UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE E DE ADIÇÃO MINERAL NO COMPORTAMENTO TERMO-MECÂNICO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Marcelo Veronez

Vitória − ES
Setembro de 2006

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE E DE ADIÇÃO MINERAL NO COMPORTAMENTO TERMO-MECÂNICO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Marcelo Veronez

Orientador:

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

Vitória − ES
Setembro de 2006

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Veronez, Marcelo, 1976-

V549e Estudo da influência do tipo de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termo-mecânico dos concretos de alto desempenho / Marcelo Veronez. – 2006.

214 f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Análise térmica. 2. Concreto de alta resistência. 3. Concreto - Aditivos. I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE E DE ADIÇÃO MINERAL NO COMPORTAMENTO TERMO-MECÂNICO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Marcelo Veronez

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em _____ por:

Substituir pela folha do Termo de Aprovação

_____

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama − Orientador, UFES

_____

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho − Examinador Externo, UFRGS

_____

Prof. Dr. Luis Carlos Machado − Examinador Externo, UFES

_____

Prof. Dr. Ing. Marcel Olivier Ferreira de Oliveira − Examinador Interno, UFES

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Este trabalho é dedicado ao meu pai Valdir Veronez e a minha mãe Leida Maria Renon Veronez, em agradecimento pelo apoio e incentivo que sempre me deram em meus estudos mesmo sem terem a noção exata do que eu estive fazendo e de onde eu queria chegar. Ainda, sou eternamente grato aos dois pelo conforto que me deram quando tomei uma das mais difíceis decisões da minha vida que foi de optar viver os últimos dois anos exclusivamente em função deste trabalho em face de minha iniciante carreira profissional como Engenheiro Civil.

AGRADECIMENTOS

Nas páginas adiante estão registrados os trabalhos de minha pesquisa de mestrado. Não foi nem um pouco fácil, mas ao fim de pouco mais de dois anos, penso que talvez tenha chegado onde deveria, ou onde poderia. De qualquer forma, foi muito duro tentar me especializar em pesquisa numa área da Engenharia não ensinada nos cursos de graduação, e que naturalmente, não tive contato em meus anos de escola de Engenharia. E foi nesta difícil situação que o professor Calmon, sempre feroz, com suas conversas fez conferir onipresença alterando todo o panorama, algumas vezes. Querendo que tudo passe por ele, que tudo ele influencie, querendo estar em todos os lugares. Devo dizer-lhe que este trabalho foi escrito com paixão e vontade e se nas páginas seguintes há mais disso que daquilo, isso se deve puramente a minha convicção como autor de que ao menos esta parte da pesquisa é por minha conta e deve refletir os meus pensamentos e deve seguir aos meus padrões e aos meus limites.

Eu concordo que a vida é feita de oportunidades, no entanto, não me considero o tipo de pessoa que se aproveita de uma boa oportunidade como se ela fosse a última. Nunca passaria por cima, nunca pisaria em alguém (ao menos conscientemente...). Assim, gostaria de agradecer ao professor Calmon do fundo de meu coração por esta ótima oportunidade que me foi dada de penetrar no centro dos pesquisadores e dos profissionais brasileiros de ponta na área em que pesquisei. Mais ainda, na verdade, agradeço por ter me dedicado alguns anos de sua amizade! Este trabalho deve sua existência também à generosidade dos engenheiros Moacir Andrade e Rubens Bittencourt, chefe do Laboratório de Concreto e diretor do Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas S. A. na cidade de Aparecida de Goiânia, estado de Goiás. Foram eles que possibilitaram esta pesquisa com a manutenção do convênio entre NDCC/DEC/CT/UFES e DCT.T/FURNAS.

É verdade, este trabalho não teria sido possível sem o apoio do amigo Sérgio Botassi, batalhador na condução dos experimentos desenvolvidos em Goiás. Agradeço a sua disposição de aprendermos juntos os procedimentos de dosagem de CAD com o Método de Furnas, aos ensinamentos de cálculo termo-mecânico e principalmente por compartilharmos nossas vidas tão de perto no período em que realizamos os experimentos. No Centro Tecnológico de Furnas em Aparecida de Goiânia, ainda, agradeço as dicas, as broncas e as amizades dos engenheiros do Laboratório de Concreto: Alexandre Fonseca, Flávio, Alfredo e Gambale, dos técnicos da sala de dosagem Eucir, Sílvio, Fernando,

Jeguinho, Careca e Acelino e do Laboratório de ensaios especiais Zito e Gilberto; e do estagiário da Universidade Federal de Goiás, Gabriel. Ainda, de Rodrigo Calixto, Pedro e dos demais colegas do DCT.T que também conviveram conosco por algum tempo.

Este trabalho certamente teria sido muito mais difícil se não fosse a presença do secretário do PPGEC, Wilton Drumond que, talvez, por ter passado pela mesma situação, assim me o fez bem mais fácil. Ao aluno de graduação e estagiário do PPGEC, James, pela ajuda no laboratório de informática e a todos os colegas de mestrado que compartilharam as vitórias e as derrotas: Ronaldo, Marita, Macksuel, Fernanda, Sandra, Mirko e outros com os quais tive pouco contato, agradeço de coração.

Agora, estou plenamente convencido de que este trabalho está encerrado e, finalmente, agradeço sinceramente aos meus pais e a todos os meus amigos que, em minhas faltas, entenderam os diligentes esforços no sentido de transformar meus primeiros rascunhos de projeto de pesquisa nesta dissertação de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS ..... **xii**

LISTA DE FIGURAS ..... **xiii**

LISTA DE TABELAS ..... **xvi**

RESUMO ..... **xvii**

ABSTRACT ..... **xix**

1. INTRODUÇÃO **1**

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 2

1.2. A PROBLEMÁTICA EM ESTUDO 4

1.3. ABRANGÊNCIA DO ESTUDO 9

1.3.1. A Situação da Pesquisa Estrangeira 9

1.3.2. A Situação da Pesquisa Nacional 10

1.4. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA 10

1.4.1. A Importância Técnica da Pesquisa 10

1.4.2. As Importâncias Econômica e Estratégica da Pesquisa 11

1.5. OBJETIVOS E HIPÓTESES 11

1.5.1. Objetivo Geral 11

1.5.2. Objetivos Específicos 11

1.5.3. Hipóteses de Pesquisa 12

1.6. LIMITAÇÕES DO ESTUDO 13

1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 14

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **16**

2.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO 17

2.1.1. Os Materiais Constituintes 18

2.1.2. As Propriedades do Concreto de Alto Desempenho 27

2.1.3. Durabilidade 30

2.1.4. As Perspectivas de Utilização do Concreto de Alto Desempenho 31

2.2. O PAPEL DOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES NO CAD 32

2.2.1. Motivação Para o Uso de Aditivos Superplastificantes 32

2.2.2. Histórico dos Aditivos Superplastificantes 34

2.2.3. Mecanismos de Ação 38

2.2.4. A Normalização dos Aditivos Superplastificantes 42

2.2.5. A Hidratação do Cimento na Presença de Superplastificantes 43

2.2.6. A Influência dos Superplastificantes nas Propriedades do Concreto 46
2.2.7. A Dosagem dos Aditivos Superplastificantes no Concreto..... 50
2.3. O PAPEL DAS ADIÇÕES MINERAIS NO CAD 52
2.3.1. O Papel das Adições Minerais..... 53
2.3.2. Histórico das Adições Minerais..... 53
2.4. O PROBLEMA TÉRMICO E TENSIONAL NO CONCRETO 59
2.4.1. O Calor de Hidratação do Cimento 59
2.4.2. A Geração de Calor Ambiental 65
2.4.3. Propriedades Térmicas do Concreto..... 66
2.4.4. O Fluxo de Calor no Concreto..... 68
2.4.5. O Problema Tensional no Concreto 70
2.5. O ESTUDO TERMO-MECÂNICO..... 71
2.5.1. Estudo do Campo de Temperatura e do Campo de Tensão..... 72
2.5.2. O Conceito de Segurança de Risco de Fissuração..... 77
2.6. A MODELAGEM PARA O PROBLEMA TERMO-MECÂNICO 78
2.6.1. Programas Computacionais de Análise Termo-Mecânica 79
2.7. O ESTUDO termo-mecânico DO CAD 84
2.7.1. A Característica Multidisciplinar do Estudo Termo-Mecânico..... 84
2.7.2. As Características Típicas do CAD e o Estudo Termo-Mecânico 86
2.7.3. Estudos Termo-Mecânicos Já Realizados em Estruturas de CAD 87
3. METODOLOGIA E PROGRAMA EXPERIMENTAL 88
3.1. ANÁLISE GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL..... 88
3.1.1. A Seleção do Material Utilizado 89
3.1.2. O Programa Experimental Piloto..... 89
3.1.3. O Programa Experimental Principal..... 89
3.1.4. A Análise Termo-Mecânica 89
3.2. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DA PESQUISA 89
3.2.1. Variáveis Independentes..... 90
3.2.2. Variáveis Dependentes 90
3.2.3. Variáveis de Controle 91
3.2.4. Variáveis Não Controladas (Intervenientes): 92
3.3. VISÃO GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL..... 93
3.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO..... 97
3.5. A SELEÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO 97
3.5.1. Considerações Gerais 97

3.5.2. Caracterização dos Materiais 97
3.6. O PROGRAMA EXPERIMENTAL LABORATORIAL PILOTO 106
3.6.1. Considerações Gerais 106
3.6.2. Compatibilidade Cimento-Aditivo 106
3.6.3. O Estudo de Dosagem dos Traços de CAD 107
3.7. O PROGRAMA EXPERIMENTAL LABORATORIAL PRINCIPAL 108
3.7.1. Considerações Gerais 108
3.7.2. Métodos Experimentais 108
3.8. A ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS/MECÂNICAS 124
3.8.1. Propriedades Mecânicas 125
3.8.2. Propriedades Térmicas 125
3.9. ANÁLISE TERMO-MECÂNICA 125
3.9.1. Informações e Diretrizes Gerais do Estudo 125
3.9.2. Propriedades do Concreto 125
3.9.3. Discretização e Condições de Contorno do Domínio 126
3.9.4. Análise dos Resultados 126
3.9.5. Análise Final dos Resultados 127
3.9.6. Conclusão do Estudo Termo-Mecânico 127

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 128
4.1. CONSIDERAÇÃO INICIAL 128
4.2. ANÁLISE DO PROGRAMA EXPERIMENTAL LABORATORIAL 129
4.2.1. Considerações Gerais 129
4.2.2. Ensaios no Concreto Fresco 129
4.2.3. Ensaios no Concreto Endurecido 130
4.2.4. Ensaios Especiais no Concreto 135
4.3. A ANÁLISE TERMO-MECÂNICA 144
4.3.1. Informações e Diretrizes Gerais do Estudo 144
4.3.2. Estudo de Dois Pilares em CAD com Diferentes Tipos de Aditivo 147
4.3.3. Estudo de Dois Pilares em CAD com Diferentes Tipos de Adição 158
4.3.4. Conclusão do Estudo Termo-Mecânico 166

5. CONCLUSÕES 167
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 168
5.2. CONCLUSÃO GERAL 168
5.3. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS 168
5.3.1. Conclusões Quanto à Utilização de Adições Minerais 168

5.3.2. Conclusões Quanto a Utilização de Aditivos Superplastificantes..... 170
5.4. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 173
5.4.1. Utilização de Adições Minerais no CAD 173
5.4.2. Utilização de Aditivos Superplastificantes no CAD 173
5.4.3. Combinações Adições Minerais-Aditivos Superplastificantes 173
5.4.4. Modelagem Termo-Mecânica de Estruturas em CAD 174
5.4.5. Estudo Termo-Mecânico de Estruturas Típicas em CAD 174
6. BIBLIOGRAFIA 175
6.1. BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA..... 175
6.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA..... 190
6.3. BIBLIOGRAFIA DE NORMAS..... 191

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARI	Alta Resistência Inicial
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing Materials
BHP	Béton à Hautes Performances
CAA	Concreto Auto-Adensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CANMET	Canadian Centre for Mineral and Energy Technology
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAR	Concreto de Alta Resistência
CEB	Comité Euro-Internacional du Béton
COBRACON	Congresso Brasileiro do Concreto
CT	Centro Tecnológico
DCT.T	Departamento de Apoio e Controle Técnico
DEC	Departamento de Engenharia Civil
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S. A.
FEM	Finite Element Method
FEST	Fundação Espírito Santense de Tecnologia
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S. A.
HPC	High-Performance Concrete
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEC	Método dos Elementos de Contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira Registrada
NDCC	Núcleo de Desenvolvimento em Construção Civil
NIST	National Institute of Standards and Technology
PFEM	Program of Finite Element Method
PPGEC	Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Constructions et Ouvrages
SP	Aditivo Superplastificante (Superplasticizer)
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UR	Umidade Relativa

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Gráfico típico de calor de hidratação de cimento Portland (TAYLOR, 1967; LEA, 1972) 4

Figura 1-2 – Temperatura no centro de uma estrutura de concreto (SANTOS, 2004)..... 5

Figura 1-3 – Margem de segurança na análise de tensões de uma estrutura de concreto 6

Figura 1-4 – Hidratação de cimento com aditivo lignossulfonato (RIXON e MAILVAGANAM, 1990) 8

Figura 2-1 – Libertação de calor de hidratação do cimento (BREUGEL, 1991; MAEKAWA *et al*., 1999; BEEK, 2000; LURA, 2000) 21

Figura 2-2 – Produtos da hidratação do cimento Portland ao longo das três fases (BEEK, 2000) . 22

Figura 2-3 – Misturas equivalentes com superplastificantes (RIXON e MAILVAGANAM, 1999)33

Figura 2-4 – Curva de três pontos para dosagem de aditivo superplastificante (RIXON, 1998)..... 33

Figura 2-5 – Monômero de um lignossulfonato (RIXON e MAILVAGANAM, 1999)..... 35

Figura 2-6 – Monômero de um naftaleno (RAMACHANDRAN, 1995; RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1998; RIXON e MAILVAGANAM, 1999) 36

Figura 2-7 – Monômero de um policarboxilato (RAMACHANDRAN et *al*., 1998) 37

Figura 2-8 – Interações entre cimento Portland, sulfato de cálcio e aditivos (JOLICOEUR *et al*., 1994) 38

Figura 2-9 – Efeito da defloculação dos grãos de cimento (AÏTCIN et al., 1994)..... 39

Figura 2-10 – Mecanismo de repulsão eletrostática (COLLEPARDI *et al*., 1999)..... 40

Figura 2-11 – Formação da dupla camada elétrica e do potencial zeta (UCHIKAWA *et al*., 1997) 41

Figura 2-12 – Influência da melamina na hidratação do C_3A (RIXON e MAILVAGANAM, 1999) 45

Figura 2-13 – Influência da melamina na hidratação do C_3S (RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1998) 45

Figura 2-14 – Perda de abatimento dos tipos de aditivo superplastificante (RIXON e MAILVAGANAM) 47

Figura 2-15 – Perda de abatimento em diferentes temperaturas (RONCERO, 2000)..... 48

Figura 2-16 – Resistência à compressão de concretos superplastificados (LEIDHODT *et al*., 2000) 49

Figura 2-17 – Taxa de calor liberado para misturas de cimento e sílica ativa (PINTO, 1997) 56

Figura 2-18 – Calor de hidratação em misturas de sílica ativa e metacaulim (ZHANG e MALHOTRA, 1995)..... 58

Figura 2-19 – Efeito da utilização de SP na elevação adiabática do CAD (CALMON *et al*., 2005a) 63

Figura 2-20 – Efeito da a/c em pastas no calor total liberado aos 3 dias (ZHANG *et al*., 2002)..... 64

Figura 2-21 – Calor de hidratação em pastas com diferentes a/c (ERN, 2002) 64

Figura 2-22 – Padrão típico da variação da temperatura ambiental 65

Figura 2-23 – Padrão típico da variação da radiação solar (CALMON *et al*., 2002)..... 66

Figura 2-24 – Temperatura no interior de um pilar de concreto 67

Figura 2-25 – Tensões desenvolvidas no interior de um pilar 71
Figura 2-26 – Campo de temperatura na seção de um pilar: (a) 1 hora; (b) 12 horas 74
Figura 2-27 – Campo de temperatura na seção de um pilar: (a) 20 horas; (b) 72 horas 75
Figura 2-28 – Campo de tensão na seção de um pilar: (a) 1 hora; (b) 72 horas 76
Figura 2-29 – Desenvolvimento de tensão e do C. S. no centro de um pilar 77
Figura 2-30 – Resolução do problema térmico pelo PFEM_2DT (Adaptado de Santos (2004)) 82
Figura 2-31 – Resolução do problema tensional pelo PFEM_2DT (Adaptado de Santos (2004)) .. 83
Figura 2-32 – Modelo de análise do risco de fissuração adotado nesta pesquisa 85
Figura 3-1 – Divisão do programa experimental da pesquisa 93
Figura 3-2 – Resumo dos ensaios do programa experimental − bateria de sílica ativa 95
Figura 3-3 – Resumo dos ensaios do programa experimental − bateria de metacaulim 96
Figura 3-4 – Perda de abatimento dos aditivos no programa experimental piloto 106
Figura 3-5 – Betoneira e fôrmas para ensaios mecânicos e térmicos 111
Figura 3-6 – Mistura dos materiais em betoneira 111
Figura 3-7 – Adição dos aditivos superplastificantes lignossulfonato e naftaleno 112
Figura 3-8 – Adição do aditivo superplastificante policarboxilato ao concreto 112
Figura 3-9 – CAD com metacaulim e mistura de aditivos no estado fresco 114
Figura 3-10 – Moldagem dos corpos de prova 115
Figura 3-11 – Desmoldagem dos corpos de prova 116
Figura 3-12 – Ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson 118
Figura 3-13 – Moldagem do corpo de prova e preparação do calorímetro 120
Figura 3-14 – Comparação entre resultados dos dois calorímetros utilizados 121
Figura 3-15 – Ensaio de calor específico 122
Figura 3-16 – Ensaio de condutividade térmica 123
Figura 3-17 – Ensaio de fluência de duas misturas de CAD 124
Figura 4-1 – Resistências à compressão até os 7 dias (a) e 91 dias (b) 131
Figura 4-2 – Módulos de ruptura até os 7 (a) e 28 (b) dias 132
Figura 4-3 – Módulos de elasticidade até os 7 (a) e 28 (b) dias 133
Figura 4-4 – Coeficientes de Poisson até os 7 (a) e 28 (b) dias 134
Figura 4-5 – Elevação adiabática de temperatura dos CAD com naftaleno 136
Figura 4-6 – Elevação adiabática de temperatura dos CAD com policarboxilato 137
Figura 4-7 – Elevação adiabática de temperatura dos CAD com combinação de aditivos 138
Figura 4-8 – Elevações adiabáticas de temperatura dos CAD com sílica ativa 139
Figura 4-9 – Elevações adiabáticas de temperatura dos CAD com metacaulim 140
Figura 4-10 – Elevações adiabáticas de temperatura dos CAD com sílica ativa (2° Lote) 141
Figura 4-11 – Fluência específica: CAD com policarboxilato e sílica ativa 142
Figura 4-12 – Fluência específica dos CAD com policarboxilato 143

Figura 4-13 – Seção estudada das estruturas típicas em CAD selecionadas 144
Figura 4-14 – Discretização em elementos finitos das seções estudadas 145
Figura 4-15 – Temperatura ambiental do mês de junho/julho - Goiânia-GO 146
Figura 4-16 – Temperatura nos centros dos pilares em CAD com sílica ativa 148
Figura 4-17 – Temperatura nas bordas dos pilares em CAD com sílica ativa 149
Figura 4-18 – Diferenças de temperatura centro-borda dos pilares com sílica ativa 149
Figura 4-19 – Temperatura ao longo dos eixos das seções dos pilares 150
Figura 4-20 – Campo de temperatura no momento de pico no centro 151
Figura 4-21 – Tensões na coluna com sílica ativa e aditivo tipo policarboxilato 153
Figura 4-22 – Tensões na coluna com sílica ativa e aditivo tipo naftaleno 153
Figura 4-23 – Tensão na seção estudada no momento de C. S. mínimo no centro 155
Figura 4-24 – C. S. nos centros dos pilares com sílica ativa e policarboxilato/naftaleno 156
Figura 4-25 – C. S. nas bordas dos pilares com sílica ativa e policarboxilato/naftaleno 156
Figura 4-26 – Temperatura nos centros dos pilares com sílica ativa e metacaulim 158
Figura 4-27 – Temperatura nas bordas dos pilares com sílica ativa e metacaulim 159
Figura 4-28 – Diferenças de temperatura centro-borda 160
Figura 4-29 – Campos de temperatura dos pilares 161
Figura 4-30 – Tensões nos centros e bordas dos pilares com sílica ativa 162
Figura 4-31 – Tensões nos centros e bordas dos pilares com metacaulim 163
Figura 4-32 – C. S. dos pilares com sílica ativa e metacaulim: Centro 164
Figura 4-33 – C. S. dos pilares com sílica ativa e metacaulim: Borda 164

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Composição dos elementos do clínquer (LEA, 1971; MEHTA e MONTEIRO, 1994) 19
Tabela 2-2 – Classes de CAD pela resistência à compressão (AÏTCIN, 2000a)..... 28
Tabela 2-3 – Classificação dos aditivos superplastificantes segundo a NBR 11768 (ABNT, 1992)43
Tabela 2-4 – Independência da água para a trabalhabilidade (PEIWEI *et al*., 2001)..... 46
Tabela 2-5 – Efeito do modo de adição no abatimento (COLLEPARDI *et al*., 1999)..... 51
Tabela 2-6 – Composição típica do metacaulim de alta reatividade (MALHOTRA e MEHTA, 1996) 56
Tabela 2-7 – Calor de hidratação dos cimentos no Brasil (ERN, 2002) 60
Tabela 2-8 – Participação dos constituintes do cimento na geração de calor (PAULON, 1987)..... 60
Tabela 2-9 – Propriedades térmicas do concreto (EQUIPE DE FURNAS, 1997)..... 68
Tabela 2-10 – Resumo dos parâmetros de entrada do programa PFEM_2DT (SANTOS, 2004).... 80
Tabela 2-11 – Resumo dos parâmetros de entrada do programa PFEM_2D AT (SANTOS, 2004) 81
Tabela 3-1 – Caracterização do cimento Portland..... 98
Tabela 3-2 – Caracterização da sílica ativa 99
Tabela 3-3 – Caracterização do metacaulim 100
Tabela 3-4 – Caracterização dos aditivos superplastificantes 104
Tabela 3-5 – Caracterização dos agregados 105
Tabela 3-6 – Traço de CAD do estudo piloto, em (kg/m³) 108
Tabela 3-7 – Dosagem detalhada de aditivos superplastificantes, em (kg/m³) 109
Tabela 3-8 – Custos percentuais dos componentes dos CAD 109
Tabela 3-9 – Custos diretos de produção dos CAD (R$/m^3)..... 110
Tabela 4-1 – Valores determinados para as propriedades físicas..... 129
Tabela 4-2 – Valores determinados para as propriedades mecânicas 130
Tabela 4-3 – Valores determinados para as propriedades térmicas 135
Tabela 4-4 – Funções das temperaturas ambientais da cidade de Goiânia-GO..... 146
Tabela 4-5 – Dados das análises termo-mecânicas: maiores tensões e menores C. S..... 157
Tabela 4-6 – Dados das análises termo-mecânicas: menores C. S. nas 168 horas..... 165

Veronez, M. 2006. **Estudo da Influência do Tipo de Aditivo Superplastificante e de Adição Mineral no Comportamento Termo-Mecânico dos Concretos de Alto Desempenho**. 214p. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, Espírito Santo.

Marcelo Veronez[1]

RESUMO

A fissuração das estruturas de concreto nas primeiras idades pode ocorrer devido às movimentações induzidas pelas variações de temperatura decorrentes do efeito combinado da hidratação do material cimentício, da temperatura ambiental, da radiação solar e da existência de cargas térmicas excepcionais atuantes durante o estágio de endurecimento. Estas fissuras não têm caráter decisivo para determinação da capacidade de carga admitida no processo de projeto estrutural das estruturas correntes, mas podem causar altos custos de reparo e reduzir sensivelmente a vida útil das mesmas.

O risco de fissuração associado a uma estrutura de concreto é avaliado por valores de coeficientes de segurança que podem ou não ser parte de códigos de obra ou de procedimentos de execução. Estes coeficientes são determinados a partir de simulações que buscam reproduzir as situações reais de uso, utilizando-se da caracterização do material, da geometria da estrutura, dos procedimentos de execução e da exposição ambiental.

Nesta dissertação são apresentados (1) estudos experimentais com o material concreto de alto desempenho e (2) estudos computacionais de simulação de estruturas típicas utilizando concreto de alto desempenho. Estes estudos visam contribuir ao conhecimento da influência dos tipos de aditivos superplastificantes e de adições minerais no comportamento termo-mecânico de estruturas típicas em concreto de alto desempenho, uma vez que estas duas questões podem ser consideradas como "chave" na produção destes tipos de concreto e, em grande parte, dos concretos produzidos na atualidade.

Experimentos laboratoriais foram realizados utilizando aditivos do tipo lignossulfonato, naftaleno e policarboxilato, e com misturas de dois tipos de aditivos (base naftaleno e policarboxilato). Metacaulim e sílica ativa foram utilizados como materiais cimentícios suplementares. Foram analisadas diversas propriedades que influenciam no estudo termo-mecânico: resistência à compressão e tração na flexão, módulo de elasticidade, fluência, coeficiente de dilatação térmica, calor específico, condutividade/difusividade térmica, elevação adiabática de temperatura e calor de hidratação.

[1] Engenheiro Civil, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.

Simulações de pilares utilizando alguns dos concretos de 80 MPa estudados foram realizadas utilizando-se programas computacionais de análise termo-mecânica de estruturas de concreto. Em vários cenários de análise, a sensibilidade do modelo computacional de análise adotado foi investigada ao se utilizar concreto de alto desempenho, e comparadas as efetivas influências destes fatores "chave" de produção no comportamento termo-mecânico.

Ao final, concluiu-se que as estruturas em CAD foram sensíveis tanto às variações dos tipos quanto aos lotes de aditivo superplastificante, do ponto de vista termo-mecânico, podendo-se encontrar uma estrutura em fase de construção dentro e outra fora de um quadro de provável fissuração. Concluiu-se, ainda, que houve um comportamento termo-mecânico mais favorável de estruturas utilizando sílica ativa que metacaulim como adição mineral. Este comportamento, no entanto se deveu ao desenvolvimento retardado das propriedades mecânicas dos concretos com metacaulim, e não ao desenvolvimento de tensões térmicas deletérias.

Palavras–chave: Análise termo-mecânica; Temperatura; Tensão; Aditivos Superplastificantes; Adições Minerais; Concreto de Alto Desempenho; Simulação.

Veronez, M. 2006. **Study of the Influence of the Superplasticizer and Mineral Admixture Type on the Thermal-Mechanical Behavior of the High-Performance Concretes**. 214p. Dissertation (Master's Degree) – Technological Center. Espírito Santo Federal University. Vitória, Espírito Santo. (In Portuguese)

Marcelo Veronez[2]

ABSTRACT

Cracking in concrete structures at the first ages of hardening can occur with its movements induced by the variations of temperature into the concrete mass due to the effect of the cement hydration, of the ambient temperature, the solar radiation and thermal loads during the period of hardening. These kinds of cracking are not decisive for the process of structural design of the current structures but they cause high costs of repair and they can significantly reduce the useful life of the same ones.

The cracking risk related with a concrete structure is evaluated by values of safety factors that can be (or not) part of building codes. These coefficients are determined from simulations that aim to reproduce the real situations of use, the geometry of the structure, the procedures of build and the ambient.

In this work, (1) experimental studies with high-performance concrete and (2) computational studies of simulation of typical structures using HPC are presented. These studies aim to contribute with the knowledge of the influence of the types of chemical admixtures (superplasticizers) and mineral admixtures on the thermal-mechanical behavior of typical HPC structures, as these two parts are considered as "key" parameters in the production of this type of concrete and, to a large amount of the concrete ones produced at the present time.

Laboratorial experiments had been carried through with HPC using lignossulfonate, naphthalene and polycarboxylate based admixtures, beyond mixture of two types of chemical admixtures (naphthalene and polycarboxylate based). Metakaolin and silica fume had been used as supplementary cementitious material. The HPC properties that influences on the thermal-mechanical problem were analyzed according to the technical procedures: strength resistance and modulus of rupture, modulus of elasticity, creep, coefficient of thermal expansion, specific heat, thermal conductivity/diffusivity, temperature of adiabatic rise, heat of hydration.

[2] Civil Engineer, he is student of the Espírito Santo Federal University Graduate Program in Civil Engineering.

Simulations of columns using some of the studied 80MPa-HPC had been carried through using computational programs of thermal-mechanical analysis of concrete structures. In these occasions, under some scenes of analysis, the sensitivity of the computational model of analysis adopted in these programs was investigated to use HPC, comparing the effective influences of these "key" parameters of HPC production on the thermal-mechanical behavior of the columns analyzed.

Finally, it can be concluded that the HPC structures had been sensible to the variations of the types and of the batches of superplasticizer admixtures, from the thermal-mechanical viewpoint, and it was possible to find the same structure under the construction stage exposed or not to a probable risk of cracking. It can be concluded, also, that silica fume had a more favorable thermal-mechanical behavior to the structures, when comparing with the use of metakaolin as mineral admixture. This better behavior, however, had been by the delayed developments of the mechanical properties of the HPC with metakaolin, and not by the developments of thermal stresses.

Key–words: Thermal Stress Analysis; Temperature; Stress; Superplasticizer Admixtures; Mineral Admixtures; High-Performance Concrete; Simulation.

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia do concreto no do Século XX, principalmente durante os anos 90, não somente obras experimentais ou grandes estruturas de concreto mas também estruturas pouco sofisticadas começaram a ser construídas utilizando-se misturas de concreto que se caracterizavam pela utilização de uma elevada quantidade de cimento Portland, por uma reduzida quantidade de água e pela utilização de adições minerais e aditivos em altas doses, em comparação direta com os concretos utilizados rotineiramente (AÏTCIN e NEVILLE, 1993; MEHTA & MONTEIRO 1994; RUSSEL, 1999; AÏTCIN, 2000a).

No Brasil, o CAD já não é mais um material de construção essencialmente experimental. Atualmente o mesmo é produzido em escala industrial, comercializado e entregue nos canteiros de obra por boa parte das empresas produtoras de concreto (CAMPOS, 2000; PAMPLONA, 2000; HARTMANN e HELENE, 2003; HELENE e HARTMANN, 2003).

Na Construção Civil e nas obras de Engenharia em geral, as estruturas de concreto são concebidas de forma a tirar proveito das propriedades do concreto nos estados fresco e

endurecido, visando produzir elementos das mais variadas formas, cores e texturas, que atendam ou até reformulem os requisitos de Engenharia e Arquitetura, sendo esta uma grande vantagem de se optar por uma estrutura de concreto, ou no caso, de CAD.

A difusão do emprego do CAD nas obras de Construção Civil requer um melhor conhecimento de suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido, de maneira a apresentar as mesmas vantagens atribuídas à produção do concreto normal, para que o mesmo dê forma a estruturas que atendam aos requisitos de Engenharia e Arquitetura impostos, e que sejam duráveis e que agridam o menos possível ao meio ambiente (MEHTA, 1997; MEHTA, 1998; MEHTA, 1999; MALHOTRA, 1999; AÏTCIN, 2000b).

Esta dissertação contém um trabalho de pesquisa desenvolvido em uma parceria entre o Núcleo de Desenvolvimento em Construção Civil (NDCC)/Departamento de Engenharia Civil (DEC)/Centro Tecnológico (CT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.T) de Furnas Centrais Elétricas S. A. (FURNAS) que busca contribuir ao melhor entendimento do comportamento termo-mecânico nas primeiras idades de estruturas utilizando CAD com vistas ao processo de fissuração devido ao surgimento de tensões de origem térmica. São estudadas as influências das combinações de diferentes tipos de aditivos superplastificantes e de adições minerais no desenvolvimento de tensões de origem térmica, das resistências mecânicas e outras propriedades físicas e mecânicas do CAD de interesse no estudo termo-mecânico.

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma simples consulta à literatura técnica Brasileira mais atual evidencia que já existe conhecimento técnico-científico disseminado no território nacional suficiente sobre o CAD; e fica muito claro que este concreto pode ser produzido em praticamente todas as regiões do Brasil utilizando materiais locais: rocha, cimento e água, sendo necessária apenas a utilização de aditivos químicos e de adições minerais originados geralmente de outras regiões ou de outros países (IBRACON, 2001; IBRACON, 2002; IBRACON, 2003; IBRACON, 2004; IBRACON, 2005).

A literatura técnica nacional, aqui referenciada pelos trabalhos apresentados nos anais dos encontros anuais do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), apresenta, num primeiro instante, trabalhos científicos de estudo em laboratório das principais propriedades dos materiais disponíveis em várias regiões brasileiras e suas possibilidades para a produção do CAD. Estudos dessa natureza podem ser encontrados em várias fontes, como por exemplo

os apresentados por Gomes *et al.* (2000a) na cidade de Maceió-AL e, mais recentemente por Ribeiro *et al.* (2003) na cidade do Rio de Janeiro-RJ, Silva *et al.* (2003) em Salvador-BA, Mendes *et al.* (2003) na cidade de Curitiba-PR e Macedo *et al.* (2004) em Goiânia-GO. Estas pesquisas, assim como outras da mesma natureza (CORDEIRO *et al*., 2001; MARELLI *et al*., 2002), encontradas na literatura, mostram que o CAD pode ser produzido em grande parte do território nacional com os materiais típicos da produção dos concretos convencionais locais, assim sendo, rocha, areia, cimento e água os seus materiais básicos.

Num segundo momento, a literatura técnica se reporta à produção destes CAD em laboratório; eles têm suas propriedades físicas e mecânicas, assim como as suas inter-relações, minuciosamente caracterizadas e são avaliados segundo os principais agentes de deterioração ambiental da atualidade para que fiquem bem definidos os seus comportamentos de durabilidade (DAL MOLIN, 1995; ISAIA, 1995; ERN, 2003; LACERDA e HELENE, 2003; PINTO *et al*., 2003; EPUSP, 2004; PINHO *et al.*, 2004). Neste âmbito se encontra grande produção científica dentre os pesquisadores brasileiros.

Como terceiro e último passo do processo de desenvolvimento do CAD, deste novo material na Construção Civil, surgem os registros na bibliografia nacional da produção industrial do mesmo. Alguns destes relatos são encontrados nos trabalhos de Isaia *et al.* (1997), Piccoli (1998), Campos (2000), Pamplona (2000), Cordeiro *et al.* (2001), e de Hartmann e Helene (2003). Todos relatam aplicações de CAD em estruturas correntes da prática brasileira da Construção Civil.

Os registros de anais do Congresso Brasileiro do Concreto (COBRACON), promovido pelo IBRACON todos os anos no Brasil são muito ricos de informações detalhadas de trabalhos como os mencionados anteriormente, e se destacam como fonte primária de consulta durante uma etapa inicial de pesquisa sobre CAD no país. Vale dizer, ainda, que o conhecimento sobre CAD constante na bibliografia nacional já dá mostras de incorporar a pesquisa e a tecnologia internacional estando em uma situação de destaque no contexto da tecnologia do concreto, o que pode ser notado pelas linhas de pesquisa mais avançadas da atualidade, derivadas do CAD, como CAD de ultra-alta resistências, CAD com altos teores de adição mineral, concretos de alta resistência e de alto desempenho auto-adensáveis – ver Ibracon (2001), Ibracon (2002), Ibracon (2003), Ibracon (2004) e Ibracon (2005).

1.2. A PROBLEMÁTICA EM ESTUDO

O problema fundamental de que trata esta dissertação está diretamente ligado ao ganho de energia térmica (aquecimento) ao qual as estruturas de concreto estão sujeitas a partir do momento do lançamento do concreto em suas fôrmas, em função do calor gerado pelas reações químicas exotérmicas dos materiais cimentícios e pelas fontes externas de energia térmica, sendo a mais comum e mais importante delas, o sol (CALMON, 1995).

A troca de energia térmica de uma massa de concreto em uma estrutura, seja se aquecendo ou se resfriando, está ligada a uma variação de volume proporcional à variação de temperatura experimentada e às dimensões do volume de concreto em questão. A variação no volume de estruturas de concreto, dependendo das restrições internas e externas de suas movimentações, pode acarretar o surgimento de tensões de tração ou compressão no interior das mesmas, possibilitando a fissuração, caso estas solicitações sejam superiores aos valores de resistência em uma determinada idade, num certo momento de análise.

Durante o aquecimento ou o resfriamento do concreto em uma estrutura, as temperaturas no interior de sua massa não são constantes, uma vez que o concreto é caracterizado pela baixa condutividade e difusividade térmica (NEVILLE, 1997). Assim, as diferenças de temperatura entre pontos da massa de concreto geram tensões de tração ou compressão e contribuem para o agravamento do quadro de fissuração térmica.

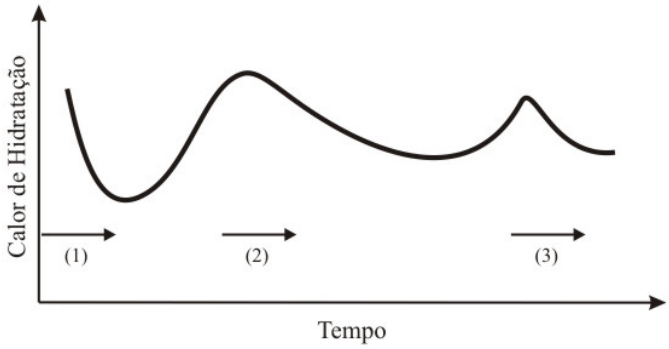


Figura 1-1 – Gráfico típico de calor de hidratação de cimento Portland (TAYLOR, 1967; LEA, 1972)

Segundo a literatura, o processo de hidratação do cimento pode ser representado na forma de três picos de temperatura provocados pelas reações exotérmicas do cimento com a água, que fornecem energia ao concreto. Estes picos estão mostrados na Figura 1-1, que apresenta o calor de hidratação de cimento Portland em um calorímetro isotérmico (TAYLOR, 1967; LEA, 1971; TAYLOR, 1978).

O processo de aquecimento-resfriamento de uma estrutura real de concreto, causado pela liberação de energia térmica (ganho de energia térmica pelo concreto, apresentada na Figura 1-1) contrabalançado pela perda de energia térmica para o ambiente, resulta numa curva próxima à mostrada na Figura 1-2. A figura apresenta a evolução de temperatura típica do centro de uma estrutura na forma de bloco de concreto, pouco ou nada influenciada pela variação da temperatura ambiental (CALMON, 1995; SANTOS, 2004). Nos pontos da estrutura que estão sujeitos a este tipo de comportamento, a massa de concreto como um todo se aquece até o momento em que a sua temperatura é máxima, de onde passa a se resfriar até se estabilizar com a temperatura média do ambiente.

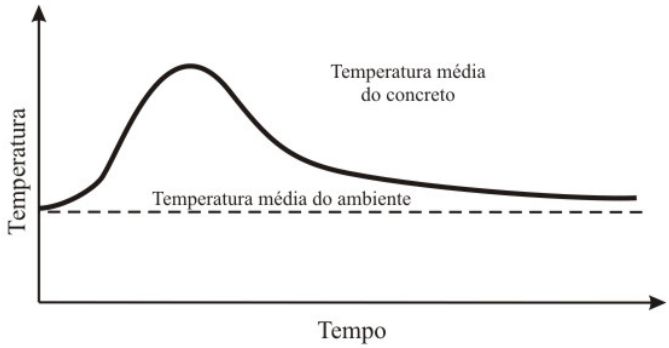


Figura 1-2 – Temperatura no centro de uma estrutura de concreto (SANTOS, 2004)

Com a variação da temperatura em cada ponto da massa de concreto ao longo do tempo, denominada de gradiente térmico, há o surgimento natural da variação volumétrica da estrutura. Ainda, como mencionado anteriormente, devido aos baixos valores de condutividade e difusividade térmica, há diferenças de temperatura entre pontos no interior da massa de concreto num mesmo instante, o que possibilita a variação de volume diferenciada dos vários pontos no interior da mesma, agravando ainda mais a situação, pela característica de não uniformidade da movimentação (CALMON, 1995; SANTOS, 2004).

A própria massa da estrutura em endurecimento se constitui em uma forma de restrição à movimentação da mesma. Se a sua deformação for restringida por algum tipo de contato, caso em que se insere a maior parte das estruturas de concreto, existe uma forte tendência de desenvolvimento de tensões de compressão em todos os pontos, até que as temperaturas alcancem os valores máximos, a partir das quais as tensões atuantes diminuem de intensidade e passam a ser de tração, em uma rápida inversão de solicitação. Durante a etapa de endurecimento do concreto, este quadro de desenvolvimento de tensões é concomitante ao desenvolvimento de suas propriedades mecânicas, que comandam o

desempenho, expresso pela tendência de fissuração da estrutura, nesta idade (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

Falar sobre o estudo termo-mecânico de uma estrutura de concreto significa falar sobre o estudo de quais as implicações mecânicas (tensões) do efeito combinado da geometria, das condições de vinculação (restrições de movimentação) da estrutura, das condições ambientais de exposição e das propriedades do concreto utilizado durante as primeiras idades, e quais as possíveis conseqüências na micro e na macro estrutura do concreto endurecido. A análise termo-mecânica busca antecipar tanto o desenvolvimento de tensões de origem térmica quanto o de resistências mecânicas do concreto, de forma que, em todos os momentos, e principalmente nas primeiras idades, seja mantida uma boa margem de segurança na relação dos mesmos. A Figura 1-3 mostra a definição desta margem se segurança, que está em acordo com o ID (Índice de Daño), apresentado por Calmon (1995).

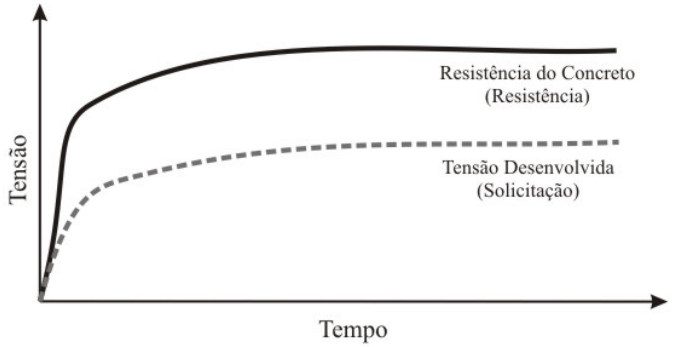


Figura 1-3 – Margem de segurança na análise de tensões de uma estrutura de concreto

Na Figura 1-3, a margem de segurança, ou coeficiente de segurança (CS), em cada instante *t*, é dada pelo quociente entre resistência e a solicitação em um mesmo ponto do interior da massa de uma estrutura de concreto.

$$CS = \frac{\text{Resistência}}{\text{Solicitação}} \rightarrow CS(t) = \frac{R(t)}{S(t)}$$

Para um bom desempenho é necessária a manutenção de um C. S. que dê uma boa margem de segurança ao longo do tempo, não permitindo assim a fissuração da estrutura: C. S. ≥ 1. Na prática da Engenharia, é suficiente manter um coeficiente entre 1,4 e 1,6 para alguns pontos analisados como críticos de uma estrutura, geralmente definidos pela combinação entre geometria e condições de contorno do problema estudado – ver Santos *et al*. (2003) e Santos (2004). Estes limites são utilizados rotineiramente nas análises termo-mecânicas

executadas nas obras de FURNAS[3]. Desta forma, analisando-se os pontos críticos de uma estrutura de concreto, em termos da evolução no tempo das margens de segurança para o problema de fissuração de origem térmica, ou seja, desenvolvimentos de resistências e solicitações, tem-se o estudo termo-mecânico completo.

Ao se proceder ao estudo termo-mecânico dos CAD e de outros tipos de concreto que utilizam adições minerais e aditivos químicos que podem influenciar no processo de geração de energia térmica e nas propriedades físicas, térmicas e mecânicas dos mesmos, outras variáveis devem ser analisadas, como os diferentes picos de temperatura e retardos ou acelerações na hidratação do material cimentício (RAMACHANDRAN, 1983; RAMACHANDRAN, 1995; SABIR *et al*., 2001; PLANK e HIRSCH, 2003).

Sabe-se que, ao se utilizar concretos contendo aditivos superplastificantes e adições minerais, isolados ou em conjunto, o processo de geração de calor pode ser bastante diferente, variando em função dos tipos, das quantidades e das combinações destes materiais (RAMACHANDRAN, 1995; RIXOM e MAILVAGANAM, 1999; SABIR *et al*., 2001). As combinações qualitativas e quantitativas de aditivo superplastificante e adição mineral, utilizadas na produção de CAD, interferem decisivamente no comportamento térmico apresentado na Figura 1-1, que mostra a hidratação típica de cimentos Portland.

As adições minerais utilizadas como substituição de parte do cimento ou como adição ao concreto, agem ativamente neste processo, uma vez que também apresentam reações exotérmicas, quando utilizadas na produção de concreto (SABIR *et al*., 2001; SCHINDLER, 2004). Os aditivos, por sua vez, agem passivamente, interferindo nas velocidades de reação dos produtos intermediários da reação do cimento e das adições minerais, acelerando ou retardando o processo como um todo (RAMACHANDRAN, 1983; RAMACHANDRAN, 1995; AÏTCIN, 2000a).

As adições minerais utilizadas podem aumentar ou diminuir a quantidade de calor liberada até uma determinada idade do concreto, dependendo basicamente da reatividade e da entalpia envolvida na reação de cada adição, o que foi discutido por Barata (1998). Segundo este autor, a opção da utilização de sílica ativa ou metacaulim implica na utilização de materiais com reatividade e entalpias bastante diferentes, resultando em um comportamento térmico e, logo, tensional, diferenciado para concretos idênticos, do ponto de vista de suas propriedades físicas e mecânicas.

[3] Coeficientes de segurança admitidos nas análises termo-mecânicas das obras de FURNAS. Não constam trabalhos publicados a respeito destes coeficientes, se tratando apenas de conhecimento prático do corpo de técnicos da empresa. Algumas diretrizes para o estudo termo-mecânico, no entanto, podem ser encontradas em Equipe de Furnas (1997).

Os aditivos superplastificantes, divididos em três grandes grupos, dependendo basicamente da estrutura orgânica da qual os mesmos são formados: a base de lignossulfonatos (1), melaminas ou naftalenos (2) e policarboxilatos (3), se caracterizam pela grande variabilidade em suas propriedades, comportamento típico dos produtos orgânicos – como apresentado por Rixon e Mailvaganam (1999), interferindo decisivamente na reação do cimento e das adições minerais com a água (SICKER, 1999), e conseqüentemente, no problema termo-mecânico do concreto. O efeito típico do que os aditivos superplastificantes base lignossulfonato, por exemplo, podem causar na hidratação do cimento Portland é apresentado por Rixon e Mailvaganam (1999) e está na Figura 1-4.

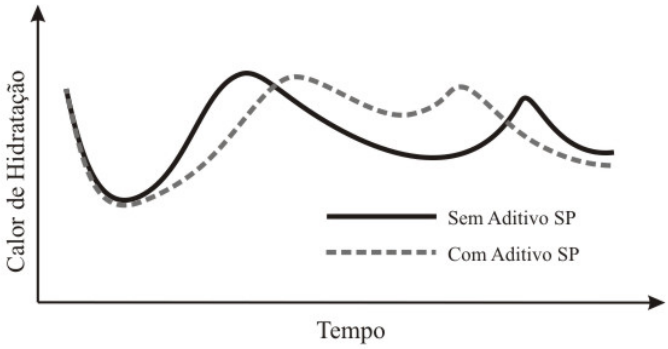


Figura 1-4 – Hidratação de cimento com aditivo lignossulfonato (RIXON e MAILVAGANAM, 1990)

A importância da diferença de comportamento térmico apresentada por CAD "idênticos", do ponto de vista do "método de dosagem"[4], durante a fase de endurecimento, quando os mesmos são produzidos com diferentes combinações de aditivos superplastificantes e de adições minerais, na análise termo-mecânica não foi objeto ainda de estudo na literatura científica, se apresentando como uma lacuna no conhecimento científico e tecnológico dentro da tecnologia do concreto – ver Roncero (2000).

Nesta pesquisa, são desenvolvidos estudos experimentais e computacionais que buscam ajudar numa melhor compreensão da importância que pode apresentar no estudo termo-mecânico de estruturas típicas em CAD a utilização de diferentes combinações de tipos de aditivos superplastificantes e de adições minerais.

[4] Neste momento cabe apenas deixar saber que não existe nenhum "método de dosagem" de concreto convencional e de CAD que se refira ao tipo ou à quantidade de aditivos químicos e adições minerais. Ao se produzir CAD, entende-se da experiência adquirida que se deve substituir numa faixa entre 10 e 12% da massa ou do volume de cimento por uma adição mineral, por exemplo, uma pozolana. Os aditivos, por sua vez, são adicionados numa etapa final de definição do traço, conhecida como "ajuste do traço", onde a dosagem deve seguir as especificações dos fabricantes para concretos convencionais, dosagens essas que são geralmente extrapoladas para os CAD.

1.3. ABRANGÊNCIA DO ESTUDO

A pesquisa utilizando-se aditivos superplastificantes e adições minerais na produção do CAD não é em si novidade. No Brasil é grande o conhecimento já alcançado no estudo de adições minerais na produção do CAD, por exemplo, assim como em outros países é bem conhecido o comportamento dos aditivos superplastificantes. Quando se objetiva o estudo termo-mecânico, no entanto, não são encontrados na bibliografia internacional trabalhos representativos para o CAD. As combinações entre aditivos superplastificantes e adições minerais também não são detalhadas na literatura, o que deixa clara uma lacuna da bibliografia internacional (RAMACHANDRAN, 1995; RONCERO, 2000).

1.3.1. A Situação da Pesquisa Estrangeira

Internacionalmente, é vasta a literatura tanto a respeito de adições minerais quanto de aditivos superplastificantes, e ela abrange ainda as suas aplicações na produção do CAD (PHELAN, 1998; OHTA *et al*., 2000; NAKANISHI *et al*., 2003). É corrente a publicação de produção científica em periódicos especializados em concreto sobre ambos os materiais, inclusive na utilização dos mesmos na produção de estruturas de CAD e em suas propriedades de durabilidade (PEIWEI *et al*., 2001).

A pesquisa internacional é bastante diversificada, focada tanto na utilização de aditivos e adições quanto na produção dos dois materiais. No caso dos aditivos, é disseminada a busca incessante de novos produtos mais adequados às condições econômicas, ambientais ou técnicas encontradas (TORRESAN e KHURANA, 1998; SUGAMATA *et al*., 2003). Os aspectos que fazem da utilização dos superplastificantes no concreto também são bastante explorados uma vez que nenhum método de dosagem de concretos leva em consideração o tipo e a dosagem de aditivo superplastificante (PAILLERE *et al*., 1990). Neste caso também podem ser incluídas as adições minerais (SABIR, 2001).

Ainda, vale ressaltar, os dois temas possuem congressos internacionais específicos: o "Congresso Internacional sobre Superplastificantes e Outros Aditivos Químicos para Concreto"[5], e o "Congresso Internacional em Cinzas Volantes e Outras Adições Minerais para Concreto"[6], ambos realizados a cada três anos pelo Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET)/American Concrete Institute (ACI). Os anais destes dois eventos concentram boa parte da pesquisa internacional a respeito de aditivos e de adições minerais, se estendendo ao que compete na utilização na produção de CAD.

[5] ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete. Ver http://www.concrete.org/.
[6] ACI International Conference on Fly Ash, Slag, Silica Fume and Other Natural Pozzolans. Ver http://www.concrete.org/.

1.3.2. A Situação da Pesquisa Nacional

No Brasil, as adições minerais já foram alvo de estudos detalhados sobre seus empregos na produção de concretos normais e de alto desempenho, seus aspectos mecânicos, de durabilidade e de sustentabilidade, como apresentado no item 1.1. No entanto, em estruturas que utilizam dos CAD, ainda não foram abordados aspectos ligados ao desenvolvimento de tensões de origem térmica, no que tange às inter-relações entre aditivos superplastificantes e adições minerais.

Quanto à utilização de superplastificantes, os registros científicos se restringem a estudos de compatibilidade físico-química entre cimento Portland (com ou sem adição mineral) e aditivo superplastificante, geralmente visando à produção de CAD (HARTMANN, 2002; SCHOBER e MÄDER, 2003). Alguns trabalhos mostram estudos com vistas à produção de concretos auto-adensáveis, que se mostram ainda em fase de experimentos físicos, como ensaios no cone de Marsh, principalmente (SILVA *et al*., 2005). Basicamente, os anais dos encontros anuais do IBRACON concentram grande parte da pesquisa a respeito de aditivos superplastificantes e adições minerais, no que se refere à bibliografia nacional.

1.4. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Um estudo da literatura disponível sobre CAD e adições minerais e aditivos superplastificantes deixa claro que a mesma é carente de conhecimento a respeito da influência de diferentes combinações de tipos de aditivo superplastificante e adição mineral na produção dos CAD. Não é possível encontrar relatos de quais as melhores opções técnica ou econômica de seleção de materiais numa análise preliminar para produção da matriz do CAD, por exemplo. Não se sabe, ao certo, quais os papéis que diferentes combinações destas podem desempenhar na durabilidade de uma estrutura.

1.4.1. A Importância Técnica da Pesquisa

O concreto “da atualidade” é baseado na utilização de produtos químicos que lhe conferem sofisticação quando comparado aos “comuns” ou “do passado” ainda utilizados, segundo Neville (1987) e Aïtcin (2000a). O estudo do comportamento do CAD em face das combinações de tipos de aditivo e adição pode suprir de conhecimento desde o processo de dosagem, onde se pode optar por determinado tipo de combinação aditivo-adição em função de propriedades físicas, mecânicas ou térmicas, até a um melhor controle das estruturas a serem produzidas, no momento de suas execuções, onde se podem estimar com melhor precisão os seus comportamentos mediante as deformações de origem térmica.

1.4.2. As Importâncias Econômica e Estratégica da Pesquisa

A previsão do comportamento termo-mecânico com vistas à durabilidade das estruturas de concreto simples e armado pode melhorar a qualidade dos elementos estruturais em CAD. Além de influenciar diretamente nos custos finais da produção destas estruturas, o estudo destas combinações aditivo-adição pode resultar em significativas melhorias no desempenho dos elementos de concreto, contribuindo para prolongar sua vida útil de projeto e minimizar os custos de manutenção durante toda a vida útil da estrutura.

Ainda, optar pela utilização de materiais mais baratos e de equivalente durabilidade para a produção de estruturas em CAD é uma boa solução a se adotar para desenvolvimento do setor da Construção Civil, ao mesmo tempo em que agrega poder de negociação à indústria de construção, que pode oferecer produtos mais baratos, e oferecer qualidade e menores custos na produção da infra-estrutura e dos equipamentos urbanos do poder público.

1.5. OBJETIVOS E HIPÓTESES

O presente trabalho de pesquisa estuda alguns aspectos da utilização de combinações entre aditivos superplastificantes e adições minerais no comportamento termo-mecânico dos CAD nas primeiras idades. Os principais objetivos da pesquisa estão detalhados a seguir.

1.5.1. Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é estudar a influência do uso de diferentes combinações de tipos de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termo-mecânico de estruturas típicas de CAD (SMITH e RAD, 1989) nas primeiras idades.

1.5.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são: estudar a influência de se optar por combinações de aditivos base lignossulfonato, naftaleno ou policarboxilato ou mesmo por uma mistura de mais de um deles e por adição mineral de sílica ativa ou metacaulim:

- No desenvolvimento das propriedades físicas e mecânicas dos concretos de alto desempenho no estado fresco e nas primeiras idades, até o concreto endurecido;
- Nos valores de suas propriedades térmicas: coeficiente de expansão, condutividade e difusividade térmica, calor específico, e elevação adiabática de temperatura;
- No desenvolvimento dos campos de temperaturas e de tensões de origem térmica devido à hidratação do aglomerante no interior de estruturas típicas de CAD;

- No desenvolvimento das margens de segurança (coeficientes de segurança) da estrutura ao longo do tempo até o endurecimento do concreto.

1.5.3. Hipóteses de Pesquisa

A partir de uma pesquisa bibliográfica, e a partir do conhecimento já adquirido por meio de pesquisas anteriores e em desenvolvimento pelo NDCC/DEC/CT/UFES e pelo Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas S. A./DCT.T/FURNAS acredita-se que os CAD, em face das combinações aditivo-adição, comportem-se como adiante descrito.

a) Quanto às propriedades físicas e mecânicas:

Espera-se que os CAD produzidos com aditivos base lignossulfonato, naftaleno ou policarboxilato, além da mistura dos dois tipos de aditivos, possam dar origem a concretos com as mesmas propriedades físicas no estado fresco e mecânicas até que alcancem os seus endurecimentos. Exceção feita aos aditivos base lignossulfonato, que devem apresentar incorporação de ar, grande retardo no endurecimento e perda sensível de resistência final.

Ao se comparar as misturas com diferentes adições, os CAD produzidos com sílica ativa e metacaulim devem apresentar propriedades físicas e mecânicas muito próximas. A exceção deve ser encontrada na consistência dos concretos, que deve diminuir para o metacaulim, uma vez que a finura do metacaulim é bem superior à sílica ativa.

b) Quanto às propriedades térmicas:

Acredita-se que as propriedades térmicas dos CAD variam sensivelmente quando comparadas às de concretos convencionais, devido principalmente à diferença da pasta/agregado. E para os aditivos base naftaleno e policarboxilato, nesta ordem, aumentará a margem de variação devido à microestrutura diferenciada da pasta de cimento – efeito da dispersão do cimento pelos aditivos. Assim podem ser descritos:

- O coeficiente de expansão térmica e a condutividade térmica terão valores sensivelmente maiores devido à suas proporcionalidades com a massa específica do material, que no caso do CAD, aumenta;
- O calor específico será maior, pois aumenta sensivelmente com a diminuição da massa unitária do agregado graúdo e o aumento do teor de pasta no concreto. Este é o caso do CAD;

- A difusividade térmica do concreto, que depende das propriedades anteriores, é bem mais influenciada pela condutividade, que é quem normalmente a controla; deve então aumentar da mesma forma.

c) Quanto ao comportamento térmico e tensional:

Os aditivos superplastificantes base policarboxilato apresentam um desenvolvimento mais rápido de calor de hidratação, logo, de elevação de temperatura e desenvolvimento de tensões de origem térmica. Seguem nesta ordem os aditivos base naftaleno e lignossulfonato, respectivamente. Estes últimos têm um quadro de desenvolvimento termo-mecânico menos favorável ao aparecimento de fissuras de origem térmica, uma vez que o problema tensional tem caráter acumulativo de tensões.

Os traços utilizando-se de metacaulim devem desenvolver mais rapidamente o calor de hidratação, alcançando as suas temperaturas máximas de elevação em idades inferiores, quando comparados aos traços com sílica ativa, sendo assim mais favoráveis a um quadro potencial de fissuração. Ainda, os concretos com metacaulim devem apresentar temperaturas máximas de elevação ligeiramente superiores aos concretos com sílica ativa.

d) Quanto às simulações de desenvolvimento de tensões internas:

Os concretos com aditivo superplastificante base lignossulfonato e naftaleno, terão nesta ordem, maior retardo na hidratação do cimento e, logo, menores possibilidades de fissuração nas primeiras idades. O tipo de aditivo superplastificante é determinante para um diferenciado comportamento tensional no interior dos espécimes visto sua influência na hidratação do cimento.

Os CAD com metacaulim apresentarão piores situações termo-mecânicas devido às suas acelerações nos processos de hidratação e às maiores temperaturas alcançadas nos interiores das estruturas – picos de temperatura.

1.6. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Quanto à produção dos concretos de alto desempenho, o estudo desenvolvido se limita a concretos utilizando adição mineral de sílica ativa e metacaulim em substituição ao cimento na proporção de 10% do volume e aditivos superplastificante base lignossulfonato, naftaleno e policarboxilato, todos disponíveis na região da cidade de Goiânia no momento da pesquisa. Quanto aos materiais básicos, os CAD utilizam cimento CP II-F 32 e agregados artificiais do tipo granítico disponíveis no mercado local. Embora de fonte

própria, a água utilizada nas misturas esteve em conformidade com os padrões de potabilidade da concessionária local de abastecimento.

1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A pesquisa em questão é dividida em duas partes distintas: uma experimental onde são determinadas algumas propriedades do CAD, e outra na qual estas alimentam um modelo computacional de simulação do comportamento termo-mecânico de estruturas com geometrias típicas da prática da Engenharia. Para apresentar todo o transcorrer da pesquisa, esta dissertação contém a presente introdução, quatro capítulos de estudos, apresentação e discussão da pesquisa, e a bibliografia.

Neste primeiro capítulo é apresentado um breve resumo da situação da linha de pesquisa na qual o trabalho se insere no PPGEC/DEC/CT/UFES, no Brasil e no mundo. São apresentadas as justificativas que levam à definição do tema, os objetivos, as hipóteses a serem testadas, as limitações do estudo e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica onde são abordadas as principais considerações sobre a tecnologia do CAD, sobre o papel que os aditivos superplastificantes e as adições minerais desempenham na produção dos mesmos, sobre o problema térmico e o tensional do concreto e especificamente do CAD, sobre a inter-relação problema térmico e tensional (problema termo-mecânico), e sobre os principais aspectos da modelagem computacional para o problema termo-mecânico. E sobre o estudo termo-mecânico propriamente dito no concreto, e especificamente no CAD.

Uma visão geral do programa experimental e do estudo piloto, os procedimentos de seleção do material, de proporção, de ensaio, e do estudo termo-mecânico são apresentados no terceiro capítulo, onde é discutida a normalização brasileira dos assuntos abordados, quando disponível, e as normas estrangeiras. Este capítulo também ilustra o desenvolvimento da pesquisa por meio de um registro fotográfico dos materiais, procedimentos de ensaio, equipamentos e atores envolvidos em toda a pesquisa.

No quarto capítulo é realizada uma análise detalhada dos resultados experimentais obtidos em laboratório e em simulações, focando o comportamento do CAD. Ainda neste capítulo, é realizada a análise termo-mecânico do material estudado em laboratório por meio de simulação de estruturas típicas utilizando CAD.

Conclui-se o trabalho no quinto capítulo, no qual são apresentadas as conclusões obtidas por meio do programa experimental da pesquisa e das simulações, as recomendações para trabalhos futuros dentro da linha de pesquisa ou em linhas correlatas, assim como as considerações finais e as sugestões para a continuidade dos estudos constantes do trabalho.

A seguir, se apresenta a bibliografia utilizada na pesquisa: a bibliografia referenciada, a bibliografia consultada e a bibliografia de normas técnicas – normas NBR da ABNT.

CAPÍTULO 2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica busca apresentar o suporte teórico para discussão dos temas associados aos questionamentos apresentados no Capítulo 1 e fundamentar a análise dos fenômenos visualizados no estudo. Para tanto, este capítulo é dividido em três partes distintas, a saber.

Englobando os subitens 2.1, 2.2 e 2.3, a primeira parte deste capítulo apresenta as propriedades fundamentais do CAD, destacando a importância dos materiais constituintes no seu comportamento térmico. Ênfase é dada a dois de seus principais materiais constituintes: adições minerais e aditivos superplastificantes, que são peças-chave em sua produção.

