



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

YURI VIANA GOMES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
DOSAGEM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
REFRIGERADO EM REGIÕES DE CLIMA QUENTE**

Palmas/TO
2021

YURI VIANA GOMES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
DOSAGEM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
REFRIGERADO EM REGIÕES DE CLIMA QUENTE**

Trabalho de Graduação submetido ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, UFT, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro

Palmas/TO
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

G633a Gomes, Yuri Viana .
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO REFRIGERADO EM REGIÕES DE CLIMA
QUENTE. / Yuri Viana Gomes. – Palmas, TO, 2021.
66 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2021.

Orientador: Fábio Henrique de Melo Ribeiro

1. Concreto. 2. Refrigerado. 3. Fundações. 4. Hidratação. I. Título

CDD 624

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

FOLHA DE APROVAÇÃO

YURI VIANA GOMES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO REFRIGERADO EM REGIÕES DE CLIMA QUENTE

Trabalho de Graduação submetido ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, UFT, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado pela seguinte banca examinadora:

Data de aprovação: 28 / 06 / 2021

Banca Examinadora



Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro, UFT



Prof. Me. Rafael Alves Amorim, UFT



Prof. Dr. Roldão Pimentel de Araújo Júnior, UFT

Palmas- TO, 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pelo dom da vida e sua eterna compaixão e amor por todos nós.

Agradeço à minha mãe, Dilma, minha irmã Stela, e a minha vó, Maria, por estarem incessantemente ao meu lado, pela criação e pelo amor dedicado em 26 anos de minha vida, pelo exemplo e preocupação, pela torcida e busca do meu sucesso, sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço à minha amada namorada Gabrielly Cintra, que diante de todas as dificuldades se mantém firme e imperativa em me trazer forças e apoiar meus sonhos.

Agradeço ao meu grande e melhor amigo Mateus Braga, pelo companheirismo de uma vida, pelos esforços mesmo nas dificuldades e pelo respeito e carinho comigo.

Agradeço a minha grandessíssima amiga Luísa Reis, pela dedicação neste trabalho, pelo auxílio inestimável e companheirismo.

Agradeço ao meu grande amigo Ítalo Eduardo, pela ajuda prática, apoio moral e companheirismo diante das maiores dificuldades.

Agradeço ao professor Roldão Araújo, pela excelência e disposição em difundir maximamente conhecimento, pelo companheirismo e apoio na construção de conhecimento e caráter como engenheiro.

Agradeço imensamente ao professor Rafael Amorim, pelo companheirismo e palavras de apoio mesmo nos momentos de maior dificuldade ao longo do percurso acadêmico, tenho-o como um exemplo de amizade, dedicação e responsabilidade quanto ao ofício do ensino.

Agradeço ao meu orientador, Fábio Ribeiro, pela oportunidade e dedicação em desenvolver este trabalho, pelo exercício da orientação e pelo apoio pessoal também em momentos de dificuldade.

Por fim, dedico integralmente todos os esforços contidos neste trabalho ao meu pai, Gregório, o maior homem que já conheci, meu maior exemplo de respeito e persistência, minha âncora. Agradeço por ter sido o melhor pai do mundo nos 25 anos que compartilhamos neste plano, pela força incessante, apoio incondicional e principalmente por ter sempre partilhado dos meus maiores sonhos, você pai, é meu maior herói e será para todo o sempre vivo em meu coração, no meu sangue e nas minhas ações como homem. O céu é teu, pois tu és vivo no lar de cristo, e assim será para todo o sempre, te amarei infinitamente e eternamente.

RESUMO

O concreto é um dos materiais mais amplamente utilizados no mundo, sua aplicação é variada e exige cuidados. A natureza exotérmica da reação de hidratação do cimento confere ao concreto um comportamento potencialmente perigoso se não for bem gerenciado, quando aplicado em grandes volumes como barragens ou fundações, o que se intensifica ainda mais em regiões de clima quente. Os objetivos envolveram a análise do comportamento térmico, de resistência e características específicas do elemento estrutural quando constituído, além dos elementos tradicionalmente utilizados, por sílica como *filler* auxiliar ao cimento e principalmente pelo gelo que substitui a água em proporções bem definidas. A partir das informações obtidas em laboratório, esta pesquisa se dispôs a reunir os dados de modo a simulá-los no *software* HACON³, que foi capaz de detalhar o potencial de surgimento de fissuras no elemento estrutural, as simulações demonstraram intensa redução na incidência do problema patológico quando há o controle térmico utilizando tanto o gelo quanto a sílica.

Palavras-chave: Concreto resfriado. Concreto refrigerado. Calor de hidratação. Sílica. Gelo. Simulação. HACON. Concreto massa. Blocos de fundação.

ABSTRACT

The concrete is one of the most widely used materials in the world, its application varies and demands caution. The exothermic nature of the hydration reaction grants to the concrete a potentially dangerous behavior if not well managed, when used in large volumes as of dams and foundations, which intensifies even further in regions with a warmer climate. The objectives contained the analysis of the thermic behavior, the resistance and specific characteristics of the structural element when built, in addition to traditional elements used, such as silica as an auxiliary filler and most importantly ice which replaces water in well defined proportions. From the information obtained in lab, this research aimed to unite the data in such a way to simulate it in the software HACON³, which was able to detail the potential occurrence of cracks in the structural element, the simulations showed intense reduction in the incidence of the pathological problem when there is thermic control using such ice as silica.

Keywords: Chilled concrete. Cooled concrete. Hydration heat. Silica. Ice. Simulation. HACON. Mass concrete. Foundation blocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forno Rotativo De Cimento	14
Figura 2: Agregados Graúdo E Miúdo, Respectivamente	15
Figura 3: Gráfico de comportamento térmico durante processo de hidratação	18
Figura 4: Grau De Restrição À Tração Na Seção Central	20
Figura 5: Resistência à compressão média das composições da classe (A) C30 e (b) C70.....	24
Figura 6: 1) Bloco de concreto flexível no Edifício Urban Terraço;2) procedimento de concretagem.....	27
Figura 7: Moldagem dos corpos de prova.....	31
Figura 8: Fluxograma dos ensaios a serem realizados	32
Figura 9: Termômetro e termopares inseridos nos corpos de prova.....	33
Figura 10: Ensaio De Compressão Axial	34
Figura 11: Corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão	35
Figura 12: Ensaio brasileiro de tração, vista da face superior.....	36
Figura 13: Característica granulométrica da Brita.....	38
Figura 14: Característica granulométrica da Areia.....	38
Figura 15: Ensaio de abatimento.....	41
Figura 16: Resultados dos ensaios de abatimento.....	41
Figura 17: A média das temperaturas demonstra o impacto da adição de gelo e sílica.....	43
Figura 18: Gráfico do comportamento térmico dos traços ao longo das primeiras 7 horas.....	44
Figura 19: Parâmetros iniciais de simulação – Materiais.....	46
Figura 1: Parâmetros iniciais – Restrições.....	47
Figura 21: Inserção de dados do traço 1.....	48
Figura 2: Inserção de dados do traço 3.....	48
Figura 23: Inserção de dados do traço 6.....	49
Figura 24: Temperatura máxima – Traço 1.....	49
Figura 25: Resistência à tração – Traço 1.....	50
Figura 26: Stress máximo – Traço 1.....	50
Figura 27: Temperatura máxima - Traço 3.....	51
Figura 28: Resistência à tração - Traço 3.....	51
Figura 29: Stress máximo - Traço 3.....	51
Figura 30: Temperatura máxima - Traço 6.....	52
Figura 31: Resistência à tração - Traço 6.....	52
Figura 32: Stress máximo - Traço 6.....	53
Figura 33: Razão entre resistência e tensões solicitantes na idade crítica.....	54
Figura 34: Gráfico dos dados de resistência à compressão aos 28 dias.....	56
Figura 35: Gráfico de resistência à tração por compressão diametral.....	57
Figura 36: Gráfico dos valores de módulo de elasticidade.....	57
Figura 37: Gráfico do índice de porosidade.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Calor de hidratação de compostos puros, em j/g.....	16
Tabela 2: Comparação entre os valores de calor de hidratação dos compostos do Cimento Portland por Coutinho (2006) e Neville (1997), em cal/g.....	16
Tabela 3: Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias	24
Tabela 1: Ensaios realizados no estado endurecido para cada um dos 6 traços.....	28
Tabela 2: Ensaios de caracterização.....	39
Tabela 3: Dados de dosagem.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.a.	Ao ano
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
CP-II E	Cimento Portland tipo II composto com escória
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
NBR	Norma Brasileira
NBR NM	Norma Brasileira + Norma Mercosul

LISTA DE SÍMBOLOS

- Ca - Consumo de água
- Cc - Consumo de cimento
- Cb - Consumo de agregado graúdo
- Vc - Volume compactado
- Cm - Consumo do agregado miúdo
- Vm - Volume de agregado
- $\gamma_{a,b,c}$ - massas específicas da água, agregado graúdo e cimento, respectivamente
- δ_b - massa unitária do agregado graúdo
- fcd - resistência à compressão (MPa)
- F - carga máxima obtida no ensaio (kN)
- d - diâmetro do corpo de prova (mm)
- π - pi (3,14)
- ftd - resistência à tração (MPa)
- F - carga máxima obtida no ensaio (kN)
- d - diâmetro do corpo de prova (mm)
- L - altura do corpo de prova (mm)
- Ecs - módulo de deformação Secante
- st - tensão de tração;
- Kr - grau de restrição;
- E - módulo de elasticidade;
- j - coeficiente de fluência;
- a - coeficiente de dilatação térmica;
- DT - gradiente de temperatura;
- CP - corpo de prova;
- C-S-H - silicato de cálcio hidratado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivos.....	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	CONCRETO.....	15
2.1.1	Cimento	15
2.1.2	Agregados	16
2.1.3	Sílica ativa	17
2.1.4	Processos químicos e calor de hidratação.....	17
2.2	RETRAÇÃO TÉRMICA E FISSURAÇÃO.....	19
2.2.1	Manifestações patológicas em decorrência das altas temperaturas	19
2.2.2	Mecanismo de fissuração.....	20
2.2.3	Análise térmica	22
2.3	MÉTODOS DE REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO.....	22
2.3.1	Uso de <i>Fillers</i>	23
2.3.2	Tubos de arrefecimento	23
2.3.3	Concretagem em Camadas	23
2.3.4	Condicionamento dos agregados	24
2.4	Concreto refrigerado com gelo	24
2.5	Concreto refrigerado em fundações de bloco flexível.....	26
2.6	HACON 3.1	26
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	METODOLOGIA DA PESQUISA	29
3.1.1	Escopo	29
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	29
3.2.1	Ensaio de consistência por abatimento do tronco de cone	33
3.2.2	Ensaio de calorimetria e condução.	33
3.2.3	Ensaio de resistência à compressão.	34
3.2.4	Ensaio de resistência à tração.	36
3.2.5	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade.	37
3.2.6	Ensaio de determinação de absorção de água por imersão.....	38
3.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40

4.1	TESTE DE ABATIMENTO	41
4.2	ENSAIOS DO ESTADO ENRIJECIDO E CALORIMETRIA	43
4.2.1	Calorimetria de condução	43
4.2.2	Simulação	46
4.2.3	Resistência à compressão	56
4.2.4	Resistência à tração	57
4.2.5	Módulo de elasticidade	58
4.2.6	Porosidade	58
5	CONCLUSÕES	60
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	ANEXO DE TABELAS COMPLEMENTARES.....	64

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, seu emprego, no entanto, exige cuidados que estão diretamente ligados às suas características e comportamento. A natureza da reação de hidratação do *Cimento Portland* consiste em um processo químico de endurecimento exotérmico, ou seja, libera energia em forma de calor. Quando aplicada ao contexto de grandes volumes, essa propriedade gera um gradiente de temperatura dentro dos maciços ao ponto de induzir o surgimento de fissuras que descaracterizam o atributo monolítico da estrutura, diminuindo sua resistência e durabilidade (GADJA; VANGEEM, 2002).

Em Palmas, estado do Tocantins, há também de se considerar o fator climático, que de acordo com os dados da normal climatológica fornecidos pelo INMET foram registrados na cidade, entre os anos de 1981 e 2010, temperaturas que variaram entre 13,7 °C até 41,5 °C em um único mês. Ou seja, a amplitude máxima diária pode ultrapassar os 15 °C, tendendo a intensificar a variação térmica dentro do elemento estrutural.

Nesse âmbito, faz-se necessária a busca por soluções no sentido de controlar as variações térmicas potencialmente danosas a um empreendimento e, conseqüentemente, aos seus usuários. O concreto refrigerado é um dos métodos mais difundidos neste sentido, sendo utilizado a princípio em obras de grande porte que requerem aplicação de altos volumes do material, tais como pontes, barragens e fundações de torres eólicas. Mais recentemente aplica-se também em blocos de fundação flexível.

O arrefecimento pode ser executado de diversas formas, desde pelo uso de nitrogênio líquido até por meio da substituição da água de amassamento por gelo (CARMONA; CARMONA, 2013), este último o mais comum e também o que será abordado neste trabalho.

Posto isto, este projeto consiste na análise do comportamento do concreto refrigerado frente ao concreto convencional, considerando as condições climáticas de Palmas-TO, para tal foram avaliados diferentes traços do concreto (com e sem sílica ativa) com diferentes teores de gelo, variando entre 0% gelo e 100% água, 50% gelo e 50% água e 70% gelo e 30% água. A partir daí, foram avaliadas características do concreto no estado fresco e endurecido, como ensaio de abatimento, massa específica, absorção de água, comportamento mecânico (resistência e deformabilidade) e comportamento térmico ao longo do tempo, em temperatura ambiente.

1.1 JUSTIFICATIVA

Do ponto de vista técnico, o interesse da pesquisa surge na intenção de impedir o surgimento de fissuras e potenciais problemas patológicos decorrentes do excesso de calor liberado, através do uso do concreto refrigerado aplicado em fundações em regiões de clima quente.

A fim de amparar este trabalho, convém citar o estudo realizado por Helene *et al.* (2016) no edifício Brookfield Century Plaza em São Paulo, com dois blocos de fundação contendo 1.200 m³ (um mil e duzentos metros cúbicos) de concreto cada um. Nele foi possível notar a diminuição no pico de temperatura de 20% se comparado à temperatura ambiente, o que segundo o autor, gerou resultados satisfatórios e dentro do que era tecnicamente esperado.

Ainda é possível mencionar situação semelhante documentada por Monte Junior *et al.* (2016), que em escala menor, fez uso da mesma técnica com o objetivo de reduzir o calor produzido pela concretagem da fundação em um edifício residencial em Natal-RN. Entretanto, a conclusão dos autores neste caso não foi satisfatória, uma vez que a temperatura de pico (55°C) estava acima do estipulado em projeto, provavelmente em função da característica climática ambiental da localidade, uma vez que Natal é, de modo geral, mais quente que São Paulo.

Na prática, estes resultados evidenciam a necessidade de se estudar mais profundamente a dinâmica de ação deste método de concretagem em regiões de clima quente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar comparativamente as diferenças no desempenho e aplicabilidade entre o concreto convencional sem aditivos e o concreto refrigerado utilizando 0%, 50% e 70% de gelo como substituto da água de amassamento e sílica ativa.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Avaliar as diferenças nas propriedades de resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade e absorção do concreto refrigerado frente ao concreto convencional;

2. Avaliar as diferentes propriedades de massa específica e fluidez do concreto refrigerado frente ao convencional no estado fresco;
3. Avaliar as diferenças no comportamento térmico do concreto nas proporções de 0%, 50% e 70% de gelo como substituto da água de amassamento no ambiente de Palmas e por meio do uso do *software HACON 3.1*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCRETO

O concreto é o material construtivo mais largamente empregado no mundo, sendo depois da água, o material que mais se consome (DINIZ, 2009). De modo geral, esse pode ser definido como qualquer composto resultante da utilização de meio cimentante constituído por uma mistura de cimento, água e agregados (miúdo e graúdo), usualmente, pode conter também uma larga gama de produtos como pozolanas, escória de alto-forno, adições minerais, aditivos, polímeros e sílica ativa, cuja função é agregar ao produto final, características de interesse do usuário em circunstâncias onde existem necessidades específicas (A.M. NEVILLE; J.J. BROOKS, 2010, p. 2).

2.1.1 Cimento

Embora o início da utilização do cimento hidráulico remonte aos tempos da Idade Antiga, foi somente em 1824 que o britânico Joseph Aspdin patenteou e popularizou o uso do *Cimento Portland*, obtido essencialmente através da mistura de material cálcico (giz ou calcário), sílica e alumina, o composto é moído e aquecido até temperaturas de 1.400°C, parcialmente fundido, recebe o nome de clínquer, este que por sua vez é misturado ao sulfato de cálcio e posteriormente moído novamente até gerar um pó fino como produto final (NEVILLE; BROOKS, 2010, p. 8).

Tipicamente em Palmas, para aplicação em estruturas de concreto armado de maior porte (como edifícios de mais de quatro pavimentos), utiliza-se o cimento do tipo II (CP II-Z-32) composto com pozolana.

Figura 3: Forno Rotativo de Cimento



Disponível em: <<https://abcp.org.br/imprensa/resolucao-conama-499-20-2/>> Acesso em nov. 2020

2.1.2 Agregados

Os agregados tem função essencial na constituição do concreto, sendo responsáveis por reduzir a retração e os custos, alcançando de 70 a 80% de todo o volume do maciço (SHETTY, 2000, p. 66). O papel do agregado na peça de concreto consiste em ocupar espaços, regulando a granulometria do elemento e garantindo resistência condizente com o material cimentante. De acordo com a NBR 7211, são classificados em dois tipos: agregado graúdo (normalmente pedregulhos de brita inerte e proveniente de rochas estáveis) e agregado miúdo (areia de origem natural ou artificial resultante do britamento de rochas estáveis).

Figura 4: Agregados graúdo e miúdo, respectivamente



Disponível em: <<https://www.guiadoconstrutor.com.br/blog/a-importancia-de-areia-e-pedra-na-construcao-civil>> Acesso em 1 nov. 2020

2.1.3 Sílica ativa

Dentre os variados gêneros de aditivos aplicáveis ao concreto, destaca-se a sílica ativa por sua dupla função: além das melhoras nas características de trabalhabilidade, resistência e durabilidade do produto final diminuindo a porosidade, o emprego deste material é paralelamente benéfico ao meio ambiente, uma vez que tal produto originalmente possui como destinação o descarte, conforme discutido por Silva, Felix e Machado (2016).

Nas análises no MEV foi possível confirmar que a sílica ativa reage de forma positiva com o concreto, aumentando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que atua de forma positiva na resistência do concreto, além de melhorar a ligação da pasta com os agregados e deixá-lo menos poroso, mais denso e com uma menor zona de transição entre agregado-pasta, sendo viável seu uso em pavimentações. (SILVA; FELIX; MACHADO, 2016, p. 7).

