



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

ANDRÉ VALMIR SAUGO RIBEIRO

**INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS NA ELEVAÇÃO
DA TEMPERATURA DE CONCRETOS MASSA DE
ELEVADA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Florianópolis, maio de 2018.

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

Ribeiro, André Valmir saugo
Influência de adições minerais na elevação da
temperatura de concretos massa de elevada
resistência à compressão / André Valmir saugo
Ribeiro ; orientador, Luiz Roberto Prudêncio Jr.
Prudêncio Jr., 2018.
145 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia Civil. 3.
Concreto massa. 4. Adições minerais. 5. Elevação
adiabática da temperatura. I. Prudêncio Jr., Luiz
Roberto Prudêncio Jr.. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

André Valmir Saugo Ribeiro

**INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS NA ELEVAÇÃO
DA TEMPERATURA DE CONCRETOS MASSA DE
ELEVADA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

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 28 de março de 2018.

Prof. Glicério Triches, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

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

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

AGRADECIMENTOS

Finalizando este trabalho gostaria de fazer agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma para que este estudo fosse concluído, pois aprendi durante esta minha caminhada que nada se constrói sozinho.

A meus pais pelo amor, incentivo incondicionais e a oportunidade de continuar estudando. Todos os meus familiares que sempre me incentivaram a seguir meus estudos. À Ana Paula, minha noiva, por sempre me incentivar, acreditar e ser meu porto seguro em todos os momentos.

Em especial agradeço ao professor Luiz Roberto Prudêncio Jr. Pela sua orientação, dedicação, paciência, incentivo e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante a orientação deste trabalho.

À banca examinadora de defesa: Professor Dr Philippe Jean Paul Gleize, Professor Dr. Fernando Pelisser, Professor Dr. Oswaldo Cascudo Matos, obrigado por aceitarem participar da avaliação deste trabalho e por suas sugestões e contribuições.

Aos amigos do GTec: Rudiele, Alex, Ana, Paulo, Ronaldo, Lucas, Sakata, Fernanda, Eduardo, Fernanda e Henrique. Agradeço pelo auxílio e companheirismo na realização de diversas atividades. Ao Nanotec agradeço por fornecer equipamentos para realização de alguns ensaios deste trabalho.

Aos meus amigos Eduardo, Mariane, Ariane, Régis, Manuela, Carol, Geanina, Grazi, Geisiele. Gostaria de agradecer por todo apoio e companheirismo. Agradeço em especial aos meus amigos Alex e Alexis, que foram pessoas iluminadas que Deus colocou em minha vida em Florianópolis. Desejo sempre o melhor para vocês e que continuemos nossas caminhadas juntos independente do lugar que estivermos.

Agradeço à Metacaulim do Brasil, Calwer Mineração LTDA, Holcim Brasil e PLM Construções e Comércio, pela doação de materiais e pela disponibilidade sempre que foi preciso. Também à Priscila e Marinea membros da secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC/Florianópolis, agradeço pela ajuda sempre que necessária com informações e procedimentos precisos. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Por fim agradeço a Deus, pois sei que sem ele nada é possível.

Muito Obrigado!

RESUMO

O presente estudo avaliou a influência de diferentes tipos de adições minerais em substituição ao cimento Portland na elevação da temperatura adiabática do concreto massa. Os aglomerantes e adições utilizadas foram o CP V - ARI, metacaulim, sílica ativa e CP III - RS. Foram realizados ensaios em argamassa, concreto e pasta. Os ensaios em argamassa foram realizados para construção das curvas de dosagem e para determinar o melhor teor de adição mineral a ser utilizada em substituição parcial ao cimento Portland, em relação ao custo/benefício, nos concretos. Dessa forma, as substituições volumétricas adotadas para a produção dos concretos foram de 8% para a sílica ativa e 12% para o metacaulim em relação ao aglomerante CP V - ARI. Após a escolha do melhor teor de substituição para cada aglomerante foram determinadas, a partir das curvas de dosagem de cada aglomerante e substituição, as relações a/aglomerante para os Fc28 de 40MPa, 45MPa, 50MPa e 55MPa. Foram utilizados dois tipos de cura, cura adiabática e câmara úmida e, a *posteriori* às curas, foram calculados indicadores para medir a influência do tipo do aglomerante e da resistência na elevação da temperatura adiabática do concreto sendo eles: °C/MPa e °C/100Kg de aglomerante. Os resultados mostraram que o aglomerante que apresentou maior valor para ambos os parâmetros foi o CP V – ARI, e o menor valor foi apresentado para os concretos produzidos com o aglomerante CP III – RS. Concluiu-se que, em uma mesma resistência, o aglomerante CP III - RS tem uma menor liberação de temperatura do que o concreto produzido com os demais aglomerantes. Os resultados de resistência à compressão mostraram que o tipo de cura não influenciou na resistência final dos concretos. Juntamente com os concretos, foram produzidas pastas com mesmas relações a/aglomerantes e mesma substituição dos concretos para serem curadas em regime adiabático e em câmara úmida. Após a cura durante 28 dias, as pastas foram ensaiadas por TG. Os resultados demonstraram que a cura não influenciou no teor de hidratos formados para a idade de 28 dias. Por fim, foi realizada uma análise econômica para indicar qual aglomerante possui melhor relação ao custo/benefício para a construção de um bloco de fundação. O resultado encontrado para a resistência de 40 MPa, é que o aglomerante CP V - ARI teve o menor valor. Já para a resistência de 55 MPa, o aglomerante CP III - RS resultou em menor valor.

Palavras-chave: Concreto massa. Elevação adiabática da temperatura. Adições minerais.

ABSTRACT

The present study evaluated the influence of different types of mineral additions instead of Portland cement in adiabatic temperature increase of mass concrete. The binders and additions used were the CP V-ARI, metakaolin, Silica fume and CP III-RS. Tests were carried out in concrete, mortar and paste. The mortar tests were conducted for construction of dosages and curves to determine the best mineral addition content to be used in partial replacement to Portland cement, in relation to the cost/benefit ratio in concrete. Thus, the volumetric adopted substitutions for the production of concretes were 8% Silica fume and metakaolin 12% in relation to the binder CP V-ARI. After choosing the best content for each binding agent were determined from the dosing curves of each binder and replacement, the relations/Binder for the Fc28 de 40MPa, 45MPa, 50MPa e 55MPa. We used two types of healing, healing and damp Chamber, and adiabatic retrospectively to cures were established variables to measure the influence of type of binder and resistance in the adiabatic temperature rise of concrete: °C/MPa and °C/100 kg of binder. The results showed that the binder that presented greater value for both parameters was CP V – ARI , and the lowest value was submitted for the concretes produced with the binder CP III – RS. It was concluded that, in the same resistance, the binder CP III-RS has a lower temperature than release the concrete produced with others binders. The results of compressive strength showed that the cure did not influence the final resistance of the concretes. Along with the concretes, were produced with the same relations folders/binders and same concrete replacement to be healed adiabatically and the incubation Chamber. After curing for 28 days the folders have been tested by TG, the results showed that the cure did not influence the hydrates formed for age 28 days. Finally, an economic analysis to indicate which Binder has better cost/benefit ratio for the construction of a foundation block. The result found for the 40 MPa strength is that the CP V - ARI binder had the lowest value. For the resistance of 55 MPa, the binder CP III - RS resulted in a lower value.

Keywords: Concrete mass. Adiabatic temperature rise. Mineral Additions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Calor de hidratação liberado devido à temperatura de cura ao durante o período de 72 horas.....	8
Figura 2- Calor gerado dos compostos presentes em diferentes tipos de cimento ao longo do tempo.....	17
Figura 3 - Calor gerado devido à temperatura de cura ao longo do tempo	18
Figura 4 - Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com diferentes aglomerantes	20
Figura 5 - Elevação da Temperatura adiabática de concretos produzidos com escória ao longo do tempo.....	23
Figura 6 - Elevação da temperatura adiabática de concretos produzidos com diferentes tipos de aglomerantes até o período de 28 dias	24
Figura 7 - Taxa de liberação de calor de diferentes misturas com o passar até o período de 100 horas	25
Figura 8 - Liberação do calor de hidratação de pastas produzidas com diferentes aglomerantes ao longo de 28 horas ..	27
Figura 9 - Quantidade de Ca(OH)_2 presente nas misturas com diferentes tipos de aglomerantes durante o período de 100 dias	29
Figura 10 - Porosidade dos concretos aos 28 dias	29
Figura 11- Ganho de resistência devido à adição de pozolanas.....	31
Figura 12 - Gradiente de temperatura nas amostras 3 e 4 (°C) com diferentes tipos de aglomerantes	32
Figura 13 - Migração de cloretos devido à substituição de clínquer por metacaulim.....	36
Figura 14 - Faixa granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	49
Figura 15 - Fluxograma de ensaios.....	51
Figura 16 - Esquema de funcionamento do calorímetro.	53
Figura 17 - Calorímetro com o corpo de prova	54
Figura 18 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para cada relação a/aglomerante utilizada	63
Figura 19 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias câmara úmida para cada relação a/aglomerante utilizada para os diferentes aglomerantes	68

Figura 20 - Resistência à compressão aos 28 dias cura autógena para cada relação a/aglomerante utilizada para os diferentes aglomerantes	68
Figura 21 - Resistência à compressão para as relações a/aglomerante dos concretos curados em câmara úmida	69
Figura 22 - Resistência à compressão para as relações a/aglomerante dos concretos curados autogenamente	70
Figura 23- Variável °C/MPa para os fc28 dos diferentes aglomerantes utilizados	75
Figura 24- Variável °C/ 100 kg de aglomerante para os Fc28 dos diferentes aglomerantes utilizados	75
Figura 25 – Curvas TGA e DrTGA do aglomerante CPIII-RS 40 Cura Adiabática	83
Figura 26- Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com CPIII-RS 40MPa cura autógena	105
Figura 27 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com CPIII-RS 40MPa câmara úmida	106
Figura 28 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com CPIII-RS 55 MPa cura autógena	107
Figura 29 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com CPIII-RS 55 MPa câmara úmida	108
Figura 30 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com MK 40MPa cura autógena	109
Figura 31 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com MK 40MPa câmara úmida	110
Figura 32 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com MK 55MPa cura adiabática	111
Figura 33 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com MK 55MPa câmara úmida	112
Figura 34 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com REF 40MPa cura adiabática	113
Figura 35 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com REF 40MPa câmara úmida	114
Figura 36 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com REF 55MPa cura adiabática	115
Figura 37 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com REF 55MPa câmara úmida	116
Figura 38 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com S.A. 40MPa cura adiabática.....	117
Figura 39 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com S.A. 40MPa câmara úmida	118

Figura 40 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com S.A. 55MPa cura adiabática	119
Figura 41 - Figura 42 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com S.A. 55MPa câmara úmida	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Calor liberado pelos compostos do cimento	13
Tabela 2 - Cimento Portland comercializado no Brasil	14
Tabela 3 - Compostos Anidros do cimento.....	16
Tabela 4 - Composição Química das adições minerais.	21
Tabela 5 - Composição química das escórias brasileiras.	22
Tabela 6 - Resistência à compressão de concretos devida a adição mineral escória de alto forno	26
Tabela 7 - Requisitos Químicos e Físicos para utilização de metacaulim no Brasil.	34
Tabela 8 - Características físicas e químicas do CP V - ARI	44
Tabela 9- Características Físicas e Químicas do CPIII-RS	45
Tabela 10 – Porcentagem retida acumulada das britas 0 e 1 para cada peneira	47
Tabela 11 - Porcentagem retida acumulada das areias natural e de britagem para cada peneira	48
Tabela 12 - Propriedades das adições minerais (metacaulim e sílica ativa).....	50
Tabela 13 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas com CP V - ARI e CP III - RS	58
Tabela 14 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas com sílica ativa	59
Tabela 15 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas com metacaulim	60
Tabela 16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de cada aglomerante utilizado e sua respectiva a/aglomerante	62
Tabela 17 - Relações água/aglomerante e consumo de aglomerante por metro cúbico para as resistências desejadas para cada aglomerante	64
Tabela 18 - Dados dos ensaios no estado fresco dos concretos.....	66
Tabela 19 - Resultados do ensaio de elevação de temperatura adiabática dos concretos com os diferentes aglomerantes.....	73
Tabela 20 - Tabela ANOVA para o parâmetro Amplitude Térmica.....	77

Tabela 21 - Tabela Anova para o parâmetro °C/Mpa	78
Tabela 22 - Teste de Duncan	79
Tabela 23 - Tabela ANOVA para o parâmetro °C/100Kg de aglomerante	80
Tabela 24 - Resultados para o Teste de Duncan para o parâmetro °C/100Kg de aglomerante.....	80
Tabela 25 - Resultados obtidos através do ensaio de Termogravimetria e suas correções aos 28 dias dos diferentes tipos de aglomerantes utilizados	84
Tabela 26 - Custo de produção do bloco de fundação com 1500m ³ para cada aglomerante nas resistências de 40 e 55 MPa	87

LISTA DE SIGLAS

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

a/c – Relação água/cimento

a/aglomerante – Relação água/aglomerante

DEF – Delayed Etringite Formation (Etringita Tardia)

MK - Metacaulim

TG - Termogravimetria

DTG – Derivada primeira da curva de Termogravimetria

SUMÁRIO

1	CÁPITULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	1
1.2	OBJETIVO GERAL.....	5
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
2	CÁPITULO 2 – REFERÊNCIAL TEÓRICO	6
2.1	CONCRETO MASSA	6
	2.1.1 Fatores Intervenientes na Elevação da	
	Temperatura	6
	2.1.2 Manifestações patológicas associadas a	
	Elevação da Temperatura	9
	2.1.2.1 Fissuração Térmica	9
	2.1.2.2 Etringita tardia.....	10
	2.1.3 Síntese	11
2.2	MATERIAIS CONSTITUINTES.....	12
	2.2.1 Cimento Portland	12
	2.2.1.1 Hidratação do Cimento	14
	2.2.1.2 Calor de Hidratação	16
	2.2.2 Adições minerais	19
	2.2.2.1 Escória granulada de alto forno.....	21
	2.2.2.2 Pozolanas no Concreto	26
	2.2.2.3 Metacaulim	33
	2.2.2.4 Sílica ativa	37
	2.2.3 Síntese	39
3	CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	40
3.2	MATERIAIS	43
	3.2.1 Cimentos.....	43
	3.2.2 Agregados	45
	3.2.3 Aditivo	49
	3.2.4 Adições minerais.....	49
3.3	METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	50
	3.3.1 Dosagem e obtenção dos concretos	51
	3.3.2 Procedimento de cura dos corpos de prova	52
	3.3.3 Calorimetria	52
	3.3.4 Resistência à Compressão	54
	3.3.5 Termogravimetria em pastas como forma de	
	avalição pozolânica das misturas.....	55

4	CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1	ENSAIOS EM ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	57
4.2	ENSAIOS EM ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO	61
4.3	ENSAIOS EM CONCRETO NO ESTADO FRESCO	65
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS	67
4.5	ENSAIOS DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DA TEMPERATURA DOS CONCRETOS.....	72
4.6	TERMOGRAVIMETRIA EM PASTAS.....	82
4.7	ANÁLISE ECONÔMICA.....	86
5	CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5.1	CONCLUSÕES	89
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 CÁPITULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DO TEMA

Atualmente, a escassez e os altos preços de terrenos urbanos ocasionam o aumento da demanda por edificações verticais com grande número de pavimentos, sendo que as mesmas geralmente necessitam de grandes blocos de fundação, que são feitos com elevadas dimensões e alto consumo de cimento (PRUDÊNCIO *et al.*, 2014). Devido ao grande volume de concreto e ao alto consumo de cimento que é utilizado nesses blocos de fundações, ressalta-se que é necessário, também, um maior controle e monitoramento de temperatura do concreto, pois ele pode atingir valores elevados de temperatura em seu período de cura, o que pode acarretar em diferentes patologias no concreto.

As altas temperaturas dos grandes blocos de fundações, também chamados de concreto massa¹, ocorrem devidas suas grandes dimensões e aos altos consumos de cimento, pois as altas temperaturas são resultado do calor gerado na mistura, a partir da hidratação do cimento, e da baixa dissipação do calor.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o calor de hidratação é gerado quando ocorre a hidratação do cimento, ou seja, os compostos químicos do cimento, ao reagirem com a água para adquirirem estados estáveis de baixa energia, liberam energia dos compostos em forma de calor. Portanto, a liberação do calor pelas partículas de cimento faz com que ocorra a elevação da temperatura do concreto, o que pode acarretar em patologias de ordem térmica, tais como: Formação de Etringita Tardia e Fissuração Térmica.

Nesse sentido, salienta-se que o controle da temperatura de peças maciças de concreto é de grande relevância para manutenção das propriedades físicas e químicas do concreto, devendo-se fazer esforços necessários para que a temperatura destes não atinjam picos elevados, evitando que ocorram as patologias de ordem térmica citadas acima.

¹ Segundo a ACI 116 (*apud* Mehta; Monteiro, 2014), o concreto massa é todo concreto em que o volume tem uma magnitude que necessita de meios especiais para combater uma elevada geração de calor e a decorrente variação de volume.

Vale ressaltar que a fissuração térmica, de acordo com Albuquerque (2009), é o resultado das variações volumétricas do concreto que ocorrem em função do calor gerado pela hidratação das partículas do cimento sob determinadas condições de restrição à deformação; e, segundo Carles-Gibergues e Hornain (2014), a formação de Etringita Tardia é uma reação de sulfatos que é originada internamente no concreto devida às reações de hidratação do cimento. Ressalta-se que a Etringita Tardia é consequência da elevação da temperatura a valores iguais ou superiores a 65°C (a partir de temperaturas entre 65°C e 70°C a etringita torna-se instável), devido a um tratamento térmico inadequado, sendo que a mesma é formada em idades tardias, após o endurecimento do concreto.

Para evitar esses problemas de ordem térmica, algumas precauções podem ser adotadas, como: (1) utilização de gelo na mistura - baixando a temperatura inicial do concreto e diminuindo seu pico de temperatura; (2) utilização de cimentos com baixa liberação de calor de hidratação; (3) diminuição do consumo de cimento - pois quanto maior a quantidade de cimento em uma peça de concreto, maior será o calor de hidratação, o que faz com que a peça atinja temperaturas elevadas; (4) utilização de pozolanas para diminuir o calor de hidratação liberado pela mistura - devido à adição liberar menor calor do que o clínquer de cimento Portland; (5) utilização de pozolanas com baixo teor de cálcio e alto teor de alumina reativa para prevenção da formação da etringita tardia (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dentre as formas de controle da temperatura do concreto, ressaltar-se neste trabalho a substituição do clínquer Portland por adições minerais, pois, ao diminuir o consumo do clínquer Portland, ocorrerá uma menor liberação de calor nas primeiras idades e, conseqüentemente, o pico de temperatura desse concreto também diminuirá, podendo, assim, prevenir as patologias de ordem térmica do concreto. Ressalta-se que, a partir da necessidade da substituição parcial ao clínquer, as adições minerais mais utilizadas são os materiais pozolânicos.

Nesse seguimento, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que o calor de hidratação total produzido por reações pozolânicas é considerado a metade do calor médio produzido pela hidratação do cimento Portland. Entretanto, a utilização de materiais pozolânicos no concreto fica muitas vezes prejudicada devida à idade padronizada

para a obtenção da resistência à compressão de projeto geralmente imposta pelo projetista (28 dias), não levando em consideração o ganho de resistência que uma mistura com adições pozolânicas tem entre as idades de 28 e 90 dias, ou seja, deve-se utilizar maior quantidade de cimento para que este concreto atinja a resistência desejada aos 28 dias.

Liduário (2006) cita que a utilização de pozolanas como a sílica ativa e o metacaulim fazem com que as propriedades mecânicas do concreto sejam aprimoradas não apenas em idades avançadas, mas também em idades iniciais. Isso ocorre em função dessas duas pozolanas aumentarem os pontos de nucleação, fazendo com que o processo de hidratação seja acelerado e, também, pelo efeito *filler*. Com isso, o uso da sílica ativa e do metacaulim diminui o consumo de aglomerante para uma mesma resistência quando comparado com o concreto produzido somente com o cimento Portland. Dessa forma, com o menor consumo de aglomerante, há uma menor quantidade de calor liberado e, conseqüentemente, uma diminuição do pico de temperatura do concreto.

Contudo, ressalta-se que uma das características que diferencia o metacaulim da sílica ativa é que o primeiro tem quantidade de alumina (Al_2O_3) reativa suficiente para colaborar com a mitigação da DEF, enquanto o segundo não possui esse composto em sua composição. Corroborando com o descrito acima, Munhoz (2007) mostra pela caracterização química do metacaulim e da sílica ativa que a quantidade de alumina (Al_2O_3) presente no metacaulim é maior que na sílica ativa, sendo que na sílica ativa a presença é quase nula.

Outro material que é adicionado ao concreto em substituição ao clínquer, é a escória granulada de alto forno, sendo que ela faz com que o consumo de clínquer seja diminuído e que sua reação ocorra em idades avançadas, porém está tem uma menor reatividade do que as adições minerais supracitadas. Assim, necessita de maior consumo deste material na mistura para uma mesma resistência.

A maioria dos trabalhos que abordam a utilização de adições minerais indica que elas causam uma diminuição no calor de hidratação do concreto. Entretanto, isto não é uma unanimidade. No trabalho de Junkes (2015), por exemplo, o autor concluiu que a substituição de cimento por cinza volante não proporcionou alteração significativa no coeficiente de elevação de temperatura adiabática, ou

seja, a taxa de geração de calor do aglomerante composto por cimento Portland e cinza volante foi idêntica à do cimento puro. Outro trabalho é o de Couto, Helene e Almeida (2016), onde verificaram que a temperatura final do concreto produzido com CP III – RS foi alta e teve um comportamento muito semelhante com o do cimento Portland puro. Demonstra-se assim a necessidade de mais estudos para o entendimento da elevação adiabática da temperatura de concretos contendo diferentes tipos de adições minerais em substituição ao cimento Portland.

A partir disso, verifica-se que é importante a avaliação da liberação de calor pelo concreto com a substituição do clínquer por adições minerais (metacaulim, sílica ativa e escória granulada de alto forno) e, dessa forma, questiona-se: qual é a influência dos diferentes tipos de adições minerais, metacaulim, sílica ativa e escória granulada de alto forno, em substituição parcial ao cimento em diferentes teores na elevação adiabática de temperatura de concretos?

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência de diferentes adições minerais - metacaulim, sílica ativa e escória granulada de alto forno - em substituição parcial ao cimento Portland, em diferentes teores, na elevação adiabática de temperatura e na resistência a 28 dias de concretos curados em temperatura ambiente e em regime adiabático para uma faixa de resistência entre 40 MPa e 55MPa.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Para cada tipo de adição mineral estudada avaliar o teor ideal de substituição considerando a melhor relação custo/benefício para a produção de concretos.
- Analisar comparativamente as resistências aos 28 dias de argamassas produzidas a partir de diferentes adições minerais com mesma relação água/aglomerante.
- Verificar a influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto, quando este é submetido ao processo de cura autógena.
- Analisar a quantidade de adição que consegue reagir aos 28 dias, em função da cura térmica autógena, por meio do ensaio de Termogravimetria.
- Analisar economicamente, dentre as adições estudadas, qual proporciona a melhor relação custo benefício para construção de um bloco de fundação para a maior e a menor resistência estudadas.

2 CÁPITULO 2 – REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO MASSA

Para Albuquerque (2009) e Neville (1997), concreto massa é todo volume de concreto com dimensões grandes o bastante que demande medidas de controle do calor gerado pela hidratação das partículas de cimento e, conseqüentemente, as mudanças de volume dela provenientes, para minimizar o risco de fissuração.

A partir dessa acepção, Coelho (2012) afirma que essas estruturas normalmente apresentam grandes dimensões, grandes volumes de concreto e baixo consumo de cimento, e ainda cita como exemplo os blocos de fundações como tipologia estrutural que utiliza o concreto massa. Salienta-se que esses tipos de estrutura são propensos ao surgimento de patologias de caráter térmico, devido ao alto pico de temperatura atingido no processo de cura.

Salum *et al.* (2014) analisaram a concretagem de um bloco de fundação na cidade de Balneário Camboriú- SC, com volume superior a 5300 m³, 5 metros de profundidade e com resistência especificada de 45 MPa, em que os resultados foram monitorados pelo GTEC e mostraram que a temperatura do bloco de fundação chegou a 79,4°C, em pontos próximos ao centro do bloco. Ou seja, esse estudo verificou um alto pico de temperatura em blocos de fundação, o que mostra a importância do controle e monitoramento dos mesmos.

O principal fator que difere o concreto massa de outros concretos é que ele está vinculado a grandes dimensões, verificando que há uma significativa diferença de temperatura entre o centro da peça e a superfície que está em contato com o meio. Devido a esse gradiente de temperatura, ocorrem as variações volumétricas restringidas com possibilidade de originar fissuras (PRUDÊNCIO *et al.*, 2014). Normalmente o gradiente da temperatura é controlado pela escolha de materiais, otimização do traço e também de algumas práticas especiais, ou seja, a utilização de um menor consumo de cimento ou de um cimento com adição mineral faz com que o concreto massa diminua seu pico de temperatura devido a menor liberação de calor pela hidratação das partículas de cimento.

2.1.1 Fatores Intervenientes na Elevação da Temperatura

Schakow *et al.* (2016) elencaram três fatores como os principais para a elevação da temperatura de um concreto, sendo eles: (1) Condições ambientais em que o concreto é exposto; (2) Escolha dos materiais, como, por exemplo, agregados e cimento. O tipo de cimento é importante devido às suas características físicas e químicas. Os agregados, devidos ao consumo de água que estes irão demandar. Quanto maior é a demanda de água, maior será o consumo de cimento, fazendo com que o calor de hidratação da mistura aumente; e (3) Temperatura inicial da mistura, podendo ser reduzida com o pré-resfriamento dos materiais ou até mesmo substituindo água por gelo.

Segundo Neville (1997), a prevenção para que o concreto não atinja elevadas temperaturas consiste em baixar o consumo de cimento no concreto, bem como, a utilização de cimentos compostos, porque é o clínquer de cimento Portland que é o responsável pela liberação de calor às primeiras idades. O mesmo autor ainda destaca que a velocidade de hidratação é maior em altas temperaturas, o que faz com que o calor seja liberado com maior facilidade.

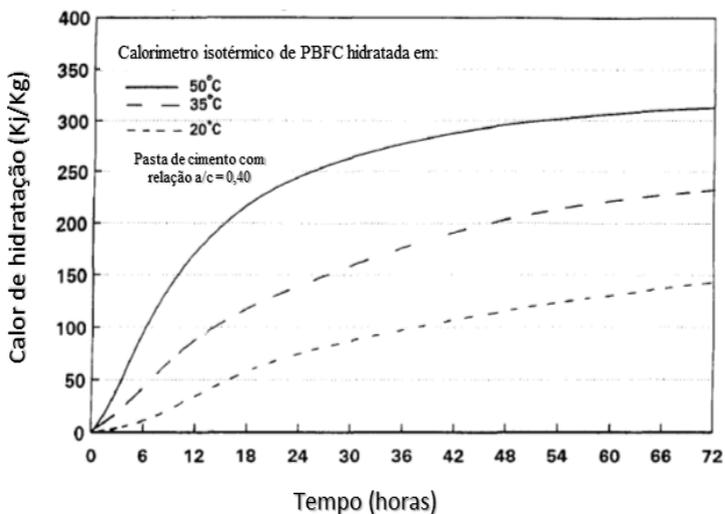
Além do tipo de cimento, a relação água/cimento é de essencial importância devida à quantidade de cimento presente na mistura. Quando não há a utilização de aditivos, quanto menor a relação a/c, maior será a quantidade de cimento para uma mesma mistura, aumentando a taxa de hidratação, liberando maior quantidade de calor e fazendo com que o concreto atinja picos de temperatura maiores do que concretos com menores consumos de cimento para um mesmo tipo de aglomerante². Ou seja, o consumo de cimento é um dos principais fatores para elevação da temperatura de um concreto. Assim, a escolha de materiais que promovam uma diminuição no consumo de água faz com que o consumo de cimento também seja reduzido, desde que se garanta a trabalhabilidade da mistura.

Outro fator que controla a temperatura final do concreto é a sua temperatura de lançamento, porque esta será a temperatura de partida do concreto. Com o conhecimento do calor de hidratação a ser liberado pela mistura e de sua temperatura inicial é possível fazer uma estimativa da sua temperatura final. Por isso, é importante ter o conhecimento do calor liberado por diferentes tipos de aglomerantes

e também as condições de exposição da mistura ao planejar o tipo de concreto feito em uma obra.

