Método da garrafa de Langavant**. Rio de Janeiro, 1990.

GUILGE, Mario; PINHEIRO, Gustavo; OLIVEIRA, Antonio M. de; ALEIXO, Daniel. **Inovação tecnológica para concretagem de bases eólicas frente aos desafios térmicos**. *Mantenedor*, 2022. DOI: 10.4322/1809-7197.2022.106.0003.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 207.2R. **Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete**. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2007. p. 1-32.

BOBKO, C. P.; SERACINO, P.; ZIA, P.; EDWARDS, A. **Crack Free Mass Concrete Footings on Bridges in Coastal Environments. Technical Report**. North Carolina State University, Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, 2014.

GUILGE, Mario; PINHEIRO, Gustavo; OLIVEIRA, Antonio M. de; ALEIXO, Daniel. **Inovação tecnológica para concretagem de bases eólicas frente aos desafios térmicos**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 15, n. 6, 2022. DOI: 10.4322/1809-7197.2022.106.0003.

FUNAHASHI JR., Eduardo Issamu; KUNINARI, Thomas Hideki; KUPERMAN, Selmo Chapira; VICENTE, Grazielle Ribeiro; FARINACIO, Caio Farto. **Alternativas executivas para controle da elevação da temperatura do concreto massa de edificações**. Estruturas em Detalhes, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2023.109.0003>.

SHEN, Yanjun et al. **Efeito de diferentes teores de gelo na transferência de calor e nas propriedades mecânicas do concreto**. *Cold Regions Science and Technology*, v. 199, 2022. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103570.

MATOS, Paulo Ricardo de; JUNCKES, Ricardo; PRUDÊNCIO JR., Luiz Roberto. **Influência do uso de cinza volante na elevação adiabática de temperatura e resistência à compressão de concretos**. *Revista Matéria*, v. 24, n. 2, 2019. ISSN 1517-7076.

HAN, Fanghui; HE, Xuejiang; ZHANG, Zengqi; LIU, Juanhong. **Calor de hidratação de escória ou cinzas volantes no ligante composto em diferentes temperaturas**. *Thermochimica Acta*, v. 655, p. 202-210, 2017. DOI: 10.1016/j.tca.2017.07.002.

H.G. Ellerbrock, S. Spung, K. Kuhlmann, **Particle size distribution and properties of cements: Part III. Influence of grinding process**, *Zem-Kalk-Gips* 43 (1) (1990) 13±19.