



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO RECKTENVALD GRAEFF

**ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DE CONCRETOS  
COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO E ADIÇÃO DE  
CINZA VOLANTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Florianópolis,  
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Graeff, Eduardo Recktenvald Graeff

Elevação de temperatura de concretos com baixo consumo de cimento e adição de cinza volante / Eduardo Recktenvald Graeff Graeff ; orientador, Luiz Roberto Prudêncio Jr. Prudêncio, 2017.

123 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. concreto massa. 3. cinza volante. 4. elevação adiabática de temperatura. 5. cura térmica. I. Prudêncio, Luiz Roberto Prudêncio Jr.. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Eduardo Recktenvald Graeff

**ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DE CONCRETOS COM  
BAIXO CONSUMO DE CIMENTO E ADIÇÃO DE CINZA  
VOLANTE**

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do Título de  
“Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, dia 17 de maio de 2017.

---

Prof. Glicério Triches, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Oswaldo Cascudo Matos, Dr.  
Universidade Federal de Goiás (Videoconferência)

---

Prof. Fernando Pelisser, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

À toda minha família, em especial minha mãe, Bernadete; meu pai, Paulo e minha irmã, Letícia. Vocês sempre me apoiaram e acreditaram nos meus sonhos. Muito obrigado pela companhia, pelo infindável empenho e pelo amor incondicional.

Ao professor que se tornou orientador e por fim amigo Luiz Roberto Prudêncio Jr. Obrigado pelas oportunidades, disposição, compreensão, pelas conversas, tanto sobre trabalho quanto sobre assuntos pessoais e principalmente pela confiança que sempre depositou em mim quando eu mais precisava.

Aos professores da banca, que trouxeram seu conhecimento e empenho para avaliar esse trabalho: Prof. Oswaldo, Prof. Fernando e Prof. Luis.

Aos amigos do GTec, que já não tenho mais como chamar apenas de colegas. Paulo, Ronaldo, Rudiele, Fernanda, (Rafael) Sakata, Paula, Lucas (Alemão), Lucas Prudêncio, André, Alex, Felipe, Matheus e Ana. Muito obrigado pela sempre bem-humorada ajuda no trabalho, pela incessante parceria e pela motivação nas partes mais difíceis do percurso.

À Supremo Cimentos pela doação do cimento Portland que possibilitou a realização deste trabalho.

À MaxMohr, em especial ao Eng. Msc. Cleiton Coelho, pela amizade, pelos anos de parceria com o GTec, pela colaboração nos trabalhos e pela doação de agregados para esta pesquisa.

À Engemix, que por meio do Eng. Allan Silva Medeiros auxiliou nas dificuldades com equipamentos de laboratório e sempre teve paciência e disposição para dar auxílio quando era necessário.

Ao Prof. Dr. Luis Gómez pela ajuda na criação (e batismo) do equipamento para elevação adiabática da temperatura, o Seguidor.

Ao Prof. Flávio Reginatto e à Doutoranda Caroline Ortmann do laboratório de Farmacognosia pela disponibilidade e solicitude.

Aos amigos César, Lidi, Matheus, Vinicius, Felipe, Alexandre, Samuel, Marina, Leonardo, Luis, Miryan. A UFSC não seria a mesma sem vocês. À Daniela, Família Xavier, André, Daniel, Rodrigo, Guilherme, Matheus, João Victor e Vitor pelos momentos de descontração. Em especial ao amigo Pedro pela parceria e pelas conversas que reavivaram o meu apreço pela ciência.

Por último e não menos importante, ao CNPq pela concessão de bolsas e pelo apoio financeiro. Por continuarem a lutar por um país de vanguarda apesar dos cortes e golpes de orçamento.

Muito obrigado.



GRAEFF, Eduardo Recktenvald. *Elevação de temperatura de concretos com baixo consumo de cimento e adição de cinza volante*. Florianópolis, 2017. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina

## RESUMO

O uso de concreto em Santa Catarina tem aumentado de forma que é comum encontrar peças que possam ser consideradas concreto massa não só em barragens, mas também em blocos de fundação e até pilares de grandes dimensões. Quando engenheiros precisam controlar o calor de hidratação dessas peças, as opções mais comuns são a utilização de gelo para reduzir a temperatura inicial e substituição de cimento por adições minerais, principalmente cinza volante e escória de alto forno. Em trabalhos recentes, principalmente o de Junckes (2015), concluiu-se que o aumento de temperatura é proporcional à massa de aglomerante empregado independentemente do teor de cinza volante utilizado. Para investigar mais a fundo essa relação, o presente trabalho apresenta a análise de elevação de temperatura de misturas de concreto com consumo de aglomerante de 200, 250 e 300 kg/m<sup>3</sup>, com e sem adição de cinza volante. Esses consumos de aglomerante são mais próximos dos utilizados em grande parte da literatura, voltada para a área de barragens. Para que fosse possível realizar o programa experimental com uma quantidade razoável de materiais, foi criado um calorímetro que garante que a água de um banho térmico que cerca o corpo de prova mantenha-se à mesma temperatura do concreto, permitindo o ensaio de elevação adiabática da temperatura seja feito com um volume de apenas 4 litros de concreto. Assim, foram feitos ensaios de elevação adiabática da temperatura, foi analisada a resistência à compressão na situação de cura térmica autógena (CTA) e cura úmida à temperatura de 23°C e foram realizados ensaios de termogravimetria para analisar o nível de reação pozolânica. Os resultados obtidos indicam que, quando uma mistura de concreto contém cimento o bastante para que a temperatura chegue a cerca de 60°C ocorre uma grande antecipação da reação pozolânica, que ocasiona uma maior liberação de calor pela cinza volante, fazendo com que a elevação de temperatura por massa de aglomerante seja similar à de misturas sem adições minerais. Com consumos de aglomerante menores e teores de cinza maiores, a resistência à compressão aumentou na CTA, mas para consumos maiores de aglomerante e menores teores de cinza a CTA prejudicou a resistência. Avaliando a razão entre elevação

adiabática da temperatura e resistência à compressão na CTA, têm-se uma ferramenta para escolher a mistura que pode fornecer a maior resistência à compressão com menor liberação de calor. Com base nesse parâmetro, as melhores misturas para concreto massa têm maior teor de substituição de cimento por cinza volante, desde que o consumo total de aglomerante se mantenha baixo.

Palavras-chave: Concreto massa. Cinza volante. Elevação adiabática da temperatura. Calor de hidratação

## ABSTRACT

The usage of concrete in southern Brazil state of Santa Catarina has increased in a way that it's common to find structural elements that can be considered mass concrete not only in dams, but also in pile caps and even large columns. When engineers need to mitigate the hydration heat of these elements, it's common to use ice to lower the initial temperature and use mineral admixtures, mainly fly ash and blast furnace slag, in substitution of cement. Recent researches, mainly Junckes (2015), concluded that the rise in temperature is proportional to the amount of binder in the mixture, whether it contains fly ash or not. To further investigate this relation, this dissertation presents the analysis of the adiabatic rise in temperature of concrete mixtures with a binder content of 200, 250 and 300 kg/m<sup>3</sup>, with or without fly ash substitution. These binder contents are closer to the ones presented in most papers about this matter, which are more focused on dams. To make sure that this experimental program could be done without an unreasonable amount of material, a calorimeter that grants that the temperature of a thermal bath is kept equal to the concrete inside it was developed, this way only 4 liters of concrete was needed to make the adiabatic temperature rise test. Besides the temperature rise, the compressive strength of the concretes was evaluated in two curing conditions, autogenous thermal curing (ATC) and standard curing at 23°C, termogravimetric analysis was done to evaluate the degree of pozzolanic reaction. The results achieved indicate that, when the concrete mix has enough cement to reach 60°C on its own, there is another exothermic reaction from the fly ash, making the rise of temperature by binder content equal whether there is or isn't fly ash on the total binder content. With lower binder content and higher fly ash ratios, compressive strength rose with ATC, but with higher binder contents and lower fly ash ratios ATC caused a decrease in compressive strength. Evaluating the ratio between adiabatic temperature rise and compressive strength can be a tool to choose the best mix in order to achieve higher compressive strength with the least hydration heat. Based in this parameter, the best concrete mixes for mass concrete have higher fly ash content, provided that the global binder content is low enough.

Keywords: Mass concrete. Fly ash. Adiabatic temperature rise. Hydration Heat.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Aumento adiabático de temperatura, utilizando-se cimentos de calor moderado e substituição parcial por pozolana. Adaptado de: Carlson, R.W. <i>et al.</i> (1979) apud Mehta e Monteiro (2014). .....	28
Figura 2- Calor de hidratação com diferentes relações a/c. Fonte: Ern & Helene (2007).....	32
Figura 3- Curva diferencial (a) e integral (b) de amostras com substituição de cimento por cinza volante. Adaptado de: Šiler <i>et al.</i> (2015) .....	33
Figura 4 - Calor de hidratação liberado por pastas de cimento puro (CM) e composto com adição de diversos teores de cinza volante (FA). Temperaturas de cura de 25°C (a), 45°C (b) e 60°C (c). Adaptado de Han <i>et al.</i> 2014.....	34
Figura 5 - Fissuras causadas por etringita tardia, indicadas em vermelho. Fonte: Shamaa <i>et al.</i> , 2014.....	36
Figura 6 - Grau de hidratação do cimento com 25% de substituição por cinza volante (a) e 50% (b), a três temperaturas de cura (25, 35 e 50°C). Adaptado de Narmluk e Nawa (2011).....	41
Figura 7 - Grau de reação da cinza volante com 25% de substituição por cinza volante (a) e 50% (b), a três temperaturas de cura (25, 35 e 50°C). Adaptado de Narmluk e Nawa (2011).....	41
Figura 8 - Representação esquemática da hipótese da nucleação heterogênea. Adaptado de Lawrance <i>et al.</i> (2003).....	42
Figura 9 - Relação entre resistências à compressão aos 28 dias de concretos com e sem cinza volante. Adaptado de Wang, 2015.....	43
Figura 10 - Termogravimetria de pastas de cimento Portland com e sem adição de cinza pesada nas idades de 7, 28 e 91 dias. Fonte: Pilar, 2012.....	46
Figura 11 - Resistência à compressão de pastas com pó de quartzo (OPC-Qz) e cinza volante (OPC-FA). Adaptado de Deschner (2013)..	51
Figura 12 - Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos. Fonte: Salum (2016).....	53
Figura 13 - Distribuição granulométrica da cinza volante utilizada. .....	57
Figura 14 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos utilizados. ....	58
Figura 15 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos. .....	59
Figura 16 - Esquema de funcionamento do calorímetro.....	64

Figura 17 - Calorímetro com corpos de prova de concreto. ....	66
Figura 18 - Teste em campo de elevação de temperatura do bloco de coroamento do empreendimento Epic Tower. Fonte: Prudêncio Jr. <i>et al.</i> (2015).....	67
Figura 19 - Molde de argamassa. (a) desmontado; (b) pronto para a moldagem; (c) pronto para ser imergido no banho térmico. ....	68
Figura 20 - Liofilizador do laboratório de Farmacognosia.....	70
Figura 21 - Moíno de bola.....	70
Figura 22- Teste de abatimento do tronco de cone da mistura 300-CV0.....	76
Figura 23 - Curvas de elevação adiabática da temperatura. Traços: (a) 200CV0; (b) 200CV15%; (c) 200CV30%; (d) 200CV45%; (e) 250CV0; (f) 250CV15%; (g) 250CV30%; (h) 300CV0; (i) 300V15%; (j) 300CV30%;.....	77
Figura 24- Comparativo entre coeficientes de elevação adiabática de temperatura.....	84
Figura 25 - Resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias.....	92
Figura 26 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV30 - CTA.....	96
Figura 27 - Teor de portlandita e água quimicamente combinada das argamassas.....	98
Figura 28 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV0 - Ref	111
Figura 29 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV0 - CTA.....	112
Figura 30 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV15 - Ref.....	113
Figura 31 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV15 - CTA.....	114
Figura 32 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV30 - Ref.....	115
Figura 33 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV30 - CTA.....	116
Figura 34 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV0 - Ref	117
Figura 35 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV0 - CTA.....	118
Figura 36 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV15 - Ref.....	119
Figura 37 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV15 - CTA.....	120

Figura 38 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV30 - Ref	121
.....	
Figura 39 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV30 - CTA	122
.....	



## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Elevação adiabática de temperatura dos concretos utilizados na barragem Três Gargantas. Adaptado de Liu <i>et al.</i> (2010).	29
Tabela 2 - Relação entre a elevação adiabática de temperatura e consumo de cimento ou aglomerante para os concretos utilizados na barragem Três Gargantas. Fonte: Baseado nos dados de Liu <i>et al.</i> (2010).	30
Tabela 3 - Estudos de elevação de temperatura de blocos de fundação pelo GTec - UFSC. Fonte: Prudêncio <i>et al.</i> , 2013-2016.	30
Tabela 4 - Resistência à compressão dos concretos com cimento CP II E-32 (Fonte: Santos, 2010)	49
Tabela 5 - Resistência à compressão aos 28 dias com diferentes regimes de cura. Fonte: Junckes, 2015.	52
Tabela 6 - Caracterização do cimento.	56
Tabela 7 - Atividade pozolânica pelo método de Chapelle modificado.	57
Tabela 8 - Caracterização do aditivo Mira Set 48.	60
Tabela 9 - Matriz de misturas do programa experimental.	61
Tabela 10 - Proporção dos concretos para 1 m <sup>3</sup> , materiais em kg.	62
Tabela 11 - Resultados dos ensaios no ensaio fresco.	75
Tabela 12 - Consumo de cimento, aglomerante, temperaturas e CEAT (em relação ao cimento e ao aglomerante total) dos traços de concreto estudados.	82
Tabela 13 - Resistência potencial à compressão dos concretos aos 28 d.	88
Tabela 14 - Influência da substituição de cimento por cinza volante (CV) e regime de cura na resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias segundo análise de variância ANOVA.	89
Tabela 15 - Influência do consumo de aglomerante e regime de cura na resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias segundo análise de variância ANOVA.	90
Tabela 16 - Coeficientes temperatura-compressão para a condição de CTA, aos 28 dias.	94
Tabela 17 - Coeficientes temperatura-compressão para a condição de cura referência, aos 28 dias.	94
Tabela 18 - Resultados da análise termogravimétrica	97
Tabela 19 - Tabela de cálculo do ensaio de termogravimetria	123



## Lista de Equações

Equação 1 - Tensão de tração pela retração térmica.....	35
Equação 2 - Hidratação da alita .....	39
Equação 3 - Hidratação da belita.....	39
Equação 4 - Reação Pozolânica.....	39
Equação 5 - Cálculo do teor de ar do concreto.....	66
Equação 6 - Determinação do teor de hidróxido de cálcio na argamassa .....	71
Equação 7 - Fator de correção para areia no ensaio de termogravimetria.....	71
Equação 8 - Fator de correção devido à substituição de cimento por cinza volante.....	71
Equação 9 - Fator de correção para as bases não-voláteis.....	72
Equação 10 - Determinação do teor de hidróxido de cálcio na argamassa com a aplicação dos fatores de correção.....	72
Equação 11 - Determinação de água combinada com hidratos, com correções.....	73



## Lista de Siglas e Abreviaturas

DEF – *Delayed Ettringite Formation* (Formação de Etringita Tardia)

dTG – Derivada primeira da curva de termogravimetria

GTec – Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento Portland

TG – Termogravimetria

IAP – Índice de Atividade Pozolânica

CTA – Cura térmica autógena<sup>1</sup>

CEAT – Coeficiente de elevação adiabática da temperatura<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> CTA – Cura térmica proporcionada pelo próprio calor de hidratação do concreto, mantido em ambiente adiabático.

<sup>2</sup> CEAT – Razão entre a elevação adiabática de temperatura e o consumo de aglomerante por metro cúbico de concreto.



## Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1.	Objetivo.....	25
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1	Concreto Massa.....	27
2.2	Fatores que influenciam o calor de hidratação.....	31
2.2.1	Relação Água/Cimento.....	31
2.2.2	Presença e porcentagem de adições minerais.....	32
2.2.3	Temperatura de cura.....	33
2.3	Fissuração devido à dilatação e contração térmica.....	34
2.4	Formação de etringita tardia.....	35
2.4.1	Mitigação da DEF por meio de adições minerais	37
2.5	Adições minerais pozolânicas.....	38
2.5.1	Efeito da adição de pozolanas na hidratação do cimento Portland.....	39
2.5.2	Efeito da adição de cinza volante na resistência à compressão	42
2.5.3	Efeito da adição de cinza volante na durabilidade	43
2.5.4	Métodos de avaliação da atividade pozolânica....	44
2.6	Resistência à compressão com diferentes regimes de cura	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1	Materiais.....	55
3.1.1	Cimento Portland.....	55
3.1.2	Cinza volante.....	56
3.1.3	Agregados.....	58
3.1.4	Aditivo.....	59
3.2	Métodos empregados.....	60
3.2.1	Matriz de misturas.....	60

3.2.2	Proporções da mistura .....	61
3.2.3	Procedimento de mistura .....	63
3.2.4	Elevação adiabática da temperatura.....	63
3.2.5	Determinação do teor de ar.....	66
3.2.6	Resistência à compressão do concreto.....	67
3.2.7	Ensaio de termogravimetria (TG).....	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	75
4.1	Resultados dos ensaios no estado fresco.....	75
4.2	Elevação adiabática da temperatura.....	76
4.3	Resistência à compressão.....	87
4.4	Análise termogravimétrica em argamassas.....	95
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
5.1	CONCLUSÕES .....	99
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	100
6	REFERÊNCIAS.....	101
7	APÊNDICES.....	111
7.1	Apêndice A – Curvas termogravimétricas .....	111
7.2	Apêndice B – Tabela de cálculo do ensaio de termogravimetria .....	123

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o ACI (2005), concreto massa é todo aquele que requer cuidados especiais com a geração de calor pela hidratação do cimento e a conseqüente variação volumétrica das peças estruturais onde é aplicado. Desta forma, não se restringe a barragens, mas a qualquer estrutura com dimensões que possam gerar este tipo de problema. Este tipo de concreto tem a dosagem baseada não só na resistência à compressão, durabilidade e economia, mas também na resposta térmica.

O problema térmico causado pela hidratação do cimento foi notado inicialmente pelos projetistas e pelas empreiteiras que construíam grandes barragens, em função da expansão e contração térmicas, seguidas de fissuração do material. Essas fissuras paralelas ao eixo das barragens comprometiam a estabilidade estrutural das mesmas, motivando os primeiros estudos na área do concreto massa.

As medidas que podem ser tomadas para aliviar as tensões, evitando que ocorra fissuração, visam diminuir o gradiente entre as temperaturas do meio e das camadas exteriores, além de reduzir o pico de temperatura da peça (NG *et al.*, 2017). Para diminuir a diferença entre a temperatura do interior e exterior da massa de concreto é importante observar a capacidade de isolamento térmico da forma, tempo de desforma, bem como garantir que a perda de calor pela superfície seja a mais lenta possível. Dessa forma, a massa de concreto pode chegar a um pico de temperatura elevado, porém o resfriamento será mais uniforme, não gerando um gradiente grande o bastante para causar fissuração (NEVILLE, 2015).

Os principais métodos para evitar a fissuração são: uso de gelo, uso de água e agregados resfriados, isolamento térmico da superfície do concreto, a utilização de cimento com menor liberação de calor de hidratação e a diminuição no consumo de cimento. Liu *et al.* (2016) conseguiram resultados expressivos de redução do pico de temperatura com a técnica de pós-resfriamento, circulando água pela estrutura, no entanto essa solução apresenta um grande custo em tubulações e resfriamento da água, além da complexidade de execução.

Outro problema causado pela elevação de temperatura é a formação de etringita tardia, um fenômeno expansivo que pode ocorrer quando o concreto atinge temperaturas superiores a 70°C. Embora possa ser mitigada com algumas adições minerais, a formação de etringita tardia é um problema que causa preocupação quando há ocorrência de

temperaturas elevadas. (TAYLOR *et al.*, 2001; RAMLOCHAN *et al.*, 2003)

No litoral norte de Santa Catarina, sobretudo na cidade de Balneário Camboriú, a última década apresentou uma grande oportunidade para as construtoras. A grande valorização dos imóveis e um plano diretor favorável à verticalização possibilitaram que os maiores edifícios do Brasil fossem construídos na cidade. Para suportar estruturas desse tamanho, blocos de fundação cada vez maiores estão sendo projetados e executados.

Pelo histórico de trabalhos do GTec/UFSC, sabe-se que a porção central de um bloco de coroamento pode atingir temperaturas superiores a 70°C quando utilizados os materiais recorrentes do litoral norte de Santa Catarina. (TOCHETTO, 2010; GRAEFF, 2013).

Em fevereiro de 2014, foi concretado o bloco de fundação do empreendimento *Infinity Coast*. Este bloco de coroamento teve sua execução acompanhada e a temperatura monitorada pela equipe do GTec. Com um volume superior a 5300 m<sup>3</sup>, 5 metros de profundidade e requisitos de resistência de até 45 MPa, os resultados do monitoramento mostraram temperaturas de até 79,4°C em pontos próximos ao centro do bloco. (SALUM, *et al.* 2014)

Uma das formas citadas pela literatura para mitigar o problema térmico dos concretos massa é o uso de adições minerais em substituição ao cimento Portland, pois as reações pozolânicas ou de escórias de alto forno liberariam menos calor do que a de alguns dos compostos do clínquer tais como o C<sub>3</sub>S e C<sub>3</sub>A. Esta solução tem sido usada com sucesso desde a década de 1930.

Com base nesse princípio foi idealizado o trabalho de Junckes (2015), no qual foi avaliada a elevação de temperatura adiabática de concretos com cinza volante. O referido autor dosou concretos contendo cimento CPV ARI e diferentes teores de cinza volante para que atingissem uma mesma resistência característica (entre 35 e 55 MPa) a 28 dias. Como o desenvolvimento das resistências em concretos contendo cinza volante se dá em idades mais avançadas, as misturas contendo cinza volante apresentaram obviamente um teor de aglomerante mais elevado do que o da mistura referência contendo apenas cimento Portland. A principal conclusão extraída desse trabalho, de certo ponto surpreendente, foi que a quantidade de calor liberado foi proporcional à massa de aglomerante empregado, independentemente do teor de cinza volante utilizado.

Desse modo o uso de cinza volante em concreto massa não seria uma vantagem pois torna-se mais eficiente a utilização de um cimento de alta resistência inicial. A utilização desse cimento faria o concreto atingir a resistência de projeto com um teor de aglomerante menor, o que reduziria o calor de hidratação liberado.

Contudo, essa conclusão vai de encontro com grande parte de literatura científica, de forma que a motivação do presente trabalho é investigar mais a fundo o fenômeno observado por Junckes (2015). Assim, espera-se elucidar a relação encontrada pelo autor e propor novas práticas para a confecção de concreto massa.

### 1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal verificar a existência de um consumo de aglomerante abaixo do qual o calor autógeno da hidratação do cimento é baixo o suficiente para que a reação pozolânica da cinza volante não seja antecipada de forma que colabore significativamente com o aumento de temperatura.

Assim sendo, são objetivos específicos deste trabalho:

- Avaliar a taxa de liberação de calor de concretos contendo diferentes teores de aglomerante e diferentes volumes de substituição de cimento Portland por cinza volante;
- Avaliar a influência da cura térmica autógena no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo;
- Medir a quantidade de cinza volante que consegue reagir nas primeiras idades (até 28 dias) e a relação destes valores com a cura térmica autógena.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Concreto Massa

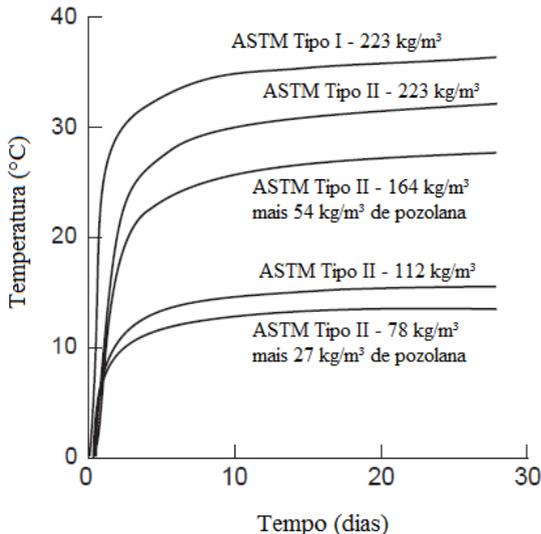
As obras de hoje em dia têm adotado grandes elementos de fundação com muito maior frequência do que antigamente. Esses elementos são especificados pelos mais diversos motivos, como necessidade de aumento de rigidez, proximidade de pilares e até facilidade de execução (COUTO *et al.* 2016). De acordo com Neville (2015), atualmente não apenas barragens, mas peças muito mais esbeltas exigem os cuidados do concreto massa, peças como grandes elementos de fundação, que, em Santa Catarina, podem chegar a um volume de 5000 m<sup>3</sup>, com espessura de 5 metros, e por isso necessitam de grande atenção na questão térmica.

O ganho de temperatura das estruturas de concreto é dado pelas reações de hidratação do cimento. Estas reações exotérmicas liberam energia sob a forma de calor de até 500 J/g de cimento (NEVILLE, 2015). Segundo Bogue (1955), metade do calor de hidratação é liberado entre o 1º e o 3º dia em um cimento Portland comum.

Neville (2015) afirma que, para consumos de cimento entre 300 kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup>, em um sistema adiabático, uma elevação no consumo de cimento de 100 kg/m<sup>3</sup> causa um aumento de 12°C na temperatura máxima do concreto, independentemente do tipo de cimento utilizado.

Outros autores também chegaram a números próximos deste, como no estudo ilustrado pela Figura 1, de Carlson *et al.* (1979). Para cada 100 kg/m<sup>3</sup> de aglomerante a elevação de temperatura foi de 13,75°C, no caso do cimento ASTM tipo II puro, e de 12,25°C quando realizou-se uma substituição volumétrica de 30% do cimento por cinza.

Figura 1- Aumento adiabático de temperatura, utilizando-se cimentos de calor moderado e substituição parcial por pozolana. Adaptado de: Carlson, R.W. *et al.* (1979) apud Mehta e Monteiro (2014).



Em um grande esforço realizado nos anos 80 pelo *Canada Centre for Mineral and Energy Technology* (CANMET) (MALHOTRA, 1986; SIVASUNDARAM, CARETTE, MALHOTRA, 1989; GIACCIO, MALHOTRA, 1988; LANGLEY *et al.*, 1989), foram estudados concretos com altos teores de cinza volante - acima dos 50%, e relações água/cimento inferiores a 0,35. Nestes estudos, foi medida a elevação adiabática de temperatura. Com reduzidos consumos de cimento e aglomerante – 152kg/m³ de cimento e 112 kg/m³ de cinza volante, se obteve valores de 0,067 e 0,085°C.m³/kg do coeficiente de elevação adiabática de temperatura, que é a razão entre a elevação adiabática de temperatura e o consumo de aglomerante por metro cúbico de concreto. Caso contabilize-se a cinza volante como aglomerante esses valores se distanciariam ainda mais dos encontrados por FitsGibbon (1977) e Carlson (1979).