A temperatura em que o concreto fica exposto, sua temperatura de cura, também influencia na liberação do calor de hidratação e, conseqüentemente, na elevação da temperatura do concreto, como é demonstrado na Figura 3.

Figura 1 - Calor de hidratação liberado devido à temperatura de cura ao durante o período de 72 horas



Fonte: adaptado de Livesey, Donnelly and Tomlison (1991).

A Figura 3 mostra que diferentes temperaturas de cura, com um mesmo tipo de cimento e uma mesma relação a/c, possuem diferentes valores de calor de hidratação. Além disso, verifica-se que quanto maior é a temperatura de cura, maior será a liberação do calor de hidratação, o que implica na aceleração do processo de hidratação das partículas de cimento, fazendo com que a temperatura do concreto atinja valores maiores do que um concreto curado a temperatura menor.

Nessa mesma perspectiva, cita-se que outros fatores intrínsecos do concreto têm influência sobre a elevação da temperatura, tais como: massa específica, condutividade térmica,

calor específico e difusidade térmica do concreto (SILVEIRA, 1961). Destaca-se que todos os fatores supracitados neste tópico são de suma importância para o concreto massa, para que não ocorra um alto pico de temperatura e não cause efeitos deletérios de ordem térmica à mistura, como a fissuração térmica e a formação de etringita tardia (DEF).

2.1.2 Manifestações patológicas associadas a Elevação da Temperatura

O concreto curado a temperaturas mais elevadas, na faixa entre 30°C e 60°C, tende a obter resistências iniciais maiores do que um concreto curado a temperatura ambiente, devido à aceleração da hidratação das partículas de cimento, fazendo com que os produtos da hidratação sejam formados com maior rapidez.

Porém, essa elevação da temperatura em uma estrutura de concreto pode acarretar ações deletérias provindas da diferença de temperatura entre o centro e a superfície da peça (Fissuração térmica) e também a geração de produto expansivo (Formação de Etringita Tardia), gerado pelos componentes químicos presentes durante a hidratação, devido a uma alta temperatura. Esses dois efeitos são discutidos nos tópicos a seguir.

2.1.2.1 Fissuração Térmica

Segundo Araújo (2013), em uma estrutura de concreto massa, o calor é transferido por condução, saindo do núcleo até as superfícies da peça e, *a posteriori*, se dissipando para o meio. Essa transferência de calor gera gradientes de temperatura que criam tensões de tração e compressão no concreto. Com o resfriamento rápido da superfície, a mesma tende a encurtar enquanto que o interior do concreto está na fase de aquecimento. Assim, o núcleo da peça introduz esforços de tração no concreto das camadas superficiais podendo fazer com que ocorram fissuras que comprometem sua durabilidade, ou seja, se tenha a formação das fissurações térmicas.

Salienta-se que peças com grande volume de concreto necessitam de um controle da fissuração por conta da alta temperatura que a mistura atinge com liberação de calor, devido à hidratação das partículas de cimento. Segundo Neville (1997), a fissuração do

concreto pode ser evitada reduzindo a diferença de temperatura entre o centro da peça de concreto, a qual é aquecida praticamente de forma adiabática, e a superfície, que perde calor em uma taxa muito mais elevada.

2.1.2.2 Etringita tardia

Diamond (1996) demonstrou que a exposição de um concreto por muitas horas em temperatura de 70°C em cura a vapor, a etringita primária é decomposta, e então, ocorre a formação da etringita tardia, bem como, sua deposição após o resfriamento da mistura, fazendo com que ocorra um mecanismo de expansão. O mesmo autor concluiu que a formação da etringita tardia não é apenas preocupante pela expansão que esta gera, mas sim, devido à perda de resistência mecânica e geração de problemas de durabilidade para a mistura em questão.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a formação da etringita tardia ocorre em temperaturas maiores que 65°C, devido ao concreto atingir elevadas temperaturas no processo de hidratação ou então ser curado a altas temperaturas. Dessa forma, a etringita formada não fica estável e transforma-se em monossulfato, liberando íons sulfatos, que ficam livres internamente e se fixam no C-S-H. Durante o processo de resfriamento, estes íons voltam a reagir com a monossulfato que se transforma novamente em etringita (secundária) quando a pasta de cimento já se encontra endurecida, gerando expansão que é deletéria ao concreto.

Carles-Gibergues e Hornain (2014) citaram que esta forma de ataque por sulfatos causa degradação da estrutura após anos, ocorrendo expansão do produto e conseqüentemente a fissuração do concreto. A fissuração ocorre por uma formação de rede de fissuras, multidirecionais, normalmente onde se tem zona de umidade elevada.

Carles-Gibergues e Hornain (2014) ainda mostraram que sob temperaturas maiores que 65°C, a formação de etringita é inibida ou então ocorre à decomposição deste produto de hidratação. São liberados então sulfatos e aluminatos que ficam depositados no interior da pasta de cimento, interior do C-S-H, na forma de íons adsorvidos fisicamente. Com isso, há a formação de nanocristais de monossulfoaluminato (AFm) que são estáveis a altas temperaturas do concreto. Entretanto, quando a temperatura diminui, equilibrando com

a do meio externo e em meio úmido, ocorre a penetração de água ou difusão iônica e conseqüentemente à recristalização de micro cristais de etringita, fazendo com que aconteça a formação de tensões dentro do material, que são absorvidas pelo mesmo. Transcorre, então, um descolamento dos agregados da pasta e a sua microfissuração. Dentro do contexto da mitigação e da não ocorrência da DEF, tem-se o incremento de adições minerais (NEVILLE, 2016).

A partir disto, pode-se verificar que, realizando-se uma cura controlada com temperaturas da mistura abaixo de 65°C, a etringita que é formada nas primeiras horas não ficará instável, e assim não será decomposta, evitando a formação de DEF. A utilização de adições minerais para diminuir a quantidade de clínquer da mistura e adições com alumina reativa também têm sido apontadas como alternativas para a mitigação da DEF. Segundo Ramloach, Thomas e Hooton (2004), a adição mineral atua como fonte de Al₂O₃ que liga-se com o sulfato proveniente da decomposição da etringita em temperaturas maiores que 65°C, impedindo que o mesmo combine com o monossulfato resultante da decomposição quando a temperatura ficar novamente abaixo de 65°C, evitando a produção da etringita em idades em que o concreto encontra-se no estado endurecido.

2.1.3 Síntese

Buscou-se com este item, primeiramente, conceituar concreto massa e entender porque é necessário controlar e monitorar sua temperatura. Foi comentado que a elevação da temperatura de um concreto massa ocorre devido hidratação das partículas de cimento e pela baixa dissipação de calor.

Comentou-se também que devido a essa elevação da temperatura, podem ocorrer patologias de origem térmicas, como por exemplo, DEF e a fissuração térmica. A partir das bibliografias consultadas foram descritos possíveis métodos e procedimentos para diminuir o alto pico de temperatura, buscando evitar essas patologias. Dentre estes, ressalta-se a utilização de adições minerais em substituição parcial ao cimento *Portland*, que foi o objeto principal de estudo desta dissertação. Dentre as adições minerais recomendadas, destacam-se o metacaulim, a escória de alto forno (constituente do CP III – RS) que possuem teor de alumina podendo prevenir a ocorrência da DEF, e a sílica ativa por proporcionar um aumento significativo na

resistência à compressão, resultando em um menor consumo de aglomerante para uma mesma resistência.

2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

O cimento Portland é um ligante hidráulico produzido a partir da pulverização de clínqueres, constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e por uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Os clínqueres variam de 5 a 25 mm de diâmetro de material sinterizado que é produzido quando uma mistura de matérias primas com proporcionamento adequado é aquecida sob altas temperaturas. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo os mesmos autores, o processo de fabricação do cimento Portland possui as seguintes etapas: (1) obtenção da matéria prima - que são materiais calcários e argilosos, (2) moagem dos materiais, e (3) mistura em proporções adequadas - calcinando em forno rotativo com temperaturas de 1450° a 1550°C, onde, assim, as reações químicas para a formação dos compostos do cimento Portland são finalizadas. Além disso, enfatiza-se que o que diferencia diferentes tipos de cimento é o grau de moagem que o clínquer é exposto, a quantidade de cada composto presente no clínquer e a adição que lhe é imposta. Assim, pode-se relatar que a escolha do tipo de cimento utilizado para confecção do concreto massa é de grande relevância.

2.2.1 Cimento Portland

Sabe-se que cada cimento tem um tipo de comportamento e, nessa lógica, é importante conhecer o tipo de cimento que irá ser utilizado para cada finalidade. Em tese, cimentos com maior pureza, maior grau de moagem e maior quantidade de compostos C_3A e C_3S , geralmente liberam maior calor de hidratação nas primeiras idades, fazendo com que o pico de temperatura seja maior e que se tenha uma maior resistência à compressão com menor tempo. Confirmando isso, a Tabela 1 mostra o calor liberado pelos compostos do cimento segundo dados adaptados de Mehta e Monteiro (2014).

Tabela 1 - Calor liberado pelos compostos do cimento

Composto	Calor de hidratação (cal/g)	
	3 dias	90 dias
C ₃ S	58	104
C ₂ S	12	42
C ₃ A	212	311
C ₄ AF	69	98

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Nessa perspectiva, conforme a Tabela 1, percebe-se que diferentes compostos liberam diferentes quantidades de calor até 90 dias, e que há uma tendência de que os cimentos com adições minerais liberarem menor quantidade de calor nas primeiras idades e obtenham mais lentamente o ganho de resistência. Ressalta-se que os cimentos produzidos no Brasil normalmente têm adições de *filler* calcário, escória de alto forno ou material pozolânico (este normalmente é a cinza volante), sendo que todos devem ser enquadrados nas normas brasileiras que indicam a composição química e física a ser respeitada. Para a confecção de cimento de alto-forno e pozolânico, por exemplo, são: ABNT NBR 5735 e 5736, respectivamente. Na Tabela 2 abaixo, são apresentados os tipos de cimento conforme a norma brasileira, a classe de resistência e o tipo de adição.

Tabela 2 - Cimento Portland comercializado no Brasil

Nome Técnico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
Cimento portland comum (NBR 5732)	Cimento Portland comum	CP I	25	CP I-25
			32	CP I-32
			40	CP I-40
	Cimento Portland comum com adição	CP I - S	25	CP I-S-25
			32	CP I-S-32
			40	CP I-S-40
Cimento portland composto (NBR 11578)	Cimento Portland composto com escória	CP II - E	25	CP II-E-25
			32	CP II-E-32
			40	CP II-E-40
	Cimento Portland composto com pozolana	CPII - Z	25	CP II-Z-25
			32	CP II-Z-32
			40	CP II-Z-40
	Cimento Portland composto com <i>filler</i>	CP II - F	25	CP II-F-25
			32	CP II-F-32
			40	CP II-F-40
Cimento portland de alto-forno (NBR 5735)	CP III	25	CP III-25	
		32	CP III-32	
		40	CP III-40	
Cimento portland pozolânico (NBR 5736)	CP IV	25	CP IV-25	
		32	CP IV-32	
Cimento portland de alta resistência inicial (NBR 5733)	CP V - ARI	-	CP V - ARI	
Cimento portland de alta resistência inicial com adição (NBR 5733)	CP V – ARI RS	-	CP V – ARI RS	

Fonte: Adaptado de Associação de Brasileira de Cimento Portland (2002).

Como já comentado anteriormente, o tipo de cimento a ser utilizado em um concreto deve ser selecionado conforme às exigências de projeto, como, por exemplo, a resistência à compressão e a idade em que a mistura deverá atingir esta resistência. Além disso, o tipo de cimento tem influência no calor liberado pela hidratação das partículas de cimento, diminuindo ou aumentando o pico de temperatura da mistura. Assim, ressalta-se a importância da escolha do tipo de cimento, devido às suas características físicas e químicas, para a produção do concreto.

2.2.1.1 Hidratação do Cimento

O cimento Portland anidro adquire propriedade adesiva somente quando entra em contato com a água, e isso acontece porque

a reação química provocada pelo contato do cimento Portland e água resulta em produtos com características de pega e endurecimento.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), para a hidratação do cimento Portland, dois mecanismos de hidratação ocorrem. O primeiro mecanismo é tratado como hidratação por dissolução-precipitação, ocorrendo a dissolução dos compostos anidros em constituintes iônicos, formando hidratos em solução e, devido à baixa solubilidade destes hidratos, ocorre uma eventual precipitação resultante da supersaturação da solução. O segundo mecanismo trata-se da hidratação no estado sólido ou topoquímico do cimento, ocorrendo reações diretamente na superfície do cimento anidro, sem que os compostos entrem em solução. Nota-se que o primeiro mecanismo ocorre nos estágios iniciais da hidratação do cimento, enquanto o segundo, ocorre em estágios posteriores, quando a mobilidade dos íons na solução se torna restrita.

Coelho (2012) cita que o cimento é responsável por uma grande liberação de calor que muda de acordo com a idade do concreto, chamado de calor de hidratação. Este, responsável pela elevação da temperatura do concreto, é geralmente medido na unidade de calorías por grama. A liberação de calor é influenciada pelo consumo de cimento empregado na mistura, pela proporção dos componentes do cimento (quantidade de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF), bem como pela adição mineral (quando utilizada) e pela maneira que é realizada a cura do concreto. Na Tabela 3 são mostrados os compostos anidros do cimento e também seus teores usuais.

Tabela 3 - Compostos Anidros do cimento

Constituinte	Notação Científica	Fórmula Química	% em massa das diferentes fases no clínquer
Silicato tricálcico	C ₃ S	3CaO.SiO ₂	60-65
Silicato dicálcico	C ₂ S	2CaO.SiO ₂	10-20
Aluminato tricálcico	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	8-12
Ferroaluminato tetracálcico	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	8-10

Fonte: Adaptado de Nonat (2014)

Cimentos com maiores teores dos compostos anidros C₃S e C₃A liberam maior calor de hidratação nas primeiras idades, pois esses são os compostos que hidratam com maior rapidez devido à sua alta reatividade. Assim, quanto maior a porcentagem destes compostos no cimento, maior será a tendência de se obter resistência inicial com maior rapidez.

Além dos compostos químicos, fatores físicos - como o grau de moagem - influenciam na hidratação das partículas de cimento. Portanto, quanto maior o grau de moagem do cimento (cimento mais fino) mais reativo ele é, acarretando na aceleração do processo de hidratação devido à sua alta superfície específica.

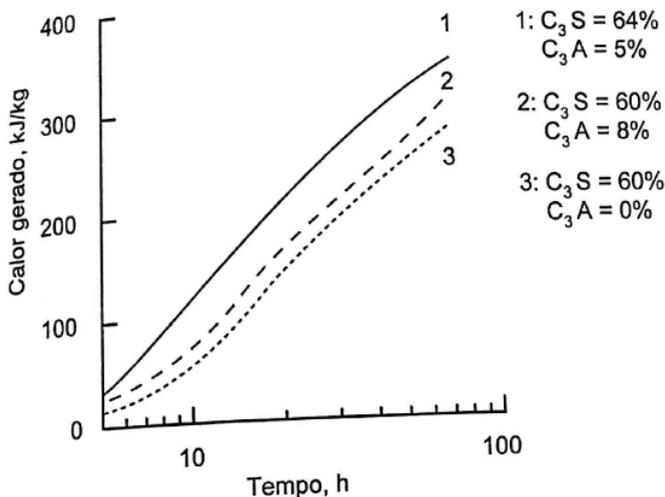
Para Neville (1997), existem várias formas de medir o grau de hidratação do cimento: (1) Quantidade de Ca(OH)₂ na pasta; (2) Calor desenvolvido na hidratação; (3) Massa específica da pasta; (4) Quantidade de água quimicamente combinada; (5) Quantidade de cimento não hidratado; (6) Indiretamente pela resistência da pasta hidratada. Assim, enfatiza-se que, para auxiliar no combate a elevados picos de temperatura de um concreto massa, deve-se ter o cuidado em escolher o tipo de cimento utilizado, pois aponta-se que o calor liberado pela hidratação das partículas do cimento é influenciado por características físicas e químicas deste insumo.

2.2.1.2 Calor de Hidratação

O processo de hidratação das partículas de cimento implica na liberação de energia em forma de calor, devido à reação exotérmica

que faz com que a temperatura da mistura aumente. A Figura 1 ilustra a quantidade de calor gerada por diferentes composições dos compostos do cimento (C_3S e C_3A).

Figura 2- Calor gerado dos compostos presentes em diferentes tipos de cimento ao longo do tempo



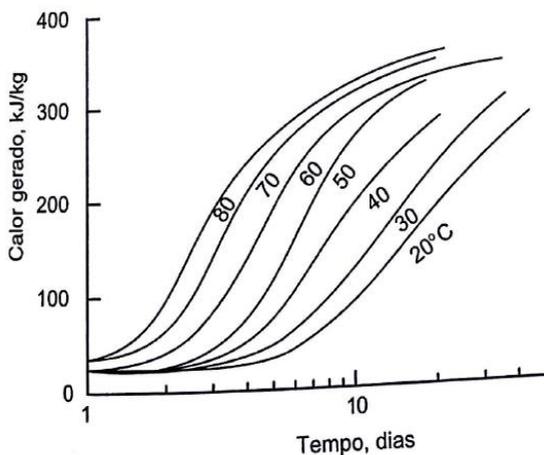
Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Conforme visualizado na Figura 1, o calor liberado varia conforme o cimento utilizado, pois há a variação dos seus compostos. Além da composição do cimento, existem outras características que exercem influência na liberação do calor conforme o tipo de cimento, tais como, a presença ou não de adição mineral e a área específica.

Com adições minerais ao cimento como, por exemplo, o metacaulim e a sílica ativa, as reações poderão ocorrer de forma mais rápida por conta da finura do material, o que aumentará os pontos de nucleação e assim podendo resultar em um aumento na temperatura final da mistura. A temperatura de cura da mistura também fará com que o calor de hidratação gerado aumente como se pode verificar na Figura 2, que mostra o calor liberado de pastas de cimento quando curadas em diferentes temperaturas para uma relação a/c de 0,4. A presença de um catalisador, como por exemplo a temperatura, no

processo de hidratação das partículas de cimento, é um fator que modifica o processo de hidratação das partículas e, conseqüentemente, o calor gerado.

Figura 3 - Calor gerado devido à temperatura de cura ao longo do tempo



(c)

Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Quando ocorre a liberação de calor das partículas de cimento, tem-se uma elevação da temperatura do concreto devida à hidratação das partículas de cimento que é regida pelo tipo de cimento utilizado, o consumo do cimento, a relação água/cimento da mistura e fatores externos a que a mistura é exposta. Os compostos de cimento Portland são produtos de reações sob alta temperatura que não estão em equilíbrio, estando em estado de alta energia. Quando as partículas de cimento são hidratadas, os compostos reagem com a água para adquirir estados estáveis de baixa energia e este processo é acompanhado pela liberação de energia em forma de calor (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Portanto, a reação da hidratação da partícula de cimento é uma reação exotérmica, reação que libera energia em forma de calor. Esse calor liberado por este processo, em concreto massa, necessitando de cuidados devidos às patologias térmicas, devidos à

baixa condutibilidade térmica do material e à elevada dimensão das peças.

Para Coelho (2012), a temperatura final do concreto depende da temperatura de seu lançamento e do calor liberado pela hidratação do cimento, e isso é vinculado ao consumo de cimento da mistura e à perda ou ganho de calor devido à temperatura do ambiente. Se as condições de hidratação não forem adiabáticas³, a quantidade de calor de hidratação não é a grandeza mais importante, e sim, a velocidade com que esse calor é gerado e liberado.

A elevação da temperatura do concreto ocorre devida a fatores intrínsecos e, também, a fatores externos ao concreto. Os principais fatores responsáveis por fazer com que a elevação da temperatura seja maior ou menor estão dispostos no tópico a seguir.

2.2.2 Adições minerais

Neville (1997) afirma que a utilização de adições minerais no cimento reduz o calor de hidratação gerado nas idades iniciais devido a menor presença de clínquer na mistura e porque as reações das adições ocorrerem de forma mais lenta. As adições mais utilizadas são sílica ativa, pozolanas naturais ou de argilas calcinadas e escória de alto forno.

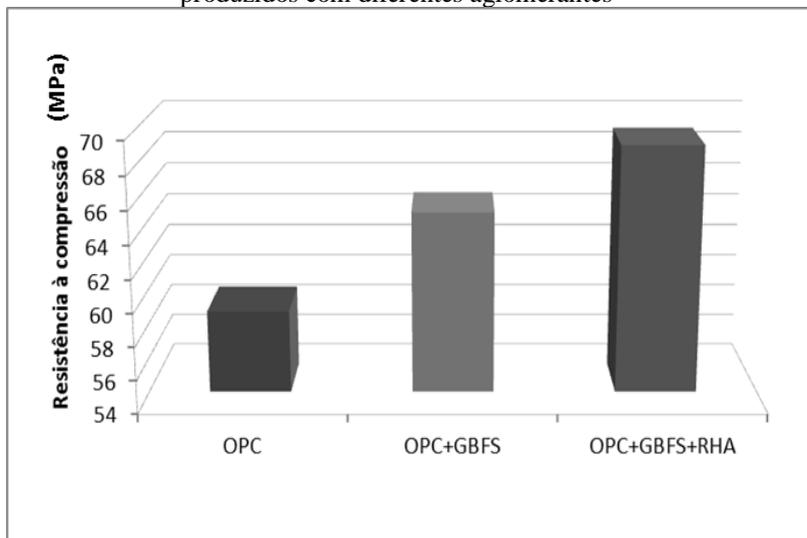
Segundo Malhotra, Carette e Sivasundaram (1992), as adições minerais como cinza volante e escória de alto forno, quando adicionadas ao cimento, não somente reduzem a quantidade de clínquer, mas também são utilizadas para que as propriedades de durabilidade do concreto sejam aprimoradas. Em um estudo, Sharma e Pandey (1999) concluíram que com a substituição em 10% de cinza volante e de escória granulada de alto forno, em relação à massa do cimento, os produtos de hidratação formados foram praticamente os mesmos.

Singh, Rai e Chaturverdi (2002) analisaram a influência na hidratação do cimento e na resistência à compressão, da adição de escória de alto forno e cinza de casca de arroz em pasta de cimento.

³ Segundo Liduário (2006), a condição de cura adiabática não permite troca de calor com o meio externo, ou seja, é a condição na qual um sistema encontra-se termodinamicamente equilibrado.

As substituições foram feitas em massa. Foram produzidas três pastas de cimento: (1) Referência (sem adição); (2) Com adição de 10% de Escória; (3) Com adição de 10% de Escória e 10% de Cinza de casca de arroz. Nos resultados, para o estado fresco, ocorreu à perda de trabalhabilidade da pasta devido à alta superfície específica da cinza e da escória (a superfície específica da escória estudada era de 4280 cm²/g já o do cimento foi de 3940 cm²/g); já para o estado endurecido, foi visto com ensaio em Difractometria de raios X que, adicionando cinza de casca de arroz e escória simultaneamente, a portlandita não foi detectada, demonstrando que a cinza de casca de arroz tem um alto índice pozolânico. Quando foi adicionada a cinza de casca de arroz (RHA) e a escória granulada de alto forno (GBFS) na mistura, verificaram o aumento da resistência à compressão aos 28 dias quando comparada com a resistência do concreto de referência, conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com diferentes aglomerantes



Fonte: adaptado de Singh, Rai e Chatuverdi, 2002.

Nessa mesma perspectiva, no estudo de Carmo e Portella (2008), os concretos produzidos com adições minerais, independentemente do consumo de aglomerante (valores entre 180 e

650 Kg/m³), obtiveram melhorias na resistência mecânica e uma redução no custo. As adições utilizadas pelos autores foram três tipos de sílica ativa e o metacaulim, sendo que as características desses materiais são expostas na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Composição Química das adições minerais

Compostos	Adições minerais			
	Sílica ativa (ind. Silício-metálico)	Sílica ativa (ind. Ferro-silício)	Sílica ativa (ind. Ferro-silício)	Metacaulim
SiO ₂ (%)	94	90	83	51,52
Al ₂ O ₃ (%)	0,06	1	2,5	40,18
Fe ₂ O ₃ (%)	0,03	2,9	2,5	1,23
CaO (%)	0,5	0,1	0,8	2
MgO (%)	1,1	0,2	3	0,12
Álcalis (%)	0,1	2,2	2,3	0,53
Perda ao fogo (%)	2,5	2,7	3,6	2,01

Fonte: Adaptado de Carmo e Portella, 2008.

Portanto, salienta-se através desses estudos que o uso de adições minerais faz com que a taxa de elevação da temperatura de um concreto seja diminuída, devido à substituição do clínquer pela adição, além de proporcionar uma melhora de resistência à compressão, podendo haver uma melhora no custo final do produto. Dentre as adições minerais supracitadas tem-se a escória de alto forno, metacaulim e sílica ativa que serão objetos de estudo desta dissertação.

2.2.2.1 Escória granulada de alto forno

Segundo Mehta e Monteiro (2014), quando ocorre a produção do ferro fundido, a escória deste é resfriada ao ar, ou então, quando líquida é resfriada por uma combinação de ar e água. O produto resfriado pela água é denominado escória granulada e o material resfriado rapidamente ao ar e com quantidade limitada de água é chamado de escória peletizada. Segue na tabela 5 a composição química de algumas escórias brasileiras.

Tabela 5 - Composição química das escórias brasileiras.

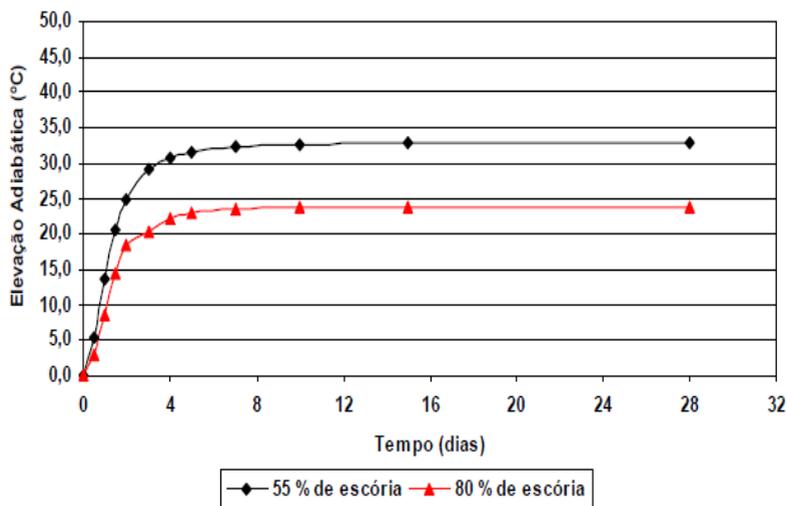
Componente (% em massa)	Procedência							
	Usiminas	Cosipa	CSN	Belgo	Sete Lagoas	Acesita	CST	Açominas
SiO ₂	35,15	33,85	32,90	38,12	40,07	43,97	35,47	35,39
Al ₂ O ₃	12,79	13,00	15,44	19,44	13,65	13,21	13,20	13,88
CaO	43,58	42,22	40,97	34,97	35,07	34,89	41,97	40,99
Fe ₂ O ₃	0,37	0,68	0,91	1,30	2,53	0,40	0,83	1,97
FeO	0,29	0,33	0,43	0,79	1,44	0,22	-	-
MgO	5,48	7,08	5,81	1,63	1,95	3,67	5,69	6,31
K ₂ O	0,45	0,70	0,73	1,88	1,94	1,86	0,28	0,49
Na ₂ O	0,13	0,21	0,19	0,12	0,19	0,12	0,10	0,12
TiO ₂	0,54	0,48	0,49	0,62	0,21	0,16	0,53	-
Mn ₂ O ₃	0,88	0,69	0,86	1,86	0,64	0,85	0,84	-
SO ₃	0,05	0,12	-	0,02	-	0,02	0,07	-
S	1,10	0,67	1,03	0,10	0,08	0,07	0,87	0,87
Fe	0,07	0,13	0,25	0,37	0,74	0,21	-	-
Natureza da Escória	básica	básica	básica	ácida	ácida	ácida	básica	básica

Fonte: BATTAGIN e ESPER, 1988.

O mecanismo de hidratação da escória é realizado por dissolução, que ocorre devido ao ataque hidroxílico - ataques por íons de OH⁻ - enquanto a do clínquer é realizada por ataque hidrolítico - ação das moléculas da água (DRON, 1982). O pH do meio é importante para a hidratação das partículas de escória, pois a elevação do pH aumenta a solubilidade da escória (VOINOVITCH, RAVERDY e DRON, 1982). Além disso, por esse mecanismo ser mais lento que o do cimento Portland comum, pode-se dizer que o cimento com escória apresenta uma tendência de menor taxa de liberação de calor.

