



**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE
OU FILER CALCÁRIO NO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO
CONCRETO AUTOADENSÁVEL EM FUNDAÇÕES DE GRANDES
VOLUMES**

**FLORIANÓPOLIS
2018**



FÁBIO BRUMMER
GUILHERME RENGEL
JENNIFER DRIELLE HEIDRICH

**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE
OU FILER CALCÁRIO NO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO
CONCRETO AUTOADENSÁVEL EM FUNDAÇÕES DE GRANDES
VOLUMES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Tecnologia do Concreto, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Tecnologia do Concreto.

Orientador: M.Sc. Denis Fernandes Weidmann.

FLORIANÓPOLIS
2018

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus por ter nos guiado para que conseguíssemos chegar aqui.

Aos nosso familiares, por não terem medido esforços para que conseguíssemos atingir nossos objetivos. Por todos os conselhos, críticas e suporte ao longo da vida e jornada acadêmica.

Gratos ao professor Denis, pela orientação e ajuda neste trabalho. Por não ter medido esforços para que conseguíssemos concluir esta jornada com êxito. Ao professor Stocco e a todos os professores do IDD, que de alguma maneira, em vários momentos, durante as aulas e nos intervalos, contribuíram para o entendimento e aprendizagem, resultando neste estudo.

À empresa Concremohr que nos cedeu espaço e equipamentos para os estudos laboratoriais. Além de disponibilizar um traço utilizado, para que conseguíssemos seguir como rumo.

Ao laboratorista Renan pelo apoio, auxílio e orientação em muitos momentos durante a realização dos ensaios.

À Tatiane, nossa colega de turma, pelo empréstimo dos equipamentos para os ensaios do concreto autoadensável.

À GCP/Grace, pela realização dos ensaios de granulometria à laser e de calorimetria complementares do nosso estudo.

Obrigado a todos, que mesmo não citados aqui, contribuíram para a conclusão desta importante etapa.

FOLHA DE APROVAÇÃO

VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE OU FILER CALCÁRIO NO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL EM FUNDAÇÕES DE GRANDES VOLUMES

Por

FÁBIO BRUMMER

GUILHERME RENGEL

JENNIFER DRIELLE HEIDRICH

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM TECNOLOGIA DO
CONCRETO, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

Florianópolis (SC) 26 de janeiro de 2018.

Prof. Denis Fernandes Weidmann, M.Sc - Orientador

Prof. Joelcio Luiz Stocco, M.Sc - Co-orientador

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr, Dr.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência das adições de cinza volante ou fíler calcário no calor de hidratação do concreto autoadensável em peças de grande volume. Com isso, o estudo partiu do problema-chave que é o calor gerado pelo concreto em peças de grandes volume, visando avaliar, entre concretos com dois tipos de cimentos e adições de fíler calcário e cinza volante, o que gerará menos calor. Para isso, realizaram-se pesquisas bibliográficas, com o propósito de obter um embasamento teórico, sempre tendendo a trazer tal pesquisa para um enfoque mais real. Logo, foram realizados ensaios laboratoriais dos cimentos puros e com as adições, com o intuito de comprovar alguns fatos apresentados nas bibliografias. Através da realização da pesquisa, pode-se avaliar que, em temperaturas até 40°C, os traços com cimento CP IV e com adição de cinza volante, apresentaram menos calor gerado. Contudo, ao se aumentar a temperatura, para 80°C, os concretos com CP II e fíler calcário tiveram melhor desempenho.

Palavras chave: Concreto. Calor de hidratação. Etringita tardia. Grandes volumes. Fundações. Cinza volante. Fíler calcário. Adições. Concreto massa. Concreto autoadensável.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Calor de hidratação dos componentes do cimento.....	22
Figura 2 - Representação da curva de taxa de liberação de calor durante a hidratação do cimento Portland	23
Figura 3 - Efeito da dimensão máxima do agregado no traço do concreto	30
Figura 4 - Cristais prismáticos de etringita em pasta de cimento pozolânico	37
Figura 5 – Esquema Resumo Método de Dosagem	42
Figura 6 – Gráfico comparativo dos ensaios de granulometria à laser.....	52
Figura 7 – Gráfico de Resistência x % adição.....	56
Figura 8 – Calorímetro semi-adiabático	60
Figura 9 – Gráfico do Desenvolvimento de Temperatura dos concretos	63
Figura 10 – Gráfico do calor de hidratação com temperatura de 20°C	66
Figura 11 - Gráfico do calor de hidratação com temperatura de 40 °C.....	67
Figura 12 - Gráfico do calor de hidratação com temperatura de 60 °C.....	67
Figura 13 - Gráfico do calor de hidratação com temperatura de 80°C.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipo de cimento e respectivas adições	20
Tabela 2 – Calor de Hidratação dos cimentos produzidos no Brasil	21
Tabela 3 – Classes de espalhamento (slump flow).....	45
Tabela 4 - Classes de viscosidade plástica aparente t500 (sob fluxo livre)	45
Tabela 5 - Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre).....	45
Tabela 6 – Classes de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado)...	45
Tabela 7 – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado).....	45
Tabela 8 – Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação	46
Tabela 9 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação	46
Tabela 10 – Classes de viscosidade plástica do CAA em função de sua aplicação	47
Tabela 11 - Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação	47
Tabela 12 - Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação	48
Tabela 13 - Resumo Boletim de Ensaio do Cimento CP II F-40 de março	50
Tabela 14 - Resumo Boletim de Ensaio do Cimento CP IV Z-32-RS de março	50
Tabela 15 - Boletim de Ensaio do Cimentos CP II F-40 de setembro.....	50
Tabela 16 - Resumo Ensaio Agregados Graúdos	53
Tabela 17 - Resumo Ensaio Areia	53
Tabela 18 - Traços dos concreto no dia 01/04/2017	55
Tabela 19 – Resultado do ensaio à compressão dos traços iniciais	56
Tabela 20 – Porcentagem de adição para cada tipo de cimento para o Fc _j desejado	57
Tabela 21 - Traço dos concretos rodados no dia 22/07/2017	57
Tabela 22 – Resultado resistência a compressão referente ao ensaio do dia 22/07/2017	58

Tabela 23 - Resultado resistência a compressão referente ao ensaio do dia 23/09/2017	59
Tabela 24 – Avaliação e Classificação do CAA referente ao ensaio do dia 23/09/2017	61
Tabela 25 – Tabela resumo das temperaturas dos concretos.....	64
Tabela 26 - Temperatura do concreto de acordo com a eficiência do traço.....	70
Tabela 27 - Relação dos custos de cada material	70
Tabela 28 - Custo de cada traço por metro cúbico	71
Tabela 29 - Custo de cada traço por MPa.....	71
Tabela 30 – Eficiência de custo e temperatura do concreto	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.2.1. Objetivo Geral	12
1.2.2. Objetivos Específicos	12
1.3. HIPÓTESE	12
1.4. JUSTIFICATIVAS	13
1.4.1. Tecnológicas.....	13
1.4.2. Econômicas	13
1.4.3. Sociais	14
1.4.4. Ecológicas	14
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	15
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. CONCRETO MASSA	18
2.1.1. Cimento Portland.....	19
2.1.2. Adições	25
2.1.3. Aditivos	27
2.1.4. Agregados.....	29
2.1.5. Controle da temperatura do concreto massa	31
2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL	39
2.2.1. Histórico	39
2.2.2. Dosagem do concreto autoadensável	41
2.2.3. Vantagens da Utilização.....	43
2.2.4. Normas	44
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	48
3.1. MATERIAIS EMPREGADOS.....	49
3.1.1. Cimento	49
3.1.2. Adições	51

3.1.3.	Agregados Graúdos	52
3.1.4.	Agregados Miúdos	53
3.1.5.	Aditivos	54
3.1.6.	Água	54
3.2.	METODOLOGIA	54
3.2.1.	Estudo em Concreto	54
3.2.2.	Calor de Hidratação.....	59
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
4.1.	Classificação do concreto autoadensável	61
4.2.	Temperatura do concreto.....	61
4.2.1.	Calorímetro semi-adiabático	62
4.2.2.	Calorímetro adiabático	65
4.3.	Eficiência e custo dos concretos	69
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
7.	ANEXOS	79

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, com o surgimento de obras de grandes edifícios, observa-se a necessidade de concretagem de blocos de grandes dimensões e volumes de concreto nas fundações. Há uma tendência que nestas estruturas seja utilizado o concreto autoadensável devido suas características e seus benefícios. Porém, o calor gerado em peças de grande volume de concreto é um fator a ser observado, pois pode promover consequências desastrosas à estrutura e ao empreendimento.

Apesar de suas vantagens, como a eliminação do uso do vibrador (eliminando o ruído, perturbação da vizinhança e insalubridade ao trabalhador), redução da mão de obra durante a concretagem (reduzindo o risco de acidentes de trabalho, além da possibilidade remanejar a mão de obra para outra frente de trabalho, otimizando o tempo de construção), eliminação de bicheiras na estrutura (evitando recuperações ou riscos estruturais e melhorando a durabilidade do concreto), há pouco uso do concreto autoadensável na construção civil local atualmente. Mesmo em estruturas densamente armadas, com difícil acesso para adensamento, o concreto comumente utilizado é o tradicional.

O calor de hidratação do cimento, acima dos limites aceitáveis em peças com grandes dimensões e volumes de concreto, poderá ocasionar fissuras de origem térmica, ou até mesmo etringita tardia, que incorrerão em patologias futuras, ocasionando perda de vida útil da estrutura e intervenções danosas e custosas ao empreendimento e à sociedade.

Com isso, este estudo procura avaliar a influência da adição de cinza volante e de fíler calcário em concreto autoadensável para reduzir a temperatura do concreto e viabilizar o seu uso frequente em grandes fundações de edifícios e estruturas afins.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

É possível reduzir o calor de hidratação do concreto autoadensável com adições de cinza volante ou fíler calcário?

1.2. OBJETIVOS

A seguir estão expostos os objetivos geral e específicos da pesquisa.

1.2.1. Objetivo Geral

Verificar a influência das adições de cinza volante ou fíler calcário no calor de hidratação do concreto autoadensável em peças de grande volume.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o calor gerado pelo concreto autoadensável ao adicionar cinza volante ou fíler calcário em diferentes percentuais para mesma resistência;
- Medir a resistência à compressão;
- Apresentar o custo de cada traço testado;
- Analisar qual traço geraria um melhor custo benefício.

1.3. HIPÓTESE

Presume-se que a adição de cinza volante e/ou fíler calcário acarretem na redução do calor de hidratação do concreto para uma mesma resistência. Essa redução é essencial para estruturas de fundação de grandes volumes.

1.4. JUSTIFICATIVAS

A pesquisa se justifica pela necessidade de reduzir o calor de hidratação do concreto autoadensável, especialmente em peças de grandes volumes, como os blocos de fundação. Neste item, apresentam-se as justificativas para a pesquisa, a saber: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas.

1.4.1. Tecnológicas

O calor de hidratação é um fenômeno natural, proveniente da hidratação do cimento, tendo em vista que esta é uma reação exotérmica. Contudo, em peças que exijam um grande volume, esse calor pode exceder o limite aceitável e causar manifestações patológicas. Com o avanço tecnológico, foi possível buscar alternativas para se controlar esse excessivo aumento de temperatura, como a utilização de gelo na mistura, aditivos estabilizadores, entre outros.

A fim de se alcançar o calor de hidratação que não prejudique a peça, a pesquisa busca uma nova forma de tornar esse almejo em realidade, através das adições de cinza volante e/ou filler calcário ao traço de concreto autoadensável (CAA).

1.4.2. Econômicas

As manifestações patológicas podem ser oriundas de vários fatores, entre eles erros na execução. Tais erros podem até comprometer a estrutura, e dependendo, a peça. A recuperação acaba sendo mais cara que a reconstrução total da obra, como por exemplo em blocos de fundação.

Em obras de grande porte, como edifícios, muitas vezes essas peças apresentam uma densidade de aço elevada, o que dificulta a aplicação do

concreto. Para tentar evitar falhas na concretagem, o concreto autoadensável se enquadra perfeitamente, contudo, dependendo da estrutura, o problema pode estar além da escolha do tipo de concreto.

Nas peças de grande volume de concreto, o calor de hidratação deve ser estudado e acompanhado, pois há grandes possibilidades de a temperatura da mistura ser muito elevada, levando a consequências indesejáveis que abram caminho à agentes agressivos e levam à deteriorações da estrutura da peça, como a fissuração. Sendo assim, medidas a fim de reparar ou sessar as manifestações patológicas deverão ser tomadas, gerando gastos, na maioria das vezes, não previstos no orçamento.

1.4.3. Sociais

A utilização do CAA em obras preconiza uma eficiência nas concretagens, evitando-se a bicheiras e patologias associadas a má aplicação do concreto, que consequentemente geram problemas de patologia na estrutura e até recuperação estrutural ou demolição, danosas à vizinhança e à sociedade em geral.

1.4.4. Ecológicas

O concreto é um composto de cimento e agregados, todos provenientes da natureza. Com o desenvolvimento das tecnologias, busca-se por alternativas para suprir a dependência, especialmente do cimento. Uma dessas alternativas é a cinza volante, resíduo proveniente das usinas termoeletricas e o filer calcário, resíduo oriundo da britagem. Estes materiais, que antes eram um grande problema ambiental, pela dificuldade de deposição, hoje são uma alternativa financeiramente viável, além de contribuir ao meio ambiente.

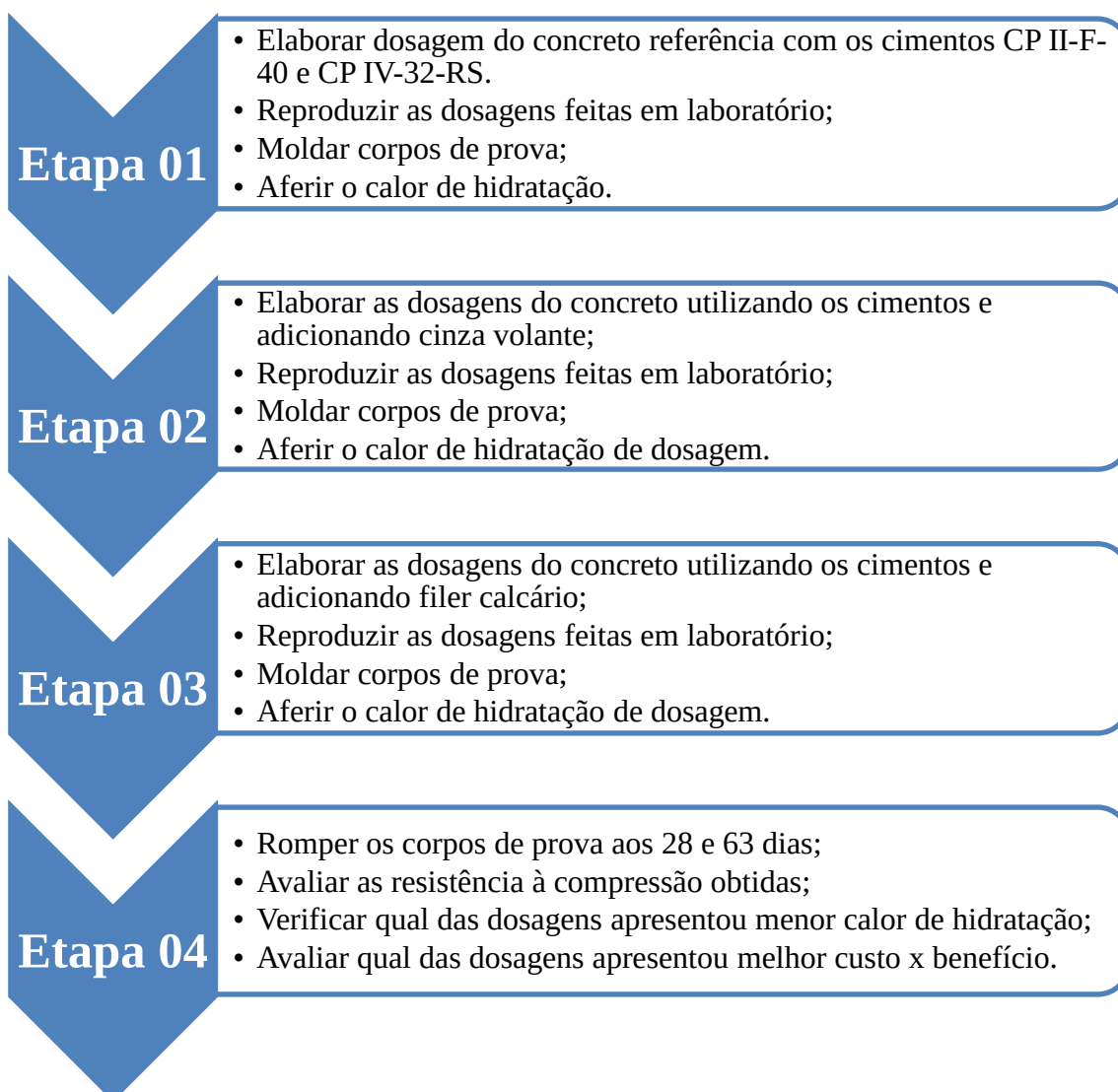
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho será realizado através de um programa experimental em laboratório com avaliações dos resultados obtidos. Para isso, uma revisão bibliográfica se torna necessária, sendo que esta abordará assuntos à saber: o concreto e sua estrutura, os tipos de cimento e suas principais características, com ênfase para os tipos de cimento empregados no programa experimental, o concreto autoadensável, o concreto massa, o calor de hidratação e as adições, sendo de cinza volante e filer calcário.