Liu *et al.* (2010) realizaram um estudo sobre os comportamentos térmico e mecânico da barragem Três Gargantas, situada na China, cujo volume de concreto é de 16 milhões de m³. Os testes de elevação adiabática da temperatura foram feitos para quatro traços de concreto e os

dados de elevação de temperatura foram fornecidos para 1, 3, 5, 7, 14 e 28 dias, apresentados na Tabela 1. A elevação de temperatura por quilograma de cimento no metro cúbico de concreto pode ser observada na Tabela 2. Essa propriedade variou de 0,042 até 0,088°C.m<sup>3</sup>/kg para a idade de três dias. Para a leitura aos 28 dias, esses valores aumentaram para até 0,128°C.m<sup>3</sup>/kg. Considerando todo o aglomerante, houve uma redução: aos 3 dias variando de 0,031 a 0,070°C.m<sup>3</sup>/kg e aos 28 dias de 0,086 a 0,105°C.m<sup>3</sup>/kg. Portanto, com estes materiais e os dados consumos de cimento e cinza volante, houve redução na elevação adiabática de temperatura ao substituir-se cimento por cinza. Pode-se atribuir o grande aumento de elevação de temperatura dos 3 aos 28 dias em decorrência do uso de cimento de baixa taxa de liberação de calor.

Tabela 1 - Elevação adiabática de temperatura dos concretos utilizados na barragem Três Gargantas. Adaptado de Liu *et al.* (2010).

Conc reto	Cim ento	Cinza volante	Aglom erante	Elevação adiabática da temperatura (°C) na idade (em dias) de:					
				1	3	5	7	14	28
R15	170	56	226	1,4	7,1	10,9	13,6	17,8	19,5
R20	172	30	202	4,0	11,7	15,0	16,8	19,6	21,3
R25	182	78	260	4,0	15,9	19,7	20,9	22,3	23,2
R30	218	54	272	6,8	19,1	23,6	25,0	26,7	27,8

De acordo com diversos estudos de caso realizados pelo grupo GTec – UFSC (PRUDÊNCIO JR *et al.*, 2013-2016), nos quais foi realizado o monitoramento da evolução de temperatura de sete blocos de coroamento para fundações na região litorânea de Santa Catarina, foram encontrados valores de CEAT entre 0,111 e 0,127°C.m<sup>3</sup>/kg. Esses valores foram encontrados com a utilização de cimento pozolânico e para consumos de cimento entre 316 e 460 kg/m<sup>3</sup>. O quadro resumo destes estudos de caso pode ser observado na Tabela 3. O único ponto destoante dentre os observados ocorreu no bloco monitorado em agosto de 2016, no qual a primeira camada de concreto não foi propriamente estabilizada e

sua hidratação iniciou antes das demais, acarretando em uma maior troca de calor e conseqüentemente em um coeficiente mais baixo, de  $0,100^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ .

Tabela 2 - Relação entre a elevação adiabática de temperatura e consumo de cimento ou aglomerante para os concretos utilizados na barragem Três Gargantas. Fonte: Baseado nos dados de Liu *et al.* (2010).

Concreto	elevação de temperatura por consumo de aglomerante ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ )			elevação de temperatura por consumo de cimento ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ )		
	3 dias			3 dias		
	7 dias	28 dias		7 dias	28 dias	
R15	0,031	0,060	0,086	0,042	0,080	0,115
R20	0,058	0,083	0,105	0,068	0,098	0,124
R25	0,061	0,080	0,089	0,087	0,115	0,127
R30	0,070	0,092	0,102	0,088	0,115	0,128

Por fim, Junckes (2015), verificou que a elevação adiabática de temperatura dos concretos com consumo de aglomerante entre 319 e 652  $\text{kg}/\text{m}^3$  permaneceu entre  $11,0$  e  $12,5^{\circ}\text{C}/100\text{kg}\cdot\text{m}^3$ , independentemente da substituição de cimento por até 45% de cinza volante. A alteração produzida pela adição de cinza ocorreu apenas no tempo necessário para a elevação de temperatura começar, que foi maior com a adição mineral.

Tabela 3 - Estudos de elevação de temperatura de blocos de fundação pelo GTec - UFSC. Fonte: Prudêncio *et al.*, 2013-2016.

Data	Volume ( $\text{m}^3$ )	Espessura (m)	Aglomerante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Elevação Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Coef. ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ )
out/13	411	3,5	460	51,0	0,111
jan/14	660	2,8	403	51,0	0,127
fev/14	5415	5,0	440	51,9	0,118
mai/15	1060	3,5	381	45,0	0,118
jun/15	4522	3,5	436	51,8	0,119
jun/16	1800	3,0	316	39,0	0,123
ago/16	1124	4,3	370	37,0	0,100

## 2.2 Fatores que influenciam o calor de hidratação

A hidratação dos quatro compostos principais do clínquer é exotérmica, mas a quantidade de calor liberado por cada um deles é diferente. O  $C_3A$  é o composto que mais libera calor. A hidratação do  $C_3S$  tem uma taxa de liberação de calor cerca de cinco vezes maior que a do  $C_2S$  aos três dias. Com base neste princípio foram criados cimentos de baixo calor de hidratação, que possuem uma porcentagem reduzida de  $C_3S$ , substituído pelo  $C_2S$ . Esse tipo de cimento é conhecido como cimento belítico. (NEVILLE, 2015).

Além da composição química do clínquer, há outros fatores que podem influenciar o calor de hidratação liberado. A interação de diversas características de um concreto com o calor de hidratação liberado será explorada nessa seção.

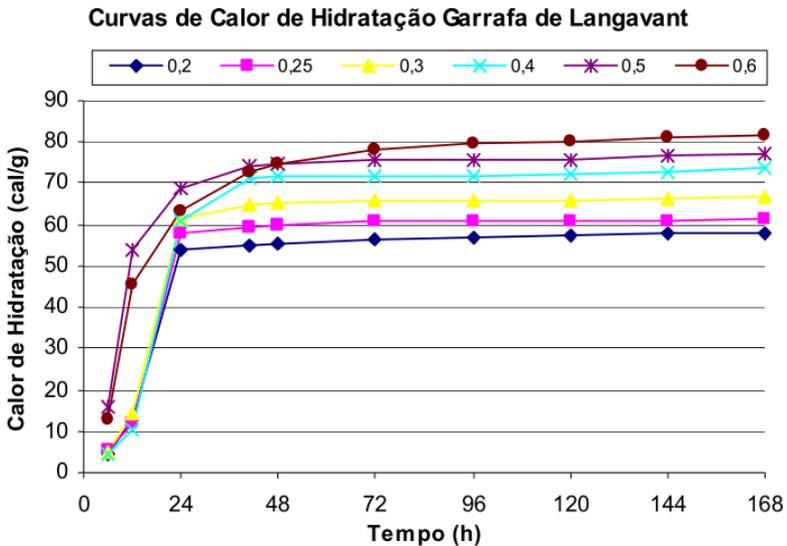
### 2.2.1 Relação Água/Cimento

O calor de hidratação liberado nas primeiras idades é muito influenciado pela relação água/cimento de uma pasta de cimento. A hidratação do cimento Portland acontece ao longo de anos e quanto mais disponibilidade de água, mais rapidamente ela ocorre em idades iniciais.

O efeito destes fenômenos pode ser observado no trabalho de Ern & Helene (2007), no qual foram proporcionadas argamassas com diversas relações água/cimento e fluidez constante por meio da utilização de um aditivo plastificante. Em seguida, as amostras foram colocadas em uma Garrafa de Langavant, um calorímetro semi-adiabático projetado para a determinação do calor de hidratação do cimento. Os resultados podem ser observados na figura 2. É possível perceber a clara tendência de menor liberação de calor à medida que a relação água/cimento das misturas diminui.

Deve-se destacar que, como o calor específico da água é cerca de 5 vezes superior ao dos demais componentes do concreto, um aumento na quantidade de água pode não gerar necessariamente um aumento da elevação adiabática da temperatura. Como a inércia térmica do material aumenta, é possível a absorção de mais calor para uma mesma elevação de temperatura que uma mistura que contenha menos água.

Figura 2- Calor de hidratação com diferentes relações a/c. Fonte: Ern & Helene (2007)



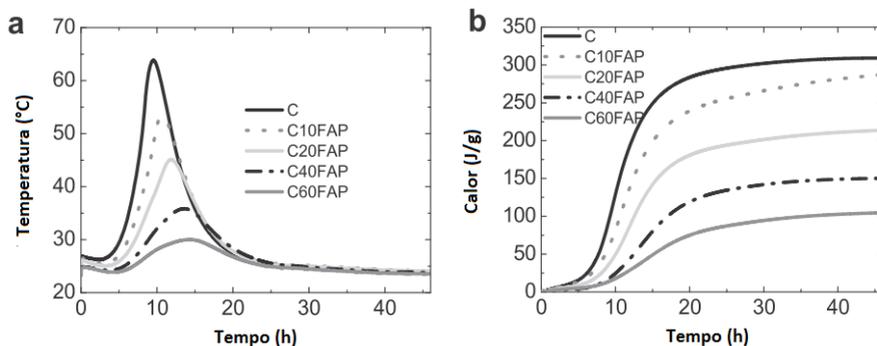
### 2.2.2 Presença e porcentagem de adições minerais

Adições minerais podem causar um efeito de diminuição do calor de hidratação do concreto. Para essa função, a adição mais empregada é a de cinza volante. Estudos como o de Šiler *et al.* (2015), mostram que a substituição de cimento por diferentes tipos de cinza causa uma redução no calor de hidratação liberado. Pode-se verificar este fenômeno na Figura 3, que apresenta a curva de uma pasta de cimento referência (C) e de diversas outras pastas com substituição de cimento por um tipo de cinza volante, em porcentagens de 10 a 60%.

Nili e Salehi (2010) também estudaram a substituição de cimento Portland por cinza volante, em teores de 15% e 25%, com o objetivo de diminuir a temperatura atingida pelo concreto. Foram estudadas duas classes de resistência: 50 e 80 MPa, com consumos de aglomerante de 385 e 540 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Utilizando um calorímetro semi-adiabático, observaram uma redução da temperatura máxima atingida pelos concretos com adição de cinza volante, com exceção traço de 50 MPa com 15% de cinza volante, que apresentou a mesma temperatura final que a mistura de referência, 47°C. O efeito na resistência à compressão foram estudados apenas até os 7 dias, para esta idade o traço mais pobre teve uma queda significativa de resistência quando houve

substituição de 25% de cimento por cinza: de 39 para 31 MPa. Para o traço com consumo de 540 quilogramas de aglomerante por metro cúbico a menor resistência encontrada foi com 15% de substituição, 54 MPa, em comparação com a referência que atingiu 63 MPa.

Figura 3- Curva diferencial (a) e integral (b) de amostras com substituição de cimento por cinza volante. Adaptado de: Şiler et al. (2015)



### 2.2.3 Temperatura de cura

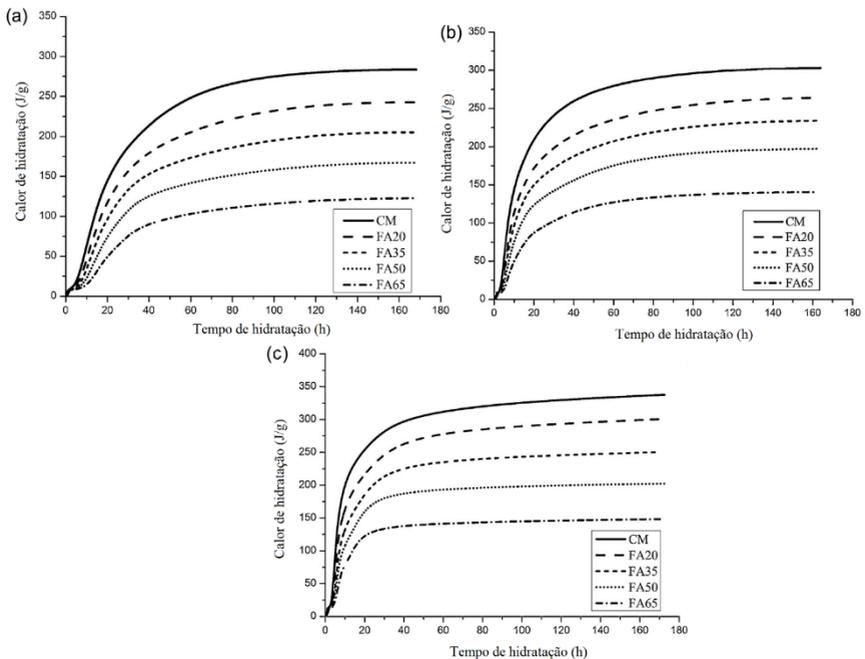
Uma maior temperatura de cura causa uma maior liberação de calor pelas reações de hidratação na primeira semana. Han *et al.* (2014), utilizaram um calorímetro isotérmico a 25, 45 e 60°C para investigar a liberação de calor de pastas de cimento com relação água/aglomerante 0,4 e substituições de cimento por cinza volante e escória de alto-forno. Cada aumento de temperatura de cura representou um aumento no total de calor liberado durante o monitoramento, que durou 7 dias.

Esses pesquisadores também identificaram o tempo em que houve o segundo pico de liberação de calor, que ocorre após o período de indução. As misturas com maior teor de cinza volante: 35, 50% e 65%, demoraram 11,1, 12,5 e 15,5 horas, respectivamente para atingir o pico de emissão de calor a 25°C. Ao elevar a temperatura para 45°C, esse pico foi atingido em 5,7, 6,3 e 6,8 horas, e a 60°C a 5,8, 5,9 e 6,1 horas. Percebe-se que a reação é acelerada a uma taxa muito maior quando se aumenta a temperatura de 25 para 45°C do que dos 45 aos 60°C. No entanto, ao contrário do tempo para atingir o pico temperatura, a taxa de calor liberada nesse pico apresentou um aumento similar tanto com a elevação da temperatura de cura dos 25 para 45°C quanto de 45 para 60°C. Para a mistura com 35% de cinza volante, a 25°C foi observado um

pico de liberação de calor de 7,1 J/g.h. Aos 45°C a liberação de calor aumentou em 9,6 J/g.h, e em mais 10,6 J/g.h aos 60°C.

Em síntese, os autores mostraram que há um aumento na liberação de calor pelas reações de hidratação à medida que a temperatura de cura é elevada. Além disso, ao comparar o calor liberado entre pastas de cimento curadas a uma mesma temperatura fica evidente o efeito de redução de calor de hidratação proporcionado pela adição de cinza volante. Os gráficos exibidos na Figura 4 ilustram bem esses resultados.

Figura 4 - Calor de hidratação liberado por pastas de cimento puro (CM) e composto com adição de diversos teores de cinza volante (FA). Temperaturas de cura de 25°C (a), 45°C (b) e 60°C (c). Adaptado de Han *et al.* 2014



### 2.3 Fissuração devido à dilatação e contração térmica

Em peças de concreto convencional, os efeitos de expansão e contração térmica não geram tensões grandes o bastante para causar problemas estruturais. Em obras de concreto massa, no entanto, a grande quantidade de cimento hidratando libera calor que não é naturalmente

dissipado de forma eficiente, de forma que se não forem tomadas medidas específicas para tratar dessa questão, problemas estruturais podem vir a acontecer. A problemática está no fato de que o concreto tem uma condutividade térmica relativamente baixa, e grandes dimensões diminuem ainda mais a taxa de dissipação do calor gerado (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Segundo Neville (2015), para evitar a fissuração do concreto, deve-se reduzir a diferença de temperatura entre o centro da peça, aquecida praticamente de forma adiabática, e a superfície, que perde o calor liberado pela hidratação do cimento em uma taxa muito mais elevada. De acordo com FitzGibbon (1977), um gradiente de temperatura maior do que 20°C ocasiona a fissuração do concreto.

O mecanismo que gera tensões pelo gradiente de temperatura entre as camadas interna e externa de uma peça de concreto massa é a dilatação térmica. Em materiais como o concreto, que possuem uma baixa resistência à tração, a maior parte dos danos são causados durante o resfriamento (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), parte da tensão gerada é dissipada pela fluência do concreto, e propõe uma equação para determinar-se a tensão de tração do concreto.

Equação 1- Tensão de tração pela retração térmica

$$\sigma_t = K_r \frac{E}{1 + \varphi} \alpha \Delta T$$

Na qual:

$\sigma_t$  = tensão de tração

$K_r$  = grau de restrição

$E$  = módulo de elasticidade do concreto

$\varphi$  = fluência do concreto

$\alpha$  = coeficiente de dilatação térmica do concreto

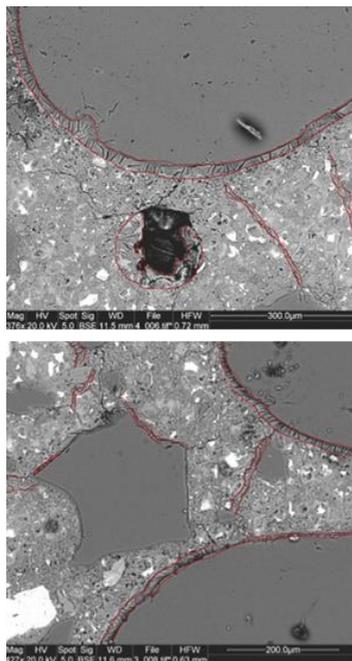
$\Delta T$  = variação na temperatura

#### 2.4 Formação de etringita tardia

A formação da etringita tardia (*delayed ettringite formation - DEF*) é um problema muito estudado no decorrer das últimas décadas, e se tornou um tópico de grande significância para a comunidade científica do concreto (DIAMOND, 1996).

Segundo Taylor *et al.* (2000), a formação de etringita tardia é definida como a formação de etringita em um material cimentício em um processo que se inicia após o endurecimento do concreto e em cuja reação não há sulfatos vindos de um meio externo. Enquanto a formação de etringita no estado fresco do concreto tem um efeito positivo (ao evitar o início imediato da hidratação, permite que o concreto possa ser transportado e moldado de acordo com as necessidades do usuário), a formação de etringita após o endurecimento do concreto torna-se um problema. As consequências da formação de etringita tardia podem vir a ser a expansão e consequente fissuração e deterioração do concreto, ilustrada pela Figura 5. (STARK & BOLLMANN, 1999).

Figura 5 - Fissuras causadas por etringita tardia, indicadas em vermelho. Fonte: Shamaa *et al.*, 2014.



Ramlochan *et al.* (2003) citam que, devido ao problema da DEF, alguns países impuseram restrições quanto à velocidade de aquecimento e resfriamento, bem como a temperatura máxima que a cura térmica pode atingir em uma fábrica de elementos pré-moldados.

Estas limitações, no entanto, não afetam os riscos da ocorrência deste tipo de expansão em elementos de concreto massa, nos quais o aquecimento é uma consequência das dimensões da peça e do consumo de cimento do concreto utilizado. Nesses casos, é comum ser impraticável limitar a temperatura da peça a 70°C, em especial nas estações mais quentes do ano. Por isso, há interesse em pesquisar outras formas de mitigar a expansão por DEF.

#### 2.4.1 Mitigação da DEF por meio de adições minerais

De acordo com o trabalho de Ramlochan *et al.* (2003), a adição de alguns tipos de pozolanas e escória de alto-forno podem resolver o problema da expansão por DEF. De acordo com os autores, isto ocorre devido à adição de  $Al_2O_3$  presente nestes materiais. O programa experimental desses investigadores consistiu na moldagem de prismas de argamassa pelo padrão ASTM, de 25 por 25 por 280 mm, utilizando dois cimentos ASTM tipo III, relação água/cimento de 0,48 e uma relação 1:2,75 de cimento : areia. As adições testadas foram sílica ativa, metacaulim, escória de alto-forno e sete tipos de cinza volante. Após a mistura, os prismas foram selados com uma pequena quantidade de água e colocados em uma câmara de testes capaz de controlar a temperatura e umidade. O aquecimento foi feito após quatro horas da mistura. Os prismas foram aquecidos de 23°C até a temperatura alvo, de 60, 70, 80 ou 95°C, a uma taxa de 20°C/h. A temperatura máxima foi mantida por 12 horas, e então a mesma taxa de 20°C/h foi aplicada para o resfriamento. Assim que terminado o resfriamento, os prismas foram desmoldados e estocados em água saturada com cal, à temperatura ambiente.

Da análise das mudanças dimensionais destas argamassas, percebeu-se que qualquer uma das adições mitigou a expansão por DEF, algumas em maior grau, outras em menor. Para todas as temperaturas de cura, a substituição de 20% do cimento por sílica ativa teve bons resultados. Para valores menores, como 15%, ainda foi observada expansão a partir de 2 anos de estocagem, alcançando 0,3% aos 4 anos. Usando uma temperatura máxima de cura de 80°C, a sílica ativa expandiu significativamente com um dos cimentos, e começou a expandir pouco antes dos 4 anos de estocagem, quando utilizada em conjunto da outra amostra de cimento (RAMLOCHAN *et al.*, 2003).

A adição de metacaulim provou ser um método muito mais eficiente para mitigar a expansão por DEF. Com a substituição de 8% ou mais do cimento por metacaulim, não foi observada expansão em nenhuma das misturas. De acordo com Ralmochan *et al.* (2003), isso

indica o mecanismo de inibição da expansão é diferente da reação pozolânica, embora esta ainda possa trazer benefícios às misturas.

Ao utilizar-se escória de alto-forno, um teor de substituição de cimento de 25% apresentou redução da expansão. Com um teor de 35% não foi registrada expansão nas misturas. A eficácia da adição das cinzas volantes em um teor de substituição de 25%, variou de acordo com diferentes amostras de cinza e cimento utilizadas. As amostras que apresentaram expansão foram as que continham elevados teores de sulfatos e/ou reduzidos teores de  $Al_2O_3$ . Com um teor de 35% de cinza não foi registrada expansão (RAMLOCHAN *et al.*, 2003).

## 2.5 Adições minerais pozolânicas

De acordo com Neville (2015), pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos sem poder aglomerante. No entanto, essas adições reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água, formando compostos com propriedades aglomerantes.

Podem-se classificar as pozolanas em naturais e artificiais. Pozolanas naturais são, salvo o diatomito, todas de origem vulcânica (NEVILLE, 2015). As pozolanas artificiais são as mais utilizadas na indústria cimenteira, em especial a cinza volante, embora ainda possam ser citados como materiais pozolânicos artificiais: sílica ativa, metacaulim, cinza da casca do arroz, etc. (BATTAGIN, 2011).

As cinzas volantes são cinzas produzidas pela queima do carvão mineral pulverizado em usinas termoelétricas. Sua composição mineral depende da composição da parte inorgânica do carvão utilizado na usina. Suas partículas tendem a ser esféricas, com uma superfície específica entre 2000 e 8000  $cm^2/g$ . (MASSAZZO, 1998).

A utilização de cinza volante, em especial para a aplicação em concreto massa, data da década de 1940 (HELMUTH, 1987). A principal característica promovida pela adição de pozolanas em concreto massa é a redução do calor de hidratação, consequência da redução no consumo de cimento, evitando assim problemas de fissuração térmica. Outros efeitos positivos desta adição são a redução do impacto ambiental e custo do concreto. O lado negativo é uma menor resistência inicial, devida à demora na ativação da reação pozolânica em um regime de cura à temperatura ambiente, já que essa reação, além de lenta, depende da presença de portlandita (LANGAN *et al.*, 2002).

As pozolanas são compostas por fases ativas, que são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio, e fases inertes. Todas as fases ativas são

ricas em sílica, e em geral são amorfas ou vítreas alteradas. (MASSAZZO, 1993).

### 2.5.1 Efeito da adição de pozolanas na hidratação do cimento Portland.

As principais reações de hidratação do cimento Portland, da alita e belita, também conhecidos como  $C_3S$  e  $C_2S$ , têm como subproduto o hidróxido de cálcio, também conhecido como portlandita, como é mostrado nas equações Equação 2 e Equação 3.

A presença de pozolanas em substituição parcial do cimento causa mudanças na química das reações de hidratação, uma vez que a pozolana reage de acordo com a reação pozolânica, descrita na Equação 4, que consome o hidróxido de cálcio para criar C-S-H, semelhante ao formado na própria hidratação do cimento. As principais reações para a formação de C-S-H: do cimento Portland comum e do cimento pozolânico; são mostradas conforme Mehta e Monteiro (2014).

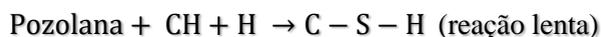
Equação 2 - Hidratação da alita



Equação 3 - Hidratação da belita



Equação 4 - Reação Pozolânica



Há duas principais vantagens apresentadas pela reação pozolânica em comparação com a hidratação do cimento sem adições. A primeira é a sua velocidade. Por ser mais lenta, a taxa de liberação de calor é menor. Por fim, os produtos da reação pozolânica tem uma ótima capacidade de preencher os poros capilares da matriz cimentícia, mais uma vez melhorando a resistência à compressão em idades avançadas.

A velocidade dessa reação é muito dependente da temperatura de cura. De acordo com Hanehara (2001) e Sakai (2005), com uma temperatura de 20°C, a reação pozolânica tem início a partir dos 28 dias. Ao aumentar a temperatura de cura para 40°C, a mesma reação teve início após 7 dias. Deschner (2013) analisou a reação pozolânica em diversas temperaturas. A 7°C ela teve início aos 90 dias, a 23°C aos 7 dias, e a temperaturas acima de 40°C teve início no primeiro dia ou antes.

Os efeitos das adições pozolânicas não só são químicos. A substituição de cimento por partículas finas também acarreta efeitos físicos que podem ajudar a hidratação do cimento.

Lawrence *et al.* (2003) estudaram o efeito da substituição de cimento por pó de quartzo de diferentes granulometrias, com superfícies específicas, medidas pelo método de Blaine, variando de 230 a 20.000 cm<sup>2</sup>/g. O pó de quartzo utilizado continha mais de 99% de sílica cristalizada em sua constituição, podendo então ser considerado inerte. O grau de hidratação foi quantificado pela proporção entre o calor liberado pelas reações e o calor total liberado pela hidratação do cimento, calculado teoricamente.

O grau de hidratação do cimento tende a aumentar com a adição de pozolanas por causa do efeito de diluição. Esse efeito é a consequência do aumento da relação água/cimento efetiva ao se elevar o teor de substituição de cimento por adições minerais. Com uma maior disponibilidade de água por massa de cimento, esse geralmente apresenta um maior grau de hidratação final.

Segundo Lothenbach *et al.* (2011), outra explicação para o efeito de diluição é devido ao início da desaceleração da reação ocorrer quando o C-S-H que cresce de um grão de cimento encontra os produtos de hidratação de um grão vizinho. Dessa forma, com uma menor densidade de grãos em um mesmo espaço, a desaceleração da reação ocorre tardiamente, promovendo um maior grau de hidratação.

O efeito de diluição, no entanto, pode ser anulado se utilizado um volume de substituição de cinza de 50% e uma temperatura de cura de 50°C, como demonstrado no trabalho de Narmluk e Nawa (2011). Neste caso, a reação pozolânica compete com a reação de hidratação do cimento pela água disponível, diminuindo o grau de hidratação final quando comparado a uma mistura submetida a uma temperatura de cura menor. Esse efeito pode observado nas Figuras 6 e 7, que mostram o grau de hidratação do cimento e o grau de reação pozolânica para as misturas com 25% e 50% de substituição de cimento por cinza volante em uma pasta com relação água/aglomerante 0,25. O grau de hidratação do cimento foi medido por meio de difração de raios X e o grau de reação da cinza volante pelo método de dissolução seletiva.