“A utilização da sílica ativa trouxe maiores benefícios ao concreto com relação à durabilidade, reduzindo a carga total passante e o coeficiente de difusão dos concretos.” (HOFFMANN, 2001, p. 104)

2.1.4 Processos químicos e calor de hidratação

O processo de endurecimento do concreto ocorre através de uma reação exotérmica de hidratação, a energia térmica liberada é chamada de *calor de hidratação*. Segundo Shetty (2000, p. 17) o cimento anidro reage com a água quando misturados, formando compostos hidratados de baixa solubilidade. O calor é, na maioria dos casos, causado pela reação da solução dos aluminatos (C_3A) e sulfatos (C_3S), de modo que o comportamento térmico muda drasticamente uma vez que esta é inibida pela formação de gesso.

Ao reduzir as proporções de C_3A e C_3S , o calor de hidratação (e a velocidade de liberação) do cimento pode ser reduzido. A finura do cimento afeta a taxa de liberação, mas não o total de calor liberado, que pode ser controlado no concreto pela quantidade de cimento na mistura (riqueza). (NEVILLE; BROOKS, 2010, p. 15).

Ainda segundo Neville (1997 *apud* SOUSA; SILVA; CASTRO, 2014), observa-se os seguintes valores típicos de calor de hidratação dos aluminatos e silicatos:

Tabela 4: Calor de hidratação de compostos puros. em J/g

Composto (J/g)	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Calor de Hidratação	502	260	867	419

Fonte: Neville (1997 apud Sousa; Silva; Castro; 2014).

Tabela 5: Comparação entre os valores de calor de hidratação dos compostos do cimento Portland por Coutinho (2006) e Neville (1997), em cal/g.

Compostos (cal/g)	Coutinho (2006)	Neville (1997)
C ₃ S	117 ± 7	120
C ₂ S	54 ± 4	62
C ₃ A	279 ± 23	207
C ₄ AF	90 ± 22	100

Fontes: Verbeck & Foster, (1950 apud Neville; 1997), Coutinho (2006), Sousa; Silva; Castro (2014)

A água dissolve os compostos que iniciam a reação de hidratação e posteriormente solidificam-se através do processo de cristalização, a transformação de estado ocorre em função da natureza da reação com a água, que transporta o material sólido para um estado menos energético e mais estável. Deste modo, a energia removida do sistema é dissipada em forma de calor e o resultado é um elemento em condição monolítica e rígida, como detalhado por Mehta e Monteiro (1994).

A reação de hidratação tem início no intervalo compreendido entre os primeiros 15 a 30 minutos após a mistura, podendo variar em função do tipo de concreto e da natureza dos aditivos utilizados. Como citado anteriormente, a finura do material da composição altera a velocidade da reação, quanto mais fino, mais rápida a emissão de calor e maior a variação térmica em menor espaço de tempo. Outro fator a se considerar logo de início é o teor de gipsita que reage com o silicato tri cálcico, formando etringita, esta que por sua vez age de modo a obstruir as interações entre os reagentes, diminuindo a velocidade do processo químico e, conseqüentemente, estendendo a emissão de calor ao longo do tempo, com menores máximas de temperatura.

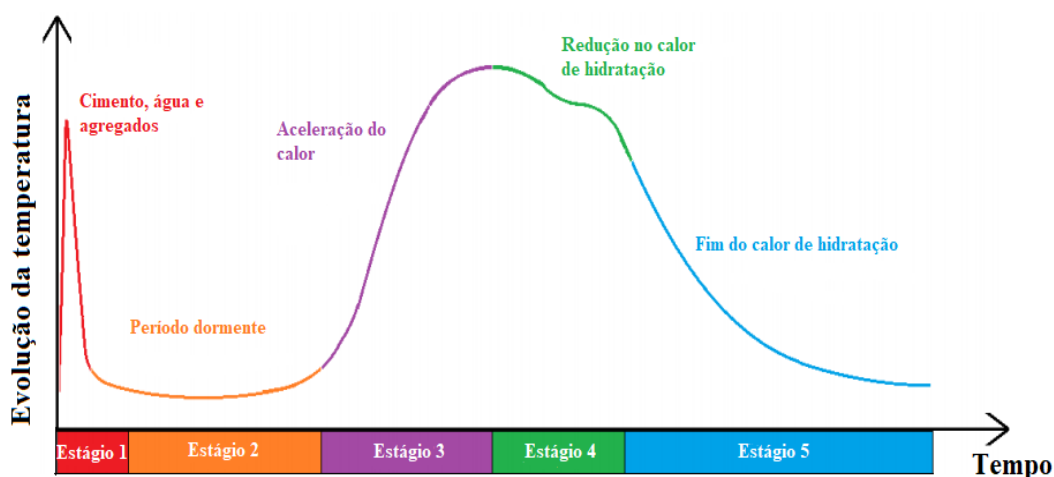
Ainda segundo Ge (2005) apud Lagundžija e Thiam (2017), o processo de hidratação pode ser dividido em 5 estágios, sendo eles:

- O primeiro estágio está relacionado ao início das reações, conforme detalhado no parágrafo acima, compreende usualmente a primeira meia hora após a mistura.
- As 5 horas seguintes são consideradas o “estágio dormente”, onde há taxa quase constante de hidratação, alta dispersão de íons suspensos e dissolvidos na água.
- O segundo estágio é caracterizado pelo aumento gradual na temperatura até o pico, processo este que pode demorar horas ou mesmo dias, sendo melhor

caracterizado pela cristalização dos silicatos de cálcio hidratados formados pelo aumento na permeabilidade da camada previamente formada pela etringita.

- O quarto estágio ocorre imediatamente após o pico de temperatura, e caracteriza-se pela progressiva diminuição na velocidade de emissão térmica, com redução gradual de temperatura.
- O quinto e último estágio pode ser descrito pela rápida perda de energia térmica, onde praticamente toda a água presente na mistura agora já foi substituída pelas formas hidratadas dos íons presentes no material.

Figura 5: Gráfico de comportamento térmico durante processo de hidratação



Fonte: Lagundžija e Thiam (2017, p. 4)

2.2 RETRAÇÃO TÉRMICA E FISSURAÇÃO

2.2.1 Manifestações patológicas em decorrência das altas temperaturas

Conforme a natureza do processo de endurecimento do cimento através da hidratação foi sendo melhor compreendido através do tempo, o formato da aplicação desse material se moldou no sentido de maior eficiência e segurança. De acordo com o que foi exposto no Capítulo 2.1, a reação de endurecimento do concreto apresenta suas dificuldades, especialmente se observado o comportamento térmico do composto:

A fissuração possui grande influência na deformabilidade, estética e durabilidade de concretos, especialmente em concretos elaborados a partir de composições com elevado consumo de cimento para uma determinada proporção de insumos e composições utilizadas em grandes volumes. (ALVES *et al.*, 2017)

Ainda segundo Gadjia, Kaufman e Sumodjo (2005), as estruturas de concreto armado tem se tornado maiores e mais exigentes nos quesitos de resistência e durabilidade. Conseqüentemente, as peças frequentemente adquirem dimensões não usuais, o que demanda maior esforço na ação de tornar o conjunto estrutural aceitável dos pontos de vista de segurança e conforto.

Para tal, faz-se uso de maiores taxas de material cimentante, bem como menor fator água/cimento e, no caso do concreto armado, componentes metálicos reforçados. Essas exigências resultam em maior quantidade de objetos de concreto expostos ao alto calor de hidratação.

Em condições de uso de grandes volumes de concreto como em barragens ou fundações de blocos flexíveis utilizados em edifícios altos, o excesso de calor gerado no processo construtivo pode ocasionar fissurações por retração térmica que reduzem a durabilidade e desempenho geral do maciço, podendo inclusive inviabilizar sua respectiva utilização. Em função disso, o uso de métodos de resfriamento do concreto tem sido amplamente difundido.

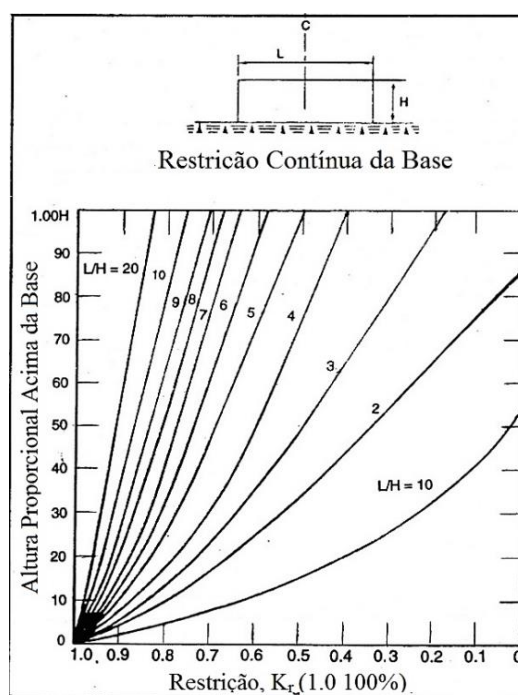
2.2.2 Mecanismo de fissuração

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o processo de fissuração por retração térmica ocorre através da restrição de movimento. Conforme a reação de hidratação desacelera, o concreto passa a gerar menos calor e o aquecimento é atenuado. Em blocos de fundação flexível, no entanto, dado o grande volume da peça, o retardo na taxa de aquecimento e posterior resfriamento não ocorrem de forma uniforme, posto que as regiões extremas tem contato direto com o ambiente externo, elas transferem calor com maior eficiência.

O interior da peça, no entanto, pela condição de confinamento, está submetido a uma taxa de transferência de energia térmica diferente, o que gera um gradiente térmico em toda a peça. Com movimentações de retração em taxas diferentes, surgem tensões de tração que podem superar a resistência à tração do concreto nessa idade jovem, gerando as fissuras. Dependendo das condições gerais da estrutura, dimensões, tipo de material utilizado, utilização do maciço e mesmo qualidade ambientais, a perda de calor residual das reações de hidratação pode levar anos para que ocorra completamente. (Casanova, 1980)

Segundo Santos, Bittencourt e Graça (2011) o grau de restrição em fundações pode ser descrito através de uma escala de 0 a 1, sendo $K_r=1$ aplicável em blocos considerados completamente restritos (do ponto de vista prático de deformação) e $K_r=0$ para blocos considerados livres. O ábaco da Figura 6 relaciona o grau de restrição com as dimensões da peça, sendo L = Largura e H = Altura.

Figura 4: Grau de restrição à tração na seção central



O processo de fissuração pode ser bem descrito em duas fases, sendo elas denominadas fase de expansão e fase de contração. A primeira ocorre no início da concretagem até o momento de máxima temperatura da peça, durante esse período o concreto é mais plástico e possui menor módulo de elasticidade, bem como a expansão do maciço em função do aumento da temperatura, o que gera tensões de compressão no centro da estrutura e de tração nas regiões próximas à superfície. (EMBORG et al., 1997)

A fase de contração inicia-se imediatamente em seguida, e caracteriza-se pelo início da diminuição da temperatura da estrutura. Nesse momento ocorre a redistribuição das tensões no objeto, uma vez que a superfície perde calor facilmente, ela tende a retrair enquanto o interior ainda aquece e expande. (EMBORG et al., 1997)

A restrição de movimento gera tensões superiores aquelas que o maciço de concreto, ainda com pouca idade, é capaz de resistir. Submetido à condição de restrição, o maciço tende a fraturar com fissuras geometricamente ortogonais ao plano de restrição (BLOMDAHL et al., 2015).

2.2.3 Análise térmica

Para correlacionar o grau de restrição “Kr” citado no item 2.2.2, utiliza-se o método ACI (*American Concrete Institute*) baseando-se na resistência característica do concreto à tração para definir a temperatura máxima em que o maciço se mantém resistente às ações das tensões geradas pelo gradiente térmico, dependendo principalmente de três fatores: módulo de elasticidade, grau de restrição e relaxação ocasionada pela fluência do concreto.

$$\sigma_t = Kr * \left[\frac{E}{1 + \phi} \right] * \alpha \Delta T$$

sendo:

σ_t : tensão de tração;

Kr : grau de restrição;

E : módulo de elasticidade;

ϕ : coeficiente de fluência;

α : coeficiente de dilatação térmica

ΔT : gradiente de temperatura

Na prática, o uso do concreto refrigerado, como será abordado mais adiante, resulta na diminuição do pico de temperatura em relação ao usual, gerando um valor de ΔT menor, observa-se então através da fórmula que, nesse cenário, há a diminuição das tensões de tração causadas pelo gradiente térmico, quando o valor da tensão é inferior à resistência característica do concreto dentro dos parâmetros de minoração aceitáveis, considera-se que a variação de temperatura é aceitável.

2.3 MÉTODOS DE REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO

O uso de concreto massa aplicado às obras constituídas de grandes peças maciças tais como barragens ou blocos de fundação representa diversos desafios aos projetos, uma vez que a característica térmica do material utilizado tem grande potencial gerador de fissuras, conforme descrito na Seção 2.2. No sentido de viabilizar tais obras, existem métodos de contorno que

podem ser adotadas para reduzir o calor gerado pelas reações químicas que ocorrem durante o processo de endurecimento, alguns desses métodos são inclusive aplicados paralelamente em uma mesma situação. Em vista disto, faz-se necessário citar os seguintes métodos:

2.3.1 Uso de *Fillers*

Fillers são substâncias inertes que em geral contribuem para reduzir o uso de material cimentante e, como o nome sugere (em inglês, “preenchedor”), ocupar potenciais espaços vazios. Além disso, alguns desses materiais por possuírem características dinâmicas específicas podem contribuir para a resistência global do material. Dentre os principais *fillers* utilizados é interessante mencionar a Sílica, Calcário e até mesmo as cinzas volantes.

A redução na variação térmica através do uso destes materiais se dá uma vez que a cinza ou a sílica, por exemplo, substituem parte do material que originalmente reage com a água. Nessa condição, com menor massa reagente, menos calor é liberado.

É possível observar na literatura diversos estudos com diferentes materiais cuja função se aplica à este cenário, através de experimentos foi possível observar a melhora no desempenho térmico do concreto ao substituir parte do cimento por CaO (POPPE; DE SCHUTTER, 2005) ou por sílica ativa na proporção de 10% (LANGAN et al., 2002), ambos gerando em média a redução de 2 graus na temperatura do corpo de concreto com cimento hidratado.

2.3.2 Tubos de arrefecimento

Tubulações de refrigeração são frequentemente utilizadas em concreto massa na Suécia, o sistema baseia-se em uma dinâmica de “radiador” ou “*watercooler*”, onde as tubulações são inseridas no elemento estrutural para realizar a troca térmica (CHARPIN et al., 2004). No interior do tubo água é bombeada e transfere a energia térmica em excesso dentro do maciço para um radiador externo à estrutura, onde este pode ser dissipado ao ambiente. Segundo Quang, Xie e Zhong (2015), o sistema foi utilizado pela primeira vez na construção da famosa hidroelétrica *Hoover Dam* nos Estados Unidos em 1930.

2.3.3 Concretagem em Camadas

Conforme o que foi disposto em 2.2.3, é possível avaliar o comportamento térmico de um maciço considerando suas condições iniciais geométricas, ambientais e características do material utilizado. Através disso, ao se observar algum impedimento na concretagem em função

das amplas dimensões de uma peça estrutural, é possível realizar a concretagem em camadas, de modo a permitir que volumes menores dissipem melhor o calor gerado pela estrutura nos seus estágios iniciais.

Em regiões de clima quente é ideal observar também a variação térmica ao longo do dia, uma vez que os horários ideais para a concretagem ocorrem ao longo da noite, quando as temperaturas são mais amenas e apresentam menor variação, bem como o intervalo entre as concretagens, observando o perfil térmico do maciço.

Segundo Helene (2007), durante a etapa de definição do projeto de concretagem do bloco de fundação do edifício Brookfield Century Plaza, em uma análise de comportamento térmico, os responsáveis optaram por alterar o número de camadas de concretagem de 2 para 4, segundo suas simulações, isso causou uma redução de mais de 10 graus no pico de temperatura do bloco (de 64,6°C para 54°C), além disso, foi determinado o intervalo de 3 dias entre concretagens.

2.3.4 Condicionamento dos agregados

De acordo com Sundblom (2004), a característica dos agregados influencia em mais de uma forma a ocorrência do calor de hidratação no maciço. É possível, a princípio, resfriar os próprios agregados de modo a reduzir o calor global do elemento, balanceando o calor gerado pela reação. Além disso, o comportamento do agregado afeta a necessidade do uso de maior ou menor quantidade de cimento, o que pode elevar ou reduzir o calor dissipado. Blomdahl et al. (2015) também menciona a propriedade de expansão e contração dos agregados como fator relevante, uma vez que este atributo pode afetar a ocorrência de trincas.

2.4 CONCRETO REFRIGERADO COM GELO

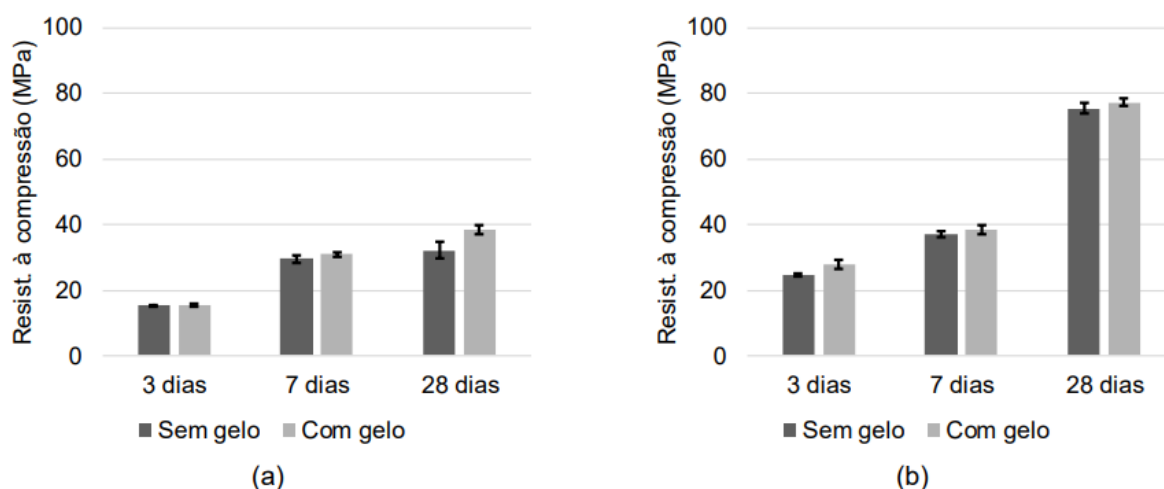
Posto o que foi comentado até então, a problemática do aquecimento nos blocos de fundação exige soluções de resfriamento, dentre elas destaca-se o uso de gelo como substituto da água de amassamento em diferentes proporções, no objetivo de reduzir o calor global máximo e atenuar o gradiente térmico ao longo da cura.