Ainda nessa perspectiva, no trabalho de Equipe de Furnas (1997), foi encontrada a curva de elevação adiabática de temperatura para cimentos com substituição de 55% e 80% de escória para um consumo de cimento de 320 Kg/m³, que indicou que, durante as primeiras 72 horas, o calor liberado e acumulado foi menor do que o do cimento sem a adição desse material. Mostrou ainda que, conforme a substituição de cimento por escória aumentava, também foi diminuído o calor liberado pela mistura e o calor acumulado.

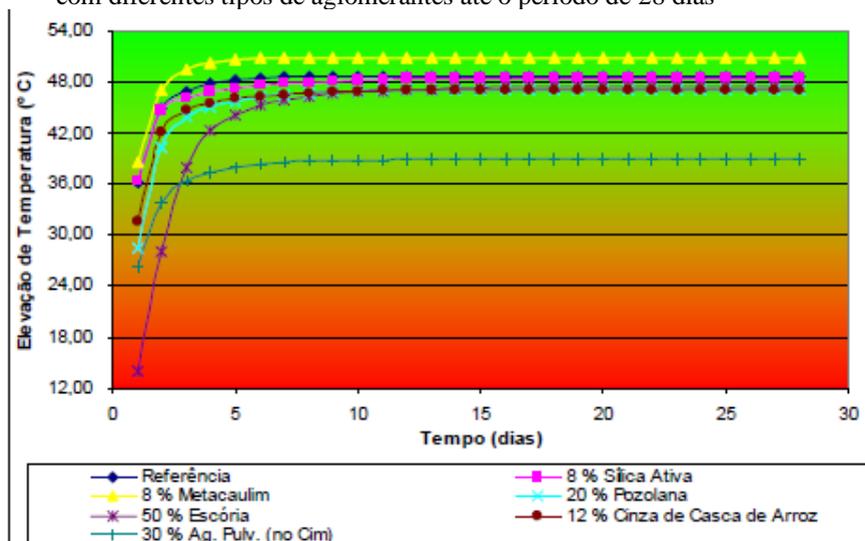
Figura 5 - Elevação da Temperatura adiabática de concretos produzidos com escória ao longo do tempo



Fonte: Equipe de Furnas, 1997.

Em outro trabalho realizado por Liduário *et al.* (2008), afirma-se que o ganho de temperatura por concretos com diferentes tipos de aglomerantes, ensaiados em um calorímetro adiabático, foi maior para concretos com os aglomerantes metacaulim, sílica ativa e referência durante os três primeiros dias em relação aos demais. Já o concreto produzido com escória foi o que teve menor liberação de calor durante este período em comparação aos outros aglomerantes supracitados, conforme verificado na figura 6 abaixo. Os concretos foram produzidos com um consumo de aglomerante de 380 Kg/m³. A legenda Pozolana a que se refere a citada figura representa o concreto produzido com cinza volante.

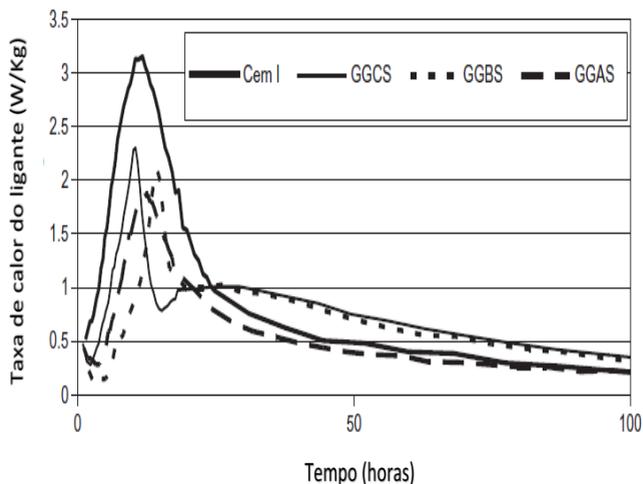
Figura 6 - Elevação da temperatura adiabática de concretos produzidos com diferentes tipos de aglomerantes até o período de 28 dias



Fonte: Liduário *et al.*, 2008.

Corroborando com isso, pode ser verificado no estudo de Beushausen, Alexander e Ballim (2012), que analisaram a liberação de calor em concreto com três tipos de escórias utilizando um calorímetro isotérmico a uma temperatura de 20°C, que todas as escórias, escória de alto forno (GGBS), *ground granulated Corex slag* (GGCS) e escória de forno a arco (GGAS), obtiveram uma taxa de liberação de calor menor do que a do concreto de referência. Além disso, a escória de alto forno (GGBS), que é uma das adições que foram estudadas neste trabalho, gerou uma taxa de liberação de calor menor que a do concreto de referência. Isso pode ser visto na Figura 7, que mostra a taxa de liberação de calor das misturas com a substituição e a referência (sem substituição).

Figura 7 - Taxa de liberação de calor de diferentes misturas com o passar até o período de 100 horas



Fonte: adaptado de Beushausen, Alexander e Ballim (2012).

A Figura 7 mostra, para idades iniciais, que as escórias diminuem a taxa de liberação de calor, devido à demora a ocorrência da reação. Nesse sentido, Darquennes *et al.* (2016) verificaram que a liberação de calor acumulado, em um calorímetro semi-adibático, para idades iniciais é maior em um cimento que não contém adições minerais se compará-la a de um cimento que contenha adição mineral de escória granulada de alto forno. Também foi verificada que houve uma melhora no quesito de durabilidade da estrutura quanto a ataques de cloreto no cimento que continha adição mineral de escória de alto forno.

Castellano *et al.* (2016) verificaram que a substituição de clínquer por escória de alto forno foi favorável para a resistência à compressão da mistura curada em temperatura de 20°C e com relação a/c de 0,3 até o teor de 40% em substituição em 365 dias de cura. Já para o teor de 80% em substituição, a resistência caiu, conforme pode ser verificado abaixo na Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência à compressão de concretos devida a adição mineral escória de alto forno

Temperatura de cura (°C)	Idade (dias)	a/c = 0,30		
		Referência	ESC 40%	ESC 80%
20	2	60,7	37	14,1
	7	69,3	58,5	33,6
	28	85,3	81,4	64,5
	90	92,2	89,4	72,6
	365	98,8	101,5	78,4

Fonte: adaptado de Castellano *et al.* (2016)

Conforme observado na tabela 6, a escória de alto forno atrasa o processo de hidratação devido a sua reação demorar a ocorrer. Porém, para a substituição de 40% e 80% (ESC 40 e 80), têm-se um grande ganho de resistência entre os dias 2 e 28, o que não ocorre com o concreto de referência. Entretanto, um alto teor de adição de escória de alto forno prejudica até mesmo em idades avançadas como demonstrado na substituição de 80% (ESC 80), em que a resistência é menor para todas as idades. No caso da substituição de 40% na idade de 365 dias, a resistência à compressão superou o concreto referência. Situação semelhante foi relatada por LIU *et al.* (2017), que verificaram que a substituição do cimento por escória em 50%, acarreta em benefícios para a resistência à compressão em idades posteriores aos 28 dias de cura.

Ou seja, pode-se verificar, através desses trabalhos, que a tendência à liberação de calor de hidratação da escória de alto forno é menor do que a do clínquer em idades iniciais, acarretando num concreto que não atinja um pico elevado de temperatura.

2.2.2.2 Pozolanas no Concreto

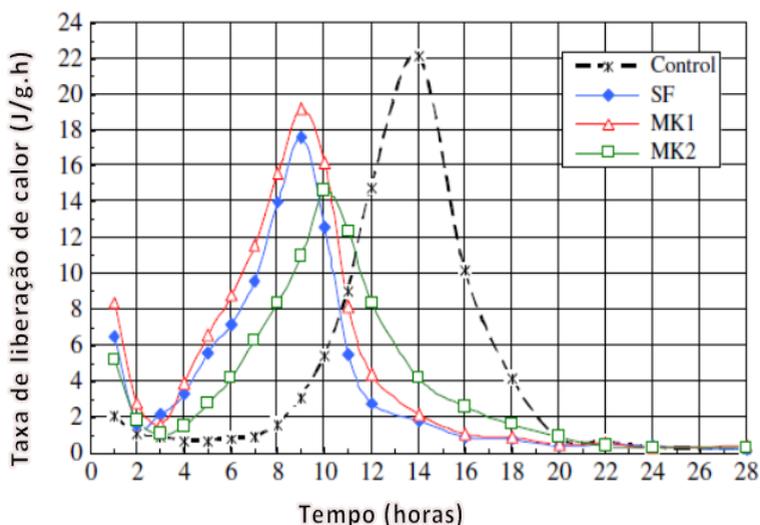
O efeito das pozolanas no concreto acontece por conta da sua reação com o hidróxido de cálcio presente, que produz C-S-H e densifica a microestrutura do concreto, diminuindo sua porosidade e aumentando a sua resistência à compressão.

Dotto *et al.* (2004) verificaram que a reação da pozolana, sílica ativa, com a portlandita forma C-S-H, que é o principal

responsável pela resistência da pasta de cimento hidratada. Através dessa reação também ocorre o aumento da densidade pelo efeito micro *filler*, pelo qual os vazios da mistura são preenchidos pelas micropartículas. Esses fatores acarretam em uma maior resistência mecânica e contribuem na durabilidade devido a ataques de cloretos e sulfatos. Mehta (1981) estudou uma pozolana chamada de Terra de Santorin, e verificou em seus resultados de durabilidade do concreto, que os mesmos foram satisfatórios e demonstraram que a adição dessa pozolana contribuiu para a melhora tanto da resistência quanto da durabilidade do concreto.

Além disso, Kadri *et al.* (2011) mostraram que a adição de sílica ativa e metacaulim na mistura faz com que ocorra uma aceleração no processo de hidratação das partículas de cimento. Isso ocorre devido as micropartículas de metacaulim e sílica ativa atuarem como pontos heterogêneos de nucleação aonde os primeiros hidratos podem precipitar e assim diminuir o período de dormência e consequentemente acelerar o processo de hidratação. Além disso, há uma menor liberação de calor quando comparada com a da referência, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Liberação do calor de hidratação de pastas produzidas com diferentes aglomerantes ao longo de 28 horas



Fonte: adaptado de Kadri *et al.* (2011)

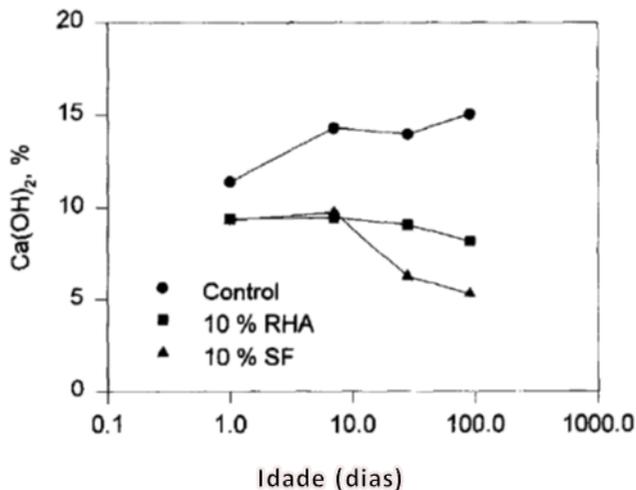
Em outro estudo, Zhang e Malhotra (1995) chegaram ao resultado que as substituições em 10% de sílica ativa e metacaulim geraram uma melhora nas propriedades mecânicas para todas as idades quando comparados com as do concreto de referência. Os autores atribuíram os resultados ao aumento de pontos de nucleação, ocasionado por essas adições minerais, pelo efeito *microfiller* e por reações pozolânicas.

Zhang, Lastra e Malhotra (1996) analisaram o efeito da sílica ativa (SF) e da cinza de casca de arroz no concreto (RHA) e concluíram, através da análise de imagens de elétrons retransmitidas (BEI)⁴, que a adição das mesmas no concreto acarretam em um efeito benéfico quanto ao refinamento dos poros e uma diminuição da quantidade de portlandita na zona interfacial entre pasta e agregado, devido às reações pozolânicas dos materiais. Ou seja, os concretos com as adições apresentaram uma resistência maior se comparados ao concreto de referência.

Nesse sentido, as figuras 9 e 10 mostram que a menor a quantidade de portlandita resulta em uma melhora na densificação da zona interfacial, ocorrendo um refinamento dos poros para o concreto aos 28 dias, resultando em um aumento na resistência à compressão do concreto.

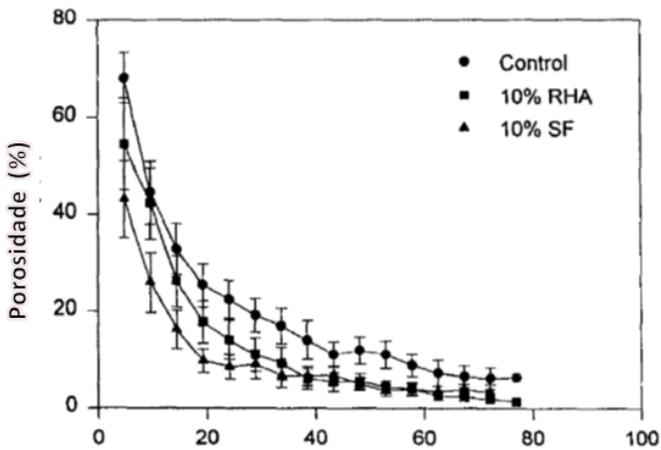
⁴ Um feixe de elétrons é emitido em direção da amostra, interagindo com a mesma enquanto a atravessa. A interação dos elétrons transmitidos, através da amostra, forma uma imagem que é focada e ampliada em um dispositivo de imagem.

Figura 9 - Quantidade de Ca(OH)_2 presente nas misturas com diferentes tipos de aglomerantes durante o período de 100 dias



Fonte: adaptado de Zhang, Lastra e Malhotra (1996)

Figura 10 - Porosidade dos concretos aos 28 dias



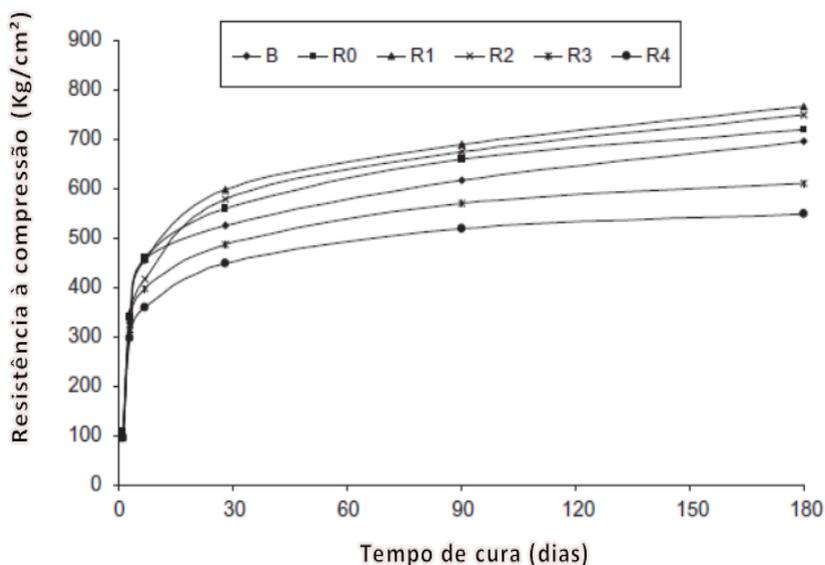
Distância da superfície do agregado (micron)

Fonte: adaptado de Zhang, Lastra e Malhotra (1996)

Langan, Weng e Ward (2002) estudaram os efeitos da Sílica Ativa e da Cinza volante no calor de hidratação do Cimento Portland através das substituições em massa do clínquer por cinza volante (10, 20, 30%) e sílica ativa (5 e 10%), para relações a/c 0,35; 0,4 e 0,5. Assim, os autores concluíram que, na presença de sílica ativa, o processo de hidratação do cimento é acelerado e quanto maior é a relação a/c, mais evidenciado fica este efeito. Para a cinza volante, também ocorre um aumento na hidratação inicial do cimento. Porém, quanto maior a relação a/c, maior é o período de dormência do concreto, o que acarreta e uma maior demora em ocorrer o processo de hidratação.

Nessa mesma perspectiva, Shatat (2013) estudou a influência da substituição de metacaulim e da cinza de casca de arroz em pasta de cimento. Após as análises dos resultados dos ensaios realizados, concluíram que a presença de adições de metacaulim juntamente com a cinza de casca de arroz aumentaram resistência à compressão, bem como reduziram a porosidade total quando comparadas com a da pasta de cimento de referência e a pasta com apenas metacaulim. Assim, verifica-se na Figura 11, o aumento de resistência devido ao tempo de cura para cada mistura do estudo.

Figura 11- Ganho de resistência devido à adição de pozolanas



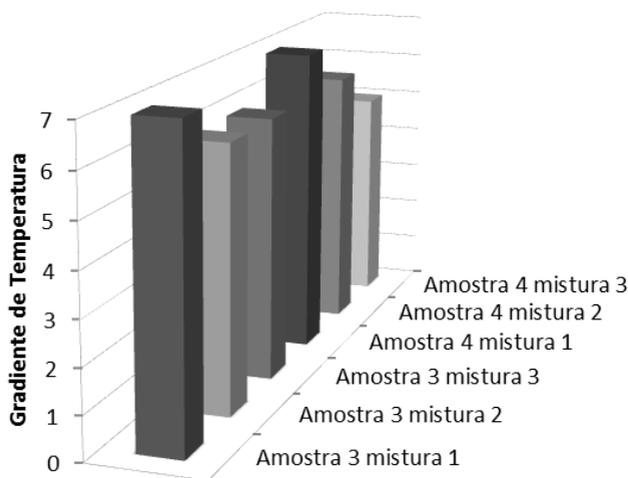
Fonte: adaptado de Shatat, 2013.

Conforme a Figura acima, as pastas ensaiadas foram: (B) Pasta referência sem substituições; (R0) Pasta com substituição em 25% de metacaulim; (R1) 20% de metacaulim e 5% de cinza de casca de arroz; (R2) 15% de metacaulim e 10% de cinza de casca de arroz; (R3) 10% de metacaulim e 15% de cinza de casca de arroz; (R4) 5% de metacaulim e 20% de cinza de casca de arroz; (R5) 25% de cinza de casca de arroz. O que se observa é que o ganho de resistência para as primeiras idades aconteceu devido ao efeito *filler* e criação de pontos de nucleação das adições de metacaulim e da cinza de casca de arroz. Já para as idades avançadas, o aumento das resistências foi devido às reações pozolânicas já explicadas.

Conforme já citado, o tipo de cimento faz diferença na liberação de calor de hidratação, em outro estudo Schakow *et al* (2016), verificaram que quanto maior é o teor de pozolana no cimento, em um calorímetro semiadiabático, menor é a taxa de liberação de calor. Nesse sentido, pode ser observado na Figura 12 que as misturas

com maiores teores de pozolanas apresentaram menor gradiente de temperatura⁵.

Figura 12 - Gradiente de temperatura nas amostras 3 e 4 (°C) com diferentes tipos de aglomerantes



Fonte: adaptado de Schakow (2016).

Conforme a Figura acima, para a mistura 1, foi utilizado o cimento CP-II-Z-32, que tem menor quantidade de material pozolânico do que na mistura 2 (CP IV) e 3 (CP IV com gelo), e devido a isso, o gradiente de temperatura foi maior para a primeira do que para as outras duas misturas em ambas as amostras.

Narmluk e Nawa (2011) e Deschner *et al.* (2013) estudaram o efeito da adição de cinza volante na cinética da hidratação do cimento Portland em diferentes temperaturas de cura. Para as primeiras idades, os concretos curados a temperaturas mais altas adquirem maiores resistências, devido à aceleração das reações tanto de hidratação das partículas de cimento quanto às pozolânicas. Pode-se dizer com este estudo que a temperatura de cura e também o teor de

⁵ Gradiente de Temperatura é a variação da temperatura com o tempo. Quanto maior é esta variação de temperatura maior é o risco de ocorrer fissuras na estrutura.

substituição de clínquer por pozolana tem grande influência no ganho de resistência dos concretos.

As reações pozolânicas acarretam em um benefício para a resistência do concreto, já que consomem o Ca(OH)_2 presente no concreto transformando-o em C-S-H, principal produto de hidratação para a resistência do concreto. Pozolanas como metacaulim e sílica ativa são mais reativas do que a cinza volante, apresentam maiores resistências iniciais e aos 28 dias. Já o concreto contendo cinza volante normalmente ultrapassa o concreto produzido somente com cimento Portland após os 28 dias de cura.

2.2.2.3 Metacaulim

Segundo Mehta e Monteiro (2015), metacaulim é uma pozolana que provém da calcinação da caulinita, que é um material argilo-mineral e que tem uma reatividade intensificada devido ao processo de calcinação, e também de moagem deste material calcinado.

Existem normas que regem os requisitos para a utilização do metacaulim com o cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, como a norma brasileira ABNT NBR 15894-1:2010. A tabela 7 abaixo, mostra os requisitos físicos e químicos para a utilização do metacaulim no Brasil.

Tabela 7 - Requisitos Químicos e Físicos para utilização de metacaulim no Brasil.

Componente	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO ₂	%	≥ 44,0 e ≤ 65,0	ABNT NBR NM 22 ou ABNT NBR 14656
Al ₂ O ₃	%	≥ 32,0 e ≤ 46,0	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
CaO + MgO	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
SO ₃	%	≤ 1,0	ABNT NBR NM 16
Na ₂ O	%	≤ 0,5	ABNT NBR NM 17
Equivalente alcalino em Na ₂ O	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 17
Umidade	%	≤ 2,0	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	%	≤ 4,0	ABNT NBR NM 18
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 µm	%	≤ 10,0	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105	ABNT NBR 15894-2
Índice de atividade pozolânica Chapelle (opcional)	m ³ Ca(OH) ₂ /tmaterial	≥ 750	ABNT NBR 15895
Área específica B.E.T. (opcional)	m ² .g ⁻¹	≥ 15	ASTM C-1069

A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após determinação do teor de umidade a (105 ± 5) °C.

A critério do consumidor, podem ser solicitados os ensaios de atividade pozolânica pelo método preconizado pela ABNT NBR 15895 (método de Chapelle) e ensaio para determinação da área específica pelo método ASTM C-1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), que devem, quando solicitados, atender aos valores mínimos apresentados na Tabela 1.

NOTA Equivalente alcalino em Na₂O → Na₂Oeq = 0,658 %K₂O + %Na₂O.

Fonte: ABNT NBR 15894-1, 2010.

Alguns estudos que estão citados abaixo apresentam a influência da substituição do clínquer por metacaulim, demonstrando a importância desta adição mineral nas propriedades mecânicas e na questão de durabilidade das misturas.

Ambroise, Maximilien e Pera (1994) concluíram que a substituição de clínquer por metacaulim acelera o processo de hidratação das partículas por conta do aumento dos pontos de nucleação, e dessa forma, acontece a redução na quantidade de portlandita – devida à reação pozolânica- fazendo com que ocorra um refinamento dos poros da mistura.

Zhang e Malhotra (1995) concluíram que a adição de metacaulim proporciona um aumento nas propriedades das resistências à compressão, à tração e módulo de elasticidade de concretos. Também demonstraram que esses concretos têm menor tempo de início e fim de pega quando comparados com o concreto de

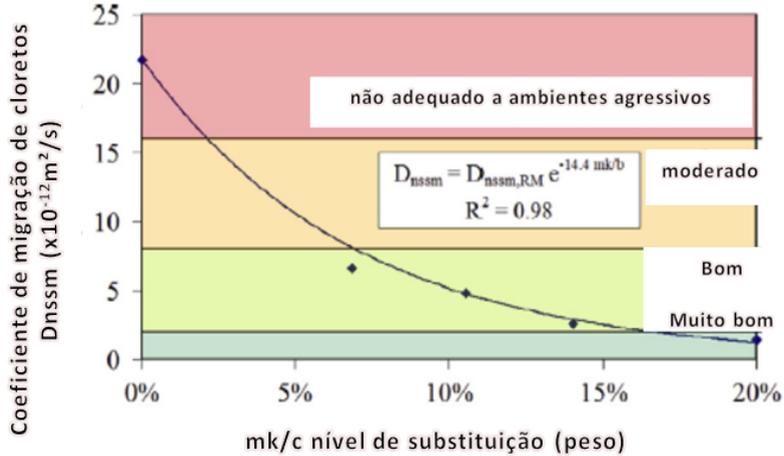
referência, indicando assim, que a substituição de metacaulim acelera o processo de hidratação.

Frías e Cabrera (2000) analisaram a relação entre a porosidade das pastas de cimento e o seu grau de hidratação, sendo que as pastas de cimento estudadas tiveram substituições de metacaulim em teores de (0, 10, 15, 20 e 25%) para uma relação a/c de 0,5 curados a 20°C para as idades de (1, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 e 360 dias). Os autores concluíram que, entre os dias 28 e 56, houve uma diminuição da porosidade total das pastas para todas as misturas, sendo que o método utilizado para essa verificação foi o de porosimetria de mercúrio. Além disso, a adição de metacaulim fez com que ocorresse um refinamento nos poros das misturas quando comparado ao das misturas feitas sem a substituição, ou seja, obteve-se uma boa correlação entre a porosidade e o grau de hidratação das pastas. Corroborando com isso, Khatib e Wild (1996) estudaram a distribuição dos poros de pastas com a substituição de clínquer por metacaulim e concluíram que esta substituição faz com que aconteça um refinamento nos poros.

Barata e Dal Molin (2002) verificaram que o efeito da adição mineral (metacaulim) fez com que o concreto desenvolvesse uma melhora na resistência à compressão, quando comparado com a do concreto de referência; e segundo Zhang e Malhotra (1995), a adição de metacaulim no concreto faz com que este tenha uma melhora quanto à durabilidade.

Ainda em relação a durabilidade, Badogiannis *et al.* (2015) estudaram a durabilidade de concreto autoadensável com a adição de metacaulim e concluíram que a substituição de clínquer por metacaulim fez com que a durabilidade do concreto melhorasse conforme aumentava o teor da substituição. Um gráfico do estudo que demonstra essa situação é o do coeficiente de migração de cloretos, devido ao aumento da quantidade de metacaulim na mistura, conforme visto na figura 13.

Figura 13 - Migração de cloretos devido à substituição de clínquer por metacaulim.



Fonte: adaptado de Badogiannis *et al.* (2015)

A figura 13 mostra que quanto maior a substituição de clínquer por metacaulim, menor é o coeficiente de migração de cloretos, ficando em zonas melhores do que o concreto de referência. Estas zonas variam de zona não suscetível a ambientes agressivos (caso do concreto de referência sem a substituição por metacaulim) até a zona muito boa (onde fica o concreto com teor de 20% de substituição).

El-Diadamony (2015) cita que a substituição de cimento por metacaulim nas pastas estudadas apresentaram um aumento na resistência à compressão e apresentaram melhoras em quesito de durabilidade. Taфраoui, Escadeilla E Vidal (2016) estudaram a durabilidade de concretos de ultra alto desempenho com a adição de metacaulim, sendo que a conclusão que os autores obtiveram foi que o metacaulim apresenta melhoras no quesito de durabilidade para este tipo de concreto.

Por fim, ressalta-se que, através dos estudos supracitados, as propriedades do metacaulim fazem com que as reações de hidratação das partículas do cimento sejam aceleradas, obtendo-se assim, resistências maiores em idades iniciais. A substituição de clínquer por metacaulim faz com que seja possível obter maior resistência com

mesma relação a/c de um concreto de referência, além de que, o metacaulim promove um refinamento dos poros da mistura, obtendo uma melhora no quesito de durabilidade e no ataque de cloreto e sulfatos.

2.2.2.4 Sílica ativa

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a sílica ativa é um subproduto da indução de fornos a arco nas indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício. É um produto altamente pozolânico e tem área superficial alta, sendo que o tamanho de suas partículas chega a ser de duas ordens de grandeza menores do que a do cimento. Malhotra, Carette e Sivasundaram (1992), indicam que a sílica ativa começou a ser estudada originalmente na Noruega no início de 1960, mas, somente em 1980 é que uma organização de pesquisadores do Canadá e dos Estados Unidos da América começou a investigar a sílica ativa.

No estudo de Feldman e Cheng-yi (1985), verifica-se que conforme foi aumentando o teor de substituição de clínquer por sílica ativa, maiores foram as densidades das pastas produzidas, devido a uma quantidade menor de incorporação de ar ocasionada por um melhor empacotamento da mistura. Além disso, foi verificado que houve um refinamento dos poros com a adição de sílica ativa na mistura.

Salienta-se que a sílica ativa tem como efeito a promoção de um aumento de resistência do concreto devido ao efeito *filler*, através do aumento dos pontos de nucleação e à reação pozolânica. Então, para uma mesma mistura, quando substituído clínquer por sílica ativa, poderá ser utilizada uma relação a/c maior para uma mesma resistência, diminuindo o consumo de aglomerante total e resultando em uma diminuição do pico de temperatura do concreto.