Figura 6 - Grau de hidratação do cimento com 25% de substituição por cinza volante (a) e 50% (b), a três temperaturas de cura (25, 35 e 50°C). Adaptado de Namluk e Nawa (2011)

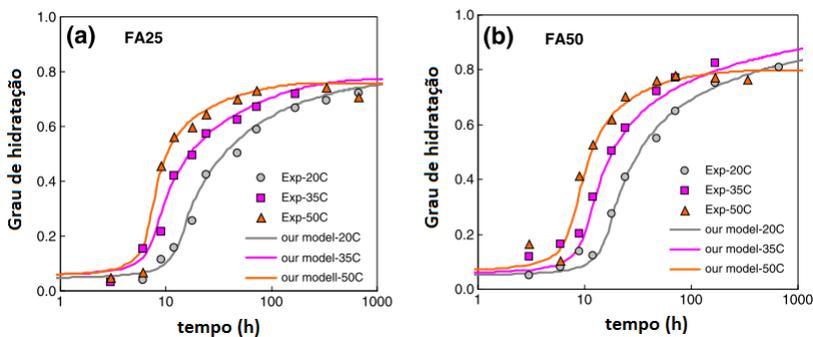
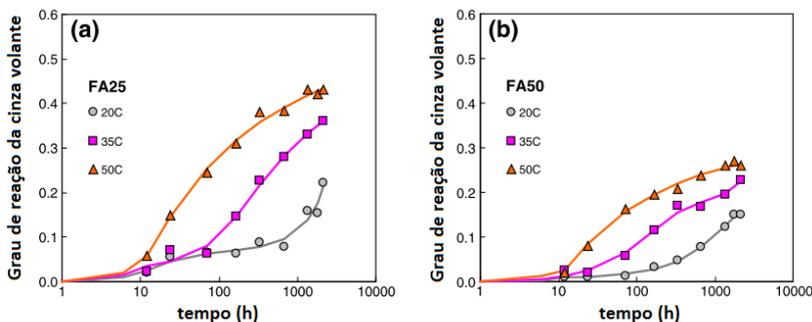


Figura 7 - Grau de reação da cinza volante com 25% de substituição por cinza volante (a) e 50% (b), a três temperaturas de cura (25, 35 e 50°C). Adaptado de Namluk e Nawa (2011)



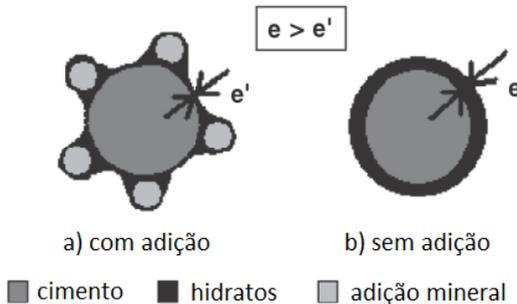
Outro efeito físico das adições minerais descrito por Lawrence *et al.* (2003) é a nucleação heterogênea. Uma hipótese que explica esse fenômeno admite que a espessura da camada de hidratos formada ao redor dos grãos de cimento é reduzida quando partículas finas o bastante de adições minerais estão presentes. Dessa forma a hidratação da parte anidra, que depende da difusão, é facilitada. A

Figura 8 ilustra a hipótese da nucleação heterogênea.

Ensaio de laboratório mostraram que o grau de hidratação cresce à medida que o tamanho do grão da adição mineral diminui e que para superfícies específicas abaixo de 500 cm<sup>2</sup>/g esse efeito é insignificante.

Estudou-se também diversos teores de substituição de cimento por pó de quartzo e, de forma geral, os maiores graus de hidratação do cimento ocorreram com substituições entre 25 e 35%.

Figura 8 - Representação esquemática da hipótese da nucleação heterogênea. Adaptado de Lawrance *et al.* (2003)



### 2.5.2 Efeito da adição de cinza volante na resistência à compressão

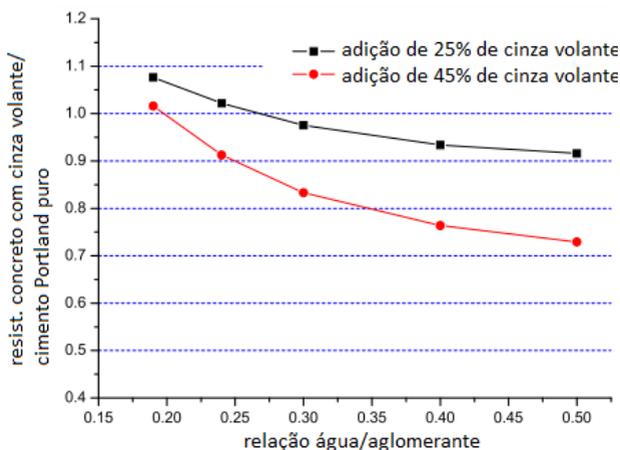
A resistência à compressão é uma das características do concreto que mais impulsionam o seu uso, em especial a relação entre resistência à compressão e custo. Por isso, é uma das características mais importantes a ser especificada ao se dosar uma mistura.

O teor de substituição e tipo de cinza volante afeta essa característica do concreto. Há outros fatores que afetam a relação entre adição e resistência, podendo favorecer taxas de adição maiores, como uma maior temperatura de cura do concreto e relações água/cimento mais baixas.

Utilizando relações água/cimento 0,5 e com cura à temperatura ambiente, Kocak e Nas (2014) observaram redução na resistência à compressão de pastas de cimento à medida que o teor de substituição de cimento por cinza volante foi elevado. Percentualmente, a queda na resistência em idades iniciais, de 2 e 7 dias, foi maior do que nas idades de 28 a 90 dias. Para o teor de substituição de cimento por cinza volante de 25%, observou-se uma redução da resistência à compressão de 33% aos 2 e 7 dias. A resistência da mistura de cimento com a adição começou a se aproximar da referência aos 28 dias, chegando a apresentar 20% de redução aos 90 dias. Wang e Park (2015) também observaram redução da resistência à compressão aos 28 dias para concretos com relações água/cimento usuais. Quando a relação água/cimento foi reduzida, foi

possível notar uma melhora na relação entre a resistência dos concretos com e sem adição de cinza volante, ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Relação entre resistências à compressão aos 28 dias de concretos com e sem cinza volante. Adaptado de Wang, 2015.



### 2.5.3 Efeito da adição de cinza volante na durabilidade

De acordo com Massazza (1998), a adição 40% de cinza volante pode reduzir em até uma ordem de grandeza a difusividade de cloretos. Essa diferença é atribuída a uma menor permeabilidade desse cimento composto, uma tortuosidade maior das ligações capilares, geradas pelo refinamento dos poros proporcionado pela reação pozolânica.

Mengxiao *et al.* (2015) também investigaram a permeabilidade de cloretos em concretos submetidos à cura térmica e cura convencional. O processo de cura térmica utilizado foi de acompanhamento da temperatura obtida nos ensaios de elevação adiabática da temperatura. O traço com 45% de substituição de cimento por cinza volante e cura térmica apresentou redução de permeabilidade de cloretos em relação à cura convencional para todas as idades ensaiadas: 28, 56 e 90 dias. A melhora mais acentuada ocorreu no ensaio aos 28 dias que em cura convencional apresentou permeabilidade moderada segundo a ASTM

C1202. Nos corpos de prova submetidos a cura térmica a permeabilidade foi muito baixa.

Hanehara (2001) comenta que há uma taxa de substituição de cimento por cinza volante a partir da qual o consumo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica pode diminuir a durabilidade de peças de concreto armado. Segundo o autor, a partir de 60% de substituição pode haver a neutralização do pH da pasta de cimento, o que causaria um efeito similar ao da carbonatação, removendo a camada passivadora que evita a corrosão do aço.

#### 2.5.4 Métodos de avaliação da atividade pozolânica

Atividade pozolânica é a capacidade de um material de reagir com hidróxido de cálcio e água. Essa propriedade pode ser dividida em dois parâmetros: a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que a reação pode consumir e a taxa com que isso ocorre. (MASSAZZA, 1998).

De acordo com Swamy (1993) apud Santos (2006), a atividade pozolânica de um material é dependente de tantos fatores que torna difícil a obtenção de um método que consiga controlar todos simultaneamente. Os requisitos básicos para avaliar um método de ensaio da atividade pozolânica são: ser capaz de identificar um material pozolânico de um não pozolânico; determinar o grau de atividade pozolânica e evolução da resistência mecânica do material investigado e cumprir os dois objetivos anteriores em um espaço de tempo viável para a pesquisa.

Com o objetivo de caracterizar a atividade pozolânica de um material, pesquisadores desenvolveram ensaios com base em diversos mecanismos de investigação. Um deles avalia a resistência mecânica de compostos cimentícios produzidos com o material investigado. Outro se baseia em análises químicas para determinar a quantidade de hidróxido de cálcio consumido. Também podem ser usadas análises térmicas, que investigam mudanças físicas e químicas em função do aquecimento do material.

##### 2.5.4.1 Termogravimetria

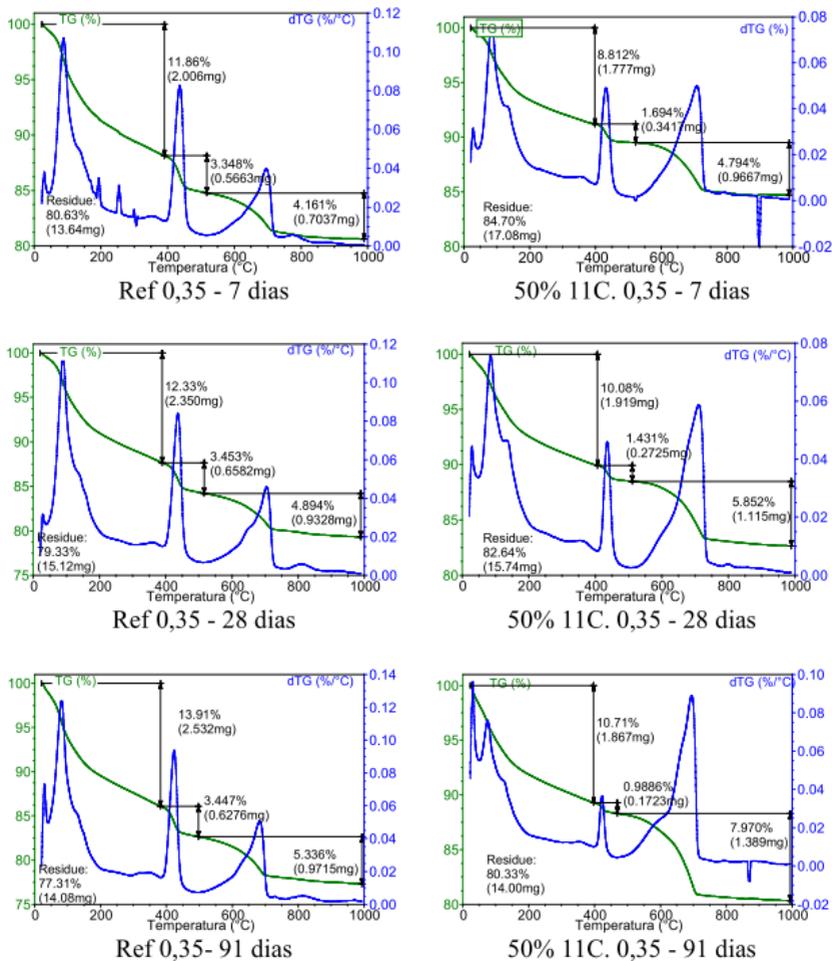
A termogravimetria (TG) é um método termo-analítico que pode ser utilizado para a avaliação da reatividade de uma pozolana. Esse método mede mudanças químicas e físicas de um material a partir da variação de massa ao ser sujeito a um programa de temperatura controlado. O equipamento necessário para essa análise consiste de um forno acompanhado de uma balança de precisão.

De acordo com Pourkhorshidi (2013), a termogravimetria é capaz de avaliar a atividade pozolânica pela decomposição térmica da fase cristalina do hidróxido de cálcio em óxido de cálcio e água, que ocorre no intervalo dos 400 aos 500°C. Com a liberação da água, pode-se medir, através da variação de massa, a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  que estava presente na amostra. Materiais altamente pozolânicos tendem a apresentar pouca variação de massa por causa do consumo de hidróxido de cálcio causado pela reação pozolânica.

Outro parâmetro importante é a curva derivada primeira de uma análise termogravimétrica (dTG). A dTG permite que as alterações sejam observadas mais facilmente, obtendo-se resultados mais detalhados quanto à determinação da temperatura que apresenta a maior taxa de perda de massa (HASPARIK, 2005).

Pilar (2012) estudou o efeito de adição de cinza pesada moída em concreto. A reatividade pozolânica foi investigada a partir da termogravimetria e pode ser observada na Figura 10. Ao chegar na faixa de temperatura de 400 a 500°C, percebe-se perda de massa causada pela saída de água advinda da degradação de hidróxido de cálcio em óxido de cálcio e água. A presença de menos hidróxido de cálcio na pasta com cinza volante em relação à referência é esperada mesmo aos 7 dias porque há menos hidratos sendo gerados, mesmo que nessa idade a reação pozolânica ainda não tenha iniciado, segundo a literatura. É possível verificar o resultado da reação pozolânica ao comparar a curva de termogravimetria da mistura com 50% de cinza aos 7, 28 e 91 dias. Nessas idades, é evidente o consumo de hidróxido de cálcio pela hidratação da cinza utilizada.

Figura 10 - Termogravimetria de pastas de cimento Portland com e sem adição de cinza pesada nas idades de 7, 28 e 91 dias. Fonte: Pilar, 2012.



#### 2.5.4.2 Chapêlle Modificado

O método de Chapêlle Modificado, prescrito pela ABNT NBR 15895:2010, é um método químico para a avaliação da atividade pozolânica de um material. Esse método consiste na comparação do consumo de CaO entre duas amostras mantidas a  $90 \pm 5^\circ\text{C}$  por 16 horas: uma com o material supostamente pozolânico e outra sem. A

pozolanicidade do material é medida em miligramas de hidróxido de cálcio consumido por grama do material pozolânico. A quantificação do hidróxido de cálcio consumido é determinada a partir de titulação ácido-base. Quanto mais  $\text{Ca(OH)}_2$  fixado, maior a pozolanicidade do material. A temperatura elevada tem função de acelerar a reação pozolânica e consequentemente o ensaio.

Gobbi (2014), fez um comparativo desse ensaio com os ensaios com base na resistência à compressão de corpos de prova moldados com os materiais investigados. Seus resultados apontaram o ensaio Chapèlle Modificado como a alternativa superior para a verificação da pozolanicidade de um material. Enquanto os métodos de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) prescritos pelas normas ABNT NBR 5751:2015 e 5752:2014 identificaram amostras de fílers inertes como pozolânicos, o ensaio de Chapèlle Modificado demonstra quimicamente a ausência de reações. Em amostras de material cerâmico calcinado, o ensaio de Chapèlle Modificado apontou atividade pozolânica pela fixação de hidróxido de cálcio, mas a resistência mecânica em corpos de prova não foi afetada de forma significativa. Portanto, pelos métodos de IAP, a calcinação desse material não representou uma mudança de pozolanicidade.

#### 2.5.4.3 *Ensaio com base na resistência mecânica de corpos de prova*

Os métodos de avaliação do Índice de Atividade Pozolânica prescritos pelas normas ABNT NBR 5751:2015 e 5752:2014 são diferenciados por avaliarem em cal e cimento, respectivamente. Nestes métodos é feita a substituição de 25% de aglomerante pelo material pozolânico. São moldados corpos de prova de referência e com a substituição e comparadas as resistências.

As críticas de Gobbi (2014) a este ensaio já foram apresentadas acima. Madalena (2013) considera este um ensaio complementar ao Chapèlle Modificado para uma abordagem mais tecnológica.

#### 2.6 Resistência à compressão com diferentes regimes de cura

A resistência à compressão é a principal propriedade mecânica do concreto. Usualmente, é a única característica especificada e testada. Tratando-se de concreto massa, a estrutura é submetida a um regime de cura diferente do aplicado aos corpos de prova que deveriam representar suas propriedades mecânicas. Essa prática pode gerar resultados que não

representam adequadamente o comportamento do material, como será visto nessa seção.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o concreto curado a temperaturas mais elevadas atinge resistências maiores nas idades iniciais, mas com um ônus na resistência final. Estudos de microscopia concluem que, a menores temperaturas de cura, a microestrutura da pasta de cimento se forma de maneira mais uniforme, o que permite uma resistência final maior do que a microestrutura mais desorganizada e com porosidade mais irregular do concreto curado a temperaturas elevadas. Por outro lado, temperaturas maiores aceleram as reações de hidratação do cimento, explicando as resistências elevadas em idades iniciais.

O efeito da condição de cura também foi investigado por Turualló e Soutsos (2015) em concretos autoadensáveis mantidos a temperaturas de 20°C a 50°C. Os traços de concreto consistiam de referência, com adição de escória ou fíler calcário e a resistência à compressão foi medida entre as idades de 3 horas até 28 dias. Os concretos curados a 50°C apresentaram uma resistência inicial maior até os 7 dias, mas houve prejuízo de até 12% na resistência aos 28 dias quando comparado aos traços curados a 20°C. O traço que teve melhor desempenho em temperaturas mais altas continha escória de alto forno, cuja reação é mais lenta. Ainda assim, a maior resistência aos 28 dias foi observada nos corpos de prova curados a apenas 30°C. Aldea *et al.* (2000) encontrou resultados similares ao comparar misturas com adição de escória em substituição ao cimento de 0 a 75% e curadas a 20 ou 80°C. Foi observada uma perda de cerca de 20% da resistência à compressão, com exceção da mistura com 75% de substituição de cimento por escória, onde a perda foi menor, cerca de 10%.

Mais evidências que corroboram com a hipótese de que o concreto curado a temperaturas maiores atinge resistências menores são mostradas por Kim *et al.* (1998). Em um comparativo entre regimes de cura em que o concreto foi curado a 20°C, 40°C, e 40°C no primeiro dia e o restante a 20°C, a primeira condição de cura resultou em uma resistência à compressão aos 28 dias em média 12% maior. Os testes foram realizados com cimento Portland comum e duas relações água/cimento: 0,55 e 0,35 e a elevação de temperatura ocorreu à razão de 20°C em um período de 6 horas.

Mantendo os patamares de temperatura de 60 e 80°C por apenas duas horas, Ferreira Jr. (2003), observou valores 15% menores na resistência à compressão em relação aos corpos de prova curados à temperatura ambiente. Esse resultado foi obtido a partir de concretos

contendo cimentos tanto do tipo CP V quanto CP III. Com uma metodologia similar, Santos (2010) manteve patamares de 65 e 80°C por 4, 6 e 8 horas, com início do aquecimento após 3 horas do contato do cimento com a água. Utilizando dois tipos de cimento, CP II-E e CP III, em concretos autoadensáveis, também foi observada uma perda de resistência. Essa perda aumentou quanto maior a temperatura e o tempo de cura térmica, conforme pode ser observado na Tabela 4. Pode-se ainda citar o trabalho de Martins (2001), que ao manter um patamar de 60°C por 2 horas também observou uma redução na resistência à compressão de seus corpos de prova com diferentes teores de escória.

Tabela 4 - Resistência à compressão dos concretos com cimento CP II E-32 (Fonte: Santos, 2010)

Condição	Patamar (h)	Resistência para o cimento CP II E-32 (MPa)				
		3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
Cura 65°C	4	33,9	40,4	48,5	54,2	54,7
	6	28,2	36,3	44,7	45,5	49,5
	8	29,5	34,5	40,5	40,6	43,6
Cura 80°C	4	22,4	26,4	37,2	41,6	42,5
	6	22,3	26,3	36,4	40,4	45,6
	8	21,7	27,8	32,5	32,6	33,1
Controle		34,9	42,5	50,7	53,4	58,1

Resultados que divergem dos supracitados foram encontrados em uma pesquisa conduzida por Jin (2017) que avaliou as propriedades mecânicas aos 90 e 360 dias de corpos de prova expostos a cinco regimes de cura diferentes a 20 ou 45°C. O estudo previu quatro traços de concreto: referência, substituição em massa de 45% do cimento por escória de alto forno ou cinza volante, e substituição de 12% do cimento por sílica ativa. Todas as misturas continham 360 kg/m<sup>3</sup> de aglomerante e relação água/cimento de 0,45. As cinco condições de cura adotadas foram:

- (A) 20°C por todo o período;
- (B) 12 horas a 20°C, 7 dias a 45°C e o restante a 20°C;
- (C) 1 dia a 20°C, 7 dias a 45°C e o restante a 20°C;
- (D) 1 dia a 20°C, 3 dias a 45°C e o restante a 20°C;
- (E) 3 dias a 45°C e o restante a 20°C.

Toda variação de temperatura ocorreu gradualmente por um período de duas horas.

Os resultados de resistência à compressão encontrados pelo autor mostram que a única condição de cura que apresentou um efeito deletério foi a (E) para os traços referência, com adição de cinza volante, e com adição de sílica ativa, tanto aos 90 quanto 360 dias. Esse prejuízo na resistência foi, em média, de 5%. O traço com adição de escória apresentou a pior resistência à compressão quando submetido à cura (A). Aos 90 dias, a condição (C) correspondeu aos maiores valores de resistência à compressão, com ganhos de 5% para o traço referência, 11% para escória, 9% para cinza volante. Para o traço com sílica ativa, o maior ganho de resistência em relação à cura (A) ocorreu sob a condição (B), de apenas 2%.

A abordagem de Payá *et al.* (2000) foi imergir os corpos de prova após um dia da moldagem em banhos térmicos com temperaturas de 20, 40, 60 e 80°C. As argamassas moldadas continham substituição de 30% do cimento por amostras de cinza volante com diferentes graus de moagem. Os maiores valores de resistência foram obtidos para as amostras curadas a 40°C. Os menores, cerca de 20% inferiores, foram obtidos para as amostras curadas a 80°C, embora as curadas a 20°C não tenham obtido resultados muito superiores.

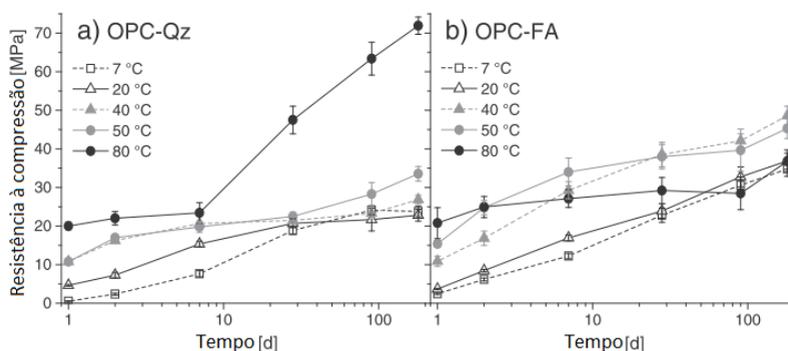
Yang *et al.* (2015) conduziram um estudo de maturidade para concretos aplicados em uma usina nuclear na Coreia do Sul. Para tanto, foi utilizado um cimento belítico, de baixo calor de hidratação, e foram investigadas temperaturas de cura de 5, 20 e 40°C. Foram avaliados dois traços, o primeiro com relação água/aglomerante 0,40 e o segundo 0,28, ambos com 5% de substituição em massa de cimento por sílica ativa. Para ambas as misturas, os corpos de prova curados a 40°C obtiveram as maiores resistências durante todo o período, que compreendia as idades de 1 a 91 dias. A vantagem no uso da cura a 40°C foi mais expressiva no traço com água/aglomerante maior (0,40): cerca de 20% aos 28 dias e 5% aos 91 dias. Na outra mistura, a resistência aos 91 dias quase se equiparou entre todas as condições de cura, e aos 28 dias houve um ganho de 3% da cura a 40°C sobre aos 20°C.

Deschner *et al.* (2013) verificaram a resistência e microestrutura de duas argamassas, uma com substituição de 50% em massa de cimento Portland por pó de quartzo (OPC-Qz) e outra com o mesmo percentual de cinza volante (OPC-FA). Os corpos de prova foram curados a 7, 20, 40, 50 e 80°C e a resistência à compressão foi acompanhada até 180 dias. A resistência do traço OPC-FA teve o melhor desempenho a longo prazo

com a condição de cura de 40°C, seguida de 50°C. Já a mistura OPC-Qz obteve um resultado expressivamente melhor a 80°C, como se pode observar na Figura 11.

O diferencial deste trabalho foi a extensiva investigação da microestrutura por meio de termogravimetria, microscopia eletrônica e difratometria de raios-x. Os ensaios de termogravimetria apontam o papel da temperatura em acelerar a reação pozolânica da cinza volante e em ativar o pó de quartzo para que este também apresentasse reação pozolânica. A 7°C, o consumo de hidróxido de cálcio foi observado apenas aos 90 dias. A 23°C após 7 dias, a 40°C após 1 dias, 50°C após 16 horas e a 80°C ainda antes disso. A microestrutura se diferencia principalmente na porosidade, de forma que as amostras curadas a 7°C apresentaram uma microestrutura menos porosa e mais homogênea quando comparada à de amostras curadas a 50 e 80°C.

Figura 11 - Resistência à compressão de pastas com pó de quartzo (OPC-Qz) e cinza volante (OPC-FA). Adaptado de Deschner (2013)



A influência do regime de cura na resistência à compressão de concretos com cinza volante foi investigado por Junckes (2015). A Tabela 5 apresenta os resultados desta investigação. Cura 1 corresponde a uma cura térmica na qual os corpos de prova foram submetidos a elevação adiabática de temperatura por 72 horas e em seguida foram desmoldados e mantidos em câmara úmida com temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  até a idade de ruptura. A Cura 2 é a convencional, na qual os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida com temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  até a idade de ruptura. Os corpos de prova submetidos à Cura 3 foram mantidos em banho térmico com temperatura de  $38 \pm 2^\circ\text{C}$  até a idade de ruptura.

Nesse estudo é evidente o ganho de resistência, mesmo a médio prazo, causado por uma cura térmica com temperaturas mais brandas. Já a Cura 1, que acompanhou a elevação de temperatura do concreto sem trocas de calor, atingindo temperaturas de 62 até 89°C, prejudicou a resistência à compressão do concreto em relação à cura convencional (2). Cabe salientar que o referido autor submeteu os corpos de prova a uma rápida perda de calor ao desmoldar e estocar imediatamente os corpos de prova ainda quentes à temperatura ambiente.

Mengxiao *et al.* (2015) estudaram o efeito da cura térmica na resistência de corpos de prova com substituição de 45% de cimento, tanto por cinza volante quando por escória de alto forno. Nesse estudo, foi determinada a curva de elevação adiabática da temperatura e foram moldados corpos de prova cúbicos, curados a uma temperatura semelhante à observada em condições adiabáticas. A resistência à compressão destes corpos de prova, medida em diversas idades variando de dois a 90 dias mostrou que essa cura térmica, que atingiu até 54°C, proporcionou corpos de prova com maior resistência à compressão em relação à cura convencional. Esse estudo não compreendeu a confecção de um traço referência, sem adições minerais.

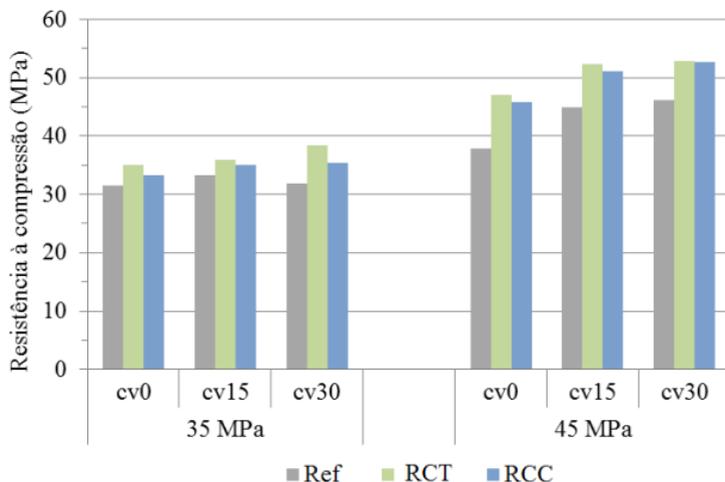
Tabela 5 - Resistência à compressão aos 28 dias com diferentes regimes de cura.  
Fonte: Junckes, 2015.