A segunda parte, constituída pelos subitens 2.4 a 2.6, busca reproduzir o que já se conhece na literatura a respeito do comportamento térmico e tensional do concreto normal e do CAD, analisando as suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas, que entram na computação do estudo térmico e tensional.

Estas duas primeiras partes dão suporte aos experimentos com o material CAD, que tem suas propriedades físicas e mecânicas estudadas para efeito de caracterização e de avaliação das influências dos aditivos químicos e das adições minerais.

Nos dois últimos subitens, 2.7 e 2.8, é apresentada a modelagem computacional desenvolvida pelo NDCC/DEC/CT/UFES e pelo DCT.T/FURNAS nos trabalhos de Silva (2002) e Santos (2004) para o problema termo-mecânico, baseada em Calmon (1995), que foca os desenvolvimentos de tensões de origem térmica em estruturas de concreto. Esta foi a base para o modelo de análise adotado no estudo termo-mecânico desta pesquisa.

2.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O concreto de cimento Portland é um material compósito onde os agregados graúdos e miúdos são "colados" pela pasta de cimento hidratada produzida pela adição de água ao cimento (NILSEN e MONTEIRO, 1993). Para a produção desta pasta, a quantidade de água necessária para a reação de hidratação do cimento é algo entre 20 e 25% da sua massa. No entanto, para obter concretos trabalháveis, que sejam tanto serem lançados como bombeados, mais água é necessária, e o dobro é utilizado rotineiramente por produtores de concreto comum (BARTON, 1989; MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; MATHER, 2001; MATHER e HIME, 2002).

A adição de uma quantidade de água bem maior que a necessária faz com que, nos concretos comuns, a matriz formada pela pasta de cimento endurecida seja o ponto fraco que norteia os limites de resistência mecânica das estruturas, uma vez que a grande quantidade de água produz uma matriz porosa – macroporosa, segundo Mehta e Monteiro (1994), heterogênea, e formada por grandes cristais de hidróxido de cálcio, que dão uma formação preferencial à ruptura (OWENS, 1989a; OWENS, 1989b; MEHTA e MONTEIRO, 1994; AÏTCIN, 2000a).

A evolução tecnológica do concreto nos últimos anos se deu, em grande parte, a partir da geração de melhores matrizes. Isto se conseguiu reduzindo-se a quantidade de água e controlando a formação dos cristais de hidróxido de cálcio na pasta de cimento. Assim, matrizes mais homogêneas e mais resistentes puderam ser produzidas e deram origem aos CAD (BURNETT, 1989). Na prática, isso foi conseguido com a utilização de superplastificantes e de adições minerais, que se desenvolveram enormemente nos últimos 20 anos, e que se mantêm em contínuo processo de desenvolvimento (AÏTCIN *et al*., 1994; COPPOLA *et al*., 1995; SPIRATOS e JOLICOEUR, 2000; TSENG *et al*., 2000).

Ao passo que matrizes cada vez mais densas e com elevadas resistências eram alcançadas, surgiu a necessidade de se escolher melhor os demais materiais para compor os CAD, sendo necessário dar especial atenção aos agregados, que formam o esqueleto rígido, e que passaram a ser os elementos mais frágeis, que definiam o limite da resistência mecânica dos CAD (AÏTCIN, 2000a). No entanto, a grande tendência, no momento em que este material passa a ser utilizado nos canteiros de obra no Brasil, é a de se buscar os materiais usuais de cada região onde se propõe fabricar o CAD, tendência que pode ser observada em parte dos trabalhos apresentados nos Congressos Brasileiros do Concreto (IBRACON, 2001; IBRACON, 2002; IBRACON, 2003; IBRACON, 2004; IBRACON, 2005).

2.1.1. Os Materiais Constituintes

O CAD é produzido utilizando-se cimento, água, agregado miúdo e graúdo, adição mineral e aditivo superplastificante (COOK, 1989; DETWILER, 1992; MEHTA e MONTEIRO, 1994; AÏTCIN, 2000a). Outros materiais podem, eventualmente, ser adicionados ao concreto, como aditivos químicos que incorporam ar, regulam o tempo de hidratação, ou adições que lhe conferem cor ou textura, por exemplo (AÏTCIN, 2000a). No entanto, os seis materiais listados e descritos a seguir estão presentes em todos os CAD e são condição obrigatória para sua produção, como encontrado na literatura (COLLEPARDI *et al*., 1990; AÏTCIN e NEVILLE, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 1994; AÏTCIN, 1997):

a) <u>O Cimento</u>

O cimento é o principal constituinte dos concretos comum e de alto desempenho, pois compõe, junto às adições minerais, a parcela considerada como reativa dos materiais, que vai formar o material de preenchimento do esqueleto de agregado (NILSEN e MONTEIRO, 1993; AÏTCIN, 2000a). Como discutido por Aïtcin (2000a), o tipo de cimento, embora deva ser o primeiro ponto de escolha, não é problema quando se busca a produção de CAD com resistência à compressão até cerca de 100 MPa.

Helene e Hartmann (2003) produziram concretos com resistências à compressão entre 50 e 135 Mpa, usando cimento CP V ARI-RS, em São Paulo; Pinto *et al.* (2003) produziram entre 60 e 100 MPa com cimento CP II F-32, em Goiânia. Regis *et al.* (2003) obtiveram concretos com resistências entre 50 e 75Mpa, com CP II F-32, em Pernambuco e Pinho *et al.* (2004), concretos com resistências entre 40 e 60 MPa com CP II Z-32, em Belém. Assim, comprova-se que vários são os possíveis tipos de cimento para produzir o CAD no Brasil.

a.1) O Cimento Anidro

O cimento Portland é obtido basicamente a partir da mistura de calcário e argila, com possíveis pequenas adições de algumas outras matérias primas. Ele é um composto essencialmente formado por quatro óxidos, ordenados em função da quantidade: óxido de cálcio (CaO), de silício (SiO_2), de alumínio (Al_2O_3); e de ferro (Fe_2O_3) (BOGUE, 1955; TAYLOR, 1967; LEA, 1971; MEHTA e MONTEIRO, 1994). A partir destas matérias, e de processos de queima, fusão e aglomeração, obtém-se clínquer, cujos componentes principais estão mostrados na Tabela 2.1 (LEA, 1971; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Tabela 2-1 – Composição dos elementos do clínquer (LEA, 1971; MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Designação*	Composição	Percentagem de ocorrência**
Aluminato tricálcico (C_3A)	$3CaO\ Al_2O_3$	0% a 15%
Aluminoferrato tetracálcico (C_4AF)	$4CaO\ Al_2O_3\ Fe_2O_3$	5% a 15%
Silicato bicálcico (C_2S)	$2CaO\ SiO_2$	10% a 55%
Silicato tricálcico (C_3S)	$3CaO\ SiO_2$	20% a 65%

Notas:

* Notações da química do cimento: C: CaO; A: Al_2O_3; F: Fe_2O_3; S: SiO_2; $\bar{S}$: SO_3;

** Percentagem em peso.

Estes quatro óxidos, apresentados na Tabela 2.1, contêm geralmente algumas impurezas devido ao processo de produção, pelo que são por vezes referenciados com denominações alternativas: a alita corresponde ao C_3S, a belita ao C_2S, a fase aluminato ao C_3A e a fase ferrítica (celita) ao C_4AF (JOHANSEN *et al.*, 2002). O conjunto formado pela alita e belita (silicatos de cálcio) constitui cerca de 85% do clínquer, sendo as fases aluminato e ferrítica distribuídas na zona intersticial (LEA, 1971; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

É muito importante a análise da proporção dos componentes do cimento para uma previsão do comportamento dele na fase de hidratação, como discutido por Johansen *et al.* (2002); para tal existem duas metodologias básicas: os métodos diretos e os indiretos. Exemplos dos métodos diretos são a microscopia eletrônica e a espectroscopia por difração de raios-X, que requerem métodos e técnicas especiais de manuseio (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O principal método indireto é o método de Bogue, aplicável apenas a cimentos Portland sem adições. A partir da análise química dos óxidos elementares do cimento, fornecida por métodos analíticos usuais, as fórmulas de Bogue (Equações 2-1 (a)-(d), conhecidas desde 1929) permitem obter a composição do cimento em termos de C_3S, C_2S,

C_3A e C_4AF (BOGUE, 1955; TAYLOR, 1967; MEHTA e MONTEIRO, 1994), expressando seus percentuais em massa dos elementos:

$$\begin{aligned}
&\text{(a) } C_3S(\%) = 4,071 \cdot C - 7,600 \cdot S - 6,718 \cdot A - 1,430 \cdot F - 2,850 \cdot \bar{S} \\
&\text{(b) } C_2S(\%) = 0,867 \cdot S - 0,7544 \cdot C_3S \\
&\text{(c) } C_3A(\%) = 2,650 \cdot A - 1,692 \cdot F \\
&\text{(d) } C_3AF(\%) = 3,043 \cdot F
\end{aligned} \qquad \text{Eq. (2-1)}$$

Estas estimativas são importantes, uma vez que pequenas variações nas análises dos óxidos podem resultar em grandes mudanças nos teores dos compostos finais. Mehta e Monteiro (1994) citam, como exemplo, uma comparação entre dois tipos de cimento onde, combinando-se a redução de 1% no teor de Al_2O_3 e um incremento idêntico no Fe_2O_3, diminui-se a quantidade final de C_3A e C_2S em 4,3 e 3,7%, respectivamente.

Outras formas de analisar a composição potencial do cimento foram propostas por outros autores, no entanto não foram plenamente estabelecidas na prática, uma vez que este tipo de análise não é considerada como necessária para o controle de qualidade de rotina na produção dos cimentos (MEHTA e MONTEIRO, 1994). As fórmulas de Bogue, no entanto, têm se mostrado adequadas, com boa coerência quando comparada aos métodos diretos (BENTZ, 1997); A inclusão do método de Bogue na norma norte-americana ASTM C150 *Standard Specification for Portland Cement* confirma esta aceitação (ASTM, 2004).

Os métodos indiretos, baseados na formulação de Bogue, têm sido mais utilizados do que quaisquer dos métodos diretos, dadas as dificuldades associadas aos métodos diretos, que são bastante laborais e caros, em oposição à simplicidade e rapidez da aplicação do método de Bogue (NEVILLE, 1997; ASTM, 2004). O método de Bogue, deve-se ter em mente, não é aplicável a cimentos Portland com adições (BOGUE, 1955), sendo geralmente utilizado como uma adaptação, uma aproximação aos cimentos comerciais.

a.2) O Cimento Durante a Hidratação

A hidratação do cimento Portland, dependendo do nível de precisão do qual o estudo necessita, pode ser entendida como formada por diversas fases de reações químicas, denominadas seguindo, geralmente, as características dos reagentes envolvidos e as velocidades de reação (JOHANSEN *et al.*, 2002). No campo do estudo térmico, focando o desprendimento de energia térmica e as suas relações com o endurecimento da pasta, é

comum dividir o processo de hidratação do cimento em três fases, os períodos *inicial*, *intermediário* e *final* (Vide Figura 2-1).

Os trabalhos de Breugel (1991), Maekawa *et al.* (1999), Beek (2000) e Lura (2000) são alguns dos quais optam por este esquema relativamente simplificado para o entendimento da hidratação, e do endurecimento da pasta de cimento.

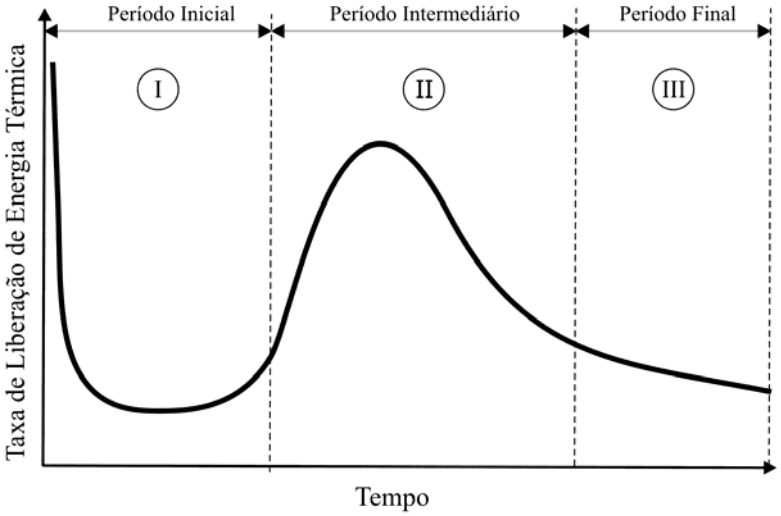


Figura 2-1 – Libertação de calor de hidratação do cimento (BREUGEL, 1991; MAEKAWA *et al.*, 1999; BEEK, 2000; LURA, 2000)

O *período inicial* começa no momento da mistura do cimento com a água, quando o C_3A reage rapidamente com ela e o gesso, formando a etringita; ocorre também a reação da água com os silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) produzindo alguns silicatos de cálcio hidratados pouco estáveis (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Estas reações ocorrem no começo do *período inicial* e são altamente exotérmicas, durando apenas alguns minutos, não mais do que cinco (JAWED *et al.*, 1983). O começo do *período inicial* também é conhecido como fase de pré-indução (JAWED *et al.*, 1983). O gesso adicionado no cimento atua nesta fase como um regulador das reações envolvendo o C_3A (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

Após esta fase inicial de reações, a pré-indução, começa uma fase de inatividade aparente de reações químicas, denominada de fase de indução ou fase dormente, que pode durar até cinco horas. Jawed *et al.* (1983) propõem um modelo bem mais abrangente para todos os três períodos, mas que inclui todas as etapas aqui apresentadas. A literatura admite que a explicação para esta inatividade aparente é o surgimento de uma camada protetora em torno das partículas de cimento em reação, que impede o progresso de novas reações

(JAWED *et al.*, 1983; BREUGEL, 1991; MAEKAWA *et al.*, 1999). Esta fase se prolonga até determinado limite de concentração de íons no interior da camada protetora, quando a mesma se rompe e inicia-se o segundo período.

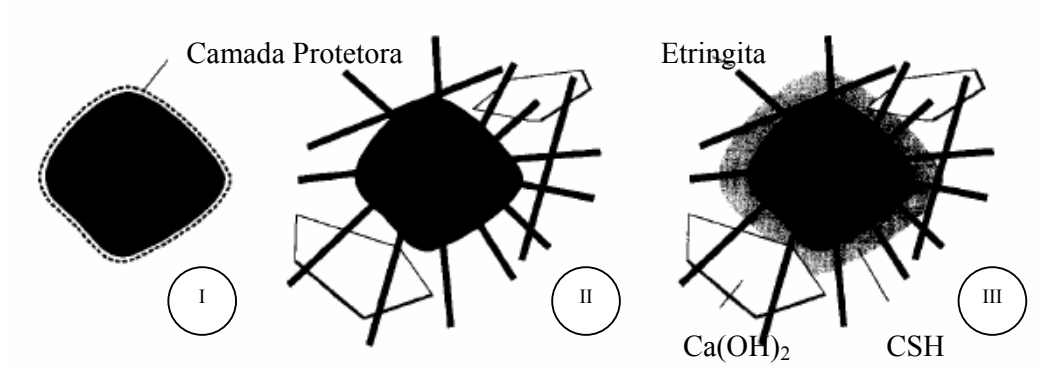


Figura 2-2 – Produtos da hidratação do cimento Portland ao longo das três fases (BEEK, 2000)

O *período intermediário* inicia-se quando é eliminado o mecanismo impeditivo do progresso das reações de hidratação durante a fase de indução. As partículas de cimento (alita e belita, principalmente) agora se hidratam com grande velocidade e com formação de grande quantidade de silicatos de cálcio hidratados (CSH) e hidróxidos de cálcio (CH), iniciando-se a transformação da etringita em monosulfoaluminato hidratado (JOHANSEN *et al.*, 2002). Neste período as partículas de cimento começam a se expandir, surgindo fibras alongadas na recém formada rede porosa, resultante da sobreposição de partículas de cimento em expansão – ver Figura 2-2 (II) (BEEK, 2000).

Dada a grande quantidade de reações e as suas características exotérmicas, ocorre um pico de geração de calor – que pode ser visto na Figura 2-1 (II), seguindo-se de uma fase de desaceleração das reações em resultado da nova camada espessa de produtos de hidratação que se forma à volta das partículas de cimento, dificultando novamente o acesso da água para a subseqüente hidratação dos reagentes ainda não hidratados (JAWED *et al.*, 1983; MEHTA e MONTEIRO, 1994). As velocidades de reação passam a ser controladas pelas taxas de difusão dos íons através das camadas de produtos de hidratação. O *período intermediário* varia entre 24 e 48 horas de duração, normalmente (JAWED *et al.*, 1983).

O *período final*, Figura 2-1 (III), corresponde à continuação das reações controladas pela difusão com que terminou o *período intermediário*, mas com velocidades de reação inferiores, devido ao espessamento progressivo da camada de produtos de hidratação – ver Figura 2-2 (III), o que reduz a taxa de liberação de calor sensivelmente. Os produtos de

reação formados durante este período (fase final do *período intermediário* em diante) são bastante estáveis, ocupando o espaço entre as fibras alongadas formadas anteriormente (JAWED *et al.*, 1983).

Todo o processo descrito acima depende fundamentalmente da composição do cimento, que ao se alterar minimamente, pode acarretar em grandes mudanças na dinâmica do processo de hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Assim, a hidratação do cimento é peça importante na produção dos concretos, como discutido nos trabalhos de Juvas *et al.* (2002) e Zhang *et al.* (2003).

Neste ponto, deve-se lembrar que um mesmo tipo de cimento pode ser produzido e aceito com uma faixa de valores bastante variável em sua composição, segundo as normas técnicas. Uma vez que pequenas variações nas composições do cimento podem influenciar sobremaneira no processo de hidratação do cimento, as propriedades reológicas dos concretos de cimentos Portland que atendem a estas normas técnicas podem ser muito diferentes. No caso dos CAD, podem ainda ser mais visíveis, uma vez que são utilizados traços com relações água-cimento muito baixas e com a presença de aditivos superplastificantes geralmente em altas doses (GROVES, 1981; AÏTCIN, 2000a), o que será discutido mais adiante.

b) <u>A Água</u>

A água utilizada para a mistura do concreto tem papel fundamental em sua produção. A literatura considera como água boa para fazer concreto toda aquela que seja natural, seja potável e que não tenha sabor ou odor pronunciado (MEHTA e MONTEIRO, 1994; PETRUCCI, 1994; NEVILLE, 1997). Mehta e Monteiro (1994) e Petrucci (1994) consideram que o concreto deve ser feito com água potável, noralmente entregue pela concessionária local. Aïtcin (2000a) afirma que, embora as características do CAD requereiram maior nível de qualidade dos materiais, a água a ser utilizada deva ser a entregue pela concessionária local, não havendo relatos de problemas causados pela mesma na produção do CAD. A experiência tem mostrado que esta não afeta significativamente as propriedades do concreto e tem um custo muito baixo.

A água de mistura, no entanto, caso não controlada sua qualidade, pode conter impurezas (como sólidos em suspensão, óleos e graxas) que afetam várias propriedades do concreto, como resistência à compressão, calor de hidratação, corrosão das armaduras, instabilidade

volumétrica, e durabilidade. Algumas das relações da água com as propriedades do concreto foram objeto de discussão por Owens (1989a) e Owens (1989b).

Quanto ao calor de hidratação, a água contendo carbonato de sódio pode causar aceleração na hidratação do cimento, enquanto que os bicarbonatos podem acelerar ou retardar o processo de hidratação (OWENS, 1989a; AÏTCIN, 2000a). Ainda, em grandes concentrações, estes sais podem reduzir significativamente a resistência do concreto. Sabe-se que, quando a soma destes dois sais excede a 1.000 ppm, devem ser realizadas análises de resistência à compressão e calor de hidratação (OWENS, 1989a; AÏTCIN, 2000a).

b.1) A Relação Água-Cimento ou Água-Material Cimentício

O grande desenvolvimento dos CAD se deu pelo entendimento de que a quantidade de água a ser adicionada ao concreto deve ser a mínima possível, além daquela necessária para a hidratação do cimento e da adição mineral – material cimentício (AÏTCIN e NEVILLE, 1993; AÏTCIN, 2000a).

A reduzida quantidade de água nos CAD proporciona matrizes menos porosas, ou ao menos, com poros menores, e um material finalmente mais homogêneo (GOLDMAN e BENTUR, 1994; AÏTCIN e NEVILLE, 2003). A zona de transição entre agregado e pasta é a mais beneficiada, uma vez que a diminuição ou inexistência do mecanismo de exsudação da água dentro do concreto lhe proporciona uma morfologia muito mais próxima daquela da matriz da pasta (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

Na prática, concretos com relações água-material cimentício inferiores a 0,40 (utilizando-se adição mineral) podem ser considerados como de alto desempenho, adquirindo propriedades diferenciadas dos concretos normais nas idades iniciais e no concreto endurecido (AÏTCIN, 1997; AÏTCIN, 2003; AMBROISE e PÉRA, 2003). Nesta pesquisa, esta é a definição adotada de concreto de alto desempenho.

A respeito da definição de relação água-cimento ou água-material cimentício, ou água-aglomerante, sabe-se o cimento não se hidrata completamente na maior parte dos CAD, e parte das adições minerais também não, funcionando como fíler (DE LARRARD, 1990; AÏTCIN, 2000a). Por estes motivos as três definições se diferenciam e causam alguma confusão na literatura. Nesta pesquisa as definições de relação água-cimento, água-material cimentício ou água-aglomerante são adotadas como as mesmas, abrangendo as relações entre as massas totais de água e as massas totais de cimento e adição mineral utilizadas na mistura de concreto. Será utilizada a expressão “relação água-cimento” ou a/c.

c) Os Aditivos

Para a reação de hidratação do cimento e da adição mineral e produção da pasta é necessário algo como 20 a 25% de água, em relação à massa do cimento. No entanto, como já discutido, para se obter concretos que sejam trabalháveis e que possam tanto ser lançados e bombeados, mais água é necessária. Cerca do dobro é utilizado pelos produtores de concreto comum (BARTON, 1989; MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; MATHER, 2001; MATHER e HIME, 2002).

No caso dos CAD, a única maneira de se produzir concretos com relações água-cimento inferiores a 0,40, e ainda manter as demais propriedades no concreto fresco, consiste em utilizar aditivos superplastificantes e aditivos retardadores de hidratação, em alguns casos (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; AÏTCIN, 2000a).

Os aditivos, de forma geral, foram introduzidos nas misturas de concreto com a finalidade de ajustar as suas características às necessidades do projeto, com objetivos de aumentar a plasticidade, diminuir a segregação, retardar ou acelerar a pega, acelerar as resistências nas primeiras idades, retardar a taxa de evolução de calor, aumentar a durabilidade, etc. (PETRUCCI, 1994, MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

Os aditivos superplastificantes são produtos químicos derivados de sais solúveis e polímeros. Por se tratarem de produtos de base orgânica, mantêm a característica de grande variabilidade de suas propriedades e são sensíveis aos fatores ambientais, quais sejam: temperatura, umidade, pressão, etc. (RIXOM, 1998; RIXOM e MAILVAGANAM, 1999). Eles causam retardos ou acelerações na hidratação do cimento, dependendo do tipo e da quantidade de aditivo utilizado. Estes aditivos serão objeto de um mais aprofundado estudo no item 2.2, mas deste ponto em diante, quando mencionado apenas como "aditivos", entenda-se que se tratam de aditivos superplastificantes.

d) As Adições Minerais

As adições minerais, geralmente utilizadas na produção dos CAD, são caracterizadas como pozolanas, embora sejam conhecidas outras adições minerais, sem atividade pozolânica mas com atividade cimentante, que também podem ser utilizadas, principalmente em misturas ternárias (ROY *et al.*, 2001; SABIR *et al.*, 2001).

A Rilem (RILEM, 1988) apresenta uma tabela de classificação segundo a atividade das principais adições minerais utilizadas na produção de concretos. Nesta Tabela, Souza (2003) identificou o metacaulim e a sílica ativa como adições minerais altamente

pozolânicas, pois a sílica ativa contém uma grande quantidade de sílica na forma amorfa e o metacaulim uma grande quantidade de aluminossilicatos, também na forma amorfa.

Estas duas adições minerais, tratadas neste trabalho, são consideradas pozolanas, materiais que apresentam capacidade de reação com os cristais de hidróxido de cálcio provenientes da hidratação do cimento Portland (NEVILLE, 1997). Dada a finura destes materiais, os mesmos colaboram para um melhor empacotamento dos macroporos presentes na pasta de cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 1994). No item 2.3 estas adições minerais serão tratadas com maior profundidade.

e) Os Agregados

Os agregados têm papel importante na produção do CAD, uma vez que eles limitarão a resistência à compressão do material (AÏTCIN, 2000a). Na produção de concreto comum é constante a aferição da qualidade do agregado, necessidade ainda mais vital no CAD. No caso do agregado graúdo utilizado em uma mistura que visa produzir um CAD, cabe uma consideração de grande importância: nos concretos convencionais, o agregado supera a resistência da matriz, enquanto que no CAD, a matriz fica extremamente fortalecida. Daí a necessidade de se adotar um agregado graúdo de melhor qualidade (AÏTCIN, 2000a).

É cabível a consideração de que qualquer que seja o agregado graúdo, há um valor crítico da relação água-cimento, abaixo do qual qualquer redução adicional deste fator não resultará em aumento significativo da resistência à compressão. A partir deste ponto, o agregado graúdo passa a constituir o elo mais vulnerável do concreto.

A norma brasileira que regulamenta a qualidade dos agregados é a NBR 7211 (ABNT, 1983); ela assume como imprescindível a observação de alguns fatores de grande relevância na sua escolha. Dentre os pontos mais relevantes, são destacados: a origem mineralógica da rocha-mãe, o tamanho máximo do agregado, a resistência à compressão, a forma e a textura superficial, o módulo de deformação, limpeza e isenção de materiais pulverulentos e o processo de britamento que foi utilizado.

Para os agregados miúdos, devem ser observadas, ao menos, as seguintes condições básicas: a forma e a angulosidade, pois agregados constituídos por partículas arredondadas e lisas tendem a necessitar de menos água para alcançar boa trabalhabilidade, daí serem mais recomendados para o CAD. A granulometria e o módulo de finura, uma vez que é recomendado que a granulometria seja uniforme e contínua para atingir-se uma boa trabalhabilidade com pouca água. Também é aconselhável que a granulometria seja um

pouco grossa, pois as misturas usadas em CAD já apresentam alto teor de partículas finas. Desta forma, o módulo de finura mínimo recomendado é de 2,8 (AÏTCIN, 2000a).

2.1.2. As Propriedades do Concreto de Alto Desempenho

Para efeito do estudo termo-mecânico, algumas propriedades do CAD são de maior interesse, pois são utilizadas direta ou indiretamente no cômputo das análises de tensões. Algumas outras, no entanto, embora não estejam contempladas no escopo do estudo termo-mecânico, são propriedades necessárias de serem analisadas em todos os concretos.

a) Propriedades no Estado Fresco

As propriedades do CAD no estado fresco que se decidiu monitorar nesta pesquisa são a consistência e o teor de ar aprisionado.

a.1) Consistência (Manutenção da Consistência)

Uma das principais propriedades que deve ser observada no CAD é a sua consistência, ou a manutenção dela, uma vez que a presença de aditivos em grandes doses e de adição mineral tende a reduzir a sua plasticidade e a proporcionar perdas de abatimento rápidas (SAADA *et al*., 1990; HU e DE LARRARD, 1996). A compatibilidade entre cimento-aditivo e adições deve, no entanto, ser estudada (RONCERO, 2000). Como o CAD não possui muita água além da necessária para a hidratação do aglomerante, no momento em que são perdidos os efeitos proporcionados pelos aditivos, o concreto perde fluidez (DUVAL *et al*., 2000; GONÇALVES e BETTENCOURT-RIBEIRO, 2000).

a.2) Teor de Ar Aprisionado

O ar aprisionado no concreto fresco é uma característica natural das misturas líquidas, que pode acarretar prejuízos ao concreto. Valores entre 0,5% e 2% são comuns nas misturas e o procedimento e o tempo de mistura são os dois fatores principais que condicionam a quantidade de ar aprisionado (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

A quantidade de ar aprisionado influencia sensivelmente a resistência à compressão dos concretos. No caso do CAD, muitos são os registros de aprisionamento de ar em quantidades grandes, em grande parte pelo uso de aditivos superplastificantes em grandes doses (TOGNON e CANGIANO, 1982; AÏTCIN, 2000a). Em alguns casos, alterando-se os procedimentos de mistura pôde-se obter resultados mais interessantes com os mesmos CAD utilizando aditivos superplastificantes em várias doses (PAILERE *et al.*, 1990; WILLIAMS *et al*., 1999).

b) Propriedades no Estado Endurecido

As propriedades do CAD de maior interesse no estado endurecido são: resistência à compressão e tração na flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

b.1) Resistência à Compressão

Como resistência à compressão, de uma forma geral, entende-se a capacidade de resistir à aplicação de tensões de compressão sem ruptura. Na forma experimental, ela é definida na normalização nacional pela NBRNM 101 (ABNT, 1996). A resistência à compressão é a principal propriedade especificada para projeto nos códigos de obra em todo o mundo e também na NBR 6118 (ABNT, 2003) que rege os projetos de estruturas de concreto normal, e em que se baseiam os projetistas brasileiros. Aïtcin (2000a) classifica os CAD pelos seus valores de resistência à compressão aos 28 dias, e os divide em cinco faixas definidas de resistências, como mostrado na Tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Classes de CAD pela resistência à compressão (AÏTCIN, 2000a)

Classe	Resistência à Compressão (MPa)
Classe I	50-75 MPa
Classe II	75-100 MPa
Classe III	100-125 MPa
Classe IV	125-150 MPa
Classe V	Maior que 150 MPa

O autor comenta que a Classe I pode ser produzida mesmo sem a incorporação de material cimentício suplementar, ficando a Classe II condicionada a esta incorporação. As Classes III, IV e V necessitariam não apenas de material cimentício suplementar, mais especificamente de sílica ativa, que é um material de maior reatividade. Atualizando esta afirmação feita por Aïtcin (2000a) pode-se dizer que sílica ativa ou metacaulim podem ser utilizados para produzir os CAD mais resistentes, baseando-se em comparações entre os dois materiais, como encontrado nos trabalhos de Barata (1998) e Souza (2003).

b.2) Resistência à Tração

Embora não seja muito utilizada pelos projetistas para fins de projeto estrutural, a resistência à tração do concreto é uma propriedade de fundamental importância no estudo termo-mecânico, pois as tensões de tração geradas pelo aquecimento/resfriamento da estrutura podem se aproximar da resistência do material nas idades iniciais (CALMON, 1995).

Segundo Price (1951), a resistência à tração pode ser estimada como cerca de 10% a 11% para concreto com baixas resistências. Para Neville (1997) podem ser esperadas 8% a 9% para concretos com média resistência e em torno de 7% para concretos com alta resistência. Ele cita que estas estimativas têm sido comprovadas por diversos pesquisadores.

Para a determinação experimental da resistência à tração, há três tipos de ensaios, a saber:

- Determinação da resistência à tração direta – por meio de um ensaio de difícil execução por problemas de fixação do corpo de prova ao equipamento, no qual ao aplicar-se a carga são introduzidas tensões secundárias indesejadas;
- Determinação da resistência à tração indireta ou por compressão diametral – proposta pelo Prof. Lobo Carneiro com cilindros de corpos de prova que seguem a recomendação de que a altura é igual a duas vezes o diâmetro, sendo submetidos a cargas de compressão ao longo de suas linhas axiais diametralmente opostas. A carga é aplicada continuamente, a uma velocidade constante. Este procedimento está regulamentado pela norma NBRNM 8 (ABNT, 1994);
- Determinação da resistência à tração na flexão – onde uma viga com seção de 15 cm x 15 cm, tendo um vão de 50 cm é submetida a uma carga em cada terço do vão com taxa de aplicação de carga de 0,8 a 1,2 MPa/min. No Brasil, a norma que regulamenta este procedimento de ensaio é a NBRNM 55 (ABNT, 1996).

Os resultados obtidos de ensaios por tração indireta e tração na flexão são superiores aos de resistência à tração direta na ordem de 13% e 10%, respectivamente (NEVILLE, 1997).

b.3) Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade, ou módulo de deformação, constitui uma das propriedades mais importantes do projeto de estruturas, devido à necessidade da determinação das deformações dos elementos estruturais existentes nos projetos. Como o que acontece para a obtenção de valores de resistência à tração, são utilizadas fórmulas de abrangência limitada para o módulo de elasticidade (NEVILLE, 1997). Aïtcin (2000a), cita que o CAD ganhou em qualidade mas perdeu em simplicidade para a determinação do valor desta propriedade, uma vez que outros parâmetros estão envolvidos, e dependendo do tipo de obra e do volume de concreto, cabe um estudo específico para a situação, avaliando-se o módulo, com os materiais utilizados. Desta forma, acredita-se poder otimizar o projeto e, o custo para execução e futura manutenção (HUO *et al*., 2001).

No Brasil, a NBR 8522 (ABNT, 2004) regulamenta os ensaios para obtenção de módulo de deformação do concreto, e internacionalmente, muitos ensaios são realizados seguindo a norma da ASTM C 469 *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression* (ASTM, 1994).

b.4) Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson é definido como a relação entre as deformações longitudinais e transversais do concreto, quando nele atua uma carga uniaxial. A aplicação de uma carga de compressão provoca deformações laterais que são associadas à ruptura do concreto. Para um material isótropo com comportamento elástico linear, o coeficiente de Poisson é constante, mas, no concreto, pode ser influenciado por condições específicas. Para tensões sob relação linear entre a tensão aplicada e a deformação longitudinal, o valor do coeficiente de Poisson é aproximadamente constante (NEVILLE, 1997).

São limitados os dados sobre o coeficiente de Poisson do concreto em geral, e do CAD em particular. Em geral, os valores do coeficiente de Poisson do CAD são semelhantes aos atingidos pelos concretos usuais, e variam numa faixa entre 0,15 a 0,20 (ZIA *et al.*, 1997). Persson (1998) encontrou valores para o CAD ligeiramente menores que o dos concretos usuais. Os valores obtidos variaram entre 0,13 e 0,16 para o CAD com adições de 5% a 10% de sílica ativa, corroborando ao trabalho de Kaszyńska (2002). Aïtcin (2000a) resume que há poucos registros do coeficiente de Poisson devido aos diversos parâmetros e às dificuldades envolvidas no ensaio. Grande parte dos resultados disponíveis foi obtida segundo a ASTM C469 (ASTM, 1994).

2.1.3. Durabilidade

Desde o início da última década, o CAD passou a ser referenciado como um material de durabilidade superior aos concretos convencionais, sendo por este motivo preterido em situações em que estruturas de concreto possam estar expostas a sérios riscos de degradação físico-química ou simplesmente por opção de se estender a vida útil de projeto das mesmas (MORENO, 1998; AÏTCIN, 2000a; SCHELL e KONECNY, 2003).

A menor permeabilidade do CAD torna-o resistente ao ataque por agentes externos (PIGEON *et al.*, 1991). Há ainda indícios de que os poros remanescentes sejam menos contínuos, mais segmentados ou obstruídos, o que lhe confere baixa permeabilidade (ALMEIDA, 1990). Devido à baixa porosidade e permeabilidade, ele é um material com maior resistência aos ataques de cloretos e sulfatos, favorecendo a sua resistência contra a

corrosão das armaduras (DURNING e HICKS, 1991; AMBROISE e PÉRA, 2003; GUERINI *et al*., 2003). Além disso, o CAD apresenta maior resistência à carbonatação, por dificultar o ataque de agentes agressivos gasosos como o CO_2 (EPUSP, 2004)

A baixa permeabilidade também impede que a água penetre no concreto (MOHAMMED *et al*., 2003; MOUNANGA *et al*., 2003), limitando a mobilidade de íons, sendo o mesmo mais resistente ao risco de reação álcali-agregado. A resistência à abrasão é maior que a dos concretos comuns, não somente devido à alta resistência, mas também devido à boa aderência agregado graúdo-matriz, que impede o desgaste diferencial da superfície (NEVILLE, 1997; ROY *et al*., 2001).

Tudo isto tornou o CAD um material procurado pela maior durabilidade, e não somente pela elevada resistência, como poderia ser esperado.

2.1.4. As Perspectivas de Utilização do Concreto de Alto Desempenho

Todas as vantagens oferecidas pela utilização dos CAD e a maior disponibilidade de seus materiais constituintes típicos no mercado tornaram este material uma realidade na Construção Civil, proporcionando uma série de benefícios. Além das vantagens técnicas já apresentadas anteriormente, estima-se que a aplicação do CAD possa diminuir o custo global de muitas obras (SMITH, 1989; MORENO, 1998).

Um estudo de viabilidade econômica, realizado por Dal Molin e Wolf (1991), apresentou uma tendência de redução de custos, com o aumento da resistência do concreto, chegando a 12% do valor total da estrutura ao se elevar a resistência característica do concreto de 21 MPa para 60 MPa. No estudo foi utilizada a Norma NBR 6118 anterior à revisão de 2003.

As evoluções do material e suas aplicações também já ocorreram, principalmente no que tange aos concretos leves de alto desempenho – que aliam as elevadas resistências e durabilidade ao reduzido peso próprio, aos CAD com fibras – que conferem maior ductilidade ao material e, no caso da fibra de polipropileno, melhor comportamento frente a altas temperaturas – e ao concreto projetado de alto desempenho – que amplia a aptidão do material aos serviços de recuperação, reforço e contenção de estruturas (COPPOLA *et al*., 1995; BICKLEY e MITCHELL, 2001; COLLEPARDI, 2003).

Desta maneira, as possibilidades de aplicação do CAD se tornam cada vez mais amplas, fazendo-se necessário um acompanhamento em pesquisa para que se possa obter o máximo de vantagens sobre este material.

2.2. O PAPEL DOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES NO CAD

Os aditivos superplastificantes ou redutores de água são substâncias orgânicas, geralmente subprodutos industriais, incorporadas aos concretos em pequenas quantidades, durante o processo de mistur, para modificar suas propriedades no estado fresco ou endurecido (MEHTA e MONTEIRO, 1994; RIXOM e MAILVAGANAM, 1999). Normalmente a quantidade de aditivo é limitada a teores em torno de 0,5% da massa de aglomerante, mas este limite pode ser ultrapassado para certos tipos de concreto, dentre os quais o CAD (AÏTCIN *et al.*, 1994; HOVER e STOKES, 1995; HOVER, 1998).

A indústria química tem provocado grandes impactos econômicos na indústria do concreto, desenvolvendo novas aplicações específicas ou melhorando os proporcionamentos de materiais para o concreto (RAMACHANDRAN, 1995; RIXOM, 1998).

2.2.1. Motivação Para o Uso de Aditivos Superplastificantes

Os aditivos superplastificantes ou redutores de água são substâncias orgânicas incorporadas aos concretos com dois únicos propósitos, quais sejam: (1) reduzir a relação água-aglomerante mantendo uma consistência fixa e (2), alternadamente, melhorar a consistência, mantendo uma relação água-aglomerante constante (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

Rixom (1998) apresenta quatro casos típicos de utilização de aditivos que causaram impactos na indústria do concreto, dois deles de superplastificantes. Como objetivos alcançados estão a redução do esforço humano, com melhor manuseio, lançamento e acabamento dos concretos utilizados, resultando em economia. Pode-se encontrar uma descrição completa de outras aplicações de superplastificantes em Malhotra (1997)

A economia na produção de concreto utilizando aditivos superplastificantes é bastante conhecida na tecnologia do concreto e muito utilizada na indústria. A Figura 2-3 mostra como “misturas correspondentes” contendo diferentes quantidades de cimento Portland, podem alcançar mesma consistência, resistência e durabilidade com o uso de redutores de água em misturas com baixa relação água-cimento, os quais ainda podem melhorar suas propriedades como retração por secagem, fluência e tensões térmicas (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

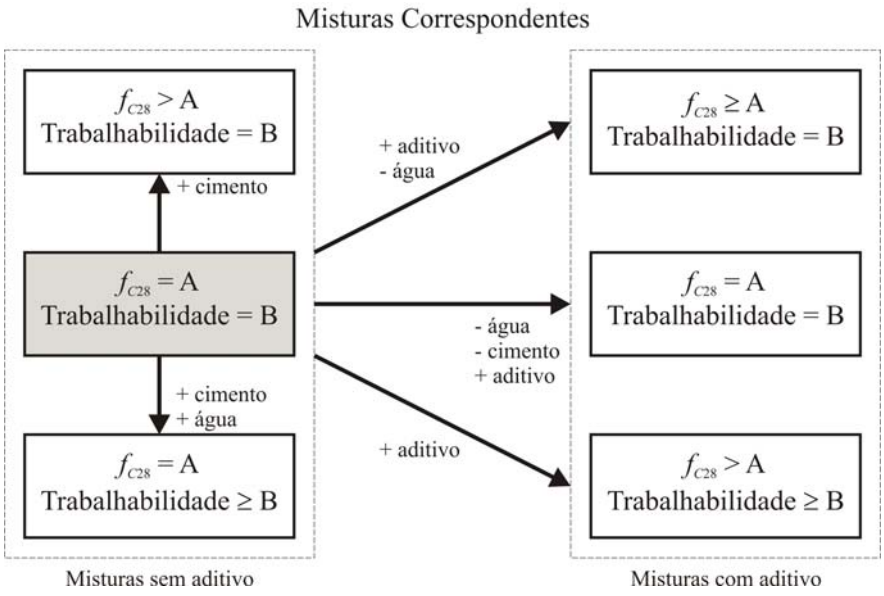


Figura 2-3 – Misturas equivalentes com superplastificantes (RIXON e MAILVAGANAM, 1999)

No entanto, na indústria da construção, onde a economia de cimento reduz os custos da produção, os clientes – Engenheiros de obra – introduziram o método dos "três pontos" de avaliar os aditivos (RIXOM, 1998). Nele três misturas de concreto são produzidas com três quantidades diferentes de cimento, com e sem aditivo, para uma consistência inicial de referência, e é plotado o gráfico resistência à compressão aos 28 dias versus consumo de cimento. A Figura 2-4 mostra um gráfico de três pontos para consumos de cimento variáveis, uma série utilizando adição de 0,25% de aditivo, retirando-se em média 4% da quantidade de água para o concreto de referência manter o comportamento reológico.

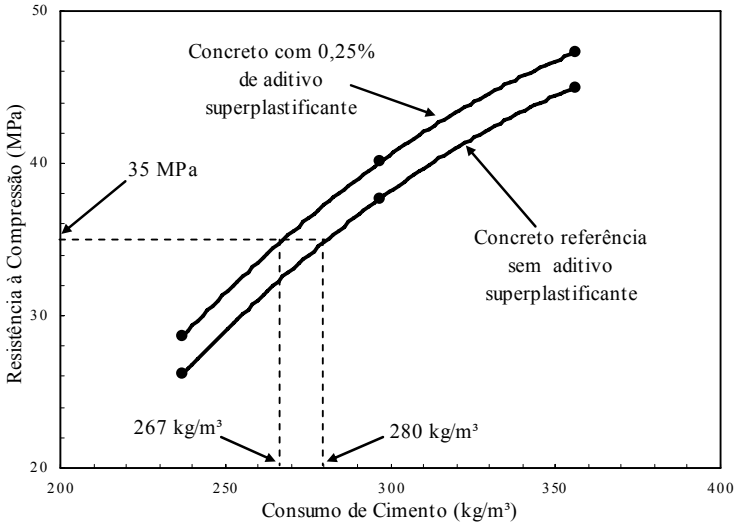


Figura 2-4 – Curva de três pontos para dosagem de aditivo superplastificante (RIXON, 1998)

Pode-se ver na Figura 2-4 que, para um concreto com resistência à compressão aos 28 dias de 35 MPa, podemos utilizar "misturas correspondentes", contendo 280 kg/m^3 ou apenas 267 kg/m^3 de cimento, com a utilização de aditivo superplastificante, mantendo-se um mesmo comportamento reológico. Neste estudo, especificamente, o autor mostra que não houve redução de custo no preço final do concreto (US$ 30,61 e US$30,59), embora tenha se produzido um concreto com características de durabilidade superiores: conclui-se que é possível produzir concreto mais durável, sem elevação nos custos de produção.

Outros dois pontos-chave, ainda, são importantes. Primeiro, que o preço do cimento vem crescendo no decorrer dos anos no mercado internacional, de tal forma que mesmo com a intensa utilização de adições minerais, não é possível estabilizar os custos de produção cada vez maiores (MEHTA, 1997; AÏTCIN, 2000b). Segundo, que o avanço na tecnologia dos produtos químicos vem diminuindo rapidamente os seus preços, além de aumentar o nível de eficiência dos mesmos (PHELAN, 1998).

2.2.2. Histórico dos Aditivos Superplastificantes

Os aditivos superplastificantes são polímeros orgânicos solúveis em água, obtidos como subprodutos da indústria ou sinteticamente, por polimerização (BUEKETT, 1998; RIXOM e MAILVAGANAM, 1999; AÏTCIN, 2000a). São aniônicos com grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarboneto, formando longas moléculas que envolvem as partículas de cimento de carga negativa e que, devido a fenômenos físico-químicos, como as forças de Van der Waals, geram dispersão (UCHIKAWA *et al*., 1995; FLATT, 1999; BLASK e HONERT, 2003). Assim, partículas de cimento com cargas opostas, que tendem a atrair-se, podem se repelir e pode haver uma hidratação melhor e mais rápida do cimento. Como resultado, obtém-se um concreto de boa consistência e resistência, devido à redução de água necessária para dar fluidez à mistura (NMEI *et al*., 1995; AÏTCIN, 2000b).

a) <u>Formulações Químicas</u>

Pode-se considerar que existem três grandes grupos de aditivos superplastificantes, em alguns casos descritos como três gerações[7]: os condensados de lignossulfonados modificados, ácidos hidroxi-carboxílicos e polímeros hidroxilatos, ou *aditivos de primeira geração*, os condensados sulfonados de melamina-formaldeídos, condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos e os poliacrilatos, ou *aditivos de segunda geração* e os ésteres de ácido sulfônico, base policarboxilato, *aditivos de terceira geração* (AÏTCIN, 2000a).

[7] Em alguns mercados consumidores os aditivos superplastificantes são classificados comercialmente como aditivos superplastificantes de primeira, segunda ou terceira geração. Essa nomenclatura foi apresentada inicialmente pelos próprios produtores em seus manuais.

a.1) Aditivos Base Lignossulfonato ou de Primeira Geração

Os aditivos base lignossulfonato são utilizados como redutores de água e em alguns casos como superplastificantes (RIXOM E MAILVAGANAN, 1999). Eles são obtidos do rejeito líquido do processo de extração da celulose da madeira, um subproduto que contém uma mistura complexa de produtos da lignina entre 20% a 30%, produtos da decomposição da celulose, carboidratos e ácidos sulfurosos livres ou sulfatos (AÏTCIN *et al*., 1994; RIXOM e MAILVAGANAN, 1999).

Esses aditivos são beneficiados por processos relativamente simples para eliminar os açúcares, sendo algumas vezes processados por fracionamento, para aumentar a massa molecular média. As suas composições podem variar em função do processo de fabricação, caso ocorra neutralização, precipitação ou fermentação (RIXOM e MAILVAGANAN, 1999). A massa molecular, no entanto, é um índice da eficiência do aditivo na dispersão das partículas de cimento, sendo atualmente produzidos aditivos com cadeias mais longas e de maior massa molecular (ANDERSEN *et al*., 1986). A estrutura molecular típica de um lignossulfonato está apresentada na Figura 2-5.

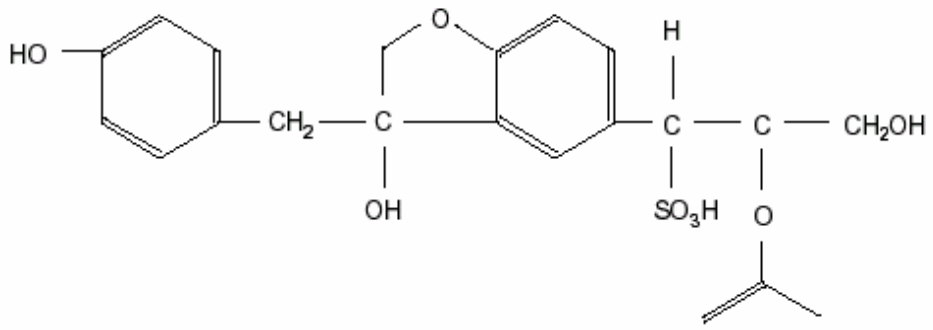


Figura 2-5 – Monômero de um lignossulfonato (RIXON e MAILVAGANAM, 1999)

Os aditivos lignossulfonatos são conhecidos por apresentarem problemas de retardo de pega, pois originalmente contêm altos teores de açúcares na sua composição – a lignina, o que pode gerar atrasos no endurecimento do concreto, além de incorporação indesejável de ar à mistura (TOGNON e CANGIANO, 1982). Alguns fabricantes, no entanto, submetem estes subprodutos industriais a processos de purificação mais refinados para remoção dos açúcares, por meio de ultra filtragens, tratamentos térmicos com pH controlado e fermentação, reduzindo os efeitos secundários e obtendo aditivos praticamente sem capacidade de provocar retardos de pega e incorporação de ar, no entanto um pouco mais caros (AÏTCIN, 2000a).

Os lignossulfonatos, segundo a literatura, permitem uma redução da água da mistura entre 8 e 12%, mas alguns fabricantes afirmam que a redução de alguns de seus produtos pode chegar a 15% (RIXOM E MAILVAGANAN, 1999). Quando utilizados em altas dosagens, no extremo destes intervalos, podem causar excessivo retardo da pega e incorporação de grande quantidade de ar no concreto fresco, por isso não é indicado o uso sem certificação experimental da dosagem (AÏTCIN *et al*., 1994).

a.2) Aditivos Base Naftaleno ou de Segunda Geração

A substância química naftaleno foi uma das primeiras a serem referenciadas na literatura técnica como um agente de redução de água nas misturas de concreto, como encontrado em Dodson (1990). No entanto, somente na década de 1970 ela foi empregada com exclusividade para a produção de aditivos superplastificantes.

Os aditivos a base de naftaleno são produzidos a partir da sulfonação e consequente polimerização dos semi-produtos. O processo genérico de produção dos aditivos base naftaleno está descrito em Rixom e Mailvaganam (1999) e algumas etapas também podem ser encontradas em Aïtcin (2000a). Os mecanismos de ação foram descritos por Dezhen *et al*. (1982). A Figura 2-6 apresenta a estrutura molecular do aditivo base naftaleno, segundo Ramachandran (1995), Ramachandran e Malhotra (1998) e Rixom e Mailvaganam (1999).

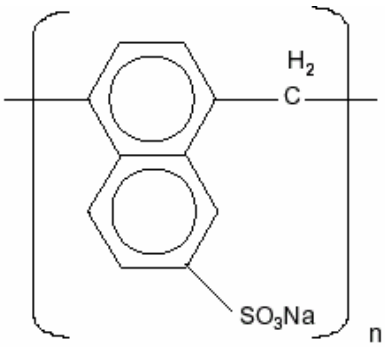


Figura 2-6 – Monômero de um naftaleno (RAMACHANDRAN, 1995; RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1998; RIXON e MAILVAGANAM, 1999)

Esse tipo de aditivo, assim como os aditivos base naftaleno sulfonado e os poliacrilatos, são conhecidos comercialmente como aditivos de segunda geração e permitem a redução em até 25% da quantidade de água da mistura, se usados como redutores de água (NEVILLE, 1997; AÏTCIN, 2000a).

a.3) Aditivos Base Policarboxilato ou de Terceira Geração

Os aditivos superplastificantes base policarboxilato são os aditivos mais recentemente utilizados na produção do concreto, disponíveis no mercado desde a década de 1990. Eles são também conhecidos como aditivos superplastificantes de alta eficiência ou ainda, como aditivos hiperplastificantes, pois permitem uma redução de água das misturas em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade, em alguns casos (AÏTCIN, 2000a).

Os aditivos base policarboxilato conferem considerável aumento na fluidez dos concretos, o que permite a utilização em concretos fluídos e auto-adensáveis e na redução da quantidade de água, possibilitando o emprego de concretos de elevada resistência, trabalhabilidade e durabilidade (COLLEPARDI, 1998; AÏTCIN, 2000a; COLLEPARDI, 2003). Esses aditivos poliméricos apresentam larga distribuição de massa molecular e sua caracterização química é muito complexa, assim como seus processos de produção. As propriedades desses aditivos são influenciadas, principalmente, pelo comprimento de sua cadeia e pelo número de reações em uma cadeia de aditivo – Figura 2-7.

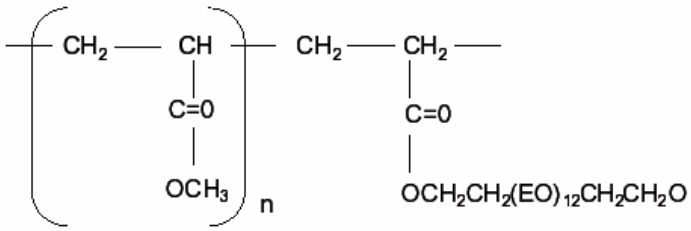


Figura 2-7 – Monômero de um policarboxilato (RAMACHANDRAN et *al*., 1998)

A estrutura desses polímeros é formada geralmente por grupos carboxílicos (COOH) e apresenta cadeias laterais de diferentes comprimentos. Para o controle da eficiência, sabe-se que a dispersão e a defloculação das partículas de cimento podem ser controladas por meio da mudança do comprimento dessas cadeias e, ainda, pela mudança da cadeia central (YAMADA *et al.*, 2000). Ramachandran (1998) explica que já foi estudado o efeito do comprimento da cadeia principal desses polímeros na dispersão/defloculação do cimento. Em estudos sobre os efeitos da estrutura química dos superplastificantes policarboxilato na fluidez das pastas de cimento foi constatado que, para uma mesma dosagem de aditivo, quanto maior o tamanho da cadeia desse aditivo, mais fluída é a mistura e menor é o seu tempo de pega; e também, quanto maior a quantidade de grupos sulfônicos e carboxílicos presentes nos polímeros, maior a fluidez do sistema, para uma mesma dosagem de aditivo.

2.2.3. Mecanismos de Ação

Embora muitas pesquisas já tenham sido realizadas procurando um conhecimento mais profundo sobre a reação de hidratação de cimento Portland na presença de aditivos, algumas vezes focando os aspectos físicos (CARINO e LEW, 1983; ANDERSEN, 1986; FOISSY e PIERRE, 1990; MIKANOVIC *et al*., 2000), em outras os aspectos químicos, (ANDERSEN *et al.*, 1986; DIAMOND e STRUBLE, 1987) e o efeito dos aditivos nas diferentes fases constituintes: C_3S, C_2S, C_3A, e C_4AF (MASSAZZA e COSTA, 1980; AÏTCIN e SARKAR, 1987), não existe, ainda, uma teoria bem aceita explicando a ação dos aditivos sobre as partículas do cimento durante a mistura e hidratação inicial, e sobre os produtos intermediários do processo de hidratação do cimento (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999; AÏTCIN, 2000a).

Um ponto muito importante na interação entre cimento e aditivo é a interelação entre cimento e sulfatos, e destes com o aditivo, comentado por Jolicoeur *et al.*, (1994) e Aïtcin (2000a) – ver Figura 2-8.

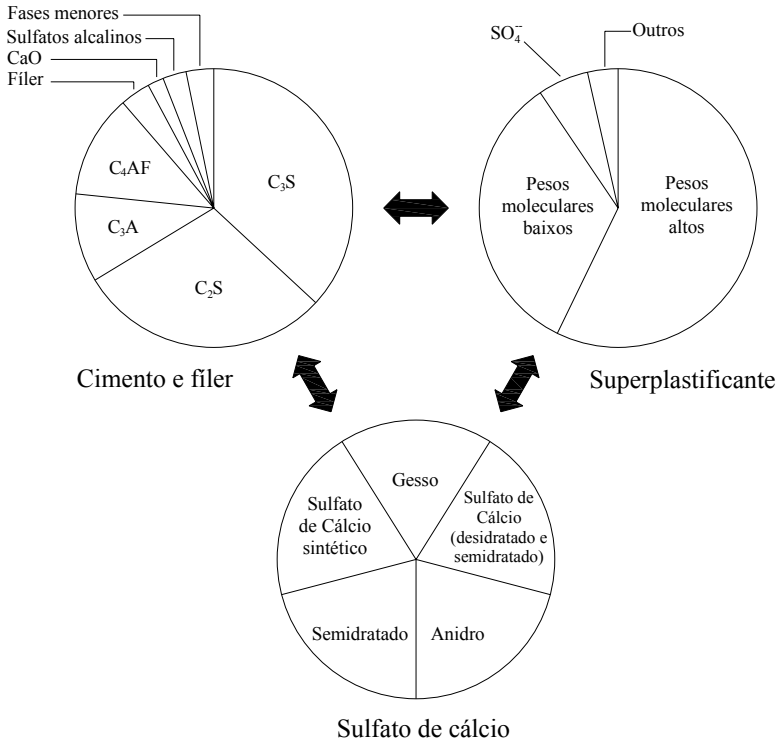


Figura 2-8 – Interações entre cimento Portland, sulfato de cálcio e aditivos (JOLICOEUR *et al*., 1994)

Os aditivos agem quando adsorvidos nas partículas de cimento, provocando repulsão que resulta na dissociação do cimento aglomerado em partículas, com grande redução da

viscosidade do sistema cimento-água-aditivo. Esses aditivos, principalmente os aditivos base lignossulfonato, também podem reduzir a tensão superficial da água, aumentando o efeito de "lubrificação" das partículas de cimento (FOISSY e PIERRE, 1990).

Ao entrar em contato com a água, as partículas de cimento tendem à floculação, resultado de diversos tipos de interações, tais como a ação das forças de Van der Waals entre as partículas. Certa quantidade de água, que tem característica apolar, fica aprisionada entre os grãos de cimento, reduzindo a água disponível e a lubrificação. Tais fenômenos aumentam a viscosidade e reduzem a área específica dos grãos de cimento disponíveis para a hidratação (CARINO e LEW, 1983; ANDERSEN, 1986; FOISSY e PIERRE, 1990).

A hidratação do cimento inicia-se logo que os seus grãos entram em contato com a água. Devido à elevada finura, uma grande superfície das fases reativas está em contato com a água (CARINO e LEW, 1983). A distribuição homogênea da água para a lubrificação e para a adsorção na superfície dos grãos necessita que as partículas estejam defloculadas e mantenham-se com alto grau de dispersão – Figura 2-9 (ANDERSEN, 1986).

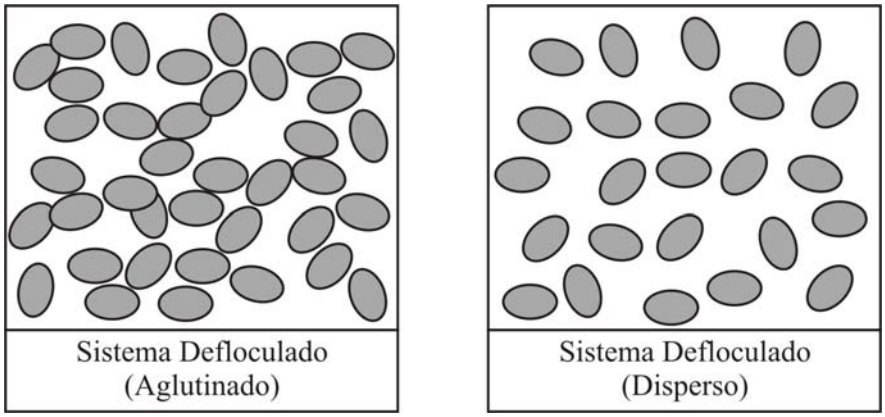


Figura 2-9 – Efeito da defloculação dos grãos de cimento (AÏTCIN et al., 1994)

Segundo Aïtcin *et al*. (1994) e Aïtcin (2000a), todos os tipos de cimento Portland podem sofrer o fenômeno da floculação, sendo os aditivos capazes de reduzir essa tendência.

a) <u>Interações Físicas</u>

a.1) Adsorção do Aditivo ao Redor das Partículas de Cimento

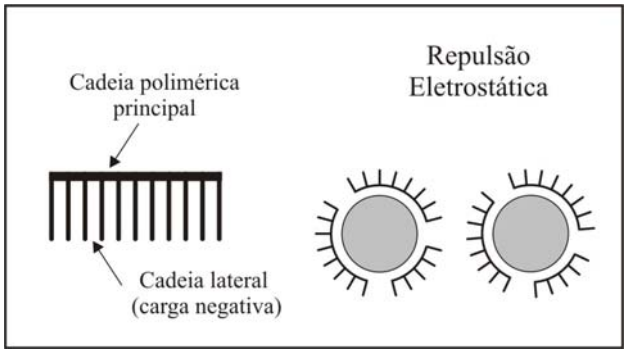
A adsorção das moléculas do aditivo ao redor das partículas de cimento se deve às forças eletrostáticas (forças de Van der Waals) e varia com o grupo funcional do aditivo – ver Kim *et al*. (2000) e YOSHIDA *et al*., (2002). Sabe-se que adsorção de aditivo se dá em maior quantidade na fase aluminato do que na fase silicato (UCHIKAWA *et al*., 1995;

RIXOM e MAILVAGANAM, 1999). Nawa *et al.* (1989) comprovaram que a presença de SO_3 também pode inibir a adsorção nos aluminatos (C_3A e C_4AF), permitindo o aumento na adsorção nos silicatos (C_3S e C_2S), dependendo somente da presença dos sulfatos do cimento. Estes autores indicam que parece haver um teor ótimo de sulfatos no cimento que parece prover uma melhor fluidez à mistura.

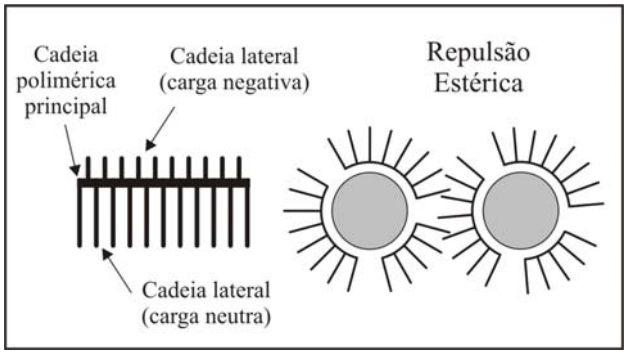
Uchikawa *et al*. (1995), Collepardi (1998) e Rixom e Mailvaganam (1999) observaram que a quantidade de aditivo adsorvida pelas partículas de cimento é menor quando o mesmo é adicionado após a mistura do cimento à água. O efeito retardante do aditivo acontece a todos os tipos de base, sendo proporcional à sua concentração, e é geralmente maior em cimentos com baixo teor de C_3A. Nestes, a quantidade de aditivo que é adsorvida pelo C_3A é menor, e logo, há mais aditivo para ser adsorvido nas outras fases e reduzir a reação superficial. Nos cimentos usuais, as quantidades de C_3A podem proporcionar significante retardo, caso sejam utilizadas grandes dosagens (UCHIKAWA *et al*., 1995).

a.2) Geração de Forças Repulsivas Entre Partículas de Cimento

Basicamente, as forças repulsivas entre as partículas de cimento podem ser provenientes da repulsão eletrostática ou da repulsão estérica (FLATT, 2001) – Figura 2-10.