“A substituição da água de amassamento por gelo durante a produção do concreto é frequentemente realizada em obras de grande porte com o objetivo de se evitar, através do resfriamento do concreto, a ocorrência de fissuras ocasionadas por retração térmica.”

(ALVES et al., 2017)

Alves *et al.* (2017) observou-se diminuição significativa na temperatura do concreto C30 dentro das condições do experimento feito, onde inicialmente as misturas sem gelo se mantiveram próximas aos 23°C, o traço com gelo não ultrapassou os 15,3°C. Ademais, além da melhoria no desempenho térmico foi possível observar também o aumento na resistência inicial e potencialmente na resistência após os 28 dias do concreto, uma vez que a diminuição da temperatura tende a reduzir a ocorrência de microfissuras na estrutura.

Figura 5: Resistência à compressão média das composições da classe (a) C30 e (b) C70



Fonte: Alves *et al.*, 2017

Conforme Assioli *et al.* (2017) experimento semelhante contendo variados tipos de cimento obteve resultados semelhantes de resistência à compressão aos 7 dias de idade, neste caso, substituiu-se 50% da água de amassamento por gelo:

Tabela 6: Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias

Traço	Cimento	Com adição de gelo	Sem adição de gelo
1:50	CP1	16,65 Mpa	11,96 Mpa
	CP2	14,22 Mpa	14,01 Mpa
	CP3	17,40 Mpa	13,60 Mpa
1:3,5	CP1	20040,11 kgf	15690,00 kgf
	CP2	23419,53 kgf	14330,00 kgf
	CP3	19442,10 kgf	14910,00 kgf
1:6,5	CP1	8789,28 kgf	7640,00 kgf
	CP2	8997,88 kgf	6740,00 kgf
	CP3	8983,98 kgf	6920,00 kgf

Fonte: Assioli *et al.*, (2017)

Através destes resultados, Assioli *et al.* (2017) e Alves *et al.* (2017) concordam que o uso do gelo é benéfico além de seu propósito principal, uma vez que, na prática, altas resistências a princípio podem reduzir o tempo necessário total de execução de um determinado estágio da estrutura, diminuindo prazos e flexibilizando o cronograma de uma obra.

O ganho de consistência com a redução das microfissuras garante também maior durabilidade da estrutura. Embora possua valor de aquisição superior ao da água, o gelo se mostra uma alternativa competitiva em função das qualidades que agrega às estruturas de concreto, podendo se tornar uma opção viável mesmo em condições onde não há exigência técnica para o seu uso.

2.5 CONCRETO REFRIGERADO EM FUNDAÇÕES DE BLOCO FLEXÍVEL

Tendo sido expostos os conceitos teóricos e práticas experimentais que norteiam este trabalho, faz-se relevante a demonstração do uso destes em campo, portanto, serão apresentados três casos:

Edifício Brookfield Century Plaza

Localizado em São Paulo capital no bairro de Alphaville, o edifício Brookfield apoia-se em dois blocos de concreto flexível cujas dimensões são 28,4m, 18,6m e 4,5m de altura, somando o equivalente a 2,400m³ de volume. Para este empreendimento, foi adotado o uso de cimento de altíssima resistência, ultrapassando 70Mpa. Conforme descrito por Britez, (2016), utilizou-se nesta obra o cimento do tipo CP III-40 com adição de metacaulim, onde toda a água de amassamento foi substituída por gelo.

A escolha do traço e composição do material utilizado se mostraram apropriadas, já que houve a diminuição de 20% no pico de temperatura considerando a variação total da quantidade de calor emitido, o que também reduz a possibilidade de fissuras.

Além do já descrito, é justo mencionar que também houve aspersão de água no agregado graúdo, o que potencializou ainda mais a diminuição do pico de temperatura.

O valor máximo de temperatura observado por fim foi de 57°C, considerando sempre a temperatura ambiente na localidade, que tende a ser amena se comparada com Palmas/TO.

Edifício residencial em Natal

Conforme apresentado por Monte Junior *et al.* (2016), utilizou-se concreto refrigerado com gelo substituindo água de amassamento em blocos isolados de fundação de concreto. A relação água/gelo foi especificada em dois tipos, em parte dos blocos foi utilizado 40% de gelo e nos demais, 100% de gelo. O cimento utilizado possuía F_{ck} de 40Mpa.

Os autores citam que tanto nas configurações de 40% quanto em 100% de uso de gelo, o elemento estrutural não se manteve abaixo da temperatura determinada como ótima (20°C), tendo sido obtido valor médio dos blocos na casa dos 25°C com pico em 55°C. O valor determinado em projeto muito provavelmente não foi alcançado em função de outro fator que é preponderante na condição térmica do maciço: Natal é uma cidade mais quente que São Paulo do ponto de vista das máximas climáticas, o que provavelmente influenciou diretamente nos resultados deste caso se comparado ao edifício *Brookfield*, isso reforça ainda mais a necessidade de se estudar a dinâmica desse tipo de concretagem em regiões de clima quente.

Edifício Urban Terraço em Palmas

Através de visita técnica feita ao edifício Urban Terraço, localizado na região da Orla em Palmas-TO, algumas informações puderam ser obtidas.

Trata-se de um empreendimento de alto padrão cujo projeto previa o uso de bloco de fundação flexível com 620m² e a escolha do consultor especialista foi pelo uso de concreto refrigerado com gelo na execução. A concretagem foi feita em etapas, tendo todas elas sido executadas à noite em consequência das altas temperaturas do período quente na cidade que ocorrem durante o dia. Imediatamente na chegada do concreto pelos caminhões betoneiras, a temperatura do concreto era aferida utilizando um termômetro a *laser* e um termômetro padrão, o limite máximo aceitável era de 24°C para esta obra. Após a verificação, também efetuava-se o teste de abatimento (*Slump Test*). Atualmente, a edificação encontra-se em estágio de concretagem da superestrutura e apresentou o comportamento desejado dentro do esperado pelos responsáveis, sem fissuras ou outros problemas patológicos.

Figura 6: 1) Bloco de concreto flexível no Edifício Urban Terraço, 2) Procedimento de concretagem



Fonte; Acervo pessoal.

2.6 HACON 3.1

O *software HACON 3.1* possui aplicação no campo de estudo do comportamento térmico do concreto. Na prática, sua utilização pode ser descrita como um conjunto de simulações que avaliam o comportamento térmico de um determinado objeto estrutural em concreto, considerando dados como composição, volume e temperatura, no intuito de verificar a possibilidade de surgimento de fissuras ao comparar o *stress* gerado pela movimentação térmica com a resistência disponível naquela idade (normalmente as maiores solicitações em função da movimentação térmica ocorrem em paralelo ao início do ganho de resistência do concreto).

Desenvolvido conjuntamente pela universidade de *Lund*, Suécia, e a *Vattenfall Utveckling AB*, o *software* foi idealizado inicialmente por Jan Alemo em 1987, no fim dos anos 80 e início dos anos 90 iniciou-se o desenvolvimento do que viria a ser a primeira versão do programa. Mais recentemente, foram adicionadas as interfaces gráficas que permitiam o uso mais intuitivo da aplicação e também a melhor visualização dos resultados através de gráficos, diagramas e tabelas. O *software* é gratuito e pode ser acessado através do site da universidade.

O utilitário faz uso de modelos matemáticos e extensa base de dados para aplicar as simulações, baseando-se no método de elementos finitos, no perfil de aquecimento em função da hidratação, no ganho de resistência do concreto ao longo do tempo e nas condições ambientais informadas pelo usuário (grau de restrição, dimensões do objeto, temperatura ambiente e perfil de temperatura obtido em laboratório).

3 METODOLOGIA

3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1.1 Escopo

A pesquisa consiste na caracterização dos atributos técnicos do cimento utilizado em Palmas/TO na condição de uso de gelo em diferentes proporções, bem como o uso de sílica ativa, totalizando seis tipos de amostra em cinco ensaios diferentes, sendo estes os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção de água e medição de temperatura.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para fins de execução experimental, foi feita uma extensa pesquisa documental em bibliografia especializada nas áreas de concreto de modo geral e concreto refrigerado aplicado a fundações de bloco flexível. Conforme disposto nos objetivos, o trabalho se propõe a conduzir uma série de atividades experimentais de acordo com as seguintes NBRs: 6118, 5738, 5739, 12142, 12819, 9778, 7211, 16605 e 8522.

Desse modo, foram cumpridos os seguintes ensaios:

Caracterização inicial dos materiais:

- Ensaio de granulometria dos agregados (NBR NM 248)
- Ensaio de umidade total (NBR 9939)
- Ensaio de massa específica e absorção de água aparente do agregado graúdo (NM 53:2002)
- Ensaio de massa unitária do agregado miúdo (NBR 7251)
- Ensaio de absorção de água do agregado miúdo (NBR NM 30)
- Ensaio de umidade superficial do agregado miúdo (NBR 9775)
- Ensaio de massa específica do agregado miúdo (NM 52:2003)
- Ensaio de massa específica do cimento (NBR 16605)

Estado fresco:

- Ensaio de determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone (NBR NM 67)
- Obtenção de temperatura através de termômetro no estado fresco.

Estado endurecido (com corpos de prova):

- Ensaio de resistência à compressão de acordo com as NBR 5738 e 5739
- Ensaio de resistência à tração de acordo com a NBR 7222
- Ensaio de módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522
- Ensaio de absorção de água de acordo com a NBR 9778
- Ensaio de calorimetria e condução com termopar.

Tabela 7: Ensaios realizados no estado endurecido para cada um dos 6 traços

Ensaio por traço	Quantidade de CPs	Idades
Compressão	3	28 dias
Tração	2	28 dias
Módulo de elasticidade	3	28 dias
Absorção	3	28 dias
Calorimetria	2	0-3 dias

Fonte: Autoria própria.

Após a realização dos testes de caracterização dos materiais, foi possível definir o traço de acordo com o método ABCP de dosagem, considerando resultados obtidos nos ensaios de caracterização as seguintes variáveis:

Ca - Consumo de água

Cc - Consumo de cimento

Cb - Consumo de agregado graúdo

Vc - Volume compactado

Cm - Consumo do agregado miúdo

Vm - Volume de agregado

$\gamma_{a,b,c}$ - massas específicas da água, agregado graúdo e cimento, respectivamente

δ_b - massa unitária do agregado graúdo

A partir daí, fixou-se uma relação água/cimento em função da resistência característica do material, e os demais teores foram encontrados através das seguintes equações:

$$C_c = \frac{C_a}{x}$$

$$C_b = V_c * \delta_b$$

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right)$$

$$C_m = \gamma_m * V_m$$

Optou-se pela utilização de areia média (que durante a caracterização acabou sendo classificada como areia fina) e brita 1 em função da disponibilidade local e cimento tipo CP-II Z, popularmente utilizado em Palmas. Além disto, também foram determinadas as seguintes variações no concreto:

1. Uso de 0% de gelo e 100% de água de amassamento, sem aditivo.
2. Uso de 50% de gelo e 50% de água de amassamento, sem aditivo.
3. Uso de 70% de gelo e 30% de água de amassamento, sem aditivo.
4. Uso de 0% de gelo e 100% de água de amassamento, com sílica ativa.
5. Uso de 50% de gelo e 50% de água de amassamento, com sílica ativa.
6. Uso de 70% de gelo e 30% de água de amassamento, com sílica ativa.

O traço piloto calculado, no entanto, se mostrou impraticável uma vez que o teor de brita se fez muito alto e havia visivelmente pouca argamassa, uma correção foi feita e reduziu-se o teor do agregado graúdo em 25%. Após a realização dos ensaios, no entanto, dados os resultados marginalmente fora do esperado, foram executados os ensaios de determinação de umidade para os agregados, onde foi possível obter o real fator água/cimento utilizado, sendo este superior ao que foi determinado através do ABCP.

A Sílica ativa foi utilizada tanto em amostras de concreto convencional quanto nas amostras com substituição de gelo, visto que a aplicação desta reduz o teor de cimento no concreto, reduzindo o calor de hidratação de forma independente.

Cada uma das seis variações foi testada em todos os cinco ensaios. Os ensaios de controle tecnológico (resistência axial à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) exigem o mínimo de dois corpos de prova por ensaio e por betonada (três no caso do ensaio de módulo de elasticidade), para os demais ensaios (absorção de água e calorimetria) a norma recomenda três amostras por teste.

Considerando cada ensaio isolado com três amostras, no caso de discrepância acima de 10% nos valores obtidos com relação à média entre elas, os dados referentes à amostra

discordante deverão ser descartados e o valor médio obtido entre as duas restantes será considerado.

Para tanto, é calculado o volume de cada corpo de prova através da fórmula do volume de um cilindro: $\pi * r^2 * h$ sendo as dimensões são $h = 20\text{cm}$ e $r = 10\text{cm}$, portanto $0,0063\text{m}^3$ por amostra ou $0,491\text{m}^3$ para as 78 amostras, considerando a perda de 10%, o volume total de concreto adotado será de $0,55\text{m}^3$.

O concreto foi produzido em doze lotes, cada um relacionado a um dos tipos de amostra. Para a mistura, foi utilizada uma betoneira cujo conteúdo produzirá 11 corpos de prova para os 6 primeiros lotes, destinados aos ensaios destrutivos e de absorção, posteriormente, utilizando o exato mesmo material, nas mesmas condições, os 6 primeiros lotes foram reproduzidos em menor escala, gerando 2 corpos de prova por lote, no intuito de realizar os ensaios de calorimetria. Uma vez tendo sido todo o conteúdo da betoneira misturado, foi realizada a primeira medição de temperatura utilizando o termopar.

Figura 76: Moldagem dos corpos de prova

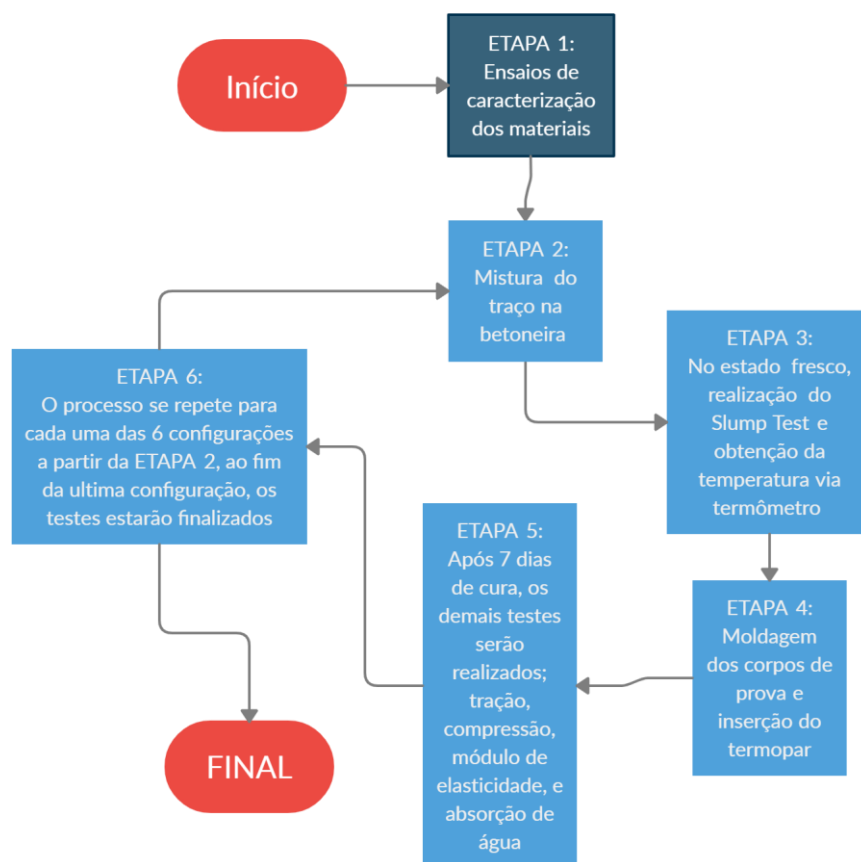


Fonte: Acervo pessoal

Os ensaios de calorimetria e absorção de água ocorreram em laboratório com temperatura do ambiente controlada, sendo possível avaliar com mais precisão a variação do comportamento térmico entre os tipos diferentes de traço. Optou-se ainda pela cura saturada, conforme orientação das normas de controle tecnológico.

A execução dos ensaios ocorreu conforme detalhado no fluxograma:

Figura 87: Fluxograma dos ensaios a serem realizados



Disponível em: *Acervo pessoal do autor*

3.2.1 Ensaio de consistência por abatimento do tronco de cone

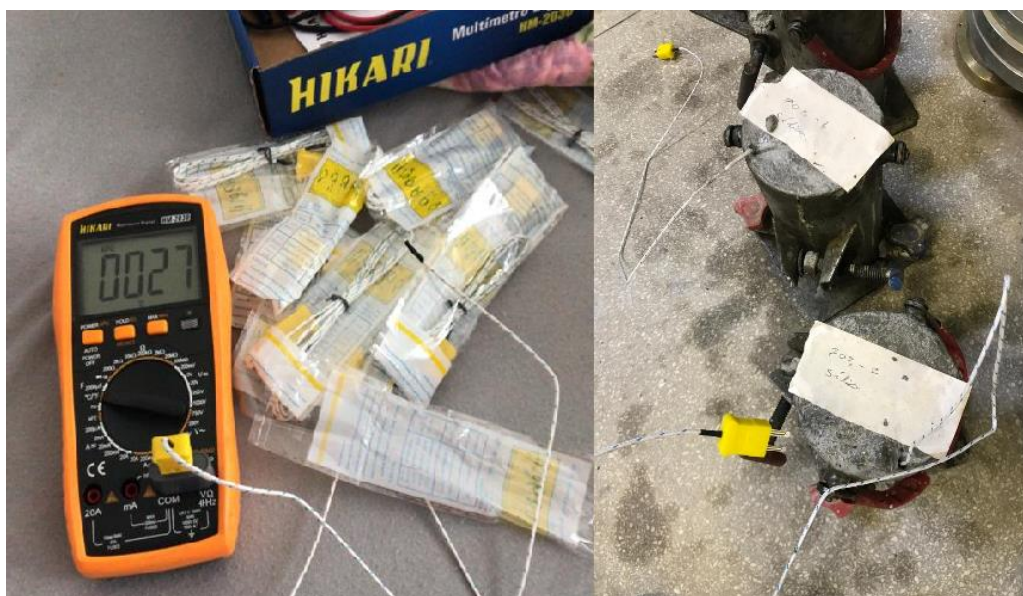
O Slump test foi realizado de forma convencional, conforme consta na norma NBR NM 67. Antes da realização deste ensaio a temperatura foi medida utilizando um termômetro convencional.