Cinza volante	Fck 35 MPa			Fck 45 MPa			Fck 55 MPa		
	Cura 1	Cura 2	Cura 3	Cura 1	Cura 2	Cura 3	Cura 1	Cura 2	Cura 3
0%	36,0	41,0	40,7	47,3	46,2	50,4	55,7	59,0	64,7
15%	41,1	39,3	43,4	57,7	63,3	65,3	54,6	59,5	67,0
30%	40,7	45,9	50,4	52,5	54,9	61,9	57,4	65,0	65,2
45%	44,8	47,9	54,2	63,9	68,9	71,9	65,6	69,1	73,5
<b>Média</b>	<b>40,6</b>	<b>43,5</b>	<b>47,2</b>	<b>55,4</b>	<b>58,3</b>	<b>62,4</b>	<b>58,3</b>	<b>63,1</b>	<b>67,6</b>

O estudo realizado por Salum (2016), integrante do GTec-UFSC, observou uma influência positiva da aplicação de um regime de cura térmica autógena na resistência aos 28 dias de corpos de prova com até 30% de substituição volumétrica de cimento por cinza volante. Nesse estudo, foram aplicadas as temperaturas que o concreto chegaria no centro e no topo de uma estrutura de concreto massa, em especial um bloco de fundação. A temperatura a ser aplicada foi calculada com base no trabalho de Junckes (2015) e nos monitoramentos feitos pelo GTec (PRUDÊNCIO JR *et al.*, 2013-2016), e os resultados mostraram que o concreto com cura térmica mais branda, simulando a condição no topo do bloco (RCT) teve

ganhos de resistência maiores que os com cura térmica praticamente adiabática, do centro do bloco de fundação (RCC), como pode-se verificar na Figura 12.

Figura 12 - Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos. Fonte: Salum (2016)



Dentre os estudos compreendidos nessa seção, a maior parte apresenta resultados deletérios na resistência a longo prazo quando a cura térmica é aplicada antes do início da hidratação do cimento ou quando é utilizada uma temperatura muito elevada. Além disso, o uso de adições minerais, principalmente escória de alto forno e cinza volante, costuma fazer com que a cura térmica acarrete em um ganho de resistência.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A escolha de materiais e formulação do programa experimental foram de acordo com os objetivos do trabalho. O principal ensaio para atingir os objetivos foi o de elevação adiabática de temperatura do concreto. Para complementar o estudo com outras questões de interesse, também foram realizados ensaios como o de resistência à compressão de corpos de prova submetidos a condição de cura análoga à encontrada em estruturas de concreto massa, aqui denominada de cura térmica autógena (CTA). Para investigar as questões da química de reações, também foram feitos ensaios de índice de atividade pozolânica (Chapelle modificado) e termogravimetria.

#### 3.1 Materiais

Este tópico trata da seleção e caracterização dos materiais que foram utilizados neste estudo. Os agregados utilizados foram selecionados por sua disponibilidade no litoral catarinense e possível utilização por concreteiras da região. Selecionou-se um cimento com pequeno teor de adições minerais, para que o traço de referência fosse pouco afetado por esta variável. Também foi selecionada uma cinza volante disponível na região e aditivos usuais na dosagem de concretos para blocos de fundação.

##### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado para este trabalho foi um CPV-ARI, cedido pela Supremo Cimentos. Esse cimento foi escolhido por apresentar um baixo teor de adições, propiciando a realização de um comparativo entre traços de concreto sem nenhuma adição ao cimento e traços com adição de cinza volante em diferentes teores.

A caracterização deste cimento foi feita pelo fabricante, e nela constam diversas propriedades químicas e físicas, mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização do cimento.

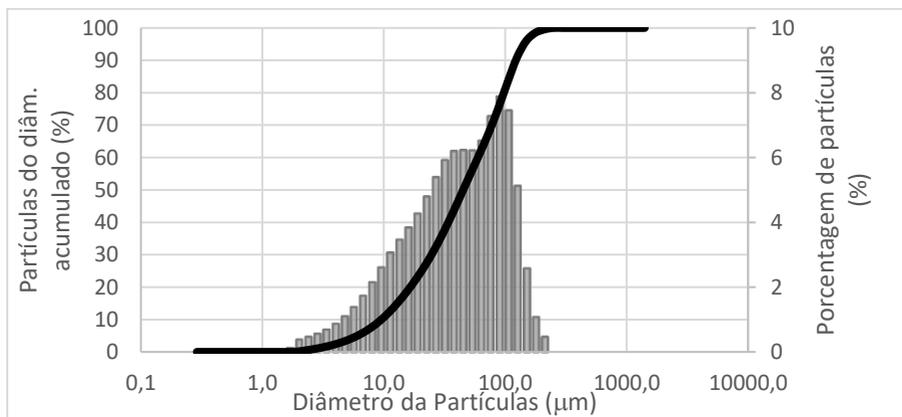
Avaliação	Método de Ensaio	Especificação Normativa	Resultados do CPV-ARI	
Resistência à compressão (MPa)	1 Dia	NBR 7215	$\geq 11$	25,6
	3 Dias	NBR 7215	$\geq 24$	35,9
	7 Dias	NBR 7215	$\geq 34$	39,7
	28 Dias	NBR 7215	não aplicável	50,7
a/c na pasta de Consistência Normal (%)	NM 43	não aplicável		29,5
Tempo de Pega (h,min)	Início	NM 65	$\geq 1h$	3h29min
	Fim	NM 65	$\leq 8h$	4h33min
% retida na peneira #325	NBR 11579	não aplicável		1,13%
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	NBR 16372	$\geq 3000$		4311
SO <sub>3</sub> (%)	NM 14	não aplicável		2,93

### 3.1.2 Cinza volante.

A cinza volante utilizada é originária de uma usina termoelétrica de queima de carvão mineral situada em Candiota/RS.

A análise granulométrica desse material foi feita em um granulômetro a laser do laboratório de nanotecnologia do Departamento de Engenharia Civil da UFSC (Nanotec), e pode ser verificada na Figura 13.

Figura 13 - Distribuição granulométrica da cinza volante utilizada.



A distribuição percentual desta cinza deu-se da seguinte maneira:

- 90% dos grãos têm diâmetro de partícula inferior a 122,30  $\mu\text{m}$ ;
- 50% dos grãos têm diâmetro de partícula inferior a 45,08  $\mu\text{m}$ ;
- 10% dos grãos têm diâmetro de partícula inferior a 9,56  $\mu\text{m}$ .

Para avaliar a cinza volante, foi realizado o ensaio de índice de atividade pozolânica Chapèlle, pelo método de Chapèlle modificado, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Atividade pozolânica pelo método de Chapèlle modificado.

Atividade pozolânica	Ensaio		
	1	2	Média
mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ cinza	445	570	507,5

O consumo de  $\text{CaO}$  do material deve ser de no mínimo 330 miligramas por grama de pozolana. Esse valor corresponde a 436 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  de pozolana. Portanto, a amostra de cinza volante investigada apresenta características pozolânicas.

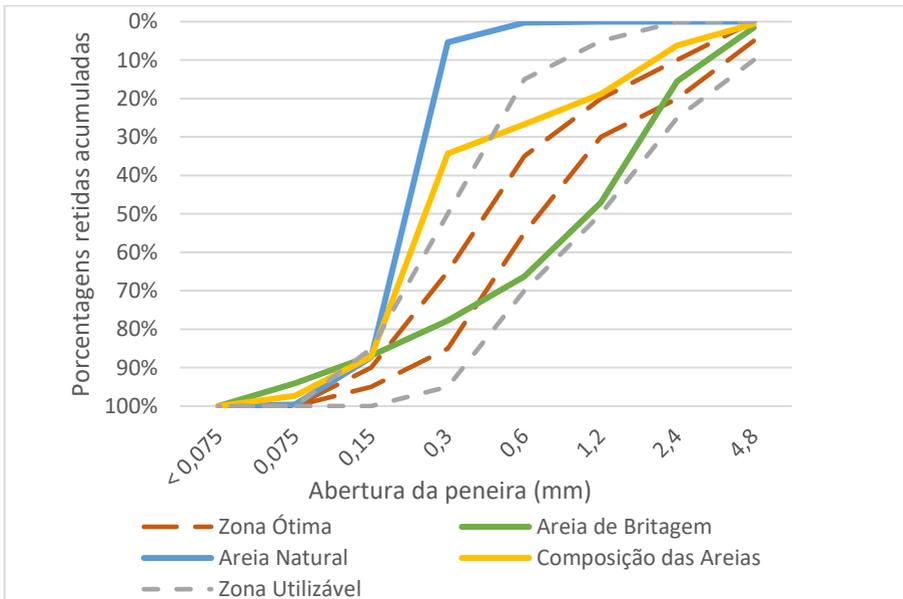
### 3.1.3 Agregados

Os agregados foram selecionados com base na disponibilidade regional e deu-se preferência aos que apresentam um histórico de constância das propriedades físicas. Foi utilizada uma composição de agregado fino natural e industrial, brita 4,75/12,5 e brita 9,5/25.

#### 3.1.3.1 Agregados Miúdos

Para os traços de concreto, foi utilizada uma composição de dois tipos de agregados miúdos: uma areia de britagem de origem calcária, proveniente de uma pedreira localizada no município de Botuverá-SC, e utilizada em uma proporção de 40% da massa total de agregado miúdo; para os 60% restantes da composição de areias, foi utilizada uma areia natural fina proveniente do município de Araquari-SC. A distribuição granulométrica dessas areias, realizada de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, está apresentada na Figura 14. A massa específica e módulo de finura desses agregados são, respectivamente, 2,55 g/cm<sup>3</sup> e 0,93 para a areia natural e de 2,69 g/cm<sup>3</sup> e 2,95 para a areia de britagem.

Figura 14 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos utilizados.

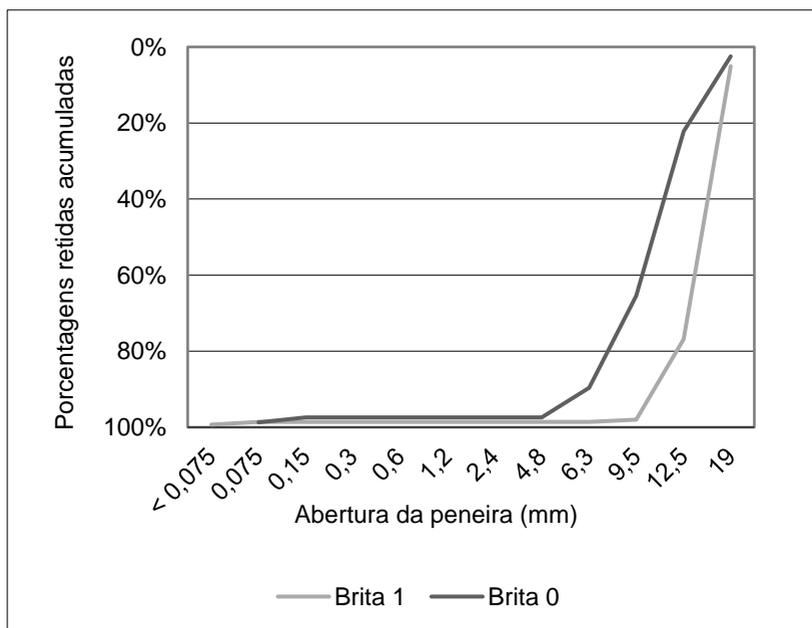


### 3.1.3.2 Agregados Graúdos

Foram utilizados dois tipos de agregado graúdo, ambos de origem granítica. São classificados como 4,75/12,5 e 9,5/25 de acordo com a classificação da ABNT NBR 7211:2009, também chamadas de brita 0 e brita 1, respectivamente. O porcionamento desta composição de agregados graúdos foi feito em massa: 30% de brita 0 e 70% de brita 1.

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos, realizada de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, está apresentada na Figura 15. A massa específica e módulo de finura e dimensão máxima característica desses agregados são, respectivamente, 2,65 g/cm<sup>3</sup>, 5,99 e 4,8 mm para a brita 0 e 2,64 g/cm<sup>3</sup>, 6,95 e 12,5 mm para a brita 1.

Figura 15 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos.



### 3.1.4 Aditivo

Para a confecção das misturas de concreto, foi empregado o aditivo plastificante polifuncional redutor de água Mira Set 48. Segundo a empresa que o produz, Grace Brasil Ltda, é um aditivo composto por

lignosulfonato e naftaleno sulfonato. O fabricante forneceu a caracterização deste aditivo, aqui apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Caracterização do aditivo Mira Set 48.

<b>Propriedade</b>	<b>Característica</b>
Aspecto	Líquido
Cor	Marrom escuro
pH	8,0 ± 1,0
Massa específica	1,21 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	31,2 a 34,4 %

### 3.2 Métodos empregados

O método de dosagem dos concretos, os ensaios de elevação adiabática da temperatura e a resistência à compressão em duas condições de cura são descritos a seguir.

#### 3.2.1 Matriz de misturas

Este estudo se propôs a estudar a influência das seguintes variáveis independentes para atingir os objetivos:

- Consumo de aglomerante em teores de 200 kg/m<sup>3</sup>, 250 kg/m<sup>3</sup> e 300 kg/m<sup>3</sup>.
- Teores de substituição volumétrica de cimento Portland de alta resistência inicial (CP V) por cinza volante, iguais a 0%, 15% e 30%. Um valor extra de substituição de 45% foi utilizado para o consumo de aglomerante de 200 kg/m<sup>3</sup>.

O teor de aglomerante mais baixo foi escolhido em decorrência do valor de elevação adiabática de temperatura de 12°C/100kg de cimento por m<sup>3</sup> de concreto, que foi verificado em diversos concretos estudos realizados pelo GTec-UFSC (TOCHETTO, 2010; GRAEFF, 2013; JUNCKES, 2015), sendo também é citado por Neville (2015). Com base neste valor, para um consumo de cimento de 200 kg/m<sup>3</sup>, ocorre um aumento de 24°C, o que, partindo de 25°C resultaria em uma temperatura final de 49°C. Com esta temperatura esperava-se que a cinza volante tivesse uma reação que liberasse menos calor nas primeiras idades do que a verificada em estudos anteriores, especialmente quando a proporção de substituição de cimento fosse aumentada.

O consumo de aglomerante de  $300 \text{ kg/m}^3$  é próximo do mais baixo utilizado por Junckes (2015), a partir do qual verificou-se que a adição de cinza volante não influenciou consideravelmente a temperatura final atingida pelo concreto. Esse valor também é desejado por proporcionar uma confirmação entre estudos, sendo um ponto de intersecção entre os dois trabalhos.

Um resumo das misturas deste programa experimental está apresentado abaixo, na Tabela 9. No total, foram confeccionados 10 traços de concreto. Corpos de prova moldados com estes traços foram submetidos a duas condições e cura, uma seguindo a elevação adiabática de temperatura do concreto e outra à temperatura de  $23^\circ\text{C}$  em câmara úmida.

Tabela 9 - Matriz de misturas do programa experimental.

Mistura	Cimento CPV ( $\text{kg/m}^3$ )	Cinza Volante ( $\text{kg/m}^3$ )	Aglomerante Total ( $\text{kg/m}^3$ )	Volume de Cimento ( $\text{l/m}^3$ )	Volume de Cinza Volante ( $\text{l/m}^3$ )	Aglomerante Total ( $\text{l/m}^3$ )
200-CV0%	200	0	200	64,5	0	64,5
200-CV15%	170	21	191	54,8	9,7	64,5
200-CV30%	140	43	183	45,2	19,4	64,6
200-CV45%	110	64	174	35,5	29	64,5
250-CV0%	250	0	250	80,6	0	80,6
250-CV15%	212	27	239	68,5	12,1	80,6
250-CV30%	175	53	228	56,5	24,2	80,7
300-CV0%	300	0	300	96,8	0	96,8
300-CV15%	255	32	287	82,3	14,5	96,8
300-CV30%	210	64	274	67,7	29	96,7

### 3.2.2 Proporções da mistura

Os traços de concreto foram proporcionados para simular os utilizados por usinas dosadoras de concreto do litoral de Santa Catarina. Dessa forma, decidiu-se dosar traços de concreto convencional com um consumo de água de  $180 \text{ L/m}^3$  e aditivo polifuncional à base de lignossulfonato.

A quantidade de aglomerante utilizada foi a apresentada na Tabela 9 - Matriz de misturas do programa experimental. O teor de argamassa foi determinado experimentalmente, com base no traço intermediário 250-CV15%. O procedimento foi iniciado com 48% de argamassa, adicionou-se cimento, areia, cinza e água em incrementos de 1% até que a mistura apresentasse um coesão e aparência julgadas adequadas, o que ocorreu ao atingir o valor de 53% de teor de argamassa.

Para finalizar o cálculo do porporcionamento, completou-se o volume de 1 m<sup>3</sup> com os agregados, respeitando-se as composições de areia descritas nos itens 3.1.3.1 e 3.1.3.2 e o teor de argamassa. O resultado deste procedimento pode ser verificado na Tabela 10.

Tabela 10 - Proporção dos concretos para 1 m<sup>3</sup>, materiais em kg.

Traço	Cimento	Cinza Vo-lante	Areia Natu-ral	Areia Indus-trial	Brita 0	Brita 1	Água	a/aglomerante (em massa)
200-CV0%	200	0	556	370	300	699	180	0,90
200-CV15%	170	23	556	370	300	699	180	0,93
200-CV30%	140	46	556	370	300	699	180	0,97
200-CV45%	110	69	556	370	300	699	180	1,01
250-CV0%	250	0	528	352	301	701	180	0,72
250-CV15%	213	29	528	352	301	701	180	0,75
250-CV30%	175	58	528	352	301	701	180	0,77
300-CV0%	300	0	500	333	301	703	180	0,60
300-CV15%	255	35	500	333	301	703	180	0,62
300-CV30%	210	69	500	333	301	703	180	0,64

O teor de aditivo polifuncional variou entre os concretos, para se obter misturas com a trabalhabilidade desejada. No entanto, fixou-se uma faixa de dosagem (0,6-0,9%) para que não houvesse uma variação muito grande no tempo início de pega e elevação de temperatura. A dosagem recomendada pelo fabricante é de 0,6 a 1,0%.

A medição da consistência foi feita pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, de acordo com a ABNT NBR NM 67:1998. O resultado desejado foi de 12 cm, mas foram aceitos valores menores para que o limite de 0,9% de aditivo não fosse ultrapassado, desde que o concreto fosse considerado moldável sem prejudicar os ensaios de resistência à

compressão e elevação adiabática da temperatura. Esse valor mínimo de abatimento foi 6 cm.

### 3.2.3 Procedimento de mistura

A confecção dos concretos foi feita no LMCC/UFSC, com utilização de uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros. Cada mistura foi calculada para um volume de 21 litros de concreto, o necessário para a moldagem dos corpos de prova e demais ensaios realizados. Uma vez que apenas uma mistura de concreto pôde ser confeccionada por dia, devido ao tempo necessário para o ensaio de elevação adiabática da temperatura, o procedimento de imprimação da betoneira não foi realizado.

Para realizar a pesagem dos materiais, foi feita a correção de umidade dos agregados miúdos pelo método de secagem ao fogo. Os demais materiais estavam secos e devidamente armazenados para assim permanecerem.

A ordem utilizada para a inserção dos materiais na betoneira foi a seguinte:

- 70% da água de amassamento;
- Agregados graúdos;
- Cimento Portland e cinza volante;
- Agregados miúdos;
- O restante da água de amassamento;
- Aditivo plastificante.

No estado fresco, também foi feita a determinação da massa específica, para posterior determinação do teor de ar pelo método gravimétrico, segundo a ABNT NBR 9833:2008.

### 3.2.4 Elevação adiabática da temperatura

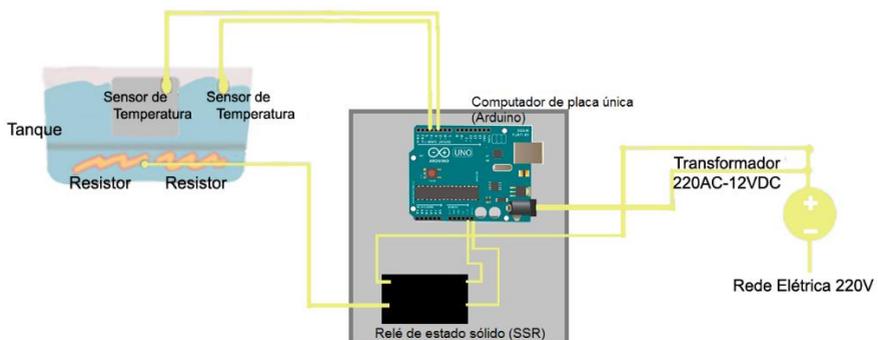
Esta etapa, além da realização do ensaio, também compreende a criação do equipamento para realizar o ensaio de determinação da elevação adiabática da temperatura, normatizado pela ABNT NBR 12819:2012.

#### 3.2.4.1 *Desenvolvimento do calorímetro*

O calorímetro criado foi inspirado no prescrito pela ABNT NBR 12819:2012, no entanto, como este requer um volume mínimo de 180 L, optou-se por reduzir a escala e adaptar o conceito para um modelo mais compacto.

O equipamento desenvolvido consiste de uma caixa metálica revestida internamente por EPS onde é colocado o concreto, e dentro deste é inserido um sensor de temperatura. Esta caixa fica submersa em um banho térmico dotado de resistências elétricas e um segundo sensor cujo objetivo é manter a temperatura similar à do concreto. Quando a temperatura do concreto começa a subir devido à liberação do calor gerado na hidratação do cimento, o sistema gerenciado por um controlador lógico programável envia um comando para acionar as resistências elétricas do banho térmico até que a temperatura se iguale com a do concreto. Desta forma, a perda de calor do concreto para a água que o cerca é desprezível. O esquema de funcionamento deste calorímetro está esquematizado na Figura 16.

Figura 16 - Esquema de funcionamento do calorímetro.



A criação, calibração e correção de erros foi a parte que mais demandou tempo no programa experimental. O processamento de informações foi feito por um Arduino Uno, um computador de placa única muito utilizado para sistemas de controle. Os resistores para o aquecimento da água são ligados por um relé de estado sólido que é ativado ao receber uma tensão de 5 V do Arduino, o que ocorre quando a diferença de temperatura entre o concreto e a água atinge o valor máximo especificado no algoritmo carregado à placa.

Inicialmente, tentou-se utilizar sensores do tipo LM35. Esses são sensores analógicos alimentados por uma tensão de 5 V e têm uma tensão de retorno linearmente dependente da temperatura, à razão de 10 mV/°C. O problema enfrentado pela utilização desse tipo de sensor foi a existência de interferência causada ao ligar o resistor, o que ocasionava

um aumento de tensão que era captado pelo retorno do sensor e acusava uma leitura de temperatura muito acima da real. A decisão de troca do sensor resolveu este problema. O novo tipo escolhido foi um sensor digital modelo DS18B20, este opera enviando um sinal binário, ou seja, operando apenas em tensões de 0 ou 5 V, fato que impede que uma pequena interferência prejudique a leitura.

O sistema de monitoramento e controle da temperatura não foi aperfeiçoado o bastante para ser capaz de registrar as temperaturas. Por ter-se um aquisitor de dados Datalogger Agilent 34970A à disposição, desenvolver uma forma de registro das temperaturas pelo Arduino não foi uma prioridade. Este aquisitor de dados foi ligado a termopares do tipo “K” para fazer a leitura e registro da curva de elevação adiabática de temperatura das misturas de concreto.

O tanque externo é paralelepípedo e tem dimensões de 50, 70 e 35 cm, com as paredes externas revestidas de placas de poliestireno expandido. Esse recipiente comporta um volume de 115 litros de água. O molde para o corpo de prova de concreto tem dimensões internas de um cubo de 16 cm de lado, totalizando um volume de 4,1 dm<sup>3</sup>. Na Figura 17 é mostrado o calorímetro com o corpo de prova de concreto dentro, pronto para o ensaio.

#### 3.2.4.2 *Ensaio de elevação adiabática da temperatura*

O ensaio consiste em moldar um corpo de prova cúbico de 16 cm de lado, adensado de forma idêntica ao ensaio de determinação da massa específica do concreto fresco. Em seguida, os sensores de temperatura (tanto do controlador quanto do aquisitor de dados) são posicionados no centro do corpo de prova, que é tampado por uma camada de isopor na face superior. O corpo de prova é então mergulhado no tanque e são feitas as conexões dos sensores com o controlador. Após verificar que os sensores estão fazendo a leitura correta da temperatura, o controlador é ligado para manter a temperatura da água similar à do corpo de prova.

Para a determinação do tempo para o fim do ensaio foram utilizados como referência os monitoramentos de temperatura de blocos de fundação realizados pelo GTec – UFSC (PRUDÊNCIO JR *et al.*, 2013-2016), nos quais o pico de temperatura ocorre em até 48 horas do início da liberação de calor. Dessa forma, foi estabelecido que em 72 horas de ensaio este pode ser considerado encerrado, para que houvesse uma tolerância de 24 horas em função do tempo de início de pega.

Figura 17 - Calorímetro com corpos de prova de concreto.



### 3.2.5 Determinação do teor de ar

A determinação do teor de ar na mistura foi feita segundo o procedimento descrito na normatização da ABNT NBR 9833:2008, utilizando-se do método gravimétrico.

O cálculo é feito de acordo com a Equação 5.

Equação 5 - Cálculo do teor de ar do concreto

$$\%ar = \left(1 - \frac{\gamma_{teórico}}{\gamma_{medido}}\right) \times 100$$

Onde  $\gamma_{teórico}$  = massa específica teórica da mistura;

$\gamma_{medido}$  = massa específica medida da mistura;

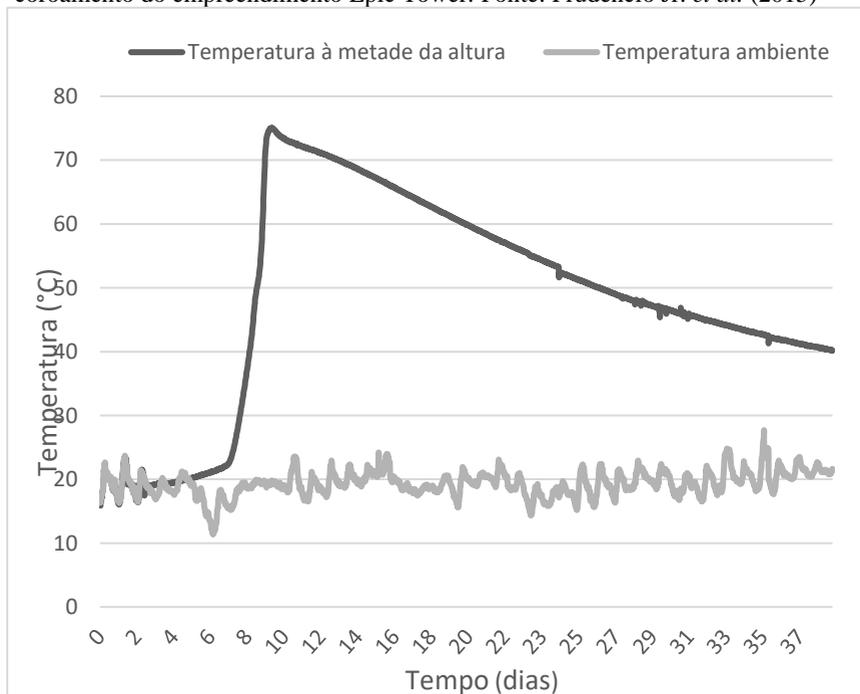
$\%ar$  = percentual de ar contido na mistura.