Segundo Malhotra, Carette e Sivasundaram (1992), a sílica ativa contribui com muitos mecanismos para a melhora das propriedades do concreto, e isso inclui o aumento da resistência da ligação entre a pasta e agregado reduzindo o tamanho da região de cristais de CH, (1) pelo aumento dos pontos de nucleação, fazendo com que os cristais de CH fiquem menores e aleatoriamente orientados; (2) reduzindo a exsudação e aumentando a coesão da mistura; e (3) reduzindo a espessura da fraca zona de transição. Nesse

sentido, ainda se ressalta que, com a adição de sílica ativa, ocorre a diminuição da portlandita devido à reação pozolânica e o aumento da densidade do sistema pelo efeito *filler*, acarretando em um refinamento da estrutura porosa.

Shannag (2000) estudou o concreto de alta resistência com adição de pozolana natural e sílica ativa e avaliou que, no concreto com a adição de sílica ativa, ocorre um refinamento dos poros na matriz, que faz com que ocorra um ganho de resistência. Além da resistência, ressalta-se que Dotto *et al.* (2004) demonstraram em seus experimentos que a sílica ativa ajuda na proteção contra a corrosão devido à densificação da microestrutura e aumento da resistividade elétrica da mistura.

Kadri e Durval (2009) verificaram a influência da adição de sílica ativa na hidratação do cimento e demonstraram que a substituição do clínquer por sílica ativa promove uma aceleração na taxa de hidratação nas primeiras idades. A explicação para este acontecimento foi que o fino da sílica ativa criou novos pontos de nucleação, fazendo com que os hidratos se desenvolvessem. Os autores ainda argumentaram que, devido à substituição do cimento por sílica ativa, houve uma diminuição do calor total liberado pela mistura e ocorreu um aumento na resistência, devido à reação pozolânica.

Oertel *et al* (2014) analisaram a influência do tipo de sílica na hidratação em concretos de ultra-alto-desempenho e concluíram que a sílica ativa acelerou a hidratação da alita, aumentando a superfície para que ocorresse a nucleação das fases do C-S-H, e fazendo com que o processo de hidratação do cimento se desenvolvesse de forma mais rápida nas primeiras idades. Portanto, a sílica ativa promove resistência à compressão maior do que a de um concreto de referência (sem adição mineral) para uma mesma relação água/aglomerantes. Com a substituição de clínquer por sílica ativa, podem ser utilizadas relações água/aglomerantes menores do que a do concreto de referência, sendo que, isso é justificado pelo efeito *filler*, a criação de novos pontos de nucleação e pela reação pozolânica. Dessa forma, percebe-se que o menor consumo de aglomerante em um concreto faz com que a mistura atinja menores picos de temperatura. Além disso, ressalta-se que a sílica ativa promove boa durabilidade quanto a ataques externos de cloretos e sulfatos, devido ao refinamento dos poros.

2.2.3 Síntese

O foco deste capítulo foi mostrar os tipos de cimento Portland e as adições minerais que foram utilizadas nesta dissertação: o metacaulim, a sílica ativa e a escória de alto forno (constituente do CP III – RS). A partir da literatura consultada foi mostrado como ocorre a hidratação do cimento Portland, os produtos formados e a liberação de calor.

Buscou-se detalhar neste item, os aspectos principais das adições minerais, como por exemplo, a origem, suas principais características físicas e químicas, bem como, seus efeitos quando utilizadas em misturas cimentícias. Ainda, a partir das bibliografias consultadas, fica evidente a importância de maiores estudos de modo a verificar a influência das adições minerais, principalmente no que tange o calor liberado pela mistura.

3 CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A primeira etapa do procedimento experimental foi à produção de argamassas para a determinação do melhor teor de substituição para cada aglomerante, sendo eles: CP V - ARI, CP V – ARI + S.A., CP V – ARI + MK e CP III - RS. A escolha do melhor teor de substituição foi feita segundo diferentes critérios. No caso da sílica ativa, foi feita visando à melhor relação custo/benefício das argamassas produzidas. No caso do metacaulim, foi levado em conta o para a possível inibição da etringita tardia. Já no caso da escória, foi utilizado o teor contido no cimento CP III - RS fornecido pelo fabricante. Com isso, a substituição de cimento Portland pelas adições minerais supracitadas teve como objetivo a análise da influência dessas adições na elevação adiabática da temperatura.

Para montagem da curva de dosagem, foram produzidos quatro traços de argamassas para cada aglomerante, sendo que, para cada traço de argamassa, foram moldados três corpos de prova, com dimensões de 5 cm x 10 cm, que foram ensaiados à compressão aos 28 dias. Com os resultados dos ensaios à compressão foi possível montar as curvas de relação a/c x resistência aos 28 dias, para que, assim, fossem retirados os valores de a/c , para as resistências estudadas de 40 MPa, 45 MPa, 50 MPa e 55 MPa, e assim utilizar essa relação a/c para a produção dos concretos.

Para as argamassas produzidas com sílica ativa e metacaulim foi feita a substituição volumétrica em relação ao cimento para os mesmos quatro traços de argamassa utilizados no traço de referência. Os valores das substituições para sílica ativa e metacaulim foram: 8%, 10%, 12% e 14%. Após a produção das argamassas, foram moldados três corpos de prova para cada traço e ensaiados à compressão aos 28 dias. Com os resultados e a construção da curva de dosagem, foram retirados dos gráficos as relações a/c para cada resistência no presente estudo.

Para a argamassa com escória, foi utilizado o cimento CP III - RS (que possui em sua composição a escória com $45 \pm 5\%$) e por isso não foi realizada a substituição em relação à referência, mas foram produzidos os quatro traços de argamassas com este insumo da mesma maneira que a referência. Após a produção das diferentes argamassas,

foram moldados três corpos de prova para cada um dos traços, que foram ensaiados à compressão aos 28 dias para a montagem da curva de dosagem. Após a montagem da curva de dosagem foram retiradas desta as relações a/aglomerante para os concretos estudados posteriormente.

Depois da determinação das relações a/aglomerante para as respectivas referências, foi calculado o traço de concreto para cada resistência, mantendo fixa a quantidade de água por metro cúbico (180 litros), a relação água/materiais secos ($H = 8\%$) e o teor de argamassa ($\alpha = 53\%$).

Com os traços calculados, foi realizada a etapa de produção dos concretos. Os materiais para a produção dos concretos foram secos em estufa e, após isso, foram retirados para resfriar em temperatura ambiente e armazenados em bombas plásticas, para evitar à umidade.

Os insumos para a produção do concreto foram pesados e misturados em betoneira, sendo que a mistura foi realizada da seguinte forma: primeiramente foi colocado na betoneira o agregado graúdo e cerca de 70% da quantidade total da água, misturando por 30 segundos. Logo após, foi colocado o aglomerante, o agregado miúdo, o restante da água e uma parte do aditivo (este último foi dosado até a mistura atingir a faixa de consistência, com o abatimento de 18 ± 3), misturando esses durante 10 minutos. Após isso, foram realizados os ensaios no estado fresco, o teste do abatimento do tronco de cone e a massa específica do concreto.

Após a realização dos ensaios no estado fresco, era moldado um corpo de prova cúbico de cinco litros de concreto para a realização do ensaio da elevação adiabática da temperatura. Este concreto foi colocado em um saco plástico que foi posicionado dentro de um molde metálico cúbico isolado com placas de isopor e, *a posteriori*, ele era imerso em banho térmico para evitar a troca de calor com o ambiente. Esse banho térmico era aquecido por meio de um sistema de resistências elétricas à medida que o concreto aquecia dentro da forma cúbica, simulando, assim, a marcha térmica que ocorre no centro de um bloco de fundação.

Ressalta-se que, dentro do corpo de prova cúbico, era inserido um sensor, que era ligado a um dispositivo que monitorava a temperatura do concreto. Isso ocorreu também para água, ou seja, era inserido um outro sensor dentro da água que estava ligado com o mesmo dispositivo. Quando a água estava em temperatura

ligeiramente menor que a do concreto, este dispositivo fazia com que uma resistência (que estava ligada a ele e dentro da água) ligasse e esquentasse a água até a temperatura equilibrar com a do concreto. Isso acontecia até ocorrer o pico de temperatura do concreto e a posterior estabilização, que transcorria até 72 horas após a confecção do concreto.

Juntamente com o corpo de prova cúbico, foram moldados corpos de prova de cada uma das misturas, sendo que, para cada uma delas, foram confeccionados seis corpos de prova, com dimensões de 10 cm x 20 cm. Destes seis corpos de prova, três deles foram colocados em câmara úmida à temperatura de 23°C até atingir a idade de 28 dias, e os outros três, confeccionados na mesma betonada, e colocados no mesmo banho térmico em que se encontrava o corpo de prova cúbico para cura até a idade de 28 dias, para, a *posteriori*, serem realizados ensaios de resistência à compressão.

Além disso, foi produzida uma pasta de cimento, com a relação a/aglomerante do respectivo concreto, curada em câmara úmida e em banho térmico, para realização do ensaio de TG.

Após isso, os corpos de prova que estavam dentro do banho térmico, bem como o molde produzido com pasta, eram colocados em outro banho térmico (que tinha a temperatura controlada por um termostato digital) para que diminuíssem a temperatura lentamente, conforme a curva de perda de calor obtida pelo GTec em outros estudos correlatos SALUM (2015) e JUNCKES (2015) até completar os 28 dias de cura a partir do dia da produção da mistura, para que, a *posteriori*, fosse realizado o ensaio à compressão. As amostras de pasta foram retiradas das suas respectivas curas aos 28 dias e foram colocadas em nitrogênio líquido, para que não ocorresse mais reações (devida à água livre), liofilizadas e ensaiadas por TG.

Salienta-se que, para atingir os objetivos do trabalho em questão, foram realizados os seguintes ensaios: (1) ensaio em argamassa para definição de teores das adições minerais (sílica ativa e metacaulim) e determinação das relações a/aglomerantes, de todos os aglomerantes, para produção dos concretos, (2) ensaio em concreto para elevação de temperatura adiabática e resistência à compressão e (3) ensaio em pasta para verificar a reação pozolânica e a hidratação das partículas de cimento. Com isso, foram analisados:

- Ensaios em argamassa: determinação dos teores de metacaulim e sílica ativa para produção dos concretos.
- Ensaios em concreto: elevação adiabática da temperatura e resistência à compressão aos 28 dias.
- Ensaios em pasta: quantidade de portlandita consumida aos 28 dias.

3.2 MATERIAIS

Neste tópico estão listados e identificados os materiais que foram utilizados no presente estudo. Ressalta-se que o cimento utilizado foi selecionado por ser o mais puro comercializado, de modo a evitar interferência significativa nos resultados devida à utilização de adições. Segue abaixo a caracterização de cada material selecionado para utilização neste trabalho.

3.2.1 Cimentos

Foi selecionado para o estudo o CP V - ARI, por apresentar um baixo teor de adições ativas e, conseqüentemente, ter uma maior sensibilidade aos efeitos da adição de sílica ativa e de metacaulim; e o CP III - RS, devido à adição de escória, produzido a partir do mesmo clínquer que o empregado na produção do cimento CP V - ARI. A caracterização destes cimentos foi disponibilizada pelo fabricante, e nelas constam diversas propriedades químicas e físicas, podendo citar:

- Teor de resíduos insolúveis;
- Finura: material retido nas peneiras #200 e #325 e Blaine;
- Água de consistência normal;
- Tempo de início e fim de pega;
- Resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias.

Dessa forma, segue abaixo, nas tabelas 8 e 9, as caracterizações físicas e químicas dos cimentos que foram utilizados no presente estudo, CP V - ARI e CP III RS, conforme informado pelo fabricante.

Tabela 8 - Características físicas e químicas do CP V - ARI

Ensaio Físicos					Valores Normativos
#400 (%)	média	2,9	1,8	1,8	-
	desvio padrão	0,99	0,32	0,32	
	n° amostras	8	8	8	
Blaine (cm ² /g)	média	4695	4753	4746	≥ 3000
	desvio padrão	63	54	75	
	n° amostras	8	8	8	
Tempo para o início de pega (min)	média	121	120	127	≥ 60
	desvio padrão	7	5	13	
	n° amostras	8	8	8	
Tempo para o fim de pega (min)	média	173	173	184	≤ 600
	desvio padrão	5	8	12	
	n° amostras	8	8	8	
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	média	28,7	28,6	28,7	≥ 14,0
	desvio padrão	0,56	1,12	0,5	
	n° amostras	8	8	8	
Resistência à compressão 3 dia (MPa)	média	41,3	41,3	41,4	≥ 24,0
	desvio padrão	0,46	0,65	0,88	
	n° amostras	8	8	7	
Resistência à compressão 7 dia (MPa)	média	46,4	46	46,3	≥ 34,0
	desvio padrão	0,36	0,78	0,57	
	n° amostras	8	8	6	
Resistência à compressão 28 dia (MPa)	média	55,1	54,3	-	-
	desvio padrão	0,52	0,8	-	
	n° amostras	8	8	-	
Análise Química (%)					
PF 1000°C	NBR NM 18	3,74	3,94	3,81	≤ 4,5
SiO ₂	NBR 14656	18,93		19,19	-
R.I.	NBR NM 15	0,87	0,91	1	≤ 1,0
Al ₂ O ₃	NBR 14656	5,16		4,91	-
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,96		3,03	-
CaO	NBR 14656	64,17		63,83	-
MgO	NBR 14656	0,76	0,76	0,7	-
SO ₃	NBR 14656	2,88	2,85	3	≤ 4,5
CO ₂	NBR NM 20	2,92	2,95	2,99	≤ 3,0
K ₂ O	NBR 14656	0,86		0,73	-
PF 500°C	IT Holcim	0,72	0,85	0,74	-
C3A (Teórico)	Equação Bogue	7,95	7,4	7,36	-

Fonte: Adaptado de HOLCIM, 2017.

Tabela 9- Características Físicas e Químicas do CPIII-RS

Ensaio Físicos					Valores Normativos
#400 (%)	média	4,4	4,8	2,9	
	desvio padrão	0,5	0,59	0,69	
	n° amostras	8	8	8	
Blaine (cm ² /g)	média	4239	4203	4185	≥ 3000
	desvio padrão	76	43	127	
	n° amostras	8	8	8	
Tempo para o início de pega (min)	média	193	199	198	≥ 60
	desvio padrão	16	11	14	
	n° amostras	8	8	8	
Tempo para o fim de pega (min)	média	253	256	259	≤ 600
	desvio padrão	17	13	11	
	n° amostras	8	8	8	
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	média	10	10	10,3	-
	desvio padrão	1,02	0,82	0,51	
	n° amostras	8	8	8	
Resistência à compressão 3 dia (MPa)	média	24,8	24,7	24,7	≥ 12,0
	desvio padrão	0,88	1,02	0,67	
	n° amostras	8	8	7	
Resistência à compressão 7 dia (MPa)	média	35	35,2	35	≥ 23,0
	desvio padrão	0,9	1,1	0,83	
	n° amostras	8	8	6	
Resistência à compressão 28 dia (MPa)	média	47,8	47,8	-	≥ 40,0
	desvio padrão	0,84	0,6	-	
	n° amostras	8	8	-	
Análise Química (%)					
PF 1000°C	NBR NM 18	3,58	3,55	3,38	≤ 4,5
SiO ₂	NBR 14656	24,75		24,57	-
R.I.	NBR NM 15	1,29	1,38	1,19	≤ 1,5
Al ₂ O ₃	NBR 14656	7,89		7,62	-
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,18		2,2	-
CaO	NBR 14656	54,7		55,04	-
MgO	NBR 14656	2,8	2,84	2,84	-
SO ₃	NBR 14656	2,59	2,7	2,74	≤ 4,0
CO ₂	NBR NM 20	2,88	2,85	2,78	≤ 3,0
K ₂ O	NBR 14656	0,61		0,65	-
PF 500°C	IT Holcim	0,79	0,79	0,81	-
C3A (Teórico)	Equação Bogue	4,39	4,26	4,23	-

Fonte: Adaptado de HOLCIM, 2017.

3.2.2 Agregados

Para a obtenção do agregado miúdo, foi feita a composição entre duas areias: uma areia de britagem provinda de rocha calcária e uma areia de duna. Já para o agregado graúdo, foi utilizada uma mistura entre brita 1 e brita 0 de origem granítica. Estes materiais foram utilizados neste estudo, pois são utilizados comumente para a produção das misturas para blocos de fundação na região de Balneário Camboriú- SC.

A proporção que foi utilizada para as britas 0 e 1 foi de cinquenta por cento de cada agregado; já para as areias, a proporção utilizada foi de sessenta por cento de areia de britagem e quarenta por cento de areia natural. Essas proporções foram utilizadas porque são

as normalmente utilizadas pelas concreteiras da região que empregam estes agregados.

Antes dos ensaios em concretos e argamassas, foram realizados os ensaios para caracterização dos materiais que foram utilizados para produção dos concretos e argamassas do presente estudo.

Os aglomerantes utilizados foram: Cimento CP V - ARI, Cimento CP III - RS, metacaulim e sílica ativa, sendo que os valores de massa específica para estes aglomerantes foram: 3,09 kg/dm³; 2,97 kg/dm³; 2,56 kg/dm³; 2,22 kg/dm³; respectivamente. Conforme pode ser verificado nos dados acima, as massas específicas das adições minerais são menores que a dos cimentos CP V - ARI e CP III - RS. Sendo que assim, obtém-se uma massa específica menor do concreto produzido com estas adições para um mesmo consumo volumétrico de aglomerante. Salieta-se que estes dados de massa específica foram fornecidos pelos fabricantes.

Os agregados utilizados no presente estudo foram areia fina, areia de britagem, brita 0 e brita 1. Os agregados graúdos utilizados foram agregados de origem granítica e areia de britagem de origem calcária. Optou-se por fazer uma mistura de areia de britagem e natural na proporção de 60% e 40% em massa. A massa específica destes agregados, para a produção das argamassas e concretos, tiveram os seguintes valores: areia natural fina: 2,65 kg/dm³, areia de britagem: 2,80 kg/dm³, brita 0: 2,62 kg/dm³ e brita 1: 2,63 kg/dm³. Os resultados dos ensaios de granulometria para as britas e as areias encontram-se nas tabelas 11 e 12, a seguir.

Tabela 10 – Porcentagem retida acumulada das britas 0 e 1 para cada peneira

Peneiras	% Retida Acumulada	
	Brita 0	Brita 1
#		
25	0%	0%
19	0%	3%
12,5	1%	46%
9,5	26%	91%
6,3	78%	99%
4,8	98%	100%
4	99%	100%
3,35	99%	100%
2,4	99%	100%
1,2	99%	100%
Fundo	100%	100%
MF	8,13	8,90
Dmáx	12,5	19

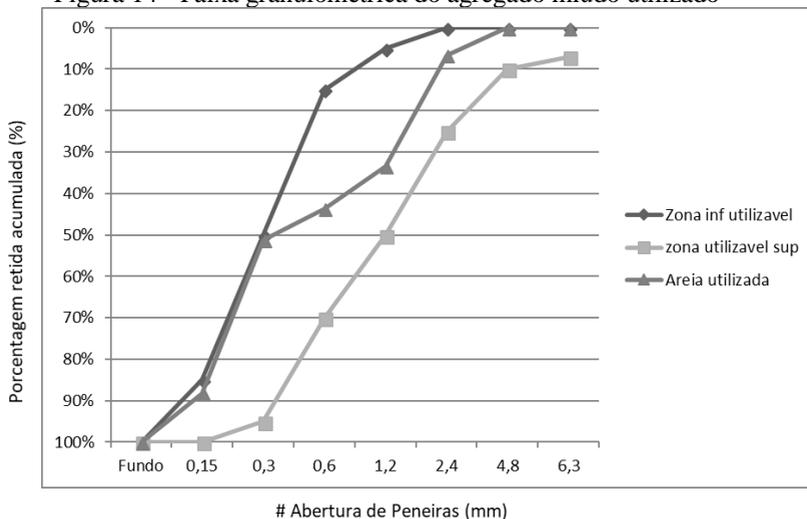
Fonte: Autor, 2017.

Tabela 11 - Porcentagem retida acumulada das areias natural e de britagem para cada peneira

Peneiras	Areia de Britagem	Areia Fina
	% Retida Acumulada	
6,3	0%	0%
4,8	0%	0%
2,4	11%	0%
1,2	55%	1%
0,6	72%	1%
0,3	80%	8%
0,15	85%	93%
0,075	88%	99%
Fundo	100%	100%
MF	3,03	1,04

Fonte: Autor, 2017.

Figura 14 - Faixa granulométrica do agregado miúdo utilizado



Fonte: Autor, 2017.

3.2.3 Aditivo

O aditivo utilizado foi o aditivo redutor de água à base de policarboxilato TEC -MULT – linha 40, por ser usualmente utilizado nos concretos produzidos nas centrais dosadoras do estado de Santa Catarina. Ressalta-se que não foi utilizado estabilizador de hidratação para que o programa experimental pudesse ser conduzido mais rapidamente e porque estudos prévios do GTEC mostraram que o emprego deste tipo de aditivo não influencia a temperatura máxima atingida por um concreto em uma situação adiabática.

3.2.4 Adições minerais

As adições minerais utilizadas no presente trabalho, metacaulim e a sílica ativa, utilizadas no presente trabalho foram obtidas através das empresas Metacaulim HP Brasil e Tecnosil, respectivamente. Algumas das características físicas e químicas desses insumos estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 12 - Propriedades das adições minerais (metacaulim e sílica ativa)

Propriedades	Metacaulim	Sílica Ativa
SiO ₂	57%	85%
Al ₂ O ₃	34%	-
Massa Específica (Kg/dm ³)	2,56	2,22
Área Específica BET (cm ² /g)	230 000	190 000
Diâmetro médio das partículas (µm)	1,5	2,0

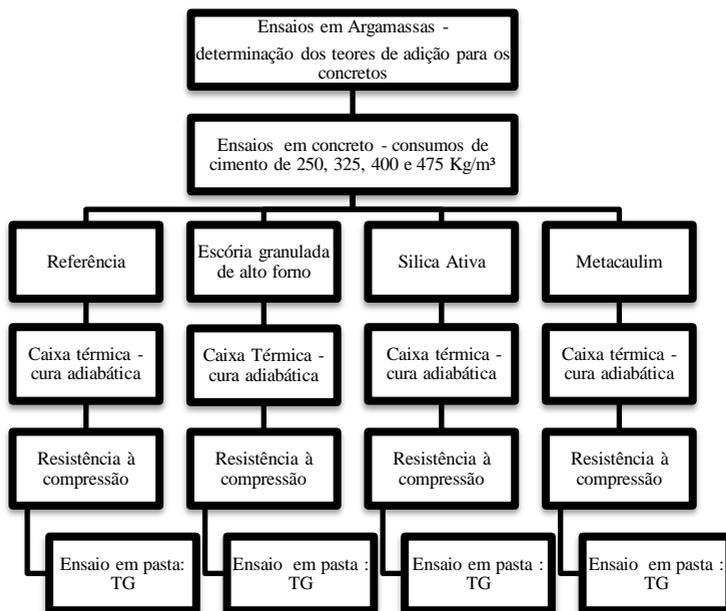
Fonte: Autor, 2017.

A partir dessas características, verifica-se que o metacaulim tem uma área específica maior que a da sílica ativa, bem como um menor diâmetro das partículas. Isso indica que este metacaulim é um material mais fino do que esta sílica ativa e que, se dosado corretamente, tem a possibilidade de inibir a formação da etringita tardia.

3.3 METODOLOGIA DE ENSAIOS

Apresenta-se, nos itens a seguir, o método que foi empregado para dosagem dos concretos, para a realização da cura dos concretos, e como foram coletados os dados de liberação de calor de hidratação dos concretos, bem como o ensaio de resistência à compressão. Visando a uma melhor compreensão dos ensaios que foram realizados neste trabalho, foi elaborado um fluxograma, conforme a figura 16 abaixo.

Figura 15 - Fluxograma de ensaios



Fonte: Autor, 2016.

3.3.1 Dosagem e obtenção dos concretos

Para a dosagem dos concretos, foram realizados testes preliminares em argamassas com diferentes teores de substituição para o metacaulim e a sílica ativa, para que assim, fosse determinado o melhor teor de adição mineral. As substituições foram realizadas em volume, sendo que os teores das substituições foram de: (1) metacaulim 8%, 10%, 12% e 14%, e (2) sílica ativa 8%, 10%, 12% e 14%. Após isso, foram adotados os teores de substituições com maiores resistências à compressão de cada material para a idade de 28 dias.

Salienta-se que os concretos foram dosados a partir de 3 adições minerais, sendo elas: metacaulim, sílica ativa e escória (CPIII-RS), e um concreto referência (CP V - ARI). Para cada adição, foi realizada uma curva de dosagem com quatro consumos de cimento diferentes, as relações a/aglomerante para a produção dos concretos

foram retiradas das curvas de dosagem das argamassas. Foi fixado o consumo de água em 180 litros, produzidos 16 traços de concreto, com resistências pré-definidas (f_{c28}) de 40 MPa, 45 MPa, 50 MPa e 55 MPa. Além disso, foi adotado um teor de argamassa para todos os concretos de 52%, devido a estudos previamente realizados pelo GTEC com os agregados utilizados neste trabalho. Os corpos de prova de concreto tinham dimensões de 10 X 20 cm.

3.3.2 Procedimento de cura dos corpos de prova

Após a confecção do concreto, foram moldados seis corpos de prova para cada traço totalizando 96 corpos de prova. Dos seis corpos de prova produzidos, três deles foram curados em câmara úmida com temperatura e umidade controlada, 23°C e 95%, respectivamente, e os outros três corpos de prova foram curados em um banho térmico, que simulava uma condição de cura adiabática, fazendo com que o concreto curasse com sua própria marcha de temperatura gerada pela liberação do calor de hidratação.

Os três corpos de prova que foram submetidos à cura térmica com temperatura variável em condição adiabática, foram desmoldados e colocados após 72 horas em um banho térmico, com temperatura controlável por termostato digital e, então, foram resfriados lentamente, a partir de uma curva padrão de resfriamento, que foi obtida através de estudos realizados pelo GTEC, curva esta que mostra um resfriamento médio do concreto de 1,5°C por dia.

3.3.3 Calorimetria

Segundo Furnas (1997), com a maior demanda da construção de obras de grande porte com volumes massivos de concreto, tornou-se necessário o conhecimento de suas propriedades térmicas, devendo-se assim estudar a evolução da temperatura nessas misturas, decorrente da liberação de calor pela reação de hidratação do cimento.

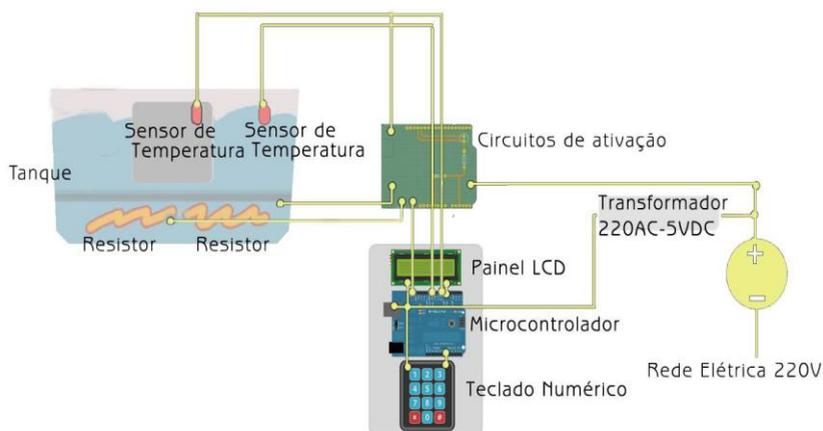
Para a simulação da temperatura gerada dentro de um bloco de fundação com grande volume de concreto, o calorímetro utilizado no presente estudo foi o calorímetro adiabático, devido ao fato deste não deixar ocorrer à troca de calor com o meio e assim não perder temperatura, o que simula a condição de temperatura no centro do bloco de fundação. Ressalta-se que um calorímetro isotérmico não

conseguiria simular a situação real da liberação de calor, pois, não ocorreria a variação de temperatura durante o experimento.

O calorímetro que foi utilizado neste trabalho foi o calorímetro produzido por Junckes (2015), que é capaz de medir e simular a elevação adiabática da temperatura do concreto. Assim que as reações de hidratação são iniciadas, o corpo de prova aquecerá e o equipamento, recebendo esta informação, fará com que a água do tanque que envolve o corpo de prova aqueça para que não ocorra troca de calor entre o corpo de prova e o ambiente que o envolve. O calorímetro de Junckes (2015) foi desenvolvido baseado no modelo de Gambale *et al.* (2004).