(a) Ação dos aditivos melamina e naftaleno



(b) Ação dos aditivos policarboxilatos

Figura 2-10 – Mecanismo de repulsão eletrostática (COLLEPARDI *et al*., 1999)

– Repulsão Eletrostática

Os produtos base melamina, naftaleno ou lignossulfonato atuam principalmente por repulsão eletrostática, isto é, eles são atraídos e adsorvidos pela superfície carregada das partículas de cimento, conferindo-lhe a mesma carga e provocando repulsão e dispersão da mistura. O efeito desse fenômeno é o aumento da fluidez e a redução da demanda de água de amassamento. Com o decorrer da hidratação do cimento, ainda no estado fresco, os polímeros são "aprisionados" pelos produtos hidratados que se precipitam e perdem seu efeito (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999). Assim, o sistema é gradualmente floculado, diminuindo a trabalhabilidade e resultando em perda de abatimento.

– Repulsão Estérica

Os produtos base policarboxilato também atuam por repulsão eletrostática, mas não é esse o seu mecanismo principal de ação, uma vez que formação da dupla camada elétrica e do potencial zeta atuam na manutenção da repulsão estérica, como discutido por Uchikawa *et al*. (1997). A Figura 2-11 mostra o esquema de formação da camada dupla e do potencial zeta apresentado por estes autores.

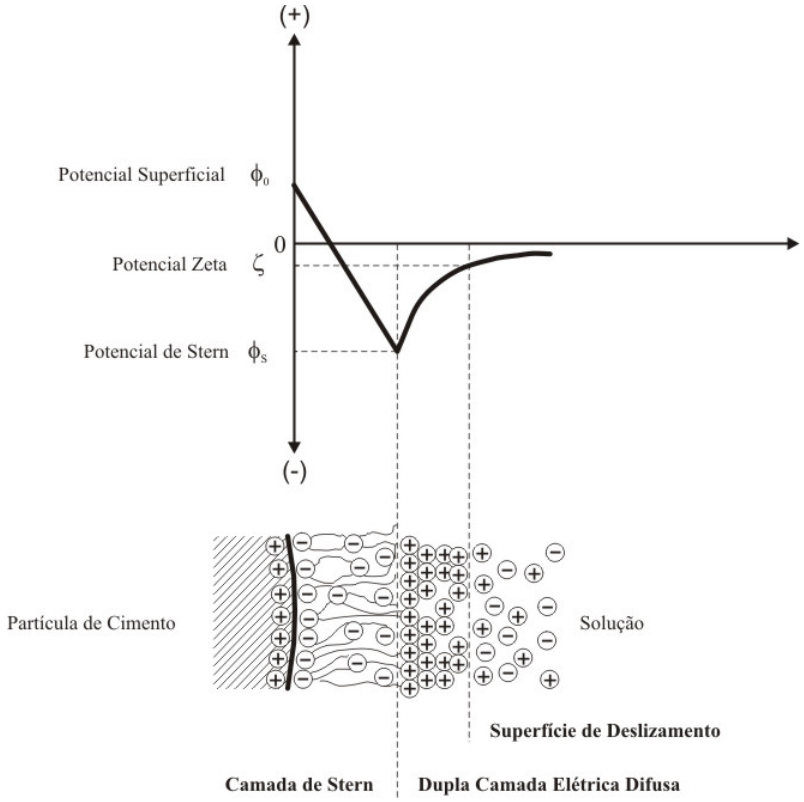


Figura 2-11 – Formação da dupla camada elétrica e do potencial zeta (UCHIKAWA *et al*., 1997)

Como pode ser encontrado em Uchikawa *et al*. (1997), além de agir por repulsão eletrostática, a dispersão das partículas de cimento, responsável pelo aumento da fluidez, pode ser relacionada ao efeito conhecido como repulsão estérica que é produzida pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero.

A arquitetura montada ao redor das partículas de cimento por este efeito produz forte dispersão, pois o impedimento do contato entre cadeias laterais de diferentes moléculas de aditivos cria uma capa de adsorção de grande volume que impede a aproximação das partículas, oferecendo vantagens, como manter o abatimento por mais tempo que os demais aditivos (UCHIKAWA *et al*., 1997; RONCERO, 2000).

b) Interações Químicas

As interações químicas entre partículas de cimento e aditivo existem, no entanto desempenham papel secundário na dispersão total do sistema, quando seus efeitos são comparados aos efeitos das interações físicas (UCHIKAWA *et al*., 1997).

As interações químicas podem ser resumidas como a *adsorção química* entre as partículas de cimento e as moléculas de aditivo e a *formação de íons complexos* entre o superplastificante e o Ca^{++}, que reduz a concentração de Ca^{++} e contribui para o retardo da pega, e ao aumento do tempo de fluidez (JOLICOUER e SIMARD, 1998).

Andersen *et al*. (1986) e Diamond e Struble (1987) discutem detalhadamente os aspectos químicos que envolvem a relação de hidratação do sistema cimento-aditivo, sendo importantes fontes de pesquisa bibliográfica.

2.2.4. A Normalização dos Aditivos Superplastificantes

No Brasil, os aditivos superplastificantes têm sua classificação estabelecida pela NBR 11768 (ABNT, 1992) – ver Tabela 2-3. Outros tipos de aditivos estão disponíveis em países estrangeiros mas não são tratados em normas nacionais.

A norma Americana equivalente à NBR 11768 é a ASTM C 494 Standard specification for chemical admixtures for concrete (ASTM, 2005), que classifica os aditivos superplastificantes. O comitê N° 212 do ACI apresenta uma publicação de especificação: 212.3R-04: *Chemical admixtures for concrete* e um guia para utilização destes produtos: 212.4R-04: *Guide for the use of high-range water-reducing admixtures (superplasticizers) in concrete*, não havendo documento equivalente no Brasil.

Tabela 2-3 – Classificação dos aditivos superplastificantes segundo a NBR 11768 (ABNT, 1992)

Tipo de Aditivo	Definição	Propriedade
P	Plastificantes	Produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada consistência.
R	Retardadores	Produto que aumenta os tempos de início e fim de pega do concreto.
A	Aceleradores	Produto que diminui os tempos de início e fim de pega do concreto, bem como acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais.
PR	Plastificantes retardadores	Produto que combina os efeitos dos aditivos plastificante e retardador.
PA	Plastificantes aceleradores	Produto que combina os efeitos dos aditivos plastificante e acelerador.
IAR	Incorporadores de ar	Produto que incorpora pequenas bolhas de ar ao concreto.
SP	Superplastificantes	Produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir um concreto com determinada consistência.
SPR	Superplastificantes retardadores	Produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e retardador.
SPA	Superplastificantes aceleradores	Produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e acelerador.

2.2.5. A Hidratação do Cimento na Presença de Superplastificantes

O endurecimento da pasta de cimento se processa a partir de reações químicas entre seus diferentes compostos, as quais possuem diferentes velocidades de reação e atuam umas sobre as outras. O processo de endurecimento da pasta, ou de hidratação do cimento, se dá resumidamente em quatro estágios, de dissolução, indução, precipitação e de difusão.

No *primeiro estágio*, a água entra em contato com o cimento (quinze minutos iniciais) e os compostos de cimento anidro são dissolvidos e formam hidratos, passando-se a constituir uma solução, ao invés de duas fases definidas. Inicia-se a liberação de calor em grande quantidade, em taxa que diminui rapidamente durante o período de indução, que é o estágio após a dissolução do cimento na água de mistura (LEA, 1971).

O *estágio de indução*, também conhecido como período de dormência, ocorre após os quinze minutos iniciais e pode durar até cerca de 4 horas após a mistura. Predominam as

reações das fases aluminato, e é nesse estágio que a concentração de SO_4^{-2} desempenha seu papel no crescimento dos cristais de etringita e na pega da pasta (PRINCE *et al*., 2002). Se a sua concentração for baixa, ocorre o fenômeno conhecido como pega rápida. Caso contrário, tem-se a falsa pega. As interações cimento-superplastificante podem inibir a falsa pega, uma vez que podem anular os efeitos do SO_4^{-2} (HANEHARA e YAMADA, 1999; BROOKS *et al*., 2000; PRINCE *et al*., 2003).

O estágio de aceleração, o terceiro (conhecido como início de pega), se inicia com novo aumento da taxa de hidratação, cerca de 4 horas após a mistura. Há a redução no desenvolvimento do calor e diminuição da velocidade de reação. Essa fase é controlada pela difusão dos íons. As reações continuam quando da existência de cimento anidro e espaço disponível para a precipitação de produtos hidratados (LEA, 1971).

Os diferentes tipos de aditivos superplastificantes podem dificultar significativamente o estudo da hidratação do cimento, uma vez que os diferentes modos de interação com o cimento podem alterar a cinética da reação, e a morfologia dos produtos formados (NAKAJIMA *et al*., 2003). Segundo Jolicoeur e Simard (1998) as diferentes atuações de cada tipo de aditivo são causadas por vários efeitos, dentre eles, a adsorção diferenciada, que dificulta a difusão da água e dos íons de cálcio na interface cimento/solução; a ação dos íons Ca^{++} dos aditivos, que alteram a nucleação/precipitação dos produtos que contém cálcio; e a forte ação dispersante, que altera a cinética de crescimento e morfologia dos produtos hidratados.

Logo após a adição à mistura, o aditivo pode estar livre na água (formando a solução) ou adsorvido. A adsorção no C_3A ocorre rapidamente, em poucos segundos, retardando o prosseguimento da hidratação (RAMACHANDRAN, 1983; GUSTAFSSON e REKNES, 2000). Os aditivos também podem retardar a hidratação nas fases silicatos (C_2S e C_3S). No entanto, este efeito é mais fraco do que no C_3A. Ramachandran *et al.* (1998) afimam que os aditivos base naftaleno e melamina retardam a hidratação do C_3A. Na Figura 2-12 eles comparam as curvas de condução calorimétrica da hidratação do C_3A na presença de aditivo melamina com as referentes à pasta de cimento sem aditivo.

Como observado na Figura 2-12, rapidamente se desenvolve uma taxa de calor, com pico em cerca de 9 minutos, para a amostra sem aditivo superplastificante, e em 7 minutos para a amostra com aditivo. Na amostra contendo aditivo, a quantidade total de calor (até 30 min.) e o pico são menores que no caso da amostra sem aditivo, fato que comprova o retardo na hidratação inicial da fase aluminato.

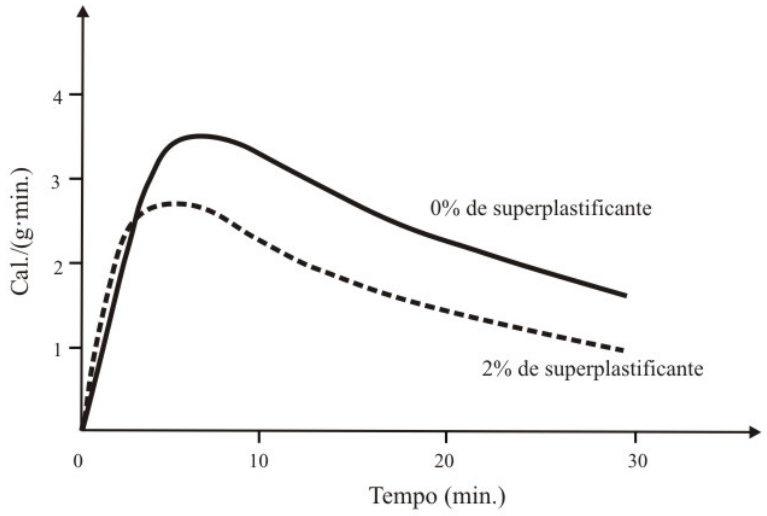


Figura 2-12 – Influência da melamina na hidratação do C_3A (RIXON e MAILVAGANAM, 1999)

A hidratação da fase C_3S também é retardada, como observado na Figura 2-13, que mostra a taxa de calor desenvolvida com 1% e 2% de aditivo. Para a adição de 1% de aditivo, essa taxa é um pouco maior, se comparada aos demais teores. No entanto, para o traço de referência (0% de aditivo) a taxa de calor é bem maior, o que comprova o atraso na hidratação da fase silicato tricálcico. Nos casos em que foram empregados aditivos superplastificantes também se observa um deslocamento do período de indução e do pico exotérmico (RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1998).

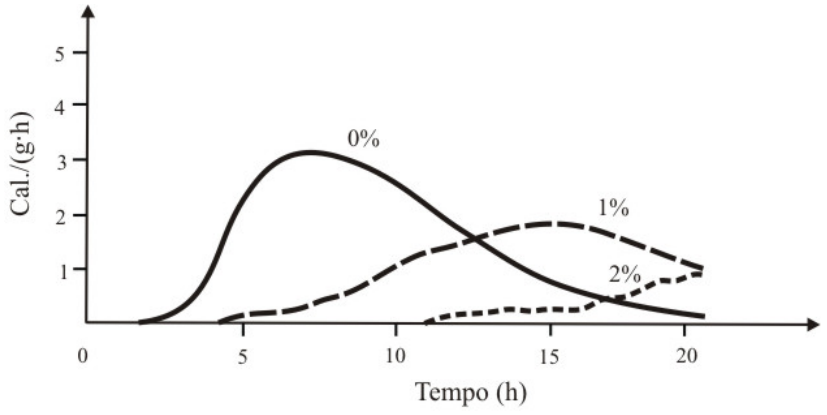


Figura 2-13 – Influência da melamina na hidratação do C_3S (RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1998)

O estudo foi realizado para a hidratação das fases separadas. Admite-se que na hidratação do cimento, que é um composto de fases, o mecanismo não é muito diferente: os aditivos são adsorvidos pela fase C_3A, resultando menor quantidade de aditivo para combinar com as demais fases, reduzindo o possível atraso na hidratação (RAMACHANDRAN, 1983).

Em resumo, o processo de hidratação do cimento pode ser alterado pela presença de aditivos de diversas formas, isoladamente ou em conjunto (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999): a alteração do grau de hidratação do cimento ou da composição e morfologia dos produtos hidratados; a precipitação de produtos insolúveis que agem como barreiras para a evolução da hidratação; e a alteração do pH da solução, alterando a solubilidade ou a estabilidade do sistema, quando o aditivo entra em contato com o cimento.

2.2.6. A Influência dos Superplastificantes nas Propriedades do Concreto

Uma vez que os superplastificantes podem alterar o comportamento da hidratação do material cimentício do concreto, suas influências nas propriedades dos concretos podem ser de grande importância para efeito de projeto. Neste item são discutidas as principais propriedades do concreto do ponto de vista termo-mecânico.

a) Propriedades no Estado Fresco

As propriedades do concreto no estado fresco ou fase de endurecimento, com exceção da massa específica, não têm interesse direto no estudo termo-mecânico. No entanto, devem ser estudadas como maneira de resguardar as condições para a produção de um bom concreto, do ponto de vista prático da Engenharia Civil.

a.1) Consistência e Manutenção da Consistência

A utilização de aditivos superplastificantes pode conferir ao concreto aumento de fluidez ou redução da relação água-material cimentício para uma dada consistência. Ao se desejar produzir CAR ou CAD, pode-se optar por reduzir a quantidade de água de amassamento, mas quando se deseja obter concretos mais fluídos, a utilização de aditivos pode aumentar a fluidez da mistura sem alterar a quantidade de água na mistura, o que é conhecido como a *independência da água para a trabalhabilidade*, na Tabela 2-4 (PEIWEI *et al.*, 2001).

Tabela 2-4 – Independência da água para a trabalhabilidade (PEIWEI *et al.*, 2001)

Mistura	Água (kg/m^3)	Aditivo (kg/m^3)	Cimento (kg/m^3)	Agregado Miúdo (kg/m^3)	Agregado Graúdo (kg/m^3)	Abati-mento (mm)	Res. Compressão	
							7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
1	175	0	550	640	1.080	20	38,3	42,4
2	175	4,4	550	640	1.080	105	57,1	83,4
3	175	5,5	550	640	1.080	130	59,5	81,6
4	175	6,6	550	640	1.080	160	57,8	76,1
5	175	7,7	550	640	1.080	205	58,8	79,0

Os aditivos têm a habilidade de manter a trabalhabilidade da mistura até que suas cadeias poliméricas sejam cobertas pelos produtos de hidratação, instante a partir do qual haverá grande perda de trabalhabilidade, e grande desprendimento de calor de hidratação.

Roncero (2001) estudou o efeito de aditivos melamina e policarboxilato na consistência (e na manutenção da trabalhabilidade) de pastas, argamassas e concretos. Em todos os casos, observou elevado ganho de fluidez. Ao estudar a perda de consistência, observou que após 90 minutos de mistura, as pastas e as argamassas apresentaram pouca perda de fluidez e os melhores desempenhos foram mostrados pelo aditivo base policarboxilato.

A Figura 2-14 apresenta as curvas de perda de abatimento para dois concretos, empregando dois aditivos, um base policarboxilato e outro base naftaleno sulfonado (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

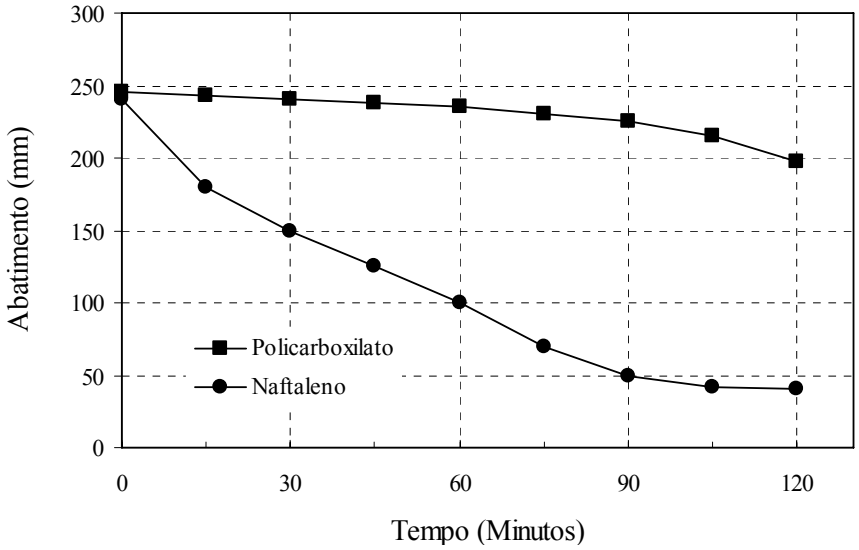


Figura 2-14 – Perda de abatimento dos tipos de aditivo superplastificante (RIXON e MAILVAGANAM)

Esta perda do abatimento com o tempo foi objeto de estudo de alguns pesquisadores, que destacam, dentre os principais fatores envolvidos, o teor e o tipo do aditivo utilizado, o instante em que ele é adicionado, o abatimento inicial do concreto, o procedimento de mistura e a temperatura ambiente e do concreto (AÏTCIN, 2000a), descritos a seguir.

a.2) Temperatura

A temperatura ambiental interfere nas propriedades do concreto, uma vez que modifica a absorção de água pelos agregados e a velocidade de evaporação da água de amassamento, reduzindo a quantidade de água livre e a fluidez da na mistura (EQUIPE DE FURNAS,

1997). O aumento da temperatura ambiente também causa a redução do efeito fluidificante dos aditivos, aumentando assim a velocidade da perda de fluidez. Efeito que aparentemente está ligado à relação entre temperatura e solubilidade para alguns compostos orgânicos (AÏTCIN, 2000a).

Na Figura 2-15, Roncero (2000) apresenta o efeito típico do aumento da temperatura na perda de abatimento de concretos com aditivos base naftaleno sulfonado. Observa-se que o aumento da temperatura ambiente reduz o abatimento mais rapidamente, efeito principalmente decorrente da aceleração nas reações de hidratação do cimento, mas que pode decorrer também de alterações na solubilidade do aditivo.

a.3) Teor de Ar Aprisionado e Massa Específica

É conhecido o efeito de aumento do teor de ar aprisionado nos concretos no estado fresco ao se utilizar aditivos. O uso de aditivos lignossulfonato, naftaleno e melamina aumenta o teor de ar, conforme reportado na literatura (NEVILLE, 1997; AÏTCIN, 2000a). O ar aprisionado inicialmente é responsável por um ganho de fluidez da mistura. A redução do seu teor gera uma perda da fluidez que é tanto maior quanto maior a quantidade de ar perdido.

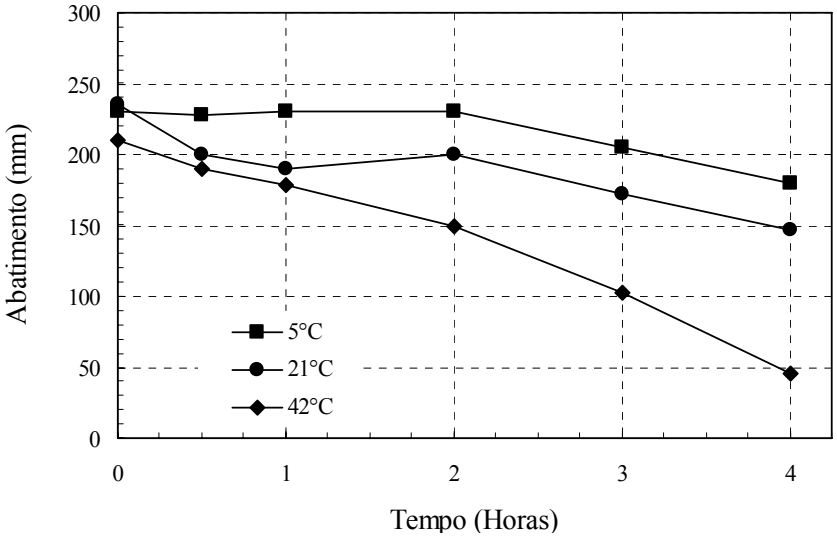


Figura 2-15 – Perda de abatimento em diferentes temperaturas (RONCERO, 2000)

Outras propriedades de importância no estado fresco são a segregação e exsudação e os tempos de início e de fim de pega do cimento. As duas primeiras não têm interesse no estudo termo-mecânico, e as duas últimas são estudadas na hidratação do cimento com aditivos.

b) Propriedades no Estado Endurecido

b.1) Resistência à Compressão

A resistência mecânica do concreto é conseqüência direta da redução de água de mistura que reduz a porosidade ou, pelo menos, reduz os tamanhos dos macroporos da pasta endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Geralmente, a qualidade do concreto é associada à sua resistência à compressão, que é função da estrutura da matriz (NEVILLE, 1997). A utilização de aditivos superplastificantes, segundo Mehta e Monteiro (1994), pode proporcionar uma maior velocidade de hidratação do cimento. Desde que o sistema esteja bem disperso e não haja efeito secundário de retardo, o concreto pode apresentar maior resistência inicial com a mesma a/c, efeito também discutido por Ramezanianpour *et al*. (1995) e Roncero *et al*., (2000).

A melhoria na resistência à compressão de concretos com superplastificante já foi objeto de estudo de diversos trabalhos, como Collepardi (1998), que observou o melhor desempenho de um aditivo polimérico a um aditivo base naftaleno, apresentando maior resistência à compressão utilizando menor dosagem de aditivo. Leidhodt *et al*. (2000) estudaram a evolução da resistência à compressão de concretos com a/c de 0,49 e abatimento 200 ± 20 mm utilizando-se aditivos base melamina, naftaleno e policarboxilato (Figura 2-16).

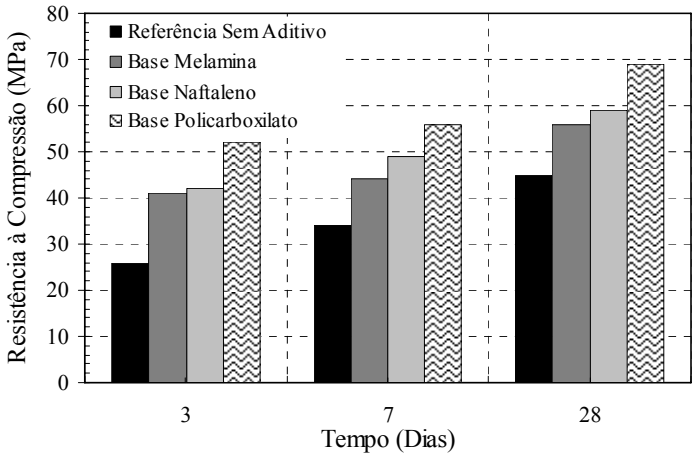


Figura 2-16 – Resistência à compressão de concretos superplastificados (LEIDHODT *et al*., 2000)

No estudo de Leidhodt *et al*. (2000), as porcentagens de redução de água e as dosagens de aditivo foram: 29% da a/c com dosagem de 1,6% para aditivo base melamina; redução de 30% da a/c e dosagem de 1,6% para o naftaleno e redução de 34% da a/c e com dosagem de 0,8% para o aditivo base policarboxilato. Pode-se observar que o aditivo base

policarboxilato utilizado por Leidhodt *et al*. (2000), apesar da menor dosagem necessária, apresentou maior redução de água e, conseqüentemente, maior resistência à compressão para todas as idades.

b.2) Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto, segundo a Equipe de Furnas (1997), é influenciado principalmente pela a/c, pela quantidade de agregado por metro cúbico de concreto e pela dimensão máxima característica e boa graduação do agregado. Assim, a utilização de aditivos superplastificantes no concreto pode influenciar apenas no primeiro destes parâmetros, ligado diretamente ao desenvolvimento de resistência à compressão e à quantidade de ar aprisionado no concreto fresco (NEVILLE, 1997; AÏTCIN, 2000a; MESBAH *et al*., 2002).

O trabalho de Collepardi *et al*. (1979) apresenta uma série de experiências com propriedades mecânicas do concreto envolvendo aditivo superplastificante base naftaleno. Pôde-se registrar o aumento do valor do módulo de elasticidade do concreto, ao se utilizar superplastificante e reduzir a quantidade de água da mistura. Os resultados apresentados por estes pesquisadores são corroborados pelos resultados encontrados por Roncero (2000) estudando as propriedades mecânicas do CAD com diversos superplastificantes, inclusive de base naftaleno.

2.2.7. A Dosagem dos Aditivos Superplastificantes no Concreto

a) <u>Dosagem e Tipo de Aditivo Superplastificante</u>

Leidhodt *et al*. (2000) compararam aditivos superplastificante base naftaleno e policarboxilato para produzir elementos pré-moldados protendidos e obtiveram concretos com maiores perdas de abatimento ao se utilizar o aditivo tipo naftaleno. Malhotra e Malanka (1978) compararam aditivos lignossulfonato, naftaleno e melamina e reportaram os melhores resultados para perda de fluidez do aditivo tipo lignossulfonato que os aditivos base naftaleno e melamina.

Quanto à dosagem, Ronneberg (1989) estudou diversas misturas de aditivo base melamina e pôde obter resultados muito satisfatórios do ponto de vista reológico. No entanto, todas as misturas apresentaram significativa perda de consistência. Hanna *et al*. (1989) também chegaram a resultados parecidos para aditivos base melamina.

b) Modo de Adição do Superplastificante

Paillere *et al.* (1990), ao estudar alguns modos de adição dos aditivos superplastificantes às misturas de cimento Portland, concluíram que as diferenças adotadas em seus procedimentos podem alterar várias das propriedades do concreto, principalmente as suas propriedades no estado fresco: consistência e sua manutenção com o tempo e incorporação de ar à massa de concreto. Estes autores estudaram algumas dessas influências para produzir CAD com sílica ativa e descreveram que a adição, alguns minutos após a mistura do cimento com a água, aumenta a fluidez e a manutenção do abatimento em comparação com a adição juntamente com a água de amassamento. Concluíram que a influência do modo de adição do superplastificante pode estar relacionada às variações na capacidade das moléculas de cada aditivo de serem adsorvidas pelo cimento anidro ou pelos compostos hidratados. Rixom e Mailvaganam (1999) já alertaram para estes tipos de comportamento em função da estrutura molecular de cada tipo de aditivo.

Collepardi *et al*. (1999) afirmam que, ao se adicionar qualquer um dos tipos de aditivo diretamente à água, pode ocorrer o aprisionamento de suas moléculas entre a formação C_3A-gipso e fazer com que haja pouca quantidade de aditivo para dispersar o C_3S e o C_2S. Estes autores afirmam que o modo de adição dos aditivos base policarboxilato parece ter menor impacto sobre a fluidez da mistura, possivelmente devido ao efeito de repulsão estérica e ao maior tamanho de suas moléculas; os mesmos detalham que, ao ocorrer a precipitação dos primeiros produtos de hidratação, eles ainda conseguem garantir a dispersão do sistema, como pode ser observado na Tabela 2-5 (COLLEPARDI *et al.*, 1999).

Tabela 2-5 – Efeito do modo de adição no abatimento (COLLEPARDI *et al*., 1999)

Tipo	Dosagem*	Modo de Adição**	a/c	Abatimento (mm)
Melamina	0,50	Imediato	0,41	100
Melamina	0,50	Atrasado	0,41	215
Naftaleno	0,48	Imediato	0,40	100
Naftaleno	0,48	Atrasado	0,40	230
Policarboxilato	0,30	Imediato	0,39	230
Policarboxilato	0,30	Atrasado	0,39	235

Notas:

* Percentual de sólidos do polímero por massa de cimento;

** Imediato: juntamente a água de amassamento; atrasado: após 1 minuto de mistura.

c) Ponto de Saturação

O ponto de saturação de um aditivo representa a quantidade, a partir da qual, se o mesmo for adicionado ao concreto, não haverá melhoria na consistência ou redução da água para um mesmo comportamento reológico. Teores acima do ponto de saturação têm desempenho inferior e dosagens maiores (abaixo do ponto de saturação), além de não apresentarem melhoria, podem produzir efeitos secundários geralmente indesejados (CASSA, 1999; AÏTCIN, 2000a). Para a avaliação desta quantidade de aditivo são geralmente utilizados dois métodos simplificados para avaliar a fluidez e determinar o ponto de saturação: o mini-abatimento e o cone de Marsh (AÏTCIN *et al*., 1994). Ambos os métodos podem ser empregados também na avaliação da compatibilidade cimento-aditivo.

Gomes, *et al.* (2000b) estudaram o ponto de saturação de argamassa e concretos, utilizando o método do cone de Marsh, e puderam verificar que pastas menos fluidas, com a/c menores que 0,50, apresentaram consideráveis variações no tempo de fluir e perda de fluidez. As pastas mais fluidas, onde as a/c eram maiores ou iguais a 0,50, a variação no tempo de fluir e as perdas de fluidez foram praticamente insignificantes. Os autores concluíram que, em pastas menos fluidas, os processos de hidratação apresentaram maiores influências na avaliação da fluidez.

Ao que se tem como certo na literatura, a dosagem para alcançar o ponto de saturação do superplastificante varia de acordo com o tipo de aditivo e a a/c (NEVILLE, 1997; AÏTCIN, 2000a). Os aditivos que possuem maiores ações repulsivas de dispersão das partículas, como os policarboxilatos, devem apresentar menores doses de aditivo para alcançar o ponto de saturação, conseqüência de mecanismos mais eficientes que implicam em menor demanda de aditivo para uma dada redução de água ou aumento de fluidez.

2.3. O PAPEL DAS ADIÇÕES MINERAIS NO CAD

Adições minerais são produtos não orgânicos, geralmente subprodutos industriais, finamente moídos adicionados ao concreto durante o processo de mistura para proporcionar certas propriedades do concreto fresco ou endurecido (NEVILLE, 1994; MEHTA, 1998; ROY *et al*., 2001; SABIR *et al*., 2001). Geralmente são utilizadas pequenas quantidades, cerca de 10% da massa do cimento utilizado, caso típico da produção de CAD com sílica ativa e metacaulim (AÏTCIN, 2000a). No entanto, em outras situações como na utilização de cinzas volante e escórias de alto forno, pode ultrapassar a margem de 60% (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.3.1. O Papel das Adições Minerais

Uma das reações das adições é a reação química conhecida como reação pozolânica. Ela ocorre quando a adição mineral é introduzida no concreto fresco e reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH) produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (CSH), fonte de resistência do concreto. Há a obstrução dos poros e a redução da permeabilidade do concreto (SABIR *et al*., 2001).

A segunda reação é o efeito fíler. Como ela é pelo menos 100 vezes menor que uma partícula de cimento, pode preencher vazios criados pela água livre na matriz e produzir um melhor empacotamento, no entanto, pode criar problemas de manuseio e aumentar o consumo de água, principalmente para altos teores, necessitando-se de quantidades maiores de aditivos (FERRARIS *et al*., 2001).

Os grãos finos e esféricos produzem ainda um mecanismo físico que reduz a exudação interna, bloqueando os canais de fluxo de água, e um empacotamento mais eficiente das partículas finas, eliminando o efeito parede, além de evitar a formação preferencial de grandes cristais de CH na pasta de cimento, devido aos vários pontos de nucleação. Esses efeitos associados propiciam melhora na microestrutura, melhorando as características da zona de transição pasta-agregado, densificando a pasta e diminuindo a permeabilidade. Assim, aumenta o desempenho dos concretos tanto do ponto de vista da resistência mecânica como de durabilidade, tornando-os resistente à agressividade do meio ambiente (AÏTCIN, 2000a).

2.3.2. Histórico das Adições Minerais

As adições minerais utilizadas na produção do concreto de alto desempenho são compostas por pozolanas em estado natural ou artificial, subprodutos de fornos de usinas termelétricas ou de indústrias metalúrgicas ou outros materiais tratados por queima (SABIR *et al*., 2001). Na limitada variedade de materiais disponíveis no mercado, citam-se a sílica ativa e o metacaulim.

a) <u>Motivação Para o Uso de Adições Minerais</u>

O emprego destes produtos em uma dosagem de concreto, principalmente no CAD, visa uma melhoria das propriedades do concreto em geral, a saber (AÏTCIN, 2000a):

- Melhoria na trabalhabilidade: os aditivos, que são partículas muito finas, diminuem o tamanho e o volume de vazios;

- Resistência à fissuração térmica: como a elevação máxima de temperatura devido ao calor de hidratação de um concreto ocorre cerca de uma semana após seu lançamento, com essas partículas substituindo parte do cimento Portland, elas contribuem no controle da temperatura, diminuindo a sua elevação durante a primeira semana;
- Aumento da resistência mecânica;
- Maior impermeabilidade: as finas partículas, pelo menos 100 vezes menor que as de cimento, preenchem os vazios da pasta, diminuindo a porosidade do concreto.

b) Adições Minerais Utilizadas no CAD

As adições minerais atualmente disponíveis comercialmente no mercado brasileiro são a sílica ativa e o metacaulim.

b.1) Sílica Ativa

A sílica ativa é um subproduto das usinas que produzem o ferro silício, o silício metálico ou outros tipos de liga com silício em sua composição, ou seja, é um subproduto de fornos a arco de indução das indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício. A redução de quartzo a silício em altas temperaturas (2000ºC) produz vapor de silício, que se oxida e condensa em zonas de temperaturas mais baixas, formando minúsculas partículas esféricas (MEHTA e MONTEIRO, 1994; SABIR *et al*., 2001).

Trata-se de um material muito fino com área específica da ordem de 20.000 m^2/kg. A sílica pode ser adicionada no concreto como um material que faz uma substituição parcial do cimento ou como material cimentante adicional, mantendo-se a quantidade de cimento (AÏTCIN, 2000a; SABIR *et al*., 2001).

A hidratação do C_3S é responsável pelas primeiras características de solidificação de uma mistura de cimento. A presença de sílica ativa provoca uma aceleração da hidratação do C_3S (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os estudos realizados por Stein e Stevels (1964), indicam que, quanto mais fina a sílica ativa, e quanto mais sílica for acrescida à mistura, mais rápida será a hidratação do C_3S, e logo, maior calor de hidratação será liberado.

Do ponto de vista microscópico, Wu e Young (1984), concluíram que, devido à grande diferença nas superfícies específicas entre a sílica e o cimento Portland, o grão de C_3S fica envolvido por uma grande quantidade de partículas de sílica, formando uma camada ao redor destes grãos. Após o contato com a água, os íons Ca^{++} e OH^-, gerados durante a

dissolução do C_3S, precisam penetrar através desta camada de sílica ao redor dos mesmos, porém os íons reagem com a sílica e formam CSH. Como conseqüência, o acréscimo de íons Ca^{++} e OH^- na solução é retardada.

Nas primeiras idades, os CSH são formados numa quantidade maior na superfície da sílica ativa do que na superfície do C_3S. Posteriormente ocorre um longo período de contato entre a água e a superfície do C_3S, implicando num acréscimo na dissolução do mesmo. Quanto mais sílica adicionada à mistura, mais rápida a aceleração na hidratação do C_3S (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A sílica ativa possui efeito pozolânico, ou seja, participa diretamente na formação de CSH. Materiais pozolânicos reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH), e formam compostos com propriedades desejáveis. Assim sendo, sua presença irá reduzir consideravelmente a quantidade de CH na mistura, transformando-o em CSH e melhorando a sua performance (SABIR *et al*., 2001).

Nas primeiras idades, o calor de hidratação é mais influenciado pela aceleração da hidratação do cimento do que pela reação pozolânica. Diferentes quantidades de sílica ativa, com áreas específicas variadas, podem ter comportamentos diferentes no desenvolvimento das curvas de calor do cimento, portanto este efeito precisa ser mais bem investigado (NEVILLE, 1997; AÏTCIN, 2000a).

Os efeitos combinados da sílica ativa e superplastificante, no fenômeno de hidratação, não são independentes (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999). A Figura 2-17 mostra que misturas com ambas as adições propiciam uma redução no período de dormência em relação a uma mistura que possui somente superplastificante (PINTO, 1997).

A Figura 2-17 sugere que, para a evolução do calor desenvolvido na reação de hidratação, ocorre uma interação entre os efeitos do superplastificante e da sílica ativa. Estas interações promovem uma aceleração do desenvolvimento de calor e também uma pequena redução no calor total gerado.

b.2) Metacaulim

O metacaulim ainda é um material novo na Construção Civil brasileira, embora o número de trabalhos científicos que tratam do seu uso na produção de concretos tenha sido muito grande nos últimos 05 (cinco) anos. O metacaulim de alta reatividade, disponível no mercado brasileiro, tem mostrado propriedades pozolânicas similares à sílica ativa (SOUZA, 2003).

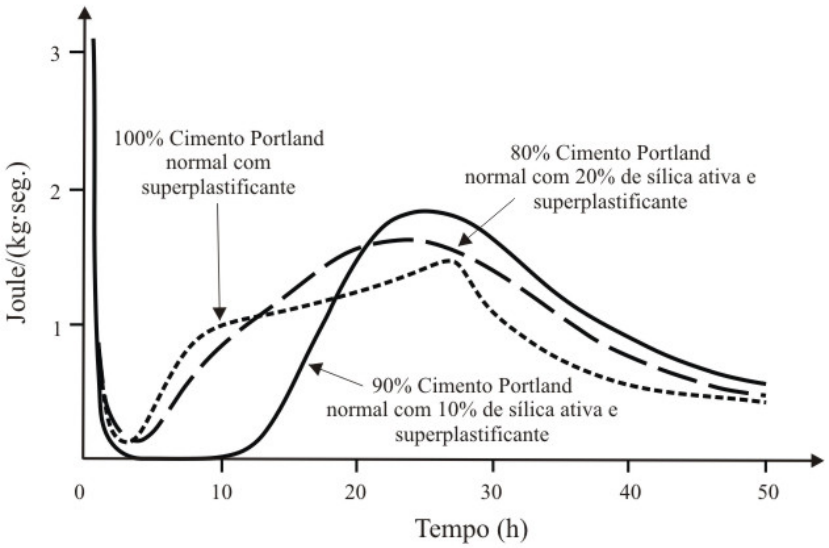


Figura 2-17 – Taxa de calor liberado para misturas de cimento e sílica ativa (PINTO, 1997)

Para as pozolanas do tipo do metacaulim tem-se, algumas exigências químicas, descritas pela norma ASTM C 618 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete* (ASTM, 2005) e pela brasileira NBR 12653 (ABNT, 1992). Mesmo não se tendo uma norma específica referente ao metacaulim, acredita-se que os padrões definidos nestas normas se apliquem, na sua maioria, a esta pozolana. A Tabela 2-6 apresenta a composição típica do metacaulim, segundo Malhotra e Mehta (1996).

Tabela 2-6 – Composição típica do metacaulim de alta reatividade (MALHOTRA e MEHTA, 1996)

Componente Químico	Porcentagem em Massa
SiO_2	51,52
Al_2O_3	40,18
Fe_2O_3	1,23
CaO	2,0
MgO	0,12
Álcalis	0,53
Perda ao Fogo	2,01

Malhotra e Mehta (1996) relatam que esta pozolana de alta reatividade é a única que não é caracterizada pelo alto teor de sílica, tendo geralmente proporções semelhantes de SiO_2 e Al_2O_3, em massa. A caulinita, mineral que dá nome ao grupo das argilas cauliníticas, apresenta uma composição química teórica de aproximadamente 39,8% Al_2O_3, 46,3% SiO_2

e 13,9% H_2O. Segundo Sabir *et al.* (2001), a composição química tem uma grande influência na definição do nível ótimo de substituição deste material por cimento.

O calor de hidratação dos concretos com metacaulim está diretamente relacionado às características físicas do mesmo. Saad *et al.* (1982), utilizando um material com a superfície específica de 850 m²/kg na produção de concreto massa, obtiveram uma diminuição do calor de hidratação, principalmente nas primeiras horas. Os autores justificaram que este comportamento deveu-se aos altos níveis de substituição de cimento por metacaulim, adotados na ordem de 30% e 50%. Contudo, este comportamento tende a ser diferente quando se adota o metacaulim de alta reatividade, devido à sua alta finura.

Os resultados evidenciam um panorama semelhante ao uso da sílica ativa, ou seja, não obtém uma diminuição do calor de hidratação ao se utilizar metacaulim. Esta situação pôde ser verificada por Zhang e Malhotra (1995), experimentando concretos envolvendo uma mistura com 10% de metacaulim de alta reatividade, outra com 10% de sílica ativa. Neste trabalho, cujos resultados são apresentados na Figura 2-18, registraram-se temperaturas semelhantes na mistura de referência e com sílica ativa, sendo estas um pouco inferiores às obtidas com o metacaulim de alta reatividade. Na mistura com metacaulim, a temperatura máxima ocorreu em torno das 15 horas de hidratação, enquanto que, nas outras misturas, a temperatura máxima ocorreu às 19 horas (sílica ativa) e às 20 horas (referência). As maiores temperaturas na mistura com o metacaulim mantiveram-se até o fim do ensaio, ou seja, até o sexto dia. Os autores creditam estes resultados à alta reatividade do metacaulim com o $Ca(OH)_2$. Sabir *et al.* (2001), utilizando argamassas, também constataram ligeiro aumento no calor de hidratação nas argamassas com sílica ativa e metacaulim, em relação à argamassa de referência.

A comparação entre argamassas com sílica ativa e com metacaulim, em relação ao calor de hidratação, também foi o foco principal do trabalho realizado por Frias *et al.* (2000), onde se constatou que as argamassa com 10% e 30% de metacaulim apresentaram um incremento na temperatura de 10% a 15%, em relação à argamassa de referência, e ligeiramente superiores aos obtidos com a sílica ativa. Neste trabalho, o incremento de temperatura na argamassa com metacaulim ocorreu entre a 18ª e a 30ª hora de hidratação. Os autores acrescentam que o metacaulim é um típico exemplo onde o efeito da reação pozolânica é compensado pelo efeito de diluição, decorrente da substituição de cimento.

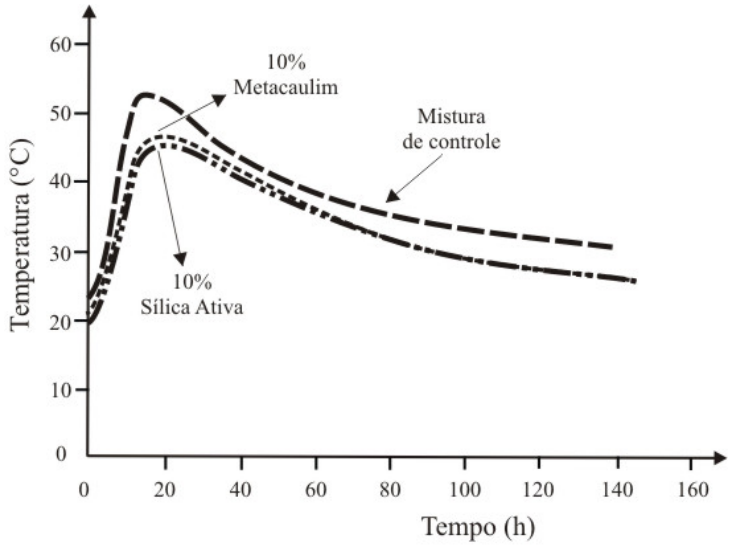


Figura 2-18 – Calor de hidratação em misturas de sílica ativa e metacaulim (ZHANG e MALHOTRA, 1995)

Apesar dos resultados, os autores relatam que é possível obter valores de calor de hidratação similares aos da argamassa de referência, usando teores de substituição entre 10% e 12%. Bai e Wild (2002) obtiveram menores valores no calor de hidratação utilizando o metacaulim em conjunto com a cinza volante. As discrepâncias entre os resultados, relacionadas à influência do metacaulim no calor de hidratação, podem ser decorrentes de diferenças existentes na sua pureza e na sua granulometria.

c) A Questão Ecológica

Além do aproveitamento de um resíduo, a utilização de adições minerais em substituição ao cimento contribui, em uma pequena parcela, para a diminuição da emissão de gás carbônico no meio ambiente. Para cada tonelada de cimento Portland produzida é liberada aproximadamente uma tonelada de gás carbônico. Segundo Malhotra (1999), pelo menos 5% das emissões de gás carbônico do mundo é atribuída à indústria de cimento Portland, contribuindo com a problemática do efeito estufa.

Por isso, essa pesquisa está direcionada para utilização de materiais alternativos, obtidos pela reciclagem de subprodutos industriais, com o objetivo de preservar o ambiente, como propõe Malhotra (1999), uma vez que ela é usuária de alto consumo de recursos naturais sendo, portanto, a mais indicada para consumir os resíduos das demais indústrias.

O aumento da vida útil das estruturas de concreto proporcionado pela utilização do CAD contribui também na questão do desenvolvimento sustentável. Além de propor soluções

mais adequadas do ponto de vista sustentável para o destino final de resíduos de outros setores, Mehta (1997) conclui que é uma solução fácil e efetiva para preservação dos recursos naturais, uma vez que se forem construídas estruturas de concreto que durem 500 anos, em vez de 50 anos, a produtividade das reservas de matérias primas multiplicarão por 10, o que significa dizer que haverá a preservação de 90% das mesmas.

2.4. O PROBLEMA TÉRMICO E TENSIONAL NO CONCRETO

Os agentes que causam a variação de temperatura no interior das estruturas de concreto e as expõem ao risco de fissuração de origem térmica são dois; internos e externos. Como em quaisquer outros corpos, os agentes externos ou ambientais atuam em praticamente todas as estruturas: elas estão expostas às variações da temperatura ambiental e da radiação solar que são os dois agentes principais desta categoria. Outros agentes externos são considerados apenas como influentes no grau com que estes dois agentes principais atuam diretamente nos corpos: são eles a UR (umidade relativa) do ar e a velocidade do vento. Os agentes internos são aqueles que, por algum processo físico-químico, cedem energia térmica aos corpos. No caso das estruturas de concreto, as reações exotérmicas da hidratação do cimento e das adições minerais são as fontes geradoras de energia térmica.

2.4.1. O Calor de Hidratação do Cimento

A quantidade e a taxa de calor fornecida ao concreto pela hidratação dos aglomerantes dependem da quantidade de clínquer, de adições, da composição, da finura do cimento e da temperatura do concreto durante a hidratação (NEVILLE, 1997). A temperatura durante a hidratação, no entanto, é afetada pela quantidade de calor perdido ou armazenado, que é governada pela geometria da estrutura (forma e dimensões) e pelas condições ambientais de exposição.

O problema da geração de calor dentro de uma estrutura de concreto pode ser facilmente entendido da seguinte forma: a hidratação dos aglomerantes gera energia térmica após o inicio das reações, a qual é conduzida através da massa de concreto, que emite e reflete essa energia através de suas faces e, ao fim de certo tempo, dependendo de vários fatores, inclusive dos agentes externos de energia e principalmente da temperatura ambiental, atinge a temperatura de equilíbrio. Para quantificar as potencialidades dos diferentes tipos de cimento, no Brasil, o ensaio que avalia diretamente o calor de hidratação pode ser feito de acordo com duas normas, a NBR 8809 (ABNT, 1985) e a NBR 12006 (ABNT, 1993) (semi-adiabático).

Ern (2002) apresenta valores para o calor de hidratação de alguns cimentos produzidos no estado de São Paulo. Os valores podem ser vistos na Tabela 2-7; os ensaios foram executados em garrafas de Langavant nos laboratórios da ABCP.

Tabela 2-7 – Calor de hidratação dos cimentos no Brasil (ERN, 2002)

Calor de Hidratação (Joule/grama)				
Tipo de Cimento	**3 Dias**		**7 Dias**	
	Min.	**Máx.**	**Min.**	**Máx.**
CP III	205	270	235	305
CP IV	210	325	240	330
CP II	220	340	260	370
CP V	250	370	350	380
CP I	Não Disponível			

O calor de hidratação do cimento também pode ser estimado indiretamente, utilizando-se meios analíticos, como foi apresentado no item 2.1.1, com as fórmulas de Bogue, ou utilizando-se da Tabela 2-8, apresentada por Paulon (1987).

Tabela 2-8 – Participação dos constituintes do cimento na geração de calor (PAULON, 1987)

Constituintes Mineralógicos do Cimento	**Participação de Cada Constituinte na Geração de Calor (caloria/grama)**		
	3 Dias	**7 Dias**	**28 Dias**
C_3S	0,98	1,10	1,14
C_2S	0,19	0,28	0,44
C_3A	1,70	1,88	2,02
C_4AF	0,29	0,43	0,48

Neste caso, Tabela 2-8, a energia térmica total gerada pela hidratação do cimento é encontrada ao se somar a multiplicação de cada porcentagem das frações dos componentes do cimento pelas suas participações respectivas na geração de calor. Os valores típicos para o calor de hidratação aos 28 dias flutuam entre 250 e 380 Joules/grama (60 a 90 calorias/grama).

A limitação dos métodos analíticos é que eles não levam em consideração aspectos físicos do cimento, como a finura, alterando sensivelmente os valores nas primeiras idades e, a forma da curva. Apesar da diferença inicial, o valor total de calor liberado ao final é igual para um mesmo clínquer (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Outra limitação é que estes métodos se aplicam somente para cimentos puros, sem adições, motivo pelo qual pouco se

utilizam essas expressões, dada à dificuldade de se encontrar cimentos puros, ou com adições fielmente controladas (NEVILLE, 1997).

a) Temperatura Adiabática do Concreto

A temperatura adiabática do concreto é a temperatura que uma determinada massa de concreto pode experimentar, caso venha a acumular, sem perdas, todo o calor liberado pelas reações de hidratação do cimento (aglomerante) que a compõe (EQUIPE DE FURNAS, 1997). No Brasil o ensaio de elevação de temperatura adiabática do concreto é regulamentado pela ABNT por meio da NBR 12819 (ABNT, 1993), que apresenta uma câmara isolada onde é colocado um volume de concreto de cerca de 200 litros, o qual é aquecido por sistema de resistências elétricas acopladas a um sistema computadorizado, compensando a variação de temperatura detectada no CP, e armazenando os dados de leitura de temperatura – ver Equipe de Furnas (1997).

Para a utilização em estrutura que seja caracterizada por grande massa de concreto, o ACI considera que o ensaio de calor de hidratação do cimento representa fielmente as características de geração de calor aos concretos aos 28 dias. No entanto, o ACI Committee N° 207.2R, publicação do ACI[8], afirma que, em concretos, ensaios mais apurados podem ser feitos em laboratório para a determinação adiabática da elevação da temperatura.

Uma estimativa da temperatura adiabática, em concretos convencionais, após 28 dias, em graus Celsius, pode ser dada por :

$$H_a = \frac{h_g \cdot \varpi_c}{2400 \cdot c} \quad , \qquad \text{onde:} \qquad \text{Eq. (2-2)}$$

c = 0,22 cal/gºC (calor específico médio do concreto);

h_g = calor de hidratação do cimento aos 28 dias (em calorias/grama);

ϖ_c = massa de cimento (em kg/m^3).

Esse modelo é muito adequado para se prever a elevação máxima de temperatura no interior de grandes estruturas, como barragens, onde os concretos apresentam, em geral, a/c acima de 0,5 (CALMON, 1995).

[8] ACI: ACI Committee N° 207.2R-95. 1995. Effect of restraint, volume change, and reinforcement on cracking of mass concrete. (Reapproved 2002). American Concrete Institute. Detroit - Michigan. 26p.

b) Curva de Evolução do Calor Adiabático

A curva de evolução do calor adiabático é utilizada em simulações do comportamento térmico de estruturas nas primeiras horas após a concretagem, utilizando-se de modelos computacionais como o Método dos Elementos Finitos (MEF), o Método das Diferenças Finitas (MDF) ou o Métodos dos Elementos de Contorno (MEC) (KHAN *et al*., 1998). Os algoritmos necessitam dos valores das variações térmicas (gradientes térmicos) do concreto no tempo, para dar respostas tais como: velocidade de concretagem, temperatura máxima que o concreto pode alcançar na estrutura, temperatura de lançamento, intervalos de concretagem, altura máxima da camada, etc., de acordo com os parâmetros envolvidos em cada uma das situações – ver Santos (2004).

De acordo com as características do concreto, principalmente o tipo de cimento, a finura e as adições e aditivos, a curva de evolução adiabática pode apresentar taxa de ganho de calor e valores máximos diferenciados, mesmo para consumos de aglomerante, água/cimento e temperatura de lançamento equivalentes, como exemplificado Figura 2-19, que apresenta o efeito da utilização de dois tipos diferentes de SP (superplastificante) na elevação adiabática do CAD (CALMON *et al.*, 2005a).

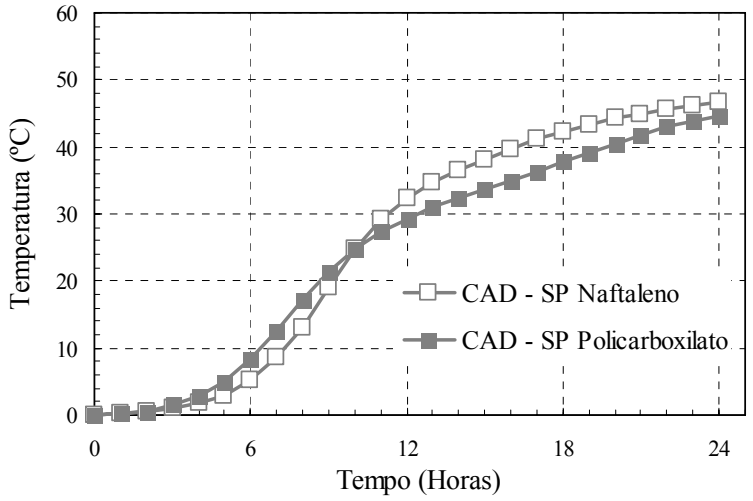
c) A Influência da Relação Água-Cimento (a/c) do Concreto

O objetivo principal do ensaio do calor de hidratação é de descobrir, para o cimento em questão, qual é seu potencial térmico, ou seja, qual a quantidade de energia térmica, em calorias ou Joules por grama de cimento que será liberada ao longo de sua hidratação.

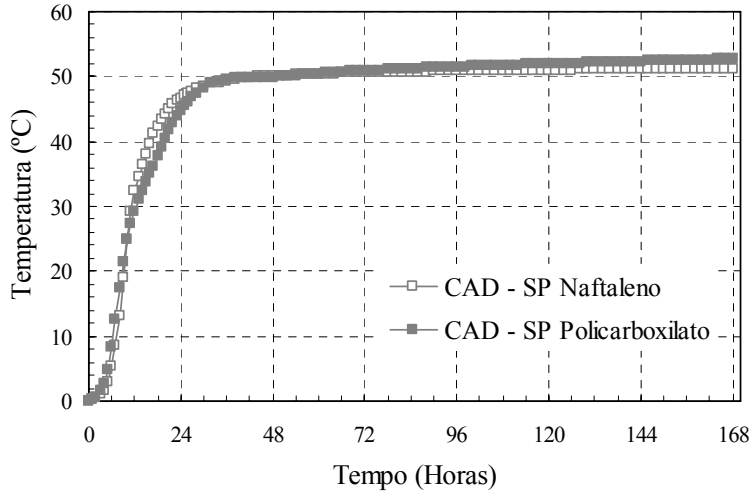
Em concretos convencionais a água/cimento é, em geral, acima da mínima considerada como necessária para a completa hidratação do cimento, intervalo entre 0,23 e 0,28 para muitos autores na literatura (OWENS, 1989a; OWENS, 1989b; KOSMATKA, 1991; SHILSTONE, 1991; NEVILLE, 2000; MATHER, 2001; MATHER E HIME, 2002), e a dispersão das partículas do cimento é feita pelo excesso de água na massa.

No CAD, o problema da dispersão das partículas de cimento pela redução da água/cimento é solucionado com a utilização de aditivos superplastificantes, apresentando resultados satisfatórios do ponto de vista reológico. Para essas água/cimento utilizadas, no intervalo entre 0,20 e 0,30, pode-se esperar uma redução significativa da energia térmica liberada, como debatido por Zhang e*t al.* (2002) e apresentado na Figura 2-20. Zhang *et al.* (2002) utilizaram pastas de cimento ensaiadas em calorímetro adiabático. O cimento Portland

utilizado foi o Tipo II, segundo a normalização da ASTM C150 *Standard Specification for Portland Cement* (ASTM, 2004).



(a) Primeiras 24 horas



(b) Primeiras 168 horas

Figura 2-19 – Efeito da utilização de SP na elevação adiabática do CAD (CALMON *et al.*, 2005a)

Ern (2003), ao produzir concretos de alto desempenho com reduzidas relações água-cimento, também avaliou a influência da a/c no calor de hidratação de argamassas de cimento Portland Tipo CP V ARI segundo a NBR5733 *Cimento Portland de Alta Resistência Inicial* (ABNT, 1991), utilizado nos CAD.

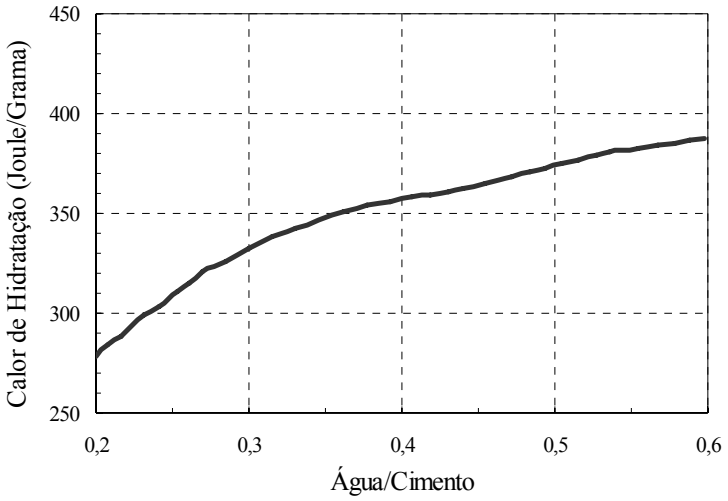


Figura 2-20 – Efeito da a/c em pastas no calor total liberado aos 3 dias (ZHANG *et al*., 2002)

A Figura 2-21 apresenta os resultados dos experimentos utilizando a garrafa de Langavant (NBR 12006) de Ern (2003). Conforme esperado pelo pesquisador, que se baseou no trabalho de Zhang *et al.* (2002), maiores quantidades de calor total foram liberadas para as argamassas de maiores relações água-cimento. Pode ser observado que as curvas das a/c entre 0,2 e 0,4 apresentam traçados diferentes das demais. Além disso, elas atingem valores de calor liberado máximos logo nas primeiras horas do ensaio.

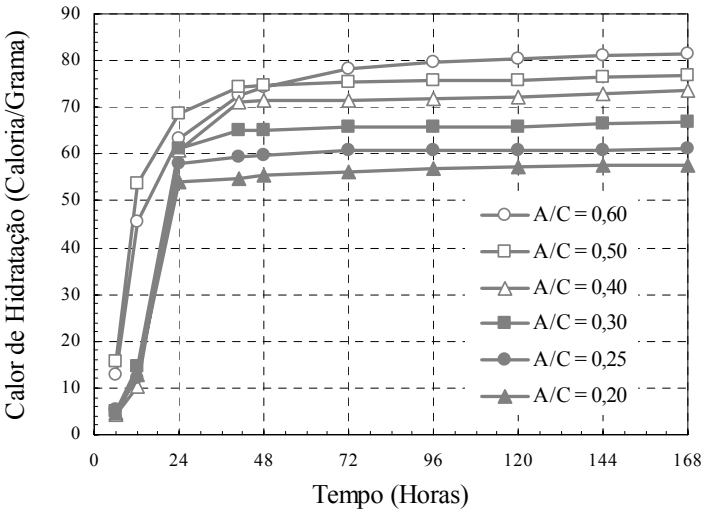


Figura 2-21 – Calor de hidratação em pastas com diferentes a/c (ERN, 2002)

Os resultados encontrados por Ern (2003), na Figura 2-21, apresentam reduções significativas de calor de hidratação das argamassas com as relações água-cimento baixas (entre 0,25 e 0,4) e um ligeiro aumento com as a/c maiores (entre 0,4 e 0,6).

2.4.2. A Geração de Calor Ambiental

A temperatura ambiental (ou temperatura do ar) é o agente que aquece um elemento estrutural a partir de um ponto de temperatura ambiental mínima, como estudado por Lachemi e Aïtcin (1997), geralmente encontrado entre 0:00 (ou 24:00 horas) e 6:00 horas da manhã e o resfria após o momento de temperatura ambiental máxima diária, geralmente entre 12:00 e 18:00 horas – Figura 2-22[9].

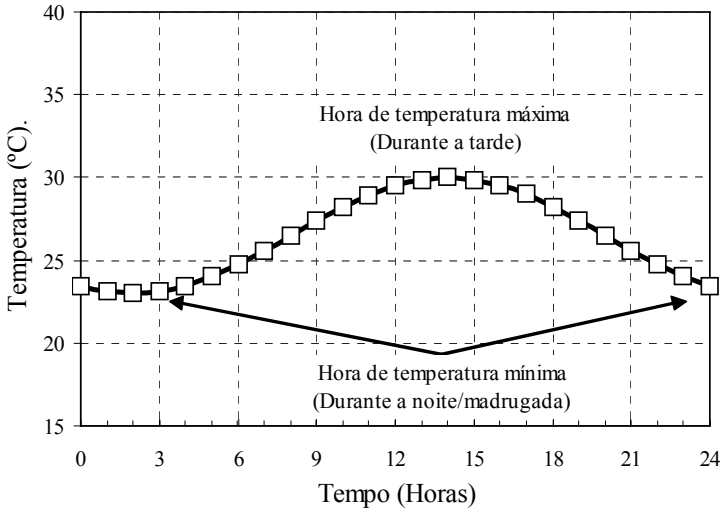


Figura 2-22 – Padrão típico da variação da temperatura ambiental

A figura anterior mostra a variação típica da temperatura ambiental ou do ar a qual as estruturas de concreto estão expostas diariamente, apresentando uma variação senoidal a partir de valores de temperatura média mínima, média média e média máxima mensais. As temperaturas médias mínima e máxima ocorrem às 2:00 (de madrugada) e 14:00 (de tarde), respectivamente, situação típica da cidade de Vitória-ES.