Para execução do programa experimental, será fixada uma resistência a compressão de todos os traços de 35 Mpa e o abatimento (flow test) de 700 mm aproximadamente, variando o tipo de cimento e as adições. Então serão moldados corpos de prova de cada dosagem feita, construído um molde com EPS para minimizar a perda de calor para o ambiente na medição do calor de hidratação, comparando-se os resultados obtidos.

Adicionalmente será realizada a medição do calor de hidratação, com um calorímetro isotérmico, observando as variações de resultados entre os calorímetros.

De forma esquemática, o programa experimental será executado conforme as etapas do esquema a seguir.



Com a apresentação das etapas do projeto, segue no próximo item a apresentação do trabalho.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho aborda os aspectos fundamentais da influência de adição de cinza volante e filer calcário no calor de hidratação do concreto autoadensável em fundações de grandes volumes e é distribuído conforme à seguir:

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa, seus objetivos e a hipótese adotada, também define as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre o concreto massa e o concreto autoadensável, desde sua definição, utilização e especificidades, principalmente em sua relação com o calor de hidratação. Descreve sobre o emprego de filler calcário e cinza volante como adição no concreto e suas características e influências nas características do concreto fresco e endurecido.

O **Capítulo 3** trata sobre o programa experimental e a metodologia dos estudos realizados em laboratório, os materiais empregados e suas características, apresentando os ensaios e análises que serviram de suporte para a pesquisa.

O **Capítulo 4** apresenta a análise dos resultados deste estudo com as temperaturas e comportamento de cada traço e suas adições, relacionando estes resultados obtidos na medição com o calorímetro semi-adiabático construído e com o calorímetro isotérmico utilizado para complementar o propósito do estudo em se obter o menor calor de hidratação para concreto a ser utilizado em grandes volumes. Ao final deste capítulo é apresentada uma avaliação de custos e eficiência de cada dosagem estudada.

O **Capítulo 5** apresenta as considerações finais acerca do estudo e as recomendações para trabalhos futuros.

Finalizando, os **Anexos** contém os laudos detalhados dos cimentos, agregados e adições utilizados neste trabalho. Além de gráficos mais detalhados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas considerações a respeito do concreto massa e concreto autoadensável, bem como o calor de hidratação do concreto e explanações sobre a cinza volante e fíler calcário como adição para o concreto.

2.1. CONCRETO MASSA

O concreto massa foi definido pelo Comitê ACI 116 (ACI Manual of Concrete Practice em Detroit 1991), como o concreto de uma estrutura de grande volume, por exemplo, viga, pilar, estaca, comporta ou barragem, onde seu volume é de tal grandeza, que requer meios especiais para combater a geração de calor e posterior mudança de volume. (MEHTA, 1994).

“Assim, o aspecto fundamental do concreto massa é o comportamento térmico, sendo um objetivo do projeto desse concreto evitar o aparecimento ou controlar a abertura e espaçamento das fissuras”. (NEVILLE, 1997).

Anteriormente, a aplicação da expressão Concreto Massa era somente em barragens de grandes volumes, mas atualmente, em fundações de grandes edificações, onde se utilizam blocos com grande volume de concreto, também são considerados como concreto massa. Para tanto, nestas situações, se não houver um estudo antecipado para adequar o tipo de concreto a ser utilizado, além da sua forma de lançamento e aplicação, podem gerar problemas devido à elevação de temperatura no concreto, provindos da hidratação dos compostos do cimento.

Como o calor gerado pela hidratação do cimento é um dos principais responsáveis pelas variações volumétricas que ocorrem no concreto, devido a sua baixa condutividade térmica, o calor gerado não dissipa rapidamente e fica retido causando aumento da temperatura e consequente expansão do concreto.

Sendo que nas primeiras idades o concreto ainda está em estado plástico, a expansão do concreto ocorre sem restrições, mas com o passar do tempo, torna-se viscoelástico e iniciam-se as restrições, gerando tensões de compressão conforme o concreto expande até que a temperatura máxima seja atingida. Iniciando-se a retração térmica depois que vai resfriando, reduzem as tensões de compressão. Quando as tensões de compressão cessam e o resfriamento continua, ocorrem as tensões de tração, e se estas ultrapassarem a resistência à tração do concreto, ocorrerão fissuras de origem térmica. (CALMON, 1995 *apud* TOCHETTO, 2010).

Então, a adoção de práticas de construção e princípios básicos que passam pela seleção de materiais e pela dosagem, são fundamentais para o controle de aumento ou queda da temperatura no concreto massa.

2.1.1. Cimento Portland

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na NBR (Norma Brasileira) 11578/91, o cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos - como a cinza volante, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores especificados.

2.1.1.1. Tipos de cimento

Como dito, o cimento é um composto de clínquer e adições, sendo que essas adições são as responsáveis por dar as características de cada tipo de cimento. Através da tabela abaixo, pode-se observar o tipo de cimento, a adição e a respectiva norma técnica.

Tabela 1 – Tipo de cimento e respectivas adições

TIPO DE CIMENTO	ADIÇÕES	SIGLA	NORMA
Cimento Portland Comum	Escória, pozolona ou fíler (até 5%)	CP I-S 32 CP I-S 40	5732
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II-E 32 CP II-E 40	11578
	Pozolana (6-14%)	CP II-Z 32	
	Fíler (6-10%)	CP II-F 32 CP II-F40	
Cimento Portland de alto-forno	Escória (35-70%)	CP III 32 CPIII 40	5735
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV 32	5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V-ARI	5733
Cimento Portland Resistente a Sulfatos	Estes cimentos são designados pela sigla RS. Ex.: CP III-40 RS, CP V-ARI RS		5737

Fonte: ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

Cada tipo de cimento possui características próprias, sendo que alguns são mais indicados para concreto massa do que outros. Uma destas propriedades é a geração de calor de hidratação.

2.1.1.2. Calor de Hidratação

O calor de hidratação é uma resultante da hidratação dos compostos do cimento, que é uma reação exotérmica. Como a condutividade térmica do concreto é relativamente pequena, ele pode se comportar como um isolante e, no interior de grandes massa de concreto, a hidratação pode resultar grandes elevações de temperatura.

A finura do cimento tem influência sobre a velocidade de desprendimento de calor, de modo que um aumento de finura acelera as reações de hidratação e, portanto, o desprendimento de calor. Logo, conforme Metha (1994), Cimentos Portland que contém relativamente mais C_3A (Aluminato tricálcico) e C_3S (silicato tricálcico) apresentam maior calor de hidratação (MEHTA, 1994).

A seguir, observa-se a relação dos tipos de cimentos fabricados em território brasileiro com as respectivas faixas de variação do calor de hidratação decorrentes da finura, composição e teor de adição.

Tabela 2 – Calor de Hidratação dos cimentos produzidos no Brasil

Tipo de cimento	Calores de hidratação a uma determinada idade (cal/g)	
	3 dias	7 dias
CP I	266 – 303	280 – 314
CP II – F	185 – 252	239 - 276
CP II – E	241	258
CP II – Z	211 – 236	214 – 250
CP III	199 – 224	216 – 257
CP IV	207 – 235	212 – 258
CP V - ARI	222 - 281	229 - 332

Fonte: Liduário (2006 apud TOCHETTO, 2010).

Porém, a quantidade de cimento na mistura tem maior influência no desprendimento de calor, portanto, o teor de cimento pode ser modificado para ajudar o controle de desprendimento de calor, bem como usar cimentos compostos, uma vez que o clínquer, presente nos cimentos Portland, é o maior responsável pelo desprendimento de calor nas primeiras idades.

Com a utilização de cimentos compostos, pode-se reduzir a elevação máxima de temperatura e sua ocorrência pode ser retardada para a idade que o concreto terá uma resistência a tração maior e será menos propenso à fissuração.

Cimentos com baixa velocidade de desprendimento de calor foram produzidos pela primeira vez para uso em grandes barragens de gravidade nos Estados Unidos, e são conhecidos como Cimento de baixo calor (tipo IV).

Há outros meios de evitar o desprendimento excessivo de calor devido à hidratação do cimento com a adição de cinza volante ou pozolana, reduzindo-se os teores de cimento puro no concreto.

Como o calor de hidratação eleva a temperatura do concreto, as restrições impostas ao movimento da massa pela variação de temperatura gera

tensões de tração que, quando são superiores à sua resistência a tração, pode fissurar o concreto.

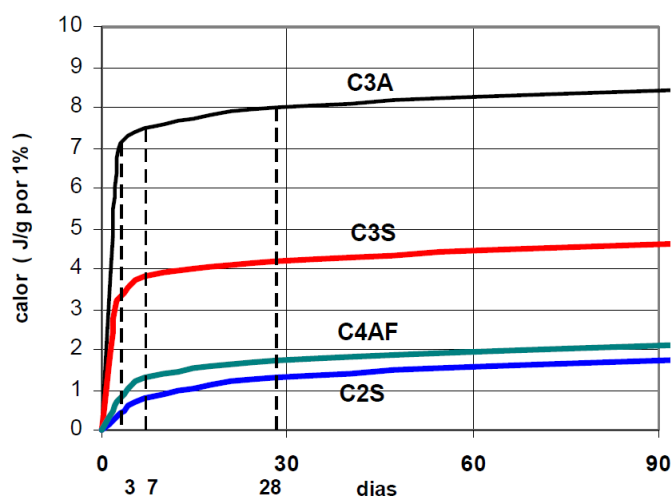
Ao mesmo tempo, o exterior da massa de concreto perde um pouco de calor, de modo que se estabelece um acentuado gradiente de temperatura e, durante o resfriamento subsequente do interior, pode ocorrer uma fissuração séria. (NEVILLE, 1997).

Basicamente, o que preocupa é a velocidade com que o calor se desprende do concreto, facilmente determinada em um calorímetro adiabático.

Conforme Neville (1997) o limite de 20°C da diferença de temperatura entre a parte interna e a parte externa do concreto foi sugerido por FitzGibbon e incorporado na norma europeia ENV 206:1992 como sendo o limite que implica na ocorrência de fissuração.

Nas primeiras idades, os diferentes compostos do cimento se hidratam a velocidades diferentes (conforme figura 1, a seguir) e seu teor determina a velocidade do desprendimento de calor. Portanto, reduzindo-se as proporções dos compostos que reagem mais rapidamente (C_3A – Aluminato tricálcico e C_3S – silicato tricálcico), pode ser reduzida a quantidade inicial de calor de hidratação do concreto.

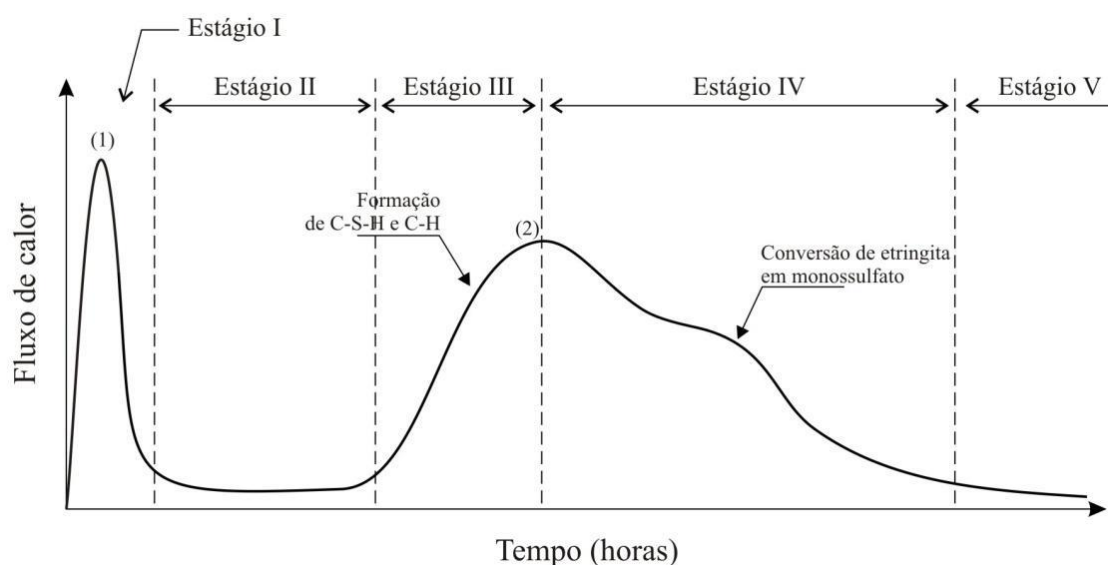
Figura 1 – Calor de hidratação dos componentes do cimento



Fonte: KUPERMAN, 2017.

Conforme TOCHETTO (2010) o processo de hidratação do cimento Portland pode ser subdividido em cinco estágios distintos, levando-se em consideração a taxa liberação de calor, representados na Figura 2, abaixo: I) Pré-indução; II) Indução ou dormência; III) Aceleração; IV e V) Pós-aceleração.

Figura 2 - Representação da curva de taxa de liberação de calor durante a hidratação do cimento Portland



Fonte: Adaptado de Mindess (2008 apud TOCHETTO, 2010).

“O período de pré-indução tem início imediatamente após o contato do cimento com a água, havendo uma rápida dissolução dos álcalis presentes no cimento e a liberação de íons na solução. Na sequência, inicia-se a dissolução das fases anidras C3S, C3A e C4AF. A hidratação nesta etapa se processa de maneira rápida e intensa, e sua natureza é altamente exotérmica, havendo contribuição de todas as reações para o pico (1) de liberação de calor. Além disso, há, fundamentalmente, a formação de dois precipitados: o gel de C-S-H e etringita.

O período de dormência é caracterizado pela diminuição da taxa de hidratação, sendo constatada uma baixa e constante liberação de calor proveniente da hidratação do cimento. Segundo Neville (1997), este período dura uma ou duas horas, durante as quais a pasta de cimento permanece trabalhável.

A teoria mais aceita para a ocorrência do período de indução propõe a formação de uma camada de etringita na superfície do C3A, atuando como uma barreira responsável pela diminuição da velocidade de hidratação.

O término deste período de indução é atribuído à ruptura da referida camada, causada pelo completo consumo de sulfato de cálcio adicional e também pela nucleação e crescimento do C-S-H (ODLER, 1998).

Com o término do período de dormência ocorre a retomada da aceleração da hidratação, associada a uma forte evolução de calor, que corresponde ao pico (2). O aumento da taxa de hidratação, principalmente do C3S, seguido do início da hidratação do C2S, possibilita a formação intensa do C-S-H.

Neste estágio, além de constatada uma densa camada de C-S-H em torno dos grãos de cimento, é possível visualizar cristais de CH. Ao término de 4 horas os grãos apresentam-se completamente envolvidos e, em aproximadamente 12 horas, a camada externa atinge uma considerável espessura, tornando possível a aglutinação dos grãos.