3.2.2 Ensaio de calorimetria e condução.

O ensaio de calorimetria de condução foi feito através do uso de um sistema manual de anotação de temperatura, o método consiste na inserção de um fio de termopar no concreto ainda fresco até a metade da altura do molde (10cm). Os dados gerados pelo termômetro foram anotados em frequência horária durante as primeiras 6 horas manualmente, sendo a primeira leitura feita às 10 horas da manhã do dia de início, indo até as 18 horas. Nos dias seguintes, a leitura foi realizada nos horários de 9 h, 14 h e 20h, processo que inicialmente deveria ser

realizado durante os 2 dias subsequentes, totalizando 3 dias de medida para cada configuração, o que, no entanto, não se fez necessário, uma vez que, tendo passado as primeiras 24 horas, os corpos de prova já se mantinham em equilíbrio térmico com o ambiente, sem alterações ativas nas temperaturas oriundas das reações exotérmicas de hidratação.

Figura 9: Termômetro e termopares inseridos nos corpos de prova



Fonte: Acervo pessoal

De acordo com Campos (2012), a partir do gráfico horário gerado pela variação da temperatura de cada amostra, é possível determinar também o tempo do início e fim de pega a partir da curva característica de elevação da temperatura considerando o início como sendo o momento do término do período dormente e, conforme Taylor (1990); Mehta et al. (1994); Neville (2013), o fim da pega como sendo o ponto de temperatura máxima.

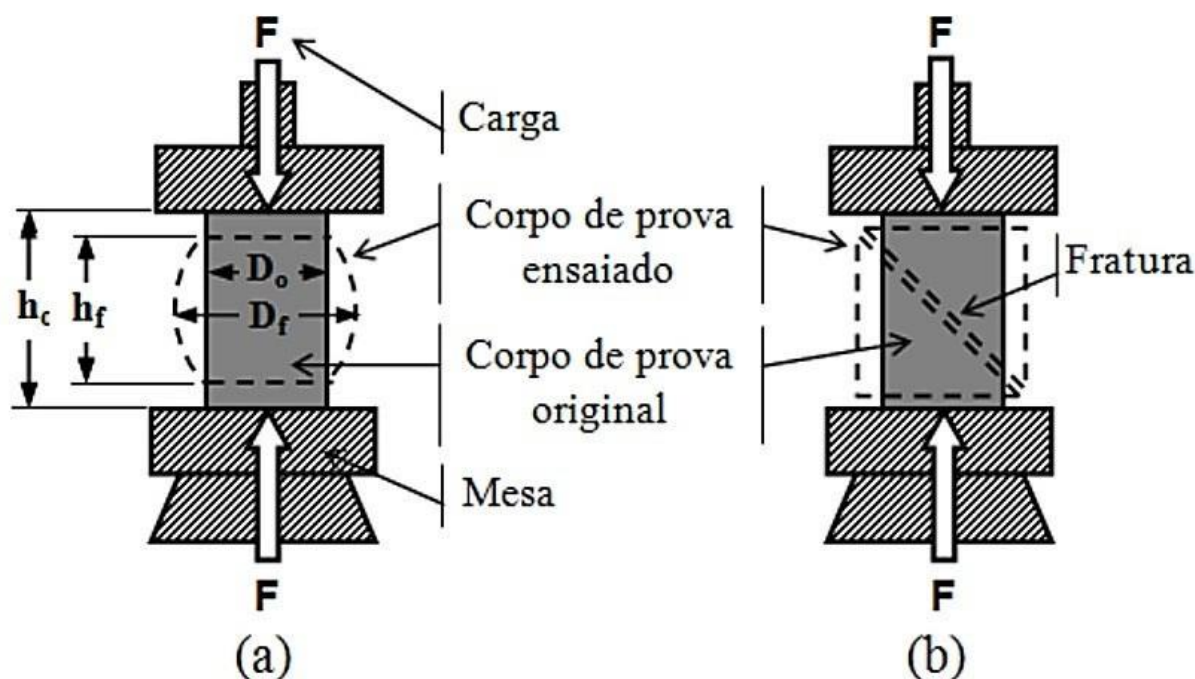
Foram utilizados para este ensaio o total de 18 corpos de prova, dois CPs para cada um dos 6 traços.

3.2.3 Ensaio de resistência à compressão.

Este é o primeiro ensaio de controle tecnológico e obedece aos procedimentos listados na NBR 5738 para moldagem e cura de corpos de prova de concreto e na NBR 5739 para ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. O ensaio de resistência à compressão axial

consiste na determinação da resistência de um determinado corpo ao sobrecarregá-lo no sentido do seu eixo longitudinal, conforme mostra a figura abaixo:

Figura 10: Ensaio de compressão axial



Disponível em: <<https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-compressao>> Acesso em nov. 2020

O teste foi realizado com a utilização de prensa eletrônica do tipo universal com capacidade de 2000 toneladas de força para ensaios de compressão e 30 toneladas para os demais, dotada de sistema de processamento e captura de dados digital que repassa as informações a um computador.

Os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura úmida durante 7 dias e aos 28 dias foram submetidos ao carregamento na prensa. O sistema embarcado é capaz de fornecer os dados de força aplicada em função do tempo e deformação de forma completamente automatizada. Convenientemente, o mesmo sistema de ensaio e processamento pode ser utilizado para os demais ensaios de controle tecnológico: módulo de elasticidade e tração por compressão diametral. Além dos dados digitais, foi possível observar visualmente o tipo de ruptura que o corpo de prova sofreu, conforme descrito na NBR 7680.

A resistência à compressão é dada pela seguinte fórmula:

$$f_{cd} = \frac{F}{\frac{\pi * d^2}{4}}$$

Onde:

f_{cd} = resistência à compressão (MPa)

F = carga máxima obtida no ensaio (kN)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

π = pi (3,14)

Serão utilizados para este ensaio o total de 12 corpos de prova, dois rompimentos para cada um dos 6 traços.

Figura 11: Corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão

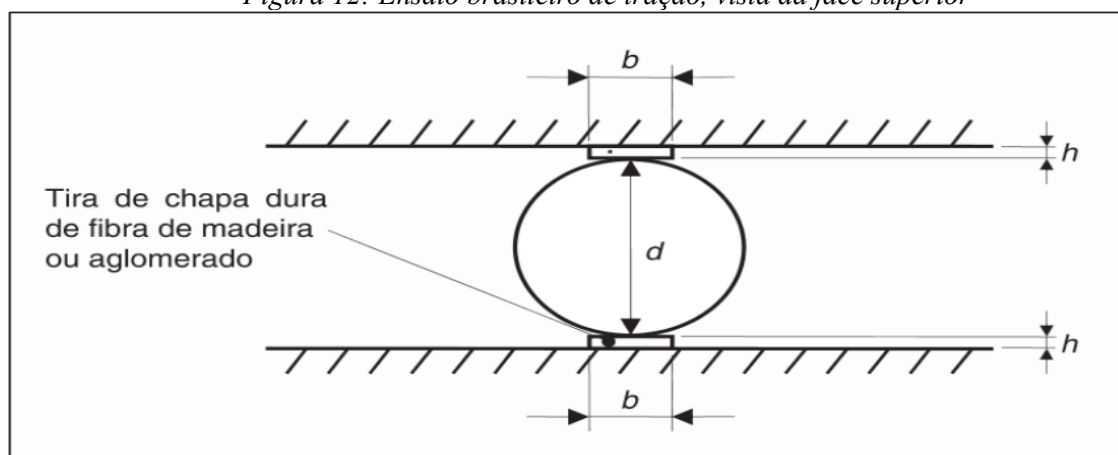


Fonte: Acervo pessoal.

3.2.4 Ensaio de resistência à tração.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral ocorre conforme descrito na norma NBR 7222, e consiste na determinação da resistência através da aplicação de carregamento sobre um eixo contido na face lateral do cilindro, conforme a figura:

Figura 12: Ensaio brasileiro de tração, vista da face superior



NBR 7222 (ABNT, 2011, p. 3)

Bem como no teste de resistência à compressão, a obtenção dos dados referentes à tração são obtidos de forma automática através do sistema de prensa eletrônica. Analogamente ao rompimento de corpo de prova anterior, as amostras passam pelo processo de cura úmida durante 7 dias e, aos 28 dias são submetidas ao carregamento.

A resistência à tração é dada pela fórmula:

$$f_{td} = \frac{2 * F}{\pi * d * L}$$

Onde:

f_{td} = resistência à tração (MPa)

F = carga máxima obtida no ensaio (kN)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

L = altura do corpo de prova (mm)

π = pi (3,14)

Serão utilizados para este ensaio o total de 12 corpos de prova, dois rompimentos para cada um dos 6 traços.

3.2.5 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade.

O procedimento previsto para este ensaio está contido na norma NBR 8522 de 2018, neste caso específico, optou-se pelo método de cálculo através do comportamento característico de tensão-deformação na “Metodologia A – Tensão σ_a fixa” conforme descrito na norma: E_{ci}

O ensaio compõe-se em procedimento semelhante ao ensaio de resistência à compressão, onde os corpos de prova devem ser testados após (considerando 7 dias de cura úmida) 28 dias

com carregamento aplicado no sentido do eixo axial. O teste consiste na aplicação de um ciclo de carregamento e descarregamento em frações do “ f_c ” que variam de $0,2f_c$ até $0,8f_c$, onde obtêm-se através daí, o gráfico de tensão-deformação utilizado para a determinação do módulo de elasticidade.

Serão utilizados para este ensaio o total de 18 corpos de prova, três rompimentos para cada um dos 6 traços.

3.2.6 Ensaio de determinação de absorção de água por imersão.

Este ensaio refere-se à norma NBR 9778 que dispõe sobre obtenção de dados sobre a absorção de água de um corpo de prova de concreto, e prevê as seguintes práticas:

Após os 7 dias de cura úmida do corpo de prova, a amostra então foi retirada e posicionada em uma estufa com temperatura de $105\text{ }^\circ\text{C}$ com margem de $5\text{ }^\circ\text{C}$, onde sua massa foi medida após 24 h, 48 h e 72 h. Tendo este procedimento sido cumprido, as amostras seguiram para a imersão, onde então novamente a massa foi medida após 24 h, 48 h e 72 h. Após a medição das massas seca e saturada, há a obtenção da massa saturada após fervura e em seguida o cálculo dos índices de vazios e absorção como resultados.

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Através da execução dos ensaios de caracterização conforme exposto em 3.2, foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 8: Característica granulométrica da Brita

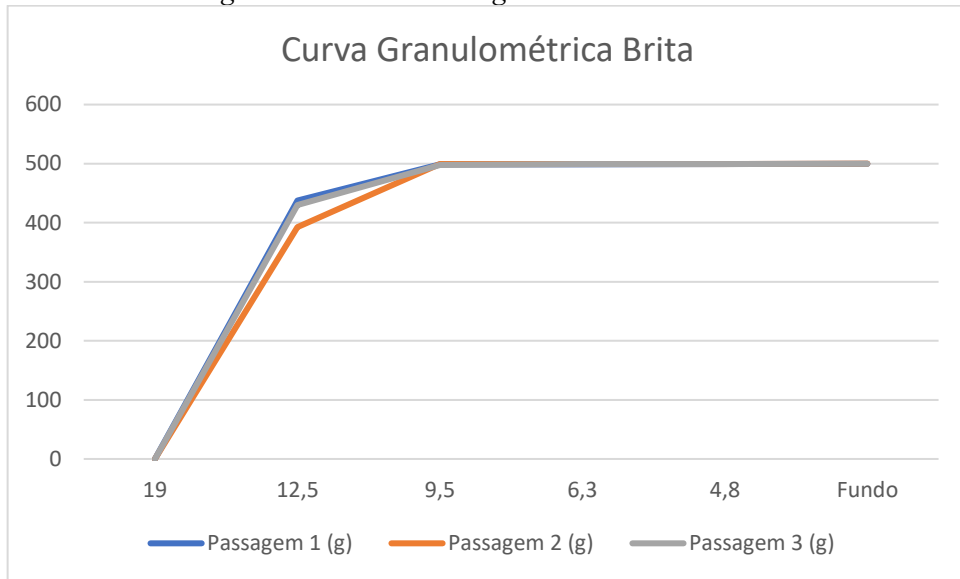


Figura 14: Característica granulométrica da Areia

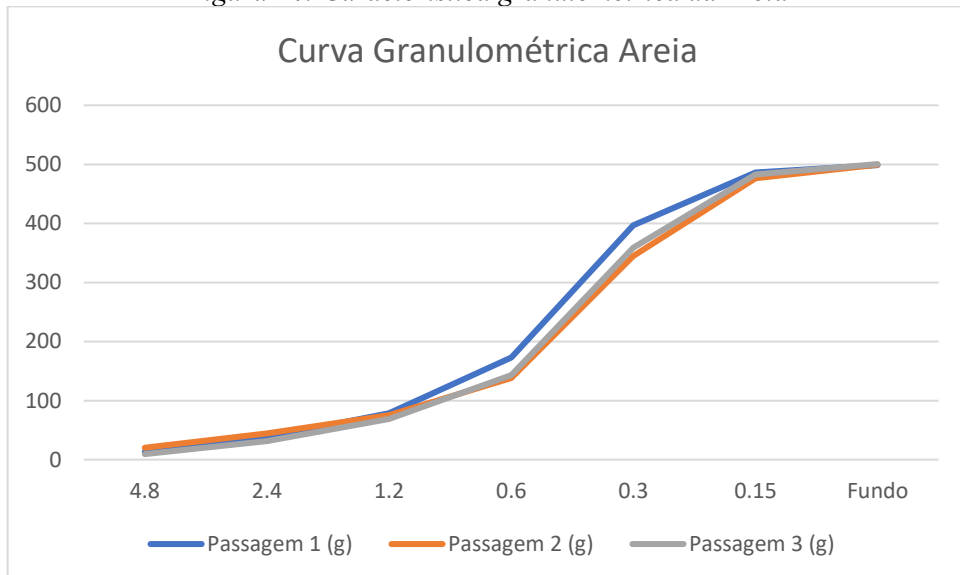


Tabela 8: Ensaio de caracterização

Tabela geral dos parâmetros de caracterização		Areia	Brita	Cimento
Massas	Unitária (g)	1685	1483,33	
	Específica (g/cm ³)	2431,34	2649,9	3100
Umidade	%	3,3	0,14	0
	Volume (L)	0,52	0,03	0
Módulos de finura		2,18	3,85	
Dim. Máxima		5,6	19	

Alterações na dosagem fizeram-se necessárias ao longo da execução dos ensaios, após a definição das correções então obteve-se a proporção de traço ideal que foi aplicada para todas as configurações:

Tabela 9: Dados de dosagem

Parâmetros de dosagem						
	Cimento	Areia	Brita	Água	Sílica	
Traço inicial calculado	1	1,467	2,675	0,47	0	Sem sílica
	0,9 + 0,1	1,467	2,675	0,47	10%	Com sílica
Traço final corrigido	1	1,467	2,048	0,51	0	Sem sílica
	0,9 + 0,1	1,467	2,048	0,51	10%	Com sílica
Quantidades em massa (kg)	10,5	15,4	21,5	5,35	0	Sem sílica
	9,45	15,4	21,5	5,35	1,05	Com sílica

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em síntese do que foi disposto, é possível analisar os resultados em acordo com o que foi proposto nos objetivos específicos (1.2.2.). Neste capítulo serão analisados os resultados referentes aos ensaios de caracterização, estado plástico e estado endurecido. O primeiro descreve as qualidades físicas dos materiais utilizados na composição do concreto, os resultados obtidos foram necessários para a determinação dos índices físicos que foram utilizados na constituição do traço.

Os ensaios no estado plástico compreendem a primeira medição de temperatura e também o ensaio de abatimento do tronco de cone. Os ensaios no estado endurecido demonstram as propriedades de desempenho do concreto considerando suas especificidades, são eles compostos pelos ensaios de resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade, calorimetria e ensaio de absorção (com objetivo de avaliar o índice de porosidade da peça).

Os testes de resistência demonstraram valores menores do que o esperado, muito provavelmente em função do potencial imprecisão nos equipamentos de medição e principalmente considerando a qualidade do material, uma vez que foi detectada a presença de matéria orgânica na areia e, ocasionalmente, também na brita. O tempo limitado de execução prática em função da pandemia não permitiu o desenvolvimento de ensaios mais precisos, os custos dos materiais tornaram a reprodução do ensaio em maior escala proibitiva. Outro fator a se considerar foram as correções no traço, que modificaram os teores de brita e o fator água cimento em função da umidade dos agregados, conforme descrito na tabela 5, diminuindo a resistência final dos corpos de prova, o maior desvio nos valores foi obtido nas amostras com 50% de gelo + Sílica.

Apesar de todos os contratemplos foi possível observar uma melhora consistente no desempenho do concreto em função dos teores de substituição de água por gelo, bem como na substituição de 10% do cimento por sílica ativa, resumidamente, quanto mais gelo e mais sílica, maior a resistência média, maior a massa específica, maior rigidez e menor a porosidade. Quanto ao estado fresco, não foram observadas maiores diferenças quanto às características senão a temperatura.

As medições de temperatura demonstraram menor calor de hidratação nos corpos de prova com mais gelo e mais sílica, onde no primeiro dia de medição, as amostras com 70% de gelo e sílica nem sequer alcançaram a temperatura ambiente, enquanto as amostras anteriores ultrapassaram em pelo menos 1 grau a temperatura do local. É importante citar, no entanto, que

muito provavelmente em função do pequeno volume individual de cada CP, não houveram maiores variações térmicas após as primeiras 12 horas, na prática, após esse tempo todas as amostras alcançaram o equilíbrio térmico.