No caso da radiação solar, as estruturas estão expostas a um ganho de energia concentrado durante a primeira parte do período do dia, uma vez que as radiações incidem formando ângulos variáveis nas faces das estruturas, de acordo com as posições geográficas relativas dos corpos emissor e receptor. As radiações noturnas, por outro lado, são praticamente nulas. A variação da radiação solar típica que atinge as faces planas de estruturas é mostrada na Figura 2-23 – de Calmon *et al.* (2002).

[9] Dados de temparatura disponíveis em: http://www.wheatherbase.com/.

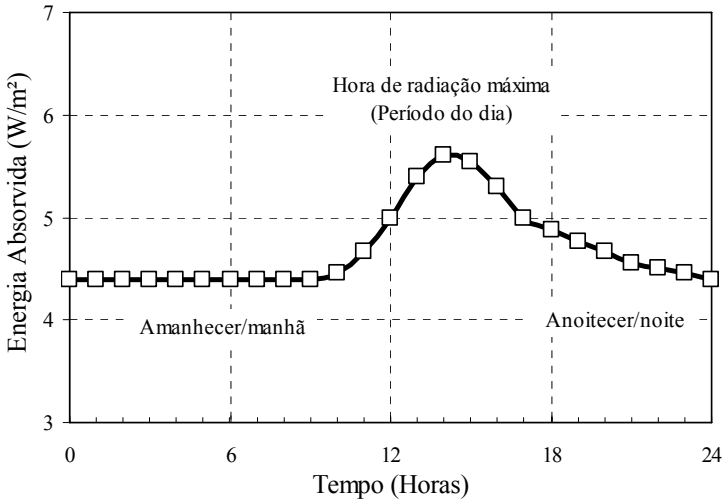


Figura 2-23 – Padrão típico da variação da radiação solar (CALMON *et al.*, 2002)

Outros agentes ambientais também influenciam diretamente na forma com que a energia solar atua nas estruturas, como a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, que podem interferir decisivamente em algumas regiões.

As estruturas de concreto nas primeiras idades sofrem, ainda, a influência do calor gerado pela hidratação do material cimentício. As reações químicas envolvidas no processo de endurecimento da pasta de cimento são exotérmicas e fazem com que as estruturas se aqueçam, a partir da mistura do material cimentício com a água. A Figura 2-19 apresenta a liberação de calor adiabática típica das reações de hidratação de aglomerantes no CAD.

2.4.3. Propriedades Térmicas do Concreto

O comportamento térmico das estruturas de concreto é função das três fontes principais de energia térmica discutidas nos itens anteriores, que são a todo instante influenciadas pelas demais condições climáticas e geográficas: velocidade do ar e UR do ar. A Figura 2-24 apresenta o comportamento típico da temperatura no interior de uma estrutura de concreto, sendo analisados um ponto no centro da mesma, um na borda e dois em profundidades intermediária entre o centro e a borda[10].

Pode ser visto como o efeito combinado da geração de calor pela hidratação do aglomerante e a baixa condutividade do concreto pode proporcionar maiores temperaturas internas durante as primeiras horas de concretagem. Ao final de alguns dias, todos os

[10] Gráficos gerados a partir de resultados de simulações não publicadas deste autor.

pontos têm praticamente as mesmas temperaturas, que variam apenas com a temperatura ambiente e a radiação solar, e eventualmente com alguma fonte de energia extraordinária.

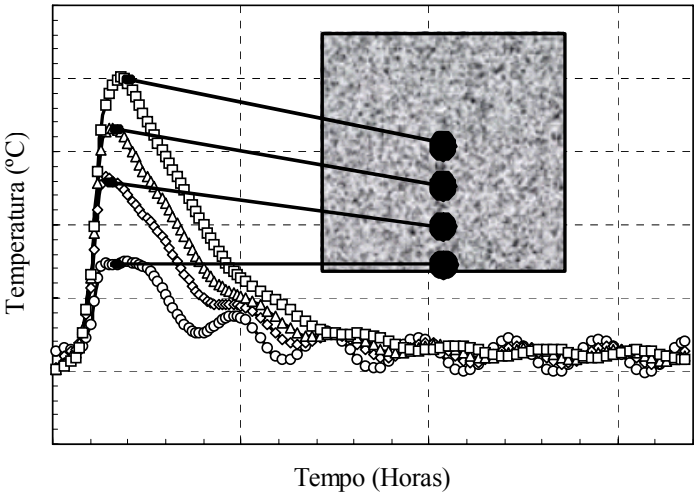


Figura 2-24 – Temperatura no interior de um pilar de concreto

As propriedades térmicas do concreto, a condutividade e a difusividade térmica e o calor específico são os principais parâmetros que controlam as trocas térmicas entre a estrutura de concreto e o meio ambiente, e são elas que podem fazer com que as temperaturas pontuais no interior da estrutura de concreto subam mais ou menos, acompanhando as variações da temperatura ambiental (CALMON, 1995).

Na Figura 2-24 pode ser observado como as propriedades térmicas bloqueiam grande parte da ação da temperatura ambiental, em uma estrutura típica – um pilar, de forma que a temperatura no centro perde vagarosamente o calor e se estabiliza praticamente com a temperatura média ambiental não sofrendo grandes variações diárias. Os pontos mais próximos da borda da estrutura, por outro lado, sofrem maiores influências da temperatura ambiental ou do ar, e assim se faz em maiores intensidades, o quanto mais próximos estão da superfície do pilar. As temperaturas nestes pontos também tendem a acompanhar as variações na temperatura ambiental, como pode ser visto na Figura 2-24. Estas diferenças de comportamento térmico durante a fase de endurecimento vão gerar diferenças de temperaturas pontuais na massa de concreto ao longo do tempo. Na Figura 2-24, por exemplo, nos momentos de pico de temperatura, podem ser vistas grandes diferenças entre as temperaturas pontuais, efeito este que se dissipa ao passo que as reações de hidratação do concreto se extinguem e que o mesmo vai perdendo calor para o ambiente.

O conhecimento das propriedades térmicas do concreto é de fundamental importância para análises térmicas e tensionais em estruturas de concreto na fase de construção. Dentre os fatores que influenciam no desenvolvimento de gradientes de temperatura e em tensões nas estruturas de concreto, podem-se citar as propriedades do concreto que atuam na difusão do calor em seu interior. Na Tabela 2-9, a seguir, estão apresentadas as propriedades térmicas que interferem no problema térmico de estruturas de concreto, destacando-se as faixas de variação para estes valores, segundo Equipe de Furnas (1997).

Tabela 2-9 – Propriedades térmicas do concreto (EQUIPE DE FURNAS, 1997)

Propriedade Térmica	Definição Fórmula e/ou Terminologia	Faixa de Variação de Valores
Calor Específico	Quantidade de calor necessária para levar em uma unidade de temperatura uma unidade de massa	0,8 a 1,25 (kJ/kgK)
Condutividade Térmica	Facilidade que o material possui em conduzir calor	1,9 a 3,5 (W/mK)
Difusividade Térmica	Expressa a velocidade da mudança de temperatura no interior da massa do material	(*)
Incremento Adiabático de Temperatura	Acréscimo de temperatura do concreto sob condições adiabáticas	(*)
Coeficiente de Dilatação Térmica	Variação adimensional do comprimento de um material para uma unidade de temperatura do mesmo	8 a 13 ($\times 10^{-6}$/K)

Nota:

* Devido à variação das propriedades que interferem no incremento adiabático de temperatura não se podem estabelecer limites em intervalo definido de valores.

2.4.4. O Fluxo de Calor no Concreto

A energia térmica pode fluir pelos meios interior e exterior do concreto por três mecanismos distintos: transmissão por convecção, transmissão de por radiação e transmissão de por condução. Essa divisão é unicamente didática, uma vez que nenhum desses mecanismos age de forma isolada dos demais.

a) <u>Transmissão de Calor por Convecção</u>

Convecção é o processo de transmissão de energia térmica por intermédio do movimento de um fluido. Os movimentos são os movimentos geralmente designados por correntes dos fluidos. Se o movimento do fluido for devido, unicamente, às diferenças de suas densidades, motivadas pelas diferenças de temperatura, a convecção diz-se natural.

Quando o movimento do fluido for devido a causas exteriores, independentes do fenômeno térmico, a convecção se diz forçada. Em relação a um corpo colocado ao ar, o vento pode ser a causa que confere o caráter de forçada à convecção. No caso do estudo dos problemas térmicos relativos às barragens de concreto, observa-se convecção forçada sempre que correntes de ar devidas ao vento atuam sobre sua superfície.

O mecanismo de transferência de calor por convecção, em geral, é bastante complexo e depende de numerosos fatores tais como:

- Diferença de temperatura entre o fluido e o corpo;
- Velocidade de deslocamento do fluido;
- Densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica do fluido;
- Natureza, forma, rugosidade, dimensões e orientação do corpo.

Esses fatores podem variar de forma aleatória, dependendo de onde a estrutura está localizada, evidenciando a complexidade de se avaliar analiticamente esse mecanismo de transmissão de calor.

É usual recorrer-se a relações de caráter prático para arbitrar valores para o coeficiente de convecção. Calmon (1995) apresenta algumas expressões empíricas para a representação do coeficiente de convecção em função da velocidade do vento.

b) Transmissão de Calor por Radiação

A radiação térmica é o processo de emissão, por um corpo, de energia radiante cuja quantidade e qualidade dependem da temperatura do próprio corpo. Admite-se que todo ele, desde que não seja perfeitamente transparente, emite permanentemente radiações térmicas para o espaço envolvente, e que absorve, pelo menos parcialmente, radiações proveniente de outros corpos (NEVILLE, 1997).

No concreto, como também em outras estruturas expostas ao ambiente, durante as horas diurnas existe um ganho de energia térmica. Resultado da radiação solar incidente sobre as superfícies da mesma, que absorve parte desta energia. À noite, ocorre uma perda de energia térmica armazenada pela estrutura, devido, em parte, a re-radiação emitida por esta ao ambiente. Em estruturas de concreto com grande geração de calor, como o CAD, e a temperaturas altas, os efeitos da radiação térmica não são muito significativos e podem ser desprezados na modelação do fenômeno físico, segundo Calmon (1995).

c) Transmissão de Calor por Condução

A condução é a transmissão de calor através de um meio material, sem movimentos internos e sem intervenção da radiação. É o processo de transmissão de energia característico dos corpos sólidos, embora possa também ter lugar nos fluidos em muito pequenas espessuras.

Além das transferências de calor por convecção e por radiação entre as superfícies das estruturas e às vizinhanças em que estão imersas, encontra-se também entre ambos os meios a transferência de calor por condução: a energia térmica se transmite das moléculas com maior energia cinética de translação (maior temperatura) às moléculas com menor energia cinética (menor temperatura), sem que haja transferência de massa (NEVILLE, 1997).

2.4.5. O Problema Tensional no Concreto

As diferenças de temperatura encontradas entre os pontos no interior da estrutura de concreto tendem a gerar deformações mesmo enquanto o concreto ainda não endureceu. Estas deformações, proporcionais ao coeficiente de deformação térmica do material e às dimensões da estruturas são tão maiores quanto são as diferenças de temperatura experimentadas pelas mesmas.

No nível de estudo das tensões, as estruturas na prática são restringidas de se deformarem mais ou menos de acordo com as concepções de projeto e construção. A restrição de deformação experimentada pela estrutura é quem efetivamente gera as tensões de origem térmica de compressão, caso a estrutura seja impedida de se alongar durante o aquecimento ou de tração caso ela seja impedida de encurtar durante o seu resfriamento.

A Figura 2-25 apresenta o comportamento tensional típico experimentado pela seção transversal de um pilar de concreto quadrado com os quatro lados restringidos nas duas direções do plano em que a seção está contida[11].

Pode ser notado que a tendência geral de todos os pontos no interior do elemento é de se afastarem nas primeiras horas após a concretagem seguindo o aquecimento acelerado e desigual da massa de concreto que faz gerar diferenças de temperatura entre os pontos. De acordo com a queda de temperatura dos pontos interiores ao pilar, as deformações passam a ser de contração do elemento, que restringido passa a ser solicitado de tensões de tração

[11] Gráficos gerados a partir de resultados de simulações não publicadas deste autor.

acumulativas com a queda da temperatura interna até a estabilização com a temperatura média ambiental, gerando a diminuição nas diferenças de temperatura e diminuição nos níveis de tensão.

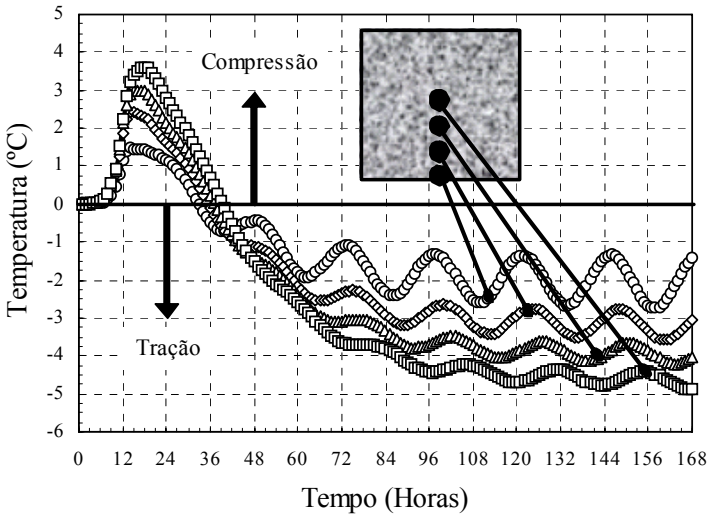


Figura 2-25 – Tensões desenvolvidas no interior de um pilar

Estudar o problema termo-mecânico no concreto, como é comentado no próximo item, pode ser entendido como: (1º) estudar o problema térmico do concreto, ou seja, todos os parâmetros que levam o concreto a elevar a ou reduzir sua temperatura interna; (2º) estudar o problema mecânico do concreto que surge com as deformações que apresenta uma estrutura quando submetida ao calor, analisando todos os parâmetros envolvidos nas deformações do concreto; e (3) estudar o problema tensional gerado pela variação nas dimensões da massa da estrutura com a variação de sua temperatura, analisando os parâmetros que influem na distribuição de tensões no interior de uma estrutura de concreto (MAJORANA *et al*., 1990).

Como se obter uma resposta para saber se a estrutura em análise está mais ou menos exposta ao risco de fissuração de origem térmica, é o objetivo do próximo item.

2.5. O ESTUDO TERMO-MECÂNICO

As fissuras de origem térmica, que podem ocorrer em estruturas de concreto na fase de endurecimento, são especialmente importantes naquelas estruturas que estão em contato direto com agentes que podem desencadear ou acelerar os processos de deterioração do concreto simples ou do concreto armado.

Pode-se exemplificar estruturas de concreto, como túneis que estão, via de regra, expostas a gradientes hidráulicos, pontes que podem estar expostas à ação das águas e a cloretos, e as estruturas que estão inseridas em ambientes das cidades, onde há o perigo da despassivação da armadura causada pela carbonatação, ou ainda nas várias cidades litorâneas, onde a exposição aos cloretos do mar é um dos mais importantes agentes de degradação das armaduras. Estes são exemplos rotineiros de estruturas que podem ter suas vidas úteis de projeto significantemente reduzidas pelo desencadeamento de fissuras de origem térmica.

O entendimento dos principais fatores que influenciam no risco de fissuração térmica nestes casos é de grande importância, uma vez que o processo de construção civil pode se beneficiar de menores custos finais alocados em estruturas de concreto que necessitam de manutenções menos freqüentes e menos honeroras para uma mesma vida útil de projeto, ou mesmo de estruturas com vidas úteis de projetos mais longas.

2.5.1. Estudo do Campo de Temperatura e do Campo de Tensão

O estudo termo-mecânico das estruturas de concreto, então, se utiliza da análise das formas com que os campos de temperatura e de tensão se desenvolvem com o endurecimento do concreto (NAGY, 2002). Isto porque o desenvolvimento das resistências são muito próximos aos desenvolvimentos de temperatura nas primeiras idades, mas os de tensões não, dependendo muito mais das condições de contorno da estrutura de concreto a ser executada do que do tipo de concreto e de seu desprendimento de energia térmica.

O MEF é muito conhecido e bastante usual na resolução das equações diferenciais parciais que governam os problemas térmico e tensional em malhas não homogêneas. Neste estudo, o MEF é utilizado em dois programas que analisam o comportamento termo-mecânico de estruturas hipotéticas em CAD resolvendo a equação transiente de condução de calor (equação de Fourier), considerando condições de contorno. O fluxo de calor nos sólidos, na forma bidimensional, é governado pela equação diferencial parcial (CALMON, 1995):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k(x)\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\left[k(y)\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\dot{q}=\rho\times c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{Eq. (2-3)}$$

onde $\dot{q}$ é a taxa de geração de calor interno devido à hidratação do cimento por unidade de volume e tempo (W/m^3·h), ρ é a densidade do concreto (kg/m^3), c é o calor específico (J/kg·ºC) e k é a condutividade térmica do concreto (W/mº·C), $\rho \cdot c$ é a capacidade térmica, e

T é a função-temperatura (ºC) a qual depende da posição geométrica da peça a ser analisada (coordenadas *x* e *y* de um dado ponto) e do tempo *t*.

As condições de contorno usadas para a análise das superfícies externas da estrutura são as condições de Neumann, que no caso deste estudo, podem ser expressas como – ver Calmon (1995):

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + q(x,y,t) = 0 \qquad \text{Eq. (2-4)}$$

onde n_x, n_y são as coordenadas cartesianas do vetor direcional de cosenos da normal à superfície e $q(x,y,t)$ é o fluxo de calor ganho ou perdido por unidade de área da superfície externa (W/m^2). No caso particular da condição de Neumann (superfície adiabática) o fluxo de calor é assumido nulo para todos os tempos de análise, como discutido por Calmon (1995) e Santos (2004).

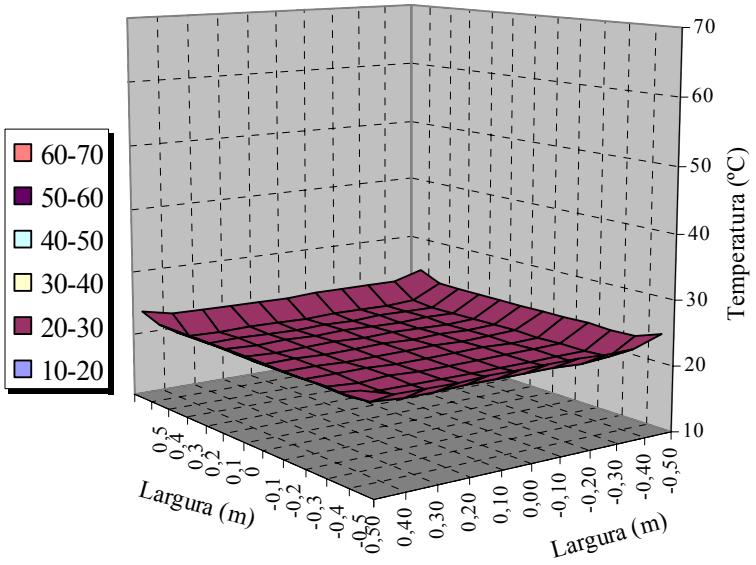
As soluções em elementos finitos para essas equações diferenciais de condução de calor apresentadas em duas dimensões, e para outras em três dimensões, são bem conhecidas e podem ser encontradas em diversas referências de livros e trabalhos científicos, como por exemplo, Oñate (1992) *apud* Calmon (1995) e Zienkiewicz e Taylor (2000) apud Calmon (1995).

A Figura 2-26 e a Figura 2-27, a seguir, apresentam os desenvolvimentos dos campos de temperaturas típicos para um pilar de seção quadrada de 1×1 m. Nelas pode ser acompanhado como se comportam as temperaturas na seção média do pilar após 1 e 12 horas (Figura 2-26) e 20 e 72 horas (Figura 2-27) após a concretagem.

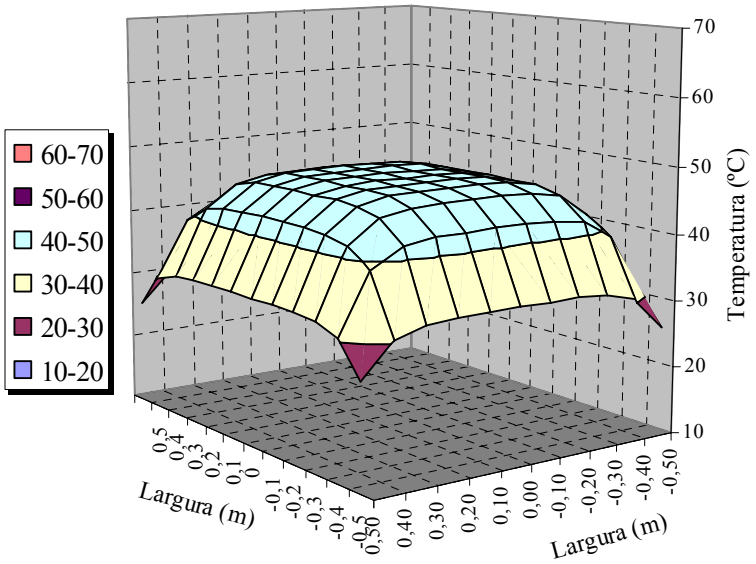
A Figura 2-27 (a) apresenta o campo de temperatura para o momento de temperatura máxima no centro do pilar, que alcança temperaturas superiores a 60°C.

Os desenvolvimentos de tensão associados aos campos de temperatura mostrados na Figura 2-26 e na Figura 2-27 estão apresentados na Figura 2-28[12]. Ela apresenta os campos de tensão para a seção média do pilar nas idades de 1 e 72 horas.

[12] Gráficos gerados a partir de resultados de simulações não publicadas deste autor.

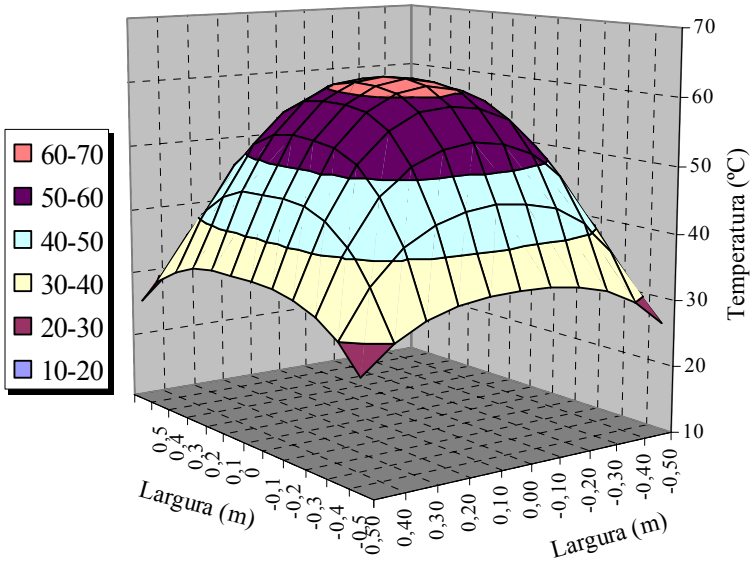


(a)

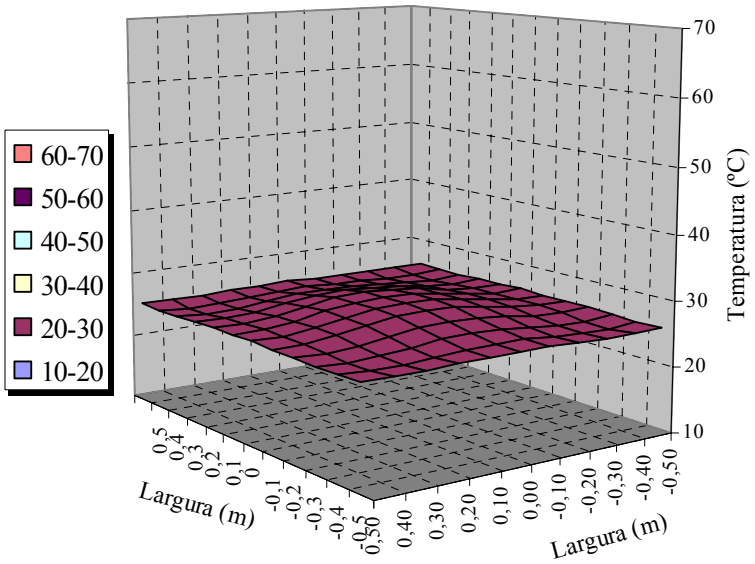


(b)

Figura 2-26 – Campo de temperatura na seção de um pilar: (a) 1 hora; (b) 12 horas

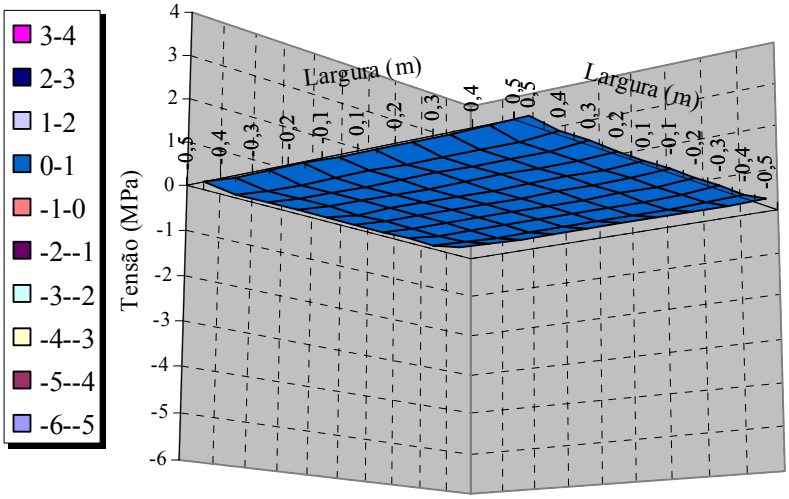


(a)

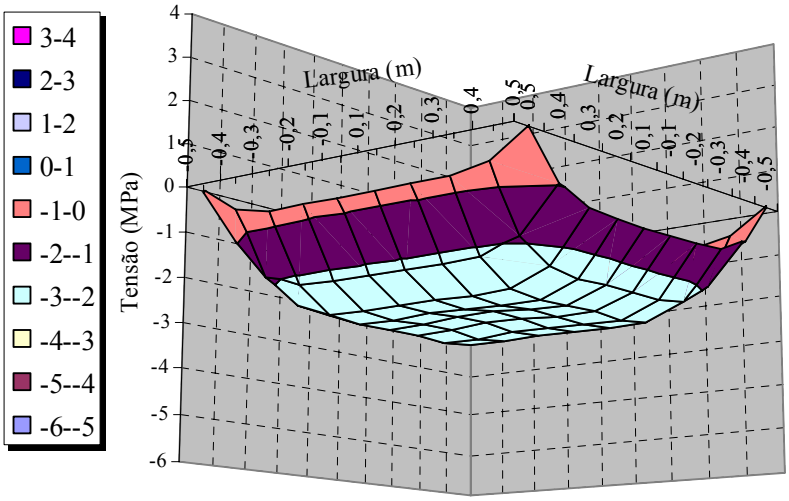


(b)

Figura 2-27 – Campo de temperatura na seção de um pilar: (a) 20 horas; (b) 72 horas



(a)

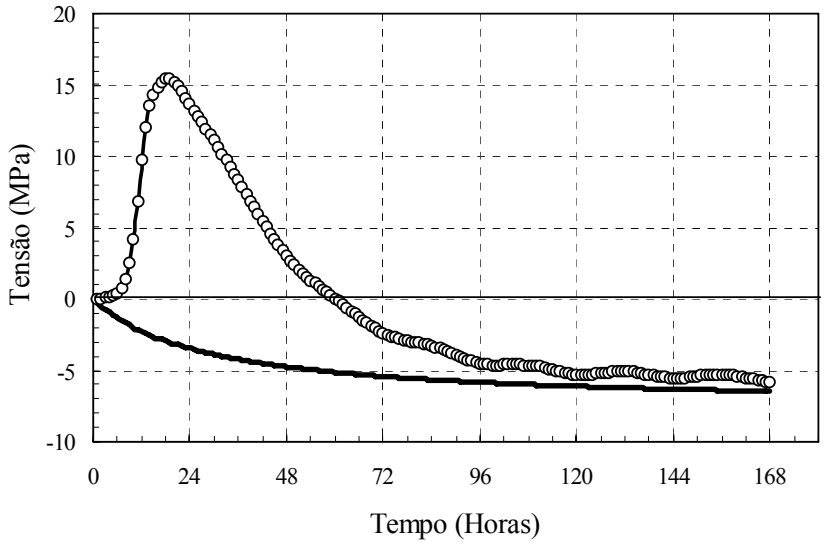


(b)

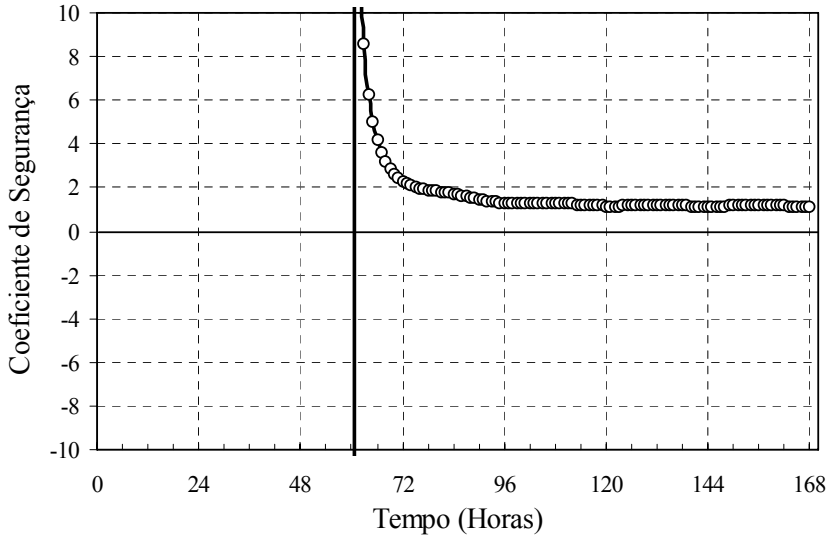
Figura 2-28 – Campo de tensão na seção de um pilar: (a) 1 hora; (b) 72 horas

2.5.2. O Conceito de Segurança de Risco de Fissuração

O estudo termo-mecânico se utiliza, então, de procurar qual é o valor da relação resistência-solicitação mecânica durante a etapa de endurecimento do concreto, conceito que é definido como segurança de risco de fissuração. A Figura 2-29 (a) apresenta os desenvolvimentos de solicitação e de resistência no ponto central de um pilar e a Figura 2-29 (b) a relação entre estas ao longo do tempo[13]. Ao se analisar Figura 2-29 (b), baseando-se em uma boa precisão dos dados envolvidos na simulação, o estudo termo-mecânico está finalizado, podendo, por exemplo, retro-alimentar uma nova simulação.



(a)



(b)

Figura 2-29 – Desenvolvimento de tensão e do C. S. no centro de um pilar

[13] Gráficos gerados a partir de resultados de simulações não publicadas deste autor.

2.6. A MODELAGEM PARA O PROBLEMA TERMO-MECÂNICO

Uma vez que o problema termo-mecânico tem abrangência extensa, como mostrado no item anterior, tem-se lançado mãos de solução computacional, que possa além de fornecer uma resposta às questões em um caso de estudo, que possa dar subsídios para execução de estruturas numa tomada de decisão *in loco*, segundo intervalos para as condições de contorno: gráficos, ábacos, tabelas, que possam auxiliar o trabalho de campo (BAETENS *et al*., 2002). Vários trabalhos têm se ocupado de preencher este espaço no campo do estudo termo-mecânico, o pioneiro deles foi o de Roy W. Carlson "A Simple Method To Compute the Thermal Stresses in Concrete" onde pela primeira vez o método dos elementos finitos foi empregado para solucionar um problema eminentemente prático no âmbito do estudo térmico do concreto com um bom grau de precisão.

Outros modelos aplicando o MEF, MDF, MEC e outros métodos de computação foram desenvolvidos desde então tentando unir numa solução relativamente precisa os problemas da energia liberada pela hidratação do cimento, e a deformação do mesmo, com o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas. Modelos tão poderosos que podem, por exemplo, apresentar em três dimensões todo o processo de hidratação do cimento na presença de adição mineral, como apresentado por Bentz (2005) com o programa chamado CEMHYD3D. Ou então, modelos que consideraram a não-linearidade das propriedades físicas, químicas e mecânicas da pasta de cimento durante a hidratação, levando em conta a questão da energia de ativação na maturidade do concreto.

De acordo com o objetivo de cada estudo, certo grau de precisão precisa ser empregado na análise computacional e aos dados de saída que serão analisados. Assim, deve ser mantida certa coerência entre os procedimentos experimentais para que não seja dada uma maior precisão do que a que efetivamente pode ser obtida a partir das propriedades experimentalmente determinadas do concreto.

Neste trabalho, são utilizadas as rotinas apresentadas por Silva (2002) e Santos (2004) para o modelo em elementos finitos do problema termo-mecânico desenvolvido no trabalho de Calmon (1995), que teve como objetivo a construção de estruturas de barragens em camadas. São utilizados dois módulos chamados PFEM_2D T (módulo de análise térmica) e PFEM_2D AT (módulo de análise tensional). O trabalho de Santos (2004), após repassar todo o problema termo-mecânico apresentado na formulação de Calmon (1995) apresentou a sua implementação computacional, destacando-se como cada fator interferente no modelo adotado foi levado em consideração nos cálculos. Ainda, Santos (1998) mostrou a

estrutura do programa e como a Programação Orientada a Objetos foi utilizada na elaboração do mesmo. Ainda, explicou sobre a capacidade do programa, comentando quais são suas aplicações e restrições na análise do problema termo-mecânico e as formas de entrada e saída de dados nos módulos que compõem o programa de computador.

2.6.1. Programas Computacionais de Análise Termo-Mecânica

Nesta pesquisa, foram utilizados para as simulações de computador dois programas utilizando-se do MEF desenvolvidos por Santos (2004), descritos resumidamente, a seguir.

a) Program Finite Element Method 2 Dimensional, Análise Térmica (PFEM_2D T)

É o módulo de análise térmica em estruturas com diferentes materiais, destacando-se, estruturas de concreto nas primeiras idades. O programa analisa a resposta térmica de estruturas em domínios bidimensionais de qualquer geometria plana, em regimes transiente ou estacionário, e realiza análise linear utilizando elementos finitos triangulares lineares de três nós. Ele é capaz de analisar sólidos e estruturas e fornece as seguintes respostas:

- O campo de temperaturas em estruturas de concreto nas idades iniciais, considerando o calor de hidratação;
- O campo de temperaturas, considerando a ação térmica ambienta;
- Análise não-linear do campo de temperaturas de estruturas de concreto.

O programa, na análise de problemas construtivos em estruturas de concreto, pode ser utilizado segundo as condições reais de campo. Dentre elas pode-se citar:

- Diferentes condições de lançamento (concretagem em camadas com diferentes espessuras, temperaturas de lançamento e intervalo de concretagem);
- Consideração de diferentes materiais com propriedades térmicas distintas, podendo incluir material inerte da fundação (rocha, por exemplo);
- Concretagem com fôrma deslizante sob uma determinada velocidade de lançamento;
- Condições ambientais e de contorno variadas conforme necessidades da análise;
- Consideração da pós-refrigeração, simulando a refrigeração através da circulação de água em tubos internos à estrutura de concreto lançada;

- Consideração da influência do tempo equivalente na geração de calor interna do concreto. Influência da maturidade no processo de hidratação do aglomerante.

Os parâmetros de entrada do programa PFEM_2D T estão apresentados na Tabela 2-11.

Tabela 2-10 – Resumo dos parâmetros de entrada do programa PFEM_2DT (SANTOS, 2004)

Características do Domínio	Geometria e materiais dentro do domínio
Discretização	Discretização dos elementos finitos
Propriedades Térmicas do Concreto	Elevação adiabática, condutividade térmica (nas direções x e y), calor específico
Propriedade Física do Concreto	Densidade
Condições Iniciais e de Contorno	Temperatura prescrita, coeficiente de convecção, temperatura ambiente
Dados do Sistema	Tempo total de análise, incremento de tempo, unidades utilizadas, método de resolução de sistemas

Para resumir as fases de resolução do problema térmico pelo PFEM_2DT, apresenta-se na Figura 2-30 um fluxograma resumido, incluindo as principais macro-atividades (ou eventos) utilizadas pelo programa. Os resultados de temperaturas gerados pelo programa PFEM_2DT, representados pela última atividade do fluxograma, são utilizados como dados de entrada do programa PFEM_2DA T de análise tensional, descrito mais adiante.

b) Análise Termo-Mecânica (PFEM_2D AT)

PFEM_2D AT é um programa para a análise tensional em regime estacionário ou transiente, desde as primeiras idades, considerando o comportamento viscoelástico-linear do concreto. Ele analisa a resposta tensional de estruturas em domínios bidimensionais de qualquer geometria plana, em regimes transiente ou estacionário, e realiza análise linear utilizando elementos finitos triangulares lineares de três nós. Ele analisa sólidos e estruturas e fornece as seguintes respostas:

- O campo de deformações em estruturas de concreto nas primeiras idades, considerando a viscoelasticidade na fase linear ou elasticidade do material, podendo utilizar como dado de entrada as deformações iniciais geradas pelo campo de temperatura fornecido pelo programa de análise térmica PFEM_2DT;
- O campo de tensões e tensão cisalhante em estruturas baseadas nas deformações, considerando a ação de forças externas e o peso próprio do material;
- O campo tensões normais máximas e tensão cisalhante máxima baseadas nas tensões inicialmente calculadas.

Todas as condições reais de campo simuladas pelo programa PFEM_2DT, de análise térmica, são consideradas no programa de análise tensional PFEM_2DAT, incluindo:

- Diferentes representações da predição da fluência do concreto;
- Consideração da retração do concreto segundo modelo do CEB e BAŽANT.
- Condições de vinculação da estrutura (apoio do 1º ou 2º grau) escolhidos em quais nós do domínio discretizado as mesmas serão consideradas;
- Aplicação de carga distribuída externa nas superfícies da estrutura;
- Escolha do tipo de análise tensional: análise no estado plano de deformações ou tensões.

Além dos dados de entrada do problema térmico associado ao programa PFEM_2DT – ver Tabela 2-10, a análise tensional realizada pelo programa PFEM_2D AT necessita dos seguintes dados de entrada – Tabela 2-11:

Tabela 2-11 – Resumo dos parâmetros de entrada do programa PFEM_2D AT (SANTOS, 2004)

Propriedades Mecânicas	- Módulo de Elasticidade (fixo ou variável com o tempo), coeficiente de Poisson, coeficiente de expansão térmica.
Propriedades Viscoelásticas	- Modelo de predição da fluência e retração
Propriedade Física	- Aceleração da gravidade e peso específico.
Condições Iniciais e de Contorno	- Atribuição de vínculos externos à estrutura através mouse.
Dados do Sistema	- Tempo total de análise, incremento de tempo (steps), unidades utilizadas, método de resolução de sistemas, liberação de memória.

A Figura 2-31 apresenta o fluxograma da resolução do problema tensional pelo PFEM_2DT, adaptado de Santos (2004).

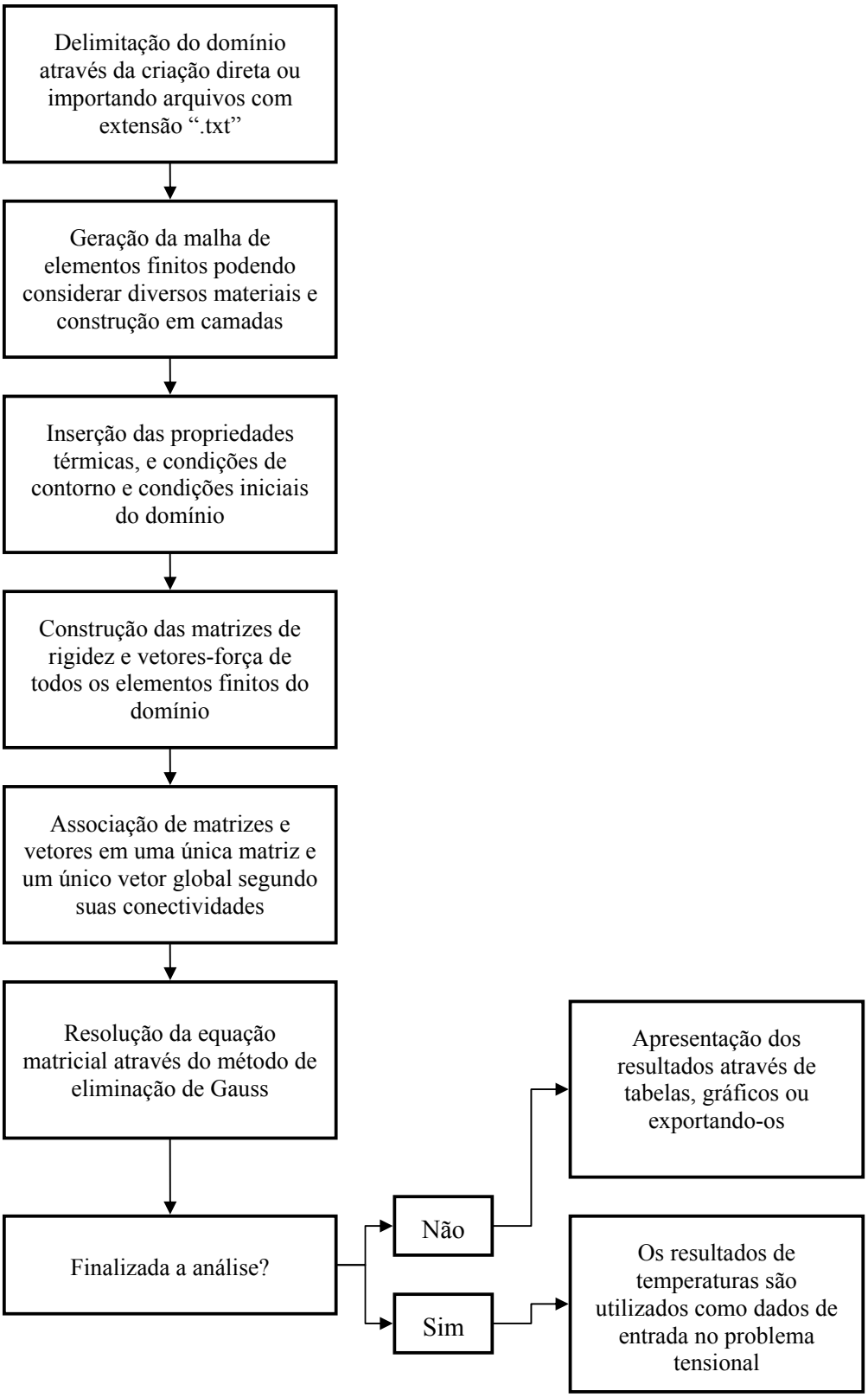


Figura 2-30 – Resolução do problema térmico pelo PFEM_2DT (Adaptado de Santos (2004))

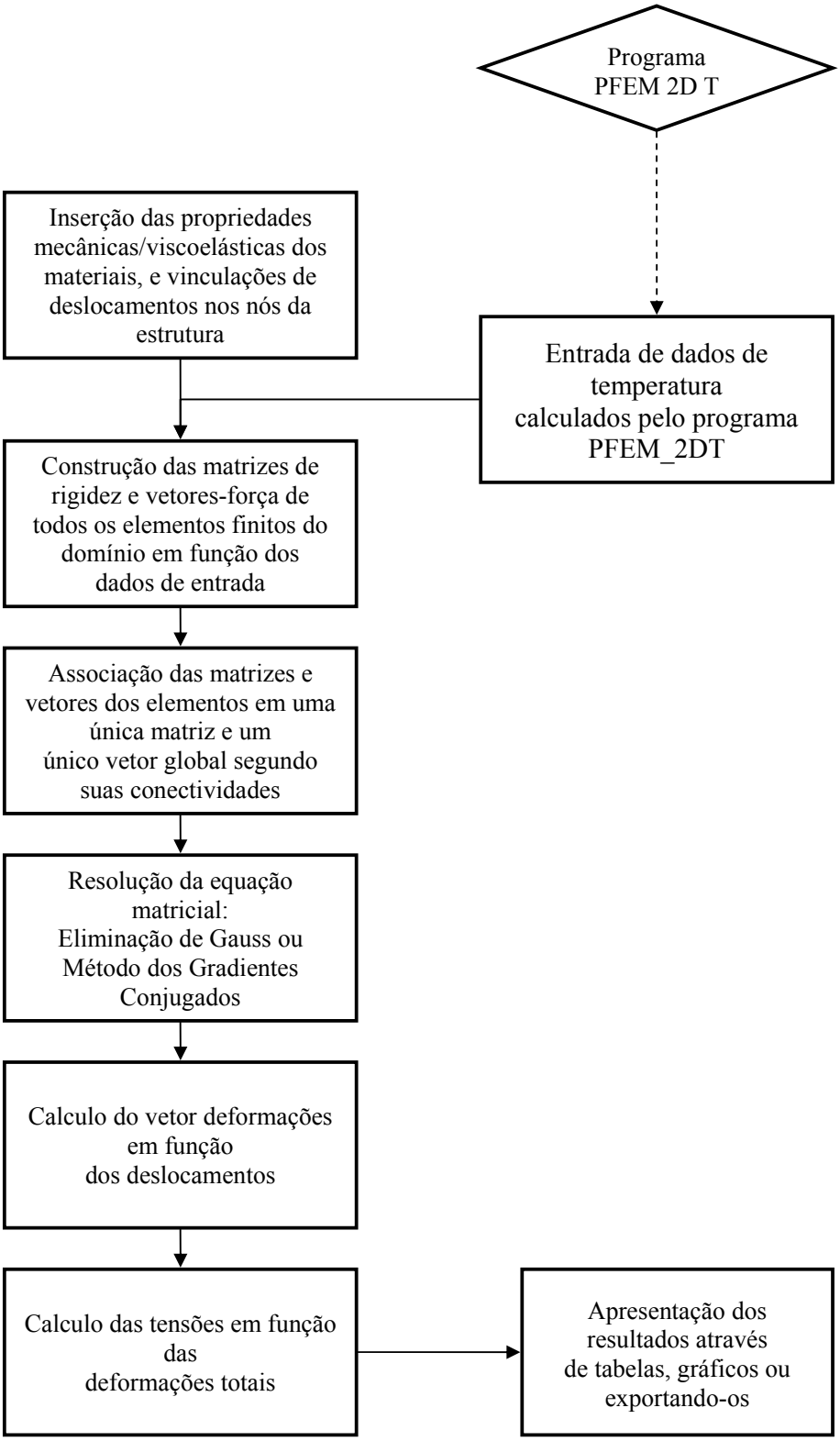


Figura 2-31 – Resolução do problema tensional pelo PFEM_2DT (Adaptado de Santos (2004))

2.7. O ESTUDO TERMO-MECÂNICO DO CAD

O estudo termo-mecânico em estruturas de concreto comum é pouco relatado na literatura técnica sendo escassos os trabalhos científicos, e para o caso do CAD não é diferente. Levando-se em conta que, para estruturas em CAD, o potencial de energia térmica a ser liberada quando da hidratação dos aglomerantes é muito grande, devido ao grande consumo destes materiais, parece bastante oportuno delinear o estudo termo-mecânico por este parâmetro (WANG e DILGER, 1995), embora o efeito decisivo da relação água-cimento seja conhecido em alguns casos inibindo a hidratação de boa parte do aglomerante contido na mistura, como apresentado por Zhang *et al*. (2002), comentado no item 2.4.

2.7.1. A Característica Multidisciplinar do Estudo Termo-Mecânico

A estimativa do risco de fissuração de uma estrutura pode ser feita na etapa de projeto ou imediatamente antes de seu lançamento nas fôrmas para um estudo prático de execução. Assim, vários modelos e ferramentas podem ser utilizados na análise de risco de fissuração. As formas de análise podem variar desde modelos de cálculo tri-dimensionais utilizando o método dos elementos finitos ou outros métodos computacionais, até simples mas acurados métodos baseados em cálculos manuais, ábacos, diagramas ou bases de dados numéricos, como discutido em Calmon (1995).

O ponto em comum de todos os tipos de análise é que eles são baseados em certo número de passos, variável de método para método. Primeiramente, o tipo da estrutura, o material e os limites de segurança devem ser definidos. Num segundo instante, as propriedades do material tais como calor de hidratação, propriedades mecânicas e térmicas, etc., devem ser determinadas experimentalmente ou por meio de bases de dados, equações, diagramas, etc. A seguir, as condições de contorno do problema devem ser adotadas, incluindo aí as condições de restrição da estrutura e as condições de exposição ambiental: temperatura ambiente, umidade, vento, radiação solar, etc. Ao final, uma análise geral da relação resistência-solicitação é apresentada para a estrutura em questão.

A Figura 2-32 a seguir, apresenta o modelo de análise termo-mecânica a ser seguido neste trabalho de pesquisa. Este modelo é simplificado em relação ao que foi adotado por Nilsson (2000) e Nilsson (2003) do ponto de vista do número de etapas, no entanto ele tem apresenta ao final o comportamento do coeficiente de segurança da estrutura analisada ao longo do tempo, com o cômputo da relação entre resistência e solicitação mecânica durante

toda a idade de endurecimento da estrutura, o que pode ser entendido como uma busca de melhor precisão de modelo de análise.

Neste modelo, o primeiro passo consiste em escolher a geometria e os traços dos concretos a serem estudados. A homogeneidade das propriedades do material deve ser respeitada para assegurar a adequação ao modelo numérico de simulação. Numa situação real de projeto segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), estaríamos falando apenas da geometria do elemento estrutural e de sua resistência à compressão, uma vez que este é o modelo para projeto de estruturas de concreto no Brasil. Ainda, a margem de segurança deve ser adotada neste momento; essa definição é uma tarefa meramente empírica e representa o retorno dado por estruturas já executadas que estiveram ou não sujeitas à fissuração de origem térmica. O Laboratório de Concreto de Furnas tem acumulada boa experiência em estudos desta natureza e conclui que é de boa precisão se adotar coeficiente mínimo entre 1,4 e 1,6 para elementos que não possuem grande massa, como é o caso das estruturas desta pesquisa. Para estruturas de grande massa, valores maiores podem ser necessários, pela grande restrição às deformações ou pelo efeito acumulativo do peso próprio.

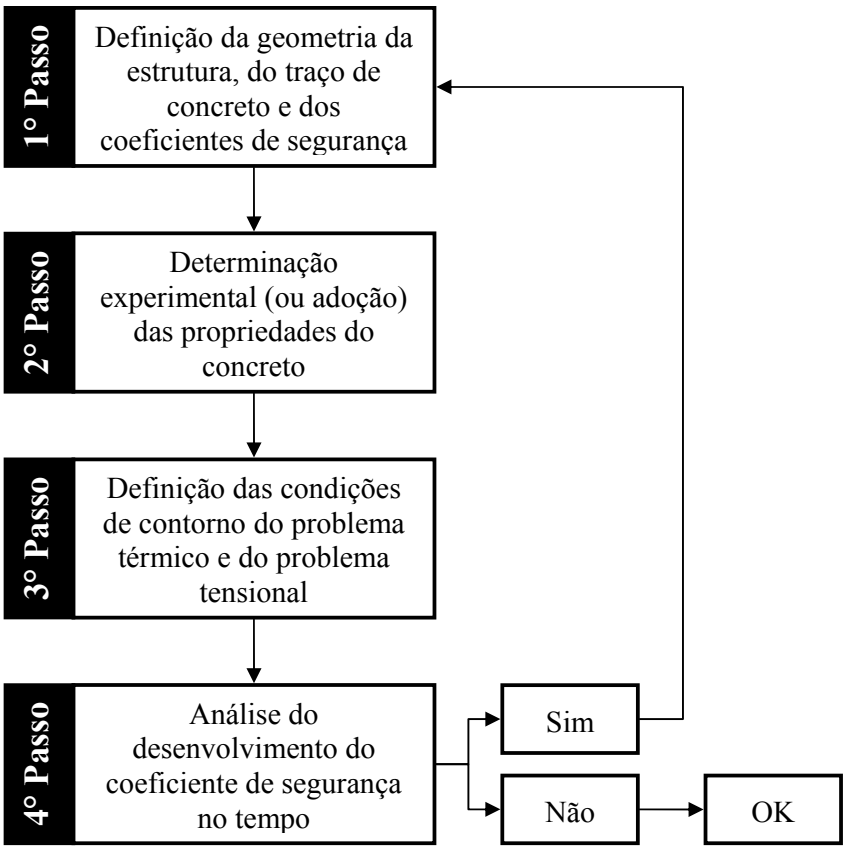


Figura 2-32 – Modelo de análise do risco de fissuração adotado nesta pesquisa

O segundo passo, na Figura 2-32, se reporta à determinação das propriedades do concreto. Do desenvolvimento de suas propriedades mecânicas até o estado endurecido: resistências à tração/compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson; e suas propriedades térmicas: condutividade/difusividade térmica, calor específico, coeficiente de dilatação térmica e calor de hidratação ou elevação de temperatura adiabática. Neste momento, pode-se lançar mão de bases de dados, gráficos, ou preferencialmente, uma investigação experimental, para a determinação dos valores que irão alimentar o modelo de cálculo.

No terceiro passo, o modelo é alimentado com as condições de contorno impostas pela própria estrutura, e pelos métodos construtivos e pela situação ambiental da mesma. As interfaces entre o elemento estudado e outras partes da mesma estrutura, de estruturas adjacentes ou do solo/fundação a qual se alicerça, devem ser cuidadosamente analisadas. Em Calmon (1995) vários casos de coeficientes de restrição podem ser encontrados para situações típicas dos elementos estruturais da Construção Civil.

A determinação da relação entre resistência mecânica e tensão de origem térmica – margem ou coeficiente de segurança – está representada no passo 4 da Figura 2-32. Este passo pode ser feito utilizando-se de programas de computador como apresentado por Santos (2004) – comentado anteriormente, de cálculos manuais ou utilizando-se diagramas e bases de dados. A análise final do risco de fissuração é feita comparando-se o desenvolvimento do coeficiente de segurança com os valores limites que podem ser encontrados em normas de projetos, na literatura técnica ou na experiência de campo, como é adotado neste trabalho. Uma apresentação clara desta análise é apresentada no Capítulo 4 desta dissertação.

2.7.2. As Características Típicas do CAD e o Estudo Termo-Mecânico

É importante frisar que, baseando-se na literatura técnica até aqui apresentada, apenas duas afirmativas podem ser feitas sobre o CAD com certo grau de certeza a respeito de seu comportamento termo-mecânico. A primeira delas, é que o CAD é um material que tem um grande potencial de proporcionar um quadro favorável ao desenvolvimento de fissuras causadas por tensões que surgem após o lançamento do material nas fôrmas. Este potencial se deve à grande quantidade de aglomerante utilizada em seu proporcionamento, e que ao se hidratar, libera energia e aquece o material. A segunda, é que a liberação de energia térmica diminui para concretos com reduzidos valores de relação água-aglomerante. Assim, embora exista um grande potencial de liberação de energia térmica, parece que nem

todo o aglomerante consegue se hidratar nas misturas com baixas relações água-aglomerante, diminuindo a quantidade de energia térmica liberada por reações químicas.

2.7.3. Estudos Termo-Mecânicos Já Realizados em Estruturas de CAD

A literatura técnica é carente de dados sobre estudos térmicos e tensionais em estruturas utilizando CAD. Neste âmbito, quatro trabalhos encontrados merecem algum destaque.

Cook et al. (1992) experimentaram três colunas de CAD de 1m de lado com 35, 90 e 120 MPa de resistência à compressão aos 28 dias e consumos de aglomerante (cimento e sílica ativa) aproximados de 350, 450 e 550 kg/m^3 de concreto que apresentaram elevação de temperatura de cerca de 50°C no centro das colunas. As tensões no interior da estrutura foram medidas com extensômetros. As propriedades térmicas, no entanto, não foram determinadas, assim como outros parâmetros importantes no estudo, como a fluência. O estudo teve abrangência muito boa, com vistas ao estudo tensional, embora não tenham sido explícitos os valores de coeficientes de segurança.

A monitoração da temperatura e da deformação procedida por Miao *et al.* (1993) em duas colunas de 0,85 m de diâmetro com CAD de 80 MPa teve como objetivo medir as tensões trocadas entre concreto e aço durante a etapa de endurecimento. O trabalho não tem uma conotação de estudo termo-mecânico, no entanto apresenta dados dificilmente encontrados para concretos desta natureza, como coeficiente de expansão térmica, por exemplo.

Selna e Monteiro (2001) apresentam as soluções adotadas durante a execução das espessas paredes da Cathedral of Our Lady of the Angels, em um CAD colorido, utilizando-se cimento branco dinamarquês e cinza volante, que alcançou resistências à compressão de cerca de 60MPa e elevação de temperatura de 52°C. A mistura teve consumo de cimento de 550 kg/m^3 de concreto e relação água-aglomerante 0,45. O estudo não teve uma abrangência tensional, uma vez que a margem de segurança foi definida limitando-se a diferença de temperatura máxima entre o centro e o exterior das peças de 25°C, orientação dada pelos projetistas da estrutura. A análise realizada foi, efetivamente, apenas térmica.

Ern (2003) e Santos (2004) apresentam estudos termo-mecânicos de estruturas típicas de fundação em CAD que incluem monitoração e análise computacional com propriedades reais do concreto. Os autores não explicitam os valores de margem de segurança, mas fazem a análise relativa graficamente entre resistência e solicitação mecânica. Distinguem-se como trabalhos mais completos do ponto de vista experimental e são os modelos a serem seguidos neste trabalho de pesquisa.

CAPÍTULO 3
PROGRAMA EXPERIMENTAL

3. METODOLOGIA E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta parte do trabalho são descritos as variáveis em estudo, os equipamentos utilizados, os métodos de ensaio e os procedimentos adotados para o desenvolvimento dos experimentos de laboratório e de computação (simulação) empregados para atingir os objetivos desta pesquisa.

A metodologia adotada envolveu, num primeiro instante, ensaios de caracterização dos CAD nos estados fresco e endurecido, ensaios de caracterização das suas propriedades térmicas e de viscoelasticidade. Numa segunda etapa, foram realizadas simulações de computador utilizando do método dos elementos finitos – MEF – para analisar os comportamentos de estruturas típicas utilizando os CAD produzidos.

3.1. ANÁLISE GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Antes da apresentação do programa experimental, algumas considerações devem ser levadas em conta, como forma de não se abster dos limites da representatividade do

programa experimental aqui apresentado. Essas considerações dizem respeito à utilização prática os resultados aqui obtidos numa situação *in loco.*

3.1.1. A Seleção do Material Utilizado

Todos os materiais utilizados no programa experimental foram adquiridos diretamente no comércio da cidade de Goiânia-GO, seja no comércio local ou por intermédio de representação comercial, como é o caso dos superplastificantes e das adições minerais.

3.1.2. O Programa Experimental Piloto

O estudo piloto objetivou a definição inicial dos traços básicos de CAD: proporções de cimento, agregados e água. Uma vez que os aditivos têm prazo de validade bastante limitado, 90 dias a partir da data de produção, não se pôde utilizar um único lote de cada tipo de aditivo durante toda a pesquisa. Assim, um lote de cada tipo de aditivo foi destinado para a definição dos traços básicos, e um segundo lote para o programa experimental principal.

3.1.3. O Programa Experimental Principal

O programa experimental principal foi dividido em duas partes, laboratorial e computacional. A primeira, envolvendo a produção e caracterização dos CAD, foi executada nos laboratórios do DCT.T de Furnas Centrais Elétricas na cidade de Aparecida de Goiânia-GO e seguiu as normas da ABNT ou da ASTM, quando aplicáveis. A segunda, envolvendo simulações computacionais utilizando o MEF, foi executada no laboratório de informática do PPGEC da UFES, e seguiu a metodologia de análise termo-mecânica desenvolvida no NDCC (CALMON, 1995; SILVA, 2002; SANTOS, 2004).

3.1.4. A Análise Termo-Mecânica

As análises foram executadas utilizando-se dos programas de computador PFEM_2D T e PFEM_2D AT, segundo metodologia desenvolvida no NDCC da UFES – ver Calmon (1995), Silva (2002) e Santos (2004). Pilares em CAD foram simulados para uma melhor compreensão do papel dos diferentes tipos de aditivo e de adição no comportamento termo-mecânico de estruturas típicas em CAD.

3.2. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DA PESQUISA

As principais variáveis estudadas no programa experimental desta pesquisa foram o tipo de adição mineral e o tipo de superplastificante utilizados na produção do CAD; as suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e viscoelásticas; o desenvolvimento de tensões

de origem térmica e o comportamento dos coeficientes de segurança ao risco de fissuração de estruturas típicas utilizando os CAD produzidos. A seguir, estas e as demais variáveis estão detalhadas; elas são estudadas em conjunto no problema termo-mecânico na segunda parte do programa experimental, quando são realizadas simulações em computador de estruturas típicas em CAD.

3.2.1. Variáveis Independentes

As variáveis independentes são as fixadas no decorrer da pesquisa com o intuito de observar o reflexo de suas variações sobre as variáveis dependentes. A presente pesquisa apresenta as seguintes variáveis independentes:

a) Tipo de Aditivo Superplastificante

Foram utilizados dois lotes de aditivos de três tipos: um aditivo base lignossulfonato, um aditivo base naftaleno e um aditivo base policarboxilato. Ainda, foi testada a produção de um CAD utilizando uma mistura de aditivos base naftaleno e policarboxilato. A definição do tipo de aditivo como variável independente é justificada pelo conhecimento de suas diferentes influências na hidratação do cimento Portland.

b) Tipo de Adição Mineral

Dois tipos diferentes de adição mineral foram escolhidos para produzir os CAD estudados: sílica ativa e metacaulim de alta reatividade. Estas escolhas se deram por elas se hidratarem de forma diferente do cimento, e por se tratarem das únicas adições minerais disponíveis no mercado brasileiro para a produção de CAD, atualmente.

3.2.2. Variáveis Dependentes

As variáveis dependentes são os fatores influenciados pela alteração das variáveis independentes da pesquisa, apresentadas no item anterior. Elas foram determinadas em laboratório, por meio da realização de experimentos laboratoriais ou computacionais (simulações de computador). As variáveis dependentes desta pesquisa foram:

a) Tensão Interna de Tração

O desenvolvimento de tensão de origem térmica foi simulado com a utilização dos programas PFEM_2D T e PFEM_2D AT, que utilizam do MEF para determinar as tensões pontuais atuantes em estruturas de concreto. As tensões internas de tração atuantes são as conseqüências finais das variações de temperatura no interior das estruturas de concreto e são um dos fatores que podem causar a fissuração do concreto, no estudo termo-mecânico.

b) Resistência à Tração na Flexão

O desenvolvimento de resistência à tração do CAD foi determinado utilizando-se uma modelagem computacional, a partir dos resultados experimentais laboratoriais de ensaios de resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) aos 1, 3, 7 e 28 dias. A resistência à tração é a variável a ser comparada com as tensões de tração, para efeito de avaliação do risco de fissuração.

c) Coeficiente de Poisson e Módulo de Deformação

Assim como no caso da resistência à tração, o desenvolvimento do coeficiente de Poisson e do módulo de deformação foi determinado utilizando-se modelagem computacional, empregando de resultados experimentais laboratoriais de ensaios nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Ambas são propriedades de singular importância não cômputo do comportamento termo-mecânico.