De acordo com Taylor (1990), esta etapa coincide com a máxima taxa de evolução de calor e corresponde, aproximadamente, ao fim de pega.

Na Pós-aceleração, com o progresso da hidratação formam-se hidratos de maior espessura sobre os grãos de cimento, fazendo com que a taxa de reação diminua progressivamente. Em seguida, a etringita reage com o C3A excedente, originando o monosulfato. Odler (1998) afirma que há a possibilidade de alguns cimentos apresentarem um pico correspondente à conversão de etringita em monosulfato. A intensa formação de hidratos faz com que as reações desacelerem ainda mais, correspondendo ao estágio V.”(TOCHETTO, 2010).

2.1.1.2.1. Ensaios de Calorimetria

Para determinar a geração interna de calor de um material existem diversos tipos de calorímetro, os mais utilizados em concreto são: calorímetro adiabático, semi-adiabático e isotérmico.

O calorímetro adiabático é aquele que está isolado de qualquer troca ou ganho de calor com o meio externo.

Neste caso, controlando-se a temperatura do meio externo ao concreto, de modo que ela sempre permaneça igual à temperatura (em elevação)

medida em seu interior, como não há troca de calor, esta condição é chamada adiabática (LIDUÁRIO, 2006 *apud* GOMES, 2011).

Basicamente o sistema é formado por um recipiente isolado, colocado em ambiente que possui controle de temperatura, mantida idêntica à temperatura da amostra (GOMES, 2011).

No calorímetro semi-adiabático há perdas de calor para o meio externo, provocadas porque as paredes do calorímetro não são totalmente isolantes. Neste caso, mede-se a variação de temperatura do concreto e calcula-se a quantidade de calor produzida pelas reações (GOMES, 2011).

O ensaio com o calorímetro isotérmico ocorre com temperatura constante em um sistema fechado, onde mantém-se a temperatura externa abaixo da temperatura do concreto que permanece constante e o calor gerado internamente é totalmente dissipado para o ambiente circundante, medindo-se a taxa de calor produzida na reação de hidratação do cimento (QUARCIONE E CINCOTTO, 2008).

O calorímetro isotérmico mede o fluxo de calor da pasta através de sensores, baseados em termopilhas. O concreto é colocado em um recipiente com sensor de fluxo de calor. A circulação de ar ou água mantém a temperatura constante utilizando um termostato. No dispositivo de referência é colocada amostra com massa semelhante e inerte. Para compensar eventuais trocas de calor com o meio externo são subtraídos os sinais obtidos nos dois dispositivos (GOMES, 2011).

Um exemplo usual de calorímetro isotérmico é o modelo TAMAir, formado por oito recipientes de medição, que mantém a temperatura constante através de circulação de ar.

2.1.2. Adições

As adições mais utilizadas, segundo Kuperman (2017), são a cinza volante, a sílica ativa, as pozolanas naturais ou de argila calcinada e a escória de alto-forno. Mas existem outros minerais sendo utilizados com ótimos resultados no concreto como metacaulim e cinza de casca de arroz.

De acordo com Paulon (1987), com 30 % de substituição de pozolana, por exemplo, pode-se reduzir a geração de calor em até 15 %. No caso da escória de alto-forno, ensaios de calor de hidratação realizados com o cimento Portland comum e com 100 % de escória apresentaram valores de quantidade calor de 79,5 cal/g e 6,10 cal/g, respectivamente (LABORATÓRIO DE FURNAS, 1990 apud TOCHETTO, 2010).

Recomenda-se que o desempenho da adição mineral seja avaliado em combinação com cimento e agregados a fim de verificar sua real contribuição com a qualidade e economia do concreto (ACI 207.1R, 1996).

Conforme Mehta (1994) a pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que possui pouca ou nenhuma propriedade aglomerante, mas que numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes.

A reação pozolânica tem sua importância decorrente de três aspectos. Primeiramente, a reação é lenta e, conseqüentemente, a taxa de liberação de calor e desenvolvimento da resistência serão lentas. Segundo, a reação consome óxido de cálcio ao invés de produzi-lo, o que representa uma contribuição importante para a durabilidade da pasta endurecida de cimento. Terceiro, os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando a resistência e impermeabilidade do sistema (MEHTA, 1994).

Em temperaturas mais elevadas (20°C a 80°C) as reações de cinza volante são mais aceleradas do que no caso do cimento puro, sem adições (NEVILLE, 1997).

Como a reatividade da cinza aumenta muito com a temperatura, o comportamento do concreto com cinza volante em seções robustas (onde a hidratação do cimento eleva a temperatura) pode ser diferente do comportamento em peças pequenas, à temperatura ambiente. (NEVILLE,1997).

Conforme SALUM (2016), isto é comprovado por Narmluk e Nawa (2011) e por Deschner *et al.*(2013), na qual verificaram que, para temperaturas acima de 50°C, a taxa de reação pozolânica é acrescida e atinge níveis significativos em algumas horas.

Também a cinza volante, como é chamada a cinza produzida durante a combustão do carvão pulverizado em usinas termoelétricas, empregada como aditivo mineral ou adição, exerce uma influência considerável sobre o consumo de água, a trabalhabilidade, a velocidade de desenvolvimento da resistência e consequentemente sobre o calor gerado nas estruturas de concreto.

A substituição do cimento Portland por cinza volante não é uma prática tão recente, sendo que tem-se notícias de adições de cinza volante desde os anos 30. Em construções de concreto massa, onde baixos consumos de cimento e elevadas proporções de cinza volante são comumente empregados, ocorreu a primeira aplicação com sucesso na construção da barragem Hungry Horse, Montana no ano de 1948 (MEHTA, 1994).

2.1.3. Aditivos

O emprego de aditivos no concreto massa conferem importantes melhorias em suas propriedades no estado fresco e endurecido, dentre as quais destacam-se:

- melhoria da trabalhabilidade e plasticidade;
- redução da água requerida para dada consistência;
- diminuição do consumo de cimento;

- aumento da resistência mecânica do concreto;
- redução da segregação;
- aumento da durabilidade;
- redução da permeabilidade e melhora da resistência a abrasão;
- retardar tempo de pega;
- acelerar a pega e endurecimento inicial;
- redução da temperatura máxima que o concreto atinge no processo

de endurecimento.

Quando trata-se de barragens, onde o teor de cimento é baixo (em torno de 100 Kg/m³), como utiliza-se um fator água/cimento baixo para obter a resistência à compressão de projeto, é comum a incorporação de 4 a 8% de ar, com a finalidade de reduzir a quantidade de água, mantendo a trabalhabilidade (MEHTA, 1994).

Nas aplicações em concreto massa para blocos e outros elementos estruturais, onde a incorporação de ar influencia na resistência mecânica do concreto, utilizam-se os aditivos redutores de água, retardadores de pega e superplastificantes.

A utilização de aditivos plastificantes, ou redutores de água, proporcionam um aumento da fluidez sem aumentar o teor de água, ou redução do teor de água mantendo uma mesma consistência do concreto fresco, sendo assim importantes na determinação do teor de cimento e consequente controle de temperatura do concreto.

Sendo utilizados cada vez mais, atualmente, os superplastificantes são necessários para o lançamento de concreto com os equipamentos de bombeamento, devido à necessidade do vencimento de grandes distâncias e alta trabalhabilidade.

O efeito dos aditivos superplastificantes é similar ao do plastificante, porém muito mais intenso. Ao utilizar um aditivo plastificante consegue-se

reduzir o teor de água do concreto em 5 % a 10 %. Já, no caso do uso de aditivos superplastificantes, essa redução pode chegar a 25 %, sem perda de consistência (SOUZA, 2007 apud TOCHETTO, 2010).

Os aditivos retardadores de pega são aqueles cuja principal finalidade é adiar o processo de pega do concreto a fim de possibilitar a realização de operações de trabalho com o mesmo. Dentre outras finalidades, os aditivos retardadores costumam ser utilizados para retardar a liberação de calor (concreto massa), bem como evitar a formação de juntas entre duas camadas adjacentes de concretagem. Assim, é possível obter uma estrutura monolítica, sem juntas frias, já que o concreto da camada inferior permanece plástico até que se complete a concretagem (TOCHETTO, 2010).

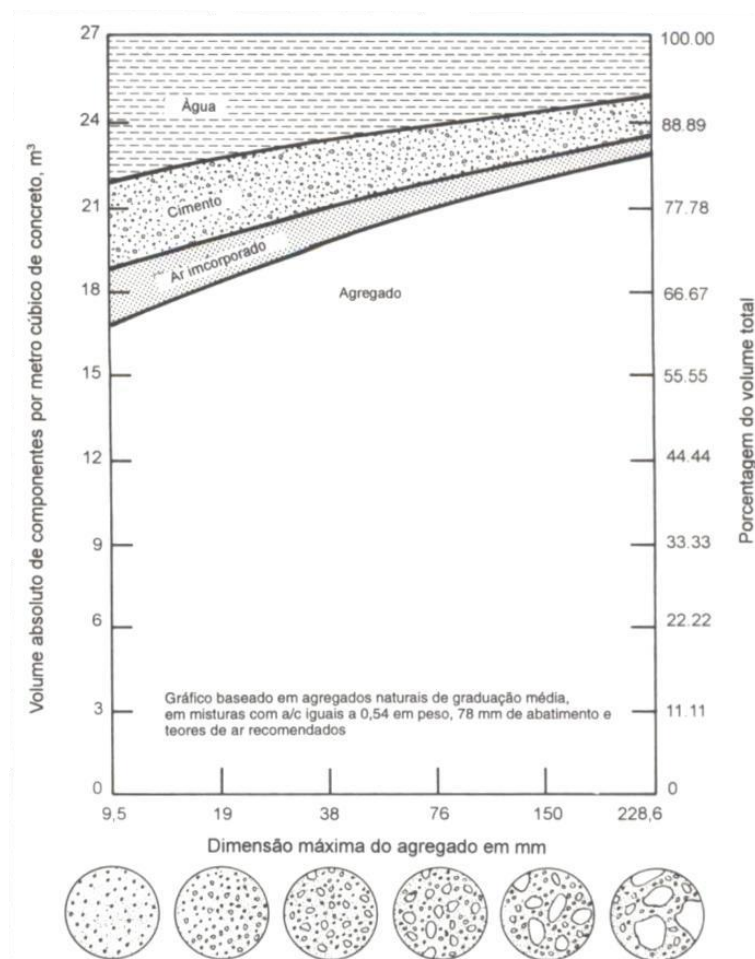
2.1.4. Agregados

A importância dos agregados decorre de sua participação na composição do volume total de concreto. Sendo que este participa aproximadamente 75% do volume da massa, impactando diretamente no consumo de cimento para determinada trabalhabilidade e resistência.

Na seleção de agregados, com o objetivo de diminuir o calor de hidratação utiliza-se o agregado mais graúdo possível (e também, menos lamelar possível), para reduzir a quantidade de água e consequentemente o teor de cimento e uma seleção de agregados que combinados produzam o máximo de massa específica e menor teor de vazios. Uma prática comum e cada vez mais crescente é combinar dois ou mais agregados miúdos e graúdos com o intuito de melhorar a composição granulométrica e reduzir o custo final do concreto.

A Figura 3 abaixo, baseada nas pesquisas do Bureau of Reclamation dos Estados Unidos mostra que, para uma dada relação a/c e uma dada consistência, à medida que o tamanho do agregado graúdo aumenta, o teor de água, bem como de cimento, são reduzidos (MEHTA, 1994).

Figura 3 - Efeito da dimensão máxima do agregado no traço do concreto



Fonte: Mehta & Monteiro, 1994.

Contudo, as dimensões máximas dos agregados devem ser observadas de acordo com a aplicação na estrutura, de acordo com o dimensionamento e espaçamento de armadura e formas.

A mineralogia dos agregados também tem grande influência nas propriedades importantes para o concreto massa, como módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, a difusividade e a capacidade de deformação (MEHTA, 1994).

Nota-se o basalto com módulo de elasticidade superior ao do arenito, por exemplo. O calcário, seguido do basalto com menor coeficiente de expansão e difusividade térmica que o quartzito. Portanto, quando possível, deve-se

selecionar agregados que favoreçam o maior módulo de elasticidade, a menor expansão e a maior capacidade de deformação no concreto massa.

2.1.5. Controle da temperatura do concreto massa

Em obras com grandes volumes de concreto, para se controlar o aumento da temperatura no interior do concreto, decorrente do calor de hidratação, visando reduzir a incidência de fissuras térmicas tomam-se medidas de prevenção, tais como:

- Redução do consumo de cimento;
- Utilização de cimentos com baixo calor de hidratação – tipo CP IV;
- Emprego de adições minerais como pozolanas;
- Seleção de de agregados;
- Pré-resfriamento da água de amassamento;
- Utilização de gelo no resfriamento do concreto;
- Pré-resfriamento dos agregados;
- Pós-resfriamento;
- Realização de concretagens em horários de temperatura mais amena;
- Redução de espessura de camadas de concreto;
- Maior intervalo de lançamento;
- Outras práticas de construção.

Essas medidas preventivas serão melhor analisadas a seguir, conforme cada material constituinte do concreto e práticas de execução.

2.1.5.1. Pré-resfriamento

Uma forma de proporcionar diminuição do pico do calor de hidratação é controlar a temperatura de lançamento do concreto. O controle desta temperatura é um dos maiores responsáveis pelo impedimento de fissuração térmica no concreto massa.

O primeiro uso de pré-resfriamento do concreto massa foi feito pelo U.S. Corps of Engineers, durante a construção da barragem de Norfolk, nos anos 40, onde a temperatura do concreto fresco foi limitada em cerca de 6°C utilizando-se gelo quebrado em substituição da água de amassamento. Posteriormente, utilizou-se combinações de gelo picado, água de amassamento gelada e agregados resfriados na construção de diversas barragens de gravidade para obter temperaturas de lançamento da ordem de 4,5 °C (MEHTA, 1994).

Atualmente, o pré-resfriamento do concreto fresco é um método comumente utilizado para controlar a subsequente queda de temperatura. Com frequência, agregados resfriados e/ou escamas de gelo são especificados para produzir misturas do concreto massa nas quais a temperatura do concreto fresco é limitada a 10° C ou menos. Durante a operação de mistura o calor latente necessário para a fusão do gelo é retirado de outros componentes da mistura do concreto, proporcionando uma maneira muito eficiente para baixar a temperatura e evitar a fissuração térmica.

A maneira mais eficiente para reduzir a temperatura do concreto é utilizando gelo ao invés de água gelada, porque ele absorve mais calor quando passa ao estado líquido em comparação com a água gelada.

Existem casos em que é necessário a complementação com o resfriamento também dos agregados graúdos com água gelada, enquanto são transportados para betoneira.

O nitrogênio líquido também pode ser utilizado no resfriamento da água de amassamento injetando-o no reservatório de água e/ou nos agregados para se obter menores temperaturas iniciais.

Outra maneira de utilizar o nitrogênio líquido é através de sua injeção diretamente sobre o concreto fresco, no balão do caminhão betoneira. Este procedimento é eficaz na redução da temperatura do concreto sem afetar adversamente suas propriedades. No entanto, este processo requer cuidados especiais para evitar a concentração diferenciada e conseqüente congelamento de porções do concreto. Além disso, é necessário que o tempo de mistura seja prolongado para que se obtenha reduções significantes na temperatura do concreto (TOCHETTO, 2010).

2.1.5.2. Pós-resfriamento

O pós-resfriamento do concreto começou a ser utilizado na construção da barragem de Hoover, no início dos anos 30. Nesta obra, além do objetivo de controlar o aumento da temperatura o pós-resfriamento visava a contração dos pilares de concreto a um volume estável para o preenchimento das juntas de construção com graute, assegurando uma ação monolítica da barragem (MEHTA, 1994).

O resfriamento é obtido através da circulação de água fria em tubos de aço com paredes finas que são distribuídos na massa do concreto, podendo iniciar juntamente ao lançamento do concreto, variando-se o espaçamento dos tubos e espessura das camadas para limitar a temperatura máxima a um nível projetado, em toda a estrutura.