4.1 TESTE DE ABATIMENTO

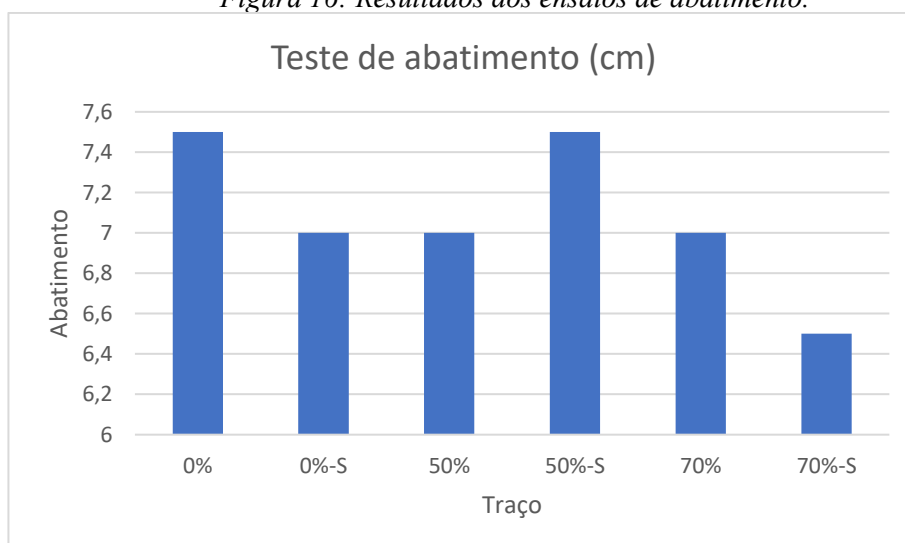
Considerando os parâmetros de dosagem, determinou-se o valor ideal de abatimento em 8cm, com tolerância de $2\text{cm} \pm$. Os resultados do ensaio de abatimento (*slump test*) mantiveram-se sempre entre 6,5cm e 7,5cm, o que coincide com o intervalo previsto (6cm a 10cm). Através deste ensaio foi possível novamente certificar-se de que a relação água/cimento foi obedecida, uma vez que a consistência do material e trabalhabilidade do concreto no estado fresco estão intimamente relacionados ao teor de água na mistura.

Figura 15: Ensaios de abatimento



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 16: Resultados dos ensaios de abatimento.



4.2 ENSAIOS DO ESTADO ENRIJECIDO E CALORIMETRIA

Os resultados obtidos em ensaio demonstraram-se coerentes com o que foi disposto na revisão bibliográfica, observando-se principalmente o que foi exposto nos ensaios de calorimetria.

4.2.1 Calorimetria de condução

Nos resultados dos ensaios de análise térmica foi possível observar um comportamento consistente ao exposto por Langan et al (2002) com relação à utilização de fillers na seção 2.3, neste caso específico, a adição de sílica já se mostra promissora no controle térmico mesmo sem a adição de gelo e em pequenos volumes. Os traços com sílica em geral mantiveram-se em média 1°C abaixo dos traços similares sem adição. Isso se dá uma vez que a característica exotérmica da reação de hidratação do cimento faz-se menos presente conforme o teor de material reagente é reduzido. Ao substituir parte do cimento por sílica, tem-se uma menor incidência de materiais liberando calor quimicamente dentro do concreto Lagundžija e Thiam (2017).

A consequência natural da substituição de parte do cimento por sílica é o ganho de resistência, uma vez que o material atenua as temperaturas ao reduzir o calor de hidratação, ele naturalmente age de modo a inibir o surgimento de microfissuras. Associado a isso, o *filler* também age reagindo com hidróxido de cálcio livre, formando C-S-H que garante maior resistência ao elemento (Macioski *et al.*, 2016), segundo Shetty (2000, p. 185), foi possível observar a redução de Ca(OH)_2 em duas amostras de cimento de 24% para 12% em 90 dias e de 25% para 11% em 180 dias com a substituição de 15% de sílica ativa, a maioria dos pesquisadores concordaram que o C-S-H formado pela reação aparentava boa qualidade e densidade.

A sílica também funciona como um inibidor da reação de hidratação em misturas com baixo teor de água, tornando-a mais lenta. Isso ocorre pois, segundo Langan et al (2002), o *filler* age consumindo parte da água da mistura, o que leva a formação de um gel, dificultando a capacidade desta de manter-se em contato com as partículas de cimento. Em função disso, a reação de hidratação sofre uma redução na velocidade de ocorrência, o que diminui, consequentemente, o pico de temperatura.

A demanda de água aumenta conforme se adiciona sílica, normalmente, o incremento é proporcional. De acordo com Shetty (2000, p. 185), 1% de adição de água se faz necessária

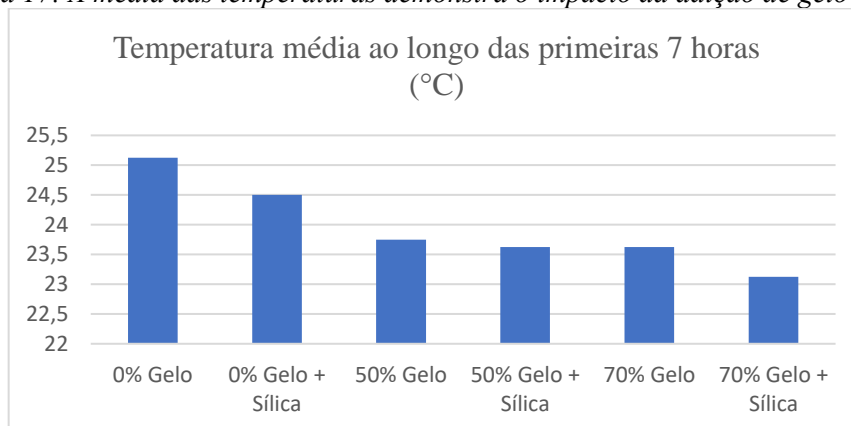
para cada 1% de substituição de cimento por sílica, para agregados com máximo tamanho de 20mm contendo 10% de sílica, significa um aumento de 20 litros de água por m³ da mistura em condições normais.

Para evitar o acréscimo de água e conseqüentemente reduzir a resistência característica do traço, é possível ajustar a proporção do agregado, bem como utilizar aditivos superplastificantes. A adição de sílica reduzirá a trabalhabilidade com menor *slump* e aumentará a coesão da mistura, esta característica facilita o transporte do material através da redução na ocorrência de segregação.

Nos ensaios realizados em laboratório, as características e comportamentos supracitados foram observados na prática. A redução da trabalhabilidade, no entanto foi menos evidente em função de problemas que serão abordados adiante. Analisando os traços é possível destacar que:

- A maior variação térmica ocorreu durante o intervalo entre a primeira medição e a primeira hora, o que caracteriza grande perda de energia térmica para o ambiente.
- Apenas os traços 50% com sílica e 70% com sílica se mantiveram abaixo dos 25 graus célsius ao longo das primeiras 7 horas de medição, indicando boa ação do *filler* em manter temperaturas mais baixas.
- Após 12 horas observou-se a temperatura constante de todos os CPs em 29 °C, o equivalente à temperatura ambiente, as medidas seguintes mantiveram-se em equilíbrio térmico com medições marcando 32°C e 29°C.
- A temperatura média dos corpos de prova ao longo das primeiras medições denota uma clara diminuição na temperatura conforme se adiciona gelo e sílica, novamente corroborando o que foi proposto.

Figura 17: A média das temperaturas demonstra o impacto da adição de gelo e sílica



O mecanismo da redução de temperatura para a inibição do surgimento de fissuras através da substituição da água de amassamento por gelo é, apesar de intuitivo,

consideravelmente elaborado, isso pois para avaliar corretamente a ação do gelo é preciso entender como funciona a dispersão de energia térmica dentro de um maciço de concreto.

Conforme exposto em 2.2.2., a retração térmica que ocorre no maciço de concreto logo nas idades iniciais é a principal causadora de fissuras potencialmente danosas à estrutura, isso se deve ao gradiente térmico formado pelo aquecimento da estrutura causada pela reação de hidratação em grandes volumes.

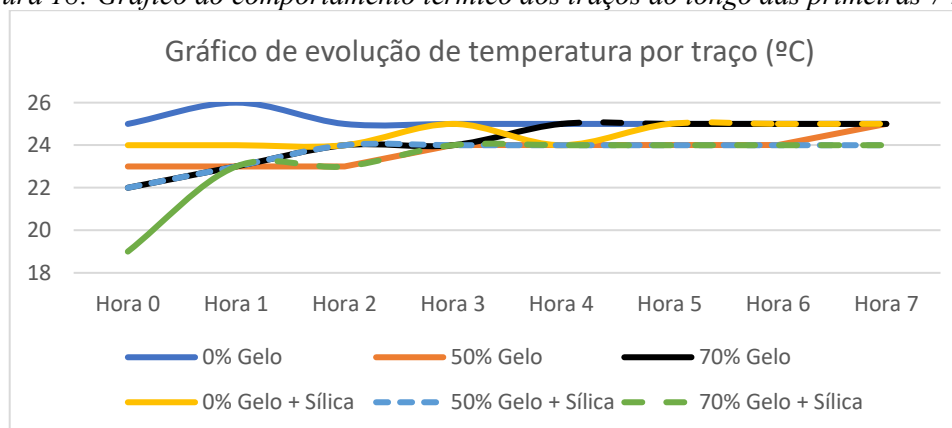
Nessa condição, o gradiente surge pois as camadas externas perdem calor energia mais rapidamente para o ambiente que as camadas internas, o que gera no maciço esforços de tração causados pela retração desigual (EMBORG et al., 1997).

O método de refrigeração através da substituição da água por gelo é tecnicamente eficiente pois o elemento refrigerante compõe a mistura de concreto, o que garante a redução da temperatura em todo o maciço.

A redução global da temperatura também reduz o gradiente térmico e a estrutura perde calor mais lentamente, que garante menores esforços gerados pela retração térmica e conseqüente menor risco de surgimento de fissuras. Os dados obtidos em ensaio demonstraram o impacto que a adição de gelo tem já nas primeiras horas, e conforme foi disposto, a redução dessa temperatura é benéfica pelos motivos já mencionados. Dessa forma é possível assimilar como positivos os resultados dos ensaios.

No gráfico a seguir, observa-se a menor temperatura geral dos traços que utilizaram gelo, o que já era intuitivamente esperado, uma vez que, analogamente à sílica, o gelo age reduzindo a máxima temperatura do concreto durante a reação de hidratação e endurecimento, o que tem como conseqüência uma menor incidência de microfissuras no material.

Figura 18: Gráfico do comportamento térmico dos traços ao longo das primeiras 7 horas



Embora tenha-se estipulado à princípio a medição de temperaturas ao longo de 3 dias, na prática, após as primeiras 12 horas todos os CPs já haviam alcançado o equilíbrio térmico e nas 60 horas subsequentes mantiveram-se em temperatura igual à ambiente.

O potencial de redução de temperatura nas primeiras (e mais críticas) horas do concreto utilizando dois dos métodos de resfriamento demonstrou-se consistente, conforme o esperado, o traço mais quente foi o sem nenhuma adição e 100% de água, já o mais frio foi o com teor alto de água (70%) e adição de sílica, que na primeira medição (hora 0, 15 minutos após a mistura dos materiais) já se mantinha 6 graus mais frio que o primeiro. Os dados obtidos nos dias seguintes mostraram temperaturas em acordo com o que o termômetro lia no ambiente, portanto não foi possível notar demais variações térmicas dentro do que permite a sensibilidade do equipamento utilizado depois das 12 primeiras horas.

Para obtenção de resultados mais expressivos, recomenda-se a realização de experimentos similares durante as épocas mais quentes do ano, de modo a observar a influência da temperatura ambiente no comportamento térmico dos materiais nas suas diferentes configurações.

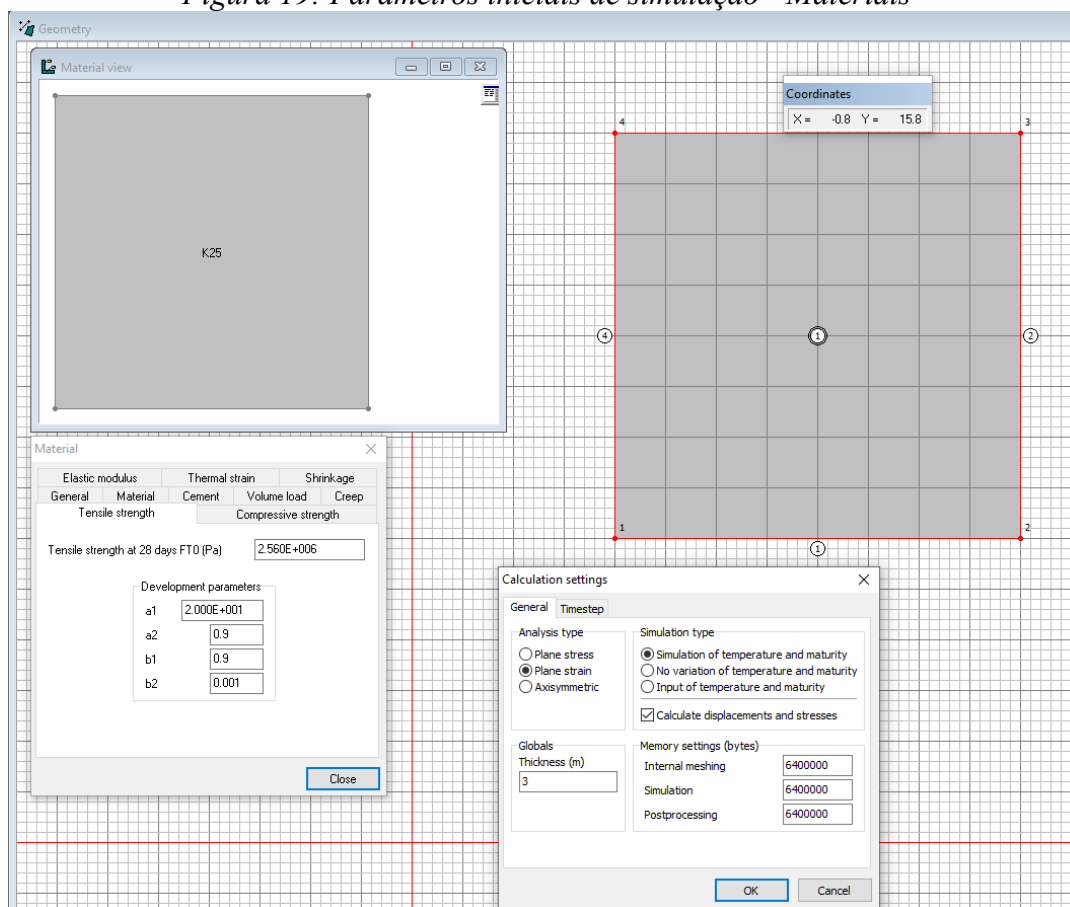
Muito além das dimensões dos CPs ou das condições ambientais envolvidas no ensaio, o maior fator de influência para a perda rápida de calor das amostras e consequente redução no tempo de variação térmica se deve à metodologia aplicada face às utilizadas nos trabalhos que norteiam este. Nos ensaios como o de Alves *et al* (2017) e Langan *et al.* (2002) o perfil térmico do elemento obtido nos testes de calorimetria de condução foi garantido diante do uso de um sistema semi-adiabático e adiabático, respectivamente, como recipiente para as amostras, isso associado ao uso de isolantes em silicone que acompanhavam a haste de termopar, o que dificultava a transmissão de calor do centro da amostra para o ambiente através dos metais no cabo de compensação e garante resultados mais condizentes com o que há de se obter na prática, em elementos estruturais de dimensões muito maiores.

4.2.2 Simulação

A partir dos dados obtidos nos ensaios de calorimetria foi possível realizar a simulação do comportamento de um bloco de concreto maciço nos perfis térmicos dispostos no trabalho, onde foi observado que, mesmo tendo os dados sido limitados em função da perda rápida de calor dos CPs para o ambiente (dada a indisponibilidade do recipiente semi-adiabático), foi possível concluir a melhora no desempenho conforme proposto em 4.2.2.

Para a realização da simulação, utilizou-se o *software HACON 3.1*, desenvolvido pela divisão de mecânica estrutural da universidade de Lund na Suécia, o programa é desenhado para detalhar exatamente este tipo de fenômeno e estudar como medidas de contorno melhoram o comportamento do concreto, viabilizando sua utilização. No estudo de Lagundžija e Thiam (2017), o mesmo *software* foi utilizado para estudar o impacto do uso de tubulações de resfriamento líquido dentro do concreto em seu perfil térmico.

Figura 19: Parâmetros iniciais de simulação - Materiais

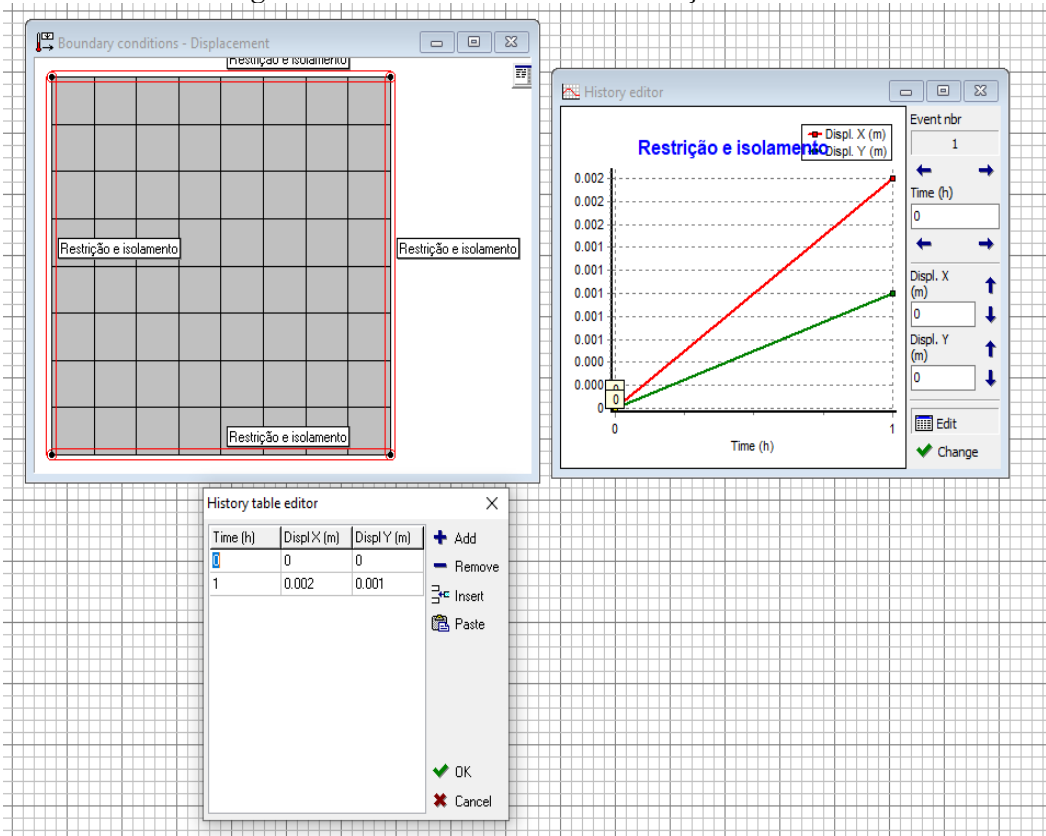


Deste modo, definiu-se um modelo padrão para a simulação, uma vez que esta tem fins comparativos. O elemento de estudo se trata de um bloco com 8m x 8m de dimensões superficiais e 3m de profundidade, totalmente restrito em suas laterais, dispendo apenas da superfície superior para contato com o ambiente, como comumente ocorre em blocos de fundação flexível. Determinou-se também como tipo de isolamento a madeira, já que esta é comumente utilizada como forma para este tipo de elemento estrutural.