### 3.2.6 Resistência à compressão do concreto

Como visto anteriormente, a resistência à compressão do concreto pode variar de acordo com temperatura de cura, teor de adições minerais e relação água/cimento. Essas características foram diversificadas dentro os traços de concreto propostos neste estudo. A resistência à compressão foi avaliada de acordo com a ABNT NBR 5739:2007, por meio de corpos de prova cilíndricos moldados conforme a ABNT NBR 5738:2003.

Para cada traço de concreto, foram moldados 4 corpos de prova, dos quais dois foram submetidos à cura convencional, à temperatura ambiente em câmara úmida. O par restante foi submetido à mesma curva de elevação adiabática da temperatura do concreto e, posteriormente, resfriado de acordo com a evolução de temperatura observada em blocos de fundação monitorados pela equipe do GTec-UFSC em campo, como exemplificado na Figura 18. Esses regimes de cura foram nomeados de referência (Ref) para a temperatura ambiente e cura térmica autógena (CTA) para a situação análoga à observada em blocos de fundação.

Figura 18 - Teste em campo de elevação de temperatura do bloco de coroamento do empreendimento Epic Tower. Fonte: Prudêncio Jr. *et al.* (2015)



Cada par de corpos de prova de determinado traço submetido a certa condição de cura foi rompido aos 28 dias.

Todos os corpos de prova tiveram seu nivelamento feito com retificação por polimento. Este procedimento foi feito em sua maior parte no laboratório da usina de concreto Engemix, situada no bairro Cacupé em Florianópolis. Para a retificação dos últimos três traços de concreto, foi possível utilizar a fresa comprada por professores do PPGEC-UFSC ligados à área de materiais de construção civil.

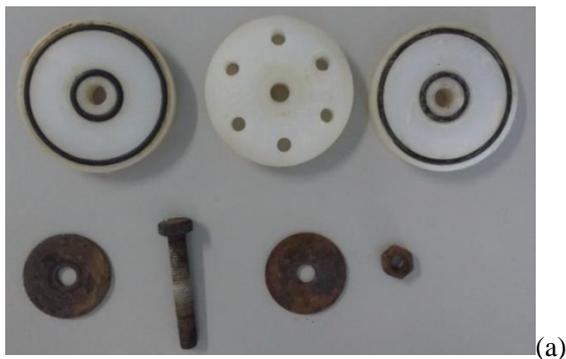
### 3.2.7 Ensaio de termogravimetria (TG)

Afim de investigar o efeito da adição de cinza volante o regime de cura na hidratação da pasta de cimento, utilizou-se a análise termogravimétrica como método para quantificar a portlandita e os hidratos formados.

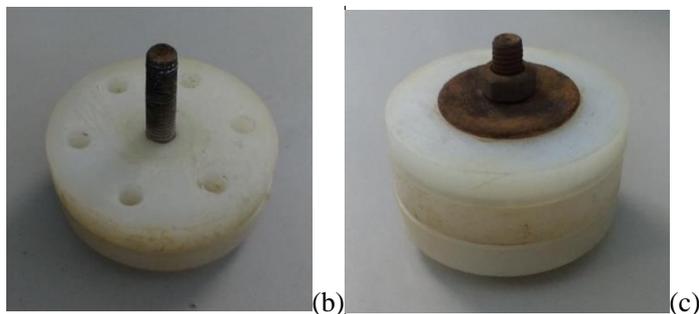
O ensaio de termogravimetria foi feito em amostras de argamassa. Essa decisão foi tomada por ser inviável a confecção de pastas de cimento com relações de água/aglomerante de até 1,01 e que mantivessem a homogeneidade sem a utilização de aditivos. A areia utilizada foi uma areia fina de duna, cujo módulo de finura é 0,86.

Os moldes dos corpos de prova foram projetados para serem mergulhados juntamente ao banho térmico sem perder a estanqueidade, conforme pode ser visualizado na Figura 19. Esses moldes comportam cerca de 4 gramas de argamassa.

Figura 19 - Molde de argamassa. (a) desmontado; (b) pronto para a moldagem; (c) pronto para ser imergido no banho térmico.



(a)



As argamassas foram moldadas com os teores de cinza e relação água/aglomerante similares aos dos concretos. Uma amostra foi colocada juntamente com o corpo de prova para o ensaio de elevação adiabática da temperatura, e posteriormente sofreu o mesmo resfriamento dos corpos de prova em condição de CTA. Outra amostra foi mantida à temperatura ambiente, e depois de três dias foi desmoldada e curada em câmara úmida.

Aos 28 dias, as amostras foram congeladas em nitrogênio líquido com a finalidade de parar a hidratação. Depois disso foram liofilizadas<sup>3</sup> no laboratório de Farmacognosia da UFSC (Figura 20). Após a moagem, realizada com moinho de bola (Figura 21), as amostras se encontravam prontas para a realização do ensaio de TG.

A TG determina a perda de massa das amostras à medida que a temperatura é elevada até 1000°C, à uma taxa de 20°C/minuto. O equipamento utilizado foi um analisador térmico simultâneo SDT Q600, da *TA Instruments*. Esse equipamento pertence ao Laboratório de Nano Tecnologia da Engenharia Civil, UFSC.

Para determinar o teor de hidróxido de cálcio presente na amostra de argamassa, basta correlacionar a perda de água referente à decomposição do hidróxido de cálcio, que ocorre entre 425°C e 550°C. Essa correlação pode ser calculada a partir da Equação 6.

No entanto, devido à utilização de cinza volante e areia fina para a confecção das argamassas, é necessária a aplicação de fatores de correção, uma vez que nem a areia nem a cinza produzem hidróxido de cálcio. Dessa forma pode-se verificar o consumo de hidróxido de cálcio pela

---

<sup>3</sup> Liofilização ou criodessecação é um processo pelo qual a amostra é congelada a vácuo e a água retirada por sublimação, ou seja, sem passar pelo estado líquido. Este processo resulta em uma amostra livre de umidade na estrutura porosa, garantindo que as reações de hidratação cessem à idade de 28 dias.

reação pozolânica de forma comparativa entre as amostras, para isso desconsidera-se o efeito de diluição que ocorre ao adicionar outros materiais à argamassa. A primeira correção, aplicada em função da adição de areia à argamassa, é apresentada na Equação 7.

Figura 20 - Liofilizador do laboratório de Farmacognosia.



Figura 21 - Moíno de bola.



Equação 6 - Determinação do teor de hidróxido de cálcio na argamassa

$$Ca(OH)_2 = \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}} = \frac{74}{18} \cdot H_2O = 4,11 \cdot H_2O$$

Em que:

$Ca(OH)_2$  – teor de hidróxido de cálcio na argamassa (%)

$H_2O$  – teor de água perdida na decomposição do hidróxido de cálcio (%)

$M_{Ca(OH)_2}$  – Massa molar do hidróxido de cálcio (74 g/mol)

$M_{H_2O}$  – Massa molar da água (18 g/mol)

Equação 7 - Fator de correção para areia no ensaio de termogravimetria.

$$FC_{areia} = \frac{M_{agl} + M_{areia}}{M_{agl}}$$

Em que:

$FC_{areia}$ : fator de correção devido à adição de areia;

$M_{agl}$ : massa de aglomerante;

$M_{areia}$ : massa de areia adicionada para evitar a exsudação.

O fator de correção aplicado à cinza volante segue o mesmo raciocínio do  $FC_{areia}$ , apresentado na Equação 8.

Equação 8 - Fator de correção devido à substituição de cimento por cinza volante.

$$FC_{cv} = \frac{M_{cim} + M_{cv}}{M_{cim}}$$

Em que:

$FC_{cv}$ : fator de correção devido à substituição de cimento por cinza volante;

$M_{cim}$ : massa de cimento;

$M_{cv}$ : massa de cinza volante.

O último fator de correções proposto tem como objetivo avaliar os resultados da curva termogravimétrica a partir das bases não voláteis do ensaio, evitando assim erros devido à diferença de umidade entre as amostras. Essa correção é apresentada na Equação 9.

Equação 9 - Fator de correção para as bases não-voláteis.

$$FC_{vol} = \frac{100}{Res (\%)}$$

Onde:

$FC_{vol}$ : fator de correção para as bases não-voláteis;

Res (%): porcentagem residual após o ensaio de termogravimetria, em comparação com a massa inicial.

Com a utilização desses fatores de correção, é possível comparar o consumo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica dentre as amostras ensaiadas. A Equação 10 descreve a aplicação dos fatores de correção para o cálculo final da quantidade de hidróxido de cálcio contida na argamassa.

Equação 10 - Determinação do teor de hidróxido de cálcio na argamassa com a aplicação dos fatores de correção.

$$Ca(OH)_2 = 4,11 \cdot H_2O \cdot FC_{areia} \cdot FC_{cv} \cdot FC_{vol}$$

Em que:

$Ca(OH)_2$  – teor de hidróxido de cálcio na argamassa (%)

$H_2O$  – teor de água perdida na decomposição do hidróxido de cálcio (%)

$FC_{areia}$ : fator de correção devido à adição de areia;

$FC_{cv}$ : fator de correção devido à substituição de cimento por cinza volante;

$FC_{vol}$ : fator de correção para as bases não-voláteis.

Para o cálculo da quantidade de água quimicamente combinada com o C–S–H, é considerada água livre a mudança de massa que ocorre até os 105°C, e água combinada com hidratos a variação encontrada deste ponto até começar a desidratação do hidróxido de cálcio. É utilizada a Equação 11 para esse cálculo.

Equação 11 - Determinação de água combinada com hidratos, com correções.

$$H_2O_{hidrato} = (H_2O_{23-425^{\circ}C} - H_2O_{livre})FC_{areia}.FC_{cv}.FC_{vol}$$

Em que:

$H_2O_{hidrato}$  – teor de água quimicamente combinada com hidratos (%)

$H_2O_{23-425^{\circ}C}$  – perda de massa entre as temperaturas de 23 e 425°C (%)

$H_2O_{livre}$ : perda de massa até 105°C;

$FC_{areia}$ : fator de correção devido à adição de areia;

$FC_{cv}$ : fator de correção devido à substituição de cimento por cinza volante;

$FC_{vol}$ : fator de correção para as bases não-voláteis.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho foram divididos entre resultados no estado fresco, elevação adiabática de temperatura, resistência à compressão e resultados de termogravimetria.

### 4.1 Resultados dos ensaios no estado fresco

Os ensaios realizados no estado fresco se resumem à medição de consistência pelo ensaio de abatimento do tronco de cone e à determinação da massa específica do concreto. Outros resultados apresentados neste item são o teor de aditivo utilizado em relação à massa de cimento e o teor de ar, calculado pela Equação 5.

Os valores desejados de abatimento de tronco de cone apenas não foram atingidos dentre as misturas com menor consumo de aglomerante e maior substituição de cinza volante por cimento Portland. Isso ocorreu em função do limite de teor de aditivo de 0,9%, estabelecido para que não houvesse demasiado retardo no início de pega. A única mistura em que esse limite não foi respeitado foi a 200-CV45%, pois esta não apresentou trabalhabilidade compatível com a moldagem dos corpos de prova com um teor de aditivo menor que 1,52%.

Os teores de ar se mantiveram, em sua maioria, entre 1,4% e 2,3%, com exceção dos traços 200-CV30% e 250CV30%, que apresentaram valores de 3,23% e 4,01%, respectivamente. Todos os resultados são apresentados na Tabela 11. A Figura 22 mostra o ensaio de abatimento de tronco de cone em uma das misturas.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios no ensaio fresco.

Mistura	Abatimento (cm)	Teor de Aditivo	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar
200-CV0%	12	0,80%	2,321	1,42%
200-CV15%	6	0,89%	2,292	2,33%
200-CV30%	8	0,92%	2,264	3,23%
200-CV45%	6	1,52%	2,279	2,29%
250-CV0%	13	0,31%	2,323	1,63%
250-CV15%	14	0,40%	2,299	2,28%
250-CV30%	11	0,73%	2,250	4,01%
300-CV0%	14	0,55%	2,327	1,75%
300-CV15%	13	0,82%	2,321	1,59%
300-CV30%	12	0,80%	2,304	1,83%

Figura 22- Teste de abatimento do tronco de cone da mistura 300-CV0

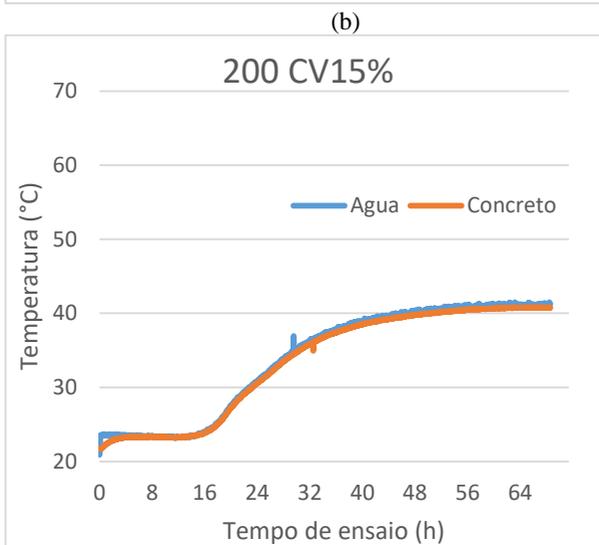
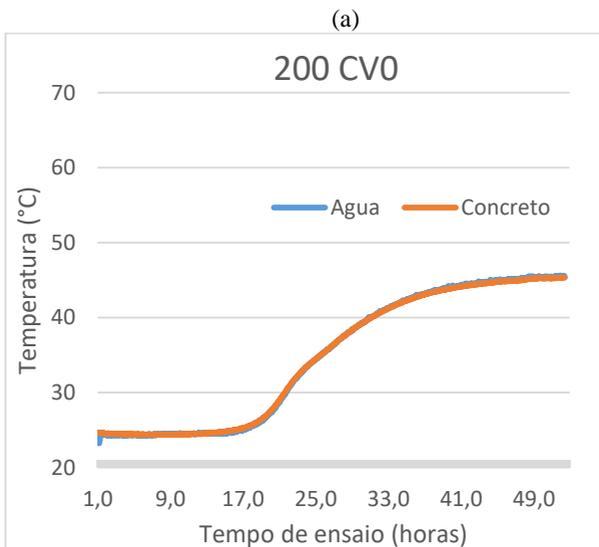


#### 4.2 Elevação adiabática da temperatura

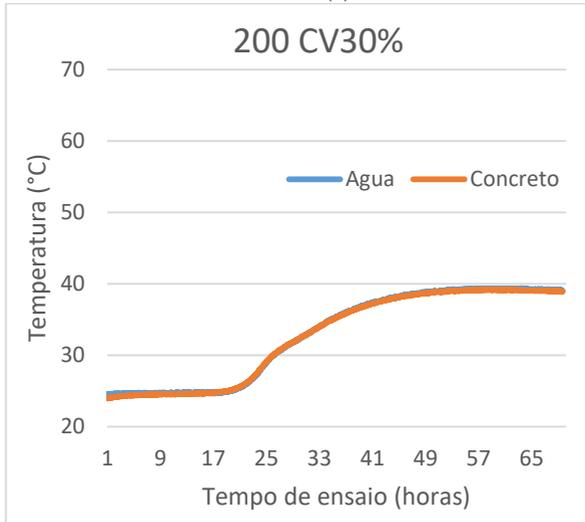
A obtenção das curvas de elevação adiabática da temperatura foi feita sempre visando partir de uma temperatura abaixo dos 30°C, uma vez que a taxa de liberação de calor depende da temperatura inicial. Estas curvas estão apresentadas na Figura 23. Todas foram analisadas até 72h caso não houvesse estabilização da temperatura, ou até a constância de temperatura caso esta ocorresse antes das 72h, de modo a poder-se disponibilizar o equipamento para o próximo ensaio. A única exceção a esta regra ocorreu na amostra 200 CV45%, na qual a temperatura só começou a subir depois de 33 horas e, portanto, foi deixada por 89 horas em ensaio.

Os gráficos são constituídos do monitoramento da temperatura do concreto e da água do banho térmico. A temperatura do concreto consiste da média entre a temperatura dos dois termopares que monitoravam o concreto. A leitura da água que envolve o concreto, reduzindo a perda de calor, serve de confirmação e validação do ensaio. Para que o ensaio seja considerado bem-sucedido, a diferença entre a temperatura da água e concreto não deve exceder 1°C por mais de uma hora consecutiva. Esse quesito, juntamente com a imprecisão e eventual má calibração de alguns sensores, ocasionou a necessidade de repetir-se diversos ensaios.

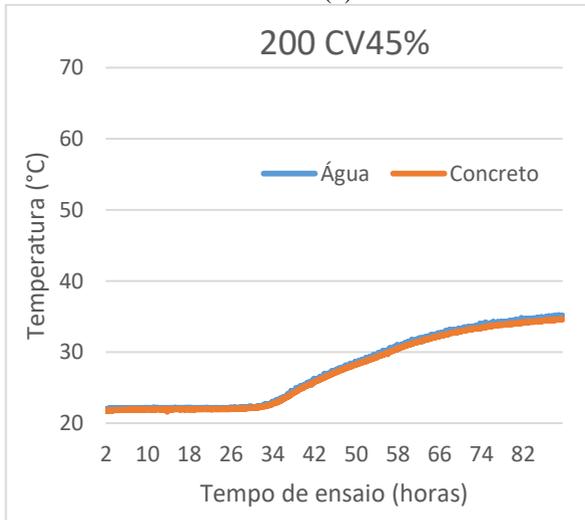
Figura 23 - Curvas de elevação adiabática da temperatura. Traços: (a) 200CV0; (b) 200CV15%; (c) 200CV30%; (d) 200CV45%; (e) 250CV0; (f) 250CV15%; (g) 250CV30%; (h) 300CV0; (i) 300V15%; (j) 300CV30%;

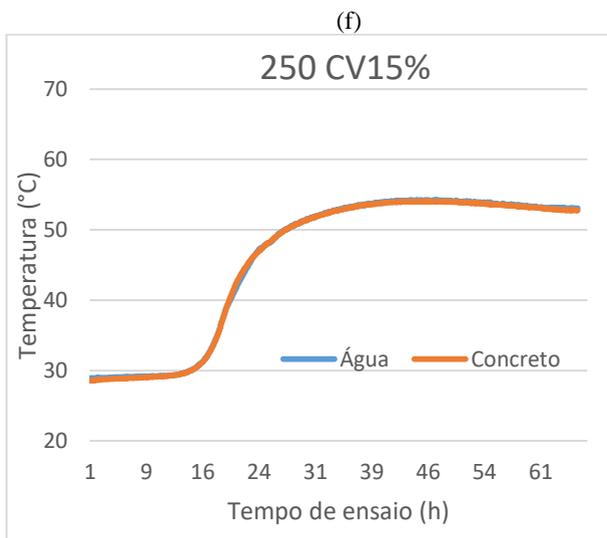
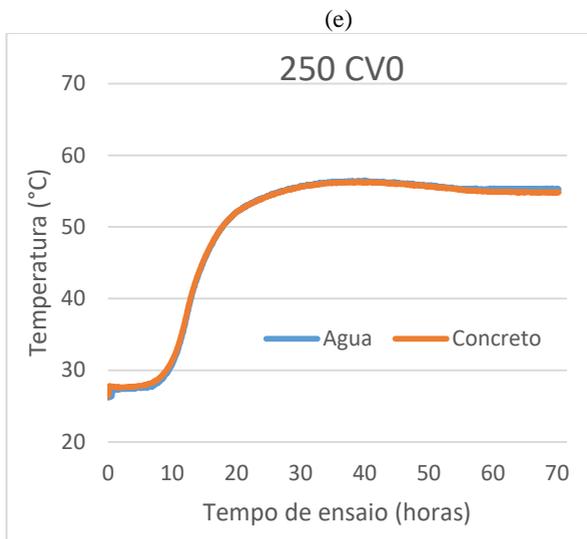


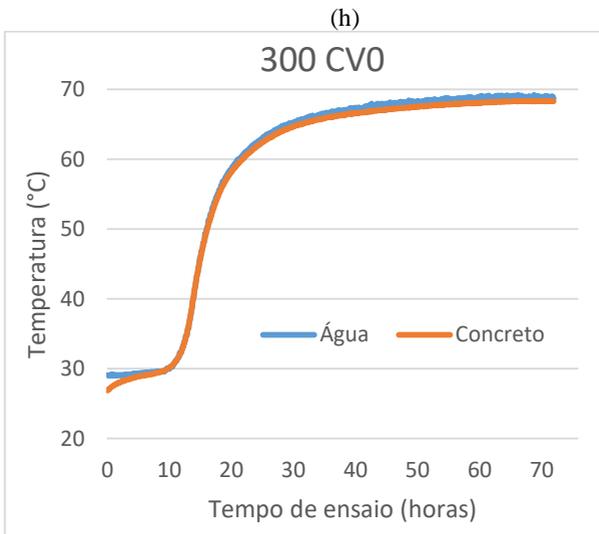
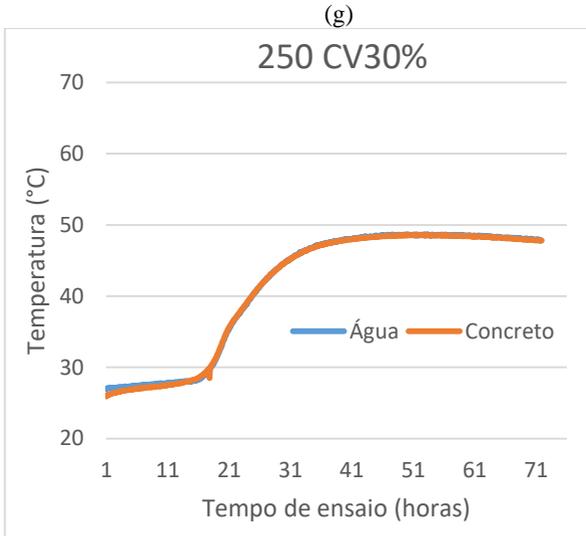
(c)

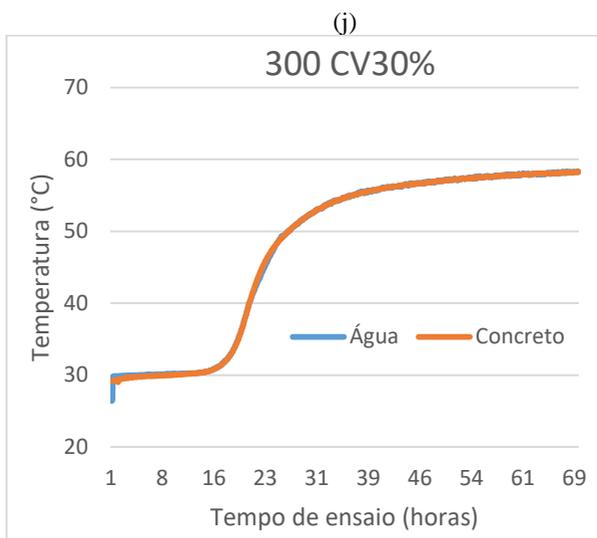
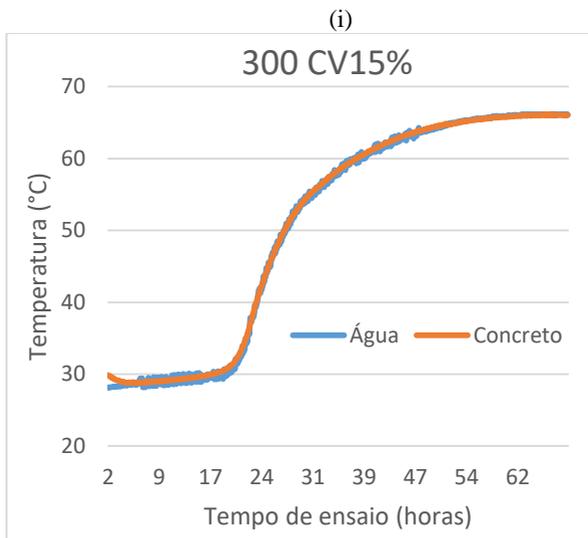


(d)









As curvas de elevação de temperatura 200 CV0, 250 CV0 e 300CV0 são de misturas em que não há adição de cinza volante, de forma que o aglomerante é composto apenas de cimento. A variação de temperatura destas curvas foi de 20,6°C para o concreto com 200 kg de cimento, 28,5°C com 250 kg e 38,7°C com 300 kg. Ao analisar o CEAT,

tem-se  $0,103^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ ,  $0,114^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$  e  $0,129^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$  para os concretos 200 CV0, 250 CV0 e 300 CV0, respectivamente. Esses dados revelam uma relação não-linear entre a elevação de temperatura e o consumo de cimento. A Tabela 12 contém a relação completa dos coeficientes obtidos neste trabalho.

O comportamento não-linear do CEAT comportamento pode ser justificado pelo estudo de Han *et al.* (2014), que já foi discutido na subseção 2.2.3. Dessa forma, pode-se explicar o aumento não-linear na elevação de temperatura por consumo de cimento do concreto pelo fato de que os traços com mais cimento atingem temperaturas maiores mais cedo. Isso aumenta a velocidade das reações e o calor total liberado até o fim do ensaio, e também minimiza os problemas de troca de calor.

Tabela 12 – Consumo de cimento, aglomerante, temperaturas e CEAT (em relação ao cimento e ao aglomerante total) dos traços de concreto estudados.

Mistura	Consumo de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Consumo de aglomerante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Temperatura			CEAT por cimento ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ )	CEAT por aglomerante ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ )
			Inicial	Final	Variação		
200 CV45%	110	179	21,9	34,5	12,6	0,115	0,070
200 CV30%	140	186	24,3	39,0	14,7	0,105	0,079
200 CV15%	170	193	23,2	40,8	17,6	0,104	0,091
200 CV0	200	200	24,6	45,2	20,6	0,103	0,103
250 CV30%	175	233	28,0	48,6	20,6	0,118	0,089
250 CV15%	212	241	29,3	54,0	24,7	0,116	0,102
250 CV0	250	250	27,8	56,3	28,5	0,114	0,114
300 CV30%	210	279	30,4	58,2	27,8	0,132	0,100
300 CV15%	255	290	29,5	66,1	36,6	0,144	0,126
300 CV0	300	300	29,5	68,2	38,7	0,129	0,129

Comparando estes resultados com os de outros trabalhos, pode-se encontrar valores parecidos obtidos por Junckes (2015), que obteve um CEAT próximo dos aqui observados. Nos traços em que o aglomerante era composto apenas de cimento, houve um consumo de 263, 355 e  $499 \text{ kg}/\text{m}^3$ , e os CEAT encontrados foram de 0,128, 0,118 e

0,117°C.m<sup>3</sup>/kg, respectivamente. Nesse trabalho, no entanto, o aumento no consumo de cimento não ocasionou um aumento no CEAT.

O CEAT também é próximo do afirmado por Neville (2015). O autor diz que para consumos de cimento entre 300 kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup> o coeficiente seria da ordem de 0,12°C.m<sup>3</sup>/kg.