De acordo com o Comitê ACI 207, tubos de alumínio ou aço com 25 mm de diâmetro nominal e paredes com espessura de 1,5 mm têm sido utilizados com sucesso nos sistemas de pós-resfriamento.

Nos primeiros dias a taxa de resfriamento pode ser a mais alta possível porque o concreto no estado fresco tem módulo de elasticidade relativamente baixo. Quando o concreto se torna elástico, é importante se ter uma queda de temperatura tão lenta quanto possível para permitir uma relaxação da tensão por fluência; sob condições de resfriamento lento, o concreto pode suportar uma queda de temperatura de 20 °C sem fissurar (MEHTA, 1994).

Para que o pós-resfriamento do concreto seja eficiente é essencial utilizar um procedimento de monitoramento da temperatura do concreto, constituído por termopares instalados no interior da massa de concreto, em posições representativas.

2.1.5.3. Práticas de execução

A utilização de boas práticas de execução para limitar os gradientes de temperatura, durante e após a concretagem, são fundamentais para se obter o resultado de qualidade e integridade para durabilidade da estrutura.

A realização de concretagens em horários de temperatura mais amenas, no período noturno, eventualmente, bem como a redução da espessura de camadas de concreto, maior intervalo de lançamento e o isolamento superficial configuram nas práticas mais importantes e utilizadas em canteiros de obra.

O objetivo do isolamento superficial não é limitar o aumento de temperatura e sim evitar sua queda brusca, regulando as diferenças de tensões resultantes dos altos gradientes de temperatura entre a superfície do concreto e seu interior.

Principalmente em climas quentes, é desejável diminuir a taxa de perda de calor da superfície, cobrindo-a com materiais isolantes, coxins de poliestireno ou uretano, para diminuir o gradiente de temperatura e evitar o

diferencial de tensão provocados pela queda da temperatura ambiente e aumentos da temperatura interna do concreto (MEHTA, 1994).

Uma das alternativas é a aplicação de uma lamina d'água sobre a superfície em contato com o ar, evitando que a face da peça se resfrie bruscamente devido a mudanças repentinas na temperatura ambiente. Além disso, de acordo com o Comitê ACI 207, mantas de lã de vidro com 50 a 100mm de espessura promovem um bom isolamento e, por isso, têm sido amplamente utilizadas (TOCHETTO, 2010).

Observando-se estes aspectos em relação à refrigeração do concreto podemos concluir e complementar as vantagens e desvantagens a seguir:

- Reduz probabilidades de fissuração de origem térmica;
- Redução de aproximadamente 0,3% de cimento para cada 1°C de redução da temperatura;
- Aumenta o tempo de pega, possibilitando a redução de aditivo retardador de pega;
- Aumenta o abatimento do concreto;
- Possibilita aumento de alturas de camadas;
- Possibilita redução no prazo construtivo;
- Dificulta a subida rápida de formas deslizantes devido ao tempo de pega;
- Aumenta o custo do concreto em aproximadamente R\$40,00/m³ (supondo 100kg gelo/m³) ;
- Para refrigerar 1 m³ de concreto em 1°C necessários 12kg N₂;
- Preço do N₂ é quase igual ao do gelo, porém não possibilita outras reduções causadas pela alteração do abatimento;
- Os equipamentos de custo elevado em obras de grande porte ficam ociosos ao término da obra (KUPERMAN, 2017).

Resultando daí a importância do Estudo Térmico para controle do aumento de temperatura no concreto. Sendo que ele só não é necessário quando as consequências não forem importantes (KUPERMAN, 2017).

O estudo das propriedades térmicas do concreto deve incluir a análise de parâmetros como condutividade térmica, difusividade térmica, incremento adiabático de temperatura, coeficiente de dilatação térmica e calor específico.

Os primeiros estudos térmicos foram realizados no final dos anos 20 na Barragem de Hoover – USA.

Kuperman (2017) comenta que é comum não fazer estudos para estruturas que não são barragens, sendo os erros mais recorrentes:

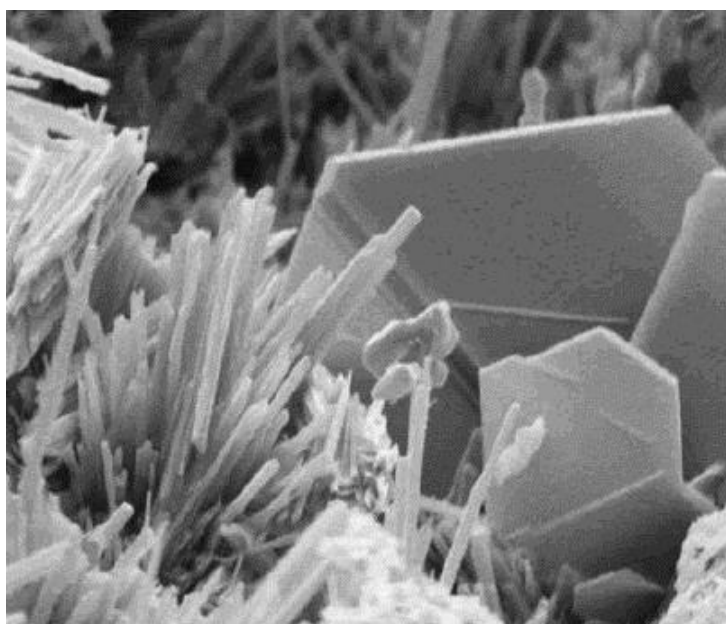
- Usar as temperaturas do último projeto, mas cada projeto é único e deveria ser considerado independentemente;
- Escolher tipo errado de cálculo;
- Estimar temperatura sem ter informações suficientes;
- Aplicar resultados para toda a estrutura, sem avaliar as restrições (limites de temperatura são mais necessários em locais com maiores restrições) que variam na estrutura;
- Ignorar a formação de uma restrição (retomada de concretagem por exemplo);
- Ignorar possibilidade de fissuração longitudinal principalmente em barragens;
- Não testar os materiais em relação as suas características físicas e térmicas.

2.1.5.4. Consequências da elevação da temperatura do concreto

Este item aborda os efeitos da etringita tardia na degradação do concreto massa.

Também conhecida como alto-sulfato ou trissulfoaluminato de cálcio hidratado, a etringita (Figura 4) é geralmente o primeiro produto a cristalizar-se durante a primeira hora de hidratação do cimento em condições de temperatura ambiente. É o elemento responsável pelo enrijecimento, pega e desenvolvimento da resistência inicial da pasta (MEHTA 1994).

Figura 4 - Cristais prismáticos de etringita em pasta de cimento pozolânico



Fonte: Disponível em <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CaOH2SEM.jpg>

A etringita primária é formada durante a hidratação do cimento, nos primeiros minutos, após o contato do cimento com a água.

Sob condições adequadas, os sulfatos solúveis, tanto os alcalinos presentes no clínquer, quanto os de cálcio, adicionados na forma de gesso na etapa final de fabricação do cimento, dissolvem-se rapidamente e reagem com o aluminato tricálcico (C_3A), precipitando na forma de etringita (ODLER, 2007 apud MELO, 2010).

Neste estágio de hidratação, a etringita não causa danos por expansão em virtude da alta fluidez da pasta.

Então, enquanto a etringita primária é formada durante a hidratação do cimento e é benéfica, a etringita tardia ou **DEF** (Delayed Ettringite Formation) ocorre quando o concreto atinge altas temperaturas (acima de 65 °C aproximadamente) e pode ser maléfica, degradando o concreto que já se encontra rígido causando expansão e fissuração que comprometerão a estrutura.

A DEF tem sido tratada na literatura como um tipo especial de ataque por sulfato interno, no qual os íons SO_4^{2-} são provenientes do próprio cimento. Para os pesquisadores Taylor (1997), Taylor, Famy e Scrivener (2001), Thaulow, Johansen e Jakobsen (1997), o processo se distingue pela formação ou recristalização da fase etringita na matriz cimentícia de argamassas ou concretos já endurecidos, durante a sua exposição à alta umidade, após terem sido submetidos a temperaturas próximas ou superiores a 70°C durante a etapa de cura. O fenômeno pode promover expansão da pasta e consequente fissuração, culminando na ruptura e lascamento do material, deteriorando-o (MELO, 2010).

Conforme Salum (2016), com base nas conclusões do seminário Rilem (2003)¹ apud Dayarathne, Galappaththi, Nanayakkara (2013), as condições necessárias para o surgimento da etringita tardia são:

- Aumento excessivo de temperatura durante a cura do concreto, relacionada com o elevado calor de hidratação de grandes massas de concreto ou devido a cura a vapor do concreto, em especial no caso de produtos pré-fabricados;
- Presença de sulfatos, essencialmente provenientes do cimento (do retardador de hidratação ou do interior das partículas de clínquer) e, em menor grau, a partir do agregado;
- Ambiente úmido.

¹ 2nd International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures. Paris, France. 2003.

Contudo, trata-se de um fenômeno complexo e as condições de temperatura para a formação do composto ainda não foram bem definidas. As normas alemãs e canadenses, por exemplo, consideram que a formação de etringita ocorre quando o tratamento térmico excede 80°C (PCA, 2001 apud SALUM 2016).

De acordo com Salum (2016), o concreto do bloco de coroamento do edifício Infinity Coast, na cidade de Balneário Camboriú/SC, ultrapassou a temperatura de 70°C, sendo possível que houvesse a formação de etringita tardia. No projeto do empreendimento Infinity Coast, o valor admitido como limite de temperatura já foi de 80°C, pois trata-se de um tema ainda não estudado com os materiais utilizados na confecção de concretos no Estado de Santa Catarina.

Neste empreendimento, para reduzir a temperatura máxima do concreto, teria que ser reduzida ainda mais a temperatura de lançamento e isto implicaria em aumento de custos para a obra. Ademais, não foram notados sinais que pudessem indicar a formação de etringita tardia (SALUM, 2016).

2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL

2.2.1. Histórico

O Concreto autoadensável (CAA), inicialmente desenvolvido no Japão pelo Professor Hajime Okamura na década de 1980, surgiu da necessidade de obter estruturas mais duráveis, com economia e menor tempo de execução, tendo em vista a proporção otimizada dos componentes da mistura e a ausência da necessidade do adensamento mecânico do concreto. Okamura e Ouchi (2003) evidenciaram que, por vários anos, desde 1983, o problema de durabilidade de estruturas de concreto foi o principal tópico de interesse no Japão. A concepção de estruturas exigia compactação adequada por operários especializados. Contudo, a redução gradual no número desse tipo de funcionário na indústria da

construção japonesa acarretou a diminuição equivalente na qualidade dos serviços. A falta desses operários não foi a única causa dos problemas de durabilidade. A baixa trabalhabilidade dos concretos também dificultava o seu adensamento em elementos estruturais com fôrmas complexas e com alta taxa de armaduras (GOMES & BARROS, 2009).

Estas situações compravam ainda mais social e economicamente que a opção por utilizar concreto autoadensável reduz o risco de acidentes e de ruídos provocado pelo uso de vibradores na execução de uma concretagem, diminuindo a incidência de periculosidade à saúde do trabalhador. Reduz a possibilidade do surgimento de manifestações patológicas decorridas da deficiência de qualidade da mão de obra e execução das estruturas de concretos, gerando ganhos significativos com a durabilidade das obras.

Uma definição simples e objetiva para o concreto autoadensável segundo Gomes e Barros (1997 apud OKAMURA, 2009) é um concreto que pode ser compactado em todo canto de uma fôrma, simplesmente por meio de seu próprio peso e sem a necessidade de equipamento de vibração.

Segundo Tutickian e Dal Molin (2005 apud EFNARC, 2015), um concreto só será considerado autoadensável se três propriedades forem alcançadas simultaneamente: a fluidez; a coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço ou habilidade passante; e a resistência à segregação.

Para ser considerado autoadensável, o concreto deve satisfazer determinadas propriedades no estado fresco, tais como: preencher todos os espaços da fôrma, somente pela ação de seu próprio peso; passar entre os obstáculos (armaduras e diminuição de seções) sem sofrer bloqueio; e manter a estabilidade da mistura, sem que haja a ocorrência de segregação e/ou exsudação de seus componentes (GOMES & BARROS, 2009).

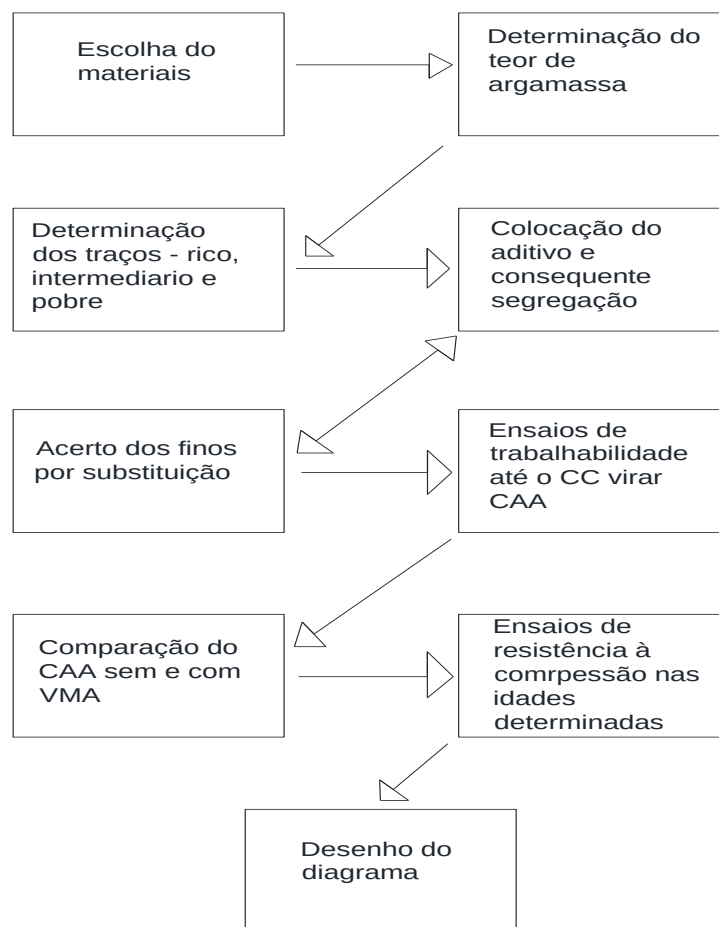
A capacidade de um concreto se autoadensar é obtida com sua alta fluidez correlacionada com sua viscosidade e sua coesão, adequadas com um

percentual de materiais minerais finos, inertes ou não, incrementados em sua massa a fim de aumentar o volume da pasta. Além claro, com o auxílio de aditivos especiais como os superplastificantes a base de policarboxilato e/ou em alguns casos modificadores de viscosidade.

2.2.2. Dosagem do concreto autoadensável

Os métodos de dosagem do CAA são diferentes dos métodos utilizados para dosagens de concreto convencional. Segundo Gomes e Barros (2009), os métodos são fundamentados em princípios não comuns que têm como meta o atendimento a propriedades que estabelecem uma relação entre a habilidade das misturas de fluir com facilidade nas fôrmas, independentemente de sua complexidade e dificuldade, e a estabilidade das misturas, que garante a ausência de segregação.

Como não é o objetivo deste trabalho, resumidamente apresenta-se o método de dosagem proposto por Tutikian (2004):

Figura 5 – Esquema Resumo Método de Dosagem

Fonte: Tutilian e Dal Molin, 2015

Tutikian se baseou no método de dosagem para concreto convencional IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992). Este é experimental e prático e possui passos que devem ser seguidos para que se alcance o objetivo final, que é a mistura de três traços de concreto, ou mais, para que se possa desenhar o diagrama de dosagem.

O método já foi testado, aprovado e utilizado por diversos autores: o próprio Tutikian (2004), Geyer (2005), Manuel (2005), Pagnussat et al. (2006), Ferreira et al. (2006), Alencar e Helene (2006), Barbosa et al. (2007), Silva (2008), entre outros. Por se tratar de um método recente, é significativa esta utilização (TUTULIAN e DAL MOLIN, 2015).

2.2.3. Vantagens da Utilização

O CAA é descrito como uma das grandes revoluções ocorridas na tecnologia do concreto para a construção nas últimas décadas. Tutikian e Dal Molin (2015) citam alguns ganhos, diretos e indiretos, entre os quais:

- Acelera a construção, já que seu lançamento é muito rápido e dispensa o adensamento;
- Reduz a mão de obra no canteiro, por eliminar a vibração e facilitar o espalhamento e o nivelamento do concreto;
- Melhora o acabamento final da superfície;
- Pode aumentar a durabilidade por ser mais fácil de adensar, evitando, assim, falhas de concretagem e grandes vazios resultantes da má vibração;
- Permite grande liberdade de formas e dimensões; o CAA preenche fôrmas curvas, esbeltas, com altas taxas de armadura e de difícil acesso;
- Permite concretagens em peças de seções reduzidas;
- Elimina o barulho de vibração, o que é muito importante em grandes centros urbanos, concretagens noturnas ou obras perto de escolas e hospitais;
- Torna o local de trabalho mais seguro, em função da diminuição do número de trabalhadores;
- Permite obter um ganho ecológico, por poder utilizar em sua composição altos teores de resíduos industriais, como a cinza volante, a escória de alto forno ou a cinza de casca de arroz;
- Pode reduzir o custo final do concreto e/ou da estrutura, se computados economicamente todos os ganhos citados acima.

Por este tipo de concreto conter grandes quantidades de finos, as propriedades no estado endurecido são melhoradas, como os acabamentos de peças pré-moldadas, pré-fabricadas, estruturas em concreto aparente, etc. Além do acabamento, os finos aumentam o empacotamento entre as partículas fazendo com que a penetração de agentes externos seja dificultada, garantindo maior durabilidade da estrutura.

O uso de CAA cada vez está mais presente no dia a dia das construções de blocos de fundações de grandes volumes, onde existem dificuldades como acesso de operários no interior das peças em meio as taxas de armaduras; longos períodos de exposição à ruídos de vibração e contato direto com o concreto; longos períodos de concretagem quando utilizado concreto convencional; risco de patologias por descuidos de adensamento e possíveis emendas de concretagem geradas pela demora da execução; entre outras. Sendo assim, a facilidade de execução de peças com dimensões elevadas com o CAA traz benefícios.

2.2.4. Normas

O concreto autoadensável é classificado pela NBR 15823-1:2010, cuja norma define como um concreto que é capaz de fluir, auto-adensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

A NBR 15823 estabelece os requisitos para classificação, controle e aceitação do concreto autoadensável no estado fresco, bem como estabelece e define limites para as classes de autoadensabilidade e prescreve os ensaios para verificação das propriedades do CAA. Esta norma é dividida em 6 partes, que apresentam os métodos de ensaio para classificação:

- Parte 2 – Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método de Abrams;
- Parte 3 – Determinação da habilidade passante – Método do anel J;
- Parte 4 – Determinação da habilidade passante – Método da caixa L;
- Parte 5 – Determinação da viscosidade – Método funil V;

- Parte 6 – Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação.

Resumidamente, as tabelas abaixo apresentam os parâmetros estabelecidos pela NBR 15823, para classificação do CAA:

Tabela 3 – Classes de espalhamento (slump flow)

Classe	Espalhamento (mm)	Método de Ensaio
SF1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2
SF2	660 a 750	
SF3	760 a 850	

Fonte: ABNT NBR 15823.

Tabela 4 - Classes de viscosidade plástica aparente t500 (sob fluxo livre)

Classe	t500 (s)	Método de Ensaio
VS1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
VS2	> 2	

Fonte: ABNT NBR 15823.

Tabela 5 - Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre)

Classe	Anel J (mm)	Método de Ensaio
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço	ABNT NBR 15823-3
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço	

Fonte: ABNT NBR 15823.

Tabela 6 – Classes de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado)

Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de Ensaio
PL1	$\geq 0,80$ com 2 barras de aço	ABNT NBR 15823-4
PL2	$\geq 0,80$ com 3 barras de aço	

Fonte: ABNT NBR 15823.

Tabela 7 – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado)

Classe	Funil V (s)	Método de Ensaio
VF1	< 9	ABNT NBR 15823-5

VF2	9 a 25
-----	--------

Fonte: ABNT NBR 15823.

Tabela 8 – Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação

Classe	Coluna de segregação (%)	Método de Ensaio
SR1	≤ 20	ABNT NBR 15823-6
SR2	≤ 15	

Fonte: ABNT NBR 15823.

Esta norma, além da classificação do CAA, faz também recomendações quanto a qual classe utilizar em cada diferente tipo de aplicação, conforme apresentado nas tabelas abaixo:

Tabela 9 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armaduras embutidas, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com escoamento livre.	Lajes
		Concreto autoadensável bombeável.	Revestimento de túneis
		Estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto autoadensável	Estacas e certas fundações profundas
SF2	660 a 750	Aplicadas para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
SF3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-paredes
			Paredes-diafragma Pilares

Fonte: ABNT NBR 15823.

Tabela 10 – Classes de viscosidade plástica do CAA em função de sua aplicação

Classe de viscosidade plástica aparente	T500 (s)	Funil V (s)	Aplicação	Exemplo
VS1 / VF1	≤ 2	≤ 8	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armaduras e embutidos, mas exige controle de exudação e de segregação Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	Lajes, paredes-diafragma, pilares-paredes, indústria de pré-moldados e concreto aparente
VS2 / VF2	> 2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência a segregação Efeitos negativos podem ser obtidos com relação a superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas	Vigas, pilares e outros

Fonte: ABNT NBR 15823.

Tabela 11 - Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação

Classe de viscosidade plástica aparente	Anel J (mm)	Caixa L (H2 / H1)	Aplicação	Exemplo
PL1 / PJ1	25mm a 50mm Com 16 barras de	$\geq 0,80$ Com 2 barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80mm a 100mm	Lajes, painéis, Elementos de fundação

	aço			
PL2 / PJ2	0 a 25 mm Com 16 barras de aço	$\geq 0,80$ Com 3 barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 50mm a 80mm	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados

Fonte: ABNT NBR 15823.

Tabela 12 - Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação

Classe de resistência a segregação	Coluna de segregação (%)	Distância a ser percorrida (m)	Espaçamento entre armaduras (mm)	Exemplos
SR1	≤ 20	< 5	> 80	- Lajes de pequena espessura - Estruturas de fundações profundas
SR2	≤ 15	> 5	> 80	- Elementos de fundações profundas Pilares, paredes e elementos estruturais complexos
		< 5	< 80	- Elementos pré-moldados

NOTA 1 SR2 ou um valor-limite mais rigoroso pode ser especificado se a resistência ou a qualidade da superfície for particularmente crítica.

NOTA 2 Quando a distância a ser percorrida pelo concreto for maior que 5m e o espaçamento inferior a 80mm, deve ser especificado um valor de SR menor que 10%.

Fonte: ABNT NBR 15823.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O referido programa experimental, teve seus estudos laboratoriais desenvolvidos no laboratório da central de concreto da Max Mohr Grupo, na cidade de Blumenau/SC.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados no programa experimental e suas características, bem como os ensaios e análises que serviram de suporte para a pesquisa.

3.1. MATERIAIS EMPREGADOS

A seguir, apresentam-se os materiais empregados no estudo, suas especificações, descrições, características e locais onde foram coletados.

3.1.1. Cimento

Para a realização deste estudo, foram utilizados os cimentos compostos mais comuns na região, CP II-F-40 e CP IV-32-RS, no caso, ambos produzidos pela Votorantim Cimentos, fornecidos à granel e coletados nas centrais de concreto da Concremohr e Supermix.

Os cimentos foram inicialmente coletados em março de 2017, sendo o CP II-F-40 coletado no dia 17/03/2017 e o CP IV-32-RS no dia 28/03/2017, como pode-se observar nas Tabelas 13 e 14.

Como foi necessário realizar mais uma bateria de estudos em concreto, que não estava prevista inicialmente, a quantidade de cimento CP II-F-40 não foi suficiente, logo, houve a necessidade de realizar uma nova coleta no dia 21/09/2017, conforme Tabela 15.

Tabela 13 - Resumo Boletim de Ensaio do Cimento CP II F-40 de março

CP II F-40 - Votoran															
Limites de Norma	Teores (%)				Finuras (%)		Blaine	Água de consist. (%)	Tempo de pega		Expansib. a quente (mm)	Resist. à compressão (MPa)			
	PF	MgO	SO3	RI	#200	#325	(cm²/g)		Início (min)	Fim (min)		1 dia	3dias	7dias	28 dias
	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 2,5	≤ 10,0	N/A	≥ 2800	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40
17/03/2017	5,2	6	3,6	1,2	0	0,4	4560	30,6	220	280	0	25,7	35,9	42,2	50,1
Média	5,18	5,95	3,45	1,27	0,00	0,34	4466,52	30,54	216,52	276,3	0,37	24,28	35,72	41,56	49,22

Tabela 14 - Resumo Boletim de Ensaio do Cimento CP IV-32-RS de março

CP IV-32-RS - Votoran														
Limites de Norma	Teores (%)				Finuras (%)		Blaine	Água de consist. (%)	Tempo de pega		Expansib. a quente (mm)	Resist. à compressão (MPa)		
	PF	MgO	SO3	RI	#200	#325	(cm²/g)		Início (min)	Fim (min)		3dias	7dias	28 dias
	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	N/A	≤ 8,0	N/A	N/A	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0; ≤ 49,0
28/03/2017	3,06	4,59	2,17	29,55	0,4	3,2	4370	30,5	240	300	0	24,9	30,5	41,4
Média	3,25	4,67	2,26	28,71	0,60	2,89	4384,76	30,58	260,24	331,19	0,02	24,61	29,46	41,24

Tabela 15 - Boletim de Ensaio dos Cimentos CP II F-40 de setembro

CP II F-40 - Votoran															
Limites de Norma	Teores (%)				Finuras (%)		Blaine	Água de consist. (%)	Tempo de pega		Expansib. a quente (mm)	Resist. à compressão (MPa)			
	PF	MgO	SO3	RI	#200	#325	(cm²/g)		Início (min)	Fim (min)		1 dia	3dias	7dias	28 dias
	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 2,5	≤ 10,0	N/A	≥ 2800	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40
21/09/2017	5,0	5,9	3,4	1,5	0,0	0,5	4520,00	30,0	210	270	0,5	24,2	37,1	41,3	49,3
Média	4,89	5,82	3,37	1,03	0,0	0,44	4548,50	30,02	213	272,50	0,48	24,33	34,86	40,85	48,11

Os boletins de ensaio dos cimentos utilizados estarão disponíveis na íntegra nos Anexos.

3.1.2. Adições

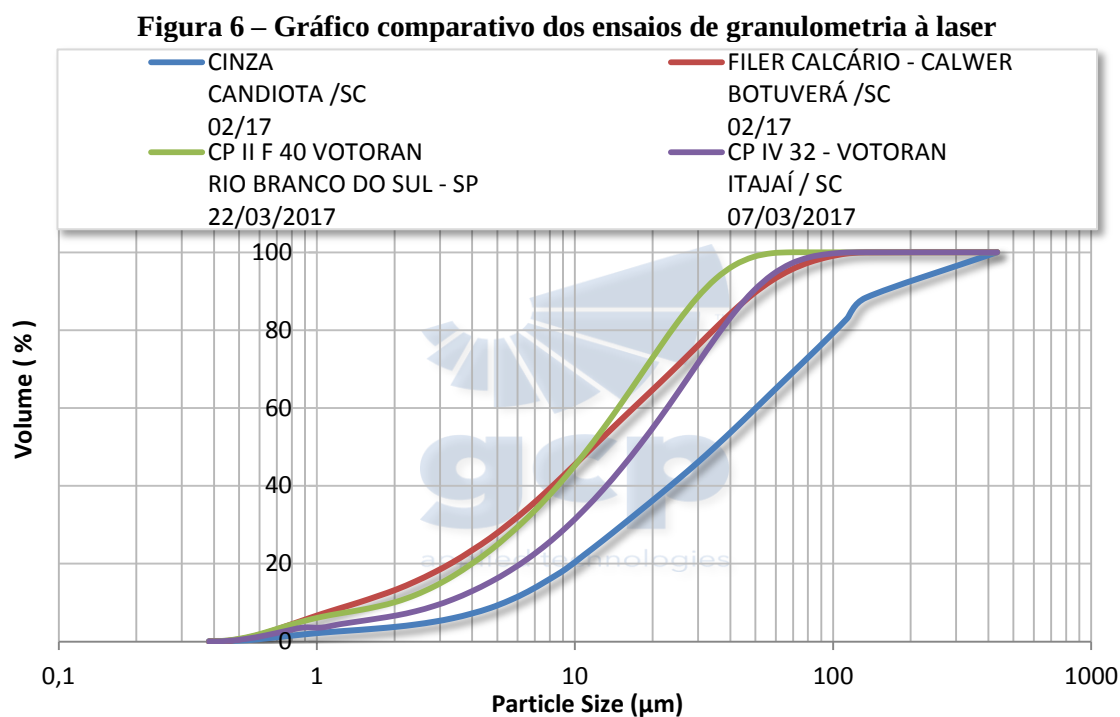
Foram utilizadas duas adições no estudo, o filer calcário e a cinza volante. O primeiro, proveniente da Calwer Mineiração, coletado no pátio da pedreira em Botuverá/SC, no mês de março de 2017.

Já a cinza volante, foi proveniente da usina termoeletrica de Candiota/RS e coletada também em março de 2017 na central da Concremohr em Blumenau/SC.

Em 12/12/2017 foi realizado o ensaio de Atividade Pozolânica da cinza volante utilizada conforme a NBR 15.895/10 – Materiais Pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado, pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), que resultou em um teor de 441,27 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de material.

O laudo integral do ensaio de atividade pozolânica ou pozolanicidade da cinza volante utilizada no estudo encontra-se nos Anexos.

Na Figura 6 está representado o gráfico comparativo dos ensaios de granulometria à laser, realizado no laboratório central da GRACE em 13/11/2017, com as adições e cimentos utilizados no presente estudo.



Fonte: Laboratório GRACE

Os ensaios de granulometria à laser estão disponíveis individualmente nos Anexos.

3.1.3. Agregados Graúdos

Nos traços de concreto foram utilizados dois agregados graúdos 4,75/12,5 e 9,5/25,0, conforme a NBR 7211:2009. Ambos fornecidos pela empresa Ouro Preto Mineração, sendo os mesmos armazenados em local seco e protegido e utilizados até o final dos experimentos em todos os traços rodados neste estudo.

Pelo fato que ter havido a necessidade de uma bateria de ensaios a mais da prevista, foi necessário a utilização de dois lotes de cada brita. Para a composição do estudo, foram realizados os ensaios de granulometria e características físicas, conforme as normas, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Resumo Ensaios Agregados Graúdos

Ensaio Agregado Graúdo				
Agregado	Brita 1		Brita 0	
Data Coleta	06/03/2017	03/08/2017	06/03/2017	03/08/2017
Diâmetro máximo (mm)	25	25	12,5	12,5
Módulo Finura	6,94	6,90	6,00	5,94
Massa Específica (g/cm³)	2,78	2,81	2,76	2,81
Mat. Pulverulento (%)	1,3	2,3	1,9	2,6
Impureza orgânica (p.p.m)	0	0	0	0

Fonte: Grupo Max Mohr

3.1.4. Agregados Miúdos

Os agregados miúdos utilizados são os disponíveis na região e já conhecidos em aplicações de concreto dosado em central. A areia natural do fornecedor Dona Otília (Araquari/SC) e a areia artificial do fornecedor Calwer Mineração (Botuverá/SC).

A areia artificial foi coletada em dois lotes, devido a falta de material para a conclusão dos estudos. Já a areia natural foi coletada em três lotes, pois os resultados de resistência obtidos no segundo ensaio foram insatisfatórios. Como a areia natural havia sido o único agregado alterado, fez-se novos ensaios com um novo lote.

Tabela 17 - Resumo Ensaios Areia

Ensaio Areias					
Agregado	Areia Natural			Areia Artificial	
Data Coleta	06/03/2017	10/07/2017	04/08/2017	09/03/2017	04/08/2017
Diâmetro máximo (mm)	1,2	1,2	1,2	4,8	4,8
Módulo Finura	1,34	1,22	1,50	2,83	2,66
Massa Específica (g/cm³)	2,65	2,65	2,65	2,80	2,80
Mat. Pulverulento (%)	1,13	1,75	0,94	13,38	15,00
Impureza orgânica (p.p.m)	300	300	300	0	0

Fonte: Grupo Max Mohr

3.1.5. Aditivos

Utilizaram-se dois tipos de aditivos fornecidos pela empresa GCP (Grace Construction & Packaging) que foram o inibidor de hidratação ECOTEC-20 e o superplastificante TECMULT 40, coletados em março de 2017 do estoque da filial de Blumenau da Max Mohr Grupo sem alterar a amostra até o final dos estudos.

Na segunda etapa de ensaios em concreto foi adicionado o aditivo modificador de viscosidade Centrament Stabi 520 do fornecedor MC-Balchemie para melhorar as propriedades do concreto fresco.

3.1.6. Água

Utilizou-se a água proveniente da rede de abastecimento local da filial da Max Mohr Grupo de Blumenau/SC.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. Estudo em Concreto

O estudo tem o objetivo de verificar a influência de adição de cinza volante ou filer calcário no calor de hidratação do concreto autoadensável, para obter resultados de menor calor de hidratação para uma determinada resistência característica (usual no cotidiano das construções).

Para isso, fixou-se a resistência característica aos 28 dias (F_{ck}) de 35,0 MPa, o consumo de cimento (ou o consumo de cimento e adição) em 400 Kg/m³ e o espalhamento em 700 ± 50 mm, variando o percentual de adição.

Na primeira etapa foram rodados traços iniciais, no dia 01 de abril de 2017, com três composições pré-estabelecidas de adições para cada um dos dois tipos de cimento, conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Traços dos concreto no dia 01/04/2017

Tipo de cimento/adição	C⁽¹⁾	C.V.⁽²⁾	Filer	Areia Nat.	Areia Art.	Brita 0	Brita 1	Água	I.H.⁽³⁾	Sup.⁽⁴⁾
CP IV-32 100%	400			644	171	688	297	190	1,2	2,4
CP IV-32 95% / FILER 5%	380		20	643	171	688	297	190	1,2	2,4
CP IV-32 90% / FILER 10%	360		40	643	170	688	197	190	1,2	2,4
CP IV-32 90% / CINZA 10%	360	40		633	168	688	297	190	1,2	2,4
CP IV-32 80% / CINZA 20%	320	80		623	165	688	297	190	1,2	2,4
CP II F-40 100%	400			658	174	683	295	195	1,2	2,4
CP II F-40 95% / FILER 5%	380		20	657	174	683	295	195	1,2	2,4
CP II F-40 90% / FILER 10%	360		40	655	174	683	295	195	1,2	2,4
CP II F-40 85% / CINZA 15%	340	60		639	170	683	295	195	1,2	2,4
CP II F-40 70% / CINZA 30%	280	120		621	165	683	295	195	1,2	2,4

(1) Cimento.

(2) Cinza volante

(3) Aditivo Inibidor de hidratação.

(4) Aditivo Superplastificante.

* Todos os valores estão em kilograma.

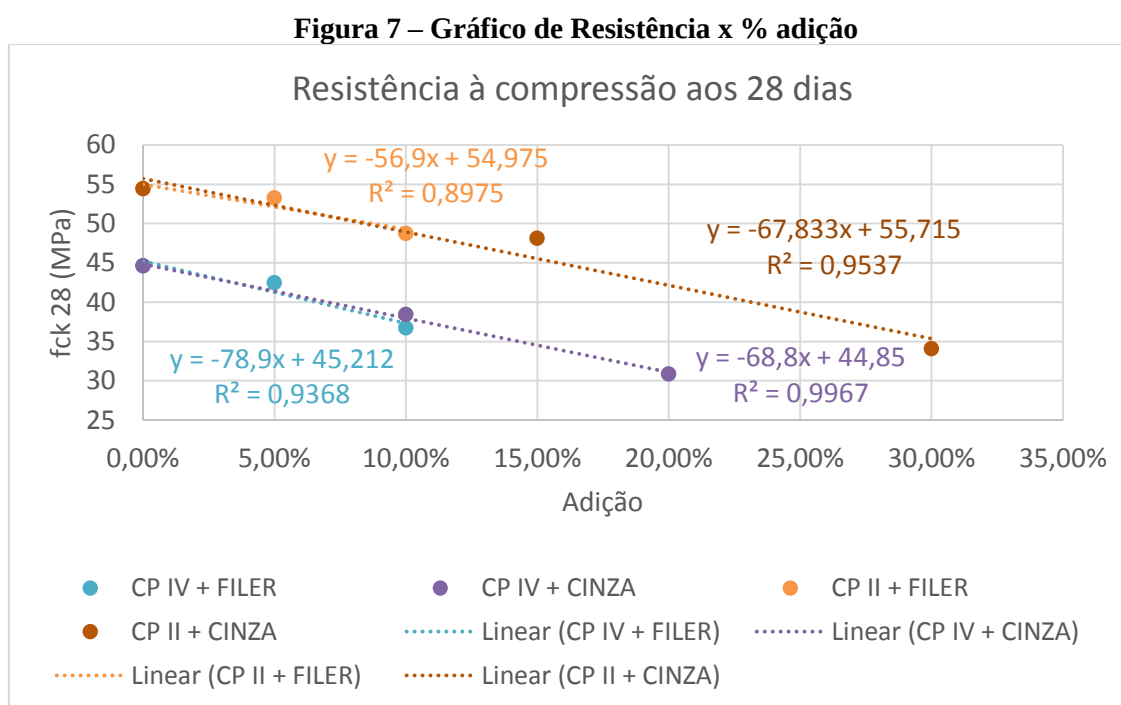
Estas composições foram adotadas com base na experiência prática e utilizações já consagradas de dosagem de concreto.

Os dez traços foram rodados, medindo-se o espalhamento (slump-flow) e após moldados três corpos de prova em cada, que foram rompidos aos 28 dias, obtendo-se os seguintes resultados:

Tabela 19 – Resultado do ensaio à compressão dos traços iniciais

Estudo	Tipo de cimento / adição	Abatimento (mm)	R28 máximo (MPa)
TCC 01	CP IV-32 100%	705	44,6
TCC 02	CP IV-32 95% / FILER 5%	700	42,5
TCC 03	CP IV-32 90% / FILER 10%	705	36,7
TCC 04	CP IV-32 90% / CINZA 10%	690	38,4
TCC 05	CP IV-32 80% / CINZA 20%	695	30,9
TCC 06	CP II F-40 100%	700	54,4
TCC 07	CP II F-40 95% / FILER 5%	710	53,2
TCC 08	CP II F-40 90% / FILER 10%	705	48,7
TCC 09	CP II F-40 85% / CINZA 15%	700	48,1
TCC 10	CP II F-40 70% / CINZA 30%	700	34,1

Com base nestes resultados, foi possível obter o gráfico da Figura 7, que segue.



Considerando-se que este concreto seria rodado em central dosadora, com todos os materiais medidos em peso e com os devidos controles tecnológicos, adotou-se um desvio-padrão de 4,0, chegando-se a uma resistência de dosagem (F_{cj}) desejada de 41,60 Mpa, através da seguinte equação.

$$F_{cj} = F_{ck} + 1,65 \times S_d$$

$$F_{cj} = 35 + 1,65 \times 4,0$$

$$F_{cj} = 41,6 \text{ MPa}$$

Onde:

- F_{cj} – Resistência de dosagem;
- F_{ck} – Resistência característica;
- S_d – Desvio padrão.

Aplicando este F_{cj} em cada equação linear do gráfico (referente a cada composição de dosagem indicado pelo eixo y), obtém-se o percentual de adição necessário, conforme Tabela 20.

Tabela 20 – Porcentagem de adição para cada tipo de cimento para o F_{cj} desejado

Composição	y	x
CP IV + Filer	41,60	4,58%
CP IV + Cinza	41,60	4,72%
CP II + Filer	41,60	23,51%
CP II + Cinza	41,60	20,81%

Então, com estes percentuais de adição em relação ao cimento, foi rodada a segunda etapa de traços, no dia 22 de julho de 2017, conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Traço dos concretos rodados no dia 22/07/2017

Tipo de cimento/adiação	Cimento	Cinza	Filer	Areia Nat.	Areia Art.	Brita 0	Brita 1	Água	Mod. Visc.	Inib. de Hidrat.	Super
CP IV-32 100%	400			637	169	683	295	195	0,08	1,2	2,4
CP IV 32 95,42% / FILER 4,58%	382		18	638	169	683	295	195	0,08	1,2	2,4
CP IV-32 95,28% / CINZA 4,72%	381	19		633	168	683	295	195	0,04	1,2	2,4
CP II F-40 100%	400			652	173	679	293	200	0,08	1,2	2,4
CP II F-40 76,49% / FILER 23,51%	306		94	646	171	679	293	200	0,08	1,2	2,4
CP II F-40 79,19% / CINZA 20,81%	317	83		626	166	679	293	200	0,08	1,2	2,4

Contudo, após rodar o concreto na betoneira e ao medir o espalhamento, observou-se que o mesmo segregou, o que até então não havia ocorrido em nenhum dos traços rodados. Afim de corrigir esta falha, adicionou-se um modificador de viscosidade e obteve-se os resultados de resistência a compressão aos 28 dias conforme Tabela 22.

Tabela 22 – Resultado resistência a compressão referente ao ensaio do dia 22/07/2017

Tipo de cimento/adição	Slump Flow (mm)	T500 (s)	Anel J (mm)	R28 máximo (MPa)	R44 máximo (MPa)
CP IV 32 + 4,58% DE FILER CALCÁRIO	660	5,72	655	31,8	35,2
CP IV 32 + 4,72% DE CINZA	640	5,44	640	28,7	30,8
CP II F 40 + 23,51% DE FILER CALCÁRIO	660	3,16	650	29,5	29,8
CP II F 40 + 20,81% DE CINZA	640	3,78		48,6	55,8

É importante ressaltar que única variável neste dia foi a areia natural, em relação à primeira etapa, e com a variação do módulo de finura e maior percentual de material pulverulento (como se pode observar nos ensaios apresentados no capítulo 3.1.4), acredita-se serem estes os motivos da diferença de coesão no estado fresco. Contudo, não se pode afirmar que a interferência nas resistências foram motivadas pela diferença de lote da areia ou pelo modificador de viscosidade.

Notou-se um elevado valor do ar incorporado, atingindo 5%, que pode ser proveniente do aditivo modificador de viscosidade ou de alguma contaminação da areia natural utilizada na segunda etapa.

Devido este percalço, realizou-se uma nova bateria de ensaio, no dia 23 de setembro 2017, com os mesmos traços da Tabela 21. Porém, adotou-se outro lote de areia natural e eliminou-se o modificador de viscosidade, resultando na terceira etapa, onde atingiu-se os seguintes resultados.

Tabela 23 - Resultado resistência a compressão referente ao ensaio do dia 23/09/2017

Tipo de cimento/adição	Slump Flow (mm)	T500 (s)	Anel J (mm)	R28 máximo (MPa)	R63 máximo (MPa)
CP IV 32	685 x 680	4,40	650 x 660	51,2	60,9
CP IV 32 + 4,58% DE FILER CALCÁRIO	690 x 670	2,62	660 x 670	46,8	57,4
CP IV 32 + 4,72% DE CINZA	710 x 730	2,25	670 x 700	41,7	54,4
CP II F 40	700 x 700	1,62	660 x 670	55,9	61,0
CP II F 40 + 23,51% DE FILER CALCÁRIO	650 x 670	2,03	600 x 610	41,4	43,8
CP II F 40 + 20,81% DE CINZA	700 x 680	1,65	650 x 630	48,6	55,8

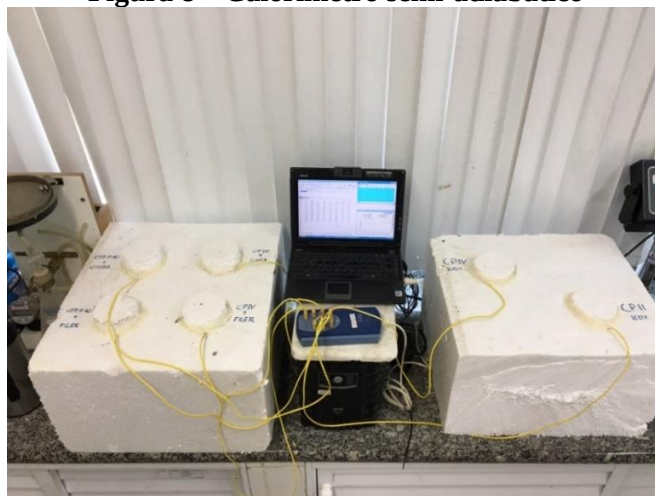
Conforme descrito no item 2.2.4, onde trata das normas que regem o concreto autoadensável, dos ensaios solicitados, foram realizados apenas três (t500, Anel J e abatimento) por serem os ensaios que foram conseguidos os equipamentos.

3.2.2. Calor de Hidratação

Nesta terceira etapa realizou-se, também, a aferição do calor gerado por cada concreto rodado, utilizando-se um calorímetro semi-adiabático da marca Pico TC-08 USB Thermocouple Data Logger da Max Mohr Grupo.

O sistema foi desenvolvido utilizando-se um bloco de polipropileno expandido (EPS) que acondiciona as seis amostras estudadas, com as seguintes dimensões: diâmetro = 10 cm, altura = 10 cm, separados 10 cm das bordas e 10 cm da amostra seguinte, termopares ligados a um computador para registro do comportamento durante todo o tempo de estudo que foi de 60 horas.

Figura 8 – Calorímetro semi-adiabático



Com este calorímetro foi possível acompanhar o desenvolvimento do calor gerado por cada concreto e também o pico máximo de temperatura atingido por cada concreto, conforme gráfico apresentado na Figura 9.

Adicionalmente, realizou-se a medição do calor de hidratação dos mesmos traços de concreto estudados no calorímetro isotérmico da GRACE (figuras 9 a 12).

Os ensaios de calorimetria isotérmica foram realizados durante os meses de novembro e dezembro de 2017 no laboratório central da GRACE em Sorocaba/SP, com amostras dos mesmos materiais e lotes utilizados em nosso estudo com calorímetro semi-adiabático. Para as temperaturas de 20 °C e 40 °C foi utilizado o calorímetro isotérmico Calmetrix e, para as temperaturas de 60 °C e 80 °C foi utilizado o microcalorímetro isotérmico TAM AIR.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos estudos do programa experimental, descritos anteriormente.

4.1. Classificação do concreto autoadensável

Primeiramente, consegue-se classificar o concreto autoadensável conforme a ABNT NBR 15823, obtendo-se os resultados da Tabela 24.

Tabela 24 – Avaliação e Classificação do CAA referente ao ensaio do dia 23/09/2017

Tipo de cimento / adição	Espalhamento (mm)	Classe	T500 (seg)	Classe	Anel J (mm)	Classe
CP IV-32	685	SF2	4,4	VS2	655	30 > PJ2
CP IV 32 + 4,58% DE FILER CALCÁRIO	695	SF2	2,6	VS2	665	30 > PJ2
CP IV 32 + 4,72% DE CINZA	720	SF2	2,3	VS2	685	35 > PJ2
CP II F-40	700	SF2	1,6	VS1	665	35 > PJ2
CP II F 40 + 23,51% DE FILER CALCÁRIO	660	SF2	2,0	VS1	605	55
CP II F 40 + 20,81% DE CINZA	690	SF2	1,7	VS1	640	50 > PJ2

Avaliando a classificação, temos um CAA para obras de fundações, onde a taxa de armadura é relativamente baixa, cujas são estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do CAA por ser concreto bombeável. O mesmo apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência a segregação. Adequado para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80mm a 100mm.

4.2. Temperatura do concreto

Neste item serão analisados os resultados obtidos através dos calorímetros semi-adiabático e isotérmico.

4.2.1. Calorímetro semi-adiabático

Através do calorímetro semi-adiabático foi possível monitorar a evolução de temperatura de cada traço, que pode ser observada conforme gráfico da Figura 9 e Tabela 25. Com isso, observa-se que o pico de temperatura do concreto foi de 44,9 °C no traço com CP II-F-40 sem adição, seguido do traço com CP II-F-40 com adição de filer que foi superior ao traço com cimento CP II-F-40 adicionado de cinza volante, atingindo 44,3 °C e 43,9 °C respectivamente.

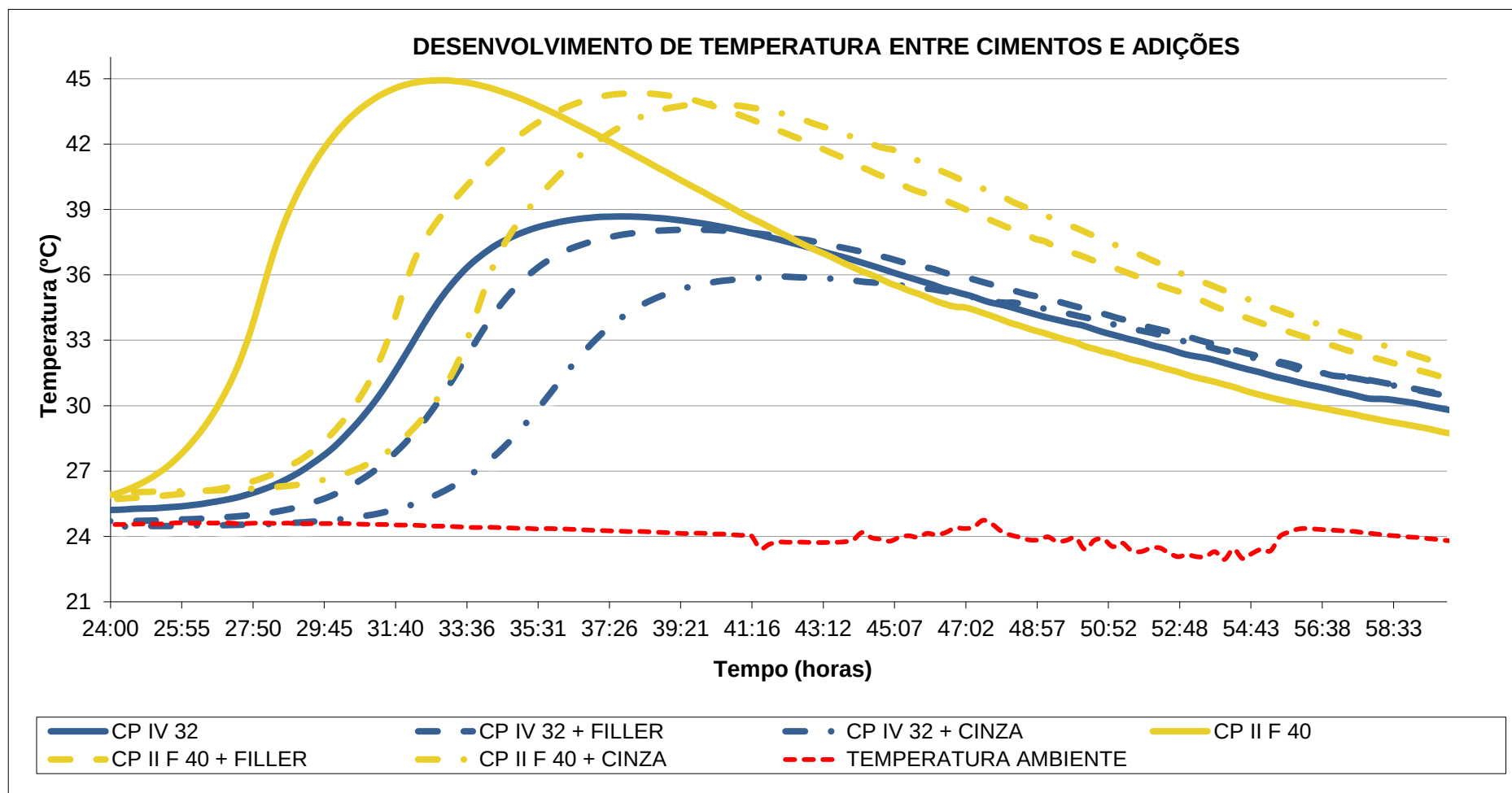
Em outro patamar de temperatura, abaixo dos traços com cimento CP II-F-40, como esperado, observa-se os traços com CP IV-32-RS, sendo o puro com maior temperatura (38,7 °C) seguido do traço com adição de filer e posteriormente o traço com adição de cinza volante, registrando 38,1 °C e 35,9 °C, respectivamente.

O menor pico de temperatura foi de 35,9 °C, obtido com o traço de cimento CP IV-32-RS adicionado de cinza volante. Este também foi o traço que teve os tempos de início do aquecimento e tempo para atingir a temperatura máxima mais tardios.

O critério utilizado para determinar o tempo de início do aquecimento foi estipulado como sendo o primeiro intervalo de tempo que obteve um acréscimo de 0,5 °C em 1 hora. E o tempo de Temperatura Máxima como sendo o tempo em que concreto obteve a máxima temperatura medida.

Também observa-se que o tempo decorrido entre o início do aquecimento e o atingimento da temperatura máxima foi menor no CP II-F-40 puro (8:15 horas) e todos os outros traços obtiveram um tempo decorrido praticamente igual (entre 9:30 e 9:45 horas).

Figura 9 – Gráfico do Desenvolvimento de Temperatura dos concretos



Fonte: Laboratório Max Mohr Grupo

Através do gráfico foi possível visualizar as seguintes informações.

Tabela 25 – Tabela resumo das temperaturas dos concretos

Estudo	Tempo Inicio Aquecimento (Horas)	Tempo Temperatura Maxima (Horas)	Temperatura Máxima (°C)	Tempo entre inicio Aqueci. e Temp. Max. (Horas)
CP IV 32	28:10	37:40	38,7	9:30
CP IV 32 + FILLER	29:40	39:25	38,1	9:45
CP IV 32 + CINZA	32:20	41:50	35,9	9:30
CP II F 40	24:30	32:45	44,9	8:15
CP II F 40 + FILLER	28:10	37:55	44,3	9:45
CP II F 40 + CINZA	30:35	40:20	43,9	9:45

Analisando-se, inicialmente a granulometria dos cimentos e adições utilizadas, com base nos ensaios detalhados no item anterior, tem-se que o cimento CP II-F-40 é o material mais fino do nosso estudo, seguido do filer, depois do cimento CP IV-32-RS e por ultimo a cinza volante. Portanto, como a finura influencia no calor de hidratação, ocorre um maior desprendimento de calor com o CP II-F-40, justamente por ser mais fino. Mas, como já observado, o mais impactante no resultado final é a quantidade de cimento.

Conclui-se, com base nos resultados obtidos, que os traços com cimento CP IV-32-RS apresentaram o menor pico de temperatura quando adicionado a cinza volante, mas com grande potencial de utilização, também, deste cimento puro, sem adições no traço, uma vez que a referida temperatura atingida não foi tão elevada (38,7 °C), contudo, obteve-se um Fck acima da referência (51,2 Mpa) possibilitando a redução na quantidade de cimento para atingir os 41,6 Mpa, com consequente diminuição da temperatura.

Quanto aos resultados na utilização do CP II-F-40, observa-se também um menor pico de temperatura quando utilizado combinado com cinza volante, e ainda com potencial de redução desta, devido ao fcj ter atingido 48,6 Mpa, sendo

possível reduzir a quantidade de cimento e conseqüentemente reduzindo a temperatura final.

Observando-se, também, que os percentuais de adições, tanto de filer quanto de cinza volante, em torno de 5%, são muito pequenos quando utiliza-se o cimento CP IV-32-RS, e levando-se em consideração o aumento do trabalho operacional numa central dosadora de concreto para utilizar mais um produto na sua dosagem, com todo o risco envolvido nesta operação, resulta-se que, a utilização do cimento CP IV-32-RS puro seria mais eficiente na prática do dia-a-dia das construções, e deve ser analisada em cada caso.

Esperava-se uma redução maior de temperatura nos traços de CP II-F-40 quando substituídos filer ou cinza volante, já que a quantidade de adição foi de 23,51% de filler e 20,81% de cinza volante, reduzindo bastante a quantidade de clínquer na mistura que reduziria a temperatura consideravelmente, porém isto não ocorreu. A temperatura ficou praticamente a mesma, com variação máxima de 0,6 °C do traço com cimento puro em relação ao traço adicionado de filer. Isto deve ter sido ocasionado pela perda irregular de calor para o meio externo no calorímetro semi-adiabático que foi produzido.

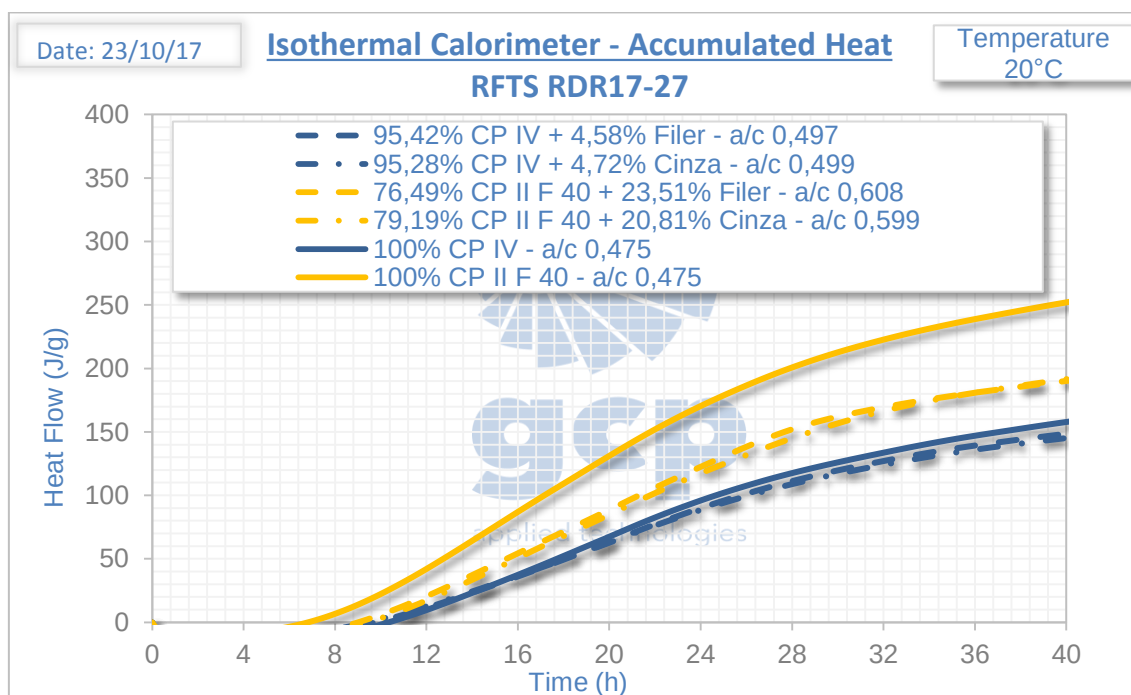
Nos traços com CP IV-32-RS, que já tem uma quantidade grande de cinza volante na composição do cimento, como a substituição pelas adições suplementares foi pequena: 4,58% de filer e 4,72% de cinza volante, já se esperava uma variação pequena entre os picos de temperatura máxima, porém conseguiu-se uma diminuição de 2,7 °C quando substituída cinza volante pelo cimento puro.

4.2.2. Calorímetro isotérmico

Conforme mencionado anteriormente, foram realizados ensaios de calor de hidratação na pasta de cimento com o calorímetro isotérmico, sendo este o ensaio que não sofre interferência da temperatura externa.

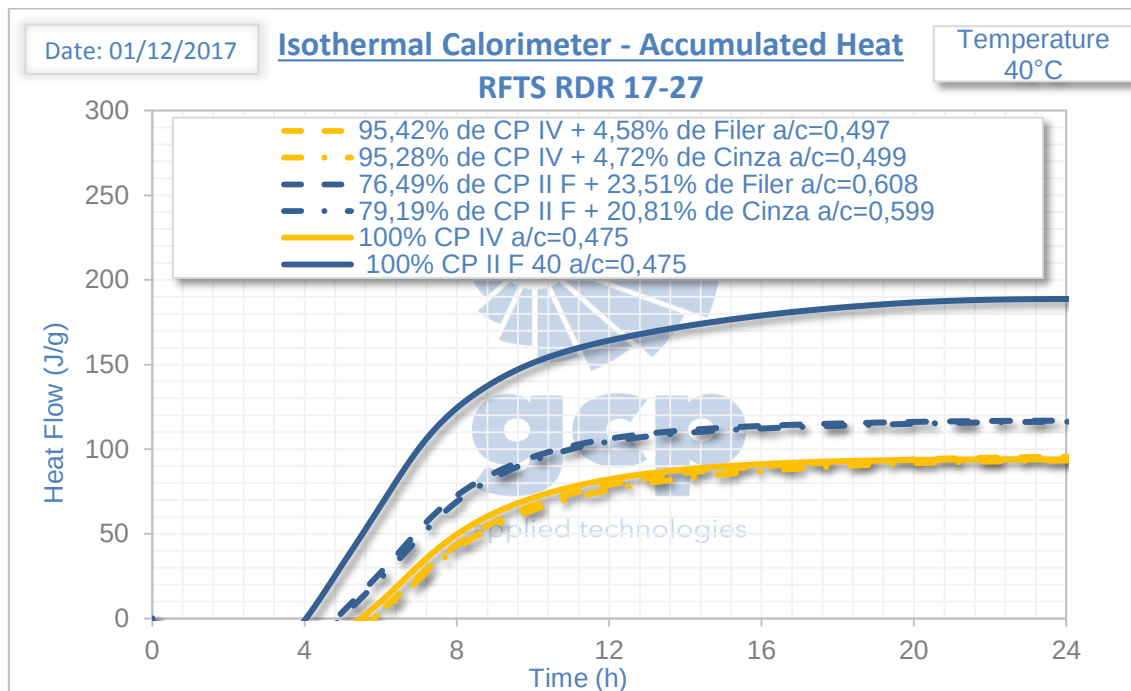
Realizou-se as medições de calor de hidratação nas temperaturas de 20°C, 40°C, 60°C e 80°C, conforme as figuras a seguir. Neste estudo o objetivo foi verificar o comportamento do concreto quando submetido a temperaturas mais elevadas que são possíveis de serem atingidas quando se trata de concreto massa.

Figura 10 – Gráfico do calor de hidratação com temperatura de 20°C



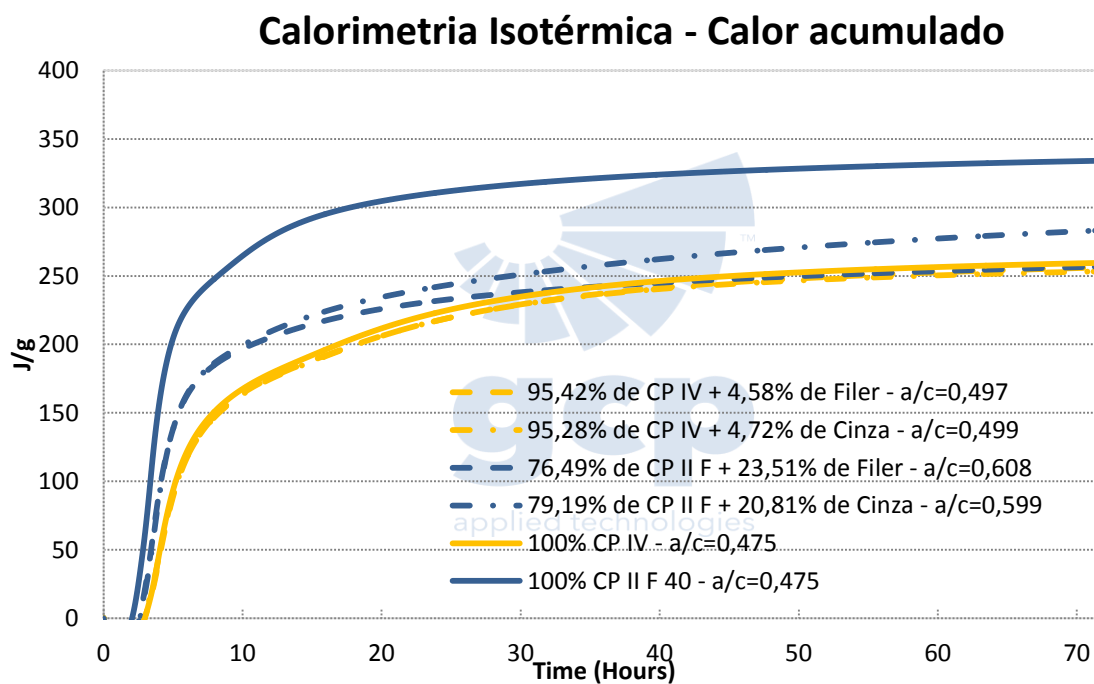
Fonte: Laboratório GRACE

Figura 11 - Gráfico do calor de hidratação com temperatura de 40 °C



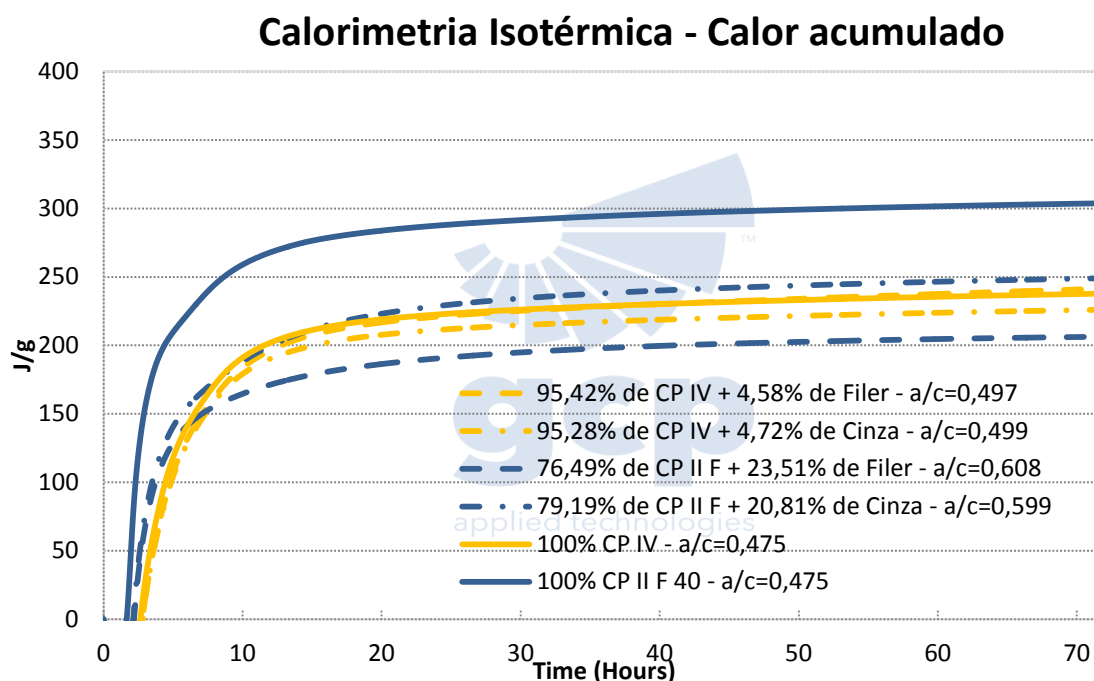
Fonte: Laboratório GRACE

Figura 12 - Gráfico do calor de hidratação com temperatura de 60 °C



Fonte: Laboratório GRACE

Figura 13 - Gráfico do calor de hidratação com temperatura de 80°C



Fonte: Laboratório GRACE

Através das figuras anteriores é possível notar que o comportamento em 20°C e 40°C são muito semelhantes entre si e com o sistema semi-adiabático. Onde temos, do traço com maior calor gerado até o com o menor calor gerado: CP II F 40, CP II F 40 + Filer, CP II F 40 + Cinza, CP IV, CP IV + Filer, CP IV + Cinza.

À medida que a temperatura é elevada, o comportamento se altera. Ao atingir a temperatura de 60°C, começa a ocorrer uma pequena variação, onde, do maior para o menor aquecimento, tem-se: CP II F 40, CP II F 40 + Cinza, CP IV, CP II F 40 + Filer e CP IV + Cinza e + Filer com praticamente a mesma temperatura. Neste ponto, os cimentos com cinza volante começam a apresentar uma maior liberação de calor.

Quando se atinge 80°C no calorímetro, observa-se uma alteração considerável de valores, onde tem-se, do maior para o menor calor de hidratação: CP II F 40, CP II F 40 + Cinza, CP IV + Filer, CP IV, CP IV + Cinza e CP II F 40 + Filer.

Nota-se que com 80°C, o traço com o menor calor gerado é o CP II-F-40 com adição de filer, o que até então não havia ocorrido, já que o filer é menos reativo que a cinza volante, pois apresenta um grau de pozolanicidade, enquanto o filer é inerte.

Como comprovado no ensaio de atividade pozolânica da cinza volante utilizada, onde o resultado determinado pelo teor de óxido de cálcio fixado pelo Método de Chapelle Modificado, obteve 441,27 mg de Ca(OH)_2 / g de material, portanto apresenta atividade pozolânica considerável já que resultou em um valor maior que 436 mg/g cinza volante, conforme RÊGO (2015) apud. SALUM (2016). Então a cinza volante utilizada no estudo é caracterizada como um material pozolânico.

Logo, quando são atingidas temperaturas mais elevadas (em torno de 80 °C) no concreto, as reações pozolânicas e as reações de hidratação do cimento são aceleradas. Então o cimento CP IV pode não se tornar a escolha mais atrativa, sendo necessário um estudo mais detalhado para cada caso.

4.3. Eficiência e custo dos concretos

Para esta análise, tomou-se por base os resultados obtidos através do calorímetro semi-adiabático.

Analisando-se a eficiência de cada traço, ou seja, a quantidade necessária de cimento para se atingir 1 Mpa, conforme Tabela 26, a seguir, conclui-se que o traço de CP IV-32-RS com cinza volante, apesar de não apresentar a melhor eficiência de Kg de cimento/MPa, quando inserida a temperatura obtida, ele apresenta a mais baixa relação de máxima temperatura atingida em relação a eficiência do traço, com 3,93 °C/Kg de cimento/MPa.

Tabela 26 - Temperatura do concreto de acordo com a eficiência do traço

Estudo	Cimento (Kg)	Adição (Kg)	R28 máximo (MPa)	Aglomerante/ MPa	Cimento/ MPa	Temp. máx. (°C)	Temp/Eficiencia (°C/Kg/MPa)
CP IV 32	400	0	51,2	7,82	7,82	38,7	4,95
CP IV 32 + FILLER	382	18	46,8	8,55	8,16	38,1	4,67
CP IV 32 + CINZA	381	19	41,7	9,59	9,14	35,9	3,93
CP II F 40	400	0	55,9	7,15	7,15	44,9	6,28
CP II F 40 + FILLER	306	94	41,4	9,67	7,39	44,3	6,00
CP II F 40 + CINZA	317	83	48,6	8,22	6,52	43,8	6,73

Complementando os objetivos do referente trabalho, buscou-se os custos de cada material que compõe o traço, tendo por base os valores praticados em Blumenau/SC.

Tabela 27 - Relação dos custos de cada material

Material	Fornecedor - Local	Preço (R\$/T)
Cimento CP II-F-40	Votorantim - Rio Branco/PR	R\$ 316,00
Cimento CP IV-32-RS	Votorantim - Itajaí/SC	R\$ 300,00
Filer Calcário	Calwer Mineração - Botuverá/SC	R\$ 40,00
Cinza Volante	Candiota/RS	R\$ 115,00
Areia Natural	Dona Otília - Araquari/SC	R\$ 32,00
Areia Artificial	Calwer Mineração - Botuverá/SC	R\$ 30,00
Brita 1	Ouro Preto Mineração - Pomerode/SC	R\$ 25,00
Brita 0	Ouro Preto Mineração - Pomerode/SC	R\$ 25,00
Água	Rede de abastecimento local	-
Aditivo inibidor de hidratação	Grace	R\$ 2,50
Aditivo superplastificante	Grace	R\$ 5,50

Através destas informações, é possível determinar o custo de cada traço, conforme Tabela 28.

Tabela 28 - Custo de cada traço por metro cúbico

Tipo de cimento/adição	Custo (R\$/m³)
CP IV 32	R\$ 186,10
CP IV 32 + 4,58% DE FILER CALCÁRIO	R\$ 181,46
CP IV 32 + 4,72% DE CINZA	R\$ 182,43
CP II F 40	R\$ 192,95
CP II F 40 + 23,51% DE FILER CALCÁRIO	R\$ 166,76
CP II F 40 + 20,81% DE CINZA	R\$ 175,23

Uma outra avaliação também se julga necessária, que seria o custo de cada traço por resistência, como mostra a Tabela 29.

Tabela 29 - Custo de cada traço por MPa

Tipo de cimento/adição	R28 máximo (MPa)	Custo (R\$/MPa)
CP IV 32	51,2	R\$ 3,64
CP IV 32 + 4,58% DE FILER CALCÁRIO	46,8	R\$ 3,88
CP IV 32 + 4,72% DE CINZA	41,7	R\$ 4,37
CP II F 40	55,9	R\$ 3,45
CP II F 40 + 23,51% DE FILER CALCÁRIO	41,4	R\$ 4,03
CP II F 40 + 20,81% DE CINZA	48,6	R\$ 3,60

Tabela 30 – Eficiência de custo e temperatura do concreto

Estudo	R28 máximo (MPa)	R\$/MPa	Temp. máx. (°C)	Temp/Eficiencia (°C/R\$/MPa)
CP IV 32	51,2	R\$ 3,64	38,7	10,64
CP IV 32 + 4,58% FILER	46,8	R\$ 3,88	38,1	9,82
CP IV 32 + 4,72% CINZA	41,7	R\$ 4,37	35,9	8,21
CP II F 40	55,9	R\$ 3,45	44,9	13,02
CP II F 40 + 23,51% FILLER	41,4	R\$ 4,03	44,3	11,00
CP II F 40 + 20,81% CINZA	48,6	R\$ 3,60	43,8	12,17

Com relação ao custo financeiro absoluto, nota-se que o traço mais econômico é de CP II-F-40 com filer, atingindo R\$ 166,76/m³ (conforme Tabela 28), porém, quando inserida a máxima temperatura obtida nesta análise, obtem-se

o traço economicamente mais eficiente sendo o de CP IV-32-RS com cinza volante com o índice de 8,21 °C/R\$/Mpa, conforme Tabela 30.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos na área.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de verificar a influência de adição de cinza volante ou filer calcário no calor de hidratação do concreto autoadensável para grandes volumes foi viabilizada através do estudo da bibliografia disponível, da aplicação das normas técnicas vigentes e dos estudos experimentais em traços de concreto no laboratório.

A dispersão de resultados, alteração de materiais constituintes do concreto durante o estudo e as deficiências construtivas do calorímetro onde estas medições foram realizadas pode ter influenciado no resultado final. Percebe-se que novos estudos mais eficientes devem ser realizados, obtendo-se resultados mais precisos e confiáveis.

De acordo com a Revisão Bibliográfica apresentada e conforme o referido estudo realizado em concreto, percebe-se que quando é necessário um controle de temperatura mais rigoroso, os traços com cimentos compostos ou pozolânicos, com adição complementar de cinza volante ou filer calcário, de acordo com a aplicação e requisitos específicos de cada projeto, tem maior possibilidade de utilização.

Considerando os resultados obtidos, em relação a máxima temperatura atingida pelo concreto em cada traço, sua eficiência em consumo de cimento pela resistência característica atingida e ao custo financeiro, conclui-se que o traço de cimento CP IV-32-RS com substituição de 4.72% de cinza volante, apresentou o melhor desempenho em temperatura ambiente.

Contudo, quando submetidos a elevadas temperaturas, próximas de 80°C, o comportamento se altera devido a pozolanicidade da cinza, que reage elevando o calor de hidratação. Favorecendo, neste caso, os traços e cimento com adições inertes como o CP II-F-40 e filer calcário.

Como atualmente não há um consenso sobre a máxima temperatura que o concreto possa atingir sem que haja problemas decorrentes do calor de hidratação que ocasione patologias favorecendo uma perda de durabilidade ou degradação, como garantia adicional, a utilização de cimentos e adições que provoquem menor calor de hidratação são os mais recomendados, sendo necessário a realização de um estudo térmico do concreto a ser utilizado com os materiais constituintes disponíveis no local, de acordo com cada projeto e suas características.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, a seguir, proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

Primeiramente, seria necessário a realização do estudo mantendo-se os mesmos materiais empregados na formulação dos traços, sem alterações de lotes, como ocorrido no referente trabalho.

Reformulação dos traços com diferentes percentuais de adições dos que foram adotados neste trabalho, a fim de se obter pontos interpolados e não extrapolados como os que foram obtidos.

Também, recomenda-se que as resistências obtidas nos seis traços finais, tenham um valor de resistência média à compressão (f_{cj}) muito próximo, a fim de que as comparações realizadas na temperatura e calor de hidratação sejam sob mesmas condições de eficiência de traço em relação à mesma resistência característica à compressão (f_{ck}).

Levando-se em consideração a utilização deste estudo na prática do dia-a-dia das construções seria importante, também, realizar dosagens com menor consumo de cimento que possam atender as necessidades de resistência do projeto sem gerar altas taxas de calor de hidratação e, adicionalmente, realizar ensaios com menores temperaturas iniciais de aplicação do concreto, com utilização de gelo, por exemplo. Itens estes que são comumente utilizados em nossas construções com concreto massa.

Com isso, obteriam-se resultados mais precisos e confiáveis para uma tomada de decisão fundamentada para cada projeto e aplicação prática a que os profissionais da construção deparam-se habitualmente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – **Quais os tipos de cimento Portland?** Disponível em:

<http://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/quais-sao-os-tipos-de-cimento-portland/>. Acesso em 28/07/2016 às 21:00.

ABESC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. **As Tecnologias do Concreto Dosado em Central**. São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023 – Informação e Documentação: Referência- Elaboração**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578 - Cimento Portland composto** – Especificações. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1:** Concreto autoadensável. Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2:** Concreto autoadensável. Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3:** Concreto autoadensável. Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4:** Concreto autoadensável. Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5:** Concreto autoadensável. Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-6:** Concreto autoadensável. Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2012.

GOMES, PAULO CÉSAR CORREIA; BARROS, ALEXANDRE RODRIGUES. **Métodos de dosagem de Concreto Autoadensável.** São Paulo: Pini, 2009.

IBRACON, Instituto Brasileiro do Concreto. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de matérias** – Volume 1. São Paulo, 2010.
REPETTE, W. L. **Concreto Autoadensável – Características e Aplicação.** Disponível em <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/135/concreto-auto-adensavel-caracteristicas-e-aplicacao-285721-1.aspx>. Acesso em 12/07/2016 às 11 horas.

KUPERMAN, SELMO. Apostila IDD, Disciplina: **Tecnologia do Concreto Massa.** Florianópolis, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MELO, SANDRA KUROTUSCH. **Estudo da Formação da Etringita Tardia em Concreto por Calor de Hidratação do Cimento.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

NEVILLE, ADAM MATTEW. **Propriedades do Concreto.** São Paulo: Pini, 1997.

SALUM, PAULA DE LIMA. **Efeito da Elevação de Temperatura Sobre a Resistência à Compressão de Concretos Massa com Diferentes Teores de**

Cinza Volante. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

TOCHETTO, EDUARDO. **Dosagem e Estudo da Evolução da Temperatura de Concreto Massa Destinado à Confeção de Blocos de Fundação.** TCC (Graduação de Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TUTUKIAN, BERNARDO FONSECA; MOLIN, DENISE CARPENA DAL. **Concreto Autoadensável**, 2ª edição. São Paulo: Pini, 2015.

QUARCIONI, VALDECIR ANGELO; CINCOTTO, MARIA ALBA. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta.** Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2008.

GOMES, FLÁVIO MAMEDE PEREIRA. **Concreto nas primeiras idades: propriedades e modelagem termomecânica simplificada.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiás, 2011.

7. ANEXOS