Dentro do programa, determinou-se dentre outros fatores (padrões) a utilização do concreto “K25” com 25MPa de resistência à compressão aos 28 dias, e 2,56MPa de resistência

à tração na mesma idade. Além disso, definiu-se também como 30°C a temperatura ambiental ao longo do período de teste.

Figura 20: Parâmetros iniciais - Restrições



Neste caso, optou-se por avaliar o comportamento de 3 dos 6 traços, sendo eles os traços 1 (0% gelo), traço 3 (70% gelo) e Traço 6 (70% gelo + sílica). Para tal, foram inseridos os dados das primeiras 6 horas e também da temperatura ambiente nos dias seguintes:

Figura 21: Inserção de dados do traço 1

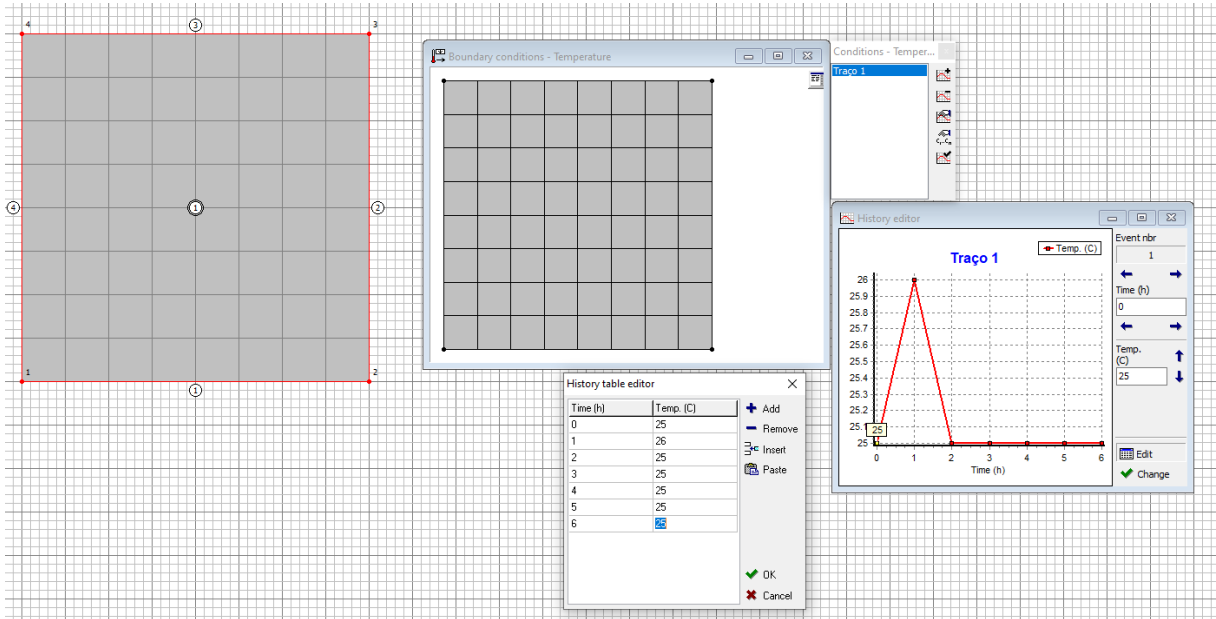


Figura 22: Inserção de dados do traço 3

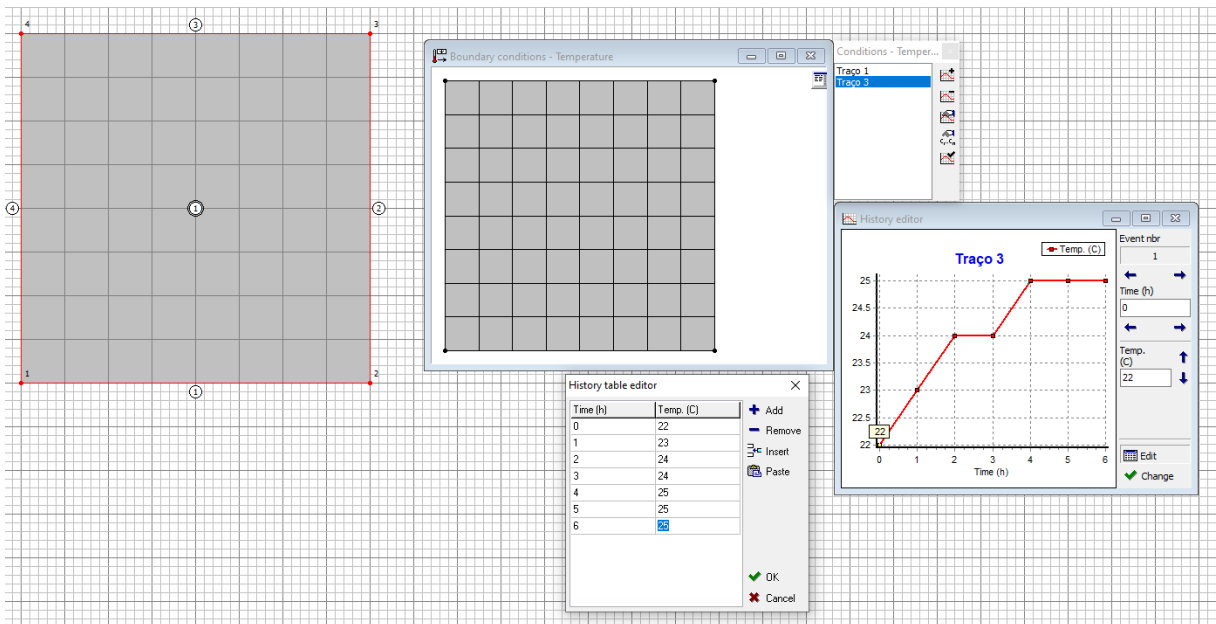
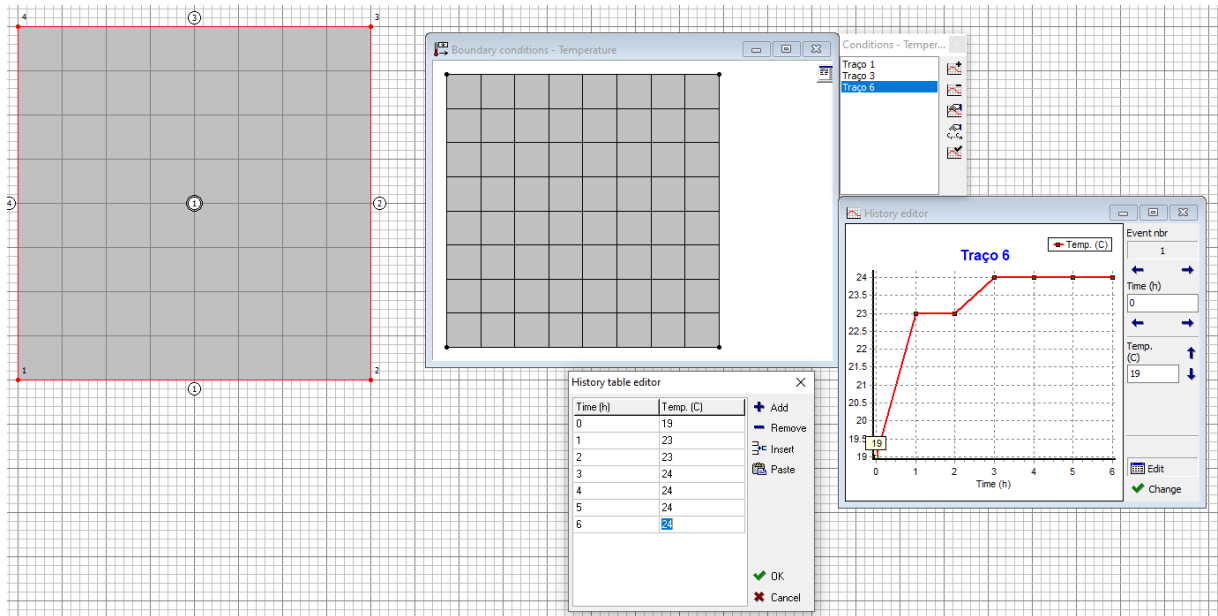


Figura 9: Inserção de dados do traço 6



Em resumo, fez-se necessário demonstrar os dados de temperatura, resistência ao longo do tempo e tensões de stress ao longo do tempo, uma vez que a intenção do método de refrigeração usando gelo e sílica é viabilizar a concretagem de grandes volumes através da inibição do surgimento de fissuras causadas pela baixa resistência e alta tensão interna, a seguir, os dados do traço 1:

Figura 10: Temperatura máxima – Traço 1

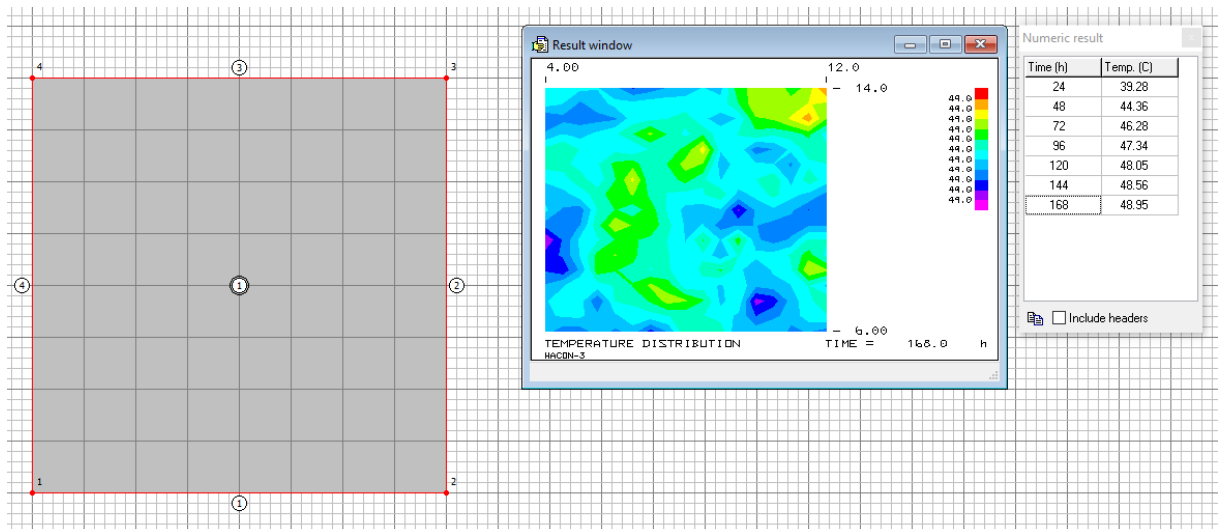


Figura 11: Resistência à tração – Traço 1

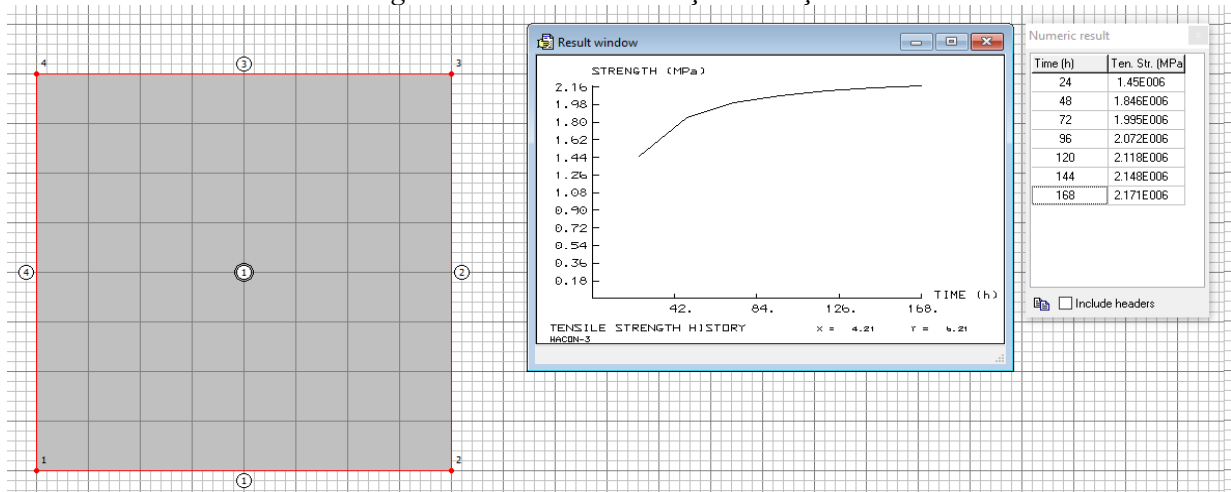
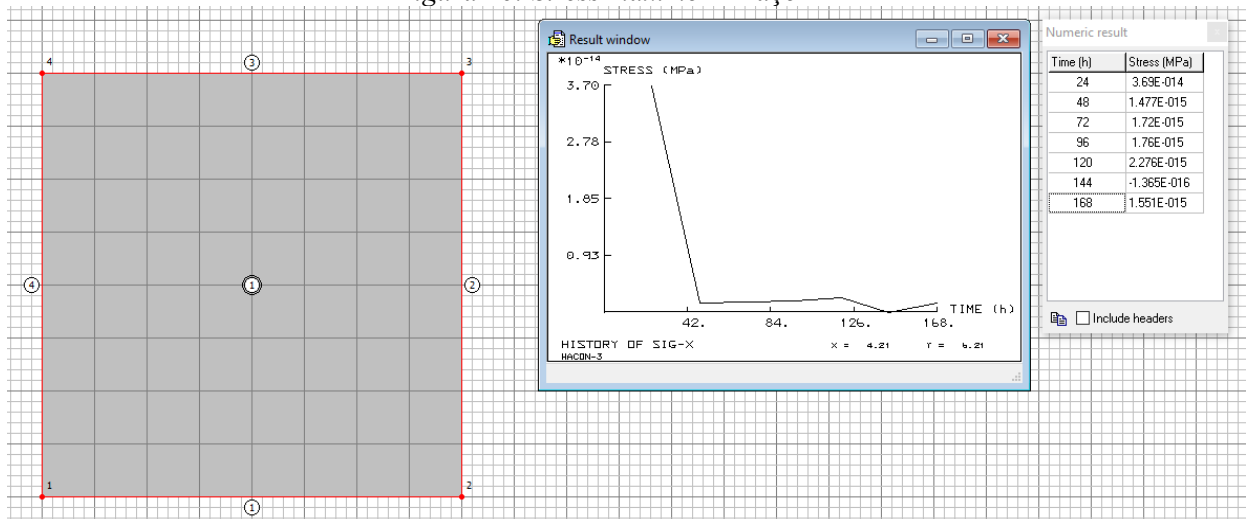


Figura 26: Stress máximo – Traço 1



Constatou-se que no traço 1 há a possibilidade de que, em função da retração térmica, surjam ainda nas primeiras 24h tensões de tração de até 3,7MPa, que são muito maiores que as tensões resistentes alcançadas nas idades iniciais e mesmo em idades posteriores.

Em seguida, foram realizadas as simulações com o traço 3:

Figura 27: Temperatura máxima - Traço 3

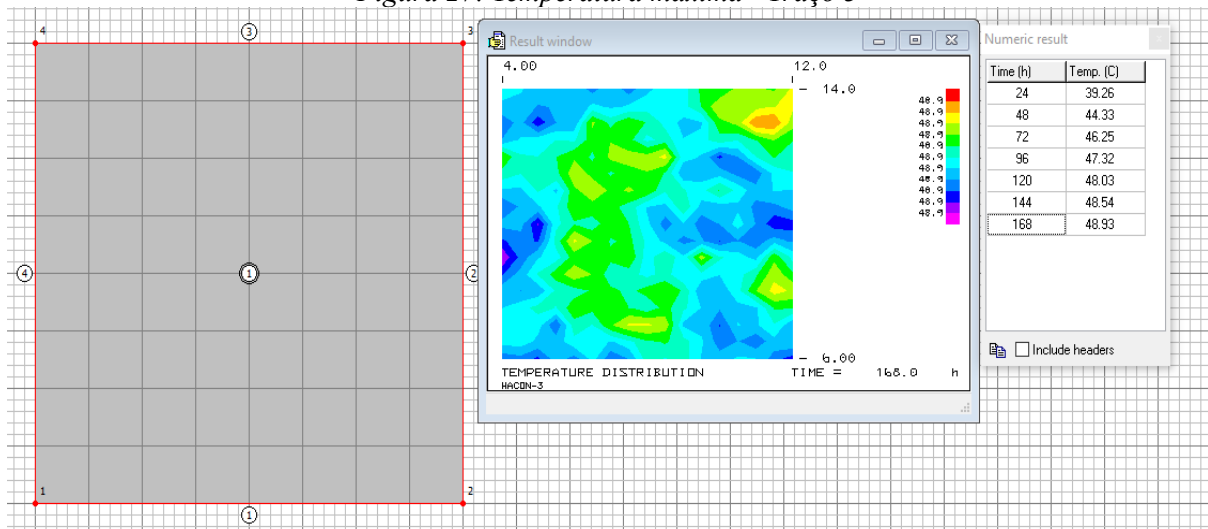


Figura 28: Resistência à tração - Traço3

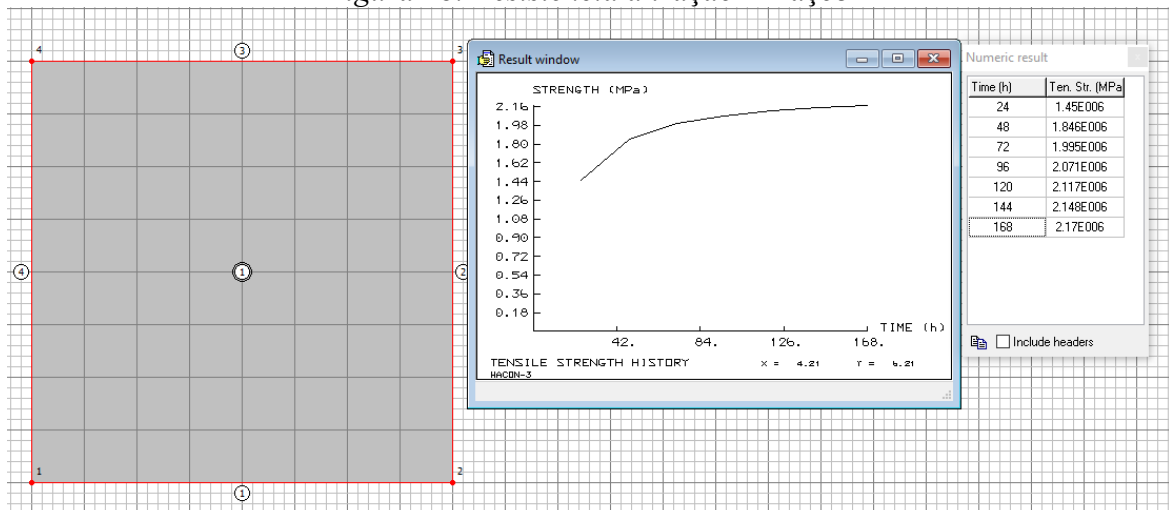
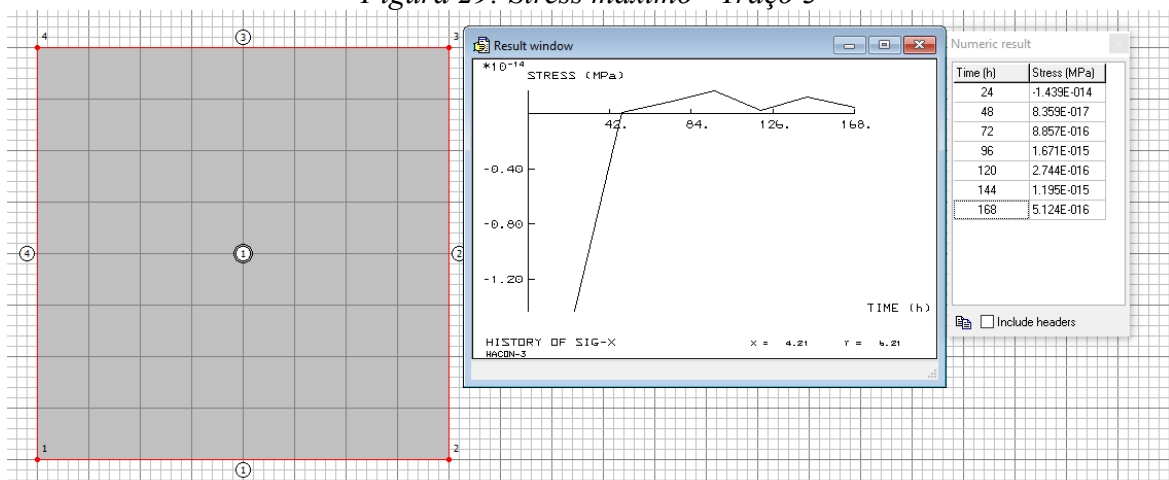


Figura 29: Stress máximo - Traço 3



Constatou-se que no traço 3, dada a temperatura inicialmente abaixo do ambiente, uma tendência inversa de movimentação térmica, o que ocasiona maiores tensões de compressão

(qualidade cuja tendência de resistência do concreto é muito maior), reduzindo abruptamente a tendência de fissuração. A tensão máxima de compressão obtida aqui foi de 1,4MPa.

E por fim, os resultados do traço 6:

Figura 30: Temperatura máxima - Traço 6

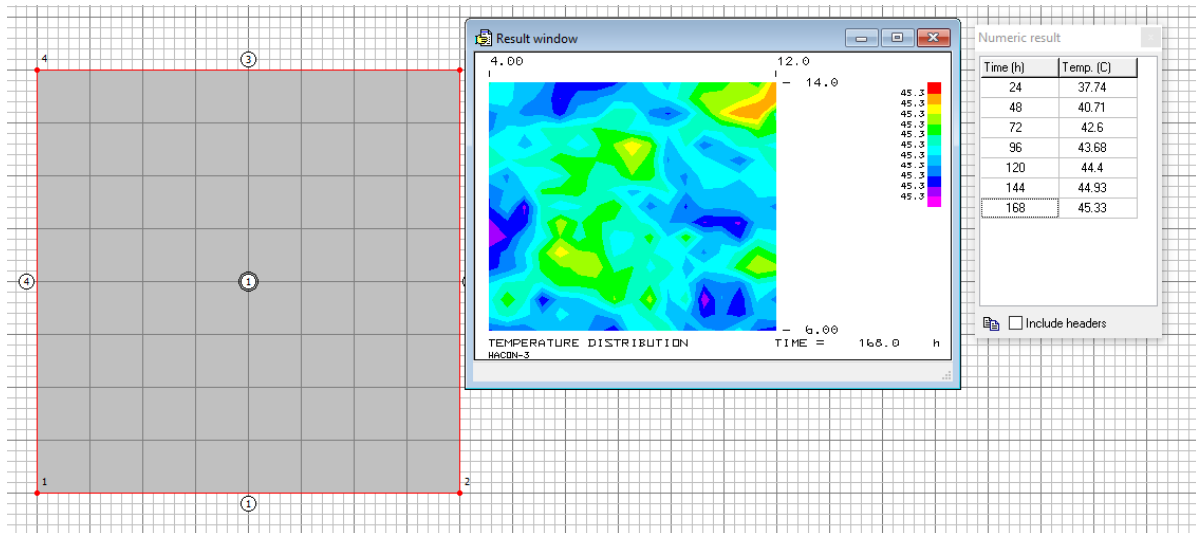


Figura 31: Resistência à tração - Traço 6

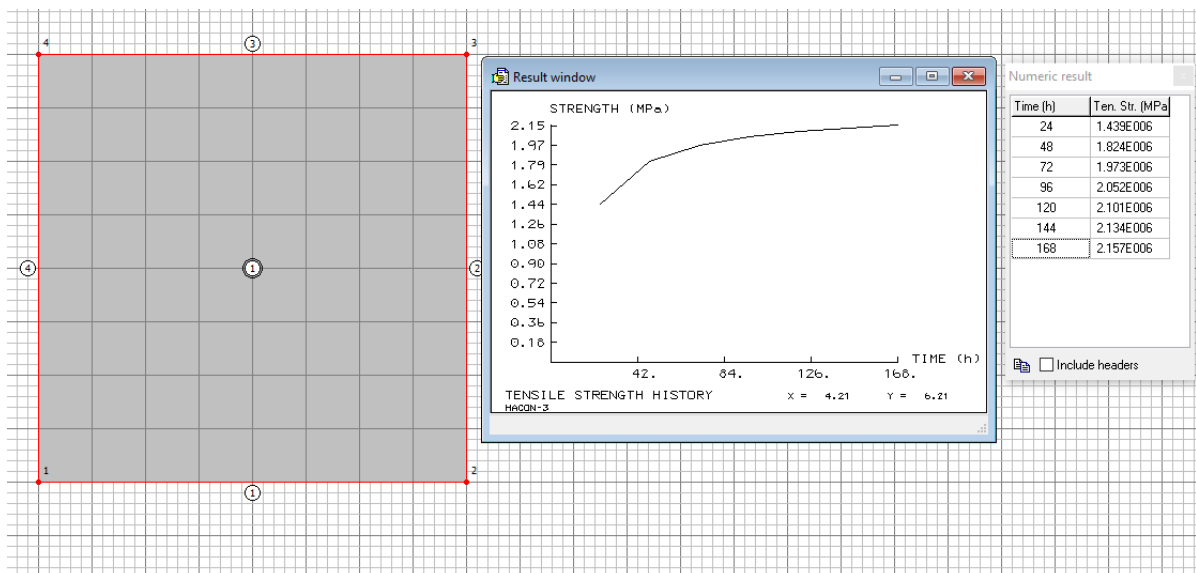
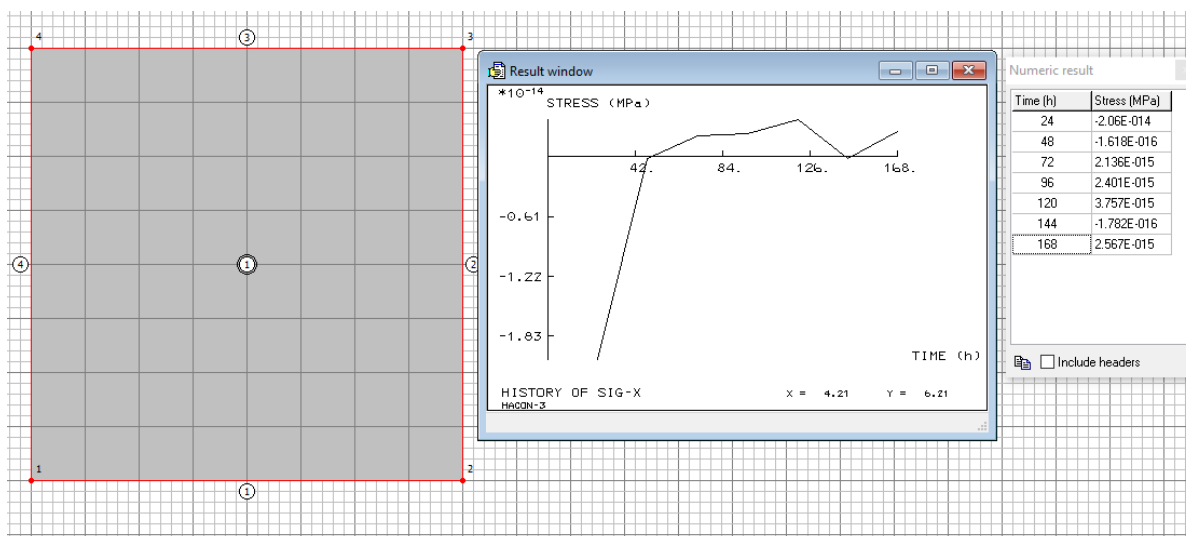


Figura 32: Stress máximo - Traço 6



Constatou-se no traço 6, comportamento semelhante ao que foi observado no traço 3, mas mais acentuadamente, o que era esperado dado o maior teor de gelo e adição de sílica.

Analisando os dados obtidos, é possível aferir as seguintes conclusões:

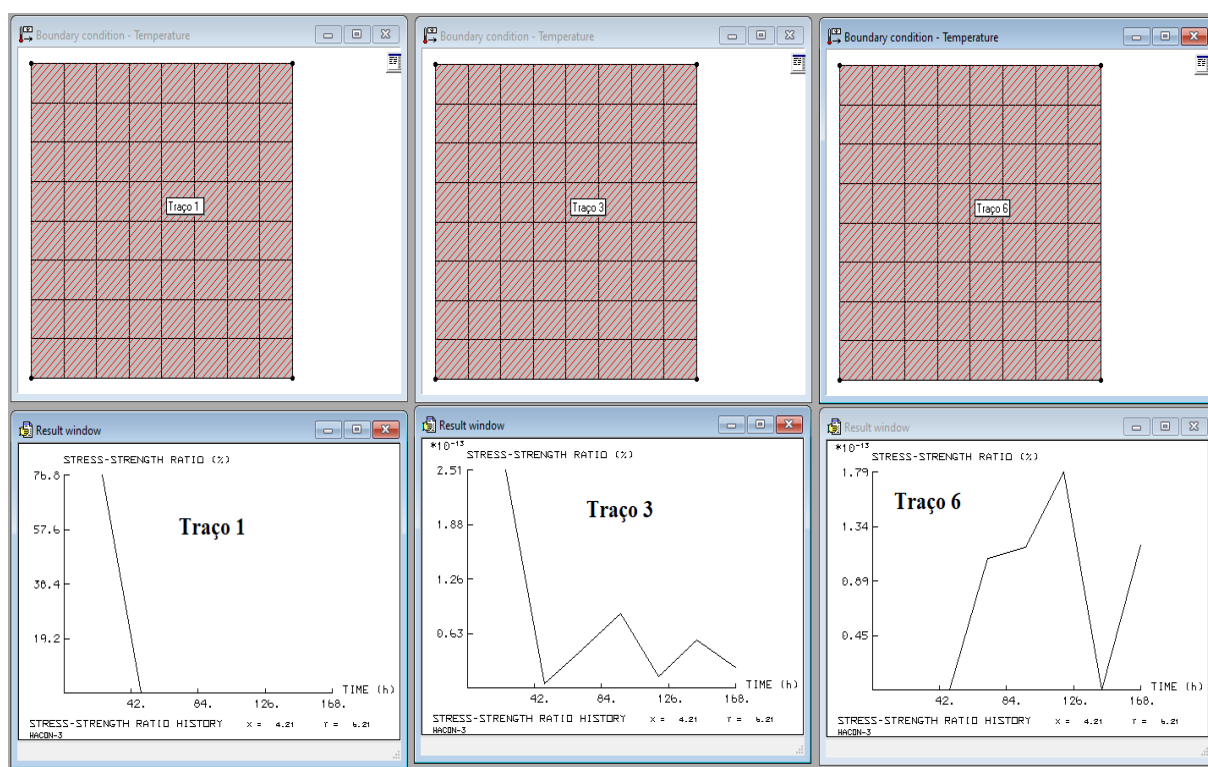
- Embora o gelo afete a temperatura do maciço inicialmente, reduzindo o gradiente de retração térmica e consequentemente atenuando os máximos de stress no objeto, por se tratar de uma ação física, não há prolongamento nos efeitos térmicos após 7 dias, em razão disso, os traços 1 e 3 mantêm virtualmente a mesma temperatura após esta idade.
- Contrariamente, por tratar-se de um fenômeno químico que acompanha o lento processo de hidratação do concreto, as reações referentes à sílica mantêm-se abaixo da temperatura dos traços sem sílica por muito mais tempo, garantindo-lhe melhor dispersão na taxa de transferência de calor em função do tempo, mantendo-se após 7 dias, 5 graus abaixo dos outros traços simulados.
- A redução do stress é progressiva e demonstra a fiabilidade dos dados obtidos em laboratório, bem como corrobora os dados de referência.

Por fim, observa-se os gráficos de potencialidade do surgimento de fissuras através de uma relação percentual entre as tensões máximas de tração geradas pelo efeito de retração térmica, e da resistência que avança em função do tempo, é possível notar que o momento mais crítico é exatamente nas primeiras horas, quando o gelo se faz mais atuante em atenuar as temperaturas, assim, para ambos os traços em que se utilizou gelo, o resultado foi próximo, uma vez que durante o período crítico de baixa resistência, o concreto se manteve frio e praticamente não sofreu com tensões internas.

No traço que não continha gelo, no entanto, observou-se que a retração inicia-se muito cedo, mesmo com o concreto com pouquíssima idade, o que denota o momento crítico e a máxima relação entre tensão resistente e tensão solicitante obtida dentre as simulações.

Comparando os traços com gelo com e sem sílica é possível notar que a sílica age de modo a estender o período de perda de calor, gerando energia térmica ativamente por mais tempo, mas em menor intensidade, o resumo destas conclusões podem ser observados nos seguintes gráficos:

Figura 33: Razão entre resistência e tensões solicitantes na idade crítica



Em análises mais profundas, é possível analisar melhor os dados do comportamento térmico nas primeiras horas, eventualmente para as dimensões definidas do bloco, o traço 1 se tornaria inviável uma vez que a tendência é de que nas primeiras 24 horas a razão entre a tensão solicitante e a tensão resistente se aproximem ou mesmo ultrapassem os 100%, o que certamente causaria fissuração.

Já os traços 3 e 6 mantêm-se muito distantes da tensão máxima resistente durante o período crítico, o que é ideal.

4.2.3 Resistência à compressão

Embora seja possível notar uma tendência de aumento de resistência nos CPs conforme se adiciona mais gelo e sílica, no geral, o valor das resistências manteve-se abaixo do esperado, além disso, os resultados parecem corroborar o proposto apenas para os traços 0% gelo, 70% gelo e 70% gelo + sílica, uma vez que mesmo no universo do que foi testado, os demais traços aparentam resultados erráticos de resistência. Além disso, considerando a resistência à compressão, o traço 50% gelo + sílica apresenta um resultado ainda aquém do que era esperado. Se comparado aos outros traços, este se manteve abaixo do padrão de resistência. Para estes problemas, é possível levantar a seguinte hipótese:

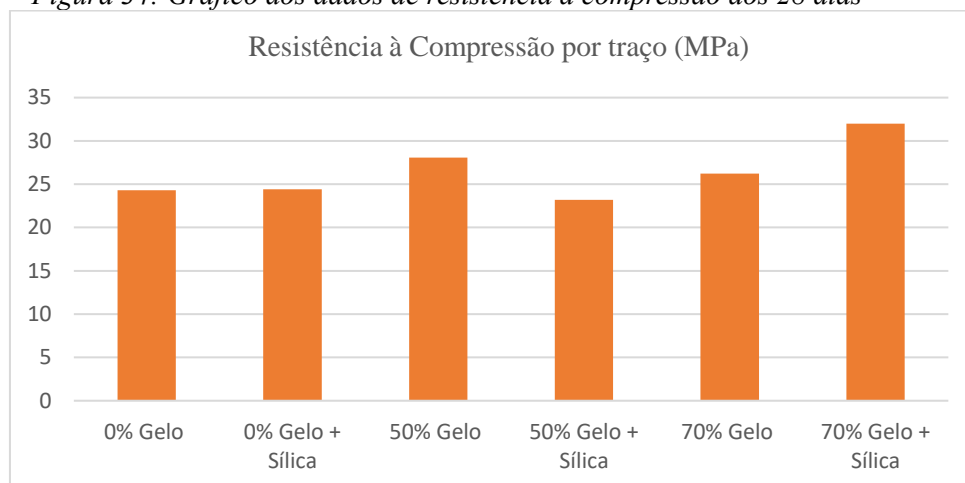
Tanto esta variação do traço específico previamente citado, quanto a médias baixas devem estar ligadas prioritariamente a um fator específico: o baixo volume total do concreto, por traço, que foi rodado na betoneira gerou um problema não antes previsto e que se alongou por todo o período de realização das rodagens. Uma vez que a máquina é previamente utilizada para rodar quantidades maiores que as experimentais, ela não é tão eficiente em fazê-lo em volumes pequenos. Durante os experimentos se fez necessária por diversas vezes a remoção de grandes volumes de material que se mantinha preso às laterais do tonel da betoneira, este material por sua vez possuía consistência visivelmente diferente, sendo muito mais seco que o corpo principal e com grandes quantidades de cimento e areia.

Embora parte deste material tenha sido devolvido ao composto inicial e novamente misturado, é impossível precisar a quantidade real perdida na lateral da máquina, bem como também o seu impacto no traço, uma vez que, dada a aleatoriedade da ocorrência deste tipo de eventualidade, bem como a exata disposição dos componentes do material aderente, certamente houve impacto na composição final das amostras, divergindo do que foi previamente definido no cálculo do traço.

A adição de sílica potencializa o problema, uma vez que reduz a trabalhabilidade do concreto (Macioski *et al.* 2018), consequentemente tornando-o menos fluído, o que não foi observado a princípio nos ensaios conforme foram obtidos os valores do abatimento. Isso se dá pois há uma tendência deste material de reduzir a fluidez do concreto sensivelmente e, como isso não se observou, há a possibilidade de que grande parte da sílica tenha se mantido nas regiões de aglutinação de material seco, nas extremidades da betoneira, isso explicaria também o porquê de não haver tanto ganho de resistência, bem como o porquê de um dos traços compostos com sílica ser aquele com menor resistência.

Ainda assim, é possível avaliar a melhora progressiva nas qualidades técnicas do concreto conforme são adicionados o gelo e a sílica, já que, conforme o que foi dito na subsecção 4.2.2., a tendência é que a adição destes materiais contribua para a resistência ao reduzir o calor de hidratação e, no caso da sílica, reagindo com íons livres para formar C-S-H aumentando a resistência.

Figura 34: Gráfico dos dados de resistência à compressão aos 28 dias



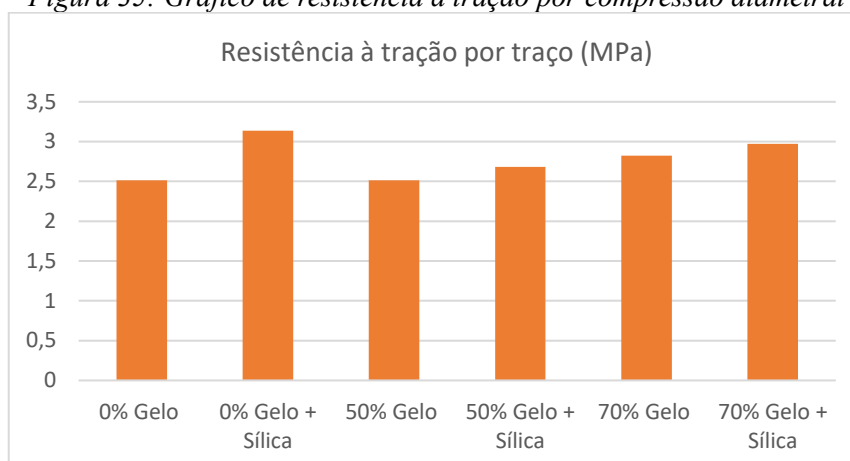
Em face do que foi disposto, recomenda-se em trabalhos futuros à serem realizados nestas condições, a adição ao traço de aditivo superplastificante, no intuito de reduzir a eventual aderência de material nas laterais da betoneira, reduzindo as perdas e imprecisões.

4.2.4 Resistência à tração

De forma análoga à subsecção 4.2.2, os ensaios de resistência à tração demonstraram aumento na capacidade de carga progressivo em função do aumento do teor de gelo e uso de sílica, corroborando o que foi descrito por Schackow et al (2016) *apud* Lagundžija e Thiam (2017).

É essencial mencionar inclusive que a utilização destes métodos de resfriamento age duplamente para reduzir o risco do surgimento de problemas patológicos, uma vez que, além do controle térmico que reduz as movimentações de expansão e contração, a redução na temperatura age de modo a aumentar a resistência do concreto nas idades iniciais (efeito que pode se prolongar no decorrer da vida do elemento estrutural), o que diminui ainda mais a possibilidade de trincas e fissuras surgirem.

Figura 35: Gráfico de resistência à tração por compressão diametral

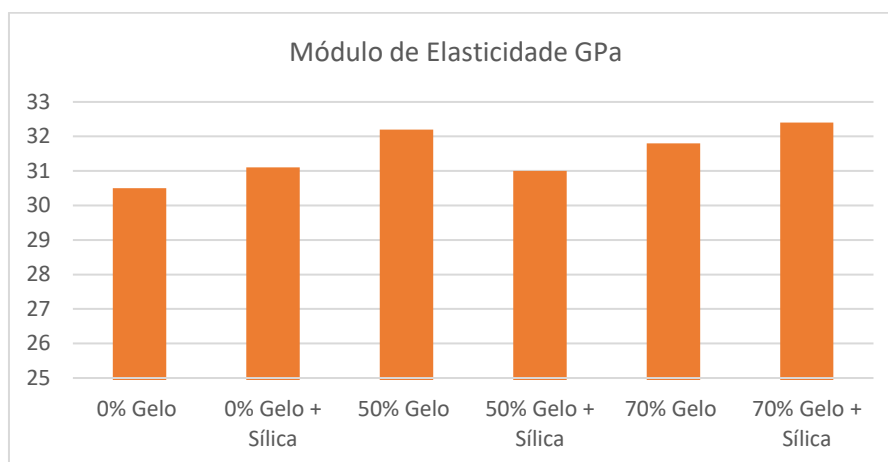


4.2.5 Módulo de elasticidade

Acompanhando o que foi apresentado nos ensaios anteriores, foi possível notar também o aumento no módulo de elasticidade de forma progressiva e proporcional à adição de gelo e sílica.

O aumento no valor do módulo é esperado, uma vez que, ao aumentar a resistência do concreto, há também um incremento na sua rigidez e redução na deformabilidade.

Figura 36: Gráfico dos valores de módulo de elasticidade



4.2.6 Porosidade

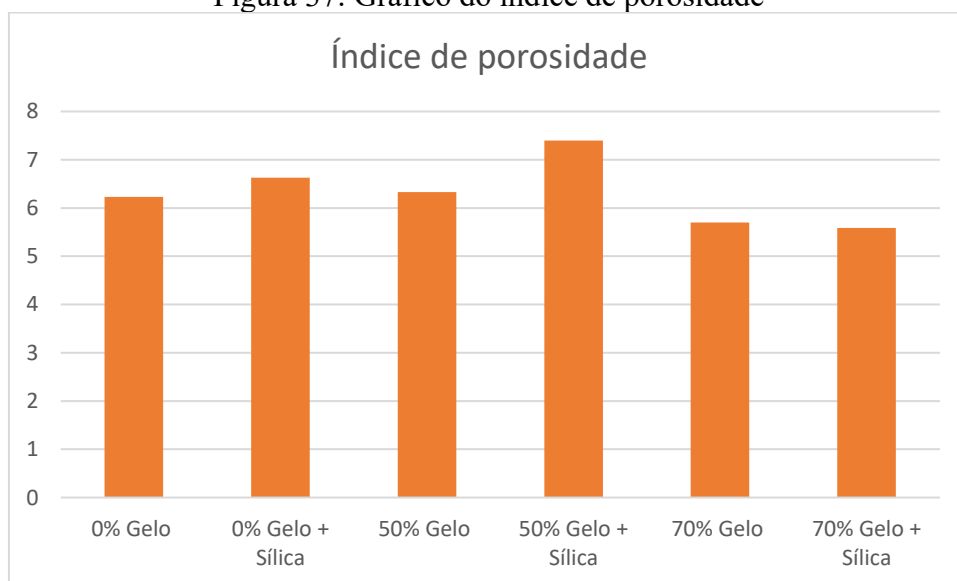
O ensaio de absorção descreve através de um percentual de penetração de água no maciço, a sua porosidade. Deste modo é possível avaliar a incidência de vazios no maciço, quanto menor, mais resistente. Em acordo com o que foi dito nos itens anteriores, o ensaio e absorção demonstrou a diminuição da porosidade nos elementos cujos traços previam maiores

usos de gelo e também uso de sílica. A porosidade está intimamente associada à resistência, uma vez que um menor índice de vazios denota maior grau de cristalização e formação de sólidos que garantem o comportamento dinâmico esperado do elemento.

Conforme o que foi exposto em 4.2.3, os resultados de resistência demonstraram desempenho abaixo do esperado. A hipótese demonstra a característica heterogênea do concreto em função do baixo volume de concreto rodado frente à capacidade da betoneira. Um dos pontos levantados considera que provavelmente surgiram regiões de maior concentração de cimento e areia, com menos água e maior ocorrência de vazios, o que pode ter gerado material com a resistência abaixo do esperado.

Se comparados, os dados de resistência à compressão e os dados de índice de vazios parecem corroborar um ao outro, sendo o exemplo mais claro o ocorrido no traço 50% + Sílica, uma vez que este apresentou baixa resistência e alta porosidade.

Figura 37: Gráfico do índice de porosidade



5 CONCLUSÕES

Em concordância com o que foi descrito na bibliografia, ficou demonstrado o potencial aumento nas resistências do concreto quando feita a substituição da água de amassamento por gelo, isso ocorre através da diminuição do calor padrão do material, o que reduz a incidência de vazios e microfissuras na microestrutura do concreto, o tornando menos poroso e mais resistente. Complementarmente, a análise em simulação mostra a evolução do gradiente térmico e como o controle de temperatura pela adição de gelo e sílica criam um ambiente de maior segurança para que a estrutura alcance o desempenho esperado, reduzindo os riscos de fissuração por retração térmica.

De forma análoga ao que já foi dito, a presença da Sílica Ativa promoveu também menores temperaturas, uma vez que, ao substituir parte do cimento, ela reduz a proporção do agente reativo dentro do maciço, diminuindo proporcionalmente a liberação de calor da reação exotérmica, o que permite um maior controle térmico com elevado potencial de ganho de resistência associado. Estas propriedades demonstradas através dos ensaios mostram de forma clara a utilidade destes materiais quando em situações onde há grande preocupação em controlar a temperatura do concreto massa, uma vez que, como já foi dito, as principais manifestações patológicas relacionadas à temperatura estão diretamente ligadas às baixas resistências iniciais e ao acentuado gradiente térmico, dois fatores que são atenuados com a adição tanto do gelo, quanto da sílica.

É importante mencionar que, dada a época do ano e o local de realização dos testes, as temperaturas ambientes mantiveram-se sempre relativamente baixas, o que dificulta também a observação de maiores diferenças no comportamento do concreto ao longo do tempo.

Apesar das eventualidades, o presente trabalho obteve êxito em demonstrar empiricamente o que se propôs, através de ensaios realizados em acordo com o método científico à nível de graduação, baseando-se na literatura especializada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função do que já foi exposto, é interessante mencionar a possibilidade de melhorias e sugestões para trabalhos futuros, principalmente no que se refere às questões relacionadas aos ensaios de calorimetria.

Recomenda-se em trabalhos futuros a adoção de recipientes de reservação adiabáticos ou semi-adiabáticos para os corpos de prova dos ensaios de calorimetria, uma vez que a perda de calor ambiental influi diretamente nos resultados e gera distorções perceptíveis.

Recomenda-se também que os ensaios de resistência sejam realizados através da confecção de maior quantidade de corpos de prova, com maiores volumes em betoneira ou manualmente, para garantir a máxima homogeneidade do material testado.

Faz-se interessante a possibilidade da realização de estudos de viabilidade financeira relacionadas ao uso de gelo e sílica como métodos de resfriamento e ganho de resistência, bem como a análise de outros métodos de refrigeração como nitrogênio líquido e *water piping*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, 1994. 3 p.

_____. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

_____. **NBR 8522**: Concreto — Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

_____. **NBR 9775**: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

_____. **NBR 9939**: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011. 3 p.

_____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 8 p.

_____. **NBR 12819**: Concreto e argamassa - Determinação da elevação adiabática da temperatura. Rio de Janeiro, 1993. 3 p.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002. 6 p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ALVES, M. H. *et al.* Efeito da substituição da água de amassamento por gelo nas propriedades de concretos C30 e C70. In: **Congresso Brasileiro de Concreto**, Bento Gonçalves, v. 1, n. 59, p. 1-11, out./2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322506467_Efeito_da_substituicao_da_agua_de_a_massamento_por_gelo_nas_propriedades_de_concretos_C30_e_C70. Acesso em: 10 out. 2020.

ANDRADE, Leonardo de Brito. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO NATURAL POR MATERIAIS GRANULARES POROSOS RESIDUAIS NA FASE PLÁSTICA DE CONCRETOS**. 2008. 286 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

ASSIOLI, D. *et al.* Concreto Resfriado: O conceito, sua função e Emprego nas Obras de Construção Civil. **Conexão Eletrônica**, Três Lagoas, v. 14, n. 1, p. 1784-1791, mai./2017. Disponível em: <http://revistaconexao.aems.edu.br/>. Acesso em: 1 out. 2020.

BRITEZ, C. *et al.* Concreto e Concretagem de Blocos de Fundação em Concreto Autoadensável e de Alta Resistência (70MPa). **ALCONPAT**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 28-40, abr./2016. Disponível em: <http://www.revistaalconpat.org/>. Acesso em: 1 out. 2020.

COÊLHO, R. S. D. A. **Concreto Armado na Prática**. 1. ed. São Luís: Editora UEMA, 2008. p. 1-338.

DINIZ, J. Z. F. Concreto: O material mais consumido no mundo. **Revista Concreto**, São Paulo, v. 1, n. 53, p. 8-13, jan./2009. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/index.php. Acesso em: 1 out. 2020.

JÚNIOR, I. V. M. *et al.* APLICAÇÃO DE CONCRETO RESFRIADO EM FUNDAÇÕES DE EDIFÍCIO RESIDENCIAL: ESTUDO DE CASO EM NATAL/RN. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Natal, v. 22, n. 1, p. 3129-3139, nov./2016. Disponível em: <http://cbecimat.com.br/>. Acesso em: 1 nov. 2020.

HELENE, P.; COUTO, D.; ALMEIDA, L. C.. Monitoramento de temperatura em sapata de fundação de grande porte: Estudo de Caso "Parque da Cidade" - SP. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 6, p. 961-968, dez./2016. Disponível em: <https://www.academicoo.com/artigo/monitoramento-de-temperatura-em-sapata-de-fundacao-de-grande-porte-estudo-de-caso-parque-da-cidade-sp>. Acesso em: 10 nov. 2020.

HOFFMANN, Anelise Todeschini. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA, RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE, TEMPERATURA E TEMPO DE CURA NO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS**. 2001. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LAGUNDŽIJA, Sandra; THIAM, Marie. **Temperature reduction during concrete hydration in massive structures**. 2017. 132 p. Dissertação (Mestrado) - Vetenskap Och Konst, Estolcomo,

Suécia, 2017. DOI 202943691. Disponível em: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1116691/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 10 maio 2021.

MACIOSKY, G. *et al.* Estudo teórico da adição máxima de sílica ativa no cimento portland em função do consumo de hidróxido de cálcio. **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Fortaleza, set./2016. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Gustavo-Macioski/publication/324360322_ESTUDO_TEORICO_DA_ADICAO_MAXIMA_DE_SILICA_ATIVA_NO_CIMENTO_PORTLAND_EM_FUNCAO_DO_CONSUMO_DE_HIDROXIDO_DE_CALCIO/links/5ae22ed90f7e9b28594a22e1/ESTUDO-TEORICO-DA-ADICAO-MAXIMA-DE-SILICA-ATIVA-NO-CIMENTO-PORTLAND-EM-FUNCAO-DO-CONSUMO-DE-HIDROXIDO-DE-CALCIO.pdf. Acesso em: 01 jun. 2021.

NEVILLE, A.m.; BROOKS, J.j.. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA., 2010. p. 1-413.

ROY, D.M.; IDORN, G.M. **Concrete Microstructure**. 1. ed. Washington, DC: Strategic Highway Research Progra, 1993. 182 p. ISBN 0-309-05254-8. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/shrp-c-340.pdf>. Acesso em: 10 maio 2021.

SANTANA, A. C. *et al.* Estudo Comparativo de Concreto com Sílica de Cinza da Casca de Arroz e Sílica Ativa. **Congresso Brasileiro do Concreto**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 1-24, set./2018. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/60cbc/index.php>. Acesso em: 11 nov. 2020.

SHETTY, M.s.. **Concrete Technology: Theory and Practice**. 1. ed. New Delhi: S. Chand & Company LTD., 2000. p. 1-607.

SILVA, H.a. Da; FELIX, E. J. P; MACHADO, A. C.. ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CONCRETOS E SUA MICROESTRUTURA. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Natal, v. 1, n. 1, p. 10104-10111, nov./2016.

SOUSA, Alex Lucena de; SILVA, Iago Rhuan Rocha da; CASTRO, Paulo Henrique Machado de. **RETRAÇÃO TÉRMICA E FISSURAÇÃO EM CONCRETO POR CALOR DE HIDRATAÇÃO**. 2014. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

ANEXO DE TABELAS COMPLEMENTARES

Tabela 1: Temperaturas medidas com termopar

	Temperatura ambiente: 24°C		Temperaturas obtidas no dia 09/03 de 2021 (1+6 medições) °C							
			Hora 0	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7
Sem Sílica	0% Gelo	Amostra 1	25	26	25	25	25	25	25	25
		Amostra 2	25	25	24	24	24	25	25	25
	50% Gelo	Amostra 3	23	23	23	24	24	24	24	25
		Amostra 4	22	24	24	24	24	24	24	25
	70% Gelo	Amostra 5	22	23	24	24	25	25	25	25
		Amostra 6	22	23	23	24	24	24	24	25
Com adição de Sílica	0% Gelo	Amostra 7	24	24	24	25	24	25	25	25
		Amostra 8	25	24	24	24	24	25	25	25
	50% Gelo	Amostra 9	22	23	24	24	24	24	24	24
		Amostra 10	23	23	23	24	24	24	24	24
	70% Gelo	Amostra 11	20	26	23	24	25	24	24	24
		Amostra 12	19	23	23	24	24	24	24	24
Na primeira leitura do dia seguinte todos os corpos de prova já haviam atingido a temperatura ambiente de 29°C										

Tabela 2: Resistência obtida aos 28 dias

	Ensaio no estado endurecido (28 dias)		Compressão (Mpa)	Tração (Mpa)	Mód. de Elasticidade (Gpa)	Porosidade
Sem Sílica	0% Gelo	Ensaio 1	20,74	9,31	27,50	6,23
		Ensaio 2	23,00	10,05	30,50	6,27
		Ensaio 3	24,30		29,30	6,36
	50% Gelo	Ensaio 4	28,07	10,06	32,20	6,66
		Ensaio 5	23,70	10,03	27,70	6,34
		Ensaio 6	24,60		28,90	6,33
	70% Gelo	Ensaio 7	24,15	11,29	31,80	6,04
		Ensaio 8	26,21	10,24	28,70	5,70
		Ensaio 9	DESCARTADO		29,50	5,81
Com adição de Sílica	0% Gelo	Ensaio 10	24,40	12,55	29,60	6,77
		Ensaio 11	22,70	10,03	31,10	7,11
		Ensaio 12	23,34		29,20	6,63
	50% Gelo	Ensaio 13	23,20	10,73	28,80	7,40
		Ensaio 14	20,00	9,17	31,00	7,67
		Ensaio 15	20,42		28,90	7,78
	70% Gelo	Ensaio 16	32,00	10,31	32,40	5,59
Ensaio 17		28,30	11,89	30,70	5,86	

		Ensaio 18	29,90		22,90	6,05
Sem Sílica		0% Gelo Média	22,68	9,68	29,10	6,29
		50% Gelo média	25,46	10,05	29,60	6,44
		70% Gelo média	25,18	10,77	30,00	5,85
Com adição de Sílica		0% Gelo Média	23,48	11,29	29,97	6,84
		50% Gelo média	21,21	9,95	29,57	7,61
		70% Gelo média	30,07	11,10	28,67	5,83