3.2.3. Variáveis de Controle

As variáveis de controle são as variáveis independentes que serão mantidas fixas no decorrer dos experimentos da pesquisa:

a) Resistência à Compressão

A resistência à compressão (fc_{28}) dos concretos estudados foi mantida constantes em 80 MPa aos 28 dias. Em cada traço de concreto foi empregado um teor de adição e de aditivo para atingir este nível de resistência.

b) Consistência do Concreto Fresco

Foi empregada no estudo uma consistência plástica, com abatimento do tronco de cone variando entre 80 e 120 mm, que deveria ser mantida pelo intervalo de, pelo menos, uma hora.

c) Tipo e Consumo de Cimento

O tipo e o consumo de cimento definem a taxa de calor de hidratação. Diferentes tipos de cimento apresentam diferentes comportamentos de hidratação. Não foram avaliadas as influências do tipo e do consumo de cimento nas variáveis dependentes desta pesquisa: o tipo e a quantidade de cimento foram fixados no programa experimental piloto. O cimento utilizado foi do tipo CP II-F 32, segundo a NBR 11578 (ABNT, 1992).

d) Consumo de Material Adição Mineral

O consumo de material cimentício suplementar foi fixado em 10% do volume de cimento Portland. Sabe-se que este é um parâmetro muito importante na elevação de temperatura interna, mas o mesmo foi mantido constante para reduzir o escopo do trabalho.

e) Consumo de Água ou Teor de Água/Materiais Secos

O consumo de água não foi alterado, sendo a consistência regulada pelo aditivo superplastificante; a quantidade de água é um fator importante (quando se fala em propriedades térmicas) do concreto pois pode alterar significativamente a sua condutividade térmica.

f) Método de Dosagem

Os traços de CAD foram dosados a partir do método de Furnas (EQUIPE DE FURNAS, 1997) para dosagem de concretos normais, numa extrapolação a resistências mais altas.

g) Traço Básico do Concreto

Foram estudados traços com proporção em massa de cimento, agregados e água constante, com o objetivo de pesquisar misturas que desenvolvam resistência à compressão de 80 MPa aos 28 dias. As adições minerais geraram pequena variação na massa, uma vez que foi empregada a técnica de substituição em volume.

h) Teor de Argamassa

O teor de argamassa pode alterar significativamente a condutividade térmica e a fluência do concreto. Ele foi mantido constante em face de se estudar apenas a influência do aditivo superplastificante e da adição mineral nas propriedades do concreto.

3.2.4. Variáveis Não Controladas (Intervenientes):

As variáveis intervenientes são variáveis que também exercem efeito sobre as variáveis dependentes, porém não se tem o interesse de controlar suas variações nesta pesquisa, sendo somente medidas para observação da sua variação. Neste trabalho foram consideradas como intervenientes as seguintes variáveis:

a) Elevação Adiabática de Temperatura

Foi avaliada a elevação de temperatura interna dos diferentes concretos ao longo do tempo por meio de ensaios de elevação adiabática em um calorímetro adiabático.

b) Propriedades Térmicas e Viscoelásticas

As propriedades térmicas (condutividade térmica, calor específico, difusividade térmica e coeficiente de dilatação) e a fluência dos concretos foram também estudadas. Analizaram-se as influências dos tipos de aditivo superplastificante e adição mineral.

c) Massa Unitária do Concreto Fresco

A massa unitária é um parâmetro importante que altera também a deformação máxima que o concreto pode sofrer antes de fissurar, influenciando na resistência à tração na flexão (módulo de ruptura).

d) Temperatura Ambiente

Muito importante na determinação dos gradientes térmicos e do resfriamento da massa de concreto no momento do lançamento (das diferenças de temperatura). Não foi estudada sua influência nos experimentos.

3.3. VISÃO GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental, elaborado com o intuito de alcançar os objetivos propostos pela pesquisa, foi desmembrado em quatro etapas, como está ilustrado na Figura 3.1.

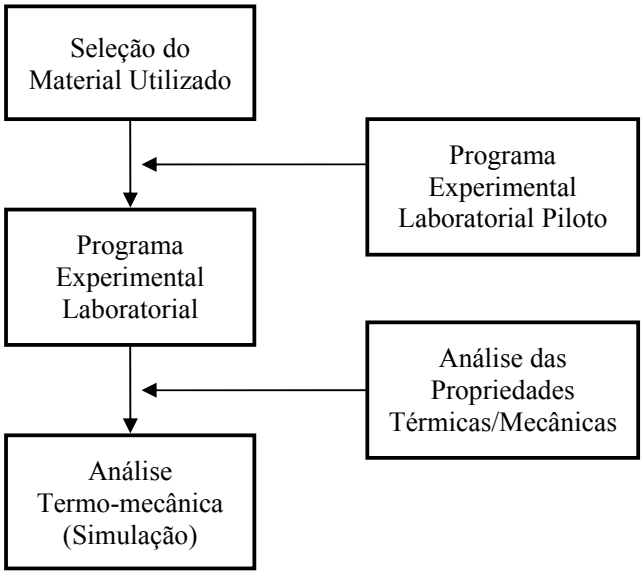


Figura 3-1 – Divisão do programa experimental da pesquisa

O programa experimental desta pesquisa foi dividido em cinco etapas para fins de execução laboratorial e de customização de viagens. O fluxo das análises desenvolvidas na pesquisa inclui a análise preliminar das propriedades térmicas e mecânicas dos CAD, antes do processo de simulação, com a finalidade de melhor definir as suas caracterizações. O

fluxo apresentado na Figura 3-1 mostra que a análise da pesquisa é dividida em três etapas: seleção de material, programa experimental laboratorial e análise termo-mecânica.

A etapa de seleção do material, a primeira etapa de análise da pesquisa, buscou encontrar um material que fosse utilizável para produção dos concretos propostos e que estivesse disponível no comércio da região de Goiânia. Materiais típicos empregados na produção de concretos do da região foram escolhidos, com exceção dos aditivos e das adições minerais.

O programa experimental piloto buscou definir traços básicos[14] (dosagem) de CAD a partir dos materiais escolhidos, em conformidade com as especificações técnicas/propriedades objeto de pesquisa. Nesta etapa, ficou definido que apenas os traços básicos de CAD e o percentual de substituição de cimento Portland por adição mineral (sílica ativa e metacaulim) seriam fixados, uma vez que os lotes de aditivos superplastificantes não poderiam ser mantidos estocados por período de tempo que contemplasse os programas experimentais piloto e principal, devido aos curtos prazos de validade dos produtos.

O programa experimental principal, mostrado na Figura 3-2 e na Figura 3-3, buscou inicialmente reproduzir os traços com novos lotes de aditivos superplastificantes e, posteriormente, caracterizá-los física, mecânica e termicamente. Esta é a segunda etapa de interesse da pesquisa, e apresenta a produção e a caracterização dos concretos, requerida para a utilização do MEF como ferramenta de simulação termo-mecânica.

Antes das simulações computacionais, foi necessária uma análise específica de toda a compilação de propriedades mecânicas e térmicas dos CAD produzidos, com o objetivo de dar uma melhor representatividade às simulações, uma vez que não se justifica utilizar métodos computacionais tão apurados se as propriedades do concreto não mantiverem certa uniformidade. Para tanto, foi lançado mão de comparações com os intervalos típicos de variações das propriedades de alguns tipos de concreto apresentadas por Equipe de Furnas (1997).

O último passo da pesquisa foi fazer as análises termo-mecânicas comparativas de estruturas típicas utilizando CAD com os diferentes tipos de aditivos superplastificantes e de adições minerais. Nelas pôde-se melhor observar como estas variáveis podem influenciar no processo de fissuração do concreto devido à sua elevação de temperatura.

[14] Nesta pesquisa, a expressão "traço básico de CAD" se refere às proporções de cimento, aglomerantes e água, que são todas variáveis de controle da pesquisa, como discutido no item 3.2.3.

1ª Dosagem TS1
CAD
Sílica ativa/SP 1ª Geração
f_{C28} = 80 MPa
Cimento CP-II-F

Temperatura de lançamento: 21ºC

ENSAIOS

(Quantidade) (Nº de CP) ENSAIO
(1) (1) Elevação adiabática
(1) (2) Calor específico
(1) (2) Condutividade térmica
(1) (2) Difusividade térmica
(1) (2) Coeficiente de dilação térmica
(0) (0) Fluência
(5) (10) Resistência à compressão
(1) (2) Módulo de Deformação/Poisson
(1) (2) Resistência à tração na flexão

2ª Dosagem TS2
CAD
Sílica ativa/SP 2ª Geração
f_{C28} = 80 MPa
Cimento CP-II-F

Temperatura de lançamento: 21ºC

ENSAIOS

(Quantidade) (Nº de CP) ENSAIO
(1) (1) Elevação adiabática
(1) (2) Calor específico
(1) (2) Condutividade térmica
(1) (2) Difusividade térmica
(1) (2) Coeficiente de dilação térmica
(0) (0) Fluência
(5) (10) Resistência à compressão
(1) (2) Módulo de Deformação/Poisson
(1) (2) Resistência à tração na flexão

3ª Dosagem TS3
CAD
Sílica ativa/SP 3ª Geração
f_{C28} = 80 MPa
Cimento CP-II-F

Temperatura de lançamento: 21ºC

ENSAIOS

(Quantidade) (Nº de CP) ENSAIO
(2) (2) Elevação adiabática
(1) (2) Calor específico
(1) (2) Condutividade térmica
(1) (2) Difusividade térmica
(1) (2) Coeficiente de dilação térmica
(1) (2) Fluência
(5) (10) Resistência à compressão
(1) (2) Módulo de Deformação/Poisson
(1) (2) Resistência à tração na flexão

4ª Dosagem TS4
CAD
Sílica ativa/Mistura
f_{C28} = 80 MPa
Cimento CP-II-F

Temperatura de lançamento: 21ºC

ENSAIOS

(Quantidade) (Nº de CP) ENSAIO
(1) (1) Elevação adiabática
(1) (2) Calor específico
(1) (2) Condutividade térmica
(1) (2) Difusividade térmica
(1) (2) Coeficiente de dilação térmica
(0) (0) Fluência
(5) (10) Resistência à compressão
(1) (2) Módulo de Deformação/Poisson
(1) (2) Resistência à tração na flexão

Figura 3-2 – Resumo dos ensaios do programa experimental − bateria de sílica ativa

5ª DOSAGEM TM1
CAD
Metacaulim/SP 1ª Geração
f_{C28} = 80 MPa
Cimento CP-II-F

Temperatura de lançamento: 21ºC

ENSAIOS

(Quantidade) (Nº de CP) ENSAIO
(1) (1) Elevação adiabática
(1) (2) Calor específico
(1) (2) Condutividade térmica
(1) (2) Difusividade térmica
(1) (2) Coeficiente de dilação térmica
(0) (0) Fluência
(5) (10) Resistência à compressão
(1) (2) Módulo de Deformação/Poisson
(1) (2) Resistência à tração na flexão

6ª DOSAGEM TM2
CAD
Metacaulim/SP 2ª Geração
f_{C28} = 80 MPa
Cimento CP-II-F

Temperatura de lançamento: 21ºC

ENSAIOS

(Quantidade) (Nº de CP) ENSAIO
(1) (1) Elevação adiabática
(1) (2) Calor específico
(1) (2) Condutividade térmica
(1) (2) Difusividade térmica
(1) (2) Coeficiente de dilação térmica
(0) (0) Fluência
(5) (10) Resistência à compressão
(1) (2) Módulo de Deformação/Poisson
(1) (2) Resistência à tração na flexão

7ª DOSAGEM TM3
CAD
Metacaulim/SP 3ª Geração
f_{C28} = 80 MPa
Cimento CP-II-F

Temperatura de lançamento: 21ºC

ENSAIOS

(Quantidade) (Nº de CP) ENSAIO
(2) (2) Elevação adiabática
(1) (2) Calor específico
(1) (2) Condutividade térmica
(1) (2) Difusividade térmica
(1) (2) Coeficiente de dilação térmica
(1) (2) Fluência
(5) (10) Resistência à compressão
(1) (2) Módulo de Deformação/Poisson
(1) (2) Resistência à tração na flexão

8ª DOSAGEM TM4
CAD
Metacaulim/Mistura
f_{C28} = 80 MPa
Cimento CP-II-F

Temperatura de lançamento: 21ºC

ENSAIOS

(Quantidade) (Nº de CP) ENSAIO
(1) (1) Elevação adiabática
(1) (2) Calor específico
(1) (2) Condutividade térmica
(1) (2) Difusividade térmica
(1) (2) Coeficiente de dilação térmica
(0) (0) Fluência
(5) (10) Resistência à compressão
(1) (2) Módulo de Deformação/Poisson
(1) (2) Resistência à tração na flexão

Figura 3-3 – Resumo dos ensaios do programa experimental − bateria de metacaulim

3.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os procedimentos de ensaio utilizados nos experimentos desta pesquisa foram baseados nas normas técnicas da ABNT. Em alguns casos, normas da ASTM também foram utilizadas. Ao final deste trabalho, está apresentada uma relação contendo todas as normas citadas no corpo desta dissertação

3.5. A SELEÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO

3.5.1. Considerações Gerais

O processo de seleção do material utilizado na pesquisa deu ênfase à utilização de materiais comerciais típicos da região metropolitana da cidade de Goiânia, estado de Goiás. O cimento e os agregados são produzidos na própria região e derivados da empresa Cimento Goiás e Pedreira Anhanguera, respectivamente. As adições minerais, sílica ativa e metacaulim, e os aditivos, são produtos disponíveis na região por meio de representação comercial, uma vez que eles são provenientes das cidades de São Paulo e de Curitiba.

3.5.2. Caracterização dos Materiais

Neste item, os materiais utilizados para a produção dos CAD estão caracterizados segundo as normas técnicas ou procedimentos adequados para sua caracterização.

a) Cimento Portland

O cimento utilizado é do tipo Portland composto com pozolana (CP II-F) da classe de resistência 32, em acordo com a norma NBR 11578 (ABNT, 1992). O mesmo é fabricado pela empresa Cimento Goiás S. A. e foi comprado em sacos de 50 quilos no comércio da região metropolitana de Goiânia-GO. O cimento escolhido é o cimento típico da região centro-oeste brasileira, e encontrado em grande parte dos centros consumidores do Brasil.

As propriedades físicas e mecânicas e a composição química do cimento utilizado nesta pesquisa estão apresentadas na Tabela 3-1, a seguir. Como pode ser observado, o cimento Portland possui alto teor de álcalis, o que lhe confere melhor fluidez na presença de superplastificantes à base de naftaleno, conforme reportado por Flatt (1999). A tabela contém, ainda, os valores de calor de hidratação, que estão diretamente ligados aos principais ensaios térmicos da pesquisa e ao aquecimento do concreto na fase de endurecimento. A medida do calor de hidratação foi efetuada por meio de um calorímetro

semi-adiabático, conhecido como garrafa de Langavant. Por meio deste ensaio mede-se continuamente o calor de hidratação dos cimentos ao longo dos primeiros sete dias.

Tabela 3-1 – Caracterização do cimento Portland

Propriedades Físicas				
Propriedade/Descrição		**Teor/Quant.**	**Norma**	**Limite (NBR 11578)**
Massa Específica (Densidade)		3,100 kg/m^3	NBRNM 23/2000	-
Água de Consistência Normal		26,4%	NBRNM 43/2003	-
Tempo de Início de Pega		190 min.	NBRNM 65/2003	≥ 60 min.
Tempo de Fim de Pega		250 min.	NBRNM 65/2003	≤ 600 min.
Finura	Área Específica – Método de Blaine	391,0 m^2/kg	NBRNM 76/1998	≥ 260,0 m^2/kg
	Resíduo na Peneira 200 (75µm)	1,0%	NBRNM 76/1998	≤ 12%
	Resíduo na Peneira 325 (45µm)	5,0%	NBR 12826/1993	-
Propriedades Químicas				
Propriedade/Descrição		**Teor/Quant.**	**Norma**	**Limite (NBR 11578)**
Componentes Químicos	Óxido de Cálcio (CaO)	63,48%	NBRNM 11-2/2004	-
	Óxido de Cálcio Livre (CaO)	2,0%	NBRNM 13/2004	-
	Dióxido de Silício (SiO_2)	20,02%	NBRNM 16/2004	-
	Óxido de Alumínio (Al_2O_3)	4,37%	NBRNM 11-2/2004	-
	Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	2,59%	NBRNM 11-2/2004	-
	Óxido de Magnésio (MgO)	1,11%	NBRNM 11-2/2004	≤ 6,5%
	Trióxido de Enxofre (SO_3)	2,51%	NBRNM 16/2004	≤ 4,0%
	Álcalis Totais: Óxido de Sódio (Na_2O)	0,59%	NBRNM 17/2004	-
	Álcalis Totais: Óxido de Potásso (K_2O)	0,75%	NBRNM 17/2004	-
	Álcalis Totais: Equivalente Alcalino (Na_2O)	1,08%	NBRNM 17/2004	-
	Sulfato de Cálcio ($CaSO_4$)	4,27%	NBRNM 17/2004	-
	Perda ao Fogo	3,43%	NBRNM 18/2004	≤ 6,5%
	Resíduo Insolúvel	0,85%	NBRNM 15/2004	≤ 2,5%
Calor de Hidratação	3 Dias	241,0 (J/g)	NBR 12006/1990	-
	7 Dias	258,4 (J/g)	NBR 12006/1990	-
Propriedades Mecânicas				
Propriedade/Descrição		**Teor/Quant.**	**Norma**	**Limite (NBR 11578)**
Resistência à Compressão	3 dias (fc_3)	22,9 MPa	NBR 7215/1996	≥ 10 MPa
	7 dias (fc_7)	30,2 MPa	NBR 7215/1996	≥ 20 MPa
	28 dias (fc_{28})	39,7 MPa	NBR 7215/1996	≥ 32 ≤ 49 MPa

b) Adições Minerais

As adições minerais utilizadas na produção dos concretos desta pesquisa foram uma sílica ativa e um metacaulim de alta reatividade, cujas características são apresentadas a seguir.

b.1) Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada na pesquisa conteve mais de 85% de sílica, conforme recomendado pela NBR 13956 (ABNT, 1994) e pela ASTM C1240 *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures* (ASTM, 2004). Suas propriedades são dadas na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Caracterização da sílica ativa

Propriedades Físicas				
Propriedade/Descrição		**Teor/Quant.**	**Norma**	**Limite (NBR 13956)**
Massa Específica (Densidade)		2,210 kg/m^3	NBRNM 23/2000	-
Área Superficial (BET[15])		15.900,00 m^2/kg	ASTM C1069	-
Índice de Atividade Pozolânica	Com Cal	5,5 MPa	NBRN 5751/1992	≥ 6 MPa
	Com Cimento	108,2 %	NBRN 5752/1992	≥ 75%*

Propriedades Químicas					
Propriedade/Descrição			**Teor/Quant.**	**Norma**	**Limite (NBR 13956)**
Componentes Químicos	Óxido de Cálcio Total (CaO)		0,41%	NBRNM 13/2004	-
	Dióxido de Silício (SiO_2)		92,69%	NBRNM 16/2004	≥ 85%
	Óxido de Alumínio (Al_2O_3)		0,00%	NBRNM 11-2/2004	-
	Óxido de Ferro (Fe_2O_3)		0,24%	NBRNM 11-2/2004	-
	Óxido de Magnésio (MgO)		0,86%	NBRNM 11-2/2004	-
	Trióxido de Enxofre (SO_3)		0,17%	NBRNM 16/2004	-
	Álcalis Totais	Óxido de Sódio (Na_2O)	0,27%	NBRNM 17/2004	-
		Óxido de Potássio (K_2O)	0,61%	NBRNM 17/2004	-
		Equivalente Alcalino (Na_2O)	0,68%	NBRNM 17/2004	-
	Sulfato de Cálcio ($CaSO_4$)		0,41%	NBRNM 17/2004	-
	Perda ao Fogo		2,69%	NBRNM 18/2004	≤ 6,0%
	Umidade		0,83%	NBRNM 15/2004	-

Nota:

* 80% segundo a norma ASTM C1240 (ASTM, 2004).

[15] Cálculo de área baseado na equação de Brunauer-Emmett-Teller (BET), ver ASTM C1069.

b.2) Metacaulim

O metacaulim utilizado nesta pesquisa é conhecido como de alta reatividade, como o utilizado por Souza (2003) na produção de concreto de alta resistência e por Barata (1998) na produção de concreto de alto desempenho. Com mais de 70% de material pozolânico (dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro), o metacaulim utilizado foi classificado como uma pozolana do tipo N de acordo com a norma ASTM C618 (ASTM, 2005) e com a normas ASTM C311 (ASTM, 1998). Suas características são mostradas na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Caracterização do metacaulim

Propriedades Físicas

Propriedade/Descrição		Teor/Quant.	Norma	Limite (NBR 12653)
Massa Específica (Densidade)		2,570 kg/m^3	NBRNM 23/2000	-
Área Superficial (BET)[16]		21.230,00 m^2/kg	ASTM C1069	-
Índice de Atividade Pozolânica	Com Cal	15,5 MPa	NBRN 5751/1992	≥ 6 MPa
	Com Cimento	118,2 %	NBRN 5752/1992	≥ 75%

Propriedades Químicas

Propriedade/Descrição			Teor/Quant.	Norma	Limite (NBR 12653)
Componentes Químicos	Óxido de Cálcio Total (CaO)		2,71%	NBRNM 13/2004	-
	Dióxido de Silício (SiO_2)		47,60%	NBRNM 16/2004	≥ 85%
	Óxido de Alumínio (Al_2O_3)		42,86%	NBRNM 11-2/2004	-
	Óxido de Ferro (Fe_2O_3)		1,59%	NBRNM 11-2/2004	-
	Óxido de Magnésio (MgO)		0,11%	NBRNM 11-2/2004	-
	Trióxido de Enxofre (SO_3)		0,05%	NBRNM 16/2004	≤ 4,0%*
	Álcalis Totais	Óxido de Sódio (Na_2O)	0,01%	NBRNM 17/2004	-
		Óxido de Potássio (K_2O)	0,72%	NBRNM 17/2004	-
		Equivalente Alcalino (Na_2O)	0,49%	NBRNM 17/2004	-
	Sulfato de Cálcio ($CaSO_4$)		0,09%	NBRNM 17/2004	-
	Perda ao Fogo		4,16%	NBRNM 18/2004	≤ 10,0%*
	Umidade		0,61%	NBRNM 15/2004	-

Nota:

* Segundo a norma ASTM C618 (ASTM, 2005).

[16] Cálculo de área baseado na equação de Brunauer-Emmett-Teller (BET), ver ASTM C1069 *Standard Test Method for Specific Surface Area of Alumina or Quartz by Nitrogen Adsorption* (ASTM, 2004).

A norma brasileira NBR 12653 (ABNT, 1992), que especifica os requerimentos para as pozolanas a partir da calcinação de argilas, como o metacaulim utilizado, enquadra este material como uma boa pozolana e de alta reatividade, muito indicada para a produção de concretos de alta resistência e de alto desempenho.

c) Aditivos Superplastificantes

Nesta pesquisa foram utilizados aditivos superplastificantes base lignossulfonato, naftaleno e policarboxilato, fornecidos pela empresa MBT Brasil. Os produtos foram escolhidos por serem os mais utilizados em cada uma das suas categorias[17]. Foram utilizados lotes diferentes de cada produto para o estudo experimental laboratorial piloto e para o estudo experimental laboratorial principal.

c.1) Aditivo Superplastificante Base Lignossulfonato

O aditivo superplastificante base lignossulfonato escolhido foi um aditivo apresentado pelo fabricante como um aditivo plastificante de pega normal, atendendo aos requisitos da norma brasileira ABNT 11768 (ABNT, 1992), que o classificada como aditivo tipo P (aditivo plastificante), e também aos da norma americana ASTM C494 (ASTM, 2005), que o classificada como um aditivo tipo A (aditivo redutor de água). O aditivo superplastificante em questão foi indicado como um aditivo compatível "com os mais diversos tipos" de cimento, ou seja, sem restrições quanto ao tipo de cimento. O mesmo, no entanto, não é um aditivo superplastificante indicado pelo fabricante especificamente para a produção de concretos de alto desempenho, pela baixa eficiência na redução de água, sendo largamente utilizado para concretos normais.

O fabricante recomenda que o aditivo superplastificante base lignossulfonato seja adicionado à mistura de concreto, junto com a água de amassamento, e nunca com o material seco (cimento, adição mineral ou agregado) ou diretamente na mistura de concreto dentro da betoneira. O teor recomendado para aplicação do mesmo fica entre 0,20 e 0,45 litros por 100 kg de cimento (cimento e adição mineral, caso seja produzido CAD). Estas dosagens são apenas orientativas, sendo recomendados estudos específicos para uma dosagem ótima para cada mistura.

A redução de água possível com este tipo de aditivo, apresentada pelo fabricante, está entre 5 a 10% da água total de amassamento, podendo ainda variar de acordo com o tipo de

[17] Ainda, pode-se incluir que foram dispensados os aditivos polifuncionais e de efeitos combinados, tipo: superplastificante retardador ou acelerador de pega, etc. Todos os aditivos são superplastificantes de pega normal, que, a princípio, não devem causar efeitos de segunda ordem nos CAD estudados, se utilizados dentro dos intervalos de dosagem recomendados.

cimento Portland utilizado no concreto e com as proporções de materiais da mistura. Ainda, o aditivo superplastificante base lignossulfonato foi indicado como compatível para ser utilizado em combinação com outros aditivos (superplastificantes ou não) do mesmo fabricante, e não foi especificado um prazo de validade do mesmo. As propriedades físicas e as demais características do aditivo superplastificante base lignossulfonato empregado estão apresentadas na Tabela 3-4.

c.2) Aditivo Superplastificante Base Naftaleno

O aditivo superplastificante base naftaleno escolhido é um aditivo superplastificante de alto desempenho (segundo as especificações do fabricante do produto), se comparado ao aditivo superplastificante base lignossulfonato. O mesmo é indicado para produzir concretos auto-adensáveis e concretos de alto desempenho com tempos de pega normal. A norma NBR 11768 (ABNT, 1992) classifica este tipo de aditivo como tipo P (aditivo plastificante) ou SP (aditivo superplastificante) e a norma americana ASTM C 494 (ASTM, 2005) o classifica como tipo A (aditivo redutor de água), tipo F (aditivo superplastificante) ou como aditivo redutor de água de alta eficiência.

A faixa de utilização deste aditivo superplastificante foi descrita pelo fabricante como variando entre 0,75 a 1,5 litro por 100 kg de cimento (cimento e adição, para o CAD), sendo dosagens fora deste intervalo possíveis, de acordo com as condições particulares de cada traço de concreto.

A indicação de lançamento deste aditivo na mistura é de que ele deve ser lançado no concreto misturado junto à água de amassamento, quando a primeira metade de água já estiver lançada na mistura, ou seja, ele deve ser misturado à segunda metade da água de amassamento. Este aditivo não deve ser adicionado aos materiais secos, nem diretamente à mistura, assim como o aditivo base lignossulfonato.

O fabricante deste tipo de aditivo afirma que o mesmo conduz a uma redução de água entre 12 e 25% da água total de amassamento, quando aplicado dentro da faixa de valores mencionada, variando esta redução em função do tipo de cimento Portland e do traço da mistura de concreto. Não foi mencionada nenhuma descrição a respeito do uso deste tipo de aditivo superplastificante em combinação com outros tipos de aditivo da mesma indústria ou similares, e o prazo de validade de sua utilização foi especificado como 12 meses a partir da data de fabricação. As propriedades físicas e as demais características do aditivo superplastificante base naftaleno escolhido estão apresentadas na Tabela 3-4.

c.3) Aditivo Superplastificante Base Policarboxilato

O aditivo superplastificante base policarboxilato escolhido foi um aditivo de última geração, baseado em polímeros sintetizados, e se constitui no o aditivo mais avançado, disponível para comercialização no Brasil pela empresa, até então. Este aditivo foi recomendado pelo fabricante para utilização específica em concretos de alta resistência e em concretos de alto desempenho, não apresentando alterações nos tempos de pega – aditivo de pega normal.

O aditivo atendeu às prescrições das normas ASTM C494 (ASTM, 2005), sendo classificado pela mesma como aditivo tipo A (aditivo redutor de água) e tipo F (aditivo superplastificante), e pela ASTM C1017 *Standard specification for chemical admixtures for use in producing flowing concrete* (ASTM, 2003), como aditivo tipo I (aditivo plastificante). Ele também foi indicado pelo fabricante como compatível com quaisquer dos cimentos que atendam as prescrições da norma ASTM C150 (ASTM, 2004), a norma americana que especifica os cimentos tipo Portland.

O fabricante do produto recomendou utilizar uma faixa de dosagem entre 0,5 e 1,0 litro de aditivo para cada 100 kg de material cimentício (ou cimento), sendo possíveis dosagens ainda maiores, sob experimentação laboratorial. A indicação de uso foi de que o aditivo não fosse colocado em contato com a água de amassamento em hipótese alguma, nem com os materiais secos; ele deveria ser adicionado ao concreto logo após todos os materiais já estarem homogeneamente misturados, inclusive com incorporação de toda a água.

Foi atribuída ao mesmo, pelo fabricante, uma redução de água de até 40% da água total de amassamento do concreto, aproximadamente, dependendo do tipo de cimento Portland e das proporções de material de cada traço específico. Este tipo de aditivo foi indicado para ser utilizado em combinação com quaisquer outros tipos de aditivo (superplastificantes ou não), desde que seja respeitada a sua forma de lançamento na mistura, nunca o misturando diretamente a outro tipo de aditivo e nunca o misturando diretamente à água.

O prazo de validade do aditivo foi informado pelo fabricante como sendo de 12 meses, a partir da data de fabricação[18]. As suas propriedades foram determinadas e estão apresentadas na Tabela 3-4. Os dados apresentados na Tabela 3-4 foram obtidos por meio de ensaios laboratoriais e apresentaram pequenas variações com os dados disponibilizados pelo fabricante. A classificação de cor foi procedida visualmente, e foi baseada no espectro

[18] Embora os prazos de validade dos aditivos sejam de, pelo menos, 12 meses segundo a empresa fabricante dos mesmos, o representante comercial forneceu os produtos com prazo de validade máximo de 6 meses, contados a partir da data de fabricação.

apresentado no manual técnico do fabricante. A Tabela 3-4 apresenta as propriedades dos dois lotes de aditivos utilizados no programa experimental

Tabela 3-4 – Caracterização dos aditivos superplastificantes

Aditivo Base	Programa Experimental	Massa Específica	Cor	Teor de Sólidos	pH	Nome Comercial
Lignossulfonato	Piloto	1,12 g/cm^3	Castanho Escuro	26,98%	6,72	Mastermix 330N
	Principal	1,13 g/cm^3	Castanho Escuro	27,02%	7,00	
Naftaleno	Piloto	1,20 g/cm^3	Castanho Escuro	41,12%	8,54	Rheobuild 1000B
	Principal	1,22 g/cm^3	Castanho Escuro	42,36%	8,98	
Policarboxilato	Piloto	1,12 g/cm^3	Bege	31,20%	6,12	Glenium 51
	Principal	1,07 g/cm^3	Branco	32,15%	6,24	

d) Agregados

Foram utilizados agregados artificiais de origem granítica disponíveis no comércio da cidade de Goiânia-GO. Os agregados, na etapa de preparo, foram lavados e mantidos na condição Saturado Superfície Seca (S.S.S.) até serem armazenados dentro da sala de dosagem por um intervalo de tempo de, pelo menos, 18 horas, para garantir uma estabilização de temperatura.

d.1) Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi um agregado artificial, de origem granítica, oriundo de uma pedreira nas proximidades da cidade de Goiânia-GO – pedreira Anhanguera. Foi dada preferência a uma areia de média a grossa com módulo de finura 2,84, valor recomendado para traços de CAD por Aïtcin (1997). A Tabela 3-5 apresenta os métodos de caracterização e as propriedades básicas deste agregado.

d.2) Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa experimental, conforme a NBR 7211 (ABNT, 1983), foi classificado como agregado tipo brita n° 1, com dimensão máxima característica de 19 mm. Na Tabela 3-5 está apresentada a caracterização física e granulométrica do agregado graúdo e todos os procedimentos de ensaio da ABNT para a mesma.

Tabela 3-5 – Caracterização dos agregados

Caracterização Física		
Propriedade	**Agregado Miúdo**	**Agregado Graúdo**
Massa Específica (NBR 9776/1994 - NBR 9937/1987)	2,64 kg/dm^3	2,64 kg/dm^3
Módulo de Finura (NBR 7217/1992)	2,84	6,60
Diâmetro Máximo Característico (NBR 7212/1992)	4,8 mm	19 mm
Teor de Material Pulverulento (NBR 7219/1987)	2,60	1,20
Massa Unitária – Estado Solto (NBR 7251/1982)	1,48	1,48
Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis (NBR 7218/1987)	0,25%	0,00%
Absorção (NBRNM 30/2001 - NBR 9937/1987)	0,4%	0,4%

Granulometria			
	Peneira # (mm)	**% Retida**	
		Retido	**Acumulado**
Agregado Miúdo	19	0,00	0,0
	9,5	0,00	0,0
	6,3	0,00	0,0
	4,8	0,46	0,5
	2,4	16,34	16,8
	1,2	23,61	40,4
	0,600	18,92	59,3
	0,300	17,11	76,4
	0,150	14,12	90,6
	Fundo	9,44	100,0
	Peneira # (mm)	**% Retida**	
		Retido	**Acumulado**
Agregado Graúdo	19	0,95	1
	9,5	76,85	78
	6,3	12,70	91
	4,8	2,70	93
	2,4	2,80	96
	1,2	1,15	97
	0,600	0,80	98
	0,300	0,50	98
	0,150	0,40	99
	Fundo	1,15	100

e) Água de Amassamento ou Mistura

A água utilizada para a produção dos CAD desta pesquisa foi derivada de extração local, por meio de poço com tratamento para elevá-la aos parâmetros de potabilidade, o que permitiu classifica-la como equivalente à água fornecida pela concessionária local.

3.6. O PROGRAMA EXPERIMENTAL LABORATORIAL PILOTO

3.6.1. Considerações Gerais

O objetivo específico do programa experimental piloto foi desenvolver os traços básicos de CAD com os primeiros lotes de aditivos, utilizando os mesmos lotes de materiais, os mesmos laboratórios, equipamentos, métodos experimentais e técnicos envolvidos na produção e caracterização dos CAD para etapa principal.

3.6.2. Compatibilidade Cimento-Aditivo

Como primeiro passo, foram determinadas as compatibilidades entre os três tipos de aditivos e o cimento. Uma vez que o método de dosagem adotado (Método de Furnas) não prevê, inicialmente, a substituição de parte do cimento Portland por adição mineral, a compatibilidade dos aditivos foi determinada apenas para o cimento, nos estudos iniciais com pastas. A Figura 3-4 apresenta a perda de abatimento em pastas de cimento Portland com aditivo.

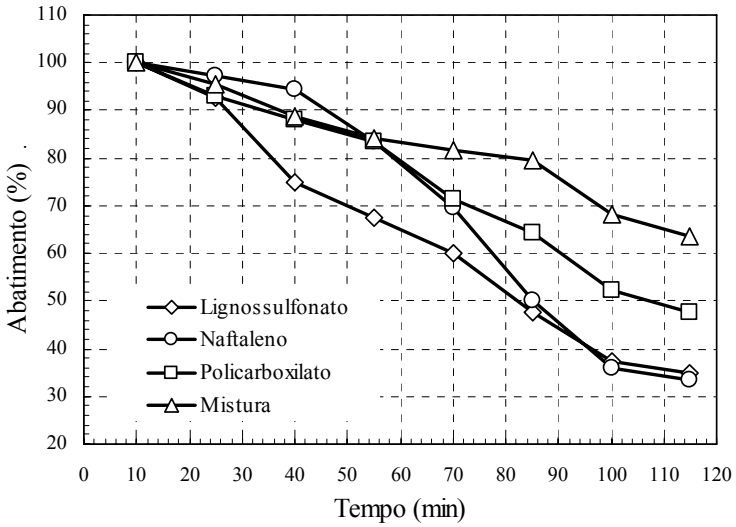


Figura 3-4 – Perda de abatimento dos aditivos no programa experimental piloto

Os ensaios foram realizados segundo o método de ensaio da NBR 7682 (ABNT, 1983), *Calda de Cimento Para Injeção: Determinação do Índice de Fluidez*, que utiliza o cone de

Marsh para a determinação do índice de fluidez da calda de cimento. O procedimento consiste em determinar o tempo, em segundos, que a calda leva para escoar pelo cone de Marsh e encher uma proveta graduada de 1000 ml. O volume mínimo de amostra deve ser de 3000 cm³ e a calda deve ser passada previamente na peneira ABNT #2,4 mm. Após a elaboração da calda foram feitas determinações da temperatura: uma logo após a mistura e outra após a determinação da fluidez da calda.

Além de se utilizar misturas com os três tipos de aditivo, foi ensaiada uma mistura de aditivos base naftaleno e policarboxilato que resultaria em um custosimilar ao da pasta com aditivo naftaleno, intermediário entre o custo do aditivo lignossulfonato, o mais barato, e do policarboxilato, o mais caro.

Na Figura 3-4 pode-se perceber que as pastas mantiveram mais de 60% de sua fluidez durante a primeira hora após a mistura. Ainda, pode-se observar que a pasta utilizando uma mistura de dois tipos de aditivos superplastificantes teve melhor retenção de fluidez, obtendo o melhor índice após a primeira hora de mistura e mantendo o melhor desempenho até o final do ensaio.

3.6.3. O Estudo de Dosagem dos Traços de CAD

Verificada a compatibilidade entre os três tipos de aditivo superplastificante e o cimento, prosseguiu-se com a definição dos traços de CAD. Para tanto, empregou-se o método de Furnas, que sofreu alterações para se adaptar às variáveis pesquisadas no programa experimental.

Basicamente, se procurou obter uma mistura de concreto que pudesse manter uma a/c igual a 0,3, abatimento do tronco de cone de 100 ± 20 mm e uma resistência à compressão aos 28 dias de 80 MPa. Um volume de 10% do cimento foi substituído por adição mineral, sendo determinadas suas propriedades mecânicas aos 28 dias e compatibilidade entre o material cimentício e os aditivos. A Tabela 3-6 resume os traços básicos de CAD definidos no programa experimental piloto.

Os traços básicos dos concretos foram verificados com a realização de novas dosagens com o segundo lote para todos os aditivos superplastificantes. Só então puderam ser preenchidas as colunas de “massa total” e “massa de sólido” dos aditivos, mostradas na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Traço de CAD do estudo piloto, em (kg/m³)

Tipo de traço		Quantidades							
Adição	Aditivo	Aditivo		Adição	Água Total (*)	Cimento	Cimento Equivalente (***)	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
		Massa Total	Massa Sólidos						
Sílica ativa	Lignossulfonato	11,37	4,78	40,35	170,57	511,65	568,25	648,09	1.057,43
	Naftaleno	8,53	3,58	40,35	170,57	511,65	568,25	648,09	1.057,43
	Policarboxilato	3,41	1,09	40,35	170,57	511,65	568,25	648,09	1.057,43
	Mistura	5,69	2,27	40,35	170,57	511,65	568,25	648,09	1.057,43
Metacaulim	Lignossulfonato	11,37	4,78	46,92	170,57	511,65	568,25	648,09	1.057,43
	Naftaleno	8,53	3,58	46,92	170,57	511,65	568,25	648,09	1.057,43
	Policarboxilato	3,41	1,09	46,92	170,57	511,65	568,25	648,09	1.057,43
	Mistura**	5,69	2,27	46,92	170,57	511,65	568,25	648,09	1.057,43

Notas:

* Incluída a água contida nos aditivos superplastificantes e nos agregados;
** Ver definição de cimento equivalente em Equipe de Furnas (1997);
*** Mistura de aditivos superplastificantes base naftaleno e policarboxilato.

3.7. O PROGRAMA EXPERIMENTAL LABORATORIAL PRINCIPAL

3.7.1. Considerações Gerais

Assim como o programa experimental piloto, o programa experimental principal se desenvolveu nos laboratórios do Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas S. A., na cidade de Aparecida de Goiânia, Goiás. Foram utilizados os mesmos lotes de materiais (com exceção dos aditivos superplastificantes), os mesmos equipamentos, os métodos e os mesmos técnicos para a produção e caracterização dos CAD.

3.7.2. Métodos Experimentais

Os subitens a seguir apresentam os métodos utilizados para a produção e caracterização dos concretos estudados nesta pesquisa.

a) Dosagem dos Concretos

Os traços dos CAD desta pesquisa foram determinados durante a etapa do programa experimental laboratorial piloto, descrito no item 3.6, e já apresentados na Tabela 3-6. As dosagens finais dos aditivos superplastificantes estão detalhadas na Tabela 3-7, onde se pode observar a dosagem com mistura de aditivos superplastificante base naftaleno e policarboxilato.

Tabela 3-7 – Dosagem detalhada de aditivos superplastificantes, em (kg/m³)

Tipo de aditivo	Dosagem de aditivo							
	Lignossulfonato		Naftaleno		Policarboxilato		Quantidade total	
	Massa total	Massa sólido	Massa total	Massa sólido	Massa total	Massa sólido	Massa total	Massa sólido
Lignossulfonato	11,37	4,78	-	-	-	-	11,37	4,78
Naftaleno	-	-	8,53	3,58	-	-	8,53	3,58
Policarboxilato	-	-	-	-	3,41	1,09	3,41	1,09
Mistura*	-	-	4,55	1,91	1,14	0,36	5,69	2,27

Notas:

* Mistura de aditivos superplastificantes base naftaleno e policarboxilato.

Para uma melhor visualização qualitativa da importância que a combinação aditivo superplastificante-adição mineral representa na produção dos CAD, a Tabela 3-8, a seguir, apresenta os custos percentuais de cada parcela dos CAD produzidos: o CAD básico (cimento + agregados + água), o aditivo superplastificante, a adição mineral, e a soma dessas duas, a parcela adição-aditivo. Pode-se ver que as opções de mistura de dois tipos de aditivo superplastificante tiveram os mesmos custos dos CAD com aditivo tipo naftaleno, o que foi a proposição dos percentuais de cada tipo de aditivo na mistura. Ainda, pode-se observar que estes concretos se situaram numa faixa entre os CAD com lignossulfonato e policarboxilato como aditivo, assim como os CAD com naftaleno.

Tabela 3-8 – Custos percentuais dos componentes dos CAD

Combinação Aditivo-Adição		Custos Percentuais				
		CAD Básico	Adição	Aditivo	Combinação	Total
Sílica Ativa	Lignossulfonato	61%	32%	7%	39%	100%
	Naftaleno	58%	30%	12%	42%	100%
	Policarboxilato	55%	29%	16%	45%	100%
	Mistura*	58%	30%	12%	42%	100%
Metacaulim	Lignossulfonato	75%	16%	9%	25%	100%
	Naftaleno	71%	15%	14%	29%	100%
	Policarboxilato	67%	14%	19%	33%	100%
	Mistura*	71%	15%	14%	29%	100%

Nota:

* Mistura de aditivos superplastificantes base naftaleno e policarboxilato.

Para uma visualização quantitativa, a Tabela 3-9 apresenta os custos diretos da produção dos CAD, caso fossem produzidos sob os custos típicos de uma central de concreto, em setembro de 2005.

Tabela 3-9 – Custos diretos de produção dos CAD (R$/m^3)

Combinação Adição-Aditivo		Custo Básico do CAD (R$)	Custo da Combinação (R$)	Custo Total do CAD (R$)
Sílica Ativa	Lignossulfonato	153,75	98,88	252,63
	Naftaleno	153,75	111,89	265,63
	Policarboxilato	153,75	124,08	277,83
	Mistura*	153,75	111,84	265,59
Metacaulim	Lignossulfonato	153,75	51,02	204,77
	Naftaleno	153,75	64,03	217,78
	Policarboxilato	153,75	76,22	229,97
	Mistura*	153,75	63,98	217,73

Nota:

* Mistura de aditivos superplastificantes base naftaleno e policarboxilato

Pode-se observar na Tabela 3-9 que a combinação de sílica ativa com policarboxilato produz o CAD mais caro (R$ 277,83); e na Tabela 3-8 pode-se ver que a combinação adição-aditivo representa a maior parcela do custo direto do material (45%). Ao contrário, o CAD com metacaulim e aditivo tipo lignossulfonato é o mais barato (204,77). Neste caso, a combinação adição-aditivo representa a menor parcela do custo final do CAD (25%). Os concretos que utilizam naftaleno ou misturas de aditivos se encontram em posições intermediárias, no que se refere aos custos e aos percentuais da parcela adição-aditivo.

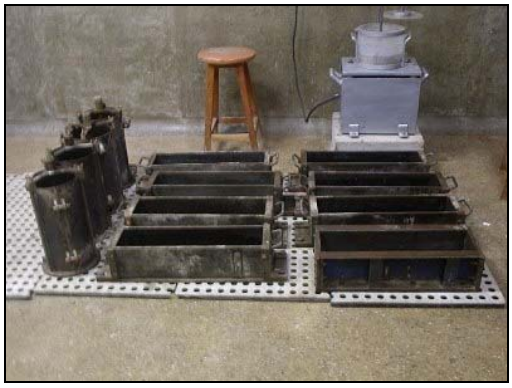
b) Produção dos Concretos

Para a reprodução dos CAD, após um período de adaptação de, pelo menos, 18 horas no interior da sala de dosagem, para estabilização da temperatura (23 ± 2°C) e umidade (> 50%), os materiais foram pesados em balança digital com precisão de grama, e misturados em betoneira estacionária, segundo normas da ABNT para produção de concreto em laboratório, NBRNM 79 (ABNT, 1996). A água utilizada foi resfriada até 5°C, para que a mistura final de CAD adquirisse temperatura inicial de 20°C.

b.1) Equipamento Utilizado

Na sala de dosagem utilizada constava o equipamento para, imediatamente após a mistura, caracterizar e moldar os corpos de prova com os CAD no estado fresco: padiolas com tara, recipientes para manusear aditivos químicos, betoneira eixo inclinado – Figura 3-5 (a), tronco de cone e seus aparatos, aparelho para medir o teor de ar, pá, baldes, carrinho de mão, moldes para ensaio dos CAD no estado endurecido – Figura 3-5 (b), vibradores de imersão, sacos de aninhagem e plástico *vita-film* para selar os corpos de prova.

(a)



(b)

Figura 3-5 – Betoneira e fôrmas para ensaios mecânicos e térmicos

b.2) Procedimento de Mistura

Os procedimentos de mistura seguiram uma forma geral para todos os CAD. Num primeiro passo, todo o agregado, miúdo e graúdo, foi colocado na betoneira e foi adicionada a metade da água de amassamento, sendo estes materiais misturados por um período de 01 (um) minuto, quando a betoneira foi parada. Em seguida, no segundo passo, com a betoneira parada, foram adicionados todo o cimento e toda a adição mineral.

(a)

(b)

Figura 3-6 – Mistura dos materiais em betoneira

A segunda parte da água de amassamento foi adicionada no terceiro passo, com a betoneira em movimento, num período de 03 (três) minutos. Foi efetuada uma parada intermediária de 01 (um) minuto, seguida por remixtura por 02 (dois) minutos, quando os CAD foram basculados para fora da betoneira, num carrinho de mão.

Para cada tipo de aditivo superplastificante, foi utilizado um procedimento de incorporação diferente, recomendado pelo fabricante como sendo o mais adequado. O aditivo base lignossulfonato foi adicionado à água de mistura – ver Figura 3-7 (a), e esta dividida em duas partes iguais para ser adicionada ao concreto nos primeiro e segundo passos da mistura, como mencionado anteriormente.

(a) (b)

Figura 3-7 – Adição dos aditivos superplastificantes lignossulfonato e naftaleno

O aditivo tipo naftaleno foi misturado à metade da água de amassamento (Figura 3-7 (b)) que foi adicionada à mistura de concreto no terceiro passo.

O aditivo base policarboxilato foi adicionado à mistura de CAD somente no terceiro passo, com a betoneira em movimento, diretamente sobre a mistura já homogênea de agregados, cimento, adições e água, como mostra a Figura 3-8.

Figura 3-8 – Adição do aditivo superplastificante policarboxilato ao concreto

Também não foi lançada água no recipiente com aditivo ao final da adição à mistura, lançando-se mão de um procedimento de tara do recipiente já incluindo um depósito final de aditivo que compensou a quantidade restante no interior do mesmo.

Para os CAD com mistura de aditivos tipo naftaleno e policarboxilato, um procedimento híbrido foi adotado, lançando-se o aditivo naftaleno no segundo passo, diluído nos 50% de água finais, e o aditivo policarboxilato somente no terceiro passo, sobre a mistura de agregados, cimento, adição, água e aditivo base naftaleno já homogênea. O procedimento de tara dos recipientes com aditivo policarboxilato também foi utilizado.

c) Ensaios no Concreto Fresco

Logo após o término dos procedimentos de mistura foram executados os ensaios no estado fresco (Figura 3-9):

c.1) Abatimento do Tronco de Cone

Neste primeiro ensaio, concreto foi colocado em um recipiente tronco-cônico e adensado como prescreve a norma NBRNM 67 (ABNT, 1998). Após a compactação da última camada foi retirado o excesso e a superfície alisada com régua metálica. Assim, o molde foi retirado, içando-o com cuidado na direção vertical, e a haste foi colocada sobre o cone invertido, e medida a distância entre a parte inferior da haste e o ponto médio do concreto, na Figura 3-9 (b).

c.2) Determinação da Massa Específica

A massa específica ou aparente foi obtida considerando-se o volume de ar aprisionado na massa. Os ensaios foram realizados colocando-se uma amostra de CAD fresco em um recipiente cilíndrico com volume conhecido e adensado-a de acordo com a norma NBR 9833 (ABNT, 1987) da ABNT. O cálculo da massa específica foi procedido dividindo-se a massa da amostra de CAD contida no recipiente pelo seu volume.

c.3) Determinação do Teor de Ar Incorporado

Os teores de ar dos concretos frescos, definidos como os volumes de ar aprisionado, expressos em percentagens dos volumes totais de concreto, foram determinados pelo método pressiométrico. Este método foi executado segundo a norma técnica NBRNM 47 da ABNT (ABNT, 2002), utilizando-se de um aparelho medidor que consiste de um recipiente cilíndrico (aparelho tipo B da referida norma) dotado de um manômetro para medir a pressão em seu interior. Os resultados de ar aprisionado foram lidos diretamente

no manômetro, onde foram realizadas as determinações das percentagens de ar contidas em uma amostra dos CAD frescos, por meio da observação das variações dos volumes de CAD com as variações das pressões no recipiente que as continha.

(a)

(b)

(c)

Figura 3-9 – CAD com metacaulim e mistura de aditivos no estado fresco

Após a execução dos ensaios de caracterização física dos concretos frescos, os mesmos foram direcionados para a moldagem dos corpos de prova empregados para os ensaios de propriedades térmicas e mecânicas – no estado endurecido.

d) Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

As moldagens e os procedimentos de cura dos CP destinados aos ensaios de caracterização térmica e mecânica dos CAD foram realizados em conformidade com a norma NBR 5738 da ABNT (ABNT, 1994). Os CAD foram adensados nos corpos de prova em camadas – Figura 3-10 (a), de acordo com os diferentes tipos e com as diferentes dimensões, e então, adensados utilizando-se das energias de vibração convenientes para cada caso.

Após as moldagens, foi nivelada a superfície dos CP com uma régua metálica – ver Figura 3-10 (b), seguida de uma selagem com uso de um filme plástico – tipo *vita-film*. Os CP foram deixados por um período de tempo entre 16 e 20 horas em descanso, na sala de dosagem, até a desfôrma. A Figura 3-10 (c) e a Figura 3-10 (d) mostram as disposições dos CP para algumas propriedades instantes antes da selagem com o filme plástico.

(a) (b)

(c) (d)

Figura 3-10 – Moldagem dos corpos de prova

Na Figura 3-10 (a) pode ser observada a moldagem de dois corpos de prova para ensaio de fluência com extensômetros tipo Carlson embutidos, moldagens que requereram maiores cuidados no lançamento e no adensamento do CAD.

e) Desmoldagem e Identificação dos Corpos de Prova

Após a remoção dos filmes de selagem dos CP, cerca de 16 horas após a mistura e a moldagem, os mesmos começaram a ser identificados com os números relativos às dosagens as quais eles pertenciam (Figura 3-11 (a)). Após a identificação inicial, começaram os procedimentos de desmoldagem dos mesmos – Figura 3-11 (b)-(d). Procedeu-se então a identificação completa, necessária devido ao grande número de espécimes para ensaio estocados na estufa do laboratório de concreto – Figura 3-11 (e)-(h).

Figura 3-11 – Desmoldagem dos corpos de prova

f) Ensaios no Concreto Endurecido

Nas idades de ensaio de 1, 3, 7 e 28 dias, os corpos de prova endurecidos que estavam armazenados na estufa, foram retirados e devidamente preparados para os ensaios, como descrito a seguir. Alguns CP foram mantidos para a realização dos ensaios de resistência à compressão aos 56 e 91 dias.

f.1) Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos conforme a norma NM 101 da ABNT (ABNT, 1996), utilizando-se corpos de prova cilíndricos de 10×20 cm. Nestes ensaios, os corpos de prova foram colocados em uma prensa servo-controlada tipo EMIC, e submetidos a um carregamento axial até a ruptura. Os resultados dos ensaios, realizados em três corpos de prova, foram expressos na forma de tensões, dividindo-se as cargas de ruptura pelas áreas das seções transversais dos corpos de prova.

f.2) Resistência à Tração na Flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados conforme a norma brasileira NBR 12142 da ABNT (ABNT, 1991), utilizando-se de corpos de prova prismáticos de 20×20×40 cm, na forma de vigas – ver Figura 3-11 (a) e (b). Para as determinações das resistências à tração na flexão, os corpos de prova foram posicionados sobre os elementos de apoio, de forma que a carga fosse aplicada no terço médio. Os cutelos de aplicação de carga foram instalados na face oposta, ajustando os cutelos nos extremos do terço médio da distância entre os de apoio.

Nos casos em que as rupturas dos CP ocorreram no terço médio das distâncias entre os cutelos de suporte, calcularam-se as resistências à tração na flexão pela expressão:

$$\sigma_r = \frac{\mathrm{P} \cdot \mathrm{L}}{b \cdot d^2}\text{, onde:} \qquad \text{Eq. (3-1)}$$

P = carga de ruptura, em kgf;

L = distância entre os cutelos de apoio, em cm;

b = largura média do corpo de prova, em cm;

d = altura média do corpo de prova, em cm;

σ_r = tensão de ruptura à tração na flexão, em MPa.

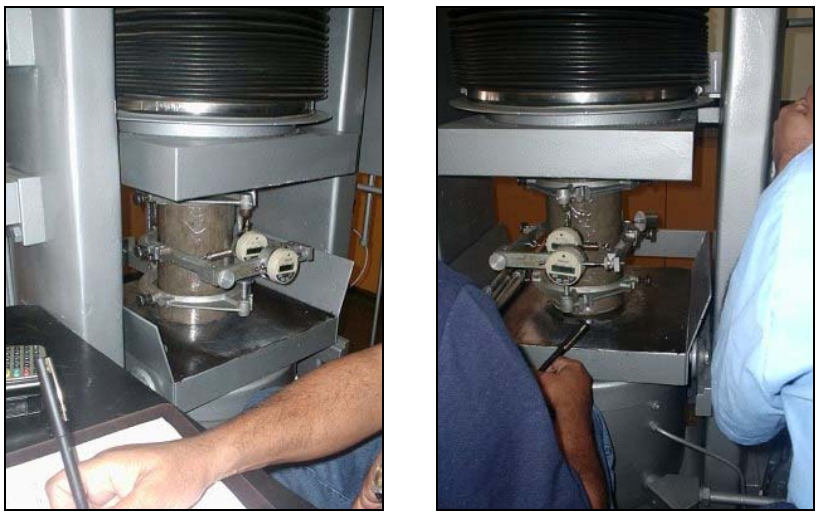
Nos casos em que as rupturas ocorreram fora do terço médio da distância entre os cutelos de suporte, mas a não mais que 5% desta mesma distância, calcularam-se as resistências à tração na flexão pela expressão:

$$\sigma_r = \frac{3 \cdot \mathrm{P} \cdot a}{b \cdot d^2}, \text{ onde:} \qquad \text{Eq. (3-2)}$$

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a correspondente ao apoio mais próximo, com aproximação de 1 mm, mediante a tomada de pelo menos 3 medidas.

f.3) Módulo de Deformação/Coeficiente de Poisson

Os ensaios de módulo de deformação nos CAD produzidos foram realizados em uma prensa, onde os corpos de prova cilíndricos 15×30 cm foram submetidos a carregamento axial e foram medidas as deformações dos mesmos – Figura 3-12 (a). A relação entre os incrementos de tensão e os incrementos de deformação são chamados de módulo de elasticidade. Os módulos de elasticidade foram determinados de acordo com os métodos da NBR 8522 (ABNT, 2004) e da ASTM C 469 (ASTM, 1994).



(a) (b)

Figura 3-12 – Ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

As determinações dos coeficientes de Poisson foram feitas seguindo as normas NBR 8522 (ABNT, 2004) e ASTM C 469 (ASTM, 1994) – Figura 3-12 (b).

g) <u>Ensaios Especiais no Concreto</u>

Os ensaios de elevação adiabática de temperatura, calor específico, condutividade térmica, coeficiente de dilatação térmica e fluência, foram realizados, como segue.

g.1) Elevação Adiabática de Temperatura

A elevação adiabática de temperatura do concreto é a elevação de temperatura causada pelo calor gerado na hidratação do material cimentício, em condições adiabáticas, isto é, sem troca de calor com o ambiente.

O ensaio se baseia em moldar um volume de concreto em fôrma com furos para imersão de termômetros de resistência elétrica, colocada em um ambiente especial, onde não há troca de calor entre o CP e o meio ambiente. Esse ambiente é o calorímetro adiabático, programado para que se tenha a mesma temperatura inicial do concreto fresco.

À medida que se processam reações de hidratação, o CP se aquece, e o calorímetro responde na mesma quantidade e velocidade, de forma que não haja troca de calor entre o CP e o calorímetro. A Figura 3-13 apresenta, resumidamente, o procedimento de ensaio no calorímetro de água.

A Figura 3-13 (a), a seguir, mostra a preparação da fôrma para ensaio no calorímetro adiabático, onde pode ser visto o aparato que posiciona os dois termômetros dentro da massa de concreto.

Depois de misturado, o CAD foi lançado cuidadosamente no molde para não danificar o posicionamento das guias dos termômetros (Figura 3-13 (b)) e adensado com um vibrador de imersão – Figura 3-13 (c). O molde foi, então, lacrado e içado, com o auxílio de uma ponte rolante, até o interior do calorímetro adiabático de água – Figura 3-13 (d)-(f), quando os termômetros foram introduzidos na mistura de concreto e o calorímetro fechado – Figura 3-13 (g) e (h).

Também foi utilizado um calorímetro de ar, seguindo os procedimentos de moldagem preconizados em Equipe de Furnas (1997). A Figura 3-14, a seguir, apresenta um teste de comparação para a certificação de que os dois equipamentos, de ar e de água, poderiam caracterizar elevações adiabáticas de temperatura do mesmo CAD com uma mesma precisão.

(a)

(b)

(c)

(d)

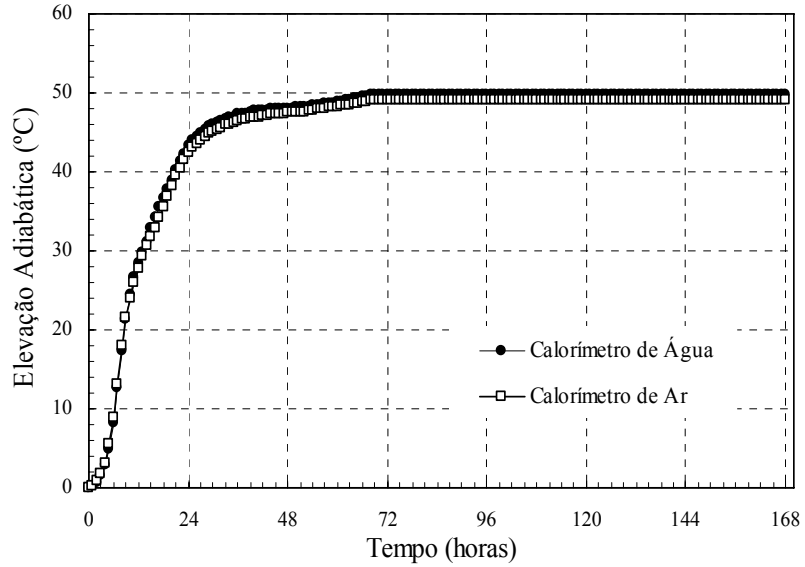
(e)

(f)

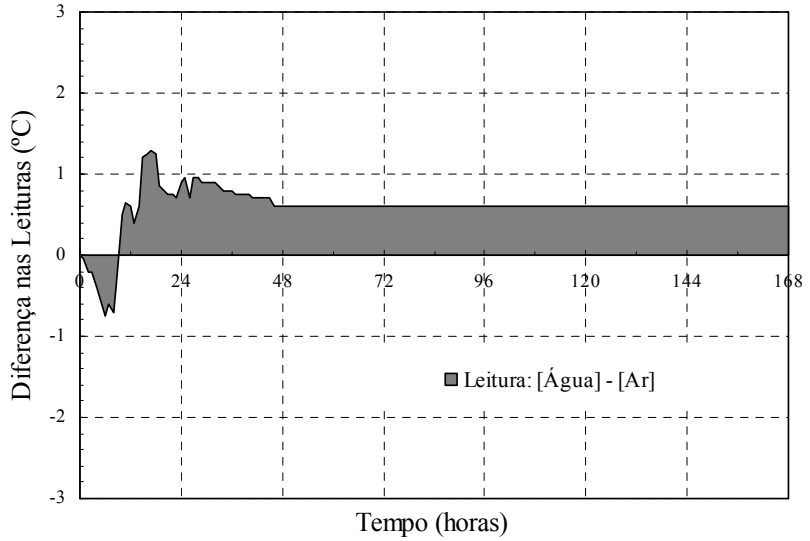
(g)

(h)

Figura 3-13 – Moldagem do corpo de prova e preparação do calorímetro



(a)



(b)

Figura 3-14 – Comparação entre resultados dos dois calorímetros utilizados

A Figura 3-14 (b) mostra que a diferença máxima de leitura nos dois calorímetros para o ensaio de elevação de temperatura adiabática de um mesmo CAD foi menor que 1,2°C no momento de pico de reação de hidratação do cimento (entre 12 e 18 horas), quando as resistências elétricas do calorímetro de ar não conseguiram fazer com que a câmara acompanhasse a elevação de temperatura do concreto. Ao final dos ensaios, esta diferença foi mantida em cerca de 0,6°C. Os dois calorímetros foram utilizados para proceder aos ensaios nos CAD.

Durante todos os ensaios de elevação adiabática foram realizadas leituras horárias até que houvesse a estabilização da temperatura, ou por um período mínimo de 6 horas, sendo então adotado umintervalo de 6 horas entre leituras. Os ensaios duraram 14 dias, no mínimo, e 28 dias, no máximo. A partir dessas leituras, foram determinadas as elevações adiabáticas das temperaturas dos CAD.

g.2) Calor Específico

O ensaio para determinação do calor específico consiste em imergir um corpo de prova cilíndrico (20×40 cm), de massa conhecida, com um furo em seu centro, em uma quantidade de água destilada previamente pesada, a qual se encontra em um calorímetro. A água circula pelo furo do corpo de prova e em torno dele, com um agitador, até que a velocidade de variação de temperatura seja constante, o que acontece aproximadamente em 30 minutos (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

Um aquecedor elétrico de imersão é ligado durante um período de aproximadamente 60 minutos, elevando a temperatura do corpo de prova e da água que o circunda – Figura 3-15. Após o fornecimento de calor ter sido interrompido (aproximadamente 30 min), a velocidade de variação de temperatura torna-se constante outra vez. A quantidade de calor necessária para elevar as temperaturas do corpo de prova, da água e das partes internas do calorímetro é medida com um *watt-horímetro*. A duração do ensaio gira em torno de 180 minutos.