Ng *et al.* (2017) também encontrou valores similares em 6 misturas distintas, contendo de 368 a 505 kg de cimento por m<sup>3</sup> de concreto e relações água/cimento de 0,35 a 0,60. Os coeficientes encontrados pelos autores variaram de 0,116 a 0,128°C.m<sup>3</sup>/kg.

Resultados semelhantes foram obtidos por Andrade (1997), que publicou um grande banco de dados das pesquisas de Furnas. Foram feitos ensaios de elevação adiabática da temperatura para misturas com cimento Portland comum, sem adições e com consumos de cimento entre 169 e 400 kg/m<sup>3</sup>, sendo o valor de 315 kg/m<sup>3</sup> o mais presente, utilizado para testar diversos tipos de cimento. Os CEAT aos 3 dias mais observados são entre 0,110 e 0,127°C.m<sup>3</sup>/kg. Alguns valores mais baixos podem ser explicados pela utilização de cimentos belíticos.

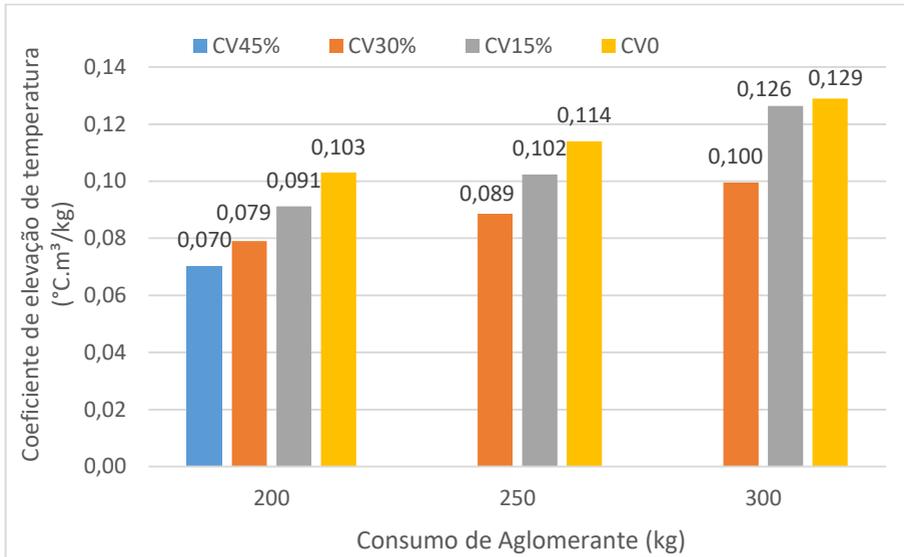
No presente estudo, as misturas de concreto em que houve substituição de cimento por cinza volante apresentaram uma tendência de redução na elevação adiabática de temperatura por consumo de aglomerante à medida que o teor de cinza aumenta. A exceção foi a mistura 300 CV15%, na qual houve apenas uma redução de 2% no CEAT por aglomerante. Este resultado é explicado pela maior taxa de liberação de calor pela reação pozolânica ativada com o calor de hidratação liberado pela hidratação do cimento Portland, em adição ao efeito filler desta adição mineral.

A Figura 24 mostra graficamente o comparativo entre coeficientes dos traços de concreto ensaiados.

Os resultados obtidos pela equipe que estudou a Barragem Três Gargantas, publicados por Liu *et al.* (2010), seguem uma tendência parecida e com resultados similares aos encontrados no presente estudo. Embora tenham sido publicados apenas quatro traços de concreto, a substituição de cimento por cinza variou de 15 a 30% e o consumo de aglomerante por m<sup>3</sup> de concreto de 202 a 272 kg. O traço com 202 kg de aglomerante e 15% de cinza atingiu um CEAT de apenas 0,052°C.m<sup>3</sup>/kg aos 3 dias, mas chegou a 0,094°C.m<sup>3</sup>/kg aos 28 dias, tal variação pode ser atribuída à utilização de um cimento belítico, que possui uma liberação de calor mais lenta. Outra mistura, contendo 260 kg de aglomerante e 30% de cinza volante chegou a um coeficiente de 0,103°C.m<sup>3</sup>/kg. Por fim,

o traço contendo 272 kg de aglomerante e 20% de cinza teve um coeficiente de  $0,123^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ .

Figura 24- Comparativo entre coeficientes de elevação adiabática de temperatura.



Como visto nos relatórios do grupo GTec (PRUDÊNCIO JR *et al.*, 2013-2016), valores do CEAT entre  $0,111$  e  $0,127^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$  podem ser esperados, mesmo com a utilização de cimento pozolânico, para consumos de cimento entre  $316$  e  $460\text{ kg/m}^3$ .

Atis (2002) também notou uma redução no pico de temperatura ao substituir 200 dos 400 kg de cimento por cinza volante. O pico de temperatura diminuiu  $55^{\circ}\text{C}$  para  $42^{\circ}\text{C}$ , o que significa uma elevação de temperatura de  $37^{\circ}\text{C}$  para  $24^{\circ}\text{C}$ . Nili e Salehi (2010) concluíram que a utilização de cinza volante em substituição ao cimento, em taxas acima de 15%, provoca uma redução significativa na elevação de temperatura. Ambos trabalhos utilizaram-se de calorímetros semi-adiabáticos, de forma que, mesmo com consumos de cimentos de até  $540\text{ kg/m}^3$ , a temperatura máxima atingida foi de  $60^{\circ}\text{C}$  tendo como ponto de partida cerca de  $28^{\circ}\text{C}$ . Essa variação de temperatura resulta em um coeficiente de apenas  $0,059^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ , valor muito abaixo dos encontrados na literatura. Dessa forma, a redução na elevação de temperatura pode ser apenas

consequência de uma liberação mais lenta de calor pelo cimento composto com cinza volante, e não uma real redução da elevação adiabática de temperatura.

A parte do banco de dados de Furnas (ANDRADE, 1997) de concretos com cinza volante apresenta resultados inconsistentes. Essa variação se dá principalmente em função do uso de diversos tipos de cimento e cinza volante, uma vez que o objetivo principal do laboratório é cumprir um papel tecnológico, e não científico. Tendo em vista isto, a maior parte dos CEAT aos 3 dias se encontram entre 0,100 e 0,130°C.m<sup>3</sup>/kg e apresentam consumos de aglomerante similares ao deste trabalho.

Cordeiro *et al.* (2009), realizaram a substituição de 15% de cimento Portland por cinza da casca do arroz ultrafina (tamanho médio de partículas de 6,8 µm e superfície específica de 33.672 m<sup>2</sup>/kg), o que não resultou em alteração na elevação adiabática de temperatura em comparação ao concreto de referência. Ambas misturas possuíam 366 kg/m<sup>3</sup> de aglomerante. Esse comportamento foi atribuído à finura da cinza e ao seu grande grau de reatividade (índice de atividade pozolânica de 109% e pelo método de Chapelle houve um consumo de 736 mg de CaO/grama de cinza).

O programa experimental deste trabalho, como mencionado anteriormente, foi elaborado para verificar as lacunas deixadas pelo trabalho de Junckes (2015), no entanto não foi possível conseguir cimento do mesmo fabricante, embora tenha-se mantido o tipo, CP-V sem adição de cinza volante. Mesmo levando em conta este aspecto, os resultados dos concretos 300 CV15% e 300 CV0 mostraram a tendência que se esperava. As duas misturas apresentam um coeficiente muito próximo: 0,126 e 0,129, respectivamente. Esses resultados se apresentam dentro da faixa encontrada Junckes, que obteve coeficientes entre 0,112 e 0,125 para as misturas com substituição de cimento por cinza volante.

Por outro lado, baixando o consumo de aglomerante e mantendo a mesma substituição de 15% de cimento Portland por cinza, observou-se uma redução maior no CEAT: 0,114 e 0,102 entre os traços 250 CV0 e 250 CV15% e 0,103 e 0,091 entre os traços 200 CV0 e 200 CV15%.

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da taxa de reação pozolânica aumentar significativamente com o aumento da temperatura, como visto na seção 2.6 (MASSAZA, 1998; HANEHARA *et al.*, 2001; XU *et al.*, 2010; NARMLUK; NAWA, 2011; DESCHNER *et al.*, 2013; HAN *et al.*, 2014), de forma que o calor liberado ao longo de semanas é antecipado para poucos dias.

Portanto, as misturas contendo cimento o suficiente para elevar a temperatura do concreto até o ponto em que a cinza volante torna-se mais reativa apresentam uma taxa de liberação de calor muito maior até os 3 dias. Dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que esta temperatura é de cerca de 60°C. Narmluk e Nawa (2011) observaram uma antecipação no grau de reação da cinza volante (para uma pasta com substituição de 25% em volume de cimento Portland), de forma que, com cerca de 3 dias, observou-se que 25% da cinza volante já havia reagido quando curada a 50°C. No entanto, para a cura a 35°C, esse grau só seria atingido com cerca de 12 dias, e com cerca de 90 dias se curada a 20°C.

Deschner *et al.* (2013) mostram que o início da hidratação da cinza volante, medido através do consumo de hidróxido de cálcio e na mudança química da solução porosa, é adiantado à medida que temperaturas mais altas foram testadas. Essa reação começou aos 7 dias a 23°C, enquanto a 40°C ocorreu após um dia do início da hidratação do cimento.

De acordo com Langan *et al.* (2002), o aumento na quantidade de cinza volante cria pontos de nucleação heterogênea, aumentando a disponibilidade do cimento para a hidratação, e cujo mecanismo é explicado por Lawrence *et al.* (2003). Esse fator pode ter colaborado na liberação de calor dos concretos feitos com adição de cinza volante.

Outro fator que pode ter influenciado em uma maior liberação de calor é uma diminuição da floculação da pasta quando há substituição de cimento por cinza volante. A floculação é um processo pelo qual as partículas formam aglomerados por uma combinação de forças eletrostáticas e de Van der Waals. O tamanho do floco depende da intensidade dessas forças, pois este se quebra quando a tensão aplicada na sua superfície é maior do que a resistência de ligação entre suas partículas. Schankoski (2017) observou que um menor grau de floculação é correlacionado a uma maior liberação de calor. Esse fenômeno é explicado por Kirby e Biernacki (2012). Os autores afirmam que, à medida que o espaço entre as partículas é aumentado, a velocidade da reação tende a permanecer elevada por um longo período de tempo, aumentando a liberação total de calor.

A redução na floculação das misturas com adição de cinza volante pode ser explicada pela diminuição da concentração de cimento, que apresenta cargas elétricas superficiais decorrentes da fragmentação do clínquer, enquanto a cinza volante, que não é moída, apresenta suas partículas não carregadas.

### 4.3 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 28 dias para cada mistura de concreto, sendo realizados em dois tipos distintos de cura. O primeiro método de cura se deu à temperatura ambiente em câmara úmida, aqui chamada de referência. O segundo, regime de cura térmica autógena (CTA), simulou a elevação adiabática de temperatura e o posterior resfriamento até os 28 dias.

A resistência à compressão de cada par de corpos de prova foi avaliada pela resistência potencial, e pode ser observada na Tabela 13, juntamente com o ganho ou perda de resistência obtido ao utilizar-se do CTA, a temperatura máxima atingida aplicando-se o CTA e a relação água/cimento equivalente.

Os dados mostram que na maioria dos traços a CTA causou uma redução na resistência dos corpos de prova em relação à referência. A redução na resistência foi maior nas misturas com mais aglomerante e as que continham apenas cimento Portland.

Outro comportamento observado foi a diminuição na perda de resistência entre a CTA e Ref. à medida que a substituição de cimento por cinza volante aumentou. Para os traços 200CV45% e 250CV30%, foi observado um aumento na resistência dos corpos de prova submetidos à CTA. A exceção para essa tendência foi a mistura 200CV30%, que apresentou a terceira maior perda de resistência, mesmo estando em dois grupos em que a perda deveria ser minimizada, e até se esperava que ocorresse um ganho de resistência: baixo consumo de aglomerante e alto teor de cinza.

Tabela 13 - Resistência potencial à compressão dos concretos aos 28 d.

Mistura	Resist. Pot. CTA (MPa)	Resist. Pot. Ref. (MPa)	Ganho no CTA	Temp. máxima (°C)	a/c.eq
200CV0	19,29	21,01	-8,2%	45,2	0,90
200CV15%	17,13	17,77	-3,6%	40,8	0,90
200CV30%	13,55	15,85	-14,5%	39,0	0,90
200CV45%	14,65	8,83	65,9%	34,5	0,90
250CV0	24,34	29,61	-17,8%	56,3	0,72
250CV15%	27,14	26,90	0,9%	54,0	0,72
250CV30%	25,54	23,96	6,6%	48,6	0,72
300CV0	36,79	46,50	-20,9%	68,2	0,60
300CV15%	36,07	39,12	-7,8%	66,1	0,60
300CV30%	33,57	33,38	0,6%	58,2	0,60

Para realizar a análise estatística dos dados, esses foram divididos de duas formas diferentes. Primeiramente foram divididos entre três classes de consumo de aglomerante: 200, 250 e 300 kg/m<sup>3</sup>; para avaliar se há influência da substituição de cimento por cinza volante e a influência do regime de cura. Em seguida, foi feito o agrupamento por teor de substituição de cimento por cinza volante, para os valores de 0, 15% e 30%. Dessa forma foi possível também verificar se há influência do regime de cura dependente da quantidade em que essa adição está presente, também foi analisada a influência do consumo de aglomerante, mas desta já se tem um resultado esperado segundo a Lei de Abrams.

A análise de variância (ANOVA) para os diversos consumos de aglomerante é apresentada na Tabela 14.

Segundo essa análise estatística, a resistência à compressão aos 28 dias é influenciada significativamente pelos parâmetros regime de cura e adição de cinza volante, assim como a inter-relação entre ambos em quase todos os casos. A adição de cinza volante teve um impacto negativo na resistência, especialmente se tratando dos corpos de prova curados à temperatura ambiente em câmara úmida. A única exceção ocorreu com o consumo de aglomerante de 200 kg/m<sup>3</sup>, no qual o regime de cura não influenciou significativamente a resistência porque os resultados não

foram consistentes: para três traços, houve redução da resistência e para o traço 200CV45%, houve um aumento expressivo.

Tabela 14 - Influência da substituição de cimento por cinza volante (CV) e regime de cura na resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias segundo análise de variância ANOVA.

(a) 200 kg/m<sup>3</sup> de aglomerante

Fonte	SQ	GDL	MQ	F.calc	F.tab	Influência
CV	119,79	3	39,93	30,37	4,07	SIM
Cura	0,16	1	0,16	0,12	5,32	NÃO
CV x Cura	53,20	3	17,73	13,49	4,07	SIM
Resíduo	10,52	8	1,31			
Total	183,67	15				

(b) 250 kg/m<sup>3</sup> de aglomerante

Fonte	SQ	GDL	MQ	F.calc	F.tab	Influência
CV	14,37	2	7,19	34,09	4,74	SIM
Cura	6,86	1	6,86	32,52	5,59	SIM
CV x Cura	30,15	2	15,08	71,52	4,74	SIM
Resíduo	1,48	7	0,21			
Total	52,85	12				

(c) 300 kg/m<sup>3</sup> de aglomerante

Fonte	SQ	GDL	MQ	F.calc	F.tab	Influência
CV	134,81	2	67,41	129,20	4,74	SIM
Cura	54,44	1	54,44	104,35	5,59	SIM
CV x Cura	46,89	2	23,44	44,93	4,74	SIM
Resíduo	3,65	7	0,52			
Total	239,79	12				

A análise de variância (ANOVA) para os diversos consumos de aglomerante é apresentada na Tabela 15. Nessa análise foi observada uma influência significativa do consumo de aglomerante sobre a resistência à compressão, fato já esperado de acordo com a Lei de Abrams. Apenas no teor de 30% de substituição de cimento por cinza volante não foi observada uma influência significativa do tipo de cura na resistência à compressão. Para os demais teores, a influência da CTA teve um impacto negativo na resistência em relação à referência. Foi observada uma influência significativa da inter-relação das variáveis em todos os grupos analisados.

Tabela 15 - Influência do consumo de aglomerante e regime de cura na resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias segundo análise de variância ANOVA.

(a) Sem substituição de cimento por cinza volante						
Fonte	SQ	GDL	MQ	F.calc	F.tab	Influência
Consumo	1015,93	2	507,96	326,50	4,74	SIM
Cura	119,76	1	119,76	76,98	5,59	SIM
C. x Cura	15,56	2	7,78	5,00	4,74	SIM
Resíduo	10,89	7	1,56			
Total	1162,14	12				

(b) 15% de substituição de cimento por cinza volante						
Fonte	SQ	GDL	MQ	F.calc	F.tab	Influência
Consumo	814,09	2	407,04	891,09	4,74	SIM
Cura	6,92	1	6,92	15,14	5,59	SIM
C. x Cura	8,51	2	4,26	9,31	4,74	SIM
Resíduo	3,20	7	0,46			
Total	832,71	12				

## (c) 30% de substituição de cimento por cinza volante

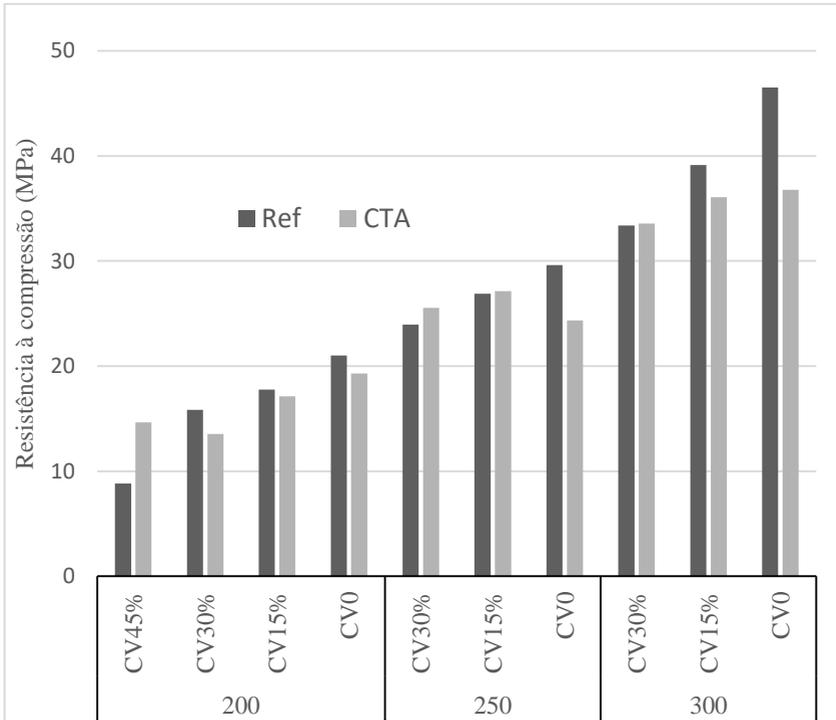
Fonte	SQ	GDL	MQ	F.calc	F.tab	Influência
Consumo	687,66	2	343,83	1551,67	4,74	SIM
Cura	0,06	1	0,06	0,28	5,59	NÃO
C. x Cura	6,90	2	3,45	15,57	4,74	SIM
Resíduo	1,55	7	0,22			
Total	696,17	12				

As tendências reveladas pelas análises estatísticas podem ser observadas na Figura 25. Concretos com baixo ou nenhum teor de cinza volante apresentaram queda de resistência quando submetidos à CTA. A adição de cinza volante teve um impacto negativo na resistência quando o concreto foi curado à temperatura ambiente, mas o impacto foi muito menor quando foi utilizada a cura térmica autógena, o que se deve pela antecipação da reação pozolânica promovida por maiores temperaturas.

O comportamento observado nos concretos com cimento Portland como único aglomerante são condizentes uma parte da literatura ao apresentarem uma resistência à compressão inferior quando submetidos à cura térmica autógena. Segundo Neville (2015), concretos submetidos a temperaturas de 32 a 49°C apresentam resistência à compressão aos 28 dias inferiores aos curados a temperaturas de 4 a 23°C. Esse prejuízo de resistência foi mais expressivo à medida que a cura térmica autógena expôs os corpos de prova a temperaturas mais elevadas.

De acordo com Patel *et al.* (1995), há pouca diferença entre a microestrutura do concreto curado a 20, 42 e 46°C. Os dois últimos apresentaram um leve engrossamento com ocasional concentração de cristais maiores de portlandita na interface pasta-agregado. O concreto curado a 85°C, no entanto, apresentou a mudança mais drástica, com a presença de microfissuras preenchidas por grandes cristais de hidróxido de cálcio, especialmente na interface pasta-agregado. Nesse corpo de prova, também foram encontradas cascas vazias, que os autores atribuem à hidratação completa do clínquer e posterior migração de íons ou à maior mobilidade de íons causada por canais deixados pela exsudação do concreto. Como os corpos de prova foram observados na idade de 60 dias, essa condição de cura também apresentou deposição de grandes cristais de etringita nas mesmas fissuras em que a portlandita era abundante.

Figura 25 - Resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias.



Um fato inesperado foi a divergência com os resultados de Salum (2016), que utilizou uma metodologia similar, com regimes de cura que procuravam simular a cura térmica autógena. A autora não verificou perda de resistência dos concretos sem cinza volante curados a temperaturas elevadas. Uma hipótese levantada é que a utilização de cimentos de fábricas e jazidas de calcário distintas possa ter causado esse comportamento discrepante.

Dessa forma, assume-se que a microestrutura da pasta de cimento tenha se comportado de maneira diferente. De acordo com Deschner (2013), em temperaturas menores, a porosidade da pasta é reduzida e a pasta é mais homogênea, o que gera uma maior resistência à compressão. Uma menor resistência a maiores temperaturas também foi observada por diversos autores, principalmente utilizando cimento Portland de alta resistência inicial, CP-V. (KIM *et al.*, 1998; ALDEA *et al.*, 2000;

MARTINS, 2001; FERREIRA JR., 2003; SANTOS, 2010; TURUHALLO; SOUTSOS, 2015)

As misturas testadas com substituição de cimento por cinza volante tiveram uma resposta melhor à cura térmica, essa conclusão é similar à obtida por Payá *et al.* (2000). Deschner (2013) encontrou um consumo maior de portlandita em temperaturas mais elevadas, indicando que a reação pozolânica teve início mais cedo.

O ganho expressivo de resistência dos corpos de prova da mistura 200-CV45% submetidos à CTA (65,9%, atingindo uma temperatura máxima de 34,5°C) também é observado por Payá *et al.* (2000). Para a substituição de 45% de cimento por cinza volante, esses pesquisadores chegaram a um ganho entre 51% e 90% de resistência para os corpos de prova 40°C em relação aos curados a 20°C.

Com o objetivo de escolher de forma mais eficiente uma mistura de concreto para utilização em blocos de fundação de concreto massa, que têm requisitos maiores de resistência à compressão, mas sem ignorar o problema térmico, propõe-se analisar a razão entre o valor de elevação adiabática da temperatura e a resistência à compressão na condição de cura térmica autógena, aqui referido como Coeficiente compressão-temperatura. Para os concretos analisados neste trabalho, os coeficientes calculados são apresentados na Tabela 16. Conclui-se então que as soluções térmicas mais eficientes envolvem concretos com teores de cinza volante de 30%.

É necessário, no entanto, observar que a resistência à compressão levada em consideração no cálculo da Tabela 16 é a de corpos de prova submetidos à condição de cura térmica autógena. Essa condição gerou resistências, em geral, menores do que a dos corpos de prova curados à temperatura ambiente. Esse fato não deve ser levado levemente, uma vez que a resistência de peças de concreto massa pode ser superestimada caso não haja um estudo térmico apropriado. A Tabela 17 traz os coeficientes temperatura-compressão dos concretos curados à temperatura ambiente.

Tabela 16 - Coeficientes temperatura-compressão para a condição de CTA, aos 28 dias.

Mistura	Coeficiente temperatura-compressão (°C/MPa)	Resistência à compressão na CTA (MPa)	Elevação adiabática da temperatura (°C)
200CV0	1,07	19	21
200CV15%	1,03	17	18
200CV30%	1,08	14	15
200CV45%	0,86	15	13
250CV0	1,17	24	29
250CV15%	0,91	27	25
250CV30%	0,81	26	21
300CV0	1,05	37	39
300CV15%	1,01	36	37
300CV30%	0,83	34	28

Tabela 17 - Coeficientes temperatura-compressão para a condição de cura referência, aos 28 dias.

Mistura	Coeficiente temperatura-compressão (°C/MPa)	Resistência à compressão c/ cura convencional (MPa)	Elevação adiabática da temperatura (°C)
200CV0	0,98	21	21
200CV15%	0,99	18	18
200CV30%	0,93	16	15
200CV45%	1,43	9	13
250CV0	0,96	30	29
250CV15%	0,92	27	25
250CV30%	0,86	24	21
300CV0	0,83	47	39
300CV15%	0,94	39	37
300CV30%	0,83	33	28

#### 4.4 Análise termogravimétrica em argamassas

Com a finalidade de verificar a influência do regime de cura adotado e a substituição de cimento Portland por cinza volante no grau de hidratação e reações pozolânicas, foram realizadas as análises termogravimétricas. O grau de hidratação foi medido a partir da água quimicamente combinada e o grau de reação pozolânica a partir do teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  encontrado nas argamassas confeccionadas.

Os resultados dos ensaios de termogravimetria realizados estão apresentados no Apêndice A e a tabela com os fatores de correção completos pode ser verificada no Apêndice B.

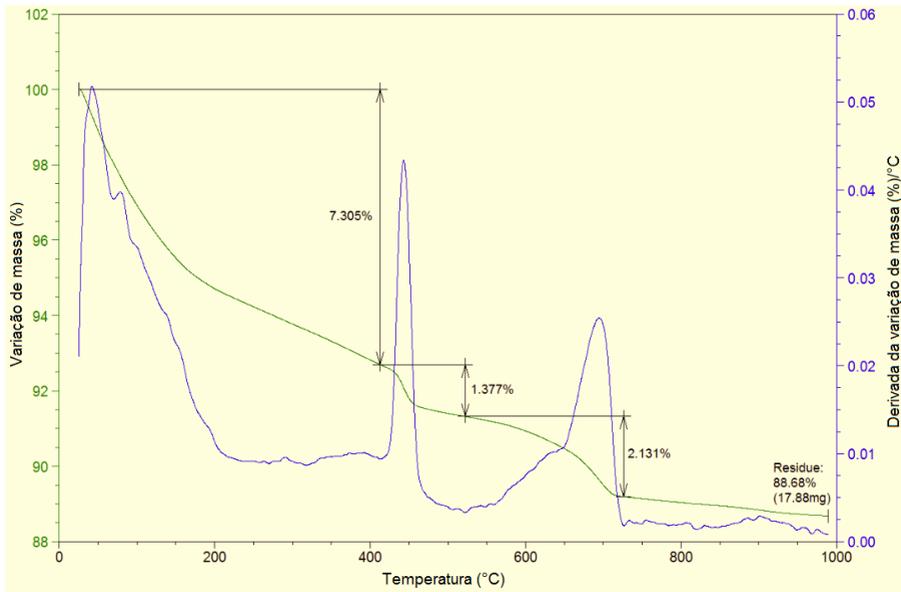
Um exemplo de curva de TG e dTG é apresentado na Figura 26, referente ao traço 250 CV30% submetido à cura térmica autógena (CTA). Nos ensaios, foram considerados quatro trechos principais de perda de massa:

- Da temperatura inicial aos 105°C: Evaporação da água livre;
- De 105°C a 425°C: decomposição de hidratos, água quimicamente combinada;
- 425°C a 550°C: decomposição do hidróxido de cálcio;
- 550°C a 750°C: decomposição do carbonato de cálcio.