O concreto é depositado dentro de uma caixa metálica, revestida por EPS. Dentro desse concreto é colocado internamente um termopar para que possa ser realizada a leitura da temperatura pelo equipamento. Esta caixa metálica fica submersa em banho térmico, onde também há um termopar e uma resistência, para que, quando a temperatura do concreto se eleva devido à liberação de calor, o sistema gerenciado por uma CLP faz com que as resistências elétricas do banho térmico sejam ativadas. Assim, esquentam a água até que a sua temperatura fique igual à do concreto, fazendo com que a perda de calor do concreto com a água seja praticamente nula. Na figura 14, apresenta-se o esquema de funcionamento do calorímetro.

Figura 16 - Esquema de funcionamento do calorímetro.



Fonte: Graeff, 2015.

Devido ao sistema de monitoramento de temperatura não ser capaz de registrar e armazenar as temperaturas, é utilizado um Datalogger Agilent 34970A ligado a termopares do tipo “K”, para que seja possível registrar temperaturas e então gerar a curva após os resultados.

O tanque em que a caixa metálica com o concreto fica imersa tem dimensões de 50 x 70 x 35 cm e tem as paredes externas revestidas de placas de poliestireno expandido, comportando um volume de 115 litros de água. O molde para o corpo de prova de concreto é metálico e tem dimensões internas de um cubo de 15 cm de lado, totalizando um volume de 3,38 dm³. Na figura 15, pode-se observar o calorímetro com o corpo de prova de concreto dentro, pronto para o ensaio.

Figura 17 - Calorímetro com o corpo de prova



Fonte: Junckes (2015)

3.3.4 Resistência à Compressão

Após a cura dos corpos de prova, estes foram ensaiados à compressão para a análise da influência da temperatura, bem como do tipo e quantidade de adição que foi empregada no concreto. A resistência à compressão foi avaliada de acordo com a NBR 5739/2007, por meio de corpos de prova cilíndricos moldados conforme a NBR 5738/2003.

3.3.5 Termogravimetria em pastas como forma de avaliação pozolânica das misturas

Segundo Ionashiro (2004), no ensaio de TG, busca-se verificar à variação da massa, a composição e a estabilidade dos compostos intermediários sobre a composição do resíduo através da elevação da temperatura. Normalmente as temperaturas do forno onde a amostra será colocada são indicadas por meio de um par termoeletrico ou de um termômetro de resistência, onde este estará em uma posição mais próxima possível da amostra. Ressalta-se que a termogravimetria busca avaliar as mudanças físicas e químicas que uma amostra sofre em função da mudança de temperatura em que é imposta a ela, pela verificação da massa da amostra.

Segundo este mesmo autor, o que normalmente afeta as curvas de TG são: (1) fatores instrumentais que levam em conta a taxa de aquecimento do forno, atmosfera do forno e a geometria do suporte de amostras deste; (2) Características da amostra, tamanho das partículas, quantidade de amostras, solubilidade dos gases que são liberados pelas amostras, compactação da amostra, calor da reação, origem da amostra, condutividade térmica da amostra.

O ensaio de TG foi aplicado neste trabalho para quantificação do teor de portlandita que permanece nas pastas de cimento de mesma relação água/aglomerantes, baseado no fato que Taylor (1997) considera o ensaio de termogravimetria o mais apropriado para quantificar o teor de hidróxido de cálcio de uma pasta de cimento, isso porque a decomposição do Ca(OH)_2 em $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ que é caracterizado por uma perda de massa na faixa de temperatura entre 425 a 550°C.

O ensaio de termogravimetria foi realizado para a determinação da influência da temperatura na velocidade das reações pozolânicas. Esses ensaios foram feitos por meio das pastas de cimento, segundo as condições de cura citadas anteriormente, na

mesma idade em que os corpos de prova de concreto foram ensaiados à compressão, ou seja, na idade de 28 dias.

As pastas de cimento foram preparadas e conservadas em recipientes plásticos selados, para que não ocorresse a troca de CO_2 ou umidade com o ambiente. Foram mantidas em um laboratório climatizado com temperatura de (23 ± 2) °C e mantidas até a idade de ensaio. Para que as pastas tivessem uma consistência semelhante, foi adotado um valor parâmetro de $(9,0\pm 1,0)$ cm de abertura média de espalhamento pelo método do mini-slump. Para as pastas que apresentaram maior espalhamento, estas foram corrigidas com areia natural seca; já as pastas que apresentarem menor espalhamento, elas foram corrigidas com aditivo plastificante.

4 CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados em laboratório durante o programa experimental, onde foram estudados argamassas, pastas e concretos com cimento Portland (CP V - ARI e CP III - RS), metacaulim e sílica ativa, sob regimes de cura distintos entre si.

Os resultados são apresentados conforme o tipo de ensaio e de estudo. Para facilitar a organização da pesquisa, bem como o entendimento do leitor, foram utilizadas as seguintes siglas: C – Concreto; P – Pastas; MK 8|10|12|14 - % de metacaulim utilizada na mistura 8%|10%|12%|14%; S.A 8|10|12|14 - % de sílica ativa utilizada na mistura 8%|10%|12%|14%; REF – mistura produzida com apenas CP V - ARI (referência); mistura produzida com CPIII-RS; 40|45|50|55 – são as resistências à compressão do concreto de 40MPa|45MPa|50MPa|55MPa, RH – Regime de cura úmida a $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$, RA – Regime de cura autógena.

4.1 ENSAIOS EM ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

Para as argamassas no estado fresco, foi medido o espalhamento de cada mistura, para 30 quedas, e a suas respectivas demandas por aditivo superplastificante, para que ficassem entre 220 – 280 mm de abertura. Os resultados deste ensaio, para cada tipo de aglomerante e cada teor, são apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15. Os traços e as quantidades de materiais para a produção das argamassas constam no apêndice 1.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas com CP V - ARI e CP III - RS

CP V - ARI		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	282	0,7
T2	271	1,3
T3	250	1,3
T4	245	1,5
CP III - RS		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	277	0,3
T2	271	0,7
T3	261	1
T4	258	1,2

Fonte: Autor, 2017.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas com sílica ativa

S.A. 8%		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	255	0,5
T2	270	1,3
T3	242	1,3
T4	254	2,6
S.A. 10%		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	264	0,5
T2	257	1
T3	243	1,2
T4	241	2,4
S.A. 12%		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	257	1,4
T2	266	1,2
T3	270	1,5
T4	258	2,2
S.A. 14%		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	248	1,2
T2	256	1,2
T3	279	2,1
T4	253	2,8

Fonte: Autor, 2017.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas com metacaulim

MK 8%		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	286	2
T2	255	1,1
T3	242	1,9
T4	245	2,9
MK 10%		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	291	1,5
T2	238	1,1
T3	221	1,5
T4	239	2,6
MK 12%		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	247	0,7
T2	234	1,2
T3	245	2,6
T4	228	3,2
MK 14%		
Traço	Espalhamento (mm)	Aditivo (g)
T1	243	0,7
T2	241	1,3
T3	221	2
T4	223	3,9

Fonte: Autor, 2017.

Verifica-se, por meio dos resultados obtidos anteriormente, que o aumento do teor de substituição da sílica ativa e do metacaulim em relação ao cimento significou um aumento na quantidade de aditivo utilizada, sendo que isso é explicado devido à superfície específica desses aglomerantes ser maior que a do cimento. Quando comparado os cimentos CP V - ARI e CP III - RS, verifica-se que o cimento com maior área específica (CP V - ARI), necessitou de uma maior quantidade de aditivo por conta desse aspecto.

Para os traços mais ricos em aglomerante (T3 e T4), houve uma maior demanda da quantidade de aditivo conforme a diminuição da relação água/aglomerante da argamassa. Atribui-se este comportamento pelo aumento da quantidade do aglomerante para a produção do mesmo volume de argamassa.

Observa-se que alguns traços possuíram um espalhamento maior do que o desejado, porém, como não foi visualizado nenhum

sinal de exsudação e segregação das fases, foram aceitas essas misturas.

4.2 ENSAIOS EM ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

Para as argamassas produzidas e curadas por 28 dias, realizou-se o ensaio de resistência à compressão em todos os traços. A partir dos resultados de resistências das argamassas, foram construídos gráficos das curvas de dosagem das argamassas para definir a melhor substituição de cada material e retirar dos gráficos as relações água/aglomerante necessárias para as resistências de 40 MPa, 45 MPa, 50 MPa e 55 MPa.

RAMLOCHAN, THOMAS E HOOTON (2004), citam que a quantidade de metacaulim utilizado para a possível inibição da DEF é de 8%. Entretanto, no presente estudo utilizou-se 12% devido ao fato da adição utilizada dos citados autores ter um teor de alumina maior do que a do metacaulim utilizado no presente trabalho. A compensação foi feita para obter a mesma quantidade do composto para 1 m³ de concreto, assim, foi encontrado o valor de 12%. O estudo cita que a possível inibição da etringita tardia ocorre pelo fato da adição mineral conter alumina reativa, onde ela reagiria com o sulfato, produto proveniente da decomposição da etringita devido a altas temperaturas, não ocorrendo o ataque do sulfato ao monossulfato após o resfriamento da estrutura, e assim, evitando a formação da etringita em idades onde a mistura encontra-se endurecida

Já, a substituição definida para a sílica ativa foi de 8%. Esse valor foi definido pelo fator custo/benefício. Assim, na tabela 16, são apresentados os resultados de resistência à compressão para as argamassas produzidas com estas substituições e os teores definidos para a idade de 28 dias.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de cada aglomerante utilizado e sua respectiva a/aglomerante

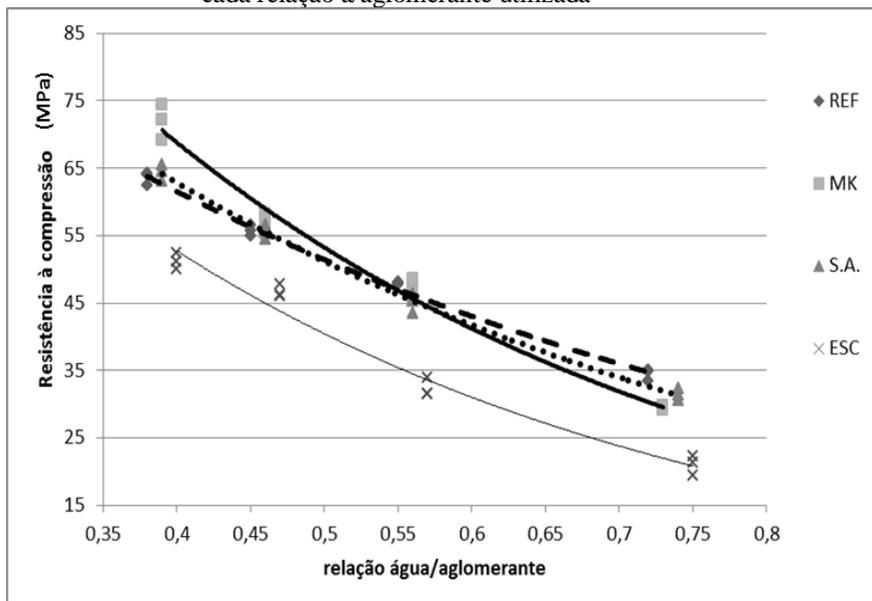
CP V - ARI				
a/aglomerante	0,72	0,55	0,45	0,38
CP1 (MPa)	35,1	48,1	54,92	64,03
CP2 (MPa)	33,43	47,87	55,82	64,21
CP3 (MPa)	34,84	47,99	56,61	62,54
Metacaulim				
a/aglomerante	0,73	0,56	0,46	0,39
CP1 (MPa)	29,33	46,86	55,25	74,44
CP2 (MPa)	29,73	45,31	56,74	72,18
CP3 (MPa)	29,08	48,67	58,22	69,1
Silica ativa				
a/aglomerante	0,74	0,56	0,46	0,39
CP1 (MPa)	30,58	45,38	54,55	63,13
CP2 (MPa)	31,33	43,56	56,55	65,57
CP3 (MPa)	32,34	46,33	55,55	64,49
CPIII-RS				
a/aglomerante	0,75	0,57	0,47	0,4
CP1 (MPa)	21,35	31,48	47,79	51,11
CP2 (MPa)	22,33	33,9	46,02	50,05
CP3 (MPa)	19,39	31,5	46,2	52,46

Fonte: Autor, 2017

Estes resultados indicam, como já esperado, a tendência do aumento do valor da resistência à compressão conforme ocorre a diminuição das relações água/aglomerante para todas as argamassas produzidas, independentemente do tipo de aglomerante utilizado. As relações água/aglomerante dos traços são diferentes devido à substituição ser em volume e a relação água/aglomerante esta apresentada em massa.

A partir destes resultados, foram construídas as curvas de dosagem para cada aglomerante, com a finalidade de encontrar as relações água/aglomerante para as resistências que iriam ser estudadas nos concretos. As curvas de dosagem para estes resultados são apresentadas na Figura 18, abaixo.

Figura 18 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para cada relação a/aglomerante utilizada



Fonte: Autor, 2017.

Verifica-se que há uma tendência no aumento da resistência à compressão conforme a diminuição das relações água/aglomerante, para as substituições de cimento Portland por metacaulim e sílica ativa. Já para o CPIII-RS, as resistências foram menores independentemente da relação água/aglomerante utilizada.

A partir das curvas de dosagem, foram encontradas, por mínimos quadrados, as equações para calcular as relações água/aglomerante correspondente as resistências (f_{c28}) 40MPa, 45MPa, 50MPa e 55MPa. As equações das curvas para os aglomerantes (1) CP V - ARI, (2) metacaulim, (3) sílica ativa e (4) CP III - RS, estão mostradas abaixo.

- (1) $Y = 125,75e^{-1,79x}$
- (2) $Y = 194,29e^{-2,58x}$
- (3) $Y = 142,73e^{-2,049x}$
- (4) $Y = 149,77e^{-2,627x}$

A partir dessas equações, foram encontradas as relações a/aglomerante para as resistências desejadas. As variáveis x e y nas equações 1, 2, 3 e 4 representam respectivamente a relação a/aglomerante e Fc28. As relações a/aglomerante e os consumos de aglomerante por metro cúbico utilizadas no trabalho, conforme a tabela 17 abaixo:

Tabela 17 - Relações água/aglomerante e consumo de aglomerante por metro cúbico para as resistências desejadas para cada aglomerante

Fc28	CP V - ARI		CP V - ARI + Metacaulim		CP V - ARI + Sílica ativa		CP III - RS	
	a/aglomerante	Kg/m ³	a/aglomerante	Kg/m ³	a/aglomerante	Kg/m ³	a/aglomerante	Kg/m ³
40	0,64	281,3	0,62	293,6	0,62	290,3	0,5	360
45	0,57	313,6	0,57	317,5	0,57	315,8	0,46	393,87
50	0,52	349,6	0,53	342,2	0,51	352,9	0,42	431,65
55	0,46	389,5	0,49	368,1	0,47	383	0,39	472,44

Fonte: Autor, 2017

Como exposto na metodologia, salienta-se que o consumo de aglomerante por metro cúbico foi calculado em uma planilha elaborada para calcular o traço do concreto. Esta planilha calcula o traço para um consumo de água fixo por metro cúbico (180 litros), teor de argamassa (53%) e relação água materiais secos (8%), além de fixar a composição das britas e areias nas suas devidas proporções, 50% de cada para as britas 0 e 1 e 60% a 40% para a areia de britagem e areia natural fina. Ou seja, para o cálculo do traço pela planilha, necessita-se apenas da relação a/aglomerante, que é retirada das curvas de dosagens das argamassas. Os traços calculados para todas resistências e os diferentes tipos de aglomerantes utilizados neste trabalho estão ilustrados no Apêndice 2.

Além disso, verifica-se na tabela 17 que, para os aglomerantes CP V – ARI + sílica ativa e CP V – ARI + metacaulim em relação ao aglomerante CP V - ARI, houve uma tendência da diminuição do consumo do aglomerante conforme o aumento da resistência. O esperado era que essas substituições fornecessem maior resistência para argamassa produzida com essas substituições do que a argamassa produzida somente com CP V - ARI, para todas as relações a/aglomerante, devido aos seus efeitos de aumento de pontos de

nucleação, efeito micro *filler* e reação pozolânica, como relatados em estudos como os de Barata e Dal Molin, 2002; Carmo e Portella, 2008; Siddique, 2011; Shatat, 2013; El-Diadamony *et al.*, 2015; Jiang, Rong e Sung, 2015. Isso pode não ter ocorrido devido a diferentes composições, pelas características físicas e químicas dos aglomerantes utilizados e por uma má dispersão das partículas. Já o concreto feito com o CP III - RS teve uma maior quantidade de aglomerante por metro cúbico, para uma mesma resistência, em relação ao concreto com o CP V - ARI.

4.3 ENSAIOS EM CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Com as relações a/c definidas a partir dos estudos em argamassa, foram produzidas quatro curvas de concretos, sendo elas: (1) Referência (CP V – ARI); (2) Com substituição volumétrica de metacaulim; (3) Com substituição volumétrica de sílica ativa; (4) Com substituição volumétrica do CP III - RS.

Após a produção dos concretos, foram realizados e coletados resultados dos ensaios no estado fresco de: abatimento do tronco de cone e massa específica das misturas, além da quantidade de aditivo utilizado para cada uma das misturas (visando à obtenção da trabalhabilidade desejada) e da verificação da incorporação de ar das misturas. Todos esses dados são apresentados na tabela 18, abaixo.

Tabela 18 - Dados dos ensaios no estado fresco dos concretos

TRAÇO	QUANTIDADE DE ADITIVO (g)	ABATIMENTO (cm)	MASSA ESPECÍFICA TEÓRICA (g/dm ³)	MASSA ESPECÍFICA REAL (g/dm ³)	AR INCORPORADO (%)
REF 40	12,7	15,5	2,412	2,401	0,450
REF 45	19,1	17,5	2,416	2,400	0,648
REF 50	21,1	17,0	2,420	2,419	0,029
REF 55	34,6	14,5	2,424	2,422	0,091
MK 12% 40	34,3	14,5	2,409	2,396	0,525
MK 12% 45	38,4	14,0	2,411	2,402	0,361
MK 12% 50	51,3	20,0	2,413	2,394	0,791
MK 12% 55	49,8	15,0	2,416	2,405	0,463
S.A 8% 40	34,2	18,0	2,412	2,389	0,958
S.A 8% 40	34,0	20,0	2,415	2,399	0,646
S.A 8% 40	27,1	18,0	2,418	2,402	0,673
S.A 8% 40	53,8	20,0	2,422	2,401	0,847
CPIII-RS 40	22,1	14,0	2,409	2,392	0,738
CPIII-RS 45	20,5	16,0	2,412	2,369	1,807
CPIII-RS 50	32,1	16,5	2,415	2,409	0,261
CPIII-RS 55	50,4	20,0	2,418	2,372	1,914

Fonte: Autor, 2017.

Conforme verificado na tabela acima, todos os concretos produzidos tiveram uma baixa quantidade de ar incorporado, o que não acarreta prejuízo à sua resistência à compressão. Ainda se verifica que os concretos com adições minerais tiveram uma massa específica menor do que os concretos produzidos com cimento CP V - ARI puro, pois as massas específicas das adições minerais são menores do que a do cimento CP V - ARI.

Em relação à quantidade de aditivo, verifica-se que, para um mesmo abatimento, a quantidade foi menor conforme diminuía a resistência, independente do aglomerante utilizado. Esse resultado era esperado, pois conforme se aumenta a resistência de um concreto diminui a relação a/c deste, acarretando no aumento do consumo de

aglomerante por metro cúbico. Ou seja, quando há o aumento do consumo de cimento em uma mistura, sua tendência é ficar menos fluída, demandando uma maior quantidade de aditivo superplastificante.

Observa-se que nas misturas produzidas com o aglomerante CPIII RS, houve uma tendência de uma maior incorporação de ar, que pode ser explicada devido pelo alto consumo de aglomerante utilizado, isto é, o alto consumo de cimento levou a um concreto com alta viscosidade, o que dificultou o seu adensamento e provavelmente resultou em maior quantidade de vazios na mistura.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

Após 28 dias, os corpos de prova foram retirados dos seus ambientes de cura e ensaiados à compressão, para obtenção dos resultados das resistências dos concretos, podendo-se assim avaliar a influência do tipo de cura e do tipo de aglomerante utilizado na mistura. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos aos 28 dias para os dois tipos de cura são apresentados nas Figuras 19, 20, 21 e 22.

Figura 19 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias câmara úmida para cada relação a/aglomerante utilizada para os diferentes aglomerantes

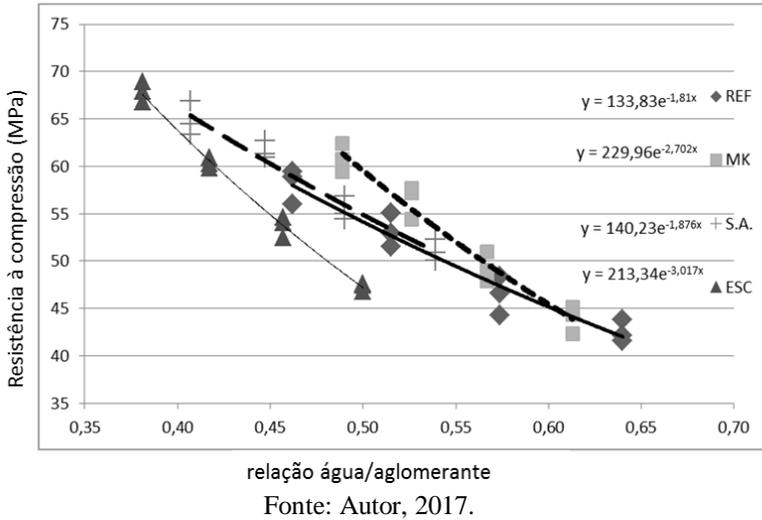
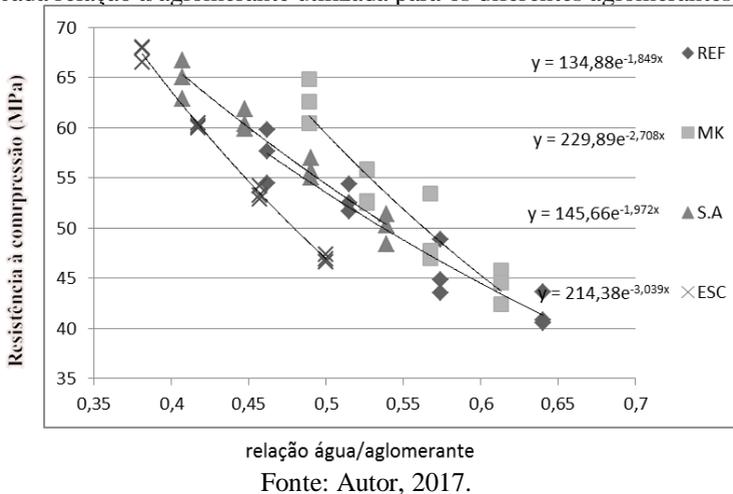
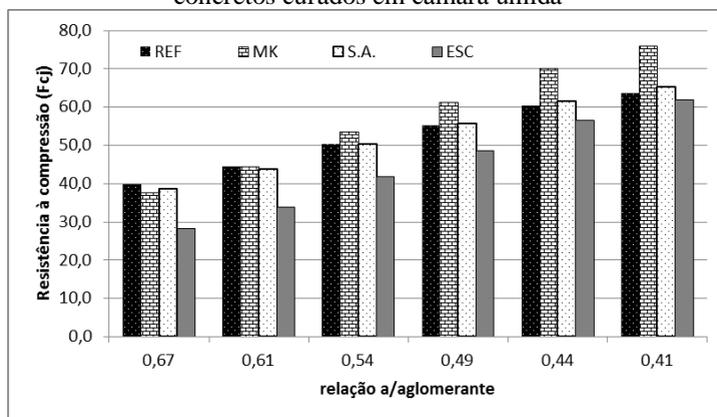


Figura 20 - Resistência à compressão aos 28 dias cura autógena para cada relação a/aglomerante utilizada para os diferentes aglomerantes



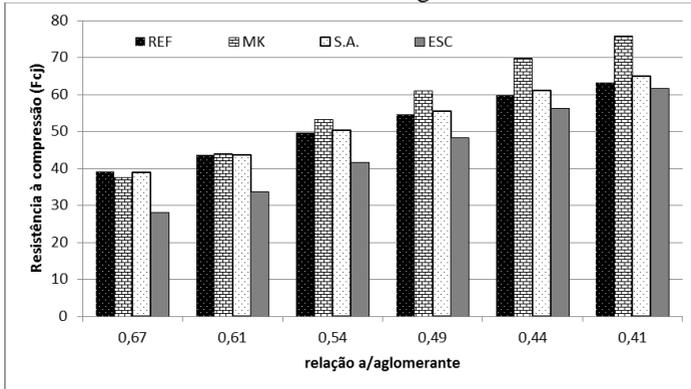
Com os resultados dos ensaios nos concretos, verifica-se que, para uma mesma relação a/aglomerante, as substituições de metacaulim e sílica ativa proporcionaram uma resistência maior, em relação aos demais aglomerantes, ou seja, podem-se dosar concretos com mesmas resistências para sílica ativa, metacaulim e CP V - ARI com menores consumos de aglomerantes por parte destas adições minerais, conforme também comentado nos estudos de (MEHTA, P. K. e GJORV 1982; BARATA e DAL MOLIN, 2002; SANJUÁN *et al.* 2015; ZHANG, ZHANG e YAN, 2016). Nesse sentido, em consequência do menor consumo de cimento, haverá uma tendência de uma menor liberação de calor para essas misturas, diminuindo o pico de temperatura do concreto. Porém o aumento da resistência à compressão, com a utilização da sílica ativa no presente estudo, chegou ao máximo 2% em relação ao CP V - ARI. Hipóteses que podem ser relacionadas são: a baixa reatividade do produto, formação de grumos, não conseguindo serem desfeitos pelo processo da mistura. Pode-se verificar nos gráficos das figuras 24 e 25, retirado das equações das curvas de dosagens, produzidas a partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos que para mesmas relações a/aglomerante, as misturas contendo metacaulim apresentaram maiores resistências, com valor até 20% maior em relação ao CP V - ARI.

Figura 21 - Resistência à compressão para as relações a/aglomerante dos concretos curados em câmara úmida



Fonte: Autor, 2017.

Figura 22 - Resistência à compressão para as relações a/aglomerante dos concretos curados autogenamente



Fonte: Autor, 2017.

Confirmando esses resultados, nos ensaios de calorimetria adiabática, foram visualizados menores valores de $^{\circ}\text{C}/\text{MPa}$ para os aglomerantes contendo sílica ativa e metacaulim se comparado com o aglomerante CP V - ARI, mostrando que a liberação de calor para uma mesma resistência é menor para concretos produzidos com esses aglomerantes. Ressalta-se ainda que o aglomerante contendo metacaulim foi dosado pela possibilidade de prevenir a formação da etringita tardia devido à quantidade de alumina reativa presente na mistura (RAMLOACHAN, 2004).

Já o aglomerante CP III - RS apresentou menores resistências para uma mesma relação a/aglomerante se comparado com os demais aglomerantes do estudo, sendo que dessa forma, deve-se utilizar uma maior quantidade para se obter mesmas resistências que as dos demais aglomerantes citados no estudo. Porém, verifica-se, através dos ensaios de calorimetria, que a utilização de escória fez com que as variáveis de liberação de calor diminuíssem, indicando assim que uma maior quantidade desse aglomerante não é necessariamente prejudicial ao concreto em relação às patologias térmicas.

Ressalta-se que concretos produzidos com a sílica ativa podem ter problemas de fissuração térmica e de formação de etringita tardia, já que o comportamento do ganho de temperatura para cada MPa foi muito parecido com o do cimento CP V - ARI (podendo

alcançar altos picos de temperatura), além de que, não há alumina reativa suficiente para inibir a formação da etringita tardia. Caso sejam utilizados grandes consumos de aglomerantes e/ou elevadas temperaturas de lançamento, o CP III - RS também pode causar problemas de fissuração térmica e DEF.

Concretos produzidos com aglomerante contendo metacaulim, em quantidade de 12% volumetricamente substituindo o cimento, provavelmente não terão problemas com a formação de etringita tardia, já que essa quantidade possivelmente fará com que a reação possa ser inibida. Além disso, o problema com a fissuração térmica diminui com a adição desse aglomerante, pois o ganho de temperatura para cada MPa é menor do que o do concreto com produzido com CP V - ARI.

Como pode ser verificado nas figuras 24 e 25, o tipo de cura não influenciou na resistência do concreto aos 28 dias, apresentando uma tendência de ter uma mesma resistência para diferentes tipos de cura citadas. Esse fenômeno pode ser explicado devido ao fato de que a cura em temperatura maior que a temperatura ambiente beneficia a resistência à compressão nas primeiras idades, pelo aumento da velocidade de hidratação dos compostos. Entretanto, essa formação de compostos realizada de uma forma acelerada prejudica a estrutura de formação do C-S-H comprometendo assim a resistência final (ASAGA *et al.*, 1992). Dessa forma, espera-se que, em idades iniciais, a resistência à compressão do concreto em cura térmica seja maior do que a curada em temperatura ambiente; em idades avançadas, espera-se ao contrário, ou seja, que a resistência à compressão da cura térmica seja menor do que a realizada em cura em temperatura ambiente; dessa forma, espera-se que, em algum período de tempo, essas resistências à compressão sejam equivalentes, como no caso deste trabalho, que se obteve as mesmas resistências para os dois tipos de cura para a idade de 28 dias.

Segundo o mesmo autor, a taxa de hidratação da pasta começará a diminuir com o passar do tempo, o que pode ser justificado devido ao encapsulamento das partículas anidras de clínquer durante os ciclos térmicos, dificultando o processo de hidratação. De Melo (2000) comenta em seu estudo que o encapsulamento das partículas de aglomerante repercute em um menor ganho de resistência ao longo do tempo, podendo ocorrer também por uma distribuição mais

heterogênea dos produtos de hidratação no interior da pasta e uma maior porosidade associada à cura térmica.

Bingol e Tohumcu (2013) e Hwang *et al.* (2012) indicam que há uma tendência de uma diminuição de resistência para a idade de 28 dias do concreto curado em cura térmica quando comparado com o mesmo concreto curado em temperatura ambiente. Estes autores atribuem isso à diminuição da taxa de hidratação da pasta ao longo do tempo. No entanto, esse fato não foi verificado no presente estudo, uma vez que os concretos curados em banho térmico e câmara úmida apresentaram mesmo nível de resistência para todos os aglomerantes. Santos (2016) e Fuchter e Godinho (2016) indicam que um tratamento térmico em imersão, caso deste trabalho, traz benefícios ao concreto, podendo assim apresentar mesmos patamares de resistência quando comparado com o concreto curado em câmara úmida. Porém nem sempre isso pode ser verificado, como nos trabalhos de Salum (2015) e Graeff (2017), onde as resistências à compressão na cura térmica foram diferentes dos concretos curados em câmara úmida. Ressalta-se, assim, a importância de se realizar um estudo prévio com os insumos a serem empregados em cada caso.

4.5 ENSAIOS DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DA TEMPERATURA DOS CONCRETOS

Foram realizados ensaios de elevação da temperatura dos concretos durante os três primeiros dias de cura para cada traço, para avaliar a variação de quantidade de calor liberado em cada resistência, para cada aglomerante. Com os resultados desses ensaios, foram estabelecidas três variáveis para uma melhor análise desses valores.

As três variáveis são: (1) °C/MPa, que representa a quantidade de temperatura liberada para cada MPa de resistência obtida dos resultados dos concretos; (2) °C/100 kg de aglomerante, representa a quantidade de temperatura liberada pela mistura para cada cem quilogramas do aglomerante utilizado; (3) Amplitude Térmica, representa a diferença entre o menor e o maior pico de temperatura medida. Os resultados do ensaio para cada traço de concreto produzido são demonstrados na tabela 19.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de elevação de temperatura adiabática dos concretos com os diferentes aglomerantes

Traço	°C/MPa	°C/100 kg de aglomerante	Amplitude Térmica (°C)
Referência 40	0,89	13,51	37,99
Referência 45	0,88	12,96	40,78
Referência 50	0,72	10,92	38,16
Referência 55	0,77	11,52	44,89
MK 40	0,79	11,77	34,55
MK 45	0,68	10,52	33,40
MK 50	0,66	10,93	37,40
MK 55	0,66	11,00	40,51
S. A 40	0,68	10,35	30,39
S. A 45	0,59	10,15	32,24
S. A 50	0,73	12,34	42,24
S. A 55	0,71	12,25	45,21
CPIII-RS 40	0,49	6,54	23,6
CPIII-RS 45	0,52	7,03	27,7
CPIII-RS 50	0,49	6,86	29,61
CPIII-RS 55	0,48	6,91	32,60

Fonte: Autor, 2017.

Com os resultados apresentados na tabela 19, verifica-se que há uma tendência do aumento dos índices, °C/MPa e °C/100kg de aglomerante, quando a resistência é mais baixa e também quando o consumo de aglomerante é menor. Já a amplitude térmica tem uma tendência de ser maior quanto maior é o consumo de aglomerante. Ressalta-se que esses valores são válidos e compreendidos dentro das faixas de resistências, com os materiais específicos e com a mistura utilizada no presente estudo. Essas variáveis foram calculadas a partir dos resultados obtidos dos picos de temperaturas de cada mistura pela resistência à compressão aos 28 dias de cada mistura (°C/MPa) e pelo consumo de aglomerante de cada mistura (°C/100 kg de aglomerante).

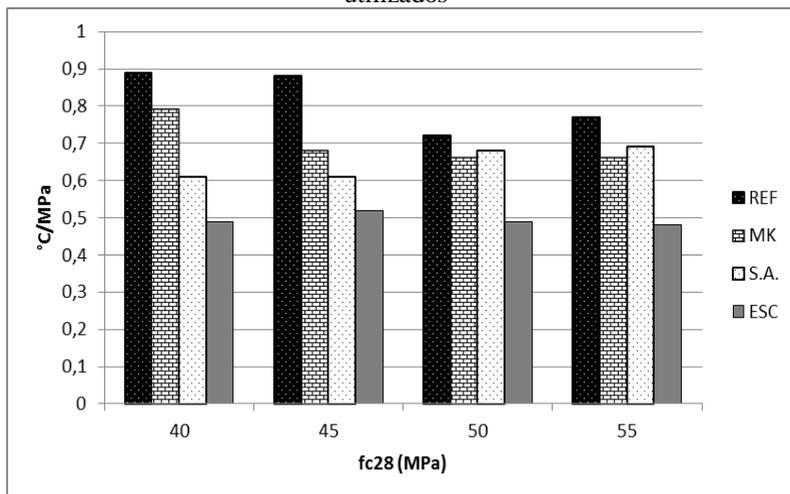
Os valores dos índices para o CP V - ARI corroboram os dados da literatura, com valores de °C/100 kg de aglomerante, os quais apontam que esse índice deve ter um valor de 12°C/100 kg do aglomerante. Isso também é válido para o metacaulim e a sílica ativa,

cujas misturas apresentaram valores parecidos com este, como pode ser verificado na tabela acima.

Já o CP III - RS apresentou um comportamento diferente dos demais aglomerantes utilizados, ou seja, um menor índice de calor liberado pela mistura para cada cem quilogramas do aglomerante utilizado se comparado com os demais. Este resultado pode ser explicado devida a este aglomerante ter uma elevada concentração de escória, cerca de 50%, e que a escória tem sua ativação devido à elevação do pH da mistura, o que pode não ter acontecido até às 72 horas analisadas no estudo. Portanto, ressalta-se que a mistura feita com escória pode ter seu pico de temperatura após as 72 horas.

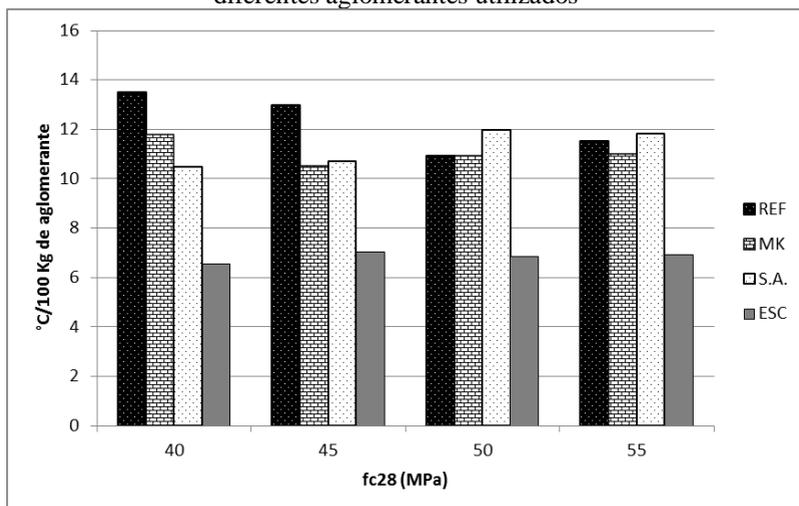
Para melhor visualização desses resultados, foram produzidos gráficos com as variáveis de °C/MPa, °C/100 kg de aglomerante e seus diferenciais de temperatura, sendo que os gráficos foram feitos com os diferentes aglomerantes utilizados e para cada faixa de resistência. Esses gráficos podem ser visualizados nas figuras 23 e 24 abaixo.

Figura 23- Variável °C/MPa para os fc28 dos diferentes aglomerantes utilizados



Fonte: Autor, 2017.

Figura 24- Variável °C/ 100 kg de aglomerante para os Fc28 dos diferentes aglomerantes utilizados



Fonte: Autor, 2017.

Comparando os resultados de mesma resistência, percebe-se que houve uma tendência de diminuir as variáveis de °C/MPa, °C/100 kg de aglomerante e amplitude térmica, para as misturas produzidas com o aglomerante CP III - RS em relação aos valores da mistura de referência. Já para os aglomerantes CP V – ARI + sílica ativa e CP V – ARI + metacaulim, foi verificado que, para as resistências de 40 e 45 MPa, houve uma diminuição dessas variáveis. Já para as resistências de 50 e 55 MPa existe um comportamento muito parecido em relação à mistura produzida com CP V - ARI.

O comportamento parecido dos aglomerantes: CP V – ARI + sílica ativa, CP V – ARI + metacaulim e CP V - ARI pode ser explicado devido aos aglomerantes, sílica ativa e metacaulim, terem uma alta reatividade e por suas substituições serem baixas em relação à mistura produzida com CP III - RS, além do que, o metacaulim e a sílica ativa têm como características a criação de pontos de nucleação.

O parâmetro °C/MPa foi verificado para que possa ser calculado o aumento da temperatura de um concreto, para um tipo de aglomerante, para uma resistência requisitada. Este parâmetro indicou que, para todas as resistências, o aglomerante CP V - ARI teve uma tendência de produzir maior quantidade de temperatura para cada MPa. Já os aglomerantes contendo metacaulim e sílica ativa tiveram uma liberação de temperatura por MPa alta e parecida com a do CP V - ARI nas resistências de 50 e 55 MPa. O aglomerante CP III - RS liberou cerca de 40% a menos de temperatura em relação ao CP V - ARI, e cerca de 30% menos do que os que continham metacaulim e sílica ativa, independente da resistência.

O Parâmetro de °C/100 kg de aglomerante resultou em um valor maior para os concretos produzidos com sílica ativa, metacaulim e CP V - ARI. Estes aglomerantes tiveram um comportamento muito parecido entre si e, também, parecido com o que a literatura indica. O aglomerante CP III - RS apresentou valor de até 45% menor em relação ao CP V - ARI e 39% menor em relação ao metacaulim e a sílica ativa, para este parâmetro, indicando uma menor liberação de temperatura para todos os teores de aglomerante utilizado no presente estudo.

Outro parâmetro verificado com os dados supracitados é a amplitude térmica. Nesse sentido, pode-se verificar que o concreto produzido com CP III - RS obteve uma menor amplitude térmica, para todas as resistências com os diferentes tipos de aglomerantes

utilizados. O aglomerante contendo metacaulim teve sua amplitude térmica menor do que o do aglomerante CP V - ARI em todas as resistências. Já em comparação com o que continha sílica ativa, seu comportamento foi de ter um ganho maior de temperatura nas resistências de 40 e 45 MPa e menor ganho para as resistências de 50 e 55 MPa. O aglomerante contendo sílica ativa apresentou um comportamento parecido com o do CP V - ARI para as resistências maiores que 45 MPa. Já para resistências menores ou iguais, apresentou um ganho de temperatura menor.

Para análise desses dados descritos acima, foi aplicada análise estatística TWO-WAY, visando à verificação da influência do tipo de aglomerante e a faixa de resistência. Assim, verifica-se na Tabela 20, abaixo, a representação da análise estatística realizada para estas variáveis.

Tabela 20 - Tabela ANOVA para o parâmetro Amplitude Térmica

Fonte	SQ ⁶	GDL ⁷	MQ ⁸	F ⁹	F0,05(3,9) ¹⁰
Resistência	194,469	3	64,823	8,37	3,86
Aglomerante	320,506	3	106,835	13,79	3,86
Resíduo	69,709	9	7,745	-	-
Total	584,684	15	-	-	-

Fonte: Autor, 2017.

Verifica-se, com 95% de confiabilidade, que o tipo de aglomerante utilizado e a resistência de dosagem na mistura têm influência no parâmetro amplitude térmica, ou seja, certifica-se que a liberação de temperatura total do aglomerante é influenciada pela resistência de dosagem e o tipo de aglomerante utilizado.

Para o parâmetro de ganho de temperatura para cada MPa de resistência do concreto, também foi realizado análise estatística TWO-

⁶ Soma dos quadrados dos resultados do parâmetro em questão.

⁷ Grau de liberdade: Número de observações independentes menos o número de restrições lineares.

⁸ Média quadrada do parâmetro em questão.

⁹ Distribuição F calculada através dos resultados do experimento.

¹⁰ Valor da Distribuição para a confiabilidade desejada (95%) com os graus de liberdade.

WAY, para a verificação da influência da resistência de dosagem e o tipo de aglomerante nesse parâmetro. Assim, conforme a Tabela 21, verificou-se que, com 95% de confiabilidade, o tipo de aglomerante utilizado na mistura tem influência no parâmetro ganho de temperatura para cada MPa de resistência, o que não ocorre com a faixa de resistência estudada. Dessa forma, ressalta-se que se deve tomar o cuidado na escolha do aglomerante para a produção das misturas, a fim de evitar as patologias de ordem térmica.

Tabela 21 - Tabela Anova para o parâmetro °C/Mpa

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F 0,05(3,9)
Resistência	0,0105	3	0,00351	1,177	3,86
Aglomerante	0,2100	3	0,07001	23,488	3,86
Resíduo	0,0268	9	0,00298	-	-
Total	0,2474	15	-	-	-

Fonte: Autor, 2017.

Além desses resultados da análise estatística já apresentados, para complementar os resultados estatísticos, foi aplicado o teste de Duncan nos dados, visando à verificação de qual tipo de aglomerante libera mais ou menos temperatura conforme a resistência. Para que isso fosse possível, utilizou-se a média do parâmetro medido para cada aglomerante. O teste de Duncan é apresentado na tabela 22, abaixo.

Tabela 22 - Teste de Duncan

Aglomerantes	Diferença	Calculado	Resultado
Ref- CIII-RS	0,32	0,1171585	DFS
Ref-S.A.	0,1575	0,1051637	DFS
Ref-MK	0,1175	0,0859163	DFS
MK-S.A.	0,04	0,0859163	NDFS
MK- CIII-RS	0,2025	0,1051637	DFS
S.A.- CIII-RS	0,1625	0,0859163	DFS

Fonte: Autor, 2017.

Assim, verifica-se que para o parâmetro °C/MPa, com a confiabilidade de 95%, pode ser aceito que os resultados obtidos se diferenciaram significativamente (DFS) para quase todos os aglomerantes, sendo que somente os aglomerantes contendo metacaulim e sílica ativa não se diferenciaram significativamente, ou seja, tiveram uma tendência de um comportamento parecido.

A partir da análise, pode-se aceitar que o tipo de aglomerante que libera maior calor, dentre os aglomerantes deste estudo, é o CP V - ARI, seguido pelos que continham metacaulim e sílica ativa, que tiveram a tendência de ter o mesmo comportamento e, por último, o aglomerante CP III - RS, que se demonstrou diferente significativamente de todos.

Para o parâmetro °C/100kg de aglomerante, também foi aplicada a análise estatística TWO-WAY, visando verificar a influência do tipo de aglomerante e resistência neste parâmetro. A Tabela 23 ANOVA abaixo apresenta os resultados deste tratamento estatístico.

Tabela 23 - Tabela ANOVA para o parâmetro °C/100Kg de aglomerante

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F0,05(3,9)
Resistência	0,3396	3	0,11322	0,152	3,86
Aglomerante	68,6936	3	22,89788	30,665	3,86
Resíduo	6,7203	9	0,74670	-	-
Total	75,7536	15	-	-	-

Fonte: Autor, 2017.

Verifica-se, com 95% de confiabilidade, que o tipo de aglomerante tem influência no parâmetro °C/100Kg de aglomerante. Além disso, conclui-se que a resistência não tem influência para este mesmo parâmetro. Para uma melhor compreensão, foi aplicado o teste de Duncan, para verificação de qual tipo de aglomerante libera mais ou menos calor conforme a resistência. O teste de Duncan é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados para o Teste de Duncan para o parâmetro °C/100Kg de aglomerante

Agglomerantes comparados	Diferença	Calculado	Resultado
Ref- CPIII-RS	5,393	1,611	DFS
Ref-S.A.	1,173	1,446	NDFS
Ref-MK	0,985	1,181	NDFS
MK-S.A.	0,188	1,181	NDFS
MK- CPIII-RS	4,408	1,446	DFS
S.A.- CPIII-RS	4,220	1,181	DFS

Fonte: Autor, 2017.

Na tabela acima, verifica-se, com a confiabilidade de 95% para o parâmetro °C/100kg, que todos os resultados obtidos se diferenciaram significativamente (DFS) para o aglomerante CPIII-RS em relação aos demais. Para os demais, não foi verificada diferença significativa entre eles, o que apresenta uma tendência de um comportamento parecido para todos estes.

Sendo assim, comprova-se que o tipo de aglomerante que libera menor temperatura para cada 100 Kg de aglomerante, dentre os aqui estudados, é o CPIII-RS. Isso pode ser verificado no trabalho de

Bamforth (1980), o qual apresenta em sua conclusão que a taxa de evolução do calor pode diminuir significativamente com a utilização de materiais cimentícios, em substituição ao cimento.

Corroborando os resultados desta pesquisa, no estudo de Dias *et al.* (1990), foram realizados ensaios de elevação de temperatura adiabática com os teores de 0%, 25%, 55%, 80% e 100% de escória, sendo que os autores observaram que, conforme o teor aumentava, ocorria a diminuição da temperatura adiabática. Além disso, Liduário *et al.* (2008) também verificou que a quantidade de calor liberado adiabaticamente pelo concreto produzido com escória foi menor até a idade de 72 horas, quando comparado com os concretos produzidos com as substituições de metacaulim, sílica ativa e a referência.

Conforme verificado no gráfico a seguir, Han *et al.* (2014) corroboram com os resultados desta pesquisa, demonstrando no gráfico de calor de hidratação liberado pelo tempo de cura, que até às 72 horas em uma temperatura de cura de 45°C, o calor liberado pelo cimento com escória é de cerca de 20% menor do que o cimento normal.

Além disso, Han *et al.* (2017) apresentam um gráfico de liberação de calor pelas pastas produzidas com cimento puro, cimento com substituição de escória (nos teores de 30% e 70%), e pó de quartzo (nos teores de 30% e 70%) que mostra a energia liberada, em forma de calor, para uma idade de 72 horas. Eles afirmam que, conforme ocorre o aumento de substituição de cimento por escória, o calor de hidratação liberado é menor. Os autores explicam isso pela maior quantidade de cimento na substituição de 30% de escória, aumentando assim o calor liberado pela hidratação das partículas. Além disso, a quantidade de OH^- é maior para a substituição de 30% do que para a substituição de 70%, o que estimula a reação da escória.

Os autores afirmam que, conforme houve o aumento da quantidade de substituição de escória em relação ao cimento, ocorreu a diminuição da liberação do calor de hidratação, devido à redução do ambiente alcalino ativador da escória, que é fornecido pela hidratação do clínquer. O que também pode ser considerado é a reatividade da escória utilizada, pois quanto maior a fração vítrea de uma escória, maior será sua reatividade e, conseqüentemente, maior será a reação e também a liberação de calor (ESCALANTE *et al.*, 2001). Corroborando os resultados apresentados acima, se podem citar os

trabalhos de (DIAS *et al.* 1990; TAM *et al.* 1994; RAMACHANDRAN 1995; MALHOTRA e MEHTA 1996).

O comportamento de menor liberação de temperatura pela escória apresentado durante os 3 dias de cura térmica neste estudo, pode ser justificado devido à reatividade dos aglomerantes, sendo a escória menos reativa do que os demais. A liberação do calor de hidratação das partículas de escória pode ocorrer lentamente, isso porque depende da decomposição da fase vítrea pelos íons de hidroxila liberados durante a hidratação do cimento Portland (NEVILLE, 1997).

Os demais aglomerantes não apresentaram diferença significativa na liberação de temperatura e, assim, com 95% de confiança, se aceita que eles liberam a mesma quantidade de temperatura para cada 100kg de aglomerante utilizado. Esses resultados estão em consonância com os escritos de FitzGibbon (1977) *apud* Neville (1997), o qual cita que consumos na faixa entre 300 e 600 kg/m³ esse parâmetro deve ser igual para qualquer tipo de cimento.

Nessa perspectiva, nos estudos de Kadri e Duval (2009) e Nili e Salehi (2010), sobre a substituição de cimento por sílica ativa, houve uma tendência de aumento no calor de hidratação liberado inicialmente pela pasta de aglomerante devido ao fato da sílica ativa promover a criação de pontos de nucleação que fazem com que as reações de hidratação ocorram mais rapidamente. Por fim, ressalta-se que, assim como nesta pesquisa, no estudo de Kadri *et al* (2011) também houve a semelhança no calor de hidratação liberado pelos aglomerantes contendo metacaulim, sílica ativa e cimento Portland comum.

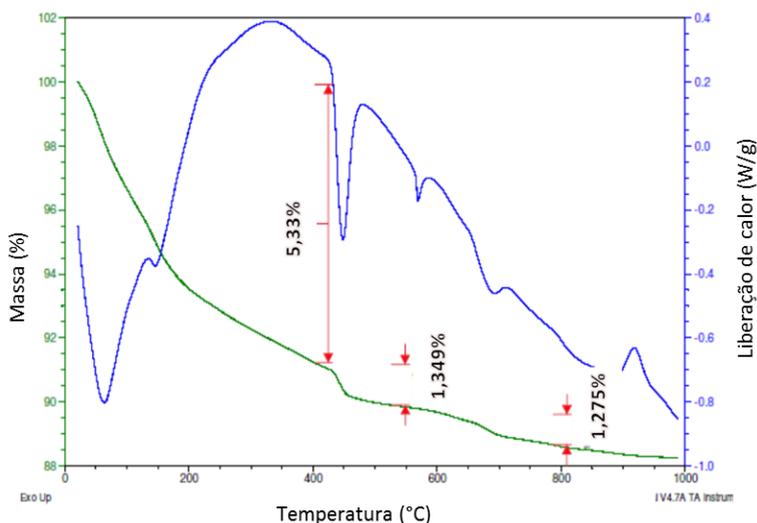
4.6 TERMOGRAVIMETRIA EM PASTAS

A influência das elevações de temperatura nas reações de hidratação dos aglomerantes foi observada através do ensaio de termogravimetria, que foi realizado em pastas produzidas com mesmas relações a/aglomerante dos concretos. As pastas foram ensaiadas aos 28 dias.

Um exemplo para facilitar o entendimento das explanações realizadas a seguir, apresenta-se na figura 25, em que estão demonstradas as curvas TGA e DrTGA de uma pasta produzida com

CP III – RS e curada adiabaticamente. Salienta-se que as curvas termogravimétricas (TGA) e a sua derivada (DrTGA) das pastas estão no Apêndice 3.

Figura 25 – Curvas TGA e DrTGA do aglomerante CPIII-RS 40 Cura Adiabática



Fonte: Autor, 2017.

Para todas as pastas do estudo, foram observadas três transições de perda de massa na curva TGA. A primeira transição ocorre na faixa de 20°C a 400°C, e é atribuída à evaporação da água livre até 105°C e à decomposição dos hidratos fica na faixa de temperatura seguinte, de 105°C a 400°C; a segunda transição fica na faixa de temperatura entre 400 até 530°C devido a dissociação da água de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita), resultando em sua desintegração; e, por fim, a terceira e última transição ocorre na faixa de 530 a 790°C, onde ocorre a volatilização do anidrido carbônico do carbonato de cálcio.

A partir dos resultados dos ensaios de termogravimetria, foram calculados os teores da água quimicamente combinada, para a faixa de temperatura entre 105°C e 400°C, e do hidróxido de cálcio presente nas pastas aos 28 dias, apresentados na Tabela 25. Ressalta-se que, para calcular esses teores, os dados retirados dos gráficos foram corrigidos conforme o Apêndice 4, ou seja, os resultados da

tabela a seguir já estão corrigidos devidos à massa residual, às adições de areia fina e também as substituições realizadas com os aglomerantes contendo sílica ativa, metacaulim e CP III - RS.

Tabela 25 - Resultados obtidos através do ensaio de Termogravimetria e suas correções aos 28 dias dos diferentes tipos de aglomerantes utilizados

Pasta	Cura	Água quimicamente combinada	Ca(OH ₂)
Ref 40	CH	12,07	22,96
S.A. 40	CH	16,21	24,40
MK 40	CH	15,84	16,15
CPIII-RS 40	CH	27,75	32,68
Ref 40	CA	12,32	20,24
S.A. 40	CA	13,70	22,33
MK 40	CA	17,11	16,19
CPIII-RS 40	CA	27,31	28,40
Ref 55	CH	11,82	22,90
S.A. 55	CH	13,41	13,44
MK 55	CH	16,54	14,34
CPIII-RS 55	CH	18,94	20,11
Ref 55	CA	11,93	22,45
S.A. 55	CA	13,25	16,85
MK 55	CA	15,18	13,43
CPIII-RS 55	CA	27,98	29,30

Fonte: Autor, 2017.

Verifica-se na tabela 25 que há uma tendência de ter maior quantidade de água quimicamente combinada - maior o teor de hidratos - quando realizada a substituição de CP V - ARI (REF) por CP III - RS (ESC), sílica ativa ou metacaulim. Constata-se assim, que as pastas produzidas com os aglomerantes: sílica ativa e metacaulim apresentaram maior grau de hidratação das partículas aos 28 dias quando comparadas com as pastas produzidas com CP V - ARI, tendo em vista que a consolidação da pasta está relacionada diretamente com o teor de hidratos formados. Ainda, houve uma tendência do aumento da quantidade de água quimicamente combinada para a resistência de 40 MPa.

Sabe-se que a cura sob uma temperatura mais alta faz com que a velocidade de hidratação das partículas de cimento acelere, acarretando uma formação de hidratos mais expressiva aos 28 dias. Esse efeito é causado devido às partículas extremamente finas presentes nos materiais, que cria pontos de nucleação e acelera o processo de hidratação das partículas (BARATA; DAL MOLIN, 2002). Esse fenômeno é mais pronunciado quanto maior for a substituição desses aglomerantes em relação ao clínquer, enfatizando que a nucleação não depende das condições de cura. Nesse sentido, para a atividade pozolânica, há um consenso na literatura, que afirma que conforme se aumenta a temperatura de cura de uma mistura acelera-se o processo de reação pozolânica.

Ainda, verifica-se que para os aglomerantes metacaulim e a sílica ativa, houve uma tendência em um maior consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para a cura autógena em relação à cura em câmara úmida, que é justificado devido à aceleração da atividade pozolânica pela temperatura de cura. Para o aglomerante CP V - ARI, pode-se afirmar que a maior quantidade de hidratos formados pela cura autógena resultou da temperatura de cura, que acelerou o processo de hidratação das partículas de cimento.

Para o metacaulim, na resistência de 40 MPa, houve um aumento da água quimicamente combinada quando curado adiabaticamente em relação ao curado em câmara úmida. Isso pode ser explicado pelo fato de que, em resistências menores, há um maior afastamento entre as partículas de cimento, ocasionada pela diminuição do consumo de aglomerante, o que faz com que a água consiga entrar em contato com as partículas de cimento com maior facilidade, fornecendo uma aceleração no processo de hidratação (LANGAN, WENG; WARD, 2002).

Nota-se que, independentemente do tipo de cura e da resistência, as pastas produzidas com metacaulim apresentaram um comportamento com maior valor de hidratos formados em relação ao CP V - ARI, com um maior consumo de hidróxido de cálcio, representando a ação preponderante para esse aglomerante que foi a reação pozolânica. O mesmo fator preponderante foi notado para o aglomerante CP III - RS, independentemente do tipo de cura e da resistência.

Já para a sílica ativa houve um aumento na quantidade de hidratos formados, porém não houve um maior consumo de hidróxido

de cálcio, para a resistência de 40 MPa independentemente do tipo de cura, preponderando-se a ação da criação de pontos de nucleação.

4.7 ANÁLISE ECONÔMICA

Neste subtópico, será apresentada uma análise econômica para os diferentes tipos de aglomerantes utilizados neste trabalho, para a produção de um bloco de fundação com volume de 1500m³, considerando a elevação adiabática de concreto, para as resistências características de 35 e 50 MPa, com temperatura inicial de 30°C. Os preços encontrados para os aglomerantes foram: CP V - ARI 0,35 R\$/KG; sílica ativa 1,00 R\$/KG; metacaulim 0,89 R\$/KG; CP III - RS 0,33 R\$/KG. Para evitar problemas de patologias térmicas, as temperaturas dos concretos produzidos com estes aglomerantes não poderão atingir valores maiores que 65°C. Para isso, será utilizado gelo. Os resultados para essa análise são mostrados na tabela 26 abaixo.

Tabela 26 - Custo de produção do bloco de fundação com 1500m³ para cada aglomerante nas resistências de 40 e 55 MPa

Resistência (MPa)	40				55			
	CP V - ARI	CP III - RS	CP V - ARI + Sílica Ativa	CP V - ARI + MK	CP V - ARI	CP III - RS	Sílica ativa	MK
Custo aglomerante (R\$/Kg)	0,35	0,33	-	-	0,35	0,33	-	-
Custo da adição empregada (R\$/Kg)	-	-	1	0,89	-	-	1	0,89
Quantidade de aglomerante p/m ³	276,9	327,3	276,9	276,9	375	409	367,35	346,2
Consumo de cimento (kg/m ³)	276,90	327,30	260,62	248,60	375,00	409,00	345,75	310,82
Consumo de adição mineral (kg/m ³)	-	-	16,28	28,30	-	-	21,60	35,38
elevação da temperatura(°C/MPa)	0,89	0,49	0,68	0,79	0,77	0,48	0,71	0,66
Temperatura inicial (°C)	30	30	30	30	30	30	30	30
Previsão de temperatura final (°C)	65,6	49,6	57,2	61,6	72,35	56,4	69,05	66,3
Gelo (Kg/m ³)	7,8	0	0	0	62,8	0	31,4	15,7
Custo do Gelo(R\$/kg)	0,25							
Custo total (Kg/m ³)	98,87	108,01	107,50	112,20	146,95	134,97	150,46	144,20
Produção do bloco de 1500m ³ (R\$)	148.297,50	162.013,50	161.247,18	168.294,84	220.425,00	202.455,00	225.693,93	216.301,63

Fonte: Autor, 2017.

Verifica-se a partir da Tabela 26 que o concreto com menor custo de produção, para o bloco de fundação com um volume de 1500m³, será o concreto produzido com o aglomerante CP V - ARI, para a resistência 40 MPa. Já para a resistência de 50 MPa o aglomerante mais barato para construção do bloco será o CP III - RS. Assim, para a resistência de 35 MPa o aglomerante que apresentou menor valor de produção foi o CP V - ARI, indicando assim que, mesmo com a utilização de gelo, a utilização desse aglomerante nessa resistência tem maior economia. Porém, para resistência de 50 MPa, o CP III - RS e o aglomerante contendo metacaulim apresentaram maior economia, indicando assim, que há uma tendência, no que se refere ao aumento da resistência, quanto maior é a resistência mais econômica se torna a utilização dessas substituições em relação ao cimento Portland.

Esta análise é de suma importância pois pode-se ter um maior consumo para um determinado aglomerante e mesmo assim a mistura pode ser economicamente viável pois não precisará utilizar gelo para diminuir o pico de temperatura. Isso pode ser verificado para as misturas para a faixa de resistência de 55 MPa, onde a mistura com CP III – RS teve um consumo de aglomerante maior do que os demais aglomerantes utilizados e resultou em uma mistura mais econômica do que as demais.

5 CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Esse trabalho analisou a elevação da temperatura adiabática de concretos produzidos com diferentes tipos de aglomerantes para diferentes valores de resistências, com o objetivo de analisar a influência do tipo de aglomerante para diferentes resistências na elevação adiabática de temperatura.

Os resultados para o ensaio de calorimetria mostraram que o aglomerante CP V - ARI apresentou maiores resultados quando comparado com os demais aglomerantes, para as variáveis de amplitude térmica e liberação do calor de hidratação para cada MPa de resistência do concreto. Isso demonstra que o aglomerante CP V - ARI tem uma maior liberação de calor para um concreto com mesma resistência quando comparado com concretos produzidos com os aglomerantes metacaulim, sílica ativa e CP III - RS.

No parâmetro de liberação de calor para cada 100Kg de aglomerante, os resultados do aglomerante CP V - ARI não diferenciaram significativamente quando comparados com os resultados dos aglomerantes contendo metacaulim e sílica ativa. Porém, as curvas de dosagem dos concretos demonstraram que o metacaulim e a sílica ativa possuem um ganho de resistência para uma mesma relação a/aglomerante, ou seja, para uma mesma resistência, os concretos produzidos com estes aglomerantes possuem a tendência de liberar menor calor de hidratação para este parâmetro, já que o consumo de aglomerante será menor. Além disso, evidencia-se que a adição de metacaulim na mistura é um método de prevenção para a formação de etringita tardia. Contudo, essa adição pode resultar em um alto pico de temperatura, o que pode acarretar em fissuração térmica.

Ressalta-se que os resultados dos ensaios de calorimetria apresentados para o aglomerante CP III - RS foram os menores em comparação aos dos demais aglomerantes e suas respectivas dosagens estudadas, indicando uma forma eficiente de diminuir o pico de elevação da temperatura adiabática dos concretos, o que previne patologias de origem térmica, como a formação de etringita tardia e a fissuração térmica. Porém, encontra-se na literatura trabalhos que demonstram que a liberação de calor do cimento CP III - RS (com

escória) pode ser semelhante à do CP V - ARI. Assim, mostra-se que devem ser feitos estudos preliminares no aglomerante antes de utilizá-lo na produção do concreto.

Os concretos curados adiabaticamente não apresentaram resistências maiores do que os curados em câmara úmida, sendo que seus comportamentos para a resistência à compressão foram muito semelhantes. Com esses resultados, construíram-se duas curvas de dosagem e essas curvas mostraram que os concretos produzidos com os aglomerantes contendo metacaulim e sílica ativa produziram maiores resistências com mesma relação a/aglomerante que o CP V - ARI e o CP III - RS.

Salienta-se que os concretos contendo sílica ativa apresentaram valores de resistência semelhantes aos produzidos com CP V - ARI, porém, o calor de hidratação liberado foi menor do que os que continham somente cimento CP V - ARI para uma mesma resistência, já que o parâmetro ganho de temperatura para cada MPa foi menor. Contudo, a sílica ativa não inibe a formação de etringita tardia, além de que o preço deste aglomerante é o mais elevado em comparação aos demais aqui estudados.

Para os resultados do ensaio de termogravimetria, verificou-se que as amostras produzidas com metacaulim foram comandadas pelo fenômeno da reação pozolânica, já as amostras produzidas com o aglomerante CP V - ARI + sílica ativa demonstraram serem regidas pelo fenômeno de produção de pontos de nucleação. Isso explica o motivo dos maiores resultados, no ensaio de resistências à compressão, para os concretos produzidos com o aglomerante metacaulim.

Ressalta-se que a utilização dessas adições minerais colabora com a durabilidade da estrutura e com a questão ambiental, pois, diminuindo o consumo de cimento dessas peças estruturais, diminuiu-se também a quantidade de emissões de dióxido de carbono ao meio ambiente. Lembra-se que, os resultados obtidos neste trabalho são para os materiais específicos desta pesquisa e com as condições específicas, de clima e ensaios.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fazer um estudo com diferentes tipos de escória de alto forno para o desenvolvimento adiabático de temperatura, fazer a caracterização de cada escória e verificar o motivo de uma escória liberar maior calor de hidratação do que outra.

Fazer um estudo de elevação da temperatura adiabática outros tipos de adições minerais como: cinza da casca de arroz, resíduo do polimento do porcelanato, cinza do bagaço de cana. E realizar uma relação custo benefício dos concretos produzidos com essas adições minerais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, de C. A. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil. Porto Alegre-RS, 2009.

AMBROISE, J. MAXIMILIEN S. PERA, J. **Properties of metakaolin blended cements**. *Advanced Cement Bases Materials*, pages 161-168, 1994.

ARAUJO, J. M. **Tensões térmicas em blocos de concreto armado**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.22, p.1-14, 2013. Editora Dunas. Disponível em:
<http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/ART1_N22.pdf>

ASAGA, K.; ISHIZAKI, M.; TAKAHAGH, S.; KONISHI, K; TSURUMI, T.; AIMON, M. Effect of curing temperature on the hydration of portland cement compounds. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION, 9, 1992. **Deli. Conference Deli: ICC**, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7. ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15894-1: **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte:1**. 2010.

_____.NBR 5735: **Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

_____.NBR 5736: **Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1999.

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

_____.NBR 5739: **Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

_____.NBR NM 22: **Agregado graúdo – Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem**. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____.NBR NM 53: **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

_____.NBR NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

BADOGIANNIS, G. E. SFIKAS, P. I. VOUKIA, V. D. TREZOS, G. K. TSIVILIS, G. S. **Durability of metakaolin self-compacting concrete**. Construction and Building Materials, vol. 82, pages 133-141, 2015.

BARATA, S. M. DAL MOLIN, C. C. D. **Avaliação preliminar do resíduo caulinitico das industrias de beneficiamento de caulim como matéria prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa**. Ambiente Construído, vol. 2, pages 69-78, 2002.

BATTAGIN, A.F.; ESPER, M.W. Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento portland de alto-forno. São Paulo: ABCP, 1988. 123 p. (ET-90)

BENTUR, A. GOLDMAN, A. **The influence of microfillers on enhancement of concrete strenght**. Cement and Concrete Research, vol. 23, pages 962-972, (1993).

BEUSHAUSEN, H. ALEXANDER, M. BALLIM, Y. **Early-age properties, strenght development and heat of hydration of concrete containing various South African slags at a diferent**

replacement ratios. Construction and Building Materials, vol. 29, pages 533-540, 2012.

BINGÖL A., TOHUMCU I. Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. **Materials & Design** 2013:51 12-18

CARLES-GIBERGUES, A. HORNAIN, H. **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo o ambiente.** Ibracon, São Paulo, 2014.

CARMO, do M. B. J. PORTELLA, F. K. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto.** Cerâmica, vol. 54, pages 309-318, 2008.

CASTELLANO, C. C. BONAVETTI, L.V. IRASSAR F. E. **The effect of w/b and temperature on the hydration and strength of blast furnace slag cements.** Construction and Building Materials, vol. 111, pages 679-688, 2016.

COELHO, A. de N. **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa.** Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília-DF, 2012.

CORDEIRO, C. G. TOLEDO FILHO, D. R. FAIRBAIRN, R. M. de E. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto.** Ambiente Construído, vol. 9, pages 99-107, 2009.

COUTO, D. HELENE, P. ALMEIDA, L. C. **Monitoramento de temperatura em sapata de fundação de grande porte: estudo de caso “Parque da Cidade” – SP.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Volume 9, Número 6 (dezembro, 2016), p. 953 – 968. ISSN 1983-4195.

DARQUENNES, A. OLIVIER, K. BENBOUDJEMA, F. GANGNÉ, R. **Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials.**

Construction and Building Materials, vol.113, pages 1017-1028, 2016.

DE MELO, A. B. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland.** 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

DESCHNER, F. LOTHENBACH, B. WINNEFELD, F. NEUBAUER, J. **Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash.** Cement and Concrete Research, vol 52, pages 169-181, 2013.

DIAS, E.G.; GAMBALE, E.A.; FONTOURA, J.T.F.; ESPER, M.W.; GÓZ, R.S.; BITTENCOURT, R.M.; PACELLI, W.A. **Estudo da influência do cimento Portland de alto-forno e cimento Portland comum com adição de escória de alto-forno moída nas propriedades do concreto.** In: 32º Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v.2, Fortaleza, 1990. (Anais).

DOTTO, R. M. J. ABREU de G. A. DAL MOLIN, C. C. D. MULLER, L. I. **Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars.** Cement and Concrete Composites, vol. 26, pages 31-39, 2004.

DRON, R. Facteurs chimiques et structuraux de la réactivité des latiers. **Silicates Industriels**, n. 6, p. 143-7, 1982.

EL-DIADAMONY, H. AMER, A. A. EL- HOSENY, S. SOKKARY, T. M. **Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes.** Housing and Building National Research Center Journal, HBRC journal, 2016.

EQUIPE DE FURNAS, Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e**

propriedades. Editor Walton Pacelli de Andrade, Editora. PINI, São Paulo, 1997.

ESCALANTE, J. J. GÓMEZ, L. Y. JOHAL, K. K. MENDOZA, G. MANCHA, H. MÉNDEZ, J. **Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions.** Cement and Concrete Research, pages 1403-1409, 2001.

FELDMAN, F. R. CHENG-YI, H. **Properties of Portland cement-silica fume pastes i. porosity and surface properties.** Cement and Concrete Research, vol. 15, pages 765-774, 1985.

FRÍAS, M. CABRERA, J. **Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes.** Cement and Concrete Research, vol. 30, pages 561-569, (2000).

FUCHTER, E. GODINHO, D. dos S. da S. **Influência da cura térmica por imersão nas propriedades mecânicas do concreto.** Universidade Estadual de Santa Catarina, 2016.

FURNAS Centrais Elétricas S/A. **Concretos: Massa, Estutural, Projetado e compactado com Rolo – Ensaios e Propriedades.** Editor Walton Pacelli de Andrade – Ed. Pini, São Paulo-SP, 1997.

HAN F., LIU R., WANG D., YAN P., **Characteristics of the hydration heat evolution of composite binder at different hydrating temperature, Thermochim. Acta.** 586 (2014) 52–57.

HAN, F. HE, X. ZHANG, Z. LIU, J. **Hydration heat of slag or fly ash in the composite binder at different temperatures.** Thermochimica Acta. Pages 202-210, 2017.

HAN, F. LIU, R. WANG, D. YAN, P. **Characteristics of the hydration heat evolution of composite binder at different hydrating temperature.** Thermochimica Acta, pg 52-57, 2014.

HWANG S D, KHATIB R, LEE H K, LEE S H, KHAYAT K H. **Optimization of steam-curing regime for high-strength, self-**

compacting concrete for precast, prestressed concrete applications. Precast Concrete Institute (PCI) Journal, summer 2012.

IONASHIRO, M. Fundamentos da termogravimetria análise térmica diferencial calorimetria exploratória diferencial. Ed. Giz, Araraquara, 2014.

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

KADRI E., KENAI, S. EZZIANE, K. SIDDIQUE, R. SCHUTTER, DE G. Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar. Applied Clay Science, vol 53, pages 704-708, 2011.

KADRI, E. H. DURVAL, R. Hydration heat kinetics of concrete with silica fume. Construction and Building Materials, vol 23, pages 3388-3392, 2009.

KHATIB, M. J. WILD, S. Pore size distribution of metakaolin paste. Cement and Concrete Research, vol. 26, pages 1545-1553, 1996.

LANGAN, W. B. WENG, K. WARD, A. M. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. Cement and Concrete Research, vol. 32, pages 1045-1051, 2002.

LIDUÁRIO, A. S. FARIAS, L. A. ANDRADE, M. A. S. BITTENCOURT, R. M. Estudo da influência de adições pozolânicas e minerais no concreto. Furnas, (2008).

LIDUÁRIO, S. A. Contribuição ao estudo das propriedades térmicas do concreto convencional na presença das adições minerais. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e construção Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia-GO, 2006.

LIU, J. YU, Q. ZUO, Z. YANG, F. DUAN, W. QIN, Q. **Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in a slag cement.** Construction and Building Materials, vol. 131, pages 381-387, 2017.

LIVESEY, P. DONELLY, A. TOMLINSON, C. **Measurement of the heat of hydration of cement.** Cement and Concrete Composites, vol. 13, pages 177-185, 1991.

MALHOTRA, V.M; MEHTA, P.K; **Pozzolanic and cementitious materials. Advanced Concrete Techonology Program.** CANMET, Ottawa, Ontario, Canada, Vol. 1, 1996.

MEHTA, K. P. MONTEIRO, M. J. P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2º edição. Edição: Nicole Pagan Rasparyk. IBRACON, São Paulo-SP, 2014.

MEHTA, K. P. **Studies on blended Portland cements containing Santorin Earth.** Cement and Concrete Research, vol. 11, pages 507-518, 1981.

MEHTA, P. K. e GJORV O. E. **Properties of Portland cement concrete containing fly ash and condensed sílica-fume.** Cement and Concrete Research, pages 587-595, 1982.

MUNHOZ, F. A. da C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia de Construção civil. São Paulo – SP, 2007.

NARMLUK, M. NAWA, T. **Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures.** Cement and Concrete Research, vol 41, pages 579-589, 2011.

NEVILLE, Adam Mattew. **Propriedades do Concreto.** 2ª Ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, Tradução Salvador Eugênio Giammusso, 1997.

NILI, M. SALEHI, A. M. **Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete.** Construction and Building Materials, pages 2108-2116, 2010.

NONAT, A. **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo o ambiente.** Ibracon, São Paulo, 2014.

OERTEL, T. HELBIG, U. HUTTER, F. KLETTI, H. SEXTL, G. **Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete.** Cement and Concrete Research, vol. 58, pages 121-130, 2014.

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

PRUDÊNÍCIO JR., L. R. P. MONTEIRO, P. J. M. SALUM, P. JUNKES, R. GRAEFF, E. **Concreto para grandes blocos de fundação.** Projeto de Pesquisa, Berkeley, 2014.

RAMACHANDRAN, V.S; **Concrete admixtures handbook – Properties, science, and technology.** 2ª edição, ISBN 0-8155-1373-9, 1995.

RAMLOCHAN, T. THOMAS, M. D. A. HOOTON, R. D. **the effects of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature part ii: microstructural and microchemical investigations.** Cement and Concrete Research, pg 1341-1356, 2004.

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.

SANJUÁN, M. A. ARGIZ, C. GÁLVEZ, J. C. MORAGUES, A. **Effect of sílica fume fineness on the improvement of Portland**

cement strength performance. Construction and Building Materials. Pages 55-64, 2015.

SANTOS, S. B. BITTENCOURT, R. M. GRAÇAN. G. **Efeitos da temperatura sobre o concreto.** In: ISAIA, G. C. (Ed) Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. Ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

SANTOS, W. F. dos. **Influência da cura térmica nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto autoadensável contendo adições de metacaulim e filer calcário.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.2016.

SCHACKOW, A. EFFTING, C. GOMES, R. I. PATRUNI, Z. I. VICENZI, F. KRAMEL, C. **Temperature variation in concrete samples due to cement hydration.** Applied Thermal Engineering, vol. 103, pages 1362-1369, 2016.

SHANNAG, J. M. **High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume.** Cement and Concrete Research, vol. 22, pages 399-406, 2000.

SHATAT, R. M. **Hydration behavior and mechanical properties of blended cement containing various amounts of rice husk ash in presence of metakaolin.** Arabian Journal of Chemistry, 2014.

SINGH, B. N. RAI S. CHATUVERDI, **Hydration of composite cement.** Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, pages 171-174, 2002.

TAM, C.T; LOO, Y.H; CHOONG, K.F; **Adiabatic temperature rise in concrete with and without GGBFS.** In: **Proceedings – ACI International Conference**, Editor V.M. Malhotra, Singapore, SP – 149, 1994.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** 2nd ed., London: Thomas Telford, 1997.

V. M. MALHOTRA, G. G. CARETTE, and V. SIVASUNDARAM. Role of silica fume in concrete: A Review, Proceeding. International Symposium on Advances in Concrete Technology. Athens, 2^a edição, Ottawa. Canada. 1992.

VOINOVITCH, I. A.; RAVERDY, M.; DRON, R. Cement de laitier granule sans clínquer. **Bull Liason Lab. P. et Ch.**, Paris, n. 116, p. 87-90, nov/dec 1981.

ZELIC, J. RUSIC, D. VEZA, D. KRSTULOVIC, R. **The role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration.** Cement and Concrete Research. Vol., 30, pages 1655-1662, 2000.

ZHANG, H. M. LASTRA, R. MALHOTRA, M. V. **Rice-husk ash paste and concrete some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste.** Cement and Concrete Research, vol. 26, pages 963-977, 1996.

ZHANG, H. M. MALHOTRA, M. V. **Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete.** Cement and Concrete Research, vol. 25, pages 1713-1725, 1995.

ZHANG, Z. ZHANG, B. YAN, P. **Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures.** Construction and Building Materials, pages 483-490, 2016.

APÊNDICE 1

Quantidade de materiais para a produção das Argamassas

Insumos	Referência (CP V - ARI)				CP III - RS			
	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
cimento (kg)	0,400	0,527	0,647	0,795	0,384	0,506	0,622	0,764
areia natural (kg)	0,947	0,877	0,812	0,716	0,947	0,877	0,812	0,716
areia de britagem (kg)	0,631	0,585	0,541	0,477	0,631	0,585	0,541	0,477
água (kg)	0,288	0,290	0,291	0,302	0,288	0,290	0,291	0,302
Insumos	Metacaulim 8%				Metacaulim 10%			
cimento (kg)	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
metacaulim (kg)	0,368	0,484	0,595	0,732	0,360	0,474	0,582	0,716
areia natural (kg)	0,0267	0,0352	0,0432	0,0531	0,0334	0,0440	0,0540	0,0664
areia de britagem (kg)	0,947	0,877	0,812	0,716	0,947	0,877	0,812	0,716
areia de britagem (kg)	0,631	0,585	0,541	0,477	0,631	0,585	0,541	0,477
água (kg)	0,288	0,290	0,291	0,302	0,288	0,290	0,291	0,302
Insumos	Metacaulim 12%				Metacaulim 14%			
cimento (kg)	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
metacaulim (kg)	0,352	0,463	0,569	0,700	0,344	0,453	0,556	0,684
areia natural (kg)	0,0401	0,0528	0,0648	0,0797	0,0467	0,0615	0,0756	0,0930
areia de britagem (kg)	0,947	0,877	0,812	0,716	0,947	0,877	0,812	0,716
areia de britagem (kg)	0,631	0,585	0,541	0,477	0,631	0,585	0,541	0,477
água (kg)	0,288	0,290	0,291	0,302	0,288	0,290	0,291	0,302
Insumos	Sílica Ativa 8%				Sílica Ativa 10%			
cimento (kg)	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
sílica ativa (kg)	0,368	0,484	0,595	0,732	0,360	0,474	0,582	0,716
areia natural (kg)	0,0230	0,0303	0,0372	0,0457	0,0287	0,0378	0,0465	0,0571
areia de britagem (kg)	0,947	0,877	0,812	0,716	0,947	0,877	0,812	0,716
areia de britagem (kg)	0,631	0,585	0,541	0,477	0,631	0,585	0,541	0,477
água (kg)	0,288	0,290	0,291	0,302	0,288	0,290	0,291	0,302
Insumos	Sílica Ativa 12%				Sílica Ativa 14%			
cimento (kg)	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
sílica ativa (kg)	0,352	0,463	0,569	0,700	0,344	0,453	0,556	0,684
areia natural (kg)	0,0345	0,0454	0,0558	0,0686	0,0402	0,0530	0,0651	0,0800
areia de britagem (kg)	0,947	0,877	0,812	0,716	0,947	0,877	0,812	0,716
areia de britagem (kg)	0,631	0,585	0,541	0,477	0,631	0,585	0,541	0,477
água (kg)	0,288	0,290	0,291	0,302	0,288	0,290	0,291	0,302

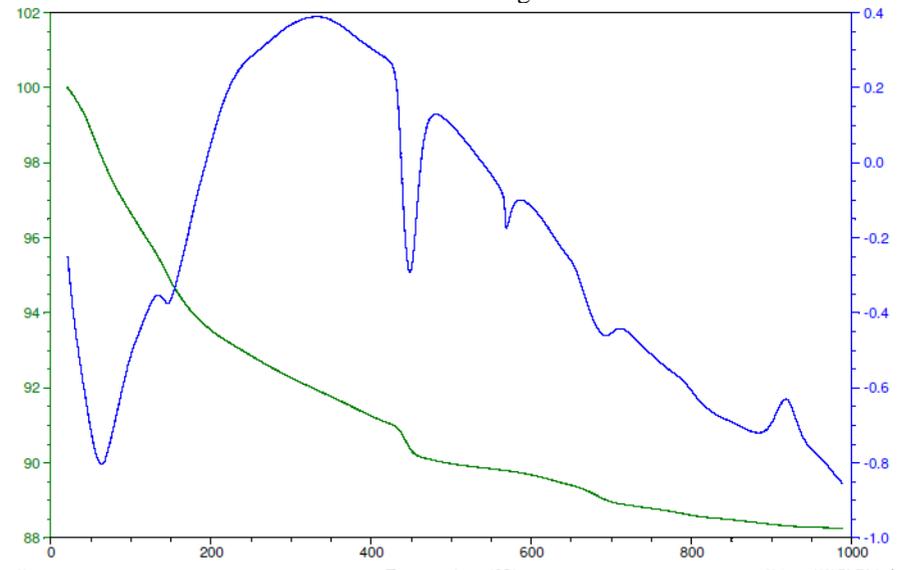
Traços para a produção das argamassas

Insumos	Traço Referência (CP V - ARI)				CP III - RS			
	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
areia natural	2,37	1,67	1,25	0,90	2,46	1,73	1,31	0,94
areia de britagem	1,58	1,11	0,84	0,60	1,64	1,16	0,87	0,62
a/c	0,72	0,55	0,45	0,38	0,75	0,57	0,47	0,40
Insumos	Metacaulim 8%				Metacaulim 10%			
	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
metacaulim	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09
areia natural	2,57	1,81	1,36	0,98	2,63	1,85	1,39	1,00
areia de britagem	1,72	1,21	0,91	0,65	1,75	1,23	0,93	0,67
a/c	0,78	0,60	0,49	0,41	0,80	0,61	0,50	0,42
Insumos	Metacaulim 12%				Metacaulim 14%			
	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
metacaulim	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	0,14	0,14
areia natural	2,69	1,89	1,43	1,02	2,75	1,94	1,46	1,05
areia de britagem	1,79	1,26	0,95	0,68	1,83	1,29	0,97	0,70
a/c	0,82	0,63	0,51	0,43	0,84	0,64	0,52	0,44
Insumos	Sílica Ativa 8%				Sílica Ativa 10%			
	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sílica ativa	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08
areia natural	2,57	1,81	1,36	0,98	2,63	1,85	1,39	1,00
areia de britagem	1,72	1,21	0,91	0,65	1,75	1,23	0,93	0,67
a/c	0,78	0,60	0,49	0,41	0,80	0,61	0,50	0,42
Insumos	Sílica Ativa 12%				Sílica Ativa 14%			
	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4	traço 1	traço 2	traço 3	traço 4
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sílica ativa	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12
areia natural	2,69	1,89	1,43	1,02	2,75	1,94	1,46	1,05
areia de britagem	1,79	1,26	0,95	0,68	1,83	1,29	0,97	0,70
a/c	0,82	0,63	0,51	0,43	0,84	0,64	0,52	0,44

APÊNDICE 3

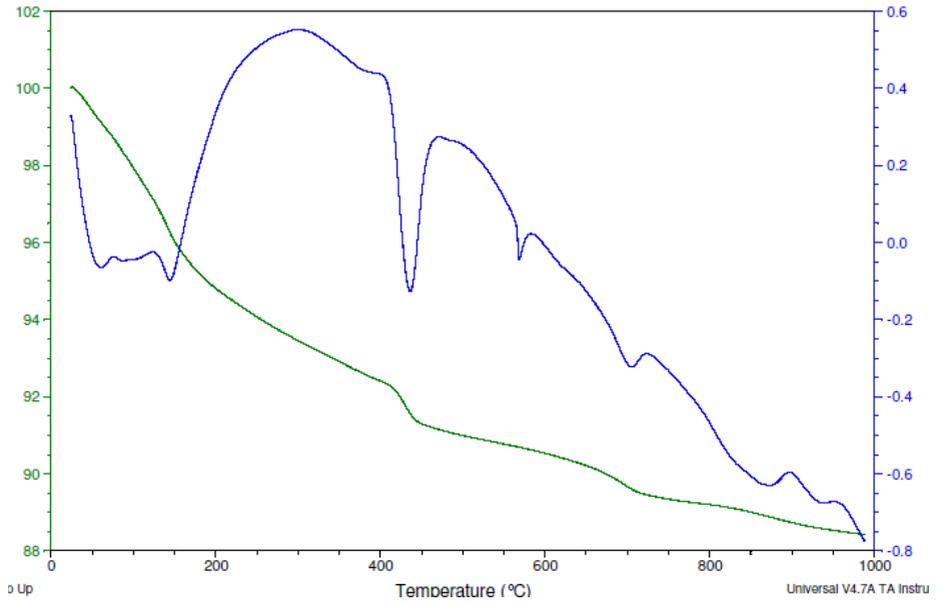
Termogravimetria – curvas TGA e DTGA das pastas produzidas com os aglomerantes

Figura 26- Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com CIII-RS 40MPa cura autógena



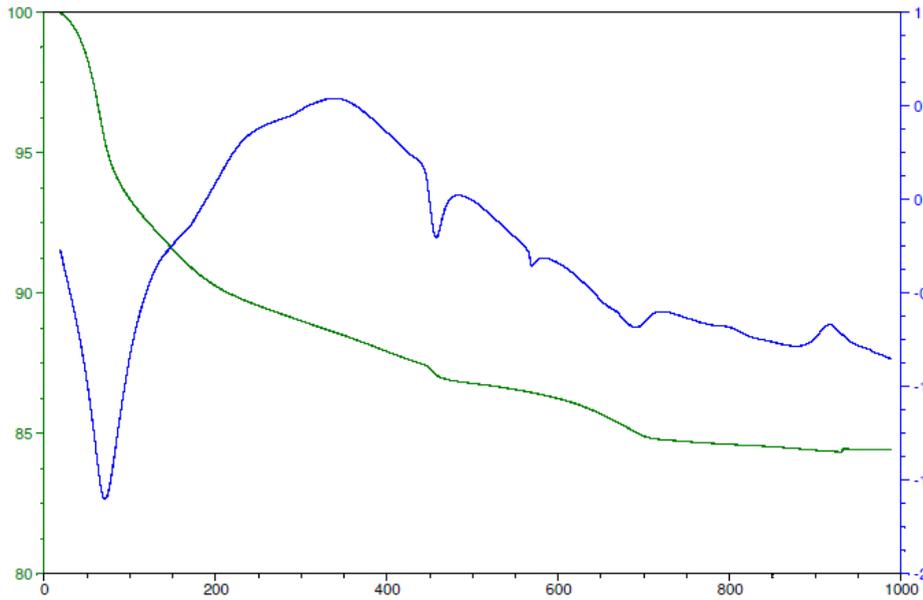
Fonte: Autor, 2017.

Figura 27 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com CPIII-RS 40MPa câmara úmida



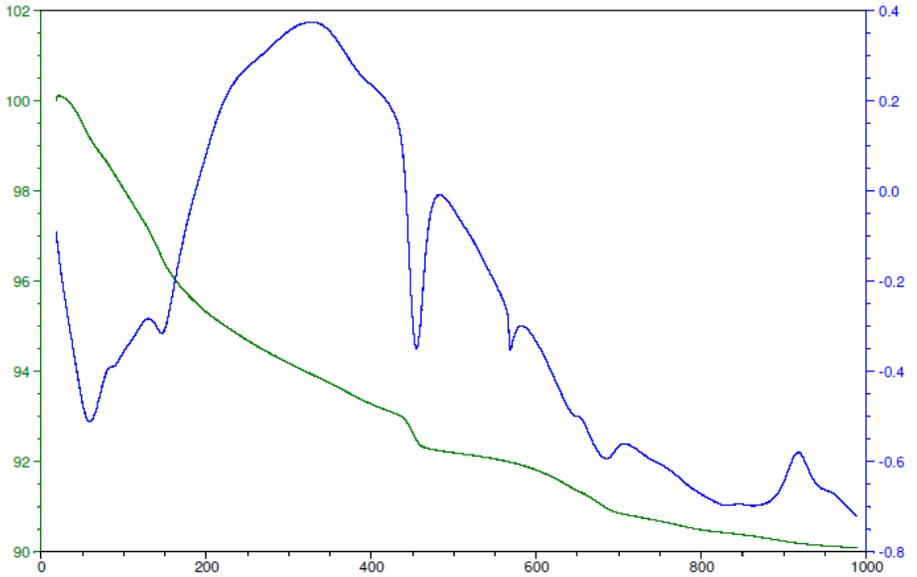
Fonte: Autor, 2017.

Figura 28 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com CIII-RS 55 MPa cura autógena



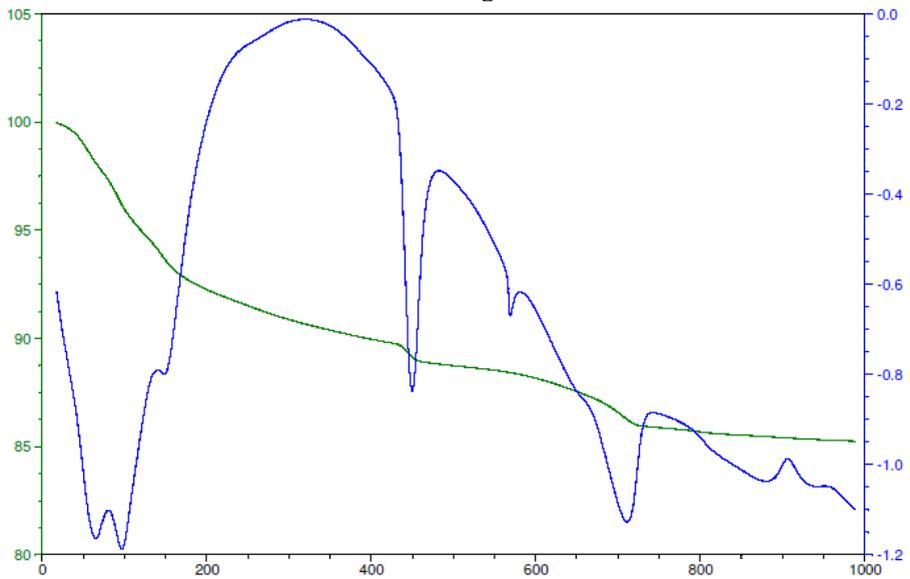
Fonte: Autor, 2017.

Figura 29 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com CPIII-RS 55 MPa câmara úmida



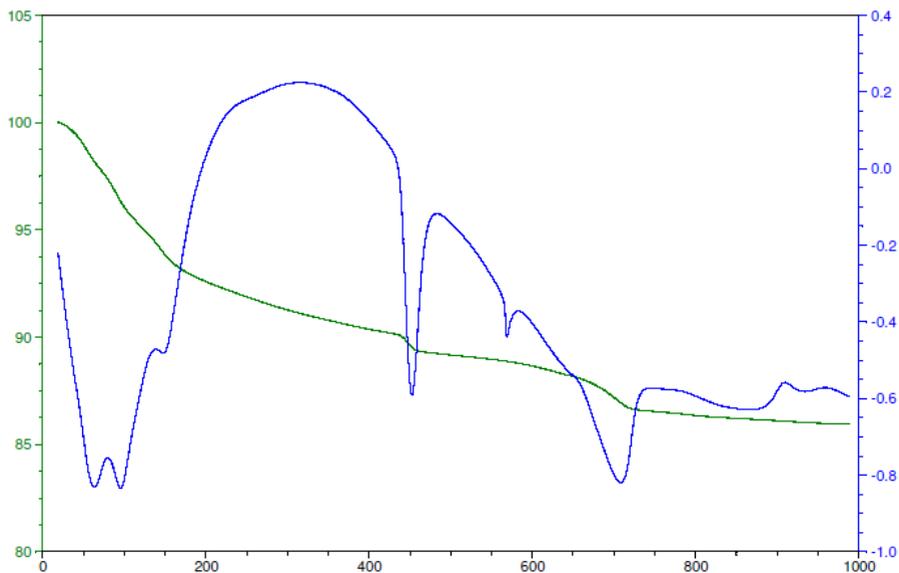
Fonte: Autor, 2017.

Figura 30 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com MK 40MPa cura autógena



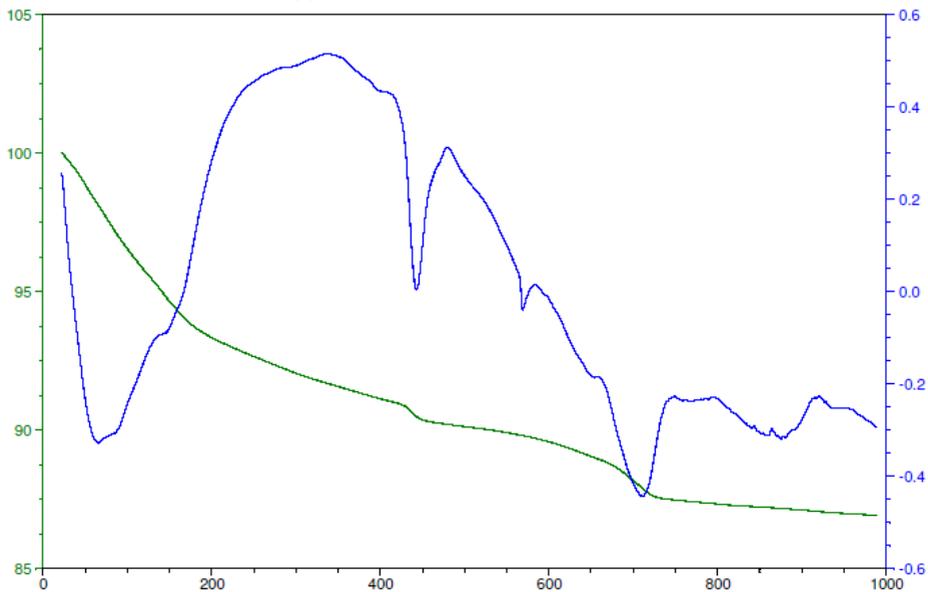
Fonte: Autor, 2017.

Figura 31 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com MK 40MPa câmara úmida



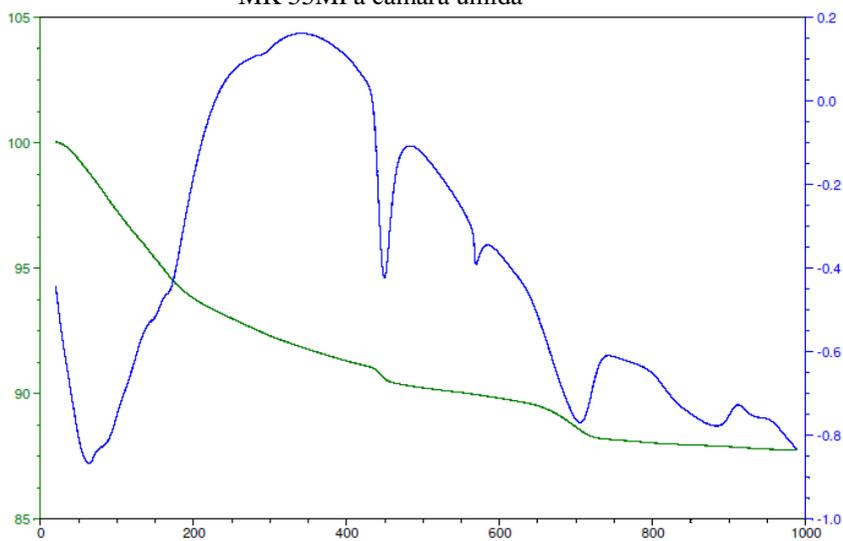
Fonte: Autor, 2017.

Figura 32 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com MK 55MPa cura adiabática



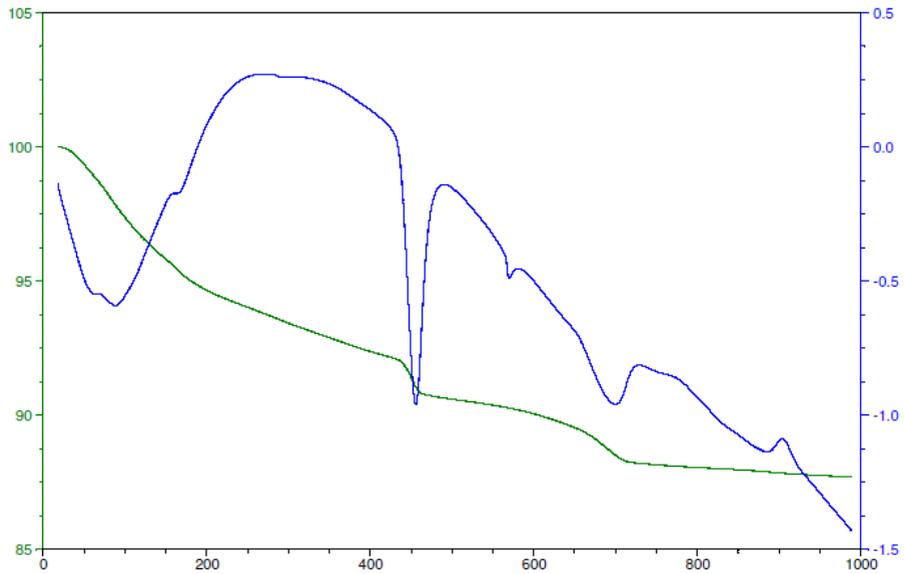
Fonte: Autor, 2017.

Figura 33 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com MK 55MPa câmara úmida



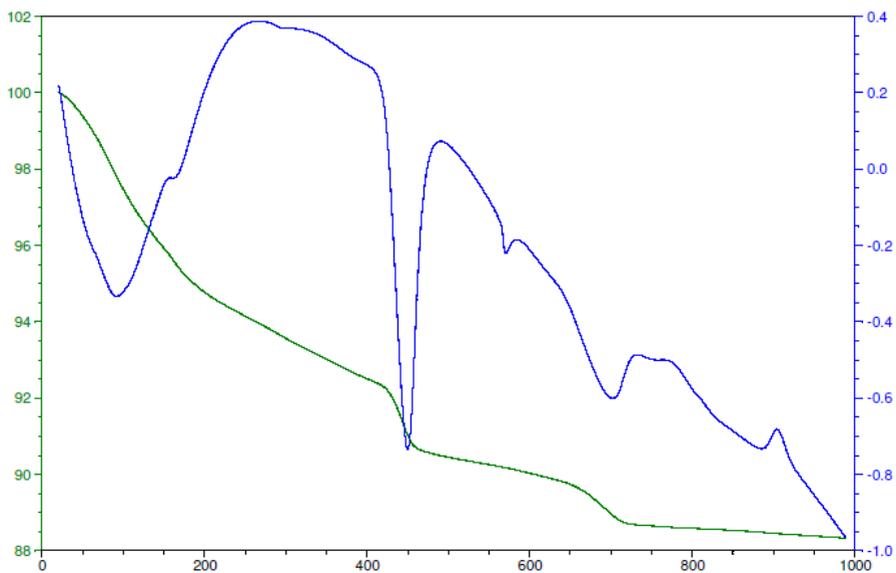
Fonte: Autor, 2017.

Figura 34 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com REF 40MPa cura adiabática



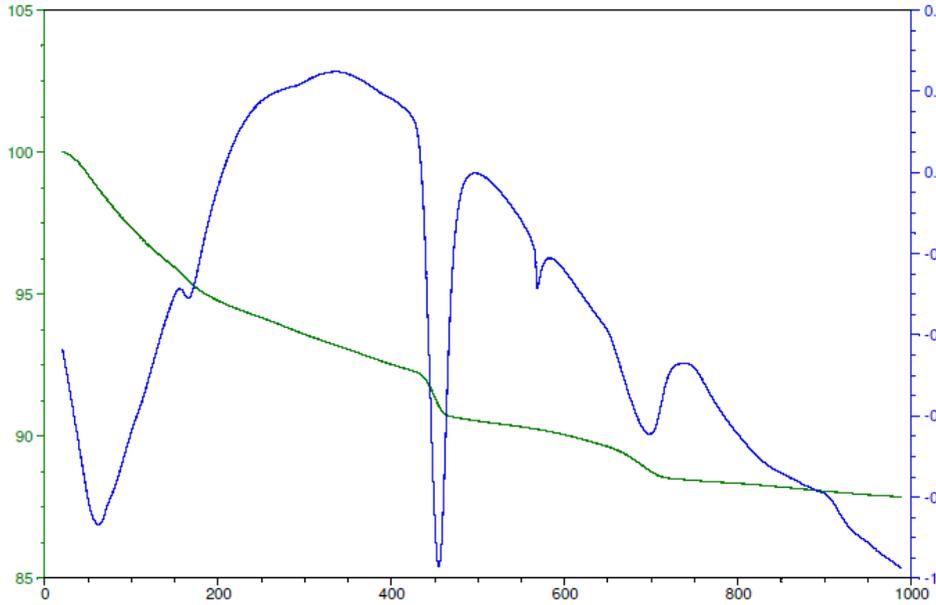
Fonte: Autor, 2017.

Figura 35 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com
REF 40MPa câmara úmida



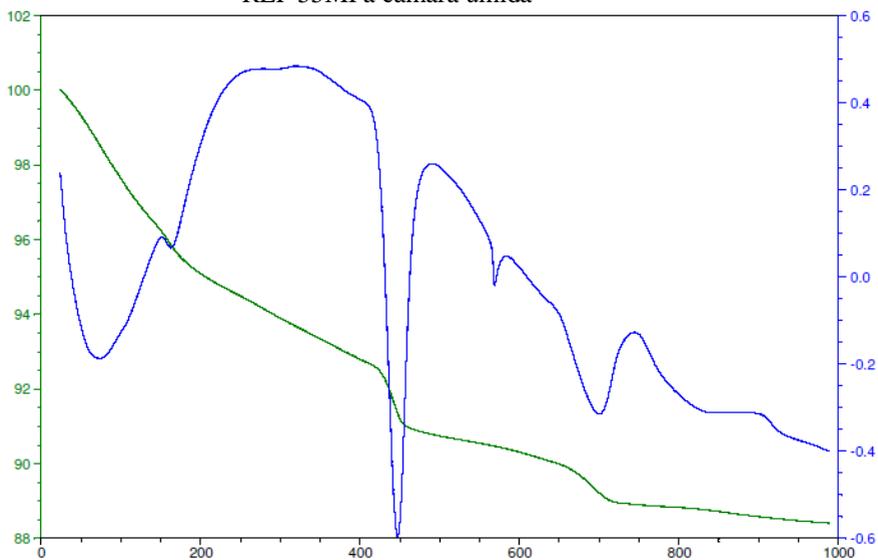
Fonte: Autor, 2017.

Figura 36 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com REF 55MPa cura adiabática



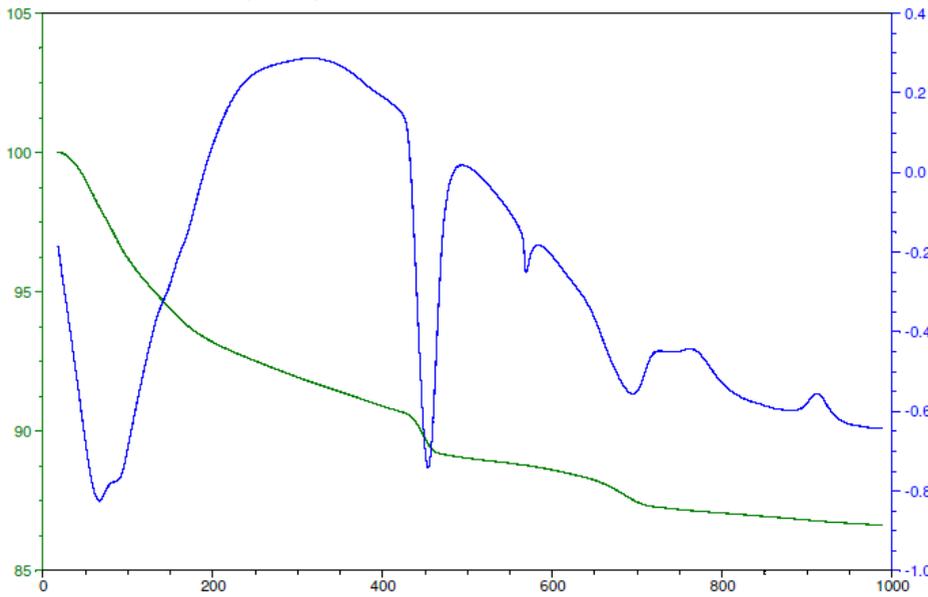
Fonte: Autor, 2017.

Figura 37 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com REF 55MPa câmara úmida



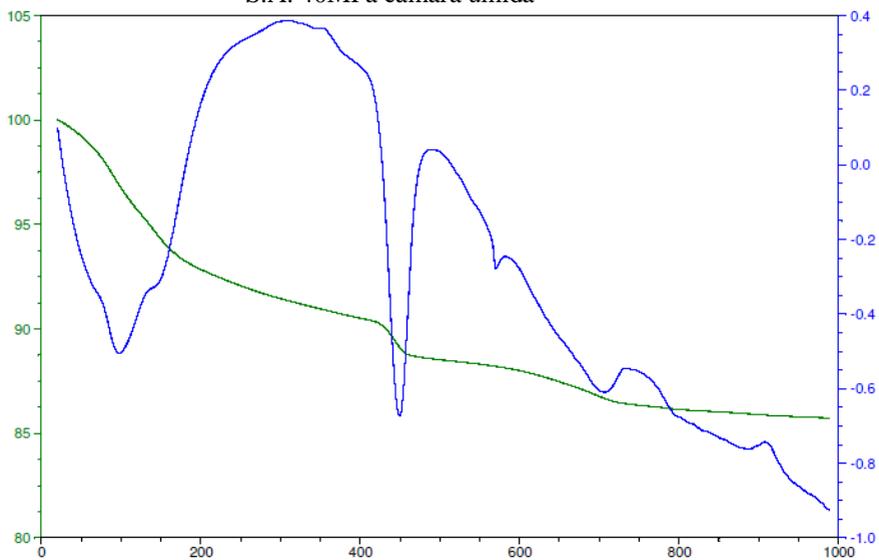
Fonte: Autor, 2017.

Figura 38 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com S.A. 40MPa cura adiabática



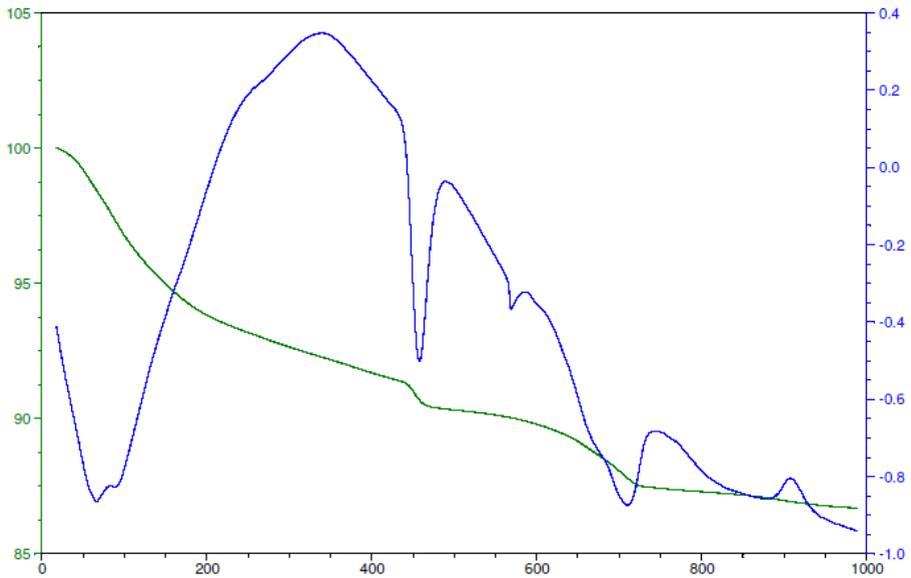
Fonte: Autor, 2017.

Figura 39 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com S.A. 40MPa câmara úmida



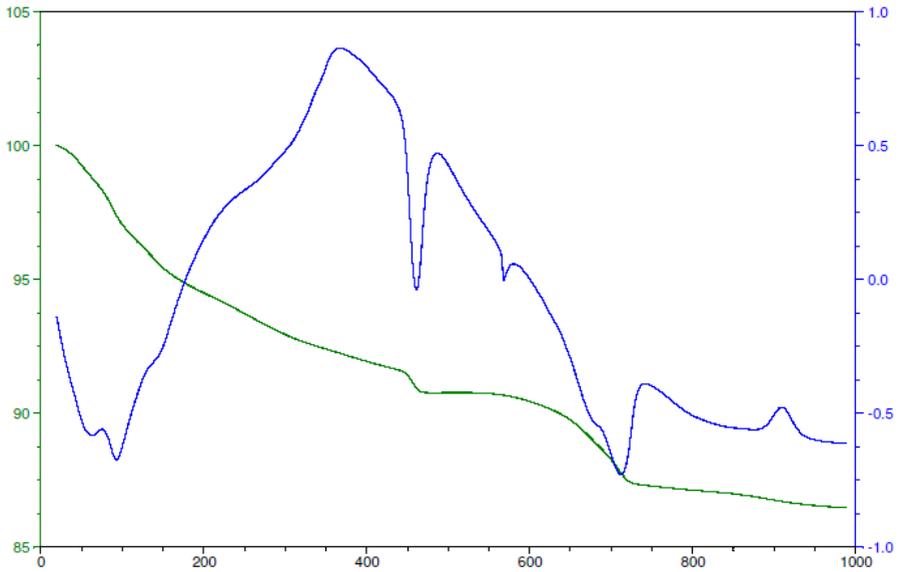
Fonte: Autor, 2017.

Figura 40 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com S.A. 55MPa cura adiabática



Fonte: Autor, 2017.

Figura 41 - Figura 42 - Curva TGA e DTGA para a pasta produzida com S.A. 55MPa câmara úmida



Fonte: Autor, 2017.

APÊNDICE 4

Termogravimetria – procedimentos de cálculo

3.1 Cálculos dos teores de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e carbonato de cálcio (CaCO_3)

A determinação do teor de hidróxido de cálcio presentes nas amostras foi feita pela equação abaixo.

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{H}_2\text{O} \cdot \frac{M_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Onde:

$\text{Ca}(\text{OH})_2$: Teor de hidróxido de cálcio (%).

H_2O : Teor de água combinada com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, obtida pela curva TGA (%).

$M_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$: Massa molecular do hidróxido de cálcio – equivalente a 74g/mol.

$M_{\text{H}_2\text{O}}$: Massa molecular da água – equivalente a 18g/mol.

A determinação do teor de carbonato de cálcio encontrada nas amostras foi calculada pela equação abaixo.

$$\text{CaCO}_3 = \text{CO}_2 \cdot \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}}$$

Onde:

CaCO_3 : Teor de carbonato de cálcio (%).

CO_2 : Teor de gás carbônico combinado com o CaCO_3 obtido através da curva TGA.

M_{CaCO_3} : Massa molecular do carbonato de cálcio, que equivale 100g/mol

M_{CO_2} : Massa molecular do gás carbônico, equivalente a 44g/mol.

3.2 Correções

Para comparação dos resultados obtidos das curvas termogravimétricas, foi preciso efetuar a correção das perdas de massa para as bases não voláteis, de acordo com o fator de correção obtido pela equação abaixo.

$$FC_{res} = \frac{100}{M_{res}}$$

Onde:

FC_{res} : É o fator de correção para a base de não voláteis.

M_{res} : É a massa residual após a perda de massa devido ao aquecimento a 900°C (%).

Durante o processo de produção das pastas foi necessário adicionar areia natural seca para garantir a uniformidade e consistência. Isso porque as pastas foram produzidas com as mesmas relações a/aglomerantes dos concretos, portanto, diferem-se entre si. Para garantir uma uniformidade de resultados foi adicionada para todas as pastas uma quantidade de areia natural seca em todas as pastas. Assim temos o mesmo fator de correção para todas as pastas produzidas neste trabalho. A adição de areia influencia diretamente nos valores de massa residual, tendo em vista que o ponto de fusão da maioria dos constituintes que a areia possui fica acima de 900°C, que foi o limite de temperatura praticado neste ensaio. Portanto, faz-se necessária a correção dos valores de perda de massa pela equação abaixo.

$$FC_{areia} = \frac{Mc + Ma}{Mc}$$

Onde:

FC_{areia} : É o fator de correção de massa devido a adição de areia.

M_c : Massa do aglomerante.

M_a : Massa de areia adicionada.

Finalmente, para a correta análise da perda de massa associada aos hidratos formados e o teor de hidróxido de cálcio, faz-se necessário ajustar os valores em função da massa total de cimento para as misturas com diferentes tipos de aglomerantes fazendo substituição ao cimento, equação abaixo.

$$FC_{Ag} = \frac{100}{100 - \%Aglomerante}$$

FC_{Ag} : Representa o fator de correção para massa total de cimento

$\%Aglomerante$: É o teor de substituição de cimento (CP V - ARI) por outro tipo de aglomerante, neste caso, metacaulim, sílica ativa e CPIII-RS.