Figura 3-15 – Ensaio de calor específico

O calor específico do concreto é igual ao total do calor fornecido (energia cedida), menos o calor necessário para elevar a temperatura da água e do calorímetro, menos a perda de calor do calorímetro, dividido pelo produto da elevação da temperatura corrigida pela massa do corpo de prova.

g.3) Condutividade Térmica

Determina-se a condutividade térmica do concreto, introduzindo-se calor no orifício central de um CP cilíndrico (20×40 cm), mantendo-se a sua superfície externa a uma temperatura mais baixa, provocando um fluxo de calor através do concreto (Figura 3-16).

Figura 3-16 – Ensaio de condutividade térmica

Esse ensaio é executado em um equipamento projetado para produzir um fluxo de calor uniforme através do CP e medir a velocidade e as diferenças de temperatura entre as suas superfícies interna e externa, que devem ser mantidas no intervalo de 30 ± 0,5ºC.

A condutividade térmica, na etapa de simulação, foi utilizada para se estabelecer o valor da difusividade térmica, uma vez que as duas propriedades estão intimamente relacionadas entre si. Assim, não foram executados ensaios de difusividade térmica.

g.4) Coeficiente de Dilatação Térmica

Os ensaios de coeficiente de dilatação térmica dos CAD foram realizados com um par de corpos de prova cilíndricos moldados para cada CAD produzido. As medidas de deformação foram efetuadas a partir de extensômetros elétricos, tipo *strain gage*, colocados na face externa dos corpos de prova.

Na idade de 28 dias, os CP cilíndricos 10×20 cm foram retirados da câmara úmida e foram armazenados em uma sala com temperatura controlada de 23 ± 2ºC, até estabilização, quando então, foram transferidos para a sala de 38 ± 2ºC, e de volta para a sala de 23 ± 2ºC, logo em seguida, para a de 4 ± 2ºC, e por fim, novamente, para a sala de 23 ± 2ºC. Em todas as salas, os corpos de prova permaneceram tempo necessário até a estabilização de temperatura (em torno de 72 horas), e durante cada período de armazenagem, foram realizadas leituras de temperatura e deformação, num total de 03 leituras diárias. A partir dessas leituras, determinaram-se os coeficientes de dilatação térmica cilíndricos.

g.5) Fluência

Os ensaios de fluência foram realizados apenas para duas das misturas de CAD, uma com adição mineral tipo sílica ativa e outra com adição mineral tipo metacaulim, ambas utilizando aditivo superplastificante base policarboxilato.

Os ensaios foram realizados em prensas capazes de manter constante uma carga atuante nos corpos de prova cilíndricos – ver Equipe de Furnas (1997). Após os carregamentos dos corpos de prova foram medidas as suas deformações. Os ensaios foram realizados segundo a norma brasileira NBR 8224 (ABNT, 1983).

Figura 3-17 – Ensaio de fluência de duas misturas de CAD

Os ensaios de fluência nos CAD foram realizados em corpos de prova selados, com a finalidade de se observar as diferenças na fluência básica ao se utilizar diferentes adições minerais para produzir os CAD. Os resultados dos ensaios de fluência, no entanto, não foram utilizados para alimentar as simulações termo-mecânicas, uma vez que não foi possível caracterizar todas as misturas de CAD com ensaios de fluência.

3.8. A ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS/MECÂNICAS

Uma vez terminado o programa experimental laboratorial principal, e caracterizados todos os CAD produzidos, uma detalhada análise dos resultados foi procedida, com o objetivo de se certificar da acerácea dos mesmos. Como a segunda parte do programa experimental desta pesquisa se dedicou a simular estruturas típicas em CAD utilizando do MEF, procedimento de grande precisão numérica, uma certificação das variações nos valores das propriedades obtidas foi realizada.

Como já discutido, não se justifica a utilização de métodos numéricos de grande precisão de cálculo se as propriedades dos materiais não têm uma precisão equivalente, ou guardam, ao menos, certo intervalo de variação já conhecido.

3.8.1. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas foram compiladas através de uma análise das variações encontradas para os seus valores, e comparadas a valores típicos constantes da literatura para concretos de alto desempenho.

3.8.2. Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas foram analisadas utilizando-se um estudo estatístico para uma grande diversidade de tipos de concreto e de propriedades, compilado por Gambale (2005)[19]. O trabalho de Gambale (2005) apresenta os intervalos típicos que a maior parte dos tipos de concreto guarda em suas propriedades térmicas, sendo de imprescindível análise, em estudos preliminares do problema termo-mecânico.

3.9. ANÁLISE TERMO-MECÂNICA

A análise termo-mecânica desenvolvida na segunda parte desta pesquisa seguiu a metodologia desenvolvida no NDCC para avaliações de risco de fissuração de origem térmica em estruturas em CCR, CAD e concretos convencionais – ver Calmon *et al*. (2003) Ern (2003) e Santos (2004).

3.9.1. Informações e Diretrizes Gerais do Estudo

O primeiro passo do estudo termo-mecânico é descrever (1) qual o material será utilizado e (2) qual a estrutura será moldada. A análise termo-mecânica se refere sempre a um tipo determinado de concreto, moldado em determinadas formas e condições.

3.9.2. Propriedades do Concreto

As propriedades físicas, mecânicas e térmicas do concreto devem ser convenientemente determinadas experimentalmente ou tomadas segundo dados estatísticos ou compilados. Elas representam parcela fundamental da representatividade da simulação.

a) <u>Propriedades Mecânicas</u>

Geralmente se opta por determiná-las experimentalmente, pois os ensaios são simples e vários laboratórios têm capacidade para executá-los. Os módulos de ruptura, os módulos de

[19] "Análise Estatistica dos Resultados de Propriedades Térmicas do Concreto Obtidos em Ensaios", submetido ao 47º Congresso Brasileiro do Concreto, mas não publicado.

elasticidade e os coeficientes de Poisson foram determinados para idades de 1, 3, 7 e 28 dias, sendo as curvas de resistência à compressão registradas até os 91 dias.

b) Propriedades Térmicas

Todas as propriedades térmicas que alimentam o modelo computacional desenvolvido por Calmon (1995) e Santos (2004) foram determinadas experimentalmente, para todos os CAD estudados.

3.9.3. Discretização e Condições de Contorno do Domínio

As estruturas escolhidas para simulação são estruturas onde o emprego do CAD é típico, tais como colunas de edifícios altos e de grandes dimensões. Estas estruturas são discretizadas por elementos finitos lineares triangulares, de dimensões entre 5 e 10 centímetros.

Foram escolhidas as condições ambientais da cidade de Goiânia-GO para alimentar as simulações, e os métodos de execução mais difundidos na construção civil brasileira para caracterização dos processos de execução: moldagem em uma camada com fôrmas de madeira ou metálica. Neste momento, também, é importante determinar quais são os pontos chave a serem analisados dentro da estrutura, uma vez que os limites de computação, tempos e custos computacionais, e a falta de interesse em estudar pontos que não comprometem a estrutura podem dificultar as análises.

3.9.4. Análise dos Resultados

Como dados de saída das simulações computacionais, gráficos, tabelas e figuras dão suporte para as análises térmica e tensional que prosseguem às simulações.

a) Análise Térmica

As análises térmicas, primeira parte do estudo termo-mecânico, se fundamentam para alimentar o próximo passo, que consiste em uma análise tensional e, para que após o estudo tensional, se tenha noção de quais as melhores possibilidades de se alterar os desenvolvimentos de tensões no interior das estruturas.

b) Análise Tensional

É a análise de como as tensões de origem térmicas são distribuídas no interior da estrutura. Podem-se determinar os pontos onde as tensões superam os valores de resistência, nos exatos momentos de ocorrência.

3.9.5. Análise Final dos Resultados

É o estudo comparativo entre tensões de compressão/tração desenvolvidas e o desenvolvimento de resistências mecânicas. Pontualmente se estuda como se comportam solicitação e resistência ao longo do tempo e se pode apresentar esta descrição na forma de um gráfico que expressa o coeficiente de segurança ou índice de segurança daquele ponto estudado da estrutura.

3.9.6. Conclusão do Estudo Termo-Mecânico

Baseando-se nas análises térmicas e tensionais de todos os pontos críticos da estrutura, pode-se concluir se a estrutura está ou não sujeita a possível ou provável fissuração devido ao problema térmico do concreto.

A conclusão do estudo termo-mecânico, no entanto, tem característica de retro-alimentação, uma vez que novas simulações podem ser executadas alterando-se as condições de contorno do estudo com base nos resultados já obtidos, de forma a se encontrar quais as condições de contorno podem ser utilizadas para a execução da estrutura.

CAPÍTULO 4
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos no programa experimental da pesquisa. Num primeiro instante, uma abordagem inicial dos objetivos do programa experimental é rediscutida, no item **Error! Reference source not found.**. Posto isso, são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos de laboratório de produção e caracterização do CAD, no item 4.2, e em seguida, no item 4.3, são apresentados e discutidos os resultados térmicos e tensionais das simulações de computador utilizando colunas típicas em CAD com os concretos produzidos.

4.1. CONSIDERAÇÃO INICIAL

Ao se proceder o programa experimental principal, os CAD produzidos com o aditivo base lignossulfonato apresentaram problemas de compatibilidade com as combinações adição mineral-cimento Portland, motivo pelo qual os demais ensaios foram cancelados, e não serão apresentados na pesquisa. Os concretos apresentaram retardos, e alguns deles levaram cerca de 15 dias para alcançarem resistência à compressão para serem ensaiados.

4.2. ANÁLISE DO PROGRAMA EXPERIMENTAL LABORATORIAL

4.2.1. Considerações Gerais

O programa experimental buscou atingir o objetivo principal da pesquisa, que consiste em avaliar as influências dos tipos de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termo-mecânico de estruturas em CAD.

4.2.2. Ensaios no Concreto Fresco

Os CAD recém tiveram suas propriedades físicas determinadas pelas normas técnicas da ABNT/ASTM, como discutido no Capítulo 3. A Tabela 4-1, a seguir, apresenta os resultados de densidade, ar aprisionado, consistência e temperatura.

Tabela 4-1 – Valores determinados para as propriedades físicas

Tipo de Adição		Propriedade Física			
Mineral	**Química**	**Densidade (NBRNM 56) (kg/m^3)**	**Ar Aprisionado (ASTM C231) (%)**	**Consistência (NBRNM 67) (mm)**	**Temperatura (NBRNM 79) (°C)**
Sílica Ativa	Naftaleno	2.412	1,2	100	19,8
	Policarboxilato	2.431	0,9	120	21,1
	Mistura*	2.388	1,4	100	21,0
Metacaulim	Naftaleno	2.425	1,1	120	21,0
	Policarboxilato	2.425	1,3	110	20,4
	Mistura*	2.400	1,3	90	20,5

Nota:

* Mistura de aditivos superplastificantes base naftaleno e policarboxilato.

a) <u>Densidade</u>

O CAD com menor valor de densidade foi obtido pela combinação de sílica ativa com mistura (2.388 kg/m^3) e o CAD com maior valor foi a combinação de sílica ativa com policarboxilato (2.431 kg/m^3). A variação obsevada de aproximadamente 40 kg/m^3, é pouco representativa.

b) <u>Ar Aprisionado</u>

Os valores de ar aprisionado variaram entre 0,9% (sílica ativa com policarboxilato) e 1,4% (sílica ativa com mistura) do volume total dos CP. Segundo Aïtcin (2000a), todo CAD deveria conter entre 1 e 1,5% de ar em seu volume, o que pode conferir ao mesmo bom desempenho aos esforços de deformação térmica e ciclos gelo/degelo durante a vida útil.

c) Consistência Pelo Método do Abatimento do Tronco de Cone

Todos os CAD se situaram no intervalo de consistência proposto para a pesquisa: 100 ± 20 mm de abatimento do tronco de cone. Os valores variaram entre 90 mm (metacaulim com mistura) e 120 mm (sílica ativa com policarboxilato e metacaulim com naftaleno).

d) Temperatura do Concreto Fresco

As temperaturas dos concretos estudados se situaram dentro do intervalo proposto na pesquisa (20 ± 1°C), com exceção do CAD com sílica ativa e policarboxilato, que atingiu uma temperatura de 21,1°C, diferença pequena que não comprometeu os demais ensaios.

4.2.3. Ensaios no Concreto Endurecido

As propriedades mecânicas dos CAD estudados foram determinadas experimentalmente. A resistência à compressão foi estudada até os 91 dias; o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e o módulo de ruptura foram determinados até os 28 dias de idade. A Tabela 4-2 apresenta o resumo dos valores encontrados aos 28 dias.

Tabela 4-2 – Valores determinados para as propriedades mecânicas

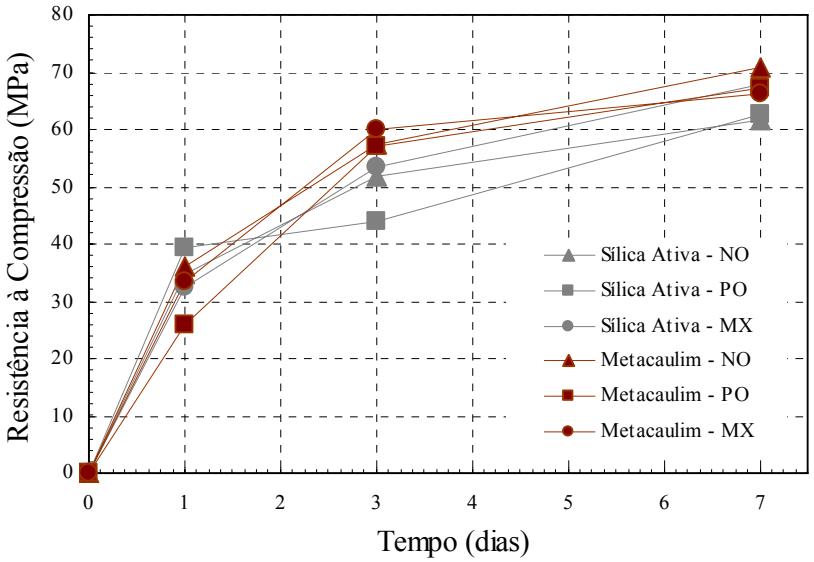
Tipo de Adição		Propriedade Mecânica			
Mineral	**Química**	**Resistência à Compressão (NBRNM 101) (MPa)**	**Módulo de Elasticidade (ASTM C469) (GPa)**	**Coeficiente de Poisson (ASTM C469)**	**Módulo de Ruptura (NBRNM 55) (MPa)**
Sílica Ativa	Naftaleno	78,0	32,0	0,19	7,9
	Policarboxilato	84,2	32,9	0,20	8,0
	Mistura*	81,0	32,2	0,17	7,1
Metacaulim	Naftaleno	79,6	32,0	0,17	6,9
	Policarboxilato	81,8	36,2	0,20	7,2
	Mistura*	79,7	32,7	0,22	7,6

Nota:

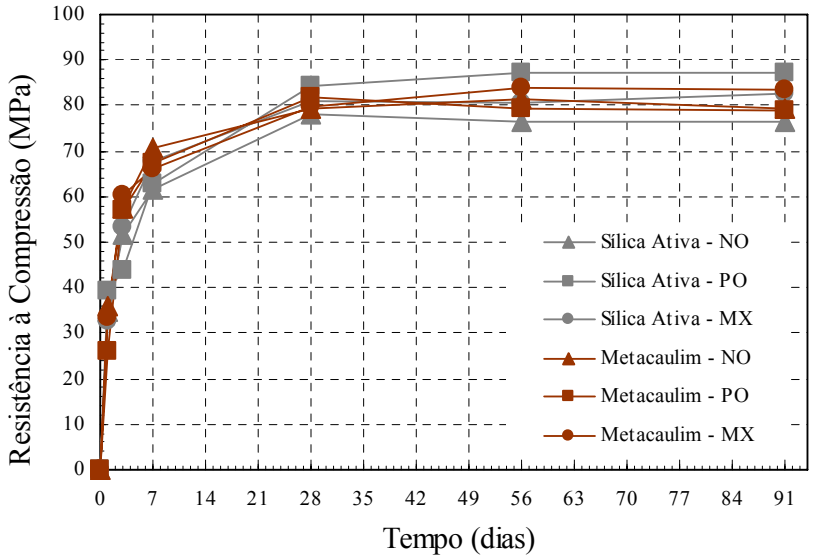
* Mistura de aditivos superplastificantes base naftaleno e policarboxilato.

a) Resistência à Compressão

A comparação das propriedades mecânicas resumidas na Tabela 4-2 é importante pois são os valores referenciados nas etapas de dimensionamento das estruturas de concreto, importantes do ponto de vista prático da caracterização dos concretos. As Figura 4-1(a) e (b) apresentam o desenvolvimento de resistência à compressão aos 7 e 91 dias. Pode-se constatar alguns pontos divergentes na Figura 4-1.



(a)



(b)

Figura 4-1 – Resistências à compressão até os 7 dias (a) e 91 dias (b)

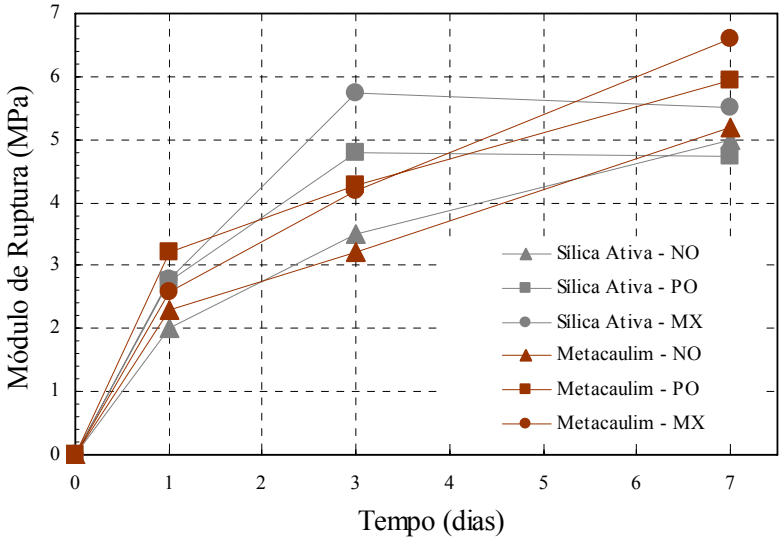
Na Figura 4-1 (a) pode-se reparar uma divergência na resistência a 1 dia do CAD com metacaulim e policarboxilato e aos 3 dias do CAD com sílica ativa e policarboxilato, que apresentaram resistências inferiores aos demais (cerca de 20% e 15% da média, respectivamente), efeitos registrados em todos os três corpos de prova de cada traço.

O CAD com sílica ativa e aditivo naftaleno apresentou ligeira queda (3 MPa) no valor da resistência à compressão após os 28 dias – na Figura 4-1 (c), efeito notado em todos os corpos de prova dos exemplares.

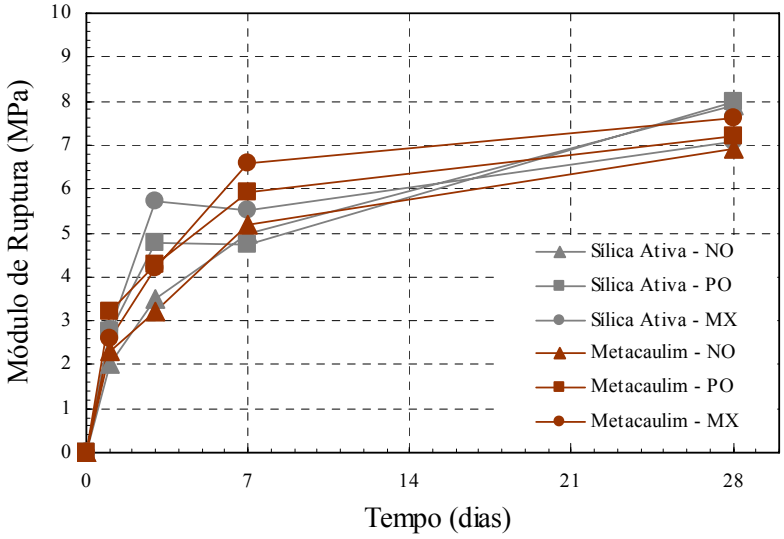
Pôde-se constatar, no entanto, a boa convergência dos valores das resistências à compressão aos 28 dias de idade (valor utilizado como referência de projeto), como pode ser observado na Figura 4-1 (b).

b) Resistência à Tração na Flexão (Módulo de Ruptura)

A resistência à tração na flexão foi estudada até os 28 dias e está apresentada na Figura 4-2. Embora tenha mostrado desenvolvimento similar aos demais até os 28 dias, o CAD com sílica ativa e aditivo naftaleno apresentou um valor alto aos 3 dias e uma redução para os 7 dias, comportamento registrado em todos os CP deste tipo. O CAD com sílica ativa e policarboxilato também apresentou redução na resistência entre 3 e 7 dias, tendência não observada nas demais misturas.



(a)



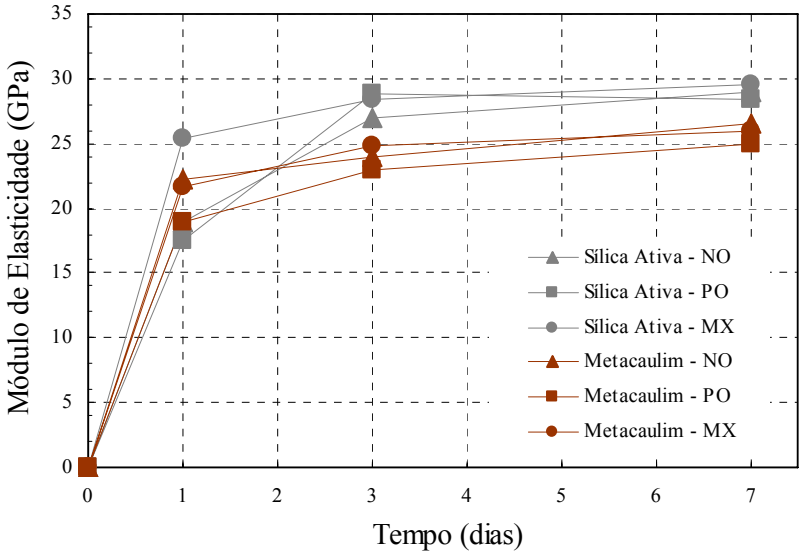
(b)

Figura 4-2 – Módulos de ruptura até os 7 (a) e 28 (b) dias

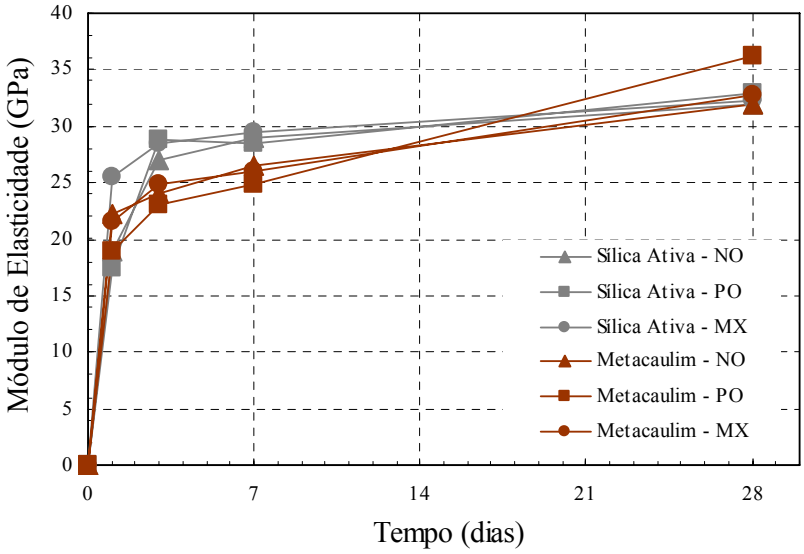
Como pode ser notado na Tabela 4-2 e na Figura 4-2 (b), os valores de resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) aos 28 dias são muito próximos, variando entre 6,9 e 8 MPa para os CAD com metacaulim e naftaleno e sílica ativa e policarboxilato, respectivamente.

c) Módulo de Deformação

Os módulos de deformação estão apresentados na Figura 4-3 que apresenta os valores nas idades até 7 dias (a) e até 28 dias (b). Pode-se observar nas Figura 4-3 (a) e (b) que os CAD com sílica ativa apresentaram módulos de elasticidade ligeiramente superiores entre 2 e 17 dias quando foram alcançados ou ultrapassados pelos demais concretos.



(a)



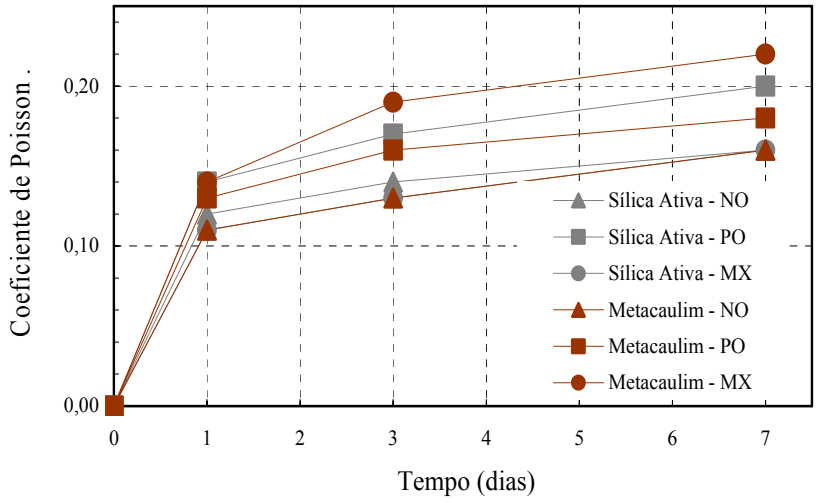
(b)

Figura 4-3 – Módulos de elasticidade até os 7 (a) e 28 (b) dias

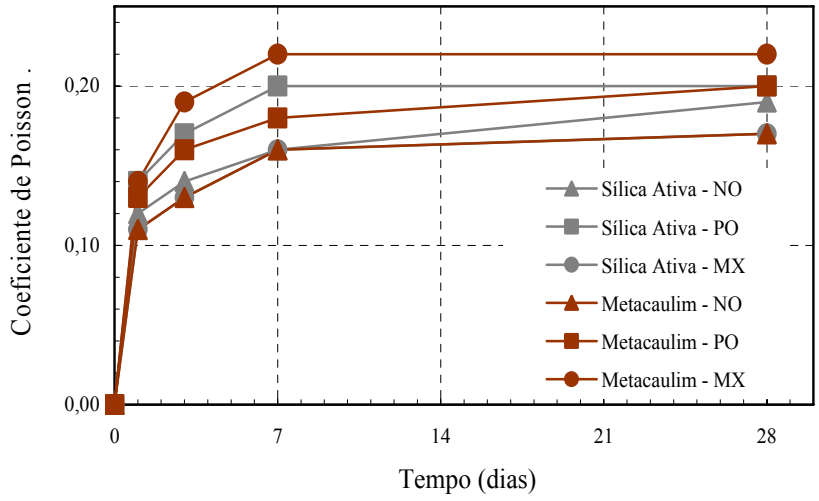
Como se observa na Tabela 4-2 e na Figura 4-3, os valores de módulo de elasticidade são muito próximos aos 28 dias para todas as combinações adição-aditivo, variando entre 32 e 33 GPa. Apenas o CAD com metacaulim e aditivo tipo policarboxilato apresentou um maior módulo de elasticidade, sensivelmente superior aos demais (36,2 GPa), o que não fica bem explicado se trata-se de um ruído experimental, uma vez que foi a tendência dos três CP do traço.

d) Coeficiente de Poisson

As evoluções nos coeficientes de Poisson estão mostradas na Figura 4-4. Podem ser observadas evoluções bastante uniformes, não havendo inversões nos valores das mesmas, como ocorre para as demais propriedades mecânicas.



(a)



(b)

Figura 4-4 – Coeficientes de Poisson até os 7 (a) e 28 (b) dias

Os valores encontrados, mostrados na Tabela 4-2 e na Figura 4-4, aos 28 dias, mantêm variação entre 0,17 para os CAD com sílica ativa e combinação de aditivos e metacaulim com aditivo naftaleno, e 0,22 para a mistura com metacaulim e combinação de aditivos.

4.2.4. Ensaios Especiais no Concreto

Os ensaios especiais no concreto são aqueles que subsidiaram a modelagem termo-mecânica: calor específico, condutividade térmica, coeficiente de expansão térmica e elevação adiabática de temperatura. Ainda, ensaios de fluência foram realizados com os dois tipos de adição mineral. A Tabela 4-3 apresenta o resumo das propriedades térmicas no estado endurecido de todos os concretos produzidos.

Tabela 4-3 – Valores determinados para as propriedades térmicas

Tipo de Adição		Propriedade Térmica		
Mineral	**Química**	**Calor Específico (NBR 12817)** (kJ/kg°C)	**Condutividade (NBR 12820)** (W/m°C)	**Coeficiente de Expansão (NBR 12815)** (10^{-6}/°C)
Sílica Ativa	Naftaleno	0,96	2.159	13,30
	Policarboxilato	1,03	2.147	13,80
	Mistura*	0,93	2.177	15,55
Metacaulim	Naftaleno	1,05	2.215	14,94
	Policarboxilato	0,93	2.182	15,90
	Mistura*	1,15	2.205	15,61

Nota:

* Mistura de aditivos superplastificantes base naftaleno e policarboxilato.

a) Calor Específico

Os valores encontrados para o calor específico variaram entre 0,93 e 1,15 kJ/kg°C para o CAD com sílica ativa e combinação de aditivo, e o CAD com metacaulim e combinação de aditivos, respectivamente. Estes valores se encontram inseridos no intervalo de valores apresentados por Gambale (2005) como usuais, utilizados como referência nesta pesquisa.

b) Condutividade Térmica

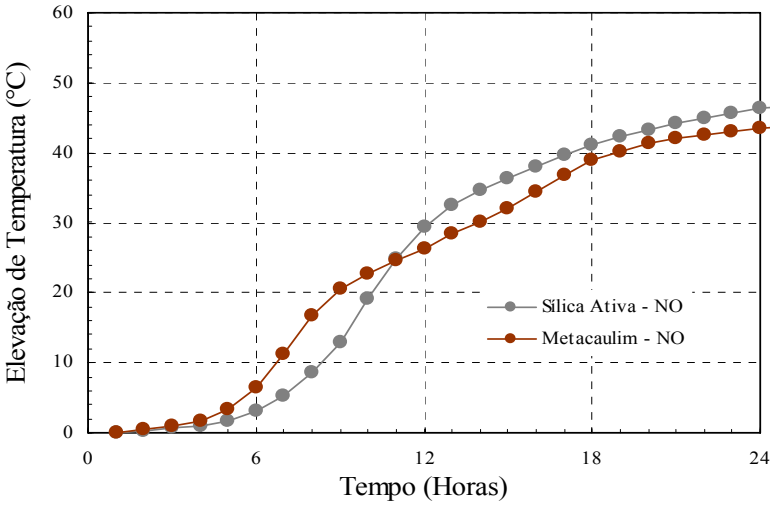
As condutividades térmicas variaram no intervalo de 2,147 a 2,215 W/m°C, nas misturas de sílica ativa com policarboxilato e de metacaulim com naftaleno, respectivamente. Os dados se encontram dentro do intervalo apresentado por Gambale (2005) e a diferença é muito pequena para influenciar no estudo termo-mecânico (0,068 W/m°C). Os CAD com policarboxilato apresentaram as menores condutividades térmicas, no entanto.

c) Coeficiente de Dilatação Térmica

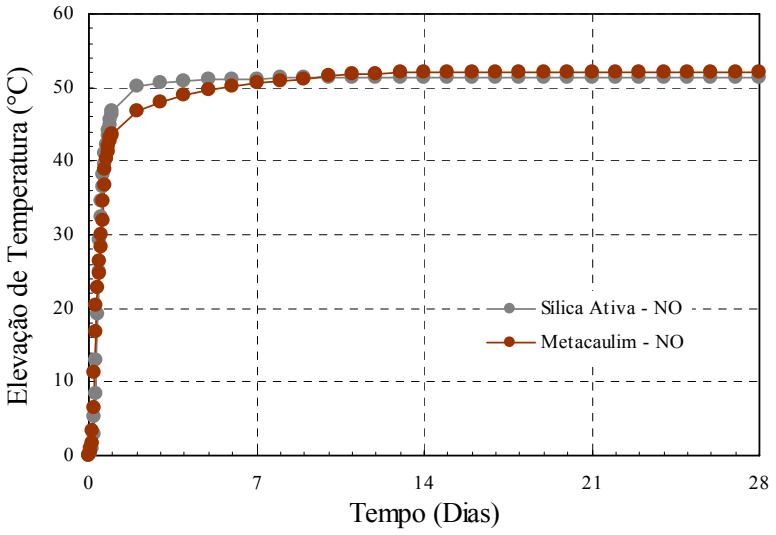
Foi encontrada uma variação entre 13,3 e 15,90×10^{-6}/°C para os coeficientes de dilatação térmica do CAD com sílica ativa e naftaleno e do CAD com metacaulim e policarboxilato, sendo observada uma variação de cerca de 20%. Os CAD com naftaleno apresentaram os menores coeficientes de dilatação.

d) Elevação Adiabática de Temperatura

Ensaios de elevação adiabática foram realizados para visualizar os papéis dos aditivos e das adições na hidratação. A Figura 4-5 apresenta os resultados das misturas com naftaleno, a Figura 4-6 com policarboxilato e a Figura 4-7 das misturas com combinação. As Figura 4-8 e Figura 4-9 apresentam as misturas com sílica ativa e metacaulim.



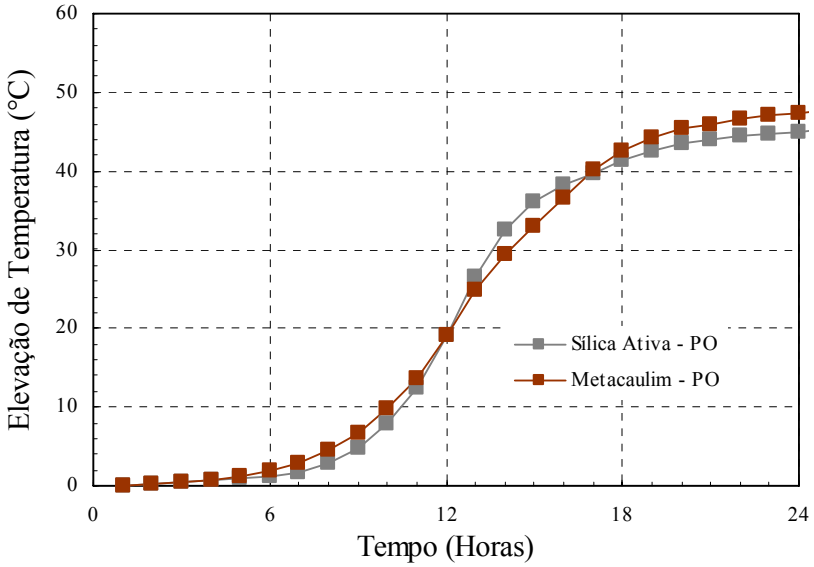
(a) Primeiras 24 horas



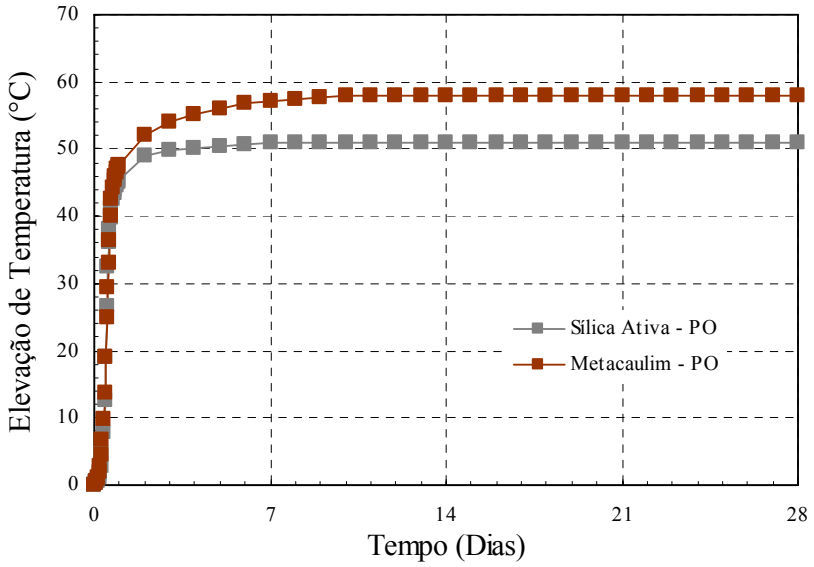
(b) Primeiros 28 dias

Figura 4-5 – Elevação adiabática de temperatura dos CAD com naftaleno

Na Figura 4-5 (a) pode ser observado que 11 horas após o início do ensaio, há uma inversão na curva e o CAD com metacaulim, que até então mantinha temperatura mais elevada, passa a uma temperatura inferior ao concreto com sílica ativa e naftaleno. Esta situação se mantém até os 7 dias, quando ela se reverte e o CAD com metacaulim se estabiliza com temperatura pouco superior ao CAD com sílica ativa – Figura 4-5 (b). Cabe salientar, todavia, que a diferença de temperatura é de somente 1°C.



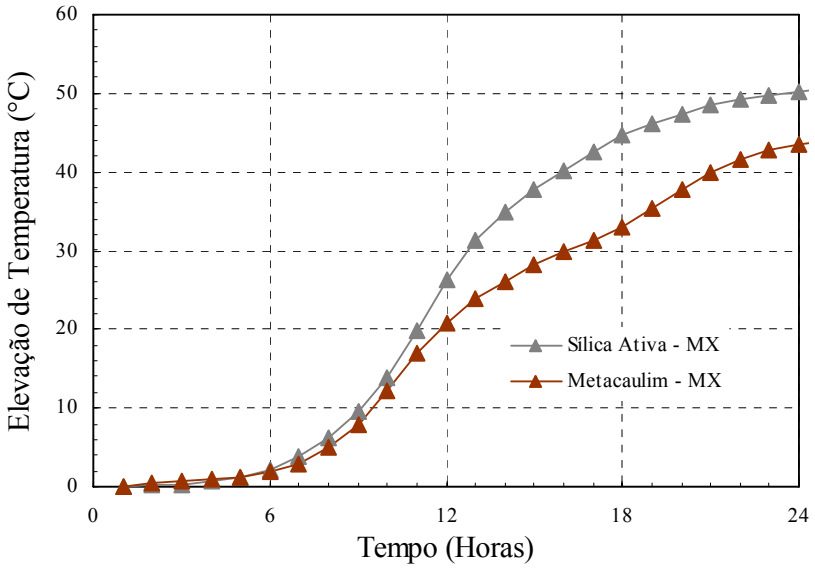
(a) Primeiras 24 horas



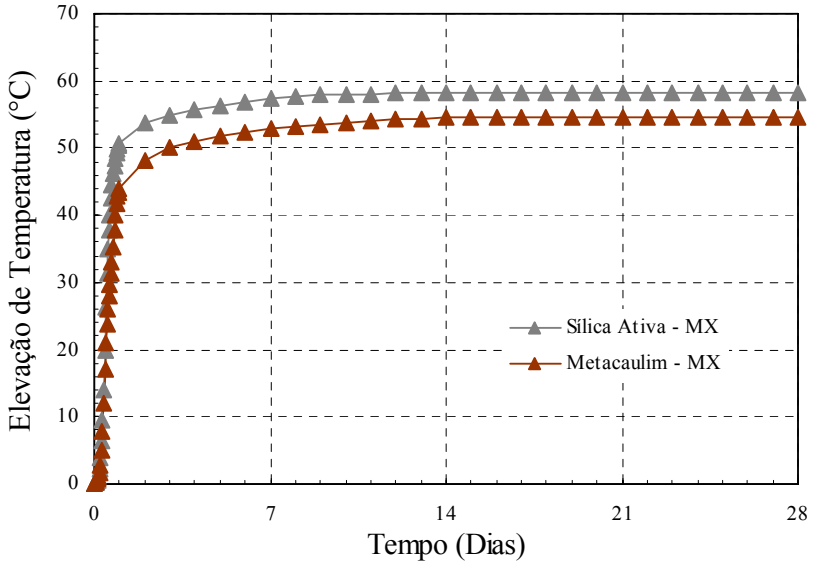
(b) Primeiros 28 dias

Figura 4-6 – Elevação adiabática de temperatura dos CAD com policarboxilato

O CAD com policarboxilato e metacaulim apresentou maior elevação de temperatura inicial – Figura 4-6 (a), duas inversões de temperatura, e temperatura final maior que o CAD com sílica ativa e policarboxilato – Figura 4-6 (b). Uma diferença de 7°C foi registrada aos 7 dias e manteve-se nesta faixa até os 28 dias. O CAD com mistura de aditivos e sílica ativa teve taxa de elevação de temperatura bastante superior ao do CAD com metacaulim, entre 12 e 18 horas de ensaio – Figura 4-7 (a). Neste período a sua temperatura chegou a apresentar diferença superior a 10°C, após 18 horas de ensaio.



(a) Primeiras 24 horas

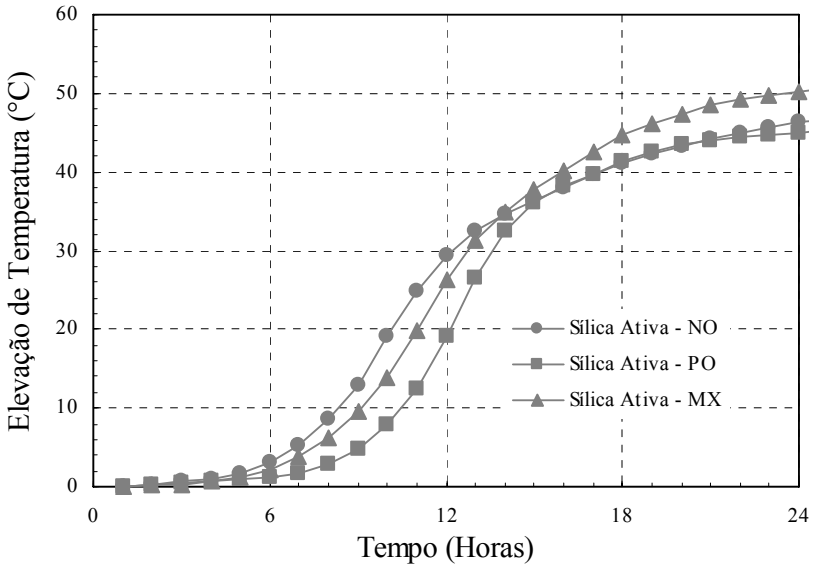


(b) Primeiros 28 dias

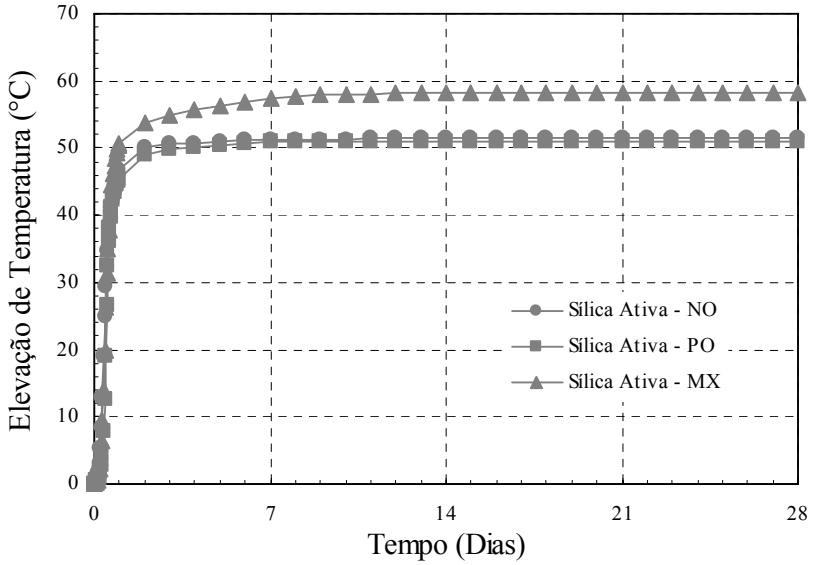
Figura 4-7 – Elevação adiabática de temperatura dos CAD com combinação de aditivos

A temperatura do CAD com sílica ativa se manteve superior, durante todo o decorrer de ensaio, se estabilizando após 11 dias, numa faixa em que a temperatura era 3,5°C superior à do CAD com metacaulim – Figura 4-7 (b).

Comparando-se os CAD produzidos com sílica ativa e com diferentes tipos de aditivo superplastificante (e mistura de aditivos) pode-se notar que o CAD com policarboxilato apresenta o maior retardo e o CAD com naftaleno o menor retardo de temperatura, até cerca de 15 horas de ensaio – Figura 4-8 (a).



(a) Primeiras 24 horas

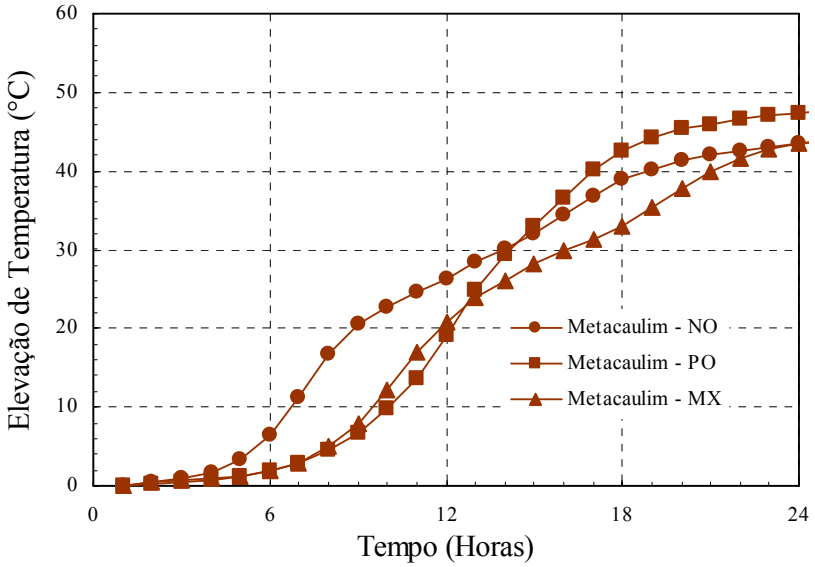


(b) Primeiros 28 dias

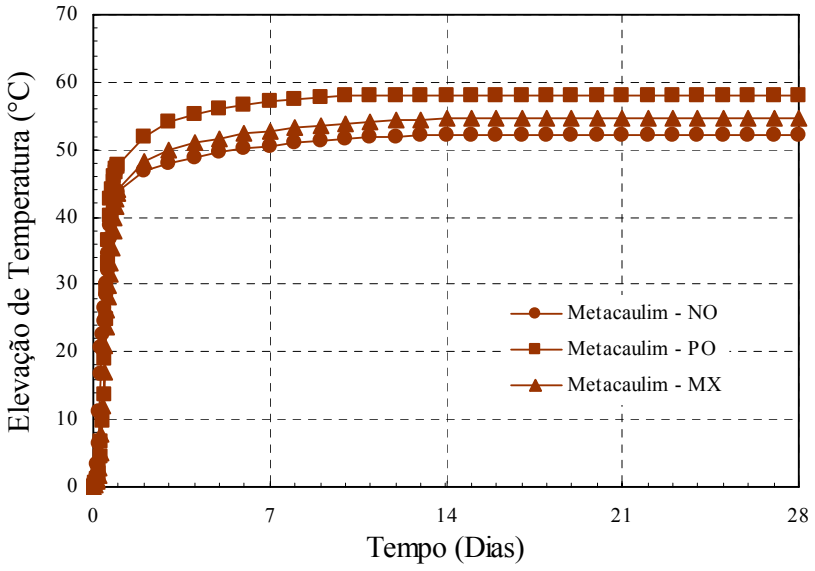
Figura 4-8 – Elevações adiabáticas de temperatura dos CAD com sílica ativa

Após 15 horas de ensaio, o CAD com mistura de aditivos naftaleno e policarboxilato desenvolve maior taxa de elevação de temperatura, até cerca de 14 dias, quando se estabiliza com temperatura pelo menos 6,7°C superior aos demais concretos que tiveram temperaturas finais praticamente idênticas – observado na Figura 4-8 (b).

Os CAD com metacaulim e com diferentes tipos de aditivo superplastificante estão mostrados na Figura 4-9.



(a) Primeiras 24 horas

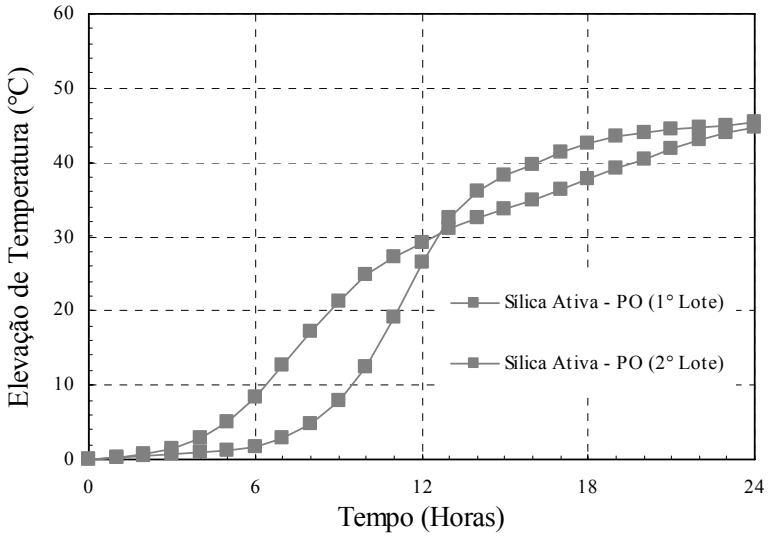


(b) Primeiros 28 dias

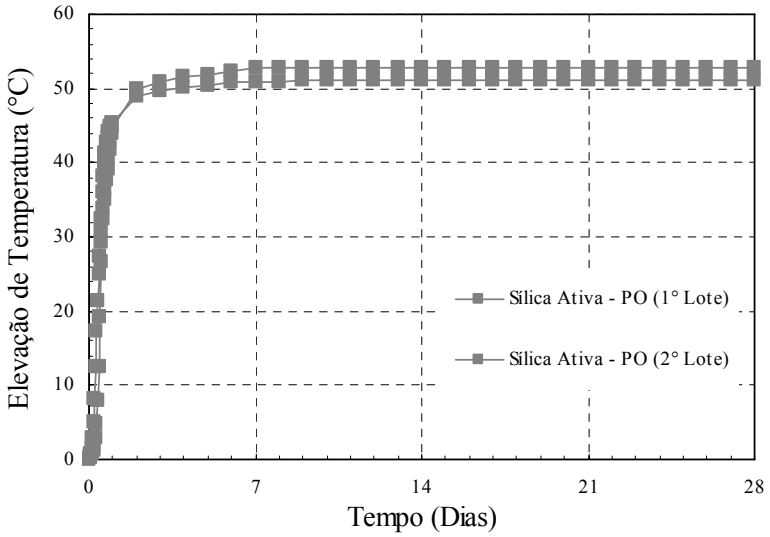
Figura 4-9 – Elevações adiabáticas de temperatura dos CAD com metacaulim

Na Figura 4-9 (a) pode-se notar que o CAD com naftaleno apresenta taxa de elevação de temperatura superior aos demais, até 9 horas, e maior temperatura total até 14 horas de ensaio, quando o CAD com policarboxilato, que possui taxa de elevação superior após as 9 horas, apresenta maior temperatura, e continua se elevando mais que os outros, até ultrapassá-los após 24 horas. Pode-se notar, na Figura 4-9 (b), que o CAD com metacaulim e policarboxilato se estabiliza, ao final do ensaio, com temperatura de carca de 3,5°C superior aos demais CAD.

A Figura 4-10 apresenta a comparação da elevação adiabática entre dois CAD produzidos com sílica ativa e com aditivo tipo policarboxilato de dois lotes de produção diferentes.



(a) Primeiras 24 horas



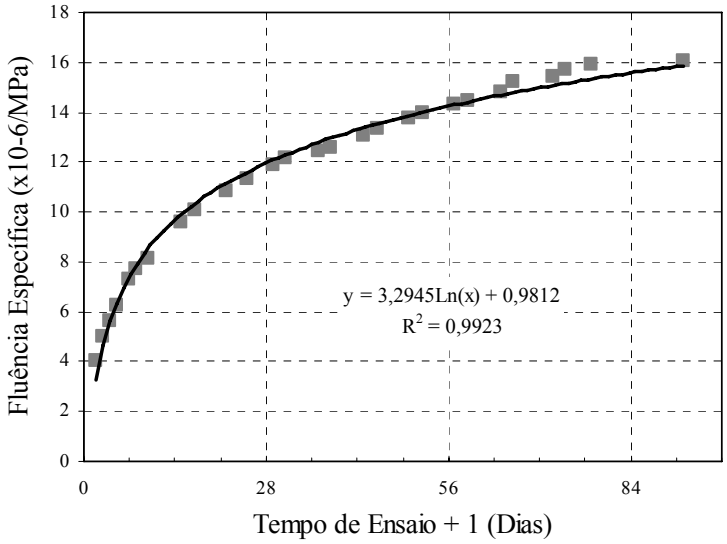
(b) Primeiros 28 dias

Figura 4-10 – Elevações adiabáticas de temperatura dos CAD com sílica ativa (2° Lote)

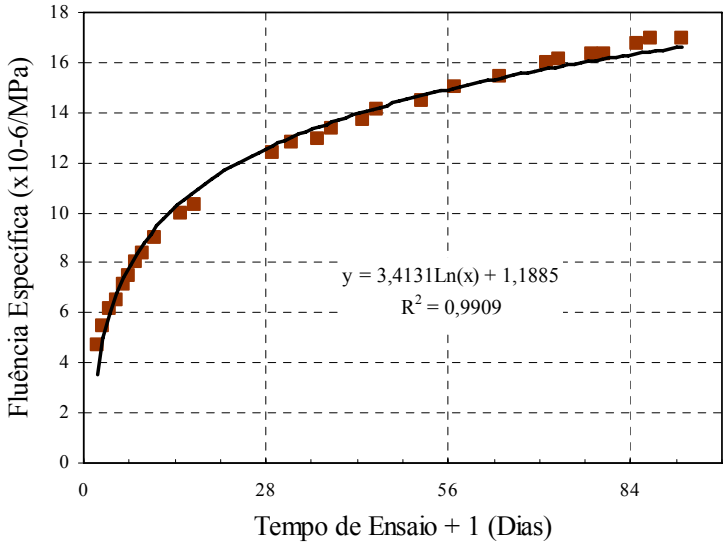
Pode ser notado na Figura 4-10 (a) que as diferenças nas elevações de temperatura para dois lotes diferentes do mesmo tipo de aditivo podem ser iguais ou superiores às encontradas para tipos de aditivos diferentes, como foi mostrado na Figura 4-8 (a) e na Figura 4-9 (a). Ao final do ensaio, no entanto, a diferença nas temperaturas de estabilização para os CAD com dois lotes diferentes de aditivo policarboxilato não chega a 2°C (Figura 4-10). Esta diferença é praticamente constante a partir dos 7 dias de ensaio.

e) Fluência

A Figura 4-11 apresenta as aproximações numéricas para os resultados dos ensaios de fluência dos CAD com sílica ativa e metacaulim com aditivo policarboxilato.



(a)



(b)

Figura 4-11 – Fluência específica: CAD com policarboxilato e sílica ativa

Como discutido anteriormente, os ensaios foram executados em corpos de prova selados, até a idade de 90 dias, com o intuito de verificar as influência dos tipos de adição mineral na fluência básica de dois dos CAD estudados.

Na Figura 4-12 pode ser observada a influência da adição mineral na fluência específica, até os 90 dias de ensaio. Os resultados estão em acordo com o que foi apresentado por Persson (1998) para o CAD. A figura mostra uma comparação aproximada para os comportamentos diferenciados dos CAD utilizando sílica ativa e metacaulim como adição mineral. Pode ser notado que, após 90 dias de carregamento, a diferença na fluência específica dos dois CAD é inferior a $0{,}5\times10^{-6}$/MPa – fluência básica.

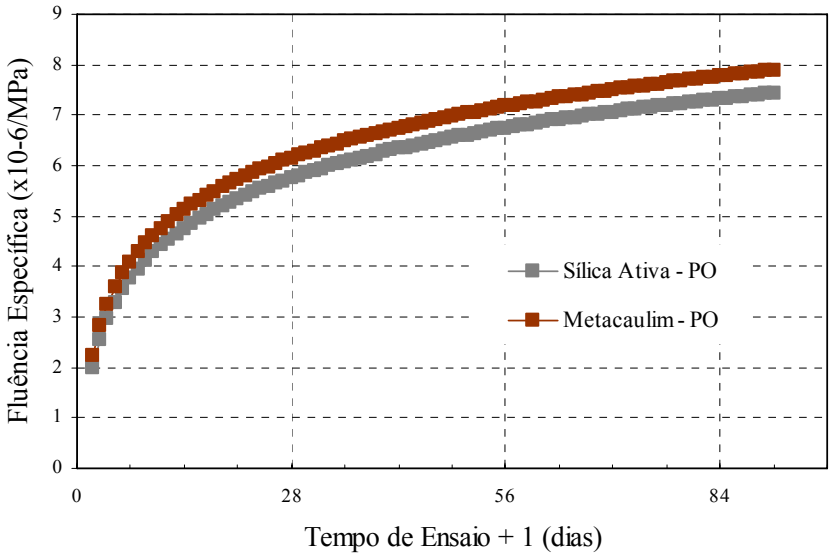


Figura 4-12 – Fluência específica dos CAD com policarboxilato

O CAD com metacaulim e aditivo superplastificante tipo policarboxilato apresenta fluência básica superior ao CAD com sílica ativa e policarboxilato durante todo o período de ensaio (90 dias).

4.3. A ANÁLISE TERMO-MECÂNICA

Esta segunda parte do programa experimental da pesquisa é dedicada à simulação computacional em estruturas típicas de CAD, utilizando um programa de computador específico para a análise termo-mecânica de estruturas de concreto desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo, em parceria com Furnas Centrais Elétricas S. A.

4.3.1. Informações e Diretrizes Gerais do Estudo

Para o melhor entendimento dos efeitos dos diferentes tipos de adição mineral e aditivos superplastificantes no comportamento termo-mecânico de estruturas em CAD, dois estudos de caso foram escolhidos para testar o efeito do tipo de aditivo superplastificante (primeiro estudo) e avaliar o impacto da variação do tipo de adição mineral (segundo estudo).

Foram dadas preferências às simulações de estruturas típicas de pilares em CAD, onde o mesmo pode ser empregado para diminuir as seções dos elementos estruturais, aumentar os carregamentos admissíveis, além de melhorar a durabilidade.

a) Geometria das Estruturas Utilizadas nas Simulações

Três dos CAD apresentados nos itens anteriores são simulados considerando a produção de pilares de seção transversal quadrada, nas dimensões de 1×1 m (primeiro estudo) e de 1,4×1,4 m (segundo estudo) em concretagem única. Para efeito de seleção da seção estudada, o pilar é considerado longo o bastante (cerca de três metros) para que não haja efeitos na distribuição de temperatura na seção mostrada na Figura 4-13, devido às demais seções em planos paralelos

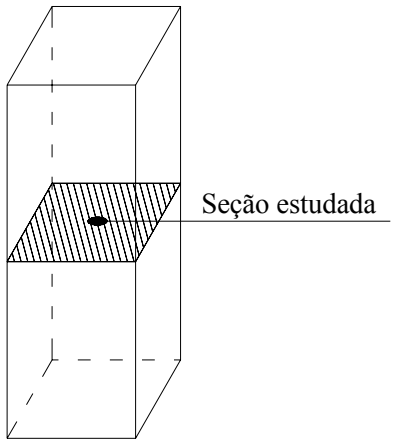


Figura 4-13 – Seção estudada das estruturas típicas em CAD selecionadas

A seção estudada (mostrada na Figura 4-13) é discretizada para seu estudo pelo método dos elementos finitos. A discretização da seção da coluna utilizada na primeira simulação está mostrada na Figura 4-14, que mostra os dois pontos chave na análise termo-mecânica deste tipo de estrutura e detalha a formação da malha em nós e elementos finitos (no detalhe à direita). O domínio desta seção consta de 200 elementos triangulares lineares de 10 cm de lado e 121 nós. Os nós analisados nas duas simulações estão mostrados na Figura 4-14. Eles são: um ponto no centro do pilar (ponto central) e um ponto na borda do pilar cerca de 10 centímetros da periferia do mesmo (ponto de borda).

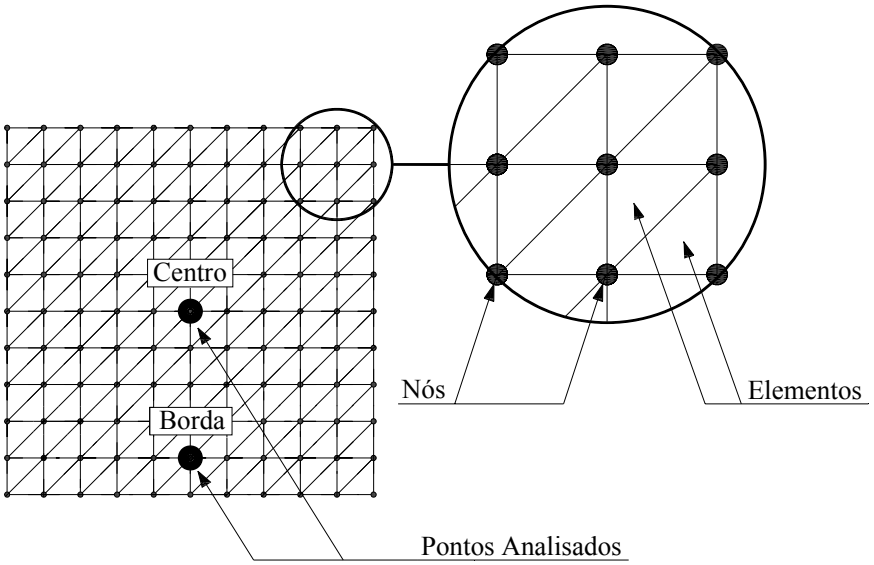


Figura 4-14 – Discretização em elementos finitos das seções estudadas

Os nós e elementos tomados para o estudo na borda do pilar se encontram a pelo menos 10 cm no interior da estrutura, para evitar que se localizem sobre pontos de descontinuidade no processo de cálculo.