Com base nos dados coletados de variação de massa, e de acordo com as Equação 7 a Equação 11, foi possível calcular tanto a quantidade de água quimicamente combinada, sob a forma de C-S-H e aluminatos, quanto o teor de hidróxido de cálcio presente na argamassa. Esses dados podem ser observados na Tabela 18.

A análise dos resultados revela a tendência de diminuição da quantidade de portlandita na argamassa à medida que o teor de cinza volante aumenta e quando é aplicada CTA. A única argamassa que apresentou um valor muito discrepante foi a 300-CV0 Ref. Esta amostra apresentou valores muito baixos, tanto de água combinada quanto de portlandita, além de ter o resíduo não-volátil de 93,40%, enquanto os demais valores variam entre 84,74% e 90,00%. Considerou-se que essa diferença foi causada por um erro de ensaio ou de preparo da amostra.

Figura 26 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV30 - CTA



A água quimicamente ligada nas misturas apresentou valores maiores nas misturas com adição de cinza volante e com cura térmica autógena, o que é melhor ilustrado pela Figura 27. Esse comportamento é uma evidência de que houve atividade pozolânica, com formação de C-S-H a partir do consumo de hidróxido de cálcio. Estes dados corroboram com a ideia de que a reação pozolânica é acelerada em maiores temperaturas.

Ao comparar estes resultados com os obtidos por Salum (2016), foi possível observar tendência similares às encontradas neste trabalho se tratando no teor de hidróxido de cálcio na argamassa. Já em relação ao grau de hidratação, foram encontrados resultados similares também no teor de água quimicamente combinada, que cresceu com o teor de adição de cinza volante.

À medida que o teor de cinza volante aumentava, as amostras de Junckes (2015) mostraram um aumento mais acentuado do que o do presente trabalho na água quimicamente combinada. Por outro lado, não foi observada a diminuição no teor de hidróxido de cálcio. Esse fenômeno foi creditado a um baixo teor de atividade pozolânica da cinza volante,

uma vez que os corpos de prova foram curados a 23°C e o ensaio realizado aos 28 dias. Dessa forma, o maior grau de hidratação foi creditado, principalmente, aos efeitos físicos da adição nas reações de hidratação do cimento Portland. Em contraste, no presente estudo é aceitável afirmar que a atividade pozolânica teve maior impacto, uma vez que foi possível tanto observar um aumento na água quimicamente combinada quanto uma redução no teor de portlandita à medida que os teores de cinza volante aumentaram.

Tabela 18 - Resultados da análise termogravimétrica

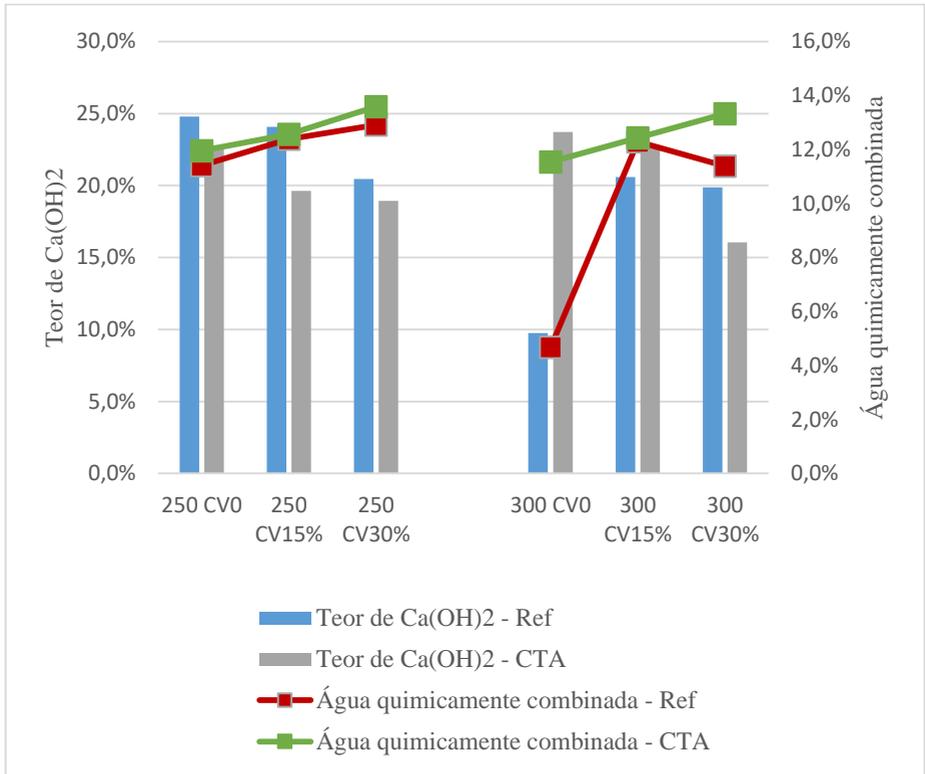
Argamassa	Cura	Água quimicamente combinada (%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)
250 CV0	Ref	11,4%	24,8%
	CTA	12,0%	22,8%
250 CV15%	Ref	12,4%	24,1%
	CTA	12,6%	19,6%
250 CV30%	Ref	12,9%	20,5%
	CTA	13,6%	18,9%
300 CV0	Ref*	4,7%*	9,7%*
	CTA	11,5%	23,7%
300 CV15%	Ref	12,3%	20,6%
	CTA	12,4%	22,6%
300 CV30%	Ref	11,4%	19,9%
	CTA	13,3%	16,0%

\*Resultado espúrio

Deschner *et al.* (2013), verificaram uma pequena redução na quantidade de portlandita presente nas pastas estudadas ao aumentar a temperatura de cura de 23°C para 50°C. Estas pastas continham teores muito mais elevados de cinza volante, 50% em massa, e mesmo assim a redução foi de cerca de 1%. Os autores não aplicaram o fator de correção pela substituição de cimento por cinza, uma vez que foi estudado apenas um teor de substituição, sem traço referência. O teor de água quimicamente ligada encontrado teve uma resposta similar quando

submetido a maiores temperaturas de cura, atingindo valores maiores aos 28 dias para a temperatura de 50°C.

Figura 27 - Teor de portlandita e água quimicamente combinada das argamassas.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse tópico, os principais resultados obtidos com a realização do programa experimental desta dissertação são percorridos. Ao final do capítulo, são sugeridas futuras pesquisas que possam trazer evoluções nos conhecimentos acerca da utilização de concreto massa.

### 5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram simuladas as condições de elevação adiabática da temperatura que podem ser encontradas em estruturas de concreto massa. Foram medidas tanto a elevação da temperatura quanto a resistência de corpos de prova curados a estas temperaturas e comparados a condições de cura úmida convencional.

Nos ensaios de elevação adiabática de temperatura, observou-se que os concretos com teor de cinza volante mais elevados e menor consumo de aglomerante apresentaram um CEAT inferior aos  $0,12^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$  observados em campo pela equipe GTec – UFSC (PRUDÊNCIO JR *et al.*, 2013-2016) e por Junckes (2015). Esse coeficiente também apresentou um decréscimo à medida que o teor de cinza utilizado cresceu.

Para o consumo de aglomerante de  $300\text{ kg/m}^3$  o CEAT aumentou para a faixa  $0,12^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$  para os traços com 0 e 15% de substituição de cimento por cinza volante. O traço com 30% de cinza volante apresentou comportamento similar ao dos concretos com menor consumo de aglomerante, reduzindo o CEAT em relação às taxas menores de substituição.

Dessa forma, teoriza-se que, quando uma mistura de concreto contém cimento o suficiente para atingir uma temperatura de cerca de  $60^{\circ}\text{C}$  sem a contribuição da cinza, a reação pozolânica é antecipada, o que acarreta em uma liberação de calor pela reação da cinza volante similar à da hidratação do cimento Portland.

Os resultados de resistência à compressão apontam que o regime de cura quente ao qual é submetido o concreto dentro de uma estrutura de concreto massa pode causar grandes ganhos de resistência em comparação à cura convencional no caso de baixos consumos de aglomerantes e grandes níveis de substituição de cimento por cinza volante. Ao mesmo tempo, para traços com apenas cimento observou-se uma queda na resistência à compressão em relação ao regime de cura úmida a frio normatizado. Nesse ponto, este trabalho divergiu das

conclusões obtidas por Junckes (2015) e Salum (2016), possivelmente pela utilização de um cimento com uma composição química diferente. Essa diferença de comportamento pode ser justificada pela relação das amostras de cimento quanto ao empacotamento da microestrutura em cura térmica autógena.

A diferença de resultados de resistência à compressão de corpos de prova curados termicamente dependente do tipo de cimento evidencia a importância do estudo minucioso de cada caso em que seja realizada uma obra de concreto massa. O estudo das propriedades térmicas do material, bem como as propriedades mecânicas quando submetido a diferentes temperaturas é indispensável, uma vez que pode-se estar tanto subestimando quanto superestimando a resistência à compressão do concreto quando os corpos de prova são curados à temperatura ambiente.

A avaliação pelo coeficiente temperatura-compressão revelou que, para este conjunto de materiais, substituições de 30% de cinza volante são ideais para atingir a resistência necessária e ao mesmo tempo proporcionar a menor temperatura possível. Este coeficiente é calculado pela razão entre o aumento adiabático de temperatura e a resistência à compressão aos 28 dias.

As análises termogravimétricas evidenciaram uma aceleração da reação pozolânica nos corpos de prova que receberam cura térmica autógena, bem como um aumento no grau de hidratação.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para ampliar o escopo dos estudos acerca de concreto massa, pode-se utilizar outros tipos de adições minerais, como escória de alto-forno, metacaulim e sílica ativa.

Realizar estudos independentes quanto à elevação adiabática da temperatura e resistência à compressão. Programas experimentais pensados para avaliar somente um destes aspectos podem ser mais precisos e revelar nuances que um estudo menos especializado deixa escapar.

Ensaio de elevação adiabática da temperatura partindo de temperaturas variadas, como de 20, 30, 40 e 50°C, de forma que se possa isolar melhor as variáveis e evidenciar se é de fato um aumento na temperatura que causa uma maior liberação de calor pela cinza volante, são também recomendados.

## 6 REFERÊNCIAS

ALDEA, C. M. *et al.* **Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement.** Cement and Concrete Research, v. 30, 2000.

ALTOÉ, S.P.S. *et al.* **Análise da Pozolanicidade de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes temperaturas de queima.** In: Anais do III Seminário de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Maringá, 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 207.1R – 05: Guide to Mass Concrete.** ACI Cometeo 207, Farmington Hills, 2005.

ANDRADE, W. **CONCRETOS: Massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaio e Propriedades.** 1ª ed. São Paulo: PINI 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12819: Concreto e argamassa – Determinação da elevação adiabática da temperatura – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895: Materiais pozolânicos. Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado. Método Chapelle modificado.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 14: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65: Cimento portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

Atis, C. D. **Heat evolution of high-volume fly ash concrete.** Cement and Concrete Research, V. 32, 2002.

BATAGGIN, A. S. Cimento Portland. In: ISAÍÁ, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 6, vol. 1.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. **Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C–S–H.** Journal of the American Ceramic Society, v. 97, 2014.

BRITISH STANDARD. **BS EN 196-2:1995 Methods of Testing Cement – Part 2: Chemical analysis of cement.** 1994

COUTO, D. *et al.* **Monitoramento de temperatura em sapata de fundação de grande porte: estudo de caso "Parque da Cidade" – SP.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 9. 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAÍÁ, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8, vol. 1.

Deschner, F. *et al.* **Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash.** Cement and Concrete Research. v.52, 2013.

DIAMOND, S. **Delayed Ettringite Formation - Processes and Problems.** Cement and Concrete Composites. v.18, 1996.

ERN, T.; HELENE, P. **Estudo das propriedades térmicas do concreto de média e alta resistência**. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Boletim Técnico BT/PCC/439, 32 F. 2007.

FERREIRA JR., E. L. **Avaliação de propriedades de concretos de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura**. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas.

GIACCIO, G. M.; MALHOTRA, V. M., **Concrete incorporating high volumes of ASTM Class F fly ash**. ASTM Cement, Concrete, and Aggregates, Vol.10, No.2, 1988.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: Uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção. Curitiba.

GRAEFF, E. **Avaliação térmica de blocos de fundação em concreto armado**. 2013. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis.

HAN, F. *et al.* **Characteristics of the Hydration heat evolution of composite binder at different hydrating temperature**. Thermochemica acta, v. 586, 2014.

HANEHARA, s. *et al.* **Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 31, 2001.

HASPARIK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

HELMUTH, R., **Fly ash in concrete**. Portland Cement Association. 1987. 203pp.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. **Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete**. Cement and Concrete Research. 2015.

JIN, H. **Late-Age Properties of Concrete with Different Binders Cured under 45°C at Early Ages**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2017, 2017.

JUNCKES, R. **Influência da adição de cinza volante na elevação de temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis.

KIM, J. K. *et al.* **Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature**. Cement and Concrete Research, V. 28, 1998.

KIRBY, D. M.; BIERNACKI, J. J. **The effect of water-to-cement ratio on the hydration kinetics of tricalcium silicate cements: Testing the two-step hydration hypothesis**. Cement and Concrete Research, V. 42, 2012.

LANGAN, B. W. *et al.* **Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement**. Cement and Concrete Research, v. 32, 2002.

LANGLEY, W.S.; CARRETE, G. G.; MALHOTRA, V. M., **Strength development and temperature rise in large concrete blocks containing high volumes of low-calcium (ASTM Class F) fly ash**. MSL Division Report MSL 90-24 (OP&J), Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, 1990.

LAWRENCE, P. *et al.* **Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration**. Cement and Concrete Research, v.33 ,2003.

LIU, J. *et al.* **Laboratory Test and Numerical Simulation of Time-Dependent Thermomechanical Behavior of the Three-Gorges Dam.** Journal of Materials in Civil Engineering, n.22, 2010.

LIU, J. *et al.* **Experimental and Numerical Studies of Controlling Thermal Cracks in Mass Concrete Foundation by Circulating Water.** Applied Sciences, n.6, 2016.

LOTHENBACH, B. *et al.* **Supplementary cementitious materials.** Cement and Concrete Research, v.41, 2011.

MADALENA, L.M.N. **Influência do teor em pozolana na reatividade e nas características mecânicas de argamassas.** 2013. 101 F. DISSERTAÇÃO (MESTRADO). Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

MALHOTRA, V. M., **Superplasticized fly ash concrete for structural applications.** ACI Concrete International, Vol. 8, No. 12, 1986.

MARTINS, A. R. **Efeito da cura termica e de cimentos com escoria granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobrimento.** 2001. 169 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas.

MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. In: HWELETT, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4<sup>a</sup> ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. Cap 10.

MASSAZZA, F. **Pozzolanic Cements.** Cement and Concrete Composites, v. 15, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais.** 2<sup>a</sup> Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENGXIAO, S. *et al.* **Comparison of the properties between high-volume fly ash concrete and high-volume steel slag concrete under temperature matching curing condition.** Construction and Building Materials. v. 98, 2015.

NARMLUK, M.; NAWA, T. **Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures.** Cement and Concrete Research, v. 41, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5ª ed. São Paulo: Bookman, 2015.

NG, P. L. *et al.* **Adiabatic temperature rise of concrete with limestone fines added as a filler.** Procedia Engineering, V. 172, 2017.

NILI, M.; SALEHI, A. M. **Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete.** Construction and Building Materials, v. 24, 2010.

PAYÁ, J. *et al.* **Mechanical treatment of fly ashes Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperatures.** Cement and Concrete Research, V. 30, 2000.

PATEL, H. H. *et al.* **The microstructure of concrete cured at elevated temperatures.** Cement and Concrete Research, V. 25, 1995.

PILAR, R. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza pesada moída em pasta de cimento Portland.** 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis.

PRUDÊNCIO JR., L. R. *et al.* **Estudo da evolução da temperatura em concreto massa: Sky Tower – FG Empreendimentos.** Florianópolis: GTec, 2014. 11 f. (Texto Técnico)

PRUDÊNCIO JR., L. R. *et al.* **Estudo da evolução da temperatura em concreto massa: Vision – FG Empreendimentos.** Florianópolis: GTec, 2014. 8 f. (Texto Técnico)

PRUDÊNCIO JR., L. R. *et al.* **Concretagem do bloco de fundação do edifício Infinity Coast.** Florianópolis: GTec, 2014. 13 f. (Texto Técnico)

PRUDÊNCIO JR., L. R. *et al.* **Bloco de fundação do edifício Olympo: Avaliação, ajuste de traço e recomendações para a.** Florianópolis: GTec, 2015. 18 f. (Texto Técnico)

PRUDÊNCIO JR., L. R. *et al.* **Bloco de fundação do edifício Epic: Avaliação, ajuste de traço e recomendações para a.** Florianópolis: GTec, 2015. 16 f. (Texto Técnico)

PRUDÊNCIO JR., L. R. *et al.* **Bloco de fundação do edifício Splendia: Concretagem, monitoramento da temperatura e resistência à compressão dos concretos.** Florianópolis: GTec, 2016. 22 f. (Texto Técnico)

PRUDÊNCIO JR., L. R. *et al.* **Bloco de fundação do edifício Phoenix: Concretagem, monitoramento da temperatura e resistência à compressão dos concretos.** Florianópolis: GTec, 2016. 14 f. (Texto Técnico)

POURKHORSHIDI, A.R. Tests to evaluate pozzolanic activity in eco-efficient concrete. In: Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S.; Labrincha, J.; John, V.M. **Eco-Efficient Concrete.** Elsevier, 2013. Cap. 6.

RAMLOCHAN, T. *et al.* **The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part I: Expansive behaviour.** Cement and Concrete Research, v. 33, 2003.

RAMLOCHAN, T. *et al.* **The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part II: Microstructural and microchemical investigations.** Cement and Concrete Research, v. 34, 2004.

SAKAI, E. *et al.* **Hydration of fly ash cement.** Cement and Concrete Research, v. 35, 2005.

SALUM, P. L. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante.** 2016. 166 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis.

SALUM, P. L. *et al.* **Estudos prévios para execução de bloco de coroamento de grande volume.** In: Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto. Natal, 2014.

SANTOS, L. F. **A influência do patamar de cura térmica sobre a resistência dos concretos autoadensáveis elaborados com diferentes tipos de cimento: avaliação pelo método da maturidade.** 2010. 280 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolanas com baixo teor de carbono obtida da cinza da casca do arroz residual para concreto de alto desempenho.** 2006. 187 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal De Santa Catarina - Programa De Pós-graduação Em Engenharia Civil. Florianópolis.

SCHANKOSKI, R. A. **Estudo de concreto autoadensável contendo fíler de britagem: características das partículas, floculação e reologia.** 2017. 247 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal De Santa Catarina - Programa De Pós-graduação Em Engenharia Civil. Florianópolis.

SCRIVENER, K, *et al.* **Advances in understanding hydration of Portland cement.** Cement and Concrete Research, v. 78, 2015

SHAMAA, A. M. *et al.* **Influence of relative humidity on delayed ettringite formation.** Cement and Concrete Composites, v. 58, 2014.

ŠILER, P. *et al.* **Effects of high-temperature fly ash and fluidized bed combustion ash on the hydration of Portland cement.** Construction and Building Materials. v.78, 2015.

SIVASUNDARAM, V.; CARETTE, G. G.; MALHOTRA, V. M. **Mechanical properties, creep, and resistance to diffusion of chloride ions of concretes incorporating high-volume of ASTM Class F fly ash from seven different sources.** MSL Divison Report MSL 89-126 (J), Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, 1989.

STARK, J.; BOLLMANN, K., **Delayed ettringite formation in concrete**. XVII Symposium on Nordic Concrete Research, p. 4-28, 1999.

TAYLOR, H.F.W. *et al.* **Delayed ettringite formation**. **Cement and Concrete Research**, v. 31, 2001.

TOCHETTO, E. **Dosagem e estudo da evolução da temperatura de concreto massa destinado à confecção de blocos de fundação**. 2010. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis.

TURUVALLO, G.; SUTSOS, M. N. **Supplementary cementitious materials: Strength development of self-compacting concrete under different curing temperature**. *Procedia Engineering*, v. 125, 2015.

WANG, X.; PARK, K. **Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash**. *Construction and Building Materials*, v. 98, 2015.

Xu, Q.; *et al.* **Isothermal calorimetry tests and modeling of cement hydration parameters**. *Thermochimica Acta*, v. 499, 2010.

YANG, K. H. **Effect of Curing Temperature Histories on the Compressive Strength Development of High-Strength Concrete**. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2015, 2015.

## 7 APÊNDICES

## 7.1 Apêndice A – Curvas termogravimétricas

Figura 28 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV0 - Ref

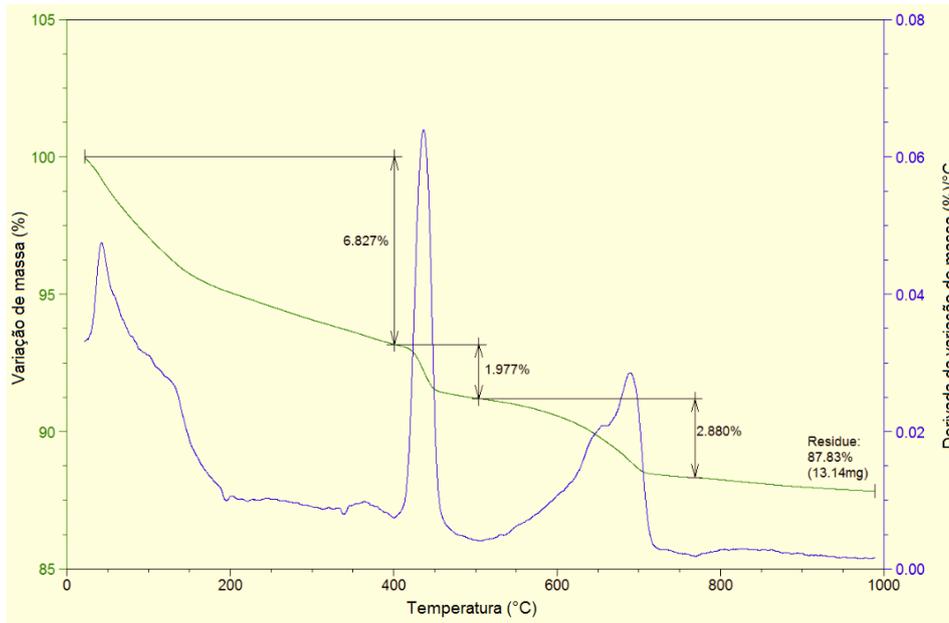


Figura 29 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV0 - CTA

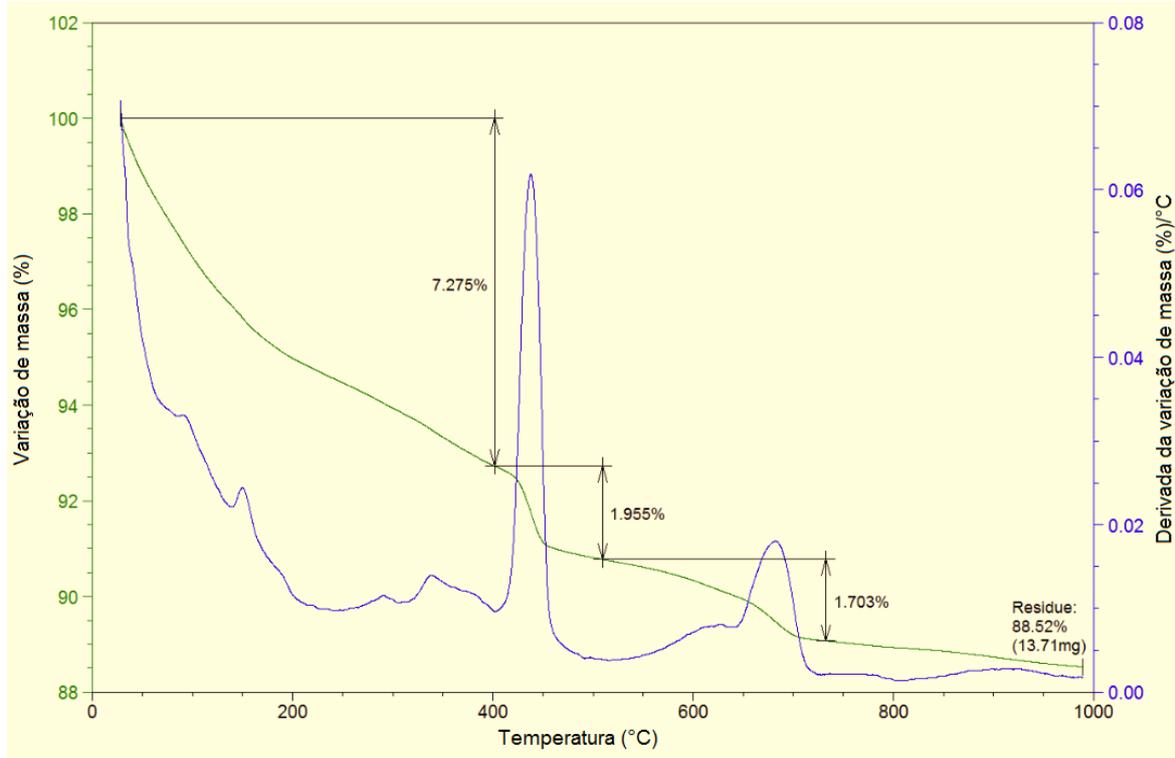


Figura 30 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV15 - Ref

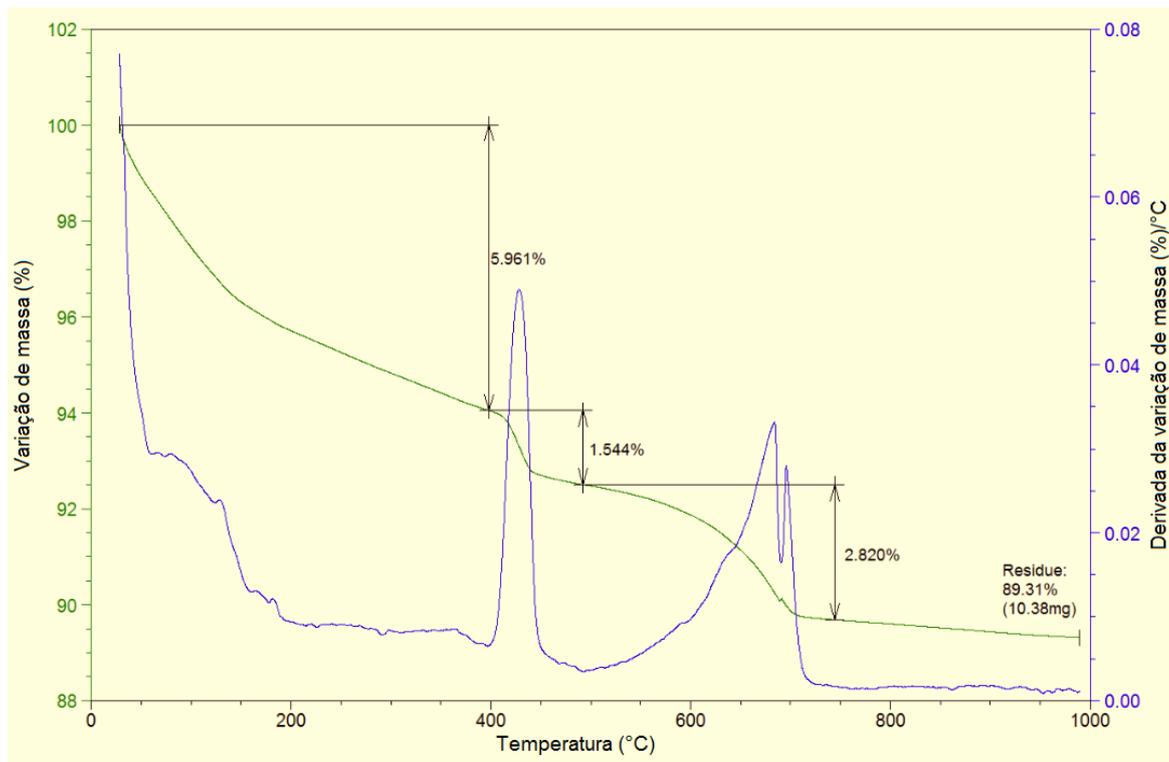


Figura 31 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV15 - CTA

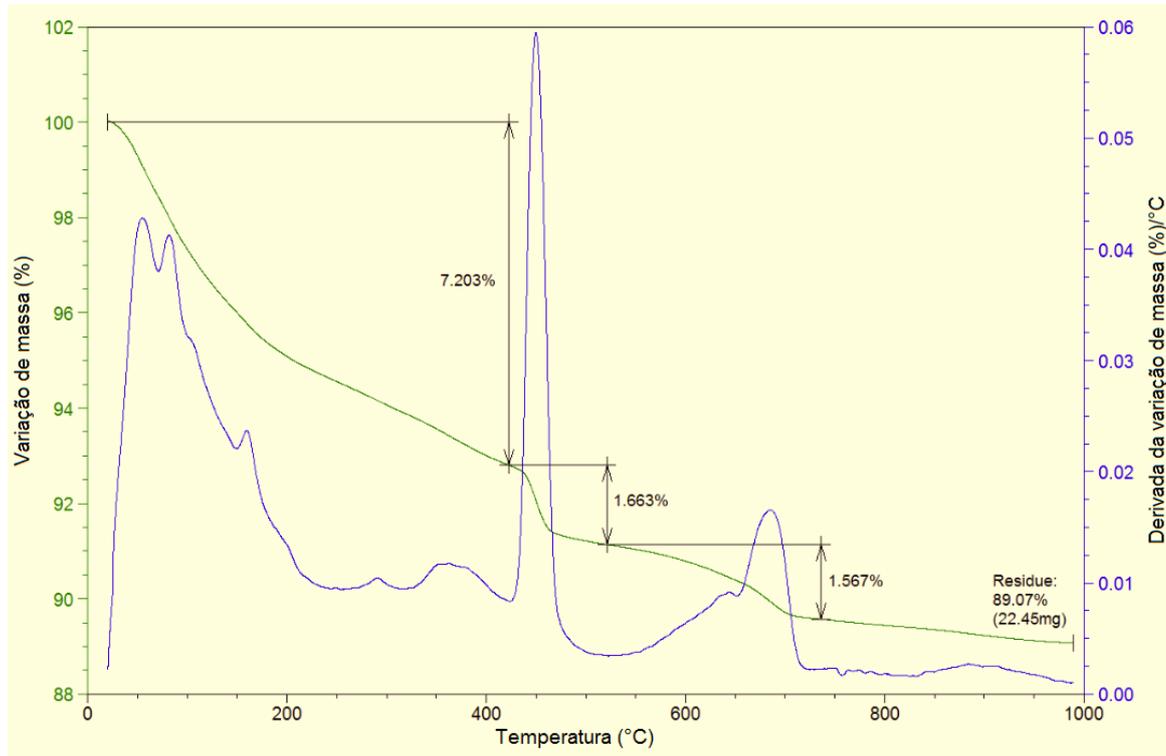


Figura 32 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV30 - Ref

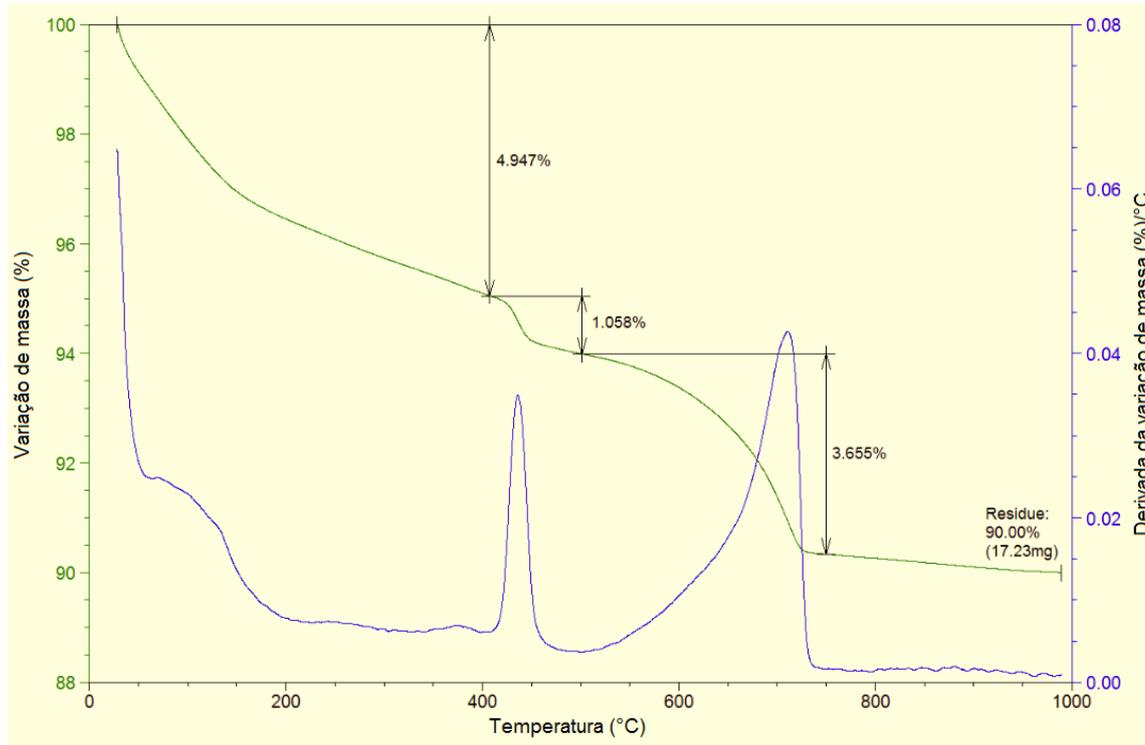


Figura 33 - Curva de TG e dTG da argamassa 250 CV30 - CTA

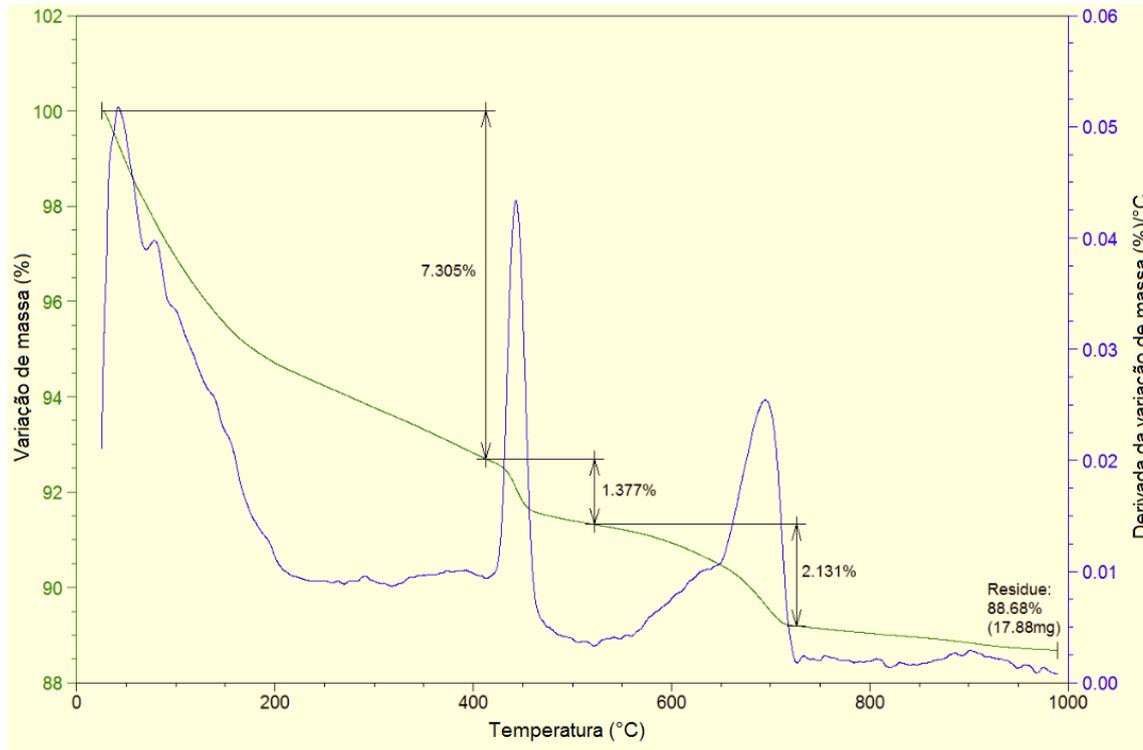


Figura 34 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV0 - Ref

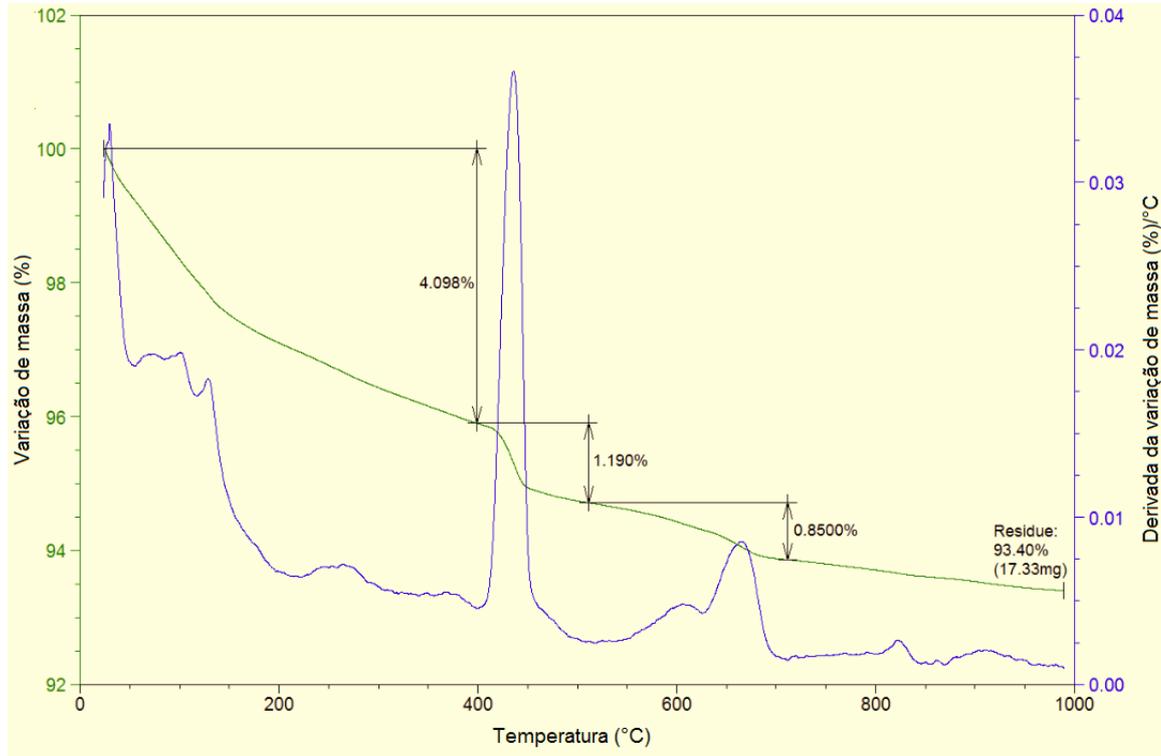


Figura 35 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV0 - CTA

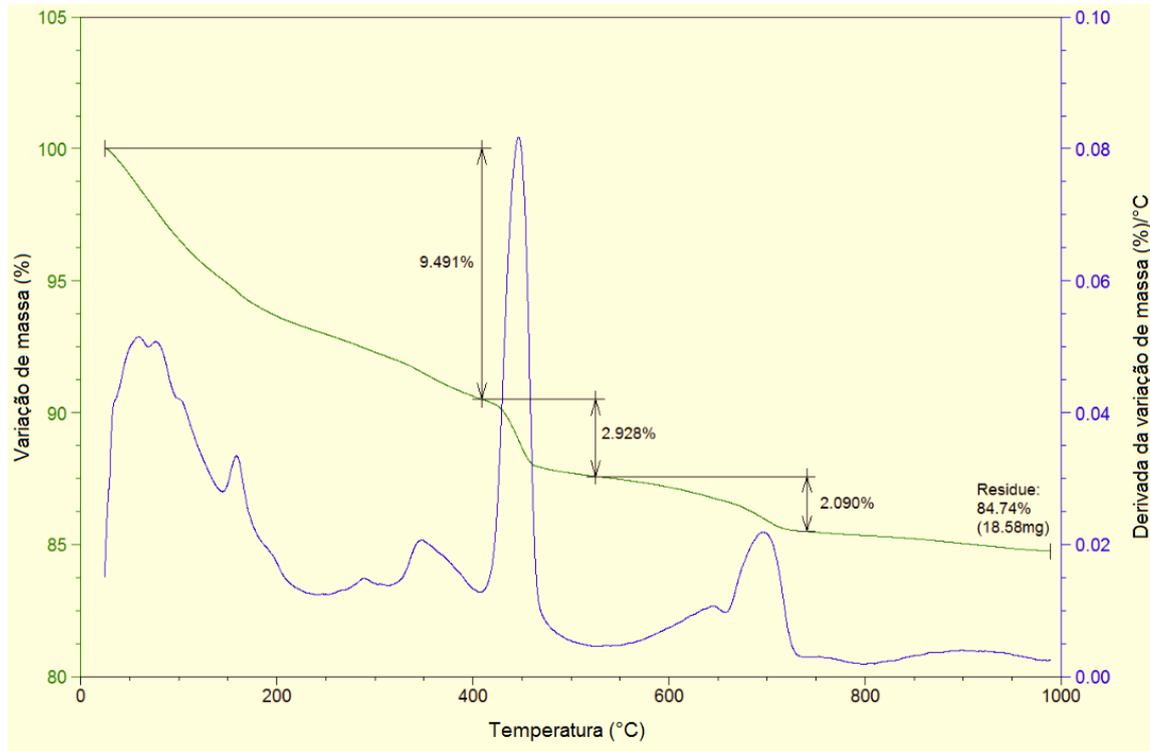


Figura 36 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV15 - Ref

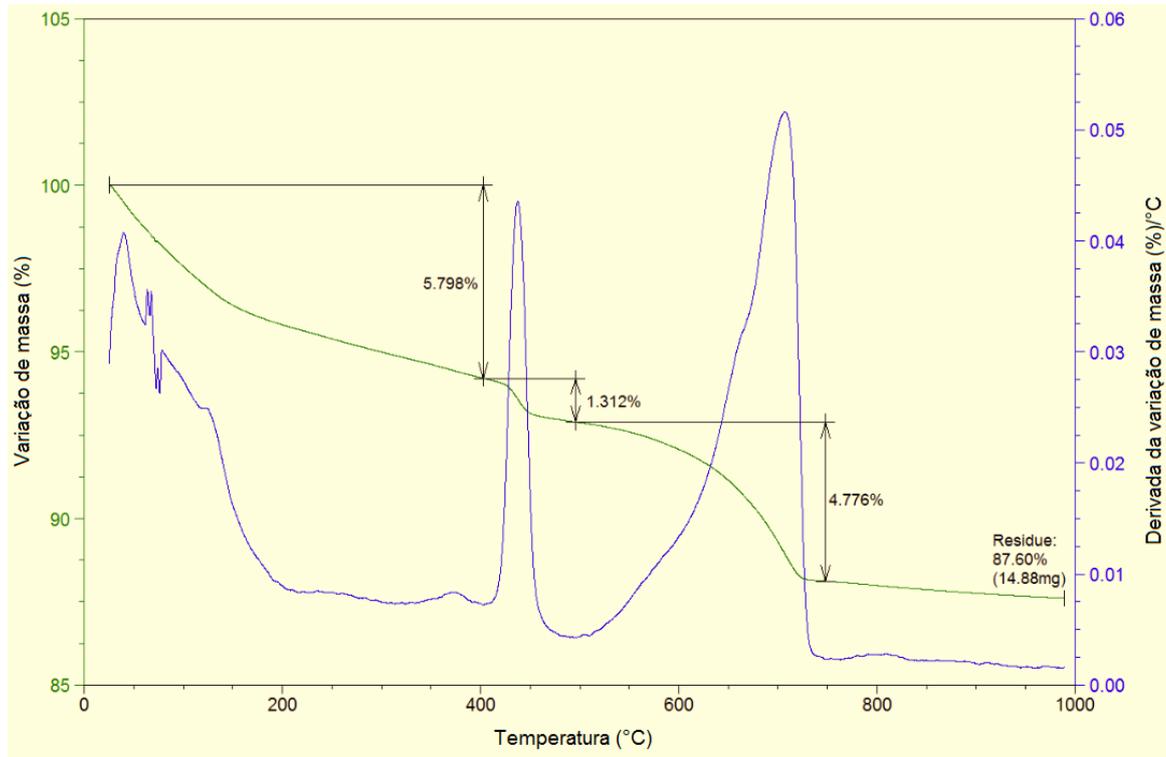


Figura 37 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV15 - CTA

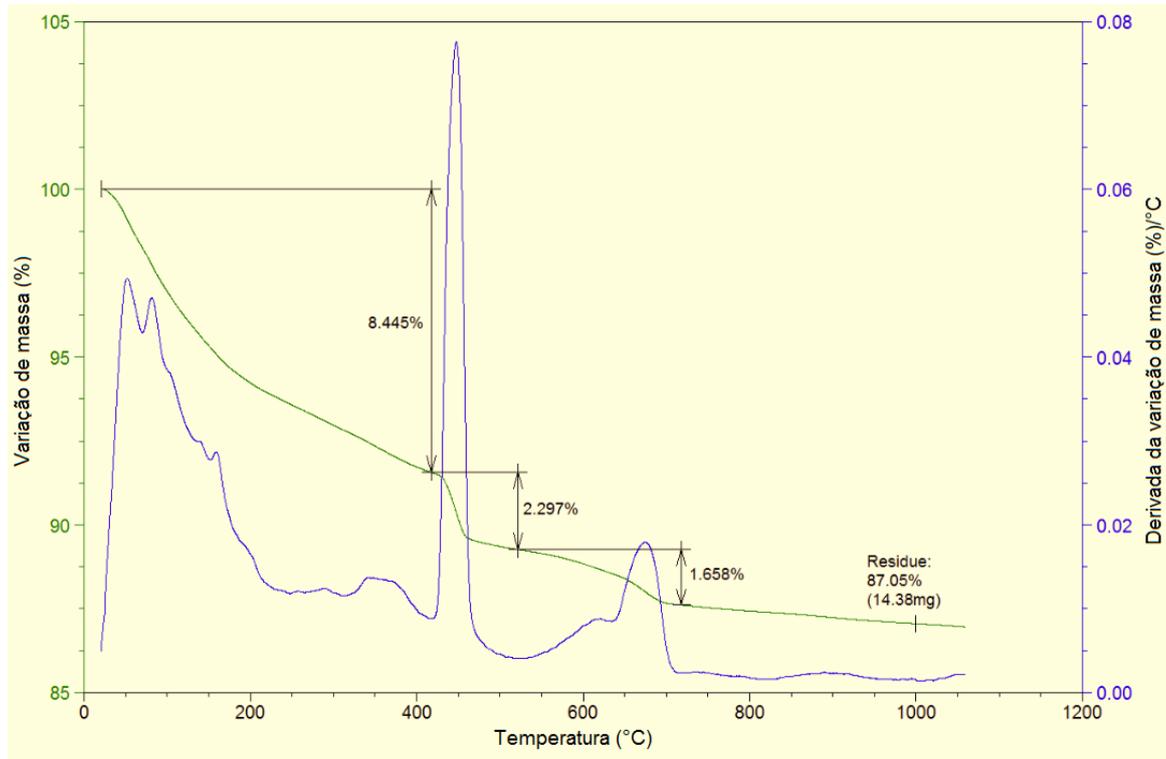


Figura 38 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV30 - Ref

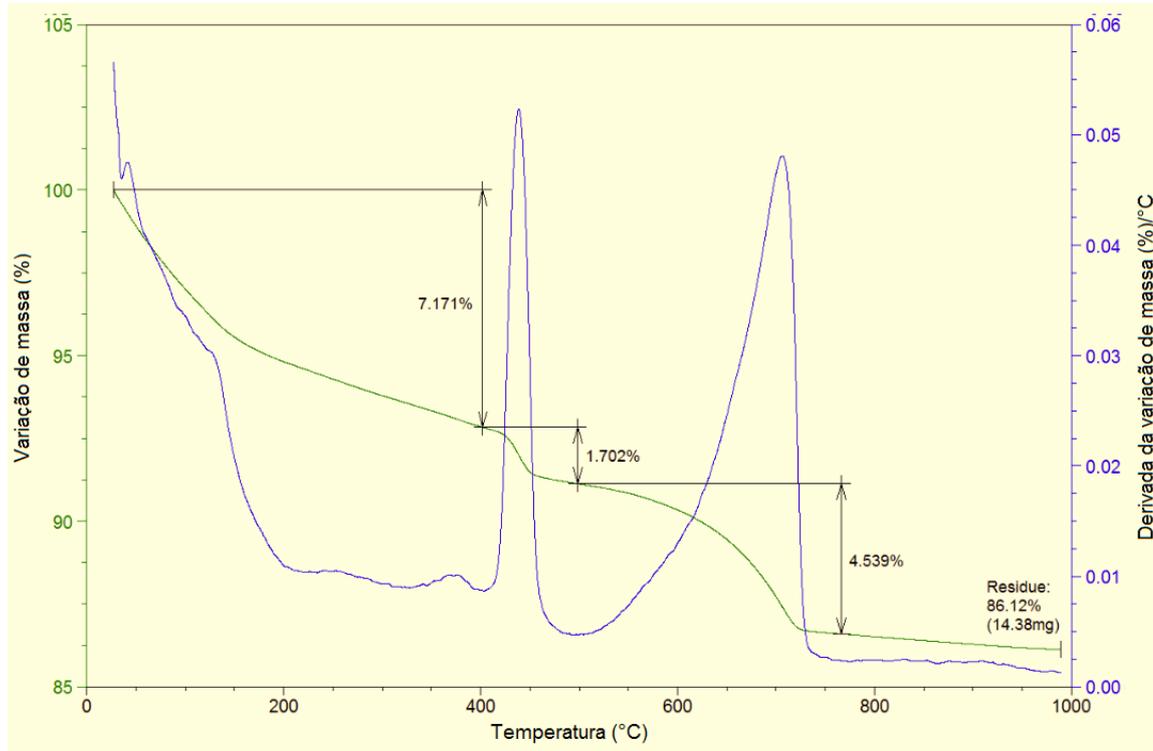
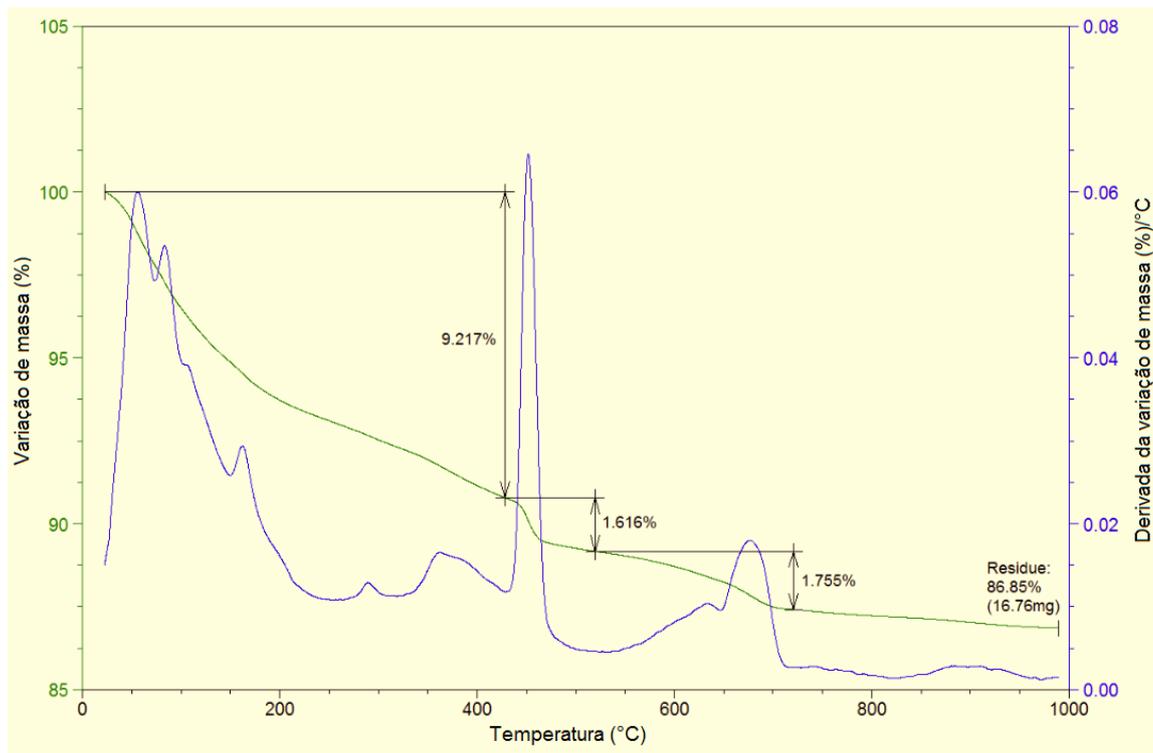


Figura 39 - Curva de TG e dTG da argamassa 300 CV30 - CTA



## 7.2 Apêndice B – Tabela de cálculo do ensaio de termogravimetria

Tabela 19 - Tabela de cálculo do ensaio de termogravimetria

Argamassa	Cura	FC.CV	FC.Areia	FC.Vol	Água Livre (%)	Água quimicamente combinada (%)	Água do Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)
250 CV0	Ref	1,00	2,68	1,14	3,08%	11,4%	6,03%	24,8%
	CTA	1,00	2,51	1,13	3,06%	12,0%	5,55%	22,8%
250 CV15%	Ref	1,14	2,99	1,12	2,70%	12,4%	5,86%	24,1%
	CTA	1,14	2,25	1,12	2,83%	12,6%	4,78%	19,6%
250 CV30%	Ref	1,33	3,18	1,11	2,20%	12,9%	4,98%	20,5%
	CTA	1,33	2,23	1,13	3,24%	13,6%	4,61%	18,9%
300 CV0	Ref	1,00	1,86	1,07	1,75%	4,7%	2,37%	9,7%
	CTA	1,00	1,67	1,18	3,64%	11,5%	5,77%	23,7%
300 CV15%	Ref	1,14	2,94	1,14	2,58%	12,3%	5,01%	20,6%
	CTA	1,14	1,83	1,15	3,24%	12,4%	5,49%	22,6%
300 CV30%	Ref	1,33	1,84	1,16	3,16%	11,4%	4,83%	19,9%
	CTA	1,33	1,58	1,15	3,70%	13,3%	3,90%	16,0%