Para a segunda simulação, uma seção de 1,4×1,4 m foi discretizada em elementos finitos lineares triangulares de 5 cm de lado, num total de 841 nós e 1.538 elementos finitos. Nesta segunda simulação os dois pontos chave mostrados na Figura 4-14 foram analisados.

b) <u>Condições de Contorno</u>

A Tabela 4-4 apresenta as funções senoidais da temperatura ambiental de todos os meses do ano para a cidade de Goiânia-GO. Para alimentar a primeira modelagem deste trabalho foi escolhida uma temperatura média diária constante de 28°C. Para a segunda modelagem, foi considerada a variação nos meses de junho/julho, mostrada na tabela. Neste segundo

caso, a função está ajustada para o lançamento do concreto às 14:00 horas, supondo que neste horário ocorre a máxima temperatura diária, e às 2:00 horas, ocorreria a mínima temperatura.

Tabela 4-4 – Funções das temperaturas ambientais da cidade de Goiânia-GO

Temperatura Ambiental, T em Horas de Concretagem (1 ≤ T ≤ 168)*			
Mês da concretagem	**Função**	**Mês da concretagem**	**Função**
Jan/Nov/Dez	$T = 24 + 4 \cdot sen(\pi \frac{T+6}{12})$	Jun/Jul	$T = 20{,}5 + 7{,}5 \cdot sen(\pi \frac{T+6}{12})$
Fev/Mar	$T = 24{,}5 + 4{,}5 \cdot sen(\pi \frac{T+6}{12})$	Ago	$T = 22{,}5 + 7{,}5 \cdot sen(\pi \frac{T+6}{12})$
Abr	$T = 23{,}5 + 5{,}5 \cdot sen(\pi \frac{T+6}{12})$	Set	$T = 24{,}5 + 6{,}5 \cdot sen(\pi \frac{T+6}{12})$
Mai	$T = 22 + 6 \cdot sen(\pi \frac{T+6}{12})$	Out	$T = 24{,}5 + 5{,}5 \cdot sen(\pi \frac{T+6}{12})$

Nota:

* Temperaturas obtidas de: http://www.weatherbase.com/.

A Figura 4-15 ilustra as variações nas temperaturas diárias do mês de junho/julho para a cidade de Goiânia-GO. Nela pode ser visto que as temperaturas extremas são encontradas às 14:00 horas (tempo de lançamento = 0 dias) e às 2:00 (tempo de lançamento = 0,5 dias), resultando em 28°C de valores temperatura média máxima e 13°C de temperatura média mínima.

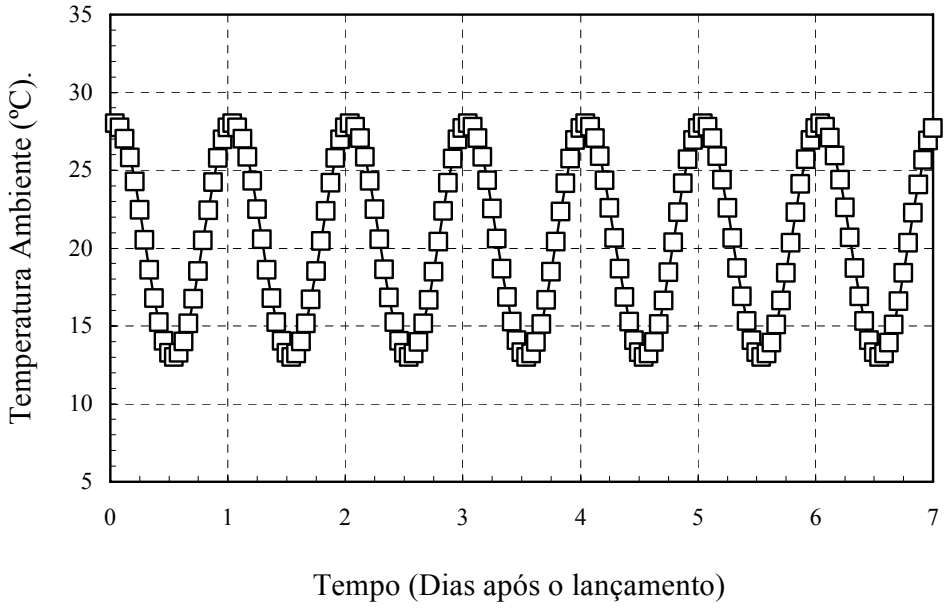


Figura 4-15 – Temperatura ambiental do mês de junho/julho - Goiânia-GO

Somente a segunda simulação apresentada utiliza esta evolução de temperatura ambiental no cômputo do estudo termo-mecânico. Ambas as simulações se desenvolvem durante as primeiras 168 horas (sete dias) a partir do lançamento do concreto na estrutura, momento este que é contado a partir de aproximadamente 30 minutos da mistura do concreto.

A estrutura de CAD é admitida como sendo formada por aço laminado com coeficiente de transmissão de calor igual a 348 W/(m^2ºC), para a primeira simulação, e de madeira compensada plastificada, para a segunda análise, com coeficiente de transmissão de calor igual a 25 W/(m^2ºC). Ambas as simulações foram procedidas para estruturas não carregadas e sem peso próprio, logo a contribuição de cargas para o desenvolvimento de fluência não foi considerada.

4.3.2. Estudo de Dois Pilares em CAD com Diferentes Tipos de Aditivo

O primeiro estudo termo-mecânico objetiva verificar como o tipo de aditivo superplastificante pode influenciar no comportamento termo-mecânico de estruturas típicas de CAD, utilizando os dados de dois dos concretos nesta pesquisa caracterizados.

Foram escolhidos os CAD produzidos com sílica ativa como adição mineral e naftaleno ou policarboxilato como aditivo superplastificante. As propriedades dos CAD que alimentam os módulos de cálculo foram apresentadas no item anterior.

a) Análise Térmica

As evoluções de temperatura no centro dos pilares estudados nas simulações estão mostradas na Figura 4-16. Nas mesmas é possível constatar que o pico de temperatura para a coluna com policarboxilato (68,6°C, em 18 horas) é maior que o pico para a coluna com naftaleno (65,8°C, em 15 horas). No entanto, como pode ser notado na figura, o pico de temperatura da coluna com policarboxilato acontece com 3 horas de atraso, quando comparado à coluna com naftaleno, fato este que é positivo do ponto de vista do desenvolvimento de tensões de origem térmica.

Pode ser notado o efeito de retardo do aditivo policarboxilato durante as 12 primeiras horas de ensaio, quando o centro da coluna tem temperatura cerca de 15°C inferior ao centro da coluna com naftaleno. Após as 12 horas, ocorre um grande aumento da taxa de reação de hidratação nesta coluna – ver também a Figura 4-8 (a) – e ela passa a ter temperatura superior em seu centro. Somente após 96 horas de ensaio ambos os centros das colunas apresentam temperaturas idênticas. Nesta primeira simulação, o concreto foi lançado com

temperatura de 28°C (temperatura do concreto) e a temperatura ambiental se manteve não variável, com valor de 28°C, durante todo o tempo em estudo.

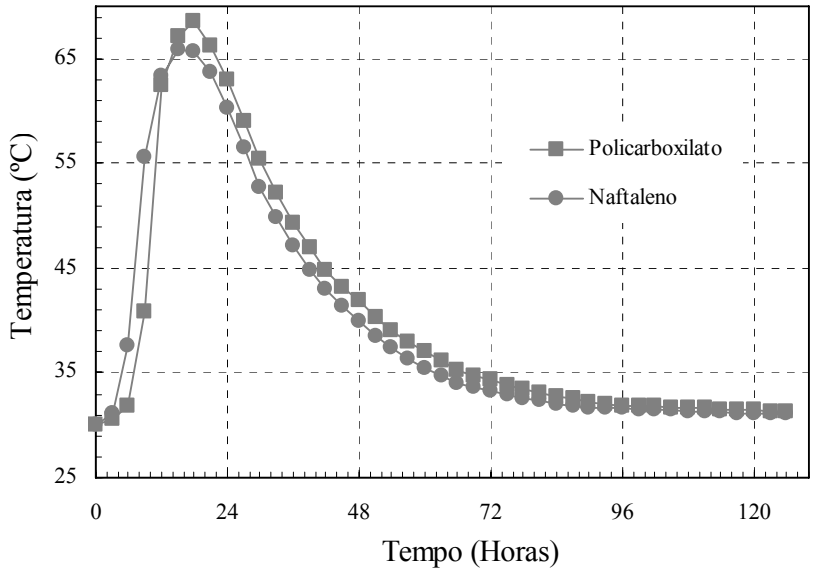


Figura 4-16 – Temperatura nos centros dos pilares em CAD com sílica ativa

A Figura 4-17 mostra a mesma análise, agora para o ponto da borda dos pilares – ver Figura 4-14. Pode ser vista a mesma tendência encontrada para os pontos no centro dos pilares: maior pico de temperatura para a coluna com policarboxilato (51,8°C contra 47,6°C para o CAD com naftaleno). No entanto, ambos os picos de temperatura ocorrem às 12 horas de análise, ou seja, o efeito de retardo do aditivo tipo policarboxilato não foi sentido no pico de temperatura. Antes das 12 horas (do pico de temperatura), no entanto, o CAD com policarboxilato apresentou visível retardo, com diferença de temperatura chegando a 10°C. O aumento repentino da taxa de hidratação do CAD com policarboxilato (Figura 4-8 (a)) fez com que a temperatura na borda da coluna, assim como no caso do centro, ultrapassasse a temperatura da coluna com naftaleno em pouco menos de 12 horas.

Após as primeiras 96 horas, como pode ser notado na Figura 4-17, as temperaturas são as mesmas nas bordas das duas colunas e tendem fortemente a se estabilizar com a temperatura média ambiental, considerada 28°C constante. Neste primeiro estudo, é importante frisar, o efeito da variação da temperatura ambiental na temperatura da coluna foi desconsiderada.

O problema termo-mecânico, no entanto, não se torna crítico necessariamente nos momentos em que se atinge a temperatura máxima em uma estrutura. Os programas de computador fazem uma análise implícita em seus algoritmos de cálculo e não deixam claro

a importância maior da distribuição de temperatura no interior da estrutura em face da temperatura pontual. A Figura 4-18 apresenta a evolução na diferença de temperatura entre os dois pontos estudados, o centro e a borda.

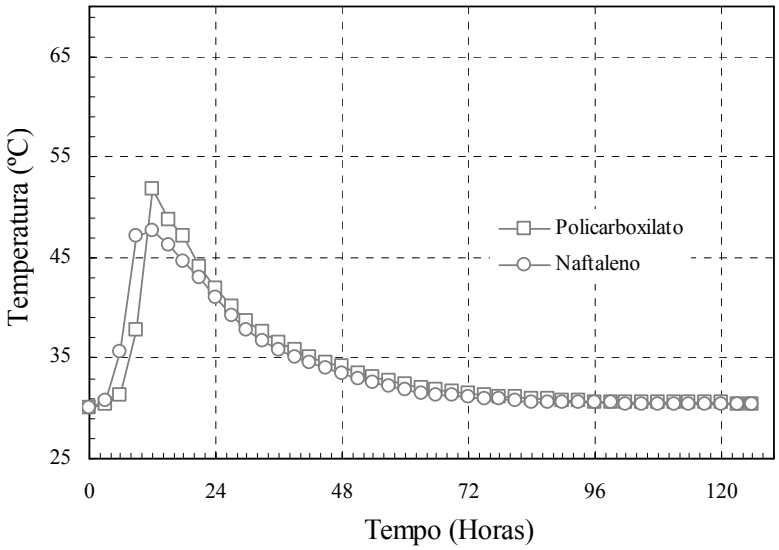


Figura 4-17 – Temperatura nas bordas dos pilares em CAD com sílica ativa

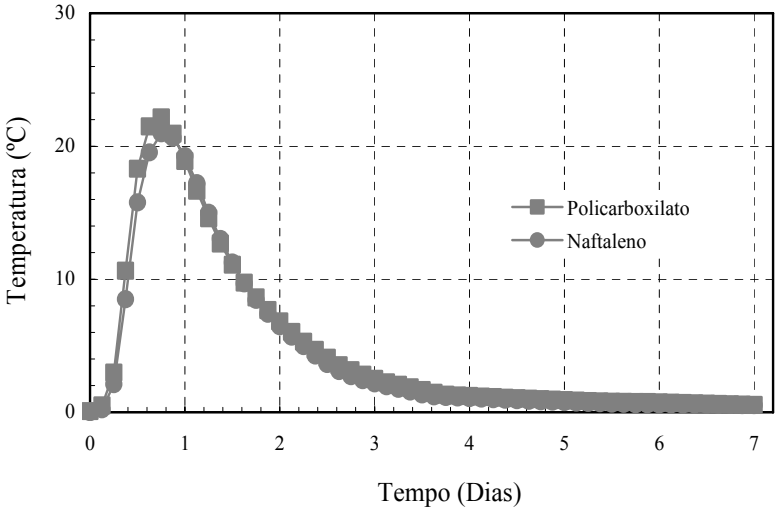
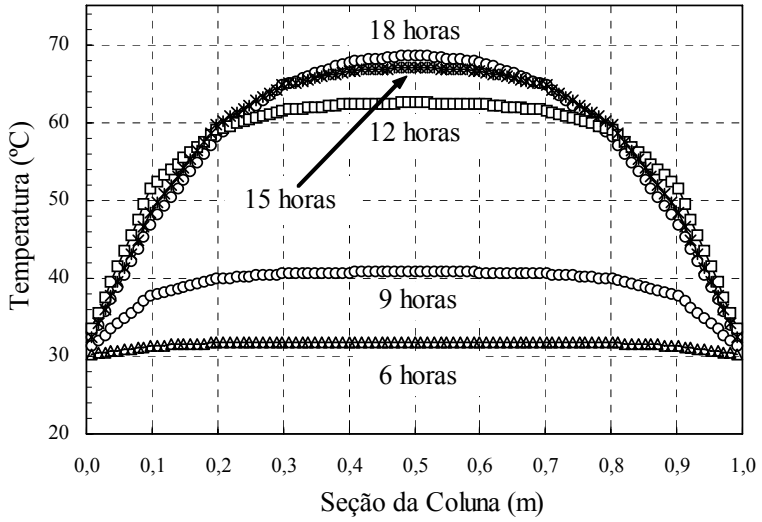


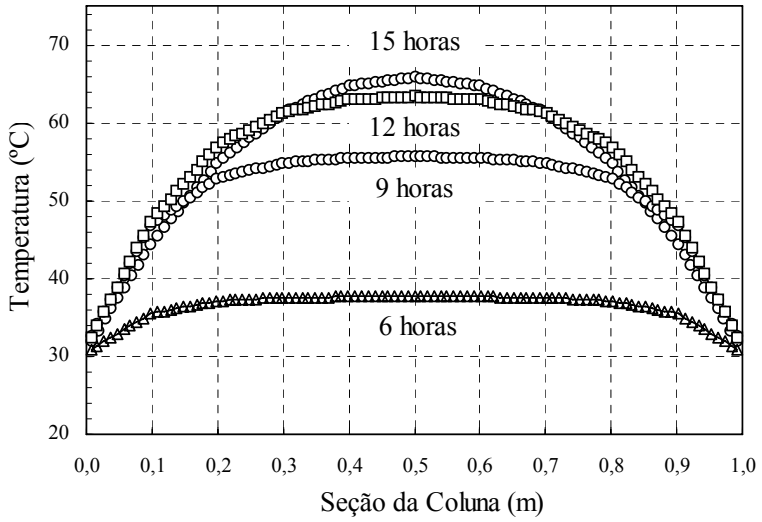
Figura 4-18 – Diferenças de temperatura centro-borda dos pilares com sílica ativa

Pode ser notado, neste caso, que a diferença de temperatura entre os dois pontos, na coluna com policarboxilato, é sensível entre 8 e 20 horas de análise. Nos demais estágios não se pode verificar um comportamento diferenciado nas diferenças de temperatura entre o centro e a borda das colunas, para ambas as situações. Para as duas colunas, as distribuições de temperatura ao longo dos eixos de suas seções, em diferentes idades de análise, estão mostradas na Figura 4-19, a seguir. Nela pode ser notado que as máximas diferenças de temperatura alcançam valores de 21,5°C para a coluna em CAD com

policarboxilato e 19,5°C para a coluna em CAD com naftaleno, nos respectivos instantes de temperatura máxima no centro da seção: 18 e 15 horas, respectivamente.



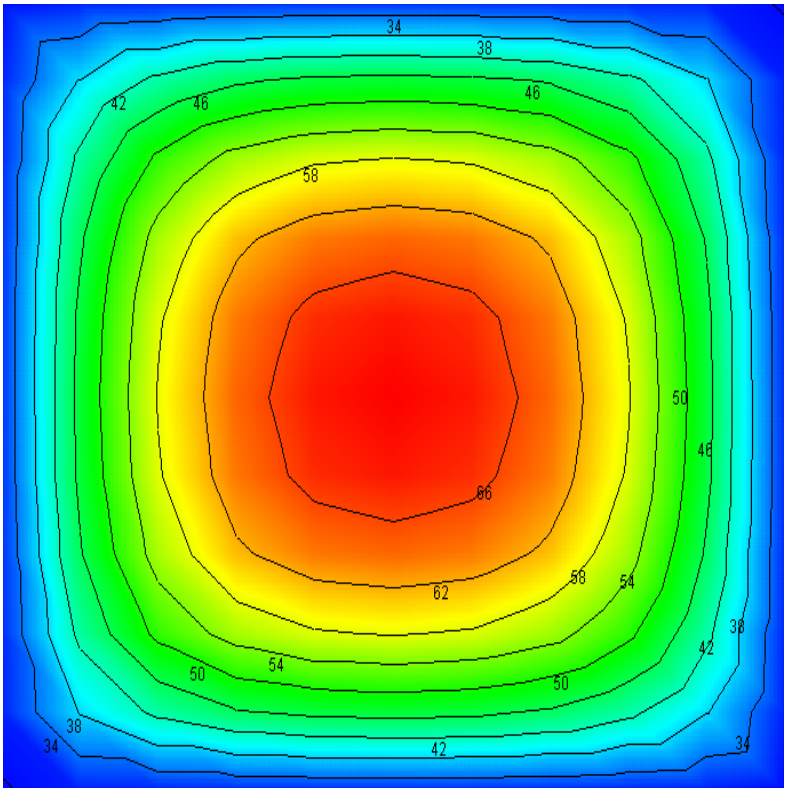
(a) Pilar em CAD com policarboxilato



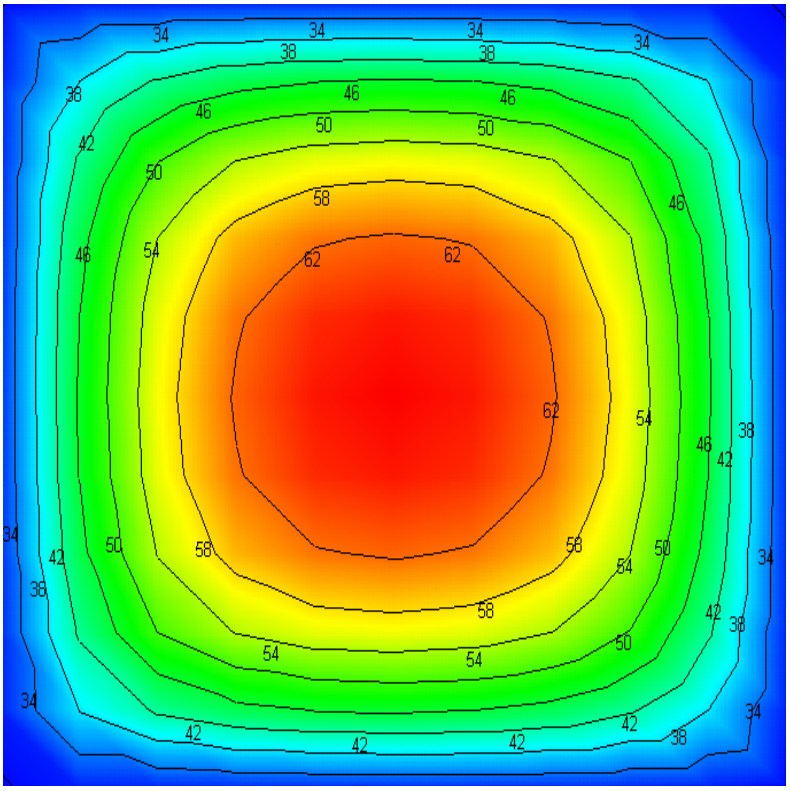
(b) Pilar em CAD com naftaleno

Figura 4-19 – Temperatura ao longo dos eixos das seções dos pilares

A Figura 4-20 apresenta a distribuição de temperatura (campo de temperaturas) nas seções estudadas, nos momentos de temperatura máxima nos centros dos pilares, para misturas com policarboxilato (a) e naftaleno (b). Deve-se frisar que as visualizações destas distribuições de temperatura parecem muito próximas umas das outras, por vezes não apresentando diferenças aparentemente significantes. Os efeitos dessas diferenças de temperatura são importantes e serão comentados mais adiante, na análise de tensões.



(a) Pilar em CAD com policarboxilato (18 horas)



(b) Pilar em CAD com naftaleno (15 horas)

Figura 4-20 – Campo de temperatura no momento de pico no centro

b) Análise Tensional

Para a computação do problema tensional, pequenas diferenças nas distribuições das temperaturas da Figura 4-20 podem fazer a diferença entre estar ou não dentro de um possível quadro de fissuração para a estrutura, uma vez que elas representam as diferenças de temperatura, que irão gerar tensões no interior das mesmas; e que o problema tensional é um problema acumulativo de solicitações.

As evoluções das tensões de compressão e tração no centro e na borda dos pilares analisados estão mostradas na Figura 4-21 e na Figura 4-22. Nas figuras apresentadas, claramente nota-se que as tensões geradas no interior dos pilares têm comportamentos bastante diferentes durante todos os estágios de análise, a despeito de comportamentos térmicos de certa maneira um pouco parecidos. A coluna em CAD com policarboxilato, como pode ser observado na Figura 4-21, alcança tensões de compressão que chegam a 14,8 MPa em 18 horas e a coluna de CAD com naftaleno, 10,7 MPa em 15 horas. Como pode ser observado na Figura 4-1(a), estes concretos já alcançaram mais que 20 MPa a estas idades, e o problema de esmagamento do concreto praticamente não existe.

No caso do estudo das tensões de tração, no centro das colunas, pode-se afirmar que são encontradas diferenças substanciais quando elas são concretadas com CAD utilizando os diferentes tipos de aditivos da pesquisa. Às 40 horas de análise, por exemplo, a coluna simulada com aditivo policarboxilato ainda não está tracionada, apresentando tensão de compressão de cerca de 2,2 MPa, e a coluna com naftaleno já corta o eixo do tempo de análise, apresentando a partir de então tensão de tração em seu ponto central.

O desenvolvimento das tensões de tração no centro da coluna com policarboxilato se mantém constante e se estabiliza com valores pouco inferiores ao desenvolvimento dos valores do módulo de ruptura do CAD estudado – Figura 4-21. A coluna de CAD com naftaleno, por sua vez, desenvolve tensões de tração que chegam a ultrapassar os valores alcançados pelo módulo de ruptura do CAD – Figura 4-22.

Para a evolução de tensão nas bordas dos pilares, pode se observar nas Figura 4-21 e Figura 4-22 que os comportamentos são bastante próximos dos apresentados pelos centros numa análise qualitativa, a coluna de policarboxilato com maiores tensões de compressão nas primeiras horas: 9,0 MPa com 12 horas, e 5,9 MPa com 12 horas, para o naftaleno; e com a coluna de CAD com naftaleno desenvolvendo valores maiores de tensões de tração, chegando a 4,0 MPa após 7 dias – 3,5 MPa, para a coluna com policarboxilato.

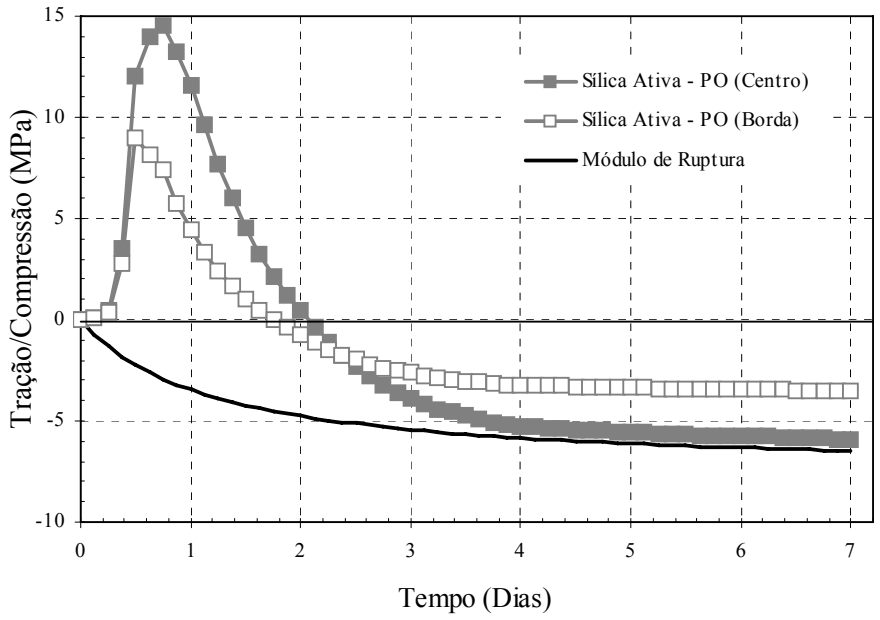


Figura 4-21 – Tensões na coluna com sílica ativa e aditivo tipo policarboxilato

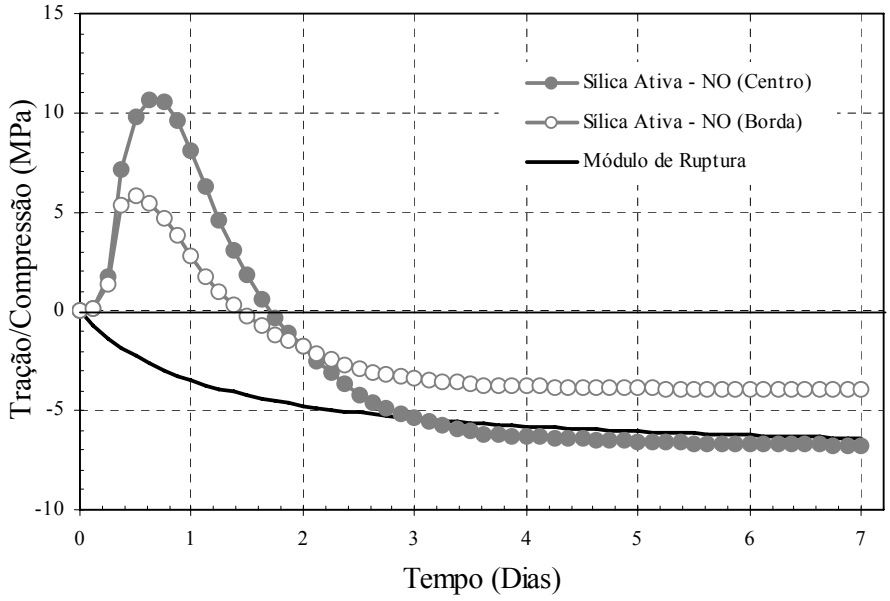
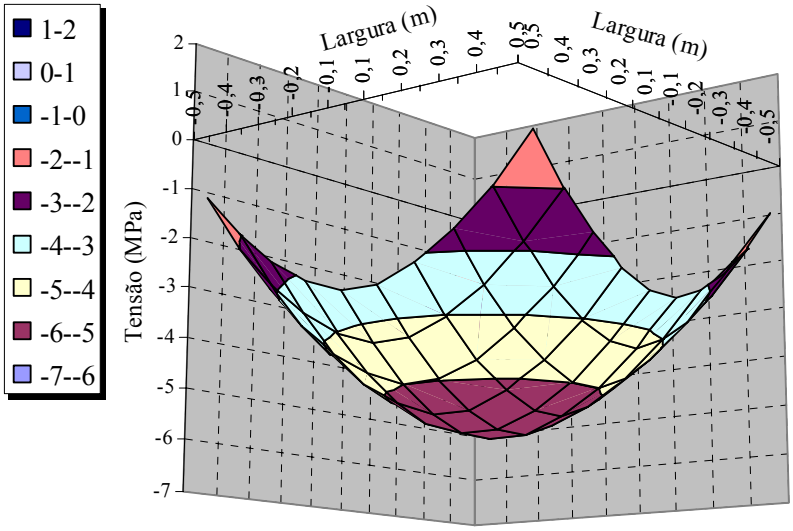


Figura 4-22 – Tensões na coluna com sílica ativa e aditivo tipo naftaleno

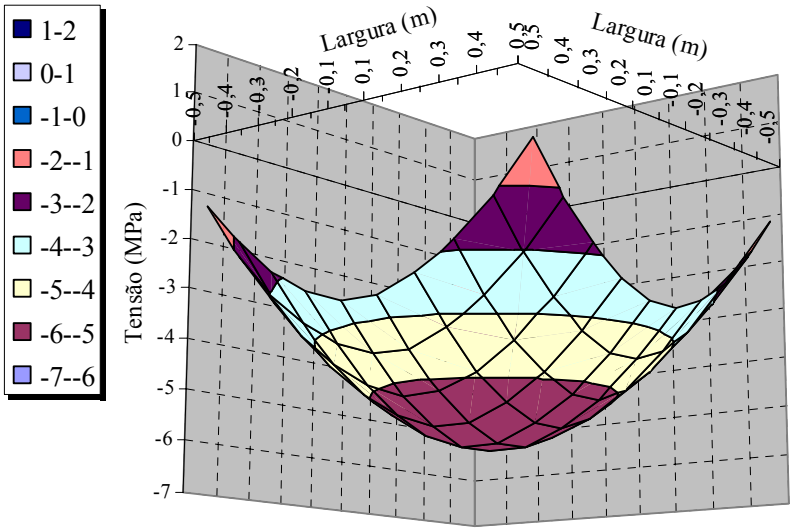
A Figura 4-23 apresenta as distribuições das tensões de tração na seção estudada no momento de C. S. mínimo no centro dos pilares para o pilar em CAD com policarboxilato (a) e para o pilar em CAD com naftaleno (b). O quadro de fissuração efetivamente falando, no entanto é delimitado pela análise dos coeficientes de segurança de acordo com os desenvolvimentos de resistência à tração (mostrados na Figura 4-21 e na Figura 4-22). A Figura 4-24 e a Figura 4-25 mostram os desenvolvimentos dos coeficientes de segurança para os pontos centrais e de borda dos pilares estudados, respectivamente.

Na Figura 4-24 pode ser visto que antes de 48 horas para o policarboxilato, e 42 para o naftaleno, os coeficientes de segurança para os centros das colunas são negativos, ou seja, não são definidos fisicamente, pois as estruturas estão solicitadas à compressão. As curvas da Figura 4-24, então, se iniciam com um período de coeficiente negativo (fisicamente não definido) que são seguidos por um instante de inversão de solicitação mecânica com pontos de descontinuidade na função (onde a função toca o eixo das abscissas no gráfico tensão-tempo da Figura 4-21 e da Figura 4-22).

No centro da coluna de CAD com policarboxilato, por exemplo, encontra-se um coeficiente de segurança de 1,09 em 168 horas de análise, e 0,91 em 87 horas para a coluna de CAD com naftaleno. Na prática da engenharia, é comum admitir um coeficiente de segurança mínimo de 1,5 para o estudo termo-mecânico, sendo desejável uma margem de segurança superior a 2, quando possível.



(a) Pilar em CAD com policarboxilato



(b) Pilar em CAD com naftaleno

Figura 4-23 – Tensão na seção estudada no momento de C. S. mínimo no centro

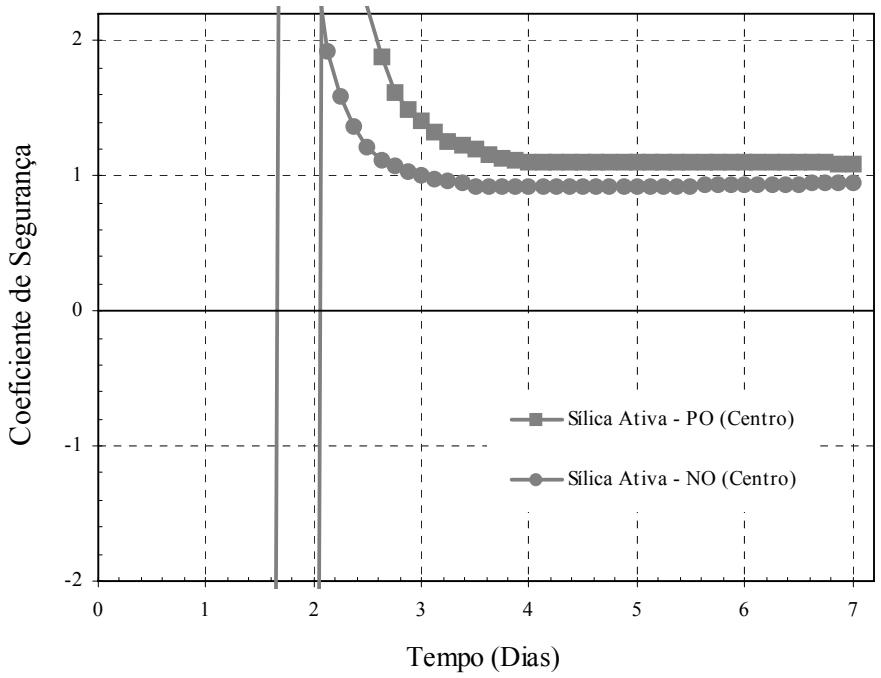


Figura 4-24 – C. S. nos centros dos pilares com sílica ativa e policarboxilato/naftaleno

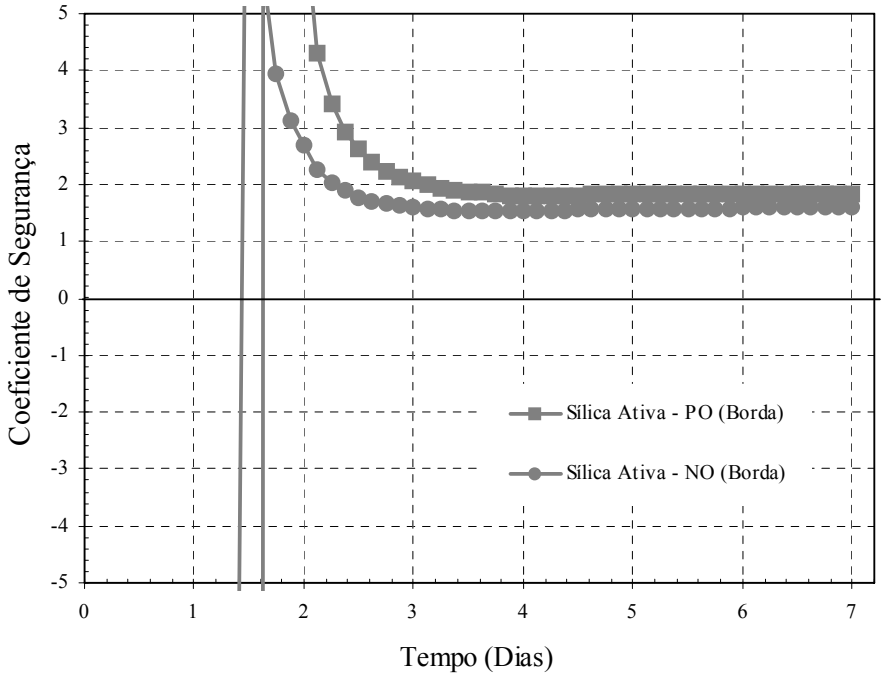


Figura 4-25 – C. S. nas bordas dos pilares com sílica ativa e policarboxilato/naftaleno

Nos casos de tensões de tração na borda dos pilares estudados, por exemplo, as piores situações são de 1,84 em 168 horas e 1,61 em 168 horas, respectivamente, para as colunas em CAD com aditivo policarboxilato e naftaleno. Em ambos os casos, embora sejam as piores situações, ainda assim elas não comprometem definitivamente o quadro termo-mecânico da estrutura.

A Tabela 4-5 apresenta os valores máximos das tensões de tração e mínimos para os coeficientes de segurança dos dois pontos de estudo das duas colunas quando simuladas até os 7 (168 horas) dias e até os 28 (1.440 horas) dias de idade.

Tabela 4-5 – Dados das análises termo-mecânicas: maiores tensões e menores C. S.

Tipo de Análise		Variável	Valor Determinado para as Colunas			
			Com Policarboxilato		Com Naftaleno	
			No Centro	Na Borda	No Centro	Na Borda
Maiores Tensões	Nas 168 Horas	Tempo de Análise	168	168	168	168
		Tensão Térmica	-5,92	-3,52	-6,75	-3,96
		Resistência à Tração	-6,47	-6,47	-6,39	-6,39
		C. S.	1,09	1,84	0,95	1,61
	Nas 1440 Horas	Tempo de Análise	1440	1440	1440	1440
		Tensão Térmica	-6,44	-3,74	-7,21	-4,15
		Resistência à Tração	-7,41	-7,41	-7,29	-7,29
		C. S.	1,14	1,98	1,01	1,75
Menores C. S.	Nas 168 Horas	Tempo de Análise	168	93	87	87
		Tensão Térmica	-5,92	-3,21	-6,19	-3,72
		Resistência à Tração	-6,47	-5,79	-5,66	-5,66
		C. S.	1,09	1,80	0,91	1,51
	Nas 1440 Horas	Tempo de Análise	174	93	87	87
		Tensão Térmica	-5,96	-3,21	-6,19	-3,72
		Resistência à Tração	-6,50	-5,79	-5,66	-5,66
		C. S.	1,09	1,80	0,91	1,51

Na Tabela 4-5 pode-se observar que existe um ponto ótimo para o valor do coeficiente de segurança de cada coluna estudada, e para os casos dos pontos do centro e da borda do pilar com aditivo naftaleno e para o caso da borda do pilar com aditivo policarboxilato estes pontos se encontram dentro das primeiras 168 horas (7 dias), 87, 87 e 93 horas,

respectivamente. Para o ponto do centro do pilar com policarboxilato, este ponto corresponde a 174 horas, mas corresponde ao mesmo coeficiente de segurança, quando aproximado na terceira casa decimal.

4.3.3. Estudo de Dois Pilares em CAD com Diferentes Tipos de Adição

O segundo estudo termo-mecânico, apresentado neste item, objetiva apresentar como o tipo de adição mineral pode influenciar no comportamento termo-mecânico de estruturas típicas de CAD utilizando-se dois dos concretos estudados. Para tal investigação os CAD produzidos com sílica ativa e metacaulim como adição mineral e policarboxilato como aditivo superplastificante foram escolhidos. As propriedades dos CAD, que alimentaram todos os módulos de cálculo, foram apresentadas no item 4.3.1.

a) Análise Térmica

As evoluções de temperatura no centro e na borda dos pilares em CAD com sílica ativa e metacaulim como adição mineral estão mostradas nas Figura 4-26 e Figura 4-27, respectivamente.

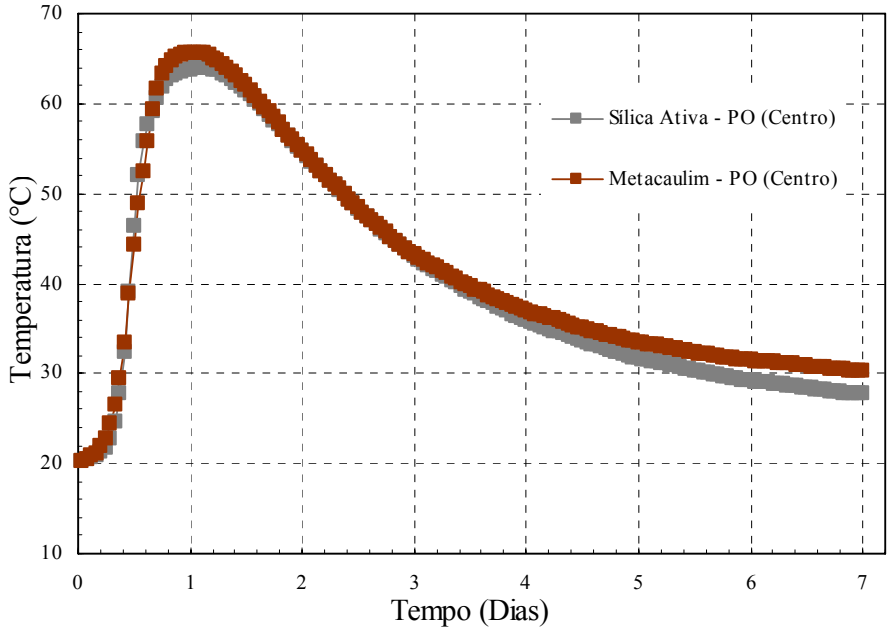


Figura 4-26 – Temperatura nos centros dos pilares com sílica ativa e metacaulim

Pode-se constatar na Figura 4-26 que o pico de temperatura para a coluna com metacaulim (65,7°C, em 25 horas) é ligeiramente maior que o pico para a coluna com sílica ativa (64,0°C, em 27 horas). No entanto, o pico de temperatura da coluna com metacaulim

acontece com 2 horas de antecedência quando comparado à coluna com sílica ativa, fato este que é negativo do ponto de vista do desenvolvimento de tensões de origem térmica.

A coluna com metacaulim como adição mineral, além de apresentar pico de temperatura mais elevado e mais adiantado, apresenta maiores temperaturas após 72 horas de análise e encerra às 168 horas de análise com temperatura de estabilização superior (30,3°C) à coluna em CAD com sílica ativa (27,7°C).

A Figura 4-27, a seguir, apresenta os comportamentos das temperaturas nas bordas dos dois pilares em CAD com sílica ativa e metacaulim.

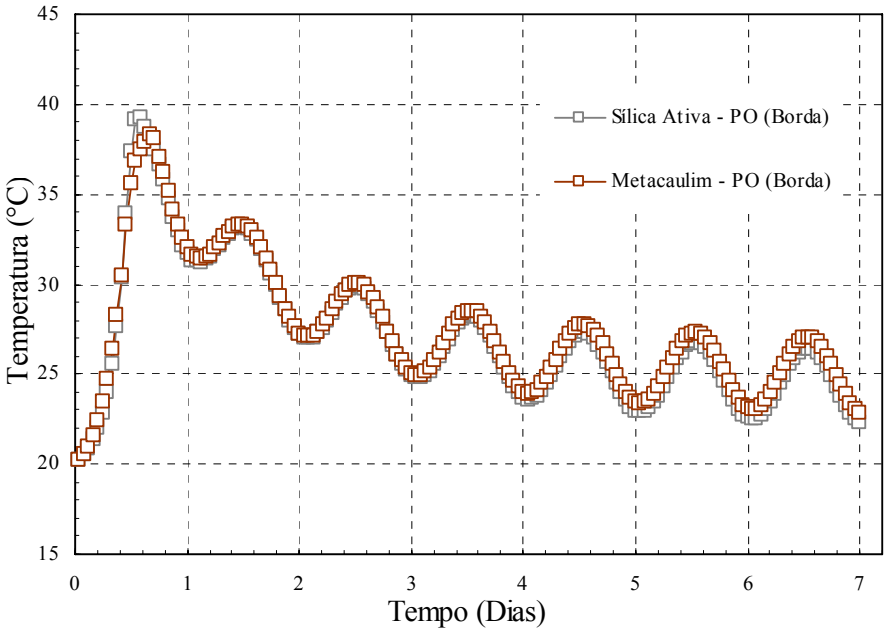


Figura 4-27 – Temperatura nas bordas dos pilares com sílica ativa e metacaulim

Pode-se notar na Figura 4-27 comportamentos muito parecidos para as bordas dos dois pilares estudados. Uma vez que nesta simulação foi utilizada uma função senoidal para a temperatura ambiental, é possível identificar que os desenvolvimentos das temperaturas nos dois pontos de análise de ambas as simulações são guiados pelo comportamento da temperatura ambiental. Exceções se fazem nos momentos de maiores taxas de liberação de calor de hidratação, entre 12 e 18 horas de análise, quando a coluna em CAD com sílica ativa supera em 1°C o pico de temperatura da coluna em CAD com metacaulim (39,3°C, contra 38,3°C) nos pontos de borda.

A Figura 4-28, a seguir, apresenta as evoluções das diferenças de temperatura entre os pontos de centro e de borda das duas colunas analisadas nas primeiras 168 horas (7 dias). Pode-se notar que a coluna com metacaulim se mantém com diferenças ligeiramente maiores entre 0 e 11 e entre 15 e 84 horas de análise, e a sílica ativa entre 11 e 15 horas. Após as 84 horas de análise, as diferenças de temperatura entre centro e borda da coluna em CAD com metacaulim apresentam valores cada vez maiores que as diferenças da coluna em CAD com sílica ativa.

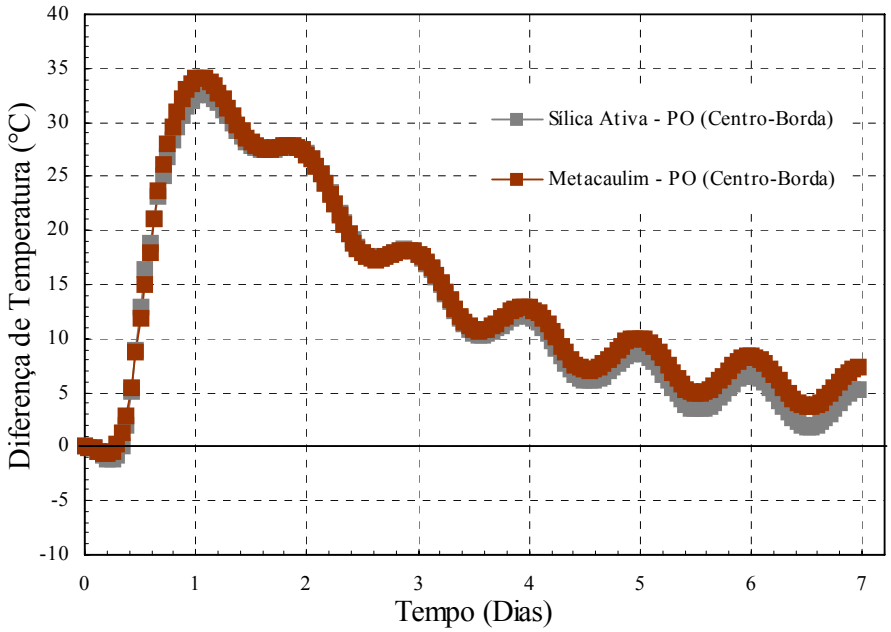
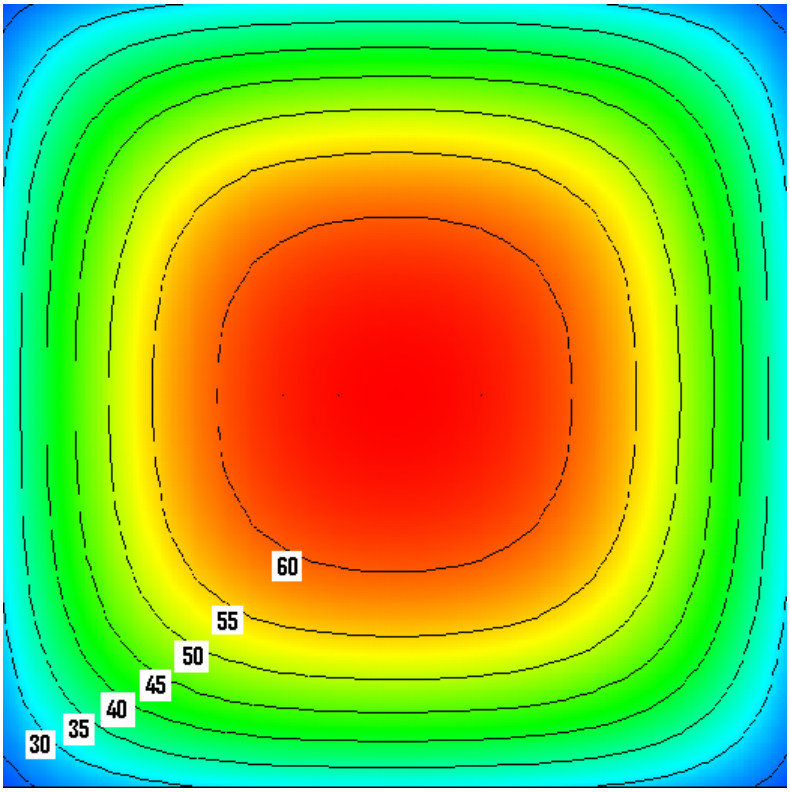
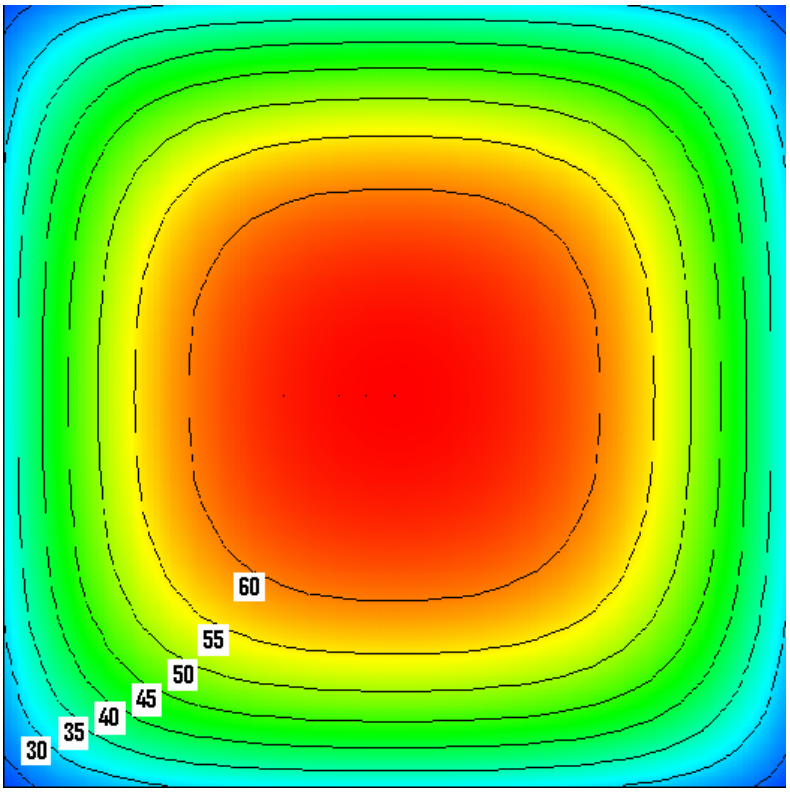


Figura 4-28 – Diferenças de temperatura centro-borda

A Figura 4-29 apresenta as distribuições de temperatura (campos de temperatura) nas seções das duas colunas no momento de pico de temperatura nos centro das mesmas.



(a) Sílica ativa (27 horas)



(b) Metacaulim (25 horas)

Figura 4-29 – Campos de temperatura dos pilares

b) Análise Tensional

Os desenvolvimentos de tensões nos pontos de centro e borda dos pilares estudados nesta segunda simulação termo-mecânica estão apresentados na Figura 4-30, para a coluna em CAD com adição de sílica ativa, e na Figura 4-31, para a coluna em CAD com adição de metacaulim. Os desenvolvimentos dos módulos de ruptura para cada um dos dois CAD também estão representados nas figuras.

Pode se observar nas duas figuras, que os comportamentos tensionais nos dois pontos analisados são bastante parecidos, para as duas colunas, com tipos de adição mineral diferentes. As tensões de compressão máximas são 17,1 MPa em 27 horas e 17,1 MPa em 25 horas para as colunas em CAD com sílica ativa e metacaulim, nesta ordem. Ainda, as mesmas deixam de estar comprimidas e passam a ficar tracionadas em seus centros após 97 e 95 horas de análise. Ou seja, os comportamentos tensionais são praticamente os mesmos durante o estágio de compressão das duas colunas.

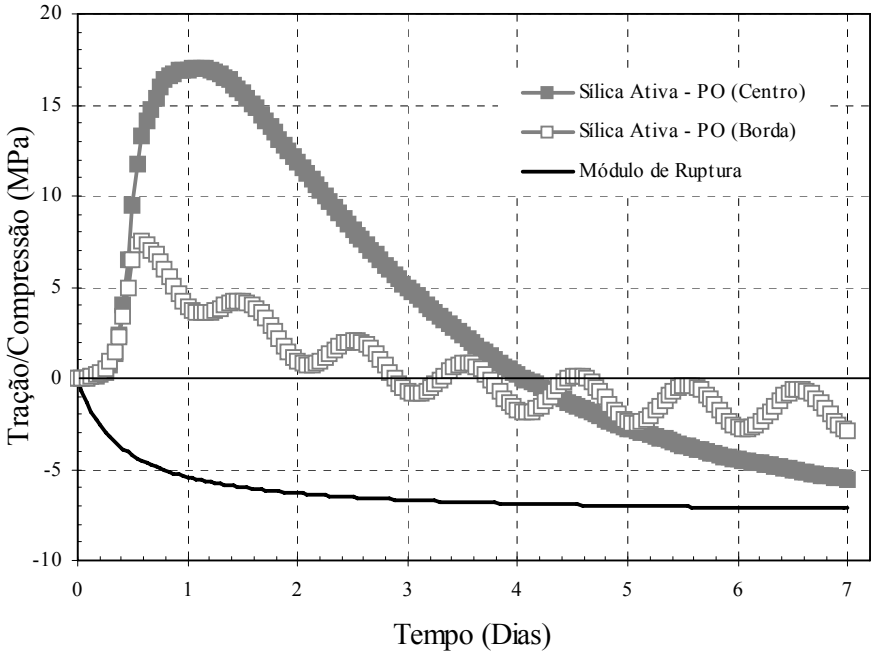


Figura 4-30 – Tensões nos centros e bordas dos pilares com sílica ativa

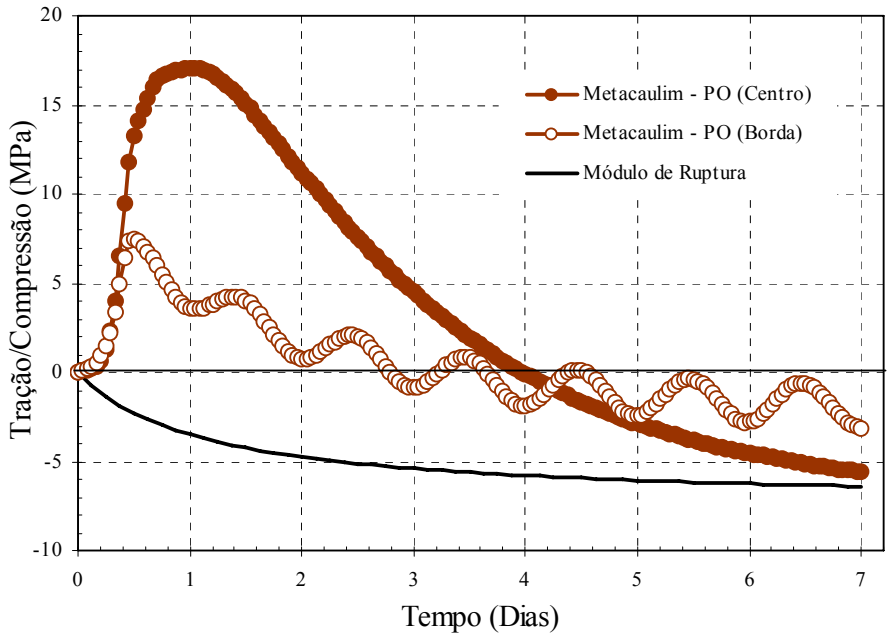


Figura 4-31 – Tensões nos centros e bordas dos pilares com metacaulim

O desenvolvimento de tensão nos pontos de borda, como pode ser visto nas figuras analisada, são bastante influenciados pela variação da temperatura ambiental, ao contrário do centro da coluna, isolado por uma espessa capa de concreto, com baixo coeficiente de transferência de calor. Estas tensões não se mostram muito importantes no caso deste estudo termo-mecânico.

Ao final de 168 horas de análise (7 dias), a coluna em CAD com sílica ativa desenvolveu tensão de tração de 5,5 MPa em seu ponto central, e a coluna com metacaulim como adição minera, 5,6 MPa. A Figura 4-32, a seguir, apresenta os desenvolvimentos dos coeficientes de segurança para os pontos centrais das duas colunas estudadas.

Pode ser observado na Figura 4-32 que, embora ocorram desenvolvimentos de tensões tão parecidos, os coeficientes de segurança apresentam sensíveis diferenças, uma vez que os desenvolvimentos de resistência à tração (módulo de ruptura) apresentaram pequenas variações. Pode-se notar o período de coeficiente negativo (fisicamente não definido) que se segue de um instante de inversão de solicitação mecânica (um ponto de descontinuidade na função, onde a função toca o eixo das abscissas no gráfico tensão-tempo) e o alcance dos C. S. mínimos de 1,30 e 1,15 para as colunas em CAD com sílica ativa e metacaulim, respectivamente. A Figura 4-33 apresenta os desenvolvimentos dos coeficientes de segurança para os pontos de borda das duas colunas.

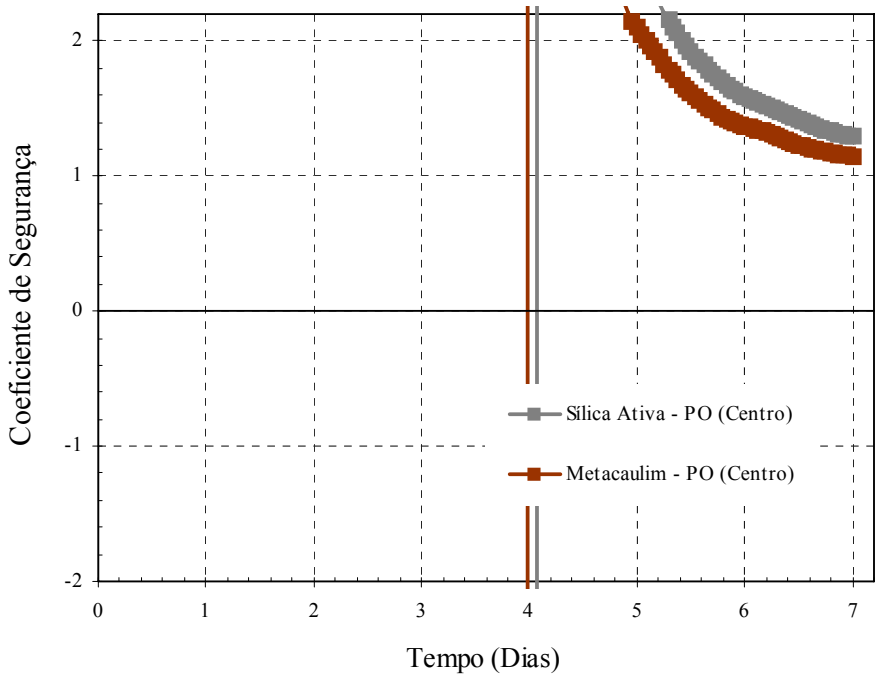


Figura 4-32 – C. S. dos pilares com sílica ativa e metacaulim: Centro

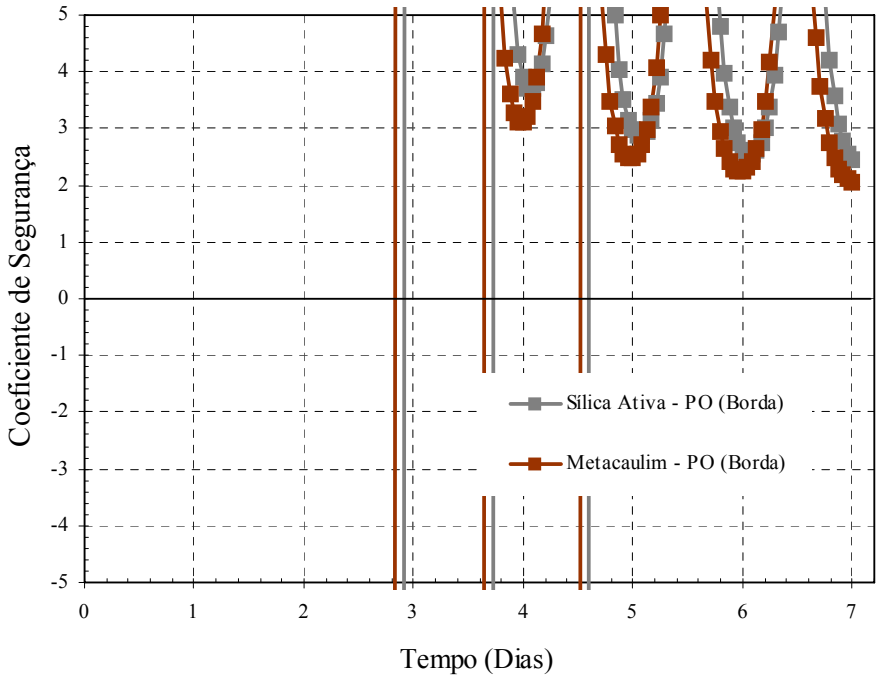


Figura 4-33 – C. S. dos pilares com sílica ativa e metacaulim: Borda

Observa-se nas três figuras anteriores, que os gráficos de evolução dos coeficientes de segurança ficam mais bem definidos para as análises dos pontos centrais das seções transversais das colunas que para os pontos de borda das mesmas.

No caso de se analisar a evolução do coeficiente de segurança dos pontos da borda – Figura 4-33, a visualização fica um pouco mais difícil, uma vez que há diversos instantes de inversão de solicitação mecânica nos pontos estudados nas estruturas (tensões de tração e de compressão), como pode ser visto na Figura 4-30 e na Figura 4-31, para os CAD com sílica ativa e metacaulim, respectivamente. Isto se deve à grande influência que a variação de temperatura ambiental causa no comportamento da temperatura (e da tensão) dos pontos de borda das colunas, como já foi comentado anteriormente.

Analogamente ao estudo dos coeficientes de segurança no ponto central, as funções dos C. S. dos pontos de borda se iniciam com um período de coeficiente negativo (fisicamente não definido) que se segue em vários instantes de inversão de solicitação mecânica com pontos de descontinuidade na função (onde a função toca o eixo das abscissas no gráfico tensão-tempo). Assim, as funções apresentam vários intervalos de valores negativos (fisicamente não definidos) e intervalos de coeficientes de segurança, valores positivos.

A Tabela 4-6, mais adiante, apresenta o resumo final dos dados desta segunda análise termo-mecânica dos dois pilares em CAD, que teve por finalidade comparar os papéis dos diferentes tipos de adição mineral em seus comportamentos termo-mecânicos no período de endurecimento do CAD.

Tabela 4-6 – Dados das análises termo-mecânicas: menores C. S. nas 168 horas

Variável	Valor Determinado para as Colunas			
	Com Sílica Ativa		Com Metacaulim	
	No Centro	Na Borda	No Centro	Na Borda
Tempo de Análise	168	168	168	168
Tensão Térmica	5,52	2,91	5,58	3,13
Resistência à Tração	7,16	7,16	6,40	6,40
C. S.	1,30	2,45	1,15	2,04

Como podem ser observados na tabela, os menores coeficientes de segurança foram encontrados para 168 horas de análise, período extremo do estudo termo-mecânico. No entanto, como discutido no estudo termo-mecânico anterior (item 4.3.2), estes podem ser considerados valores aproximados dos valores mínimos alcançados pelos coeficientes de segurança nos pontos analisados, no decorrer do endurecimento do concreto.

Ainda, pode-se comparar, com melhor clareza, que os valores encontrados dos C.S. para a coluna em CAD com sílica ativa são sensivelmente superiores aos para coluna em CAD com metacaulim, para os três pontos analisados nas seções médias das colunas.

4.3.4. Conclusão do Estudo Termo-Mecânico

Este capítulo, apresentou dois estudos de caso envolvendo simulações dos comportamentos térmicos e tensionais – termo-mecânicos – de pilares em CAD utilizando as propriedades determinadas experimentalmente e apresentadas no item 4.2.

No primeiro destes dois estudos, pôde-se notar claramente que o tipo de aditivo superplastificante escolhido para a produção do CAD pode influenciar decisivamente no comportamento termo-mecânico de uma estrutura típica onde o mesmo pode vir a ser utilizado. Foi apresentada uma comparação entre dois pilares em CAD com aditivo tipo policarboxilato e com aditivo tipo naftaleno em que o primeiro destes levou a estrutura a um possível quadro de fissuração de origem térmica (C.S. = 1,09; 1 < C.S. < 1,5) em seu centro, e o segundo, a um provável quadro de fissuração térmica (C.S. = 0,91; C.S. < 1).

O segundo estudo de caso buscou apresentar como o tipo de adição mineral escolhido pode atuar no comportamento termo-mecânico de estruturas utilizando CAD. Foram simulados dois pilares utilizando os CAD com sílica ativa e metacaulim, caracterizados na etapa anterior da pesquisa. Pôde-se observar que, embora os comportamentos térmico e tensional tenham sido muito parecidos para os dois pilares, os valores dos desenvolvimentos dos coeficientes de segurança dos mesmos se mostraram sensivelmente diferentes, valores mínimos de 1,30 e 1,15 para os centros das colunas em CAD com sílica ativa e metacaulim, respectivamente. Neste caso, o CAD com metacaulim, que apresentou comportamento térmico e tensional muito próximo do CAD com sílica ativa, desenvolveu menores C. S. devido a um ligeiro retardo no desenvolvimento de suas propriedades mecânicas durante as primeiras idades.

CAPÍTULO 5
CONCLUSÕES

5. CONCLUSÕES

Na presente dissertação, foi apresentado um programa experimental com o objetivo de melhor entender as influências de diferentes combinações de tipos de aditivos superplastificantes e de tipos de adições minerais no comportamento termo-mecânico de estruturas típicas de CAD.

Procedeu-se, após ensaios de caracterização física, mecânica e térmica dos CAD, a uma análise computacional utilizando-se do MEF para comparar os desenvolvimentos dos valores de tensões de tração de origem térmica aos desenvolvimentos dos valores das resistências à tração, nas seções médias de pilares típicos de CAD.

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões que podem ser traçadas a partir do programa experimental desenvolvido nesta pesquisa, e algumas sugestões que podem ser úteis para futuros trabalhos de pesquisa utilizando-se como linha de pesquisa aditivos superplastificantes, adições minerais e investigações termo-mecânicas em estruturas de CAD.

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo principal: verificar quais as combinações de aditivos e de adições minerais podem ser mais ou menos favoráveis ao se optar pela utilização de CAD em uma estrutura, do ponto de vista termo-mecânico. Foram estudadas várias propriedades físicas, mecânicas e térmicas de concretos, alternando-se aditivos superplastificantes tipo lignossulfonato, naftaleno e policarboxilato, com adição mineral de sílica ativa e metacaulim. Estes produtos mencionados estão à disposição no mercado nacional e têm regulamentação dada pela ABNT, no entanto guardam importantes variações em suas propriedades entre lotes de produção, condições de armazenagem e uso.

Desta forma, as conclusões apresentadas a seguir, estando ou não em consonância com a bibliografia referente ao assunto, não devem ser tomadas de forma absoluta, uma vez que estão relacionadas somente aos tipos, às quantidades, e às qualidades dos materiais e dos procedimentos de armazenagem, utilização e ensaios adotados nesta pesquisa. A representatividade dos resultados alcançados deve ser ratificada, ou melhor ainda apurada, com a realização de novos trabalhos que corroborem ou não os resultados obtidos.

Tendo este entendimento, com base nos ensaios experimentais de laboratório de materiais e nos resultados dos experimentos de simulação computacional realizados, podem-se tomar como conclusões desta pesquisa as apresentadas nos itens a seguir.

5.2. CONCLUSÃO GERAL

A conclusão geral desta pesquisa é de que: produzir estruturas em CAD utilizando-se diferentes combinações de tipos de aditivos superplastificantes e adições minerais pode levar as mesmas a apresentar diferentes comportamentos termo-mecânicos nas idades de endurecimento. Estes comportamentos diferenciados podem apresentar valores tão elevados que podem fazer a diferença entre a ocorrerência ou não de fissuração de origem térmica em uma estrutura em CAD, como discutido no item 4.3.2.

5.3. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

São conclusões específicas e fazem parte da conclusão geral da pesquisa os seguintes itens:

5.3.1. Conclusões Quanto à Utilização de Adições Minerais

Neste trabalho, foram produzidos CAD alternando-se o uso de sílica ativa e de metacaulim como adição mineral em substituição a 10% do volume de cimento. Podem ser enumeradas as seguintes influências dos tipos de adição mineral estudados:

a) Nas Propriedades Físicas

As propriedades físicas dos CAD estudados foram praticamente as mesmas, quando se utilizou sílica ativa ou metacaulim (ver item 4.2.2), com variações dentro dos intervalos comumente definidos pela variabilidade dos materiais e métodos de ensaio. Pode-se concluir que o tipo de adição mineral não teve influência marcante nas propriedades físicas dos concretos frescos: densidade, com intervalo máximo de variação de 13 kg/m^3 de concreto para os CAD com naftaleno; ar aprisionado, com intervalo máximo de variação de 0,4 % para os CAD com aditivo tipo policarboxilato; consistência, pelo abatimento de tronco de cone, com intervalo máximo de variação de 20 mm para os CAD com naftaleno; e temperatura, com intervalos máximos de variação de 1,2°C para os CAD com naftaleno.

b) Nas Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos CAD estudados, assim como as propriedades físicas, não apresentaram grandes variações em seus valores (item 4.2.3). As resistências à compressão apresentaram intervalos máximos de variação de 2,2 MPa para os CAD com policarboxilato; os módulos de elasticidade, intervalo máximo de variação de 3,2 GPa para os CAD com policarboxilato; os coeficientes de Poisson, intervalo máximo de 0,05 para os CAD com misturas de aditivos; e os módulos de ruptura, variação máxima de 1,0 MPa, para os CAD com aditivo base naftaleno; sendo todos estes valores correntes aos 28 dias. Durante a etapa de endurecimento, no entanto, as variações foram mais significativas, provavelmente pela hidratação mais acelerada ou retardada de cada uma das adições: sílica ativa ou metacaulim. Ainda, deve ser levada em conta o efeito diferenciado do mesmo tipo de aditivo superplastificante em adições minerais diferentes.

A respeito da fluência, pôde ser visto que o CAD utilizando metacaulim como adição mineral apresentou fluência específica ligeiramente superior ao CAD com sílica ativa, intervalo de variação não superior a $0{,}5\times10^{-6}$/MPa, como foi discutido no subitem e) do item 4.2.4.

c) Nas Propriedades Térmicas

O calor específico apresentou intervalo máximo de variação de 0,22 kJ/kg°C para os CAD com mistura de aditivos superplastificantes; a condutividade térmica, intervalo máximo de 56 W/m°C para os CAD com naftaleno, valores muito próximos. Os coeficientes de expansão térmica atingiram intervalo máximo de $2{,}1\times10^{-6}$/°C, para os CAD com aditivo tipo policarboxilato. Os CAD utilizando mistura de dois tipos de aditivo superplastificante

não apresentaram diferenças significativas (variações inferiores a $0{,}05\times10^{-6}$/°C). Com exceção dos valores dos coeficientes de expansão, que apresentaram valores sensivelmente elevados, os demais valores se enquadraram nos valores médios apresentados por Gambale (2005) numa compilação universal de valores de propriedades térmicas.

Nas elevações adiabáticas de temperatura, os CAD com sílica ativa mostraram ligeiro retardo no desprendimento de calor, durante as 12 horas iniciais de hidratação do material cimentício, em combinação com aditivos naftaleno e policarboxilato. Utilizada uma mistura dos dois tipos de aditivos, o CAD com metacaulim mostrou maior retardo durante todo o período de hidratação. Esta mistura foi também a única onde a temperatura final de elevação foi inferior ao término do ensaio para os concretos com metacaulim. Assim, o tipo de adição mineral foi decisivo no comportamento das elevações adiabáticas de temperatura dos CAD.

d) <u>No Comportamento Termo-Mecânico</u>

Os dois tipos de adição mineral não apresentaram diferenças significativas nos comportamentos térmicos das estruturas simuladas nesta pesquisa. Tanto a sílica ativa quanto o metacaulim puderam ser utilizados (em combinação ao aditivo superplastificante tipo policarboxilato) como adição mineral para produzir CAD com desempenhos térmicos muito parecidos, como pôde ser observado no segundo estudo de simulação computacional (apresentado no item 4.3.3).

Os coeficientes de segurança para a estrutura simulada em CAD com metacaulim, no entanto, mostraram valores inferiores aos da estrutura simulada com sílica ativa, uma vez que os desenvolvimentos de suas propriedades mecânicas (resistência à tração e módulo de ruptura) apresentaram sensíveis retardos durantes os primeiros dias de endurecimento.

5.3.2. Conclusões Quanto a Utilização de Aditivos Superplastificantes

Neste trabalho, foram produzidos CAD alternando-se o uso de aditivo superplastificante base lignossulfonato, base naftaleno, base policarboxilato e uma mistura destes dois últimos aditivos.

Os aditivos base lignossulfonato, como apresentado anteriormente, não foram capazes de repetir as produções dos CAD desenvolvidos no estudo piloto do programa experimental. Assim, os mesmos podem ser considerados como inadequados para a produção dos concretos em estudo, e por isso foram descartados.

Podem, assim, ser enumeradas as influências (detectadas nos experimentos da pesquisa) dos tipos de aditivo superplastificante analisados:

a) Nas Propriedades Físicas

A Tabela 4-1 apresentou as propriedades físicas estudadas, que foram praticamente as mesmas quando utilizando os dois tipos de aditivo ou a combinação dos mesmos. Pode-se concluir que o tipo de aditivo superplastificante não teve influência marcante nas propriedades físicas analisadas dos concretos frescos: densidade, com intervalo máximo de variação de 43 kg/m^3 e de 25 kg/m^3 para os CAD com sílica ativa e metacaulim, respectivamente; ar aprisionado, com intervalo máximo de 0,5% e 0,2% para os CAD com sílica ativa e metacaulim; abatimento de tronco de cone, com intervalo máximo de variação de 20 mm e 30 mm para os CAD com sílica ativa e metacaulim, nesta ordem; e temperatura, com intervalo máximo de variação de 1,3°C e 0,6°C, para os CAD com sílica ativa e metacaulim, na mesma ordem.

b) Nas Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas, assim como as propriedades físicas, também não apresentaram grandes variações em seus valores. As resistências à compressão, apresentaram intervalo máximo de variação de 6,2 MPa para os CAD com sílica ativa e 2,2 MPa para os CAD com metacaulim. Os módulos de elasticidade, intervalos máximos de 0,9 GPa para os CAD com sílica ativa e 4,2 GPa para os CAD com metacaulim. Os coeficientes de Poisson, variações máximas no intervalo de 0,03, para os CAD com sílica ativa e de 0,05 para os CAD com metacaulim. Os módulos de ruptura, intervalo máximo de variação de 0,9 MPa, para os CAD com sílica ativa e de 0,7 para os CAD com metacaulim; valores estes aos 28 dias. Durante a etapa de endurecimento, no entanto, as diferenças foram mais significativas, provavelmente pela hidratação mais acelerada ou retardada do material cimentício em contato com tipos de aditivos superplastificantes diferentes.

c) Nas Propriedades Térmicas do CAD

Ao se analisar os tipos de aditivo superplastificante, o calor específico apresentou intervalo máximo de variação de 0,10 kJ/kg°C para os CAD com sílica ativa e de 0,22 kJ/kg°C para os CAD com metacaulim. A condutividade térmica, porém, variou num intervalo máximo de 0,030 W/m°C para os CAD com sílica ativa e de 0,033 para os CAD com metacaulim, resultando em valores muito próximos. Os coeficientes de expansão térmica, obtiveram intervalo de variação de $2{,}25\times10^{-6}$/°C e $0{,}96\times10^{-6}$/°C, para os CAD com sílica ativa e

metacaulim, respectivamente. Com exceção dos valores dos coeficientes de expansão térmica, que apresentaram valores sensivelmente elevados para os CAD com sílica ativa, os demais valores se enquadraram nos valores médios apresentados por Gambale (2005), numa compilação universal de valores de propriedades térmicas para diversos tipos de concreto.

Nas elevações adiabáticas de temperatura, os CAD apresentaram certa ordem de retardo durante as primeiras 24 horas de hidratação que foi: o CAD com aditivo tipo naftaleno se hidratou mais rapidamente e o CAD com aditivo tipo policarboxilato menos rapidamente, para todos os tipos de adição mineral; a mistura dos dois tipos de aditivos apresentou um comportamento intermediário.

No entanto, a diferença encontrada na hidratação durante as 12 horas iniciais, em CAD produzidos com dois lotes diferentes do aditivo superplastificante tipo policarboxilato, apresentada na Figura 4-10, deixa concluir que o intervalo de variação para dois lotes diferentes do mesmo tipo de aditivo pode ser superior aos intervalos dentre tipos diferentes de aditivos superplastificantes.

d) <u>No Comportamento Termo-Mecânico</u>

No caso simulado no item 4.3.2, os dois tipos de aditivo superplastificante apresentaram sensíveis diferenças nos comportamentos térmicos das estruturas estudadas. Aditivos base policarboxilato e naftaleno foram utilizados (em combinação à adição mineral de sílica ativa) como superplastificantes para produzir uma estrutura em CAD com desempenhos térmicos mais ou menos retardados. De forma similar ao verificado nas elevações adiabáticas de temperatura – apresentadas no item anterior, o CAD com aditivo base policarboxilato mostrou retardo na hidratação do material cimentício nas primeiras 12 horas, quando comparado ao CAD com aditivo tipo naftaleno.

O coeficiente de segurança para a estrutura simulada em CAD com aditivo tipo naftaleno alcançou os menores valores ao final da simulação, C. S. = 0,91 < 1, possibilitando uma situação de provável fissuração. O CAD com policarboxilato, a despeito de obter valores maiores, 1 < C. S. = 1,09 < 1,5, apresentou um quadro geral de possível fissuração. No geral, todavia, o CAD com policarboxilato apresentou maiores valores de coeficiente de segurança durante todo o intervalo de simulação.

5.4. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido ao pequeno número de trabalhos científicos que enfocam o uso de combinações de aditivos superplastificantes e de adições minerais, algumas recomendações podem ser apresentadas neste âmbito para trabalhos futuros.

5.4.1. Utilização de Adições Minerais no CAD

Uma vez que a utilização de adição mineral[20] é praticamente um consenso entre 8 e 12% da massa de cimento na produção de concretos de alto desempenho, é necessária, somente, uma base de dados confiável de propriedades de concretos de alto desempenho em face dos diversos tipos de adições minerais passíveis da produção do mesmo. Um melhor entendimento de quais as propriedades físicas, mecânicas, térmicas, e de durabilidade que são alteradas significativamente (do ponto de vista termo-mecânico) com a mudança do tipo de adição mineral no intervalo de dosagens mencionado.

5.4.2. Utilização de Aditivos Superplastificantes no CAD

Da mesma forma que colocado no item anterior para as adições minerais, dados mais confiáveis quanto à representatividade dos tipos de aditivo superplastificante no comportamento termo-mecânico também são necessários. As faixas de utilização de aditivos superplastificantes (ou de misturas dos mesmos) para atingir determinados níveis ótimos das propriedades do material também não são bem conhecidas.

Misturas de dois tipos de aditivos superplastificantes também podem ser utilizadas para produzir concreto de alto desempenho. Assim, devem ser mais bem conhecidos os parâmetros que podem ser estudados no momento de se misturar aditivos superplastificantes no concreto, seja num mesmo momento de mistura, seja na forma de correção de abatimento.

5.4.3. Combinações Adições Minerais-Aditivos Superplastificantes

Se já não são encontrados muitos trabalhos envolvendo aditivos superplastificantes, são extremamente escassos os relatos técnicos e científicos de concretos com enfoque nas combinações aditivo superplastificante-adição mineral. Uma vez que este duo representa parcela significativa tanto do custo quanto do comportamento reológico do concreto de alto desempenho, estudos visando melhor definir os parâmetros de análise na definição das melhores combinações podem ser bastante práticos.

[20] Como já observado anteriormente, nesta pesquisa, trata-se como adição mineral aquelas que possuem atividade pozolânicas na hidratação do cimento Portland.

5.4.4. Modelagem Termo-Mecânica de Estruturas em CAD

A modelagem e a implementação de modelos computacionais na análise termo-mecânica de estruturas em concreto de alto desempenho podem ser consideravelmente resumidas. Modelos adaptados às faixas de propriedades típicas dos CAD e ao comportamento típico de estruturas em CAD podem, por exemplo, reduzir sensivelmente os tempos de análise e aumentar os níveis de precisão, uma vez que os algoritmos podem omitir algumas propriedades (pouco significativas) e adicionar outras (mais significativas), como o tipo de adição mineral, de aditivo superplastificante, ou a combinação dos mesmos ou a correção do abatimento da mistura.

5.4.5. Estudo Termo-Mecânico de Estruturas Típicas em CAD

Uma vez que todo o trabalho de pesquisa apresentado está voltado para o estudo termo-mecânico de estruturas em concreto de alto desempenho, pode-se destacar que mais trabalhos enfocando os campos térmico e tensional podem esclarecer melhor a utilização prática da pesquisa.

Trabalhos que envolvam análises paramétricas das propriedades aqui estudadas e discutidas na pesquisa e trabalhos que apresentem validações experimentais para o modelo de análise termo-mecânica serão muito úteis para ratificar ou retificar as conclusões da pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

6. BIBLIOGRAFIA

Neste capítulo, são apresentadas todas as referências realizadas ao longo do texto. Ainda, é apresentada a bibliografia consultada durante a pesquisa que, no entanto, não foi citada no texto da dissertação. A bibliografia de normas técnicas nacionais e internacionais, além dos procedimentos internos de Furnas Centrais Elétricas S. A. que foram utilizadas no programa experimental.

6.1. BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

Aïtcin, P-C. 1997. The art and science of high-performance concrete. Proceedings **of Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology**, Rome - Italy, pp. 107-126;

Aïtcin, P-C. 2000a. **Concreto de alto desempenho**. Tradução: Geraldo G. Serra. Ed. Pini. São Paulo. 667p;

Aïtcin, P-C. 2000b. Cement of yesterday and today: concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 30, N° 9, pp. 1349-1359;

Aïtcin, P-C. 2003. The durability characteristics of high-performance concrete: a review. **Cement**

and Concrete Composites, Elsevier, Vol. 25, N° 4-5, pp. 409-420;

Aïtcin, P-C; Jolicoeur, C; MacGregor, J. G. 1994. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, ACI, Vol. 16, N° 5, pp. 45-51;

Aïtcin, P-C; Neville, A. M. 1993. High-performance concrete demystified. **Concrete International**, ACI, Vol. 15, N° 1, pp. 21-26;

Aïtcin, P-C; Neville, A. M. 2003. How the water-cement ratio affects concrete strength. **Concrete International**, ACI, Vol. 25, N° 08, pp. 51-58;

Aïtcin, P-C; Sarkar, S. L. 1987. Retardation effect of superplasticizer on different cement fractions. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 17, N° 6, pp. 995-999;

Almeida, I. R. 1990. **Betões de alta resistência e durabilidade – Composição e características**. Lisboa. Tese (Doutorado). Universidade Técnica de Lisboa. 740 p;

Ambroise, J; Péra, J. 2003. Durability of concrete with high early-stage strength. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 257-270;

Andersen, P. J. 1986. The effect of superplasticizers and air-entraining agents on the zeta potential of cement particles. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 16, N° 6, pp. 931-940;

Andersen, P. J; Roy, D. M; Gaidis, J.M. 1986. The effect of superplasticizer molecular weight on its adsorption and dispersion of cement. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 16, N° 16, pp. 980-986;

Baetens, B; Schlangen, E; Van Beek, T; Roelfstra, P; Buen, J. 2002. Computer simulation for concrete temperature control. **Concrete International**, ACI, Vol. 24, N° 12, pp. 43-48;

Bai, J; Wild, S. 2002. Investigation of the temperature change and heat evolution of mortar incorporating PFA and metakaolin. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 24, N°2, pp. 201-209;

Barata, M. S. 1998. **Concreto de alto desempenho no Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego e adições de sílica ativa e metacaulim**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 153p;

Barton, R. B. 1989. Water-cement ratio is passé. **Concrete International**, ACI ,Vol. 11, N° 11, pp. 75-78;

Beek, A. van. 2000. **Dielectric properties of young concrete**. Tese (Doutorado). Delft Uniiversity. Delft. 178p;

Bentz, D. P. 1997. Three-dimensional computer simulation of Portland cement hydration and microstructure development. **Journal of the American Ceramic Society**, Vol. 80, N°, pp. 3-3(1);

Bentz, D. P. 2005. **CEMHYD3D: A three-dimensional cement hydration and microstructure**

development modeling package. Version 3.0. NISTIR 7232 Interagency Report, Technology Administration, U.S. Department of Commerce;

Bickley, J. A; Mitchell, D. 2001. State-of-the-art review of the durability, economics and constructability of high-performance concrete structures build in Canada: 1990-2000. **Cement Association of Canada Report**. Toronto, 114p;

Blask, O; Honert, D. 2003. The eletrostatic potential of highly filled cement suspensions containing various superplasticizers. **Proceedings of the 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 87-102;

Bogue, R. H. 1955. **The chemistry of portland cement**. Second edition. Reinhold Publishing Corporation. New York - NY, 793p;

Breugel, K. 1991. **Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials**. Tese (Doutorado). Delft Uniiversity. Delft. 308p;

Brooks, J. J; Megat Johari, M. A; Mazloom, M. 2000. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, Vol. 22, N° 4, pp. 293-301;

Buekett, J. 1998. International admixture standards. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, Vol. 20, N° 2-3, pp. 137-140;

Burnett, I. 1989. High-strength concrete in Melbourne, Australia. **Concrete International**, ACI, Vol. 11, N° 4, pp. 17-25;

Calmon, J. L. 1995. **Estudio térmico y tensional en estructuras masivas de hormigón. Aplicación a las presas durante la etapa de construcción**. Tese (Doutorado) – Universidade Politécnica da Catalunya, Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Barcelona. 711p;

Calmon, J. L; Murcia, J; Santos, S. B; Gambale, E; Silva, C. 2003. Numerical modelling of thermal stress of RCC dams using 2-D finite element method. Case study. **Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete**, V.1, pp. 569-577;

Calmon, J. L; Santos, S. B; Silva, C. J; Pettersen, P. 2002. Comportamento térmico de sistemas de vedação para a estação de verão em Vitória-ES.. In: **Encontro Nacional de Tecnologias de Ambientes Construídos** - ENTAC, Foz do Iguaçu;

Calmon, J. L; Veronez, M; Santos, S. B; Andrade, M. A. S. 2005a. A thermal behaviour study of HPC made with different kinds of superplasticizer admixtures. **FIB Symposium "Structural Concrete and Time"**, September 28-30, 2005, La Plata, Argentina;

Calmon, J. L; Veronez, M; Santos, S. B; Andrade, M. A. S. 2005b. Um estudo das propriedades físicas e mecânicas de concretos de alto desempenho utilizando diferentes tipos de aditivos superplastificantes. **Simpósio Ibero-Americano "O Betão nas Estruturas"**. July 5-7, 2005, Coimbra – Portugal;

Calmon, J. L; Veronez, M; Santos, S. B; Andrade, M. A. S. 2005c. A study on thermal properties of high-performance concretes with different types of superplasticizers. **International Conference on Concrete for Structures**. July 7-8, 2005, Coimbra – Portugal;

Campos, F. G. V. 2000. Análises e aplicações de concretos de alto desempenho no complexo penitenciário da grande Goiânia. In: **42° Congresso Brasileiro do Concreto**, Fortaleza. Anais em CD, 14p;

Carino, N. J; Lew, H. S. 1983. Model of mechanism for naphthalene series water-reducing agent. **ACI Journal**, ACI, Vol. 80, N° 3, pp. 177-182;

Cassa, J. C; Carneiro, A. P; Silva, A. S. R; Gomes, A. O; Mota, R. M; Costa, D. B; Carneiro, F. C; Pereira, G. S; Costa, A. D. 1999. Avaliação da compatibilidade físico-química entre cimento e aditivo superplastificante. In: **41° Congresso Brasileiro do Concreto**, Salvador. Anais em CD, 16p;

Collepardi, M. 1998. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, Vol. 20, N° 2-3, pp. 103-112;

Collepardi, M. 2003. Innovative concretes for civil engineering structures: SSC, HPC and RPC. **Proceedings of the Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering**, Milan - Italy, pp. 1-8;

Collepardi, M; Corradi, M; Valente, M. 1979. Low-slump-loss superplasticized concrete. **Superplasticizers in Concrete**, pp. 7-12, Transportation Research Board and National Academy of Sciences, Washinton D.C;

Collepardi, M; Monosi, S; Pauri, M; Biagini, S; Alverà, I. 1990. Superplasticized silica fume high-strength concretes. **Proceedings of the International RILEM Symposium on Admixtures for Concrete**, Barcelona - Spain, pp. 175-182;

Collepardi, S; Coppola, L; Trolli, R; Collepardi, M. 1999. Mechanisms of action of different superplasticizers for high performance concrete. **Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference on high-performance concrete: Performance and quality of concrete structurese**, ACI SP-186, Edited by D.Dal Molin, Gramado - Brasil, pp. 503-523;

Cook, J. E. 1989. 10,000 psi concrete. **Concrete International**, ACI, Vol. 11, N° 10, pp. 67-75;

Cook, W-D; Miao, B; Aïtcin, P-C; Mitchell, D. 1992. Thermal stresses in large high strength concrete columns. **ACI material Journal**, ACI, Vol.89, N°1, pp. 62-68;

Coppola, L; Zaffaroni, P; Collepardi, M. 1995. Development in chemical admixtures for high performance ready mixed concrete. **Proceedings of ERMCO '95, 11th European RMC Congress**, Istanbul - Turkey, pp. 357-368;

Cordeiro, G. C; Désir, J. M; Castro, A. M. 2001. Concreto de alto desempenho produzido com materiais naturais de Campos dos Goytacazes. In: **43° Congresso Brasileiro do Concreto**, Foz do Iguaçu. Anais em CD, 14p;

Dal Molin, D. C. C. 1995. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos**

de alta resistência com e sem adições de Microssílica. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 200p;

De Larrard, F. 1990. A Method for proportioning high-strength concrete mixtures. **Cement, Concrete and Aggregates**. ASCE, Vol. 12, N° 1, pp 47-52;

Detwiler, G. 1992. High-strength silica fume concrete – Chicago style. **Concrete International**, ACI, Vol. 14, N° 10, pp. 32-36;

Dezhen, G; Dayu, X; Zhang, L. 1982. Model of mechanism for naphthalene series water-reducing agent. **ACI Journal**, ACI, Vol. 79, N° 5, pp. 378-386;

Diamond, S; Struble, L. J. 1987. Interaction between naphthalene sulfonate and silica fume in Portland cement pastes. In: **Materials Research Society Fall Meeting**, Boston, 19p;

Dodson, V. H. 1990. **Concrete admixtures** (VNR Structural Engineering Series). 1st edition, New York, 208p;

Durning, T. A; Hicks, M. C. 1991. Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemicals. **Concrete International**, ACI, Vol. 13, N° 3, pp. 42-48;

Duval, R; Kadri, E. H; Bigas, J. P; Luhowiak, W. 2000. Rheology of high-performance concrete effect of superplasticizer and silica fume. **Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-195, Edited by V. M. Malhotra, Nice - France, pp. 143-161;

Epusp. 2004. **Estudo da influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**. Relatório de Pesquisa. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 65p;

Equipe de Furnas. 1997. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e propriedades**. Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico. Editor Walton Pacelli de Andrade. Ed. Pini. São Paulo. 837p;

Ern, T. 2003. **Estudo das propriedades térmicas do concreto de média e alta resistência. Contribuição a critérios de projeto e construção**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 107p;

Ferraris, C. F; Obla, K. H; Hill, R. 2001. The influence of mineral admixture on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 31, N° 2, pp. 245-255;

Flatt, R. J. 1999. **Interparticle forces and superplasticizers in cement suspensions**. Tese (Doutorado). École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. 301p;

Flatt, R. J. 2001. **Polymeric dispersants in concrete**. In: Polymers in Particulate Systems – Properties and Applications. Chapter 9. Editors: V. A. Hackley, P. Somasundaran and J. A. Lewis. Marcel Dekker, Inc. New York, NYL, pp.247-294;

Foissy, A; Pierre, A. 1990. Les mécanismes d'action des fluidifiants. **Ciments, Betons, Plâtres, Chaux**, N° 782, pp. 18-19;

Frías, M; Rojas, M. I. S; Cabrera, J. 2000. The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars. **Cement and Concrete Research**. Vol. 30, pp. 209-216;

Gambale, E. A. 2005. **Análise estatistica dos resultados de propriedades térmicas do concreto obtidos em ensaios**. Submetido ao 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Não publicado;

Goldman, A; Bentur, A. 1994. Properties of cementitious systems containing silica fume or nonreactive microfillers. **Advanced Cement Based Materials**, Elsevier, Vol. 1, N° 5, pp. 209-215;

Gomes, P. C. C; Lima, F. B; Uchôa, S. B. B. 2000a. Influência dos materiais do estado de Alagoas nas propriedades do concreto de alto desempenho. In: **40° Congresso Brasileiro do Concreto**, Fortaleza. Anais em CD, 14p;

Gomes, P. C. C; Gettu, R; Roncero, J; Agulló, L. 2000b. Estudo dos fatores que divergem a dosagem de saturação do superplastificante da argamassa e do concreto do sistema pasta. **Engenharia Ciência e Tecnologia**. Ano 3. Vol. 16, pp. 3-15;

Gonçalves, A; Bettencourt-Ribeiro, A. 2000. Comparative study of the influence of superplasticizers and superplasticizer/plasticizer blends on slump-loss. **Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-195, Edited by V. M. Malhotra, Nice - France, pp. 321-333;

Groves, G. W. 1981. Microcrystalline calcium hydroxide in Portland cement pastes of low water-cement ratio. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 11, N° 5-6, pp. 713-718;

Guerini, A; Filiâtre, C; Canevet, C; Mosquet, M; Foissy, A. 2003. Durability of concrete made with different chemical admixtures under marine splash environment. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 573-582;

Gustafsson, J; Reknes, K. 2000. Adsorption and dispersing properties of lignosulfonates in model suspension and cement paste. **Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-195, Edited by V. M. Malhotra, Nice - France, pp. 181-193;

Hanehara, S; Yamada, K. 1999. Interactions between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 29, N° 8, pp. 1159-1165;

Hanna, E; Luke, K; Perraton, D; Aïtcin, P-C. 1989. Rheological behavior of portland cement in the presence of a superplasticizer. In: **Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete**. Edited by M. Malhotra, 665p;

Hartmann, C. 2002. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados**

a concretos de cimento portland. São Paulo. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 210p;

Hartmann, C. T; Helene, P. R. L. 2003. Recorde mundial em concreto de alto desempenho colorido. In: **45° Congresso Brasileiro do Concreto**, Vitória. Anais em CD, 14p;

Helene, P. R. L; Hartmann, C. 2003. HPCC in Brazilian office tower. **Concrete International**, ACI, Vol. 25, N° 12, pp. 64-68;

Hover, K. C. 1998. Concrete mixture proportioning with water-reducing admixtures to enhance durability: a quantitative model. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, Vol. 20, N° 2-3, pp. 113-119;

Hover, K; Stokes, T. 1995. Making 'cents' out of the water-cement ratio. **Concrete International**, ACI, Vol. 17, N° 5, pp. 52-54;

Hu, C; Larrard, F. 1996. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 26, N° 2, 283-294;

Huo, X. S; Al-Omaishi, N; Tadros, M. K. 2001. Creep, shrinkage, and modulus of elasticity of high-performance concrete. **ACI Materials Journal**, ACI, Vol. 98, N° 6, pp. 440-449;

Ibracon, 2001. Apresentação dos trabalhos do 43º Congresso Brasileiro do Concreto. **Instituto Brasileiro do Concreto**. Anais em CD. Foz do Iguaçu;

Ibracon, 2002. Apresentação dos trabalhos do 44º Congresso Brasileiro do Concreto. **Instituto Brasileiro do Concreto**. Anais em CD. Belo Horizonte;

Ibracon, 2003. Apresentação dos trabalhos do 45º Congresso Brasileiro do Concreto. **Instituto Brasileiro do Concreto**. Anais em CD. Vitória;

Ibracon, 2004. Apresentação dos trabalhos do 46º Congresso Brasileiro do Concreto. **Instituto Brasileiro do Concreto**. Anais em CD. Florianópolis;

Ibracon, 2005. Apresentação dos trabalhos do 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Instituto Brasileiro do Concreto**. Anais em CD. Olinda;

Isaia, G. C. 1995. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: Um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 200p;

Isaia, G. C; Sarkis, P; Vaguetti, M. 1997. Uma experiência de edificação em CAD em Santa Maria-RS. In: **39° REIBRAC – Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto**, São Paulo, v.2, p. 579-594;

Jawed, I; Skalny, J; Young, J.F. 1983. Hydration of Portland cement. In: **Structure and Performance of Cements**. Editado por P. Bames. Applied Science Publishers, Barking, Essex, England, pp. 237-317;

Johansen, V. C; Klemm, W. A; Taylor, P. C. 2002. Why chemistry matters in concrete? **Concrete International**, ACI, Vol. 24, N° 3, pp. 84-89;

Jolicoeur, C; Nkinamubanzi, P. P; Simard, M. A; Piotte, M. 1994. Progress in understanding the

functional properties of superplasticizers in fresh concrete. **Proceedings of the Fourth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-148, Edited by V. M. Malhotra, Montreal - Canada, pp. 63-88;

Jolicoeur, C; Simard, M-A. 1998. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, Vol. 20, N° 2-3, pp. 87-101;

Juvas, K; Käppi, A; Salo, K; Nordenswan, E. 2002. The effects of cement variations on concrete workability. **Nordic Concrete Research**. Publication N° 26. Parainen, Finland. 8p;

Kaszyńska, M. 2002. Early age properties of high-strength/high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, Vol. 24, N° 2, pp. 253-261;

Khan, A. A; Cook, W. D; Mitchell, D. 1998. Thermal properties and transient thermal analysis of structural members during hydration. **ACI Materials Journal**, ACI, Vol. 95, N° 3, pp. 293-303;

Kim, B-G; Jiang, S; Jolicoeur, C; Aïtcin, P-C. 2000. The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 30, N° 6, pp. 887-893;

Kosmatka, S. H. 1991. In defense of the water-cement ratio. **Concrete International**, ACI, Vol. 13, N° 9, pp. 65-69;

Lacerda, C. S; Helene, P. R. L. 2003. Estudo da resistência mecânica em concretos de alto desempenho com metacaulim. In: **45° Congresso Brasileiro do Concreto**, Vitória. Anais em CD, 20p;

Lachemi, M; Aïtcin, P-C. 1997. Influence of ambient and fresh concrete temperatures on the maximum temperature and thermal gradient in a high-performance concrete structure. **ACI Materials Journal**, ACI, Vol. 94, N° 2, pp. 102-110;

Lea, F. M. 1971. **The chemistry of cement and concrete**. Third Edition. Chemical Publishing Company, Inc. New York - NY, 727p;

Leidhodt, C; Nmai, C; Schlagbaum, A. 2000. Effectiveness of a polycarboxylate-based high range water-reducer in a precast/prestressed operation. **Proceedings of the PCI/FHWA/FIB International Symposium on High Performance Concrete**, Florida – USA, pp. 24-32;

Lessard, M; Dallaire, E; Blouin, D; Aïtcin, P-C. 1994. High-performance concrete speeds reconstruction for McDonald's. **Concrete International**, ACI, Vol. 16, N° 9, pp. 47-50;

Lura, P. 2000. **Autogenous deformation and internal curing of concrete**. Tese (Doutorado). Delft Uniiversity. Delft. 180p;

Macedo, D. C. B; Paula, H. M; Mendes, M. J. A; Carvalho, M. T. M; Geyer, A. L. B. 2004. Concreto de alto desempenho colorido com materiais de Goiânia-Goiás. In: **46° Congresso Brasileiro do Concreto**, Florianópolis. Anais em CD, pp. II.528-II.541;

Maekawa, K; Chaube, R; Kishi, T. 1999. **Modelling of concrete performance**. London. E & FN SPON. 308p.

Majorana, C. E; Zavarise, G; Borsetto, M; Giuseppetti, M. 1990. Nonlinear analysis of thermal stresses in mass concrete casting. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 20, N° 4, pp. 559-578;

Malhotra, V. M. 1997. Innovative applications of superplasticizers in concrete - A review. **Proceedings of Mario Collepardi symposium on advances in concrete science and technology**, pp. 271-314. Rome, Italy;

Malhotra, V. M. 1999. Making concrete "greener" with fly ash. **Concrete International**, ACI, Vol. 21, N° 5, pp. 61-66;

Malhotra, V. M; Malanka, D. 1978. Performance of superplasticizers in concrete: Laboratory investigation. Part I. **CANMET/ACI International Symposium on the Use of Superplasticizers in Concrete**, 1., Ottawa. Proceedings, ACI, pp. 209-243;

Malhotra, V. M; Mehta, P. K. 1996. Pozzolanic and cementitious materials. **Advanced Concrete Technology Program**, CANMET, Ottawa, 191p;

Marelli, L. M; Libório, J. B. L; Melo, A. B. 2002. A tecnologia dos concretos de alto desempenho aplicada na execução de reatores anaeróbios (UASB) utilizados para tratamento de esgoto doméstico. In: **41° Congresso Brasileiro do Concreto**, Salvador. Anais em CD, 16p;

Massazza, F; Costa, V. B 1980. Effect of superplasticizer on the CA hydration. In: **7th International Conference on Chemistry of Cement**, Vol. 4, Paris, pp.529-534;

Mather, B. 2001. How much w in w/cm? **Concrete International**, ACI, Vol. 23, N° 12, pp. 60-62;

Mather, B; Hime, W. G. 2002. Amount of water required for complete hydration of Portland cement. **Concrete International**, ACI, Vol. 24, N° 6, pp. 56-58;

Mehta, P. K. 1997. Bringing the concrete industry into a new era of sustainable development. In: **Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology**, Rome - Italy, pp. 49-67;

Mehta, P. K. 1998. Role of the pozzolanic and cementitious materials in sustainable development of the concrete industry. In: **Fly Ash, Slag, Silica Fume and Other Natural Pozzolans**, SP-178, ACI, pp. 1-20;

Mehta, P. K. 1999. Concrete technology for sustainable development. **Concrete International**, ACI, Vol. 21, N° 11, pp. 47-53;

Mehta, P. K; Monteiro, P. J. M. 1994. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Tradução: vários. Ed. Pini. São Paulo. 573p;

Mendes, S. E. S; Filho, J. M; Paulon, V. A. 2003. Concretos de alto desempenho (CAD) produzidos com agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. In: **45° Congresso Brasileiro do Concreto**, Vitória. Anais em CD, 16p;

Mesbah, H. A; Lachemi, M; Aïtcin, P-C. 2002. Determination of elastic properties of high-

performance concrete at early ages. **ACI Materials Journal**, ACI, Vol. 99, N° 1, pp. 37-41;

Miao, B; Chaallal, O; Perraton, D; Aïtcin, P-C. 1993. On-site early-age monitoring of high-performance concrete columns. **ACI Materials Journal**, ACI, Vol. 90, N° 5, pp. 415-420;

Mikanovic, N; Simard, M-A; Jolicoeur, C, C. 2000. Interaction between poly-napthalene sulfonate-type superplasticizers and cements during initial hydration. **Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-195, Edited by V. M. Malhotra, Nice - France, pp. 561-583;

Mohammed, T. U; Hamada, H; Yamaji, T. 2003. Durability of concrete made with different chemical admixtures under marine splash environment. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 17-36;

Moreno, J. 1998. High-performance concrete: economic considerations. **Concrete International**, ACI, Vol. 20, N° 3, pp.0;

Mounanga, P; Loukili, A; Khelidj, A. 2003. Durability of concrete made with different chemical admixtures under marine splash environment. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 513-528;

Nagy, A. 2002. Parameter study of thermal cracking in HPC and NPC structures. **Nordic Concrete Research**. Publication N° 26. Jönköping, Sweden. 13p;

Nakajima, Y; Goto, T; Yamada, K. 2003. Cement characteristics affecting the performance of β-naphthalene sulfonate superplasticizer. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 311-326;

Nakanishi, H; Tamaki, S; Yaguchi, K; Yamada, K; Kinoshita, M; Ishimori, M; Okazawa, S. 2003. Performance of a multifunctional and multipurpose superplasticizer for concrete. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 327-342;

Nawa, T; Eguchi, H; Fukaya, Y. 1989. Effect of alkali sulfate on the rhaological behaviour of cement paste containing a superplasticizer. **Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-119, Edited by V. M. Malhotra, Ottawa - Canada, pp. 405-424;

Nehdi, M; Mindess, S; Aïtcin, P-C. 1998. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 28, N° 5, 687-697;

Neville, A. M. 1994. Cementitious materials – a different viewpoint. **Concrete International**, ACI, Vol. 16, N° 7, pp. 33-34;

Neville, A. M. 1997. **Propriedades do concreto**. Segunda edição. Tradução: Salvador E. Giamusso. Ed. Pini. São Paulo. 828p;

Neville, A. M. 2000. Water and concrete: A love-hate relationship. **Concrete International**, ACI, Vol. 22, N° 12, pp. 34-38;

Nilsen, A. U; Monteiro, P. J. M. 1993. Concrete: a three phase material**. Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 23, N° 1, pp. 147-151;

Nilsson, M. 2000. **Thermal cracking of young concrete: partial coefficients, restrain effects and influence of casting joints**. Licentiate Thesis. Lulea University of Technology. 289p.;

Nilsson, M. 2003. **Restraint factors and partial coefficients for crack risk analyses of early age concrete structures**. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. 185p.;

Nmei, K; Schlagbaum, T; Violetta, B. 1998. A history of mid-range water-reducing admixtures. **Concrete International**, ACI, Vol. 20, N° 4, pp. 45-50;

Ohta, A; Sugiyama, T; Uomoto, T. 2000. Study of dispersing effects of polycarboxylate-based dispersant on fine particles. **Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-195, Edited by V. M. Malhotra, Nice - France, pp. 211-227;

Owens, P. L. 1989a. Water and its role in concrete – Part 1 of 2. **Concrete International**, ACI, Vol. 11, N° 11, pp. 68-74;

Owens, P. L. 1989b. Water and its role in concrete – Part 2 of 2. **Concrete International**, ACI, Vol. 11, N° 12, pp. 68-71;

Paillere, A. M; Serrano, J. J; Grimaldi, M. 1990. Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilite optimum des betons a hautes performances avec et sans fumees de silice. **Proceedings of the International RILEM Symposium: Admixtures for Concrete Improvement of Properties**. Edited by E. Vázquez. Ed. Chapman and Hall, Barcelona - Spain, pp. 63-79;

Pamplona, A. D. G. 2000. A utilização do concreto de alto desempenho na construção do porto do Pecém. In: **42° Congresso Brasileiro do Concreto**, Fortaleza. Anais em CD, 10p;

Papadakis, V. G. 1999. Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 29, N° 1, pp. 79-86;

Paulon, V. A. 1997. **O fenômeno térmico no concreto**. Associação Brasileira do Cimento Portland. São Paulo - SP. 42p;

Peiwei, G; Min, D; Naiqian. 2001. The influence of the superplasticizer and superfine mineral powder on the flexibility, strength and durability of HPC. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 31, N° 5, pp. 703-706;

Persson, B. 1998. Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 28, N° 7, pp. 1023-1036;

Persson, B. 2002. Eight-year exploration of shrinkage in high-performance concrete. **Cement and**

Concrete Research, Pergamon, Vol. 32, N° 8, pp. 1229-1237;

Petrucci, E.G.R. 1994. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre, Ed. Globo, 198p;

Phelan, W. S. 1998. Admixtures and HPC: a happy marriage. **Concrete International**, ACI, Vol. 20, N° 4, pp. 27-30;

Piccoli, G. M. 1998. Concreto de alto desempenho: exemplo de aplicação em obra portuária. In: **40° Congresso Brasileiro do Concreto**, Rio de Janeiro. Anais em CD, 12p;

Pigeon, M; Gagné, R; Aïtcin, P-C; Banthia, N. 1991. Freezing and thawing tests of high-strength concretes. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 21, N° 5, pp. 844-852;

Pinho, J. R. S; Júnior, U. S. D; Neto, B. B. P; Barata, M. S. 2004. Comparação de dois métodos de dosagem de CAD para materiais da região de Belém. In: **46° Congresso Brasileiro do Concreto**, Florianópolis. Anais em CD, pp. II.443-II.458;

Pinto, R. C. A. 1997. **The effect of curing temperatures on the development of mechanical properties of fresh and hardened high-strength silica fume mixtures – A maturity approach**. PhD dissertation, Cornell University, Ithaca, NY;

Pinto, R. O; Geyer, A. L. B; Lopes, A. N. M. 2003. Aplicação dos métodos de dosagem específicos para concretos de alto desempenho. In: **45° Congresso Brasileiro do Concreto**, Vitória. Anais em CD, 16p;

Plank, J; Hirsch, C. 2003. Superplasticizer adsorption on syntetic ettringite. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 282-298;

Price, W. H. 1951. Factors influencing concrete strength. **ACI Journal**, ACI, Vol. 47, N° 6, pp. 417-432.

Prince, W; Edwards-Lajnef, M; Aïtcin, P-C. 2002. Interaction between ettringite and a polynaphthalene sulfonate superplasticizer in a cementitious paste. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 32, N° 1, pp. 79-85;

Prince, W; Espagne, M; Aïtcin, P-C. 2003. Ettringite formation: a crucial step in cement superplasticizer compatibility. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 33, N° 5, pp. 635-641;

Ramachandran, V. S. 1983. Adsorption and hydration behavior of tricalcium aluminate-water and tricalcium aluminate-gypsum-water systems in the presence of superplasticizers. **ACI Journal**, ACI, Vol. 80, N° 2, pp. 235-241;

Ramachandran, V. S. 1995. **Concrete admixtures handbook - Properties, science, and technology**, Second edition, Noyes Publications, New Jersey, 1153p;

Ramachandran V. S; Malhotra, V. M; Jolicoeur, C; Spiratos, N. 1998. **Superplasticizers: properties and applications in concrete**. Canada: Materials Technology Laboratory, CANMET. 403p;

Ramachandran, V. S; Malhotra, V. M. 1998. Superplasticizers. In: **Concrete Admixture Handbook: Properties science and technology**. Edited by Ramachandran, V.S. Canada: Noyes Publication, pp. 410-517;

Ramezanianpour, A. A; Sivasundaram, V; Malhotra, V. M. 1995. Superplasticizers: their effect on the strength properties of concrete. **Concrete International**, ACI, Vol. 17, N° 4, pp. 30-35;

Regis, P. A; Oliveira, R. A; Nunes, N. S; Araújo, E. R; Carneiro, A. M. P. 2003. Resistências à compressão e à tração de um concreto de alta resistência ao longo do tempo. In: **45° Congresso Brasileiro do Concreto**, Vitória. Anais em CD, 15p;

Ribeiro, E. M; Almeida, I. R; Prudêncio, W. J. 2003. Pesquisa de agregados graúdos do Rio de Janeiro para a produção de concretos de alto desempenho. In: **45° Congresso Brasileiro do Concreto**, Vitória. Anais em CD, 12p;

RILEM Technical Reports. 1988. Final Report: Silicious by-products for use in concrete. **Materials and Structures**, Vol. 21, N° 121, pp. 69-80;

Rixom, M. R. 1998. The economic aspects of admixture use. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, Vol. 20, N° 2-3, pp. 141-147;

Rixom, M. R; Mailvaganam, N. P. 1999. **Chemical admixtures for concrete**. Third Edition. E & FN Spon. New York. 437p;

Roncero, J. 2000. **Effect of the superplasticizers on the behaviour of concrete in the fresh and hardened states: implications for high-performance concretes**. Tese (Doutorado). Universidade Politécnica da Catalunya. Barcelona. 189p;

Roncero, J; Valls, S; Gettu, R. 2000. Study of the influence of superplasticizers on the hydration of cement paste using nuclear magnetic resonance and X-ray diffraction techniques. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 32, N° 1, pp. 103-108;

Ronneberg, H. 1989. Use of chemical admixtures in concrete platforms. In: **Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete**. Edited by M. Malhotra, 665p;

Roy, D. M; Arjunan, P; Silsbee, M. R. 2001. Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 31, N° 12, pp. 1809-1813;

Russel, H. G. 1999. ACI defines high-performance concrete. **Concrete International**, ACI, Vol. 21, N° 2, pp. 56-57;

Saad, M; Andrade, W. P; Paulon, V. A. 1982. Properties of mass concrete containing an active pozzolan made from clay. **Concrete International**. pp. 59-65;

Saada, R; Barrioulet, M; Legrand, C. 1990. Influence dês fluidifiants sur lês caracteristiques rheologiques dês patês de ciments fillerises. **Proceedings of the International RILEM Symposium: Admixtures for Concrete Improvement of Properties**. Edited by E. Vázquez. Ed. Chapman and Hall, pp. 80-93. Barcelona, Spain;

Sabir, B. B; Wild, S; Bai, J. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a

review. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, Vol. 23, N° 6, pp. 441-454;

Santos, S. B. 2004. **Uma contribuição ao estudo do comportamento termomecânico de estruturas maciças de concreto. Modelagem viscoelástica linear e aplicações**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. 270p;

Santos, S. B; Gambale, E. A.; Andrade, M. A. S; Bittencourt, R. M. 2003. **Validação dos resultados do cálculo das tensões instaladas de origem térmica no concreto massa, com resultados reais**. In: Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo.

Schell, H. C; Konecny, J. 2003. Ensuring the quality of HPC. **Concrete International**, ACI, Vol. 25, N° 07, pp. 79-84;

Schindler, A. K. 2004. Effect of temperature on hydration of cementitious materials. **ACI Materials Journal**, ACI, Vol. 101, N° 1, pp. 72-81;

Schober, I; Mäder, U. 2003. Compatibility of polycarboxylate superplasticizers with cements and cementitious blends. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 453-468;

Selna, D; Monteiro, P. J. M. 2001. Cathedral of Our Lady of the Angels. **Concrete International**, ACI, Vol. 23, N° 11, pp. 27-33;

Shilstone, J. M. 1991. The water-cement ratio – Which one and where do we go? **Concrete International**, ACI, Vol. 13, N° 9, pp. 64, 66-69;

Sicker, A. 1999. The influence of superplasticizer on the autogenous shrinkage of high-performance concrete. **Leipzig Annual Civil Engineering Report** (LACER) N° 4. Institut für Massivbau und Baustoffechnologie. Leipzig - Germany, 5p;

Silva, C. J. 2002. **Comportamento de estruturas metálicas e mistas em situação de incêndio – Modelagem e aplicações**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. 191p;

Silva, A. S. R; Azevedo, M. T; Mota, R. M; D'Almeida, C. R; Medici, C. E. S. 2003. Estudo para obtenção e produção de concretos de alta resistência com uso de sílica-ativa em Salvador-BA. In: **45° Congresso Brasileiro do Concreto**, Vitória. Anais em CD, 15p;

Silva, W. R; Repette, W; Kraus, Z. 2005. Dosagem de concreto auto-adensável (CAA) com base no comportamento das argamassas - Otimização da definição do teor de aditivo superplastificante. **VI Simpósio Epusp sobre Estruturas de Concreto Brasileiro do Concreto**, 2-7 de Setembro de 2005, São Paulo – Brazil;

Smith, G. J; Rad, F. N. 1989. Economic advantages of high-strength concretes in columns. **Concrete International**, ACI, Vol. 11, N° 4, pp. 37-43;

Souza, P. S. L. 2003. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 203p;

Spiratos, N; Jolicoeur, C. 2000. Trends in concrete chemical admixtures for the 21st century. **Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-195, Edited by V. M. Malhotra, Nice - France, pp. 17-36;

Stein, H. N; Stevels, J. M. 1964. Influence of silica on the hydration of $3CaO.SiO_2$. **Journal of Applied Chemistry**. Vol. 14, pp. 338-346;

Sugamata, T; Sugiyama, T; Ohta, A. 2003. The effect of a new high-range water-reducing agent on the improvement of rheological properties. **Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-217, Edited by V. M. Malhotra, Berlin - Germany, pp. 343-360;

Taylor, H. F. W. 1967. **La quimica de los cementos**. Enciclopedia de la Química Industrial. Traduzido por F. Romero Rossi. URMO, S. A. Ediciones. Tomo I. Bilbao. 512p (Em espanhol);

Taylor, H. F. W. 1978. **La quimica de los cementos**. Enciclopedia de la Química Industrial. Traduzido por J. A. Fernandez. Revisado por M. A. Montemayor. URMO, S. A. Ediciones. Tomo II. Bilbao. 469p (Em espanhol);

Tognon, G; Cangiano, S. 1982. Air contained in superplasticized concretes. **ACI Journal**, ACI, Vol. 79, N° 4, pp. 350-354;

Torresan, I; Khurana, R. 1998. New superplasticizers based on modified melamine polymer. **Proceedings of the Fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium on Concrete Technology**, ACI SP-179, Edited by V. M. Malhotra, Tokushima - Japan pp. 235-253;

Tseng, Y. C; Wu, W. L; Huang, H. L; Wang, C. T; Hsu, K. C. 2000. New carboxylic acid-based superplasticizer for high-performance concrete. **Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete**, ACI SP-195, Edited by V. M. Malhotra, Nice - France, pp. 401-413;

Uchikawa, H; Hanehara, S; Sawaki, D. 1997. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 27, N° 1, pp. 37-50;

Uchikawa, H; Sawaki, D; Hanehara, S. 1995. Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 25, N° 2, pp. 353-364;

Wang, C; Dilger, W. H. 1995. Modeling of the development of heat of hydration in high-performance concrete. **Proceedings of the Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology**, ACI SP-154, Edited by V. M. Malhotra, pp. 473-488. Las Vegas, USA;

Williams, D. A; Saak, A. W; Jennings, H. M. 1999. The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 29, N° 9, 1491-1496;

Wu, Z; Young,J. F. 1984. The ydration of tricalcium silicate in presence of colloidal silica. **Journal of Material Science**. Vol. 19, pp. 3477-3486;

Yamada, K; Takahashi, T; Hanehara, S; Matsuhisa, M. 2000. Effects of the quimical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. **Cement and Concrete Research**. Pergamon, Vol. 30, N° 2, 197-207;

Yoshioka, K; Tazawa, E-I; Kawai, K; Enohata, T. 2002. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 32, N° 10, pp. 1507-1513;

Zhang, M-H; Bremner, T. W; Malhotra, V. M. 2003. The effect of Portland cement type on performance. **Concrete International**, ACI, Vol. 25, N° 1, pp. 87-94;

Zhang, M-H; Malhotra, V. M. 1995. Characteristics of thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, N° 8, pp. 1713-1725;

Zhang, Y; Sun, W; Liu, S. 2002. Study on the hydration heat of binder paste in high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 32, N° 9, 1483-1488.

Zia, P; Ahmad, S; Leming, M. 1997. **High-performance concretes**. FHWA-RD-97-030, Federal Highway Administration;

6.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ACI: ACI Committee N° 207.2R-95. 1995. Effect of restraint, volume change, and reinforcement on cracking of mass concrete. (Reapproved 2002). **American Concrete Institute.** Detroit - Michigan. 26p;

ACI: ACI Committee N° 209R-92. 1992. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures. (Reapproved 1997). **American Concrete Institute.** Detroit - Michigan. 47p;

ACI: ACI Committee N° 228.2R-98. 1998. Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. **American Concrete Institute.** Detroit - Michigan. 62p;

Andriolo, F.R., Skwarczynski, T.M. 1989. **Concreto pré-refrigerado no Brasil**. Uma evolução com mais de 20 anos. Ed. Graphos. São Paulo. 104p;

Malhotra, V. M. 1994. **Proceedings of the fourth CANMET/ACI International Conference on superplasticizers and others chemical admixtures in concrete**. ACI SP-148 (Editor). Detroit, MI. 455p;

Malhotra, V. M. 1997. **Proceedings of the fifth CANMET/ACI International Conference on superplasticizers and others chemical admixtures in concrete**. ACI SP-173 (Editor). Detroit, MI. 1022p;

Malhotra, V. M. 2000. **Proceedings of the sixth CANMET/ACI International Conference on superplasticizers and others chemical admixtures in concrete**. ACI SP-195 (Editor).

Detroit, MI. 642p;

Malhotra, V. M. 2003. **Proceedings of the seventh CANMET/ACI International Conference on superplasticizers and others chemical admixtures in concrete**. ACI SP-217 (Editor). Detroit, MI. 626p;

Meeks, K. W; Carino, N. J. 1999. **Curing of high-performance concrete: report of the state-of-the-art**. Building and Fire Research Laboratory of National Institute of Standards and Technology (NIST). NISTIR 6295. Maryland, 191p;

RILEM. 1990. Admixtures for concrete improvement of properties. **Proceedings 5. Proceedings of the International RILEM Symposium**. Edited by E. Vázquez. Ed. Chapman and Hall. Barcelona. 586p;

Veronez, M. 2004. **Influência do tipo de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termotensional dos concretos de alto desempenho**. Projeto de Pesquisa (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. 71p.

6.3. BIBLIOGRAFIA DE NORMAS

American Society for Testing Materials (ASTM). 1991. Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method. ASTM C 231-91. **Annual Book of ASTM Standards,** ASTM, West Conshohocken, Pa;

_____. 1994. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. ASTM C 469-94. **Annual Book of ASTM Standards**, ASTM, West Conshohocken, Pa;

_____. 1998. Practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM C 1074-98. **Annual Book of ASTM Standards**, ASTM, West Conshohocken, Pa;

_____. 2003. Standard specification for chemical admixtures for use in producing flowing concrete. ASTM C1017/C1017M-03. **Annual Book of ASTM Standards**, ASTM, West Conshohocken, Pa;

_____. 2003. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. ASTM C618-03. **Annual Book of ASTM Standards,** ASTM, West Conshohocken, Pa;

_____. 2004. Standard Specification for silica fume used in cementitious mixtures. ASTM C1240-04. **Annual Book of ASTM Standards,** ASTM, West Conshohocken, Pa;

_____. 2004. Standard test method for specific surface area of alumina or quartz by nitrogen adsorption. ASTM C1069-86. **Annual Book of ASTM Standards,** ASTM, West Conshohocken, Pa;

_____. 2004. Test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete. 2. Properties. ASTM C1069-86. **Annual Book of ASTM Standards,** ASTM, West Conshohocken, Pa;

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregados**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983a;

_____. 1983b. **Calda e cimento para injeção**. NBR 7681. Rio de Janeiro, 1983;

_____. 1983c. **Concreto endurecido - determinação da fluência**. NBR8224. Rio de Janeiro;

_____. 1991. **Cimento Portland de alta resistência inicial**. NBR5733. Rio de Janeiro.

_____. 1992. **Aditivos para concreto de cimento Portland**. NBR 11768 Rio de Janeiro;

_____. 1992. **Cimento Portland – cimento Portland composto**. NBR 11578. Rio de Janeiro;

_____. 1992. **Concreto - perda de abatimento**. NBR 10342. Rio de Janeiro;

_____. 1992. **Materiais pozolânicos – Especificação**. NBR 12653. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Cimento Portland - Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant**. NBR12006. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico**. NBR 12826. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Concreto e argamassa - Concreto - Determinação da difusividade térmica**. NBR12818. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Concreto e argamassa - Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear**. NBR12815. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Concreto e argamassa - Concreto endurecido - Determinação do calor específico**. NBR12817. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Concreto e argamassa - concreto endurecido - determinação do coeficiente de dilatação térmica linear**. NBR 12815. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Concreto e argamassa - concreto endurecido - determinação do calor específico**. NBR 12817. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Concreto e argamassa - Determinação da elevação adiabática da temperatura**. NBR12819. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Concreto endurecido - Determinação da condutividade térmica**. NBR12820. Rio de Janeiro;

_____. 1993. **Concreto endurecido - determinação da condutividade térmica**. NBR 12820. Rio de Janeiro;

_____. 1994a. **Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. NM8. Rio de Janeiro;

_____. 1994. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – procedimento**. NBR-05738. Rio de Janeiro;

_____. 1994. **Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Especificação**. NBR 13956. Rio de Janeiro;

_____. 1996a. **Cimento Portland - determinação da resistência à compressão**. NBR 7215. Rio de Janeiro;

_____. 1996b. **Concreto - determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. NBRNM 55. Rio de Janeiro;

_____. 1996c. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NM101. Rio de Janeiro;

_____. 1996. **Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBRNM 101. Rio de Janeiro;

_____. 1996. **Concreto fresco - determinação da massa específica, do rendimento e do reor de ar, pelo método gravimétrico**. NBRNM 56. Rio de Janeiro;

_____. 1996. **Preparação de concreto em laboratório**. NBRNM 79. Rio de Janeiro;

_____. 1997. **Sílica ativa para uso em cimento portland, concreto, argamassa e pasta de cimento portland - especificação**. NBR 13956. Rio de Janeiro;

_____. 1997. **Sílica ativa para uso em cimento portland, concreto, argamassa e pasta de cimento portland - Métodos de Ensaio**. NBR 13957. Rio de Janeiro;

_____. 1998. **Cimento Portland - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. NBRNM 76. Rio de Janeiro;

_____. 1998. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBRNM67. Rio de Janeiro;

_____. 1998. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBRNM 67. Rio de Janeiro;

_____. 2000. **Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação de massa específica**. NBRNM 23. Rio de Janeiro;

_____. 2001. **Agregado Graúdo - determinação da absorção de água**. NBRNM 30. Rio de Janeiro;

_____. 2003. **Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. NBRNM 53. Rio de Janeiro;

_____. 2003. **Agregado miúdo - determinação de massa específica e massa específica aparente**. NBRNM 52. Rio de Janeiro;

_____. 2003. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. NBRNM248. Rio de Janeiro;

_____. 2003. **Agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem**. NBRNM 46. Rio de Janeiro;

_____. 2003. **Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal**. NBRNM43. Rio de Janeiro;

_____. 2003. **Cimento Portland - determinação do tempo de pega**. NBRNM 65. Rio de Janeiro;

_____. 2003. **Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de** resistência à penetração. NBRNM9. Rio de Janeiro;

_____. 2003. Projeto de estruturas de concreto. NBR6118. Rio de Janeiro;

_____. 2004. **Cimento Portland – análise química – determinação da perda ao** fogo. NBRNM 18. Rio de Janeiro;

_____. 2004. **Cimento Portland - análise química - determinação de resíduo insolúvel**. NBRNM 15. Rio de Janeiro;

_____. 2004. **Cimento Portland – análise química – determinação de anidrido sulfúrico**. NBRNM 16. Rio de Janeiro;

_____. 2004. **Cimento Portland – análise química – determinação do óxido de cálcio livre pelo etileno glicol – método de ensaio**. NBRNM 13. Rio de Janeiro;

_____. 2004. **Cimento Portland - análise química - método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama**. NBRNM 17. Rio de Janeiro;

_____. 2004. **Cimento Portland - análise química - método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - parte 2: Método ABNT**. NBRNM 11-2. Rio de Janeiro.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo