

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Análise da Fluência do Concreto Massa nas Primeiras Idades de
Carregamento: Influência de Aditivos Plastificantes e Adições
Minerais

Sergio Botassi dos Santos

Porto Alegre
2011

SERGIO BOTASSI DOS SANTOS

**ANÁLISE DA FLUÊNCIA DO CONCRETO MASSA NAS PRIMEIRAS
IDADES DE CARREGAMENTO: INFLUÊNCIA DE ADITIVOS
PLASTIFICANTES E ADIÇÕES MINERAIS**

TESE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL. ORIENTAÇÃO CONJUNTA: PROF. Dr. LUIZ CARLOS PINTO DA SILVA FILHO E PROF. Dr. JOÃO LUIZ CALMON NOGUEIRA DA GAMA.

Porto Alegre
2011

S237a Santos, Sergio Botassi dos

Análise da fluência do concreto massa nas primeiras idades : influência de aditivos plastificantes e adições minerais / Sergio Botassi dos Santos. – 2011.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Coorientador: Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

1. Concreto - Propriedades. 2. Concreto - Ensaios. 3. Materiais de construção. I. Silva Filho, Luiz Carlos Pinto da, orient. II. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da, coorient. III. Título.

CDU-691.32(043)

SERGIO BOTASSI DOS SANTOS

**ANÁLISE DA FLUÊNCIA DO CONCRETO MASSA NAS
PRIMEIRAS IDADES: INFLUÊNCIA DE ADITIVOS
PLASTIFICANTES E ADIÇÕES MINERAIS**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Materiais da Construção Civil, e aprovada e, sua forma final pelo professores orientadores, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2011

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Ph.D. University of Leeds
Orientador e Coordenador PPGEC-UFRGS

Prof. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Dr. Ing. Universidad Politécnica da Catalunya
Orientador UFES

BANCA EXAMINADORA

Prof. Selmo Chapira Kuperman (USP)
Dr. Universidade Politécnica da USP

Prof. José Márcio Fonseca Calixto (UFMG)
Ph.D. University of Texas at Austin
Escola de Engenharia da UFMG

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)
Ph.D. Pennsylvania State University

Dedico esta tese ao meu grande Pai “Deus” por ter me dado força e perseverança nos momentos mais difíceis, e a todos que de alguma forma poderão usufruir dos conhecimentos contidos nesta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui: meu pai, minha mãe, a minha futura esposa Ivana e a todos os familiares e amigos. Gostaria ainda de deixar expresso os meus sinceros agradecimentos:

- À empresa Furnas Centrais Elétricas S.A., em especial ao Laboratório de Concreto em Goiânia, sob a gerência do engenheiro Moacir Alexandre Souza de Andrade;
- Aos meus orientadores: João Luiz Calmon Nogueira da Gama e Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, pelo amor com que se dedicam a engenharia, aos seus próximos e a mim no desenvolvimento da tese;
- Aos meus amigos e colegas do Departamento Apoio Controle Tecnológico de Furnas, empresa ao qual trabalhei por mais de 6 anos, com destaque para: Gambale, Alfredo, Leandro, Mamede, Flavio de Lima, Anne, Nicole, Zito, Gilberto e tantos outros que de alguma forma me ajudaram sem esperar algo em troca, mas somente pela gratidão de ter mais um amigo;
- Às bancas de qualificação e de defesa da tese pela atenção e contribuição ao conteúdo desta obra;
- Ao Ministério Público do Estado de Goiás, onde atualmente exerço a função de Perito em Engenharia, por ter apoiado e cedido alguns dias de trabalho para finalizar a minha tese;
- À *Gávea Sensors*, representante no Brasil na época dos produtos da *FiberSensing*, pela cooperação no fornecimento dos sensores customizados e equipamento de monitoramento ótico, pioneiros em ensaios de fluência e retração;
- À Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL - por dar suporte financeiro ao desenvolvimento das pesquisas que culminaram, entre outros benefícios, com a elaboração desta tese.

RESUMO

Análise da Fluência do Concreto Massa nas Primeiras Idades de Carregamento: Influência de Aditivos Plastificantes e Adições Minerais

Estruturas de concreto mais arrojadas têm sido executadas ao longo das últimas décadas, utilizando-se de projetos e técnicas construtivas cada vez mais avançadas, às quais, por sua vez, procuram manter a qualidade na execução da obra e proporcionar maior durabilidade e rapidez na entrega do empreendimento. Dentro deste contexto evolutivo, também se enquadra a tecnologia do concreto, incluindo o estudo dos efeitos de seus materiais constituintes (agregados, aglomerantes, aditivos, adições, etc) sobre as mais diversas propriedades do concreto. Frente a este desafio, a tese se propõe a contribuir de maneira planejada na avaliação de como algumas adições minerais e os aditivos plastificantes podem afetar as propriedades do concreto, com ênfase dada à fluência nas primeiras idades de início de carregamento. A fluência além de ser de difícil obtenção de resultados em laboratório é uma propriedade que possui sua complexidade associada às diversas variáveis intervenientes no fenômeno e ainda ao seu mecanismo de atuação, o qual não é totalmente compreendido. A atual bibliografia sobre o assunto tem se mostrado incipiente e algumas vezes contraditória nos trabalhos disponíveis, principalmente quando se refere aos efeitos na fluência nas primeiras idades, apesar dos esforços depreendidos por pesquisadores consagrados desde a década de 30 do século passado. Assim, surgiu a necessidade de se delimitar a pesquisa a partir de um programa experimental capaz de avaliar, mesmo que ainda restrito a uma amostra de materiais e dosagem limitada, mas que permita uma visão geral de como as adições e os aditivos interagem no comportamento da fluência. O programa experimental compreenderá basicamente na avaliação matricial das possíveis combinações das adições minerais: metacaulim, escória de alto-forno e argila calcinada, associadas aos aditivos plastificantes, base *lignossulfonato* e *naftaleno*, sobre a fluência do concreto nas idades iniciais de carregamento de 1, 3 e 7 dias, e ainda sobre outras propriedades mecânicas, elásticas e térmicas, também nas idades de 14 e 28 dias. Os resultados demonstram que tanto as adições minerais estudadas como os aditivos plastificantes e suas combinações, avaliados por meio da análise estatística de variância, interferem decisivamente no comportamento da fluência, mesmo mantendo o proporcionamento dos materiais inalterados em relação à referência. A idéia é de que esta pesquisa contribua para a atualização dos padrões normativos atuais sobre o assunto, e que estimule futuras pesquisas para detalhar o efeito de outras adições e aditivos químicos sobre a fluência e também sobre uma série de traços de concreto e condições além das abordadas nesta tese.

Palavras-chave: fluência; concreto; aditivos plastificantes; adições minerais; primeiras idades.

ABSTRACT

Creep Analysis of Mass Concrete at Early Ages at Loading: Influence of Chemical and Mineral Admixtures

Bolder concrete structures have been performed in the past decade. They use increasingly advanced building projects and techniques which, in turn, aim at keeping work quality and providing higher durability and quicker project completion. Concrete technology also has a role in this evolutionary setting. It studies the effects of its component materials (aggregates, binders, chemical and mineral admixtures, etc.) on various concrete properties. In face of this challenge, this thesis aims at contributing to a planned assessment of how some mineral and chemical admixtures can affect concrete properties, mainly regarding creep at early ages at loading. Besides being difficult to assess through laboratorial testing, creep is a property whose complexity is associated to several intervening variables and to its working mechanisms, which are not fully understood. The current relevant literature has shown to be incipient and sometimes contradictory concerning the available studies, mainly those referring to the effects of creep at early ages, despite the efforts renowned researchers have made since the 1930s. This explains the need of limiting the investigations to an experimental program which is able to assess, even if restricted to a sample of materials and limited mix proportion, but also allow an overview of how mineral and chemical admixtures interact creep behavior. For assessing the possible mineral admixture combinations, this experimental program will comprise basically: metakaolin, blast furnace slag, and calcined clay associated to lignosulfonate and naphthalene-based admixtures on concrete creep at ages of loading 1, 3, and 7 days, as well as on other mechanical, elastic, and thermal properties, at ages 14 and 28 days. The results show that both mineral and chemical admixtures and their combinations, assessed in this study through statistical analysis of variance, significantly interfere in creep behavior, even though material proportion remains unchanged compared to the reference concrete mix. The idea is that this research can contribute to update the current standards in this field, and stimulate future studies detailing the effect of other mineral and chemical admixtures on creep and also on other concrete mixes and conditions that have not been approached in this study.

Keywords: creep; concrete; chemical admixtures; mineral admixtures; early ages.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. Estudos sobre a Influência dos Aditivos e Adições na Fluência – Visão Geral.	21
1.2. Justificativa.	22
1.3. Objetivos.	24
1.3.1. Objetivo principal.	24
1.3.2. Objetivos secundários.	24
1.4. Hipóteses Levantadas.	25
1.5. Limitações da Pesquisa.	26
1.6. Estrutura da Tese	27
1.6.1. Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos.	27
1.6.2. Capítulo 3 – Efeitos das adições e aditivos na fluência.	28
1.6.3. Capítulo 4 - Programa experimental.	28
1.6.4. Capítulo 5 - Apresentação dos resultados.	28
1.6.5. Capítulo 6 - Tratamento e análise dos resultados.	29
1.6.6. Capítulo 7 - Conclusões e recomendações.	29
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	30
2.1. Introdução.	30
2.2. O Estudo da Fluência no Concreto – Breve Histórico.....	30
2.3. Fluência do Concreto.....	34
2.3.1. Definição.....	34
2.3.2. Mecanismos de fluência.....	35
2.3.3. Fatores influentes.....	37
2.3.4. Predição da fluência.....	46
2.3.5. Efeitos na estrutura.....	47
2.3.6. Ensaio de fluência.....	48
2.4. Aditivos Plastificantes.....	50
2.4.1. Definição.....	51
2.4.2. Classificação.....	52
2.4.3. Composição básica.....	53
2.4.4. Mecanismos de atuação.....	54
2.4.5. Efeitos nas propriedades reológicas.....	55

2.4.6.	Efeitos nas propriedades do concreto endurecido.....	56
2.5.	Adições Minerais.....	59
2.5.1.	Definição.....	60
2.5.2.	Classificação.....	60
2.5.3.	Função no concreto.....	63
2.5.4.	Efeitos nas propriedades reológicas.....	64
2.5.5.	Efeitos nas propriedades do concreto endurecido.....	65
3.	EFEITOS DAS ADIÇÕES E ADITIVOS NA FLUÊNCIA.....	70
3.1.	Introdução.....	70
3.2.	Aditivos Plastificantes.....	70
3.2.1.	Aspectos gerais da interferência na fluência.....	70
3.2.2.	Efeito dos aditivos mantendo a dosagem inalterada.....	74
3.2.3.	Efeito dos aditivos mantendo a trabalhabilidade e resistência fixas.....	75
3.2.4.	Efeito dos aditivos mantendo a dosagem fixa e trabalhabilidade variando.....	76
3.2.5.	Efeito dos aditivos utilizados para redução do consumo de água.....	77
3.2.6.	Efeito do tipo de aditivo.....	77
3.2.7.	Efeito dos aditivos em diferentes idades de carregamento.....	78
3.2.8.	Síntese dos trabalhos pesquisados.....	79
3.3.	Adições Minerais.....	86
3.3.1.	Tipos de efeito na fluência.....	86
3.3.2.	Associação da resistência mecânica com a fluência.....	88
3.3.3.	Efeito das condições do ensaio.....	90
3.3.4.	Influência das superpozolanas.....	91
3.3.5.	Influência das pozolanas comuns.....	93
3.3.6.	Influência das adições cimentantes.....	96
3.3.7.	Efeito do teor das adições na fluência.....	99
3.3.8.	Síntese dos trabalhos pesquisados.....	101
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	108
4.1.	Introdução.....	108
4.2.	Variáveis do Programa Experimental.....	109
4.2.1.	Fatores controlados.....	110
4.2.2.	Variáveis de resposta.....	111
4.2.3.	Fatores constantes.....	111

4.2.4. Fatores não controlados (Ruídos).....	112
4.2.5. Interações entre as variáveis.....	113
4.2.6. Níveis dos fatores de controle.....	113
4.3. Estratégias Adotadas para o Planejamento Experimental.....	114
4.4. Insumos, Equipamentos e demais Recursos Laboratoriais.....	117
4.4.1. Agregados.....	117
4.4.2. Aglomerantes.....	118
4.4.3. Aditivos químicos (plastificantes).....	120
4.4.4. Sensores de deformação e temperatura.....	120
4.5. Planejamento das Atividades.....	125
4.6. Descrição do Estudo Experimental.....	130
4.6.1. Estudo de dosagem.....	130
4.6.2. Procedimentos de ensaios.....	135
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	136
5.1. Introdução.....	136
5.2. Definição das Dosagens e suas Moldagens.....	136
5.3. Resultados das Propriedades Mecânicas.....	140
5.3.1. Resistência à compressão.....	140
5.3.2. Resistência à tração.....	142
5.3.3. Módulo de elasticidade.....	144
5.4. Resultados das Propriedades Térmicas.....	146
5.4.1. Elevação adiabática de temperatura.....	147
5.4.2. Calor específico.....	152
5.4.3. Difusividade térmica.....	154
5.4.4. Coeficiente de dilatação térmica.....	155
5.5. Resultados das Propriedades Deformacionais.....	157
5.5.1. Retração autógena.....	158
5.5.2. Fluência básica.....	161
5.6. Resultados das propriedades complementares.....	166
6. TRATAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	169
6.1. Introdução.....	169
6.2. Análise Estatística dos Resultados.....	169

6.2.1. Efeito sobre a fluência e retração autógena.....	171
6.2.2. Efeito sobre as propriedades elásticas e mecânicas.....	174
6.2.3. Efeito sobre as propriedades térmicas.....	180
6.3. Agrupamento dos Resultados de Fluência Estatisticamente Semelhantes.....	182
6.3.1. Efeito das adições minerais.....	183
6.3.2. Efeito dos aditivos plastificantes.....	187
6.4. Comparação com Modelos de Predição.....	192
6.5. Aplicação dos Resultados de Ensaio à Situação de Campo.....	198
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	209
7.1. Introdução.....	209
7.2. Conclusão Geral.....	209
7.3. Conclusões Específicas.....	210
7.3.1. O efeito das adições minerais na fluência do concreto.....	211
7.3.2. O efeito das adições minerais nas demais propriedades do concreto.....	211
7.3.3. O efeito dos aditivos na fluência do concreto.....	213
7.3.4. O efeito dos aditivos nas demais propriedades do concreto.....	214
7.3.5. O efeito combinado dos aditivos e adições na fluência do concreto.....	215
7.3.6. O efeito combinado dos aditivos e adições nas demais propriedades do concreto.....	216
7.3.7. Comparação dos resultados de ensaios com modelos de predição de fluência.....	217
7.3.8. Os efeitos das adições e aditivos em uma estrutura de concreto.....	217
7.4. Recomendações para Futuras Pesquisas.....	218
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	219
APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	227
APÊNDICE B - MOLDAGEM DAS DOSAGENS.....	241
APÊNDICE C - RESULTADOS INDIVIDUAIS.....	244
APÊNDICE D - ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	255

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Comportamentos simplificados típicos dos sólidos sob carga. (a) Tensão constante. (b) Tensão variando.	34
Figura 2.2: Efeito da umidade ambiente e interna do concreto na retração.	38
Figura 2.3: Composição da fluência total.	39
Figura 2.4: Comportamento da fluência para duas idades de início de carregamento distintas.	44
Figura 2.5: Comportamento do volume de vazios com a idade em pastas de aglomerantes.....	67
Figura 3.1: Efeitos dos aditivos plastificantes na fluência	72
Figura 3.2: Relação indireta existente entre as adições e a fluência no concreto.....	89
Figura 3.3: Comportamento da fluência sobre o efeito da escória de alto-forno na idade de início de carregamento 14 dias.....	98
Figura 3.4: Efeito das adições minerais na fluência	100
Figura 4.1: Parâmetros envolvidos nos experimentos	110
Figura 4.2: Princípio do cimento equivalente	116
Figura 4.3: Extensômetro ótico utilizado na pesquisa. (a) Sensor com o cabo e o conector. (b) Detalhe da capsula com os sensores de temperatura e deformação.....	121
Figura 4.4.: Aparelho emissor e receptor dos sinais óticos. (a) Vista geral do aparelho em funcionamento. (b) Tela de visualização dos dados que funciona também como painel de operação.	122
Figura 4.5: Primeiro ensaio piloto para validação do sensor ótico.....	124
Figura 4.6: Gráfico comparativo entre os extensômetros ótico e <i>Carlson</i> para o novo ensaio piloto e entre CP's	125
Figura 4.7: Fluxograma das macro-atividades principais do programa experimental	126
Figura 4.8: Matriz de planejamento dos experimentos - 3ª fase da pesquisa.....	128
Figura 4.9: Resumo do processo de estudo de dosagem – Método do módulo de finura..	131
Figura 4.10: Estudo de dosagem para determinação do traço do concreto de referência (fck=31MPa aos 28 dias) – Método do módulo de finura.....	133
Figura 5.1: Moldagem da dosagem de referência: (a) Abatimento; (b) Ensaio de ar aprisionado; (c) Moldagem dos CP's 15x30cm; (d) Vista geral das moldagens; (e) Moldagem dos CP's de fluência; (f) Detalhe da moldagem com extensômetro embutido;	

(g) Moldagem das propriedades térmicas; (h) Moldagem da adiabática; (i) Final das moldagens	139
Figura 5.2: Resistência à compressão média das dosagens sem a combinação aditivo-adição	141
Figura 5.3: Resistência à compressão média das dosagens com a combinação aditivo-adição	142
Figura 5.4: Resistência à tração por compressão diametral média das dosagens sem a combinação aditivo-adição	143
Figura 5.5: Resistência à tração por compressão diametral média das dosagens com combinação aditivo-adição	144
Figura 5.6: Módulo de elasticidade médio das dosagens sem a combinação aditivo-adição.....	145
Figura 5.7: Módulo de elasticidade médio das dosagens com combinação aditivo-adição.....	146
Figura 5.8: Elevação adiabática de temperatura nas primeiras 24 horas de ensaio – Dosagens sem combinação entre aditivos e adições	147
Figura 5.9: Elevação adiabática de temperatura até a idade de 14 dias – Dosagens sem combinação entre aditivos e adições	148
Figura 5.10: Elevação adiabática de temperatura nas primeiras 24 horas de ensaio – Dosagens com combinação entre aditivos e adições	148
Figura 5.11: Elevação adiabática de temperatura até a idade de 14 dias – Dosagens com combinação entre aditivos e adições	149
Figura 5.12: Maturidade do concreto em várias idades – Dosagens sem combinação entre aditivos e adições	151
Figura 5.13: Maturidade do concreto em várias idades – Dosagens com combinação entre aditivos e adições	152
Figura 5.14: Calor específico das dosagens sem as combinações adição-aditivo.....	153
Figura 5.15: Calor específico das dosagens com as combinações adição-aditivo	153
Figura 5.16: Difusividade térmica das dosagens sem a combinação aditivo-adição	154
Figura 5.17: Difusividade térmica das dosagens com a combinação aditivo-adição.....	155
Figura 5.18: Coeficiente de dilatação térmica das dosagens sem a combinação aditivo-adição.....	156
Figura 5.19: Coeficiente de dilatação térmica das dosagens com a combinação aditivo-adição	157

Figura 5.20: Forma de representação da retração autógena a partir dos resultados de ensaio.....	158
Figura 5.21: Taxa de retração autógena das dosagens sem a combinação aditivo-adição.....	159
Figura 5.22: Taxa de retração autógena das dosagens com a combinação aditivo-adição.....	160
Figura 5.23: Forma de representação da fluência básica a partir dos resultados de ensaio.....	161
Figura 5.24: Taxa de fluência básica das dosagens sem a combinação aditivo-adição	163
Figura 5.25: Taxa de fluência básica das dosagens com a combinação aditivo-adição	163
Figura 5.26: Propriedades complementares das dosagens sem a combinação aditivo-adição: (a) Absorção; (b) Índice de vazios; (c) Massa específica saturada	166
Figura 5.27: Propriedades complementares das dosagens com a combinação aditivo-adição: (a) Absorção; (b) Índice de vazios; (c) Massa específica saturada	167
Figura 6.1: Resultados de fluência básica das dosagens com adição mineral e sem aditivos estatisticamente semelhantes, para a idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias	184
Figura 6.2: Resultados de fluência básica das dosagens com adição mineral e aditivo plastificante estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias	185
Figura 6.3: Resultados de fluência básica das dosagens com adição mineral e aditivo superplastificante estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias	186
Figura 6.4: Resultados de fluência básica das dosagens com aditivos plastificante e sem adição mineral estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias	188
Figura 6.5: Resultados de fluência básica das dosagens com aditivos plastificantes e adição de superpozolana estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias	189
Figura 6.6: Resultados de fluência básica das dosagens com aditivos plastificantes e adição de pozolana estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias	190
Figura 6.7: Resultados de fluência básica das dosagens com aditivos plastificantes e adição cimentícia estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias	191
Figura 6.8: Variação dos resultados dos modelos em relação aos resultados de ensaio na idade de início de carregamento de 1 dia	197

Figura 6.9: Variação dos resultados dos modelos em relação aos resultados de ensaio na idade de início de carregamento de 7 dias	197
Figura 6.10: Foto dos muros da calha do vertedouro. (a) Visão geral da calha. (b) Detalhe do muro	200
Figura 6.11: Dimensões e malha de elementos finitos da seção do muro.....	201
Figura 6.12: Estabelecimento dos contornos com deformações restringidas para simulação tensional	202
Figura 6.13: Evolução da temperatura na região central do muro	203
Figura 6.14: Evolução da temperatura na região próxima à superfície do muro.....	203
Figura 6.15: Isocores de temperatura 4 dias após finalizada a concretagem do muro. Dosagem: (a) referência, (b) com a mistura de escória de alto-forno e superplastificante, e (c) com a mistura de pozolona e plastificante	204
Figura 6.16: Evolução da tensão na região central do muro	205
Figura 6.17: Evolução da tensão na região próxima à superfície do muro.....	206
Figura 6.18: Fator de segurança na região central do muro	207
Figura 6.19: Fator de segurança na região próxima à superfície do muro.....	207

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação dos poros da pasta de cimento endurecida.....	36
Tabela 2.2: Alguns dos requisitos de desempenho dos plastificantes – Comparativo entre a norma brasileira e a americana (em relação percentual com a referência).....	53
Tabela 2.3: Comparativo de alguns requisitos mínimos exigidos pela norma brasileira e americana.....	63
Tabela 3.1: Redução das deformações em relação ao concreto de referência na idade de ensaio de 3 dias.....	98
Tabela 4.1: Resultados de caracterização dos Agregados.....	118
Tabela 4.2: Calor de hidratação do cimento e das suas combinações com as adições.....	119
Tabela 4.3: Aditivos químicos utilizados na pesquisa.....	120
Tabela 4.4: Especificações técnicas do aparato de monitoramento de deformações e temperatura fabricado pela Fiber Sensing.....	122
Tabela 4.5: Levantamento de ensaios a serem realizados.....	129
Tabela 4.6: Aleatorização dos níveis dos fatores de controle para moldagem do programa experimental.....	130
Tabela 4.7: Exigências básicas para o concreto de referência da pesquisa.....	132
Tabela 4.8: Níveis de substituição das adições minerais e aditivos plastificantes no concreto de referência.....	134
Tabela 5.1: Dosagens obtidas para o programa experimental.....	137
Tabela 5.2: Quantitativo de CP's por dosagem do programa experimental.....	138
Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de resistência à compressão.....	141
Tabela 5.4: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	143
Tabela 5.5: Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.....	145
Tabela 5.6: Resultados dos ensaios de calor específico.....	142
Tabela 5.7: Resultados dos ensaios de difusividade térmica.....	154
Tabela 5.8: Resultados dos ensaios de coeficiente de dilatação térmica.....	156
Tabela 5.9: Resultados dos ensaios de retração autógena.....	159
Tabela 5.10: Resultados dos ensaios de fluência básica.....	162

Tabela 6.1: Resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}).\ln(t)] - t_0=1$ dia	171
Tabela 6.2: Resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}).\ln(t)] - t_0=3$ dias.....	171
Tabela 6.3: Resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}).\ln(t)] - t_0=7$ dias.....	172
Tabela 6.4: Resultados de retração autógena $(10^{-6}/\ln(t))$	174
Tabela 6.5: Resultados de resistência à compressão (MPa) - $t=1$ dia	175
Tabela 6.6: Resultados de resistência à compressão (MPa) - $t=3$ dias	175
Tabela 6.7: Resultados de resistência à compressão (MPa) - $t=7$ dias	175
Tabela 6.8: Resultados de resistência à compressão (MPa) - $t=28$ dias.....	176
Tabela 6.9: Resultados de resistência à tração (MPa) - $t=1$ dia	177
Tabela 6.10: Resultados de resistência à tração (MPa) - $t=3$ dias.....	177
Tabela 6.11: Resultados de resistência à tração (MPa) - $t=7$ dias.....	177
Tabela 6.12: Resultados de resistência à tração (MPa) - $t=28$ dias.....	178
Tabela 6.13: Resultados de módulo de elasticidade (GPa) - $t=1$ dia	179
Tabela 6.14: Resultados de módulo de elasticidade (GPa) - $t=3$ dias	179
Tabela 6.15: Resultados de módulo de elasticidade (GPa) - $t=7$ dias	179
Tabela 6.16: Resultados de módulo de elasticidade (GPa) - $t=28$ dias	180
Tabela 6.17: Resultados de calor específico (J/(kg.°C))	181
Tabela 6.18: Resultados de difusividade térmica (m^2/dia)	181
Tabela 6.19: Resultados de coeficiente de dilatação térmica ($10^{-6}/^\circ\text{C}$).....	182
Tabela 6.20: Resultados dos modelos preditivos comparados com ensaios de fluência – Idade de início de carregamento de 1 dia	195
Tabela 6.21: Resultados dos modelos preditivos comparados com ensaios de fluência – Idade de início de carregamento de 7 dias	195
Tabela 6.22: Variação dos resultados dos modelos em relação aos resultados de ensaio na idade de início de carregamento de 1 dia	196
Tabela 6.23: Variação dos resultados dos modelos em relação aos resultados de ensaio na idade de início de carregamento de 7 dias.....	196
Tabela 6.24: Caracterização estimada das propriedades da rocha utilizada na fundação..	201
Tabela 6.25: Condições de contorno do problema térmico.....	202

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Resumo das principais características do ensaio de fluência	49
Quadro 2.2: Classificação dos aditivos plastificantes - Comparativo entre a norma brasileira e a americana.....	52
Quadro 2.3: Classificação das principais adições minerais.....	61
Quadro 2.4: Classificação segundo norma brasileira e associação com a norma americana.....	62
Quadro 3.1: Principais variáveis abordadas nos trabalhos para avaliar os efeitos dos aditivos plastificantes na fluência.....	74
Quadro 3.2: Levantamento de casos da influência dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência.....	81
Quadro 3.3: Estratégias adotadas nos trabalhos levantados para avaliar os efeitos das adições minerais na fluência.....	86
Quadro 3.4: Levantamento de casos da influência das adições minerais na fluência.....	103
Quadro 4.1: Fatores de controle com seus respectivos níveis de variação	113
Quadro 6.1: Modelos de predição da fluência escolhidos	193

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI: American Concrete Institute
- ANOVA: *Analysis of Variance*
- ASTM: American Society for Testing and Materials
- BS: British Standard
- CAD: Concreto de alto desempenho
- CEB: Comitê Euro-Internacional du Béton
- CP: Corpo de prova
- Cim: Concreto com adição cimentícia (escória de alto forno)
- HC: Hidróxido de Cálcio
- IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- NBR: Norma Brasileira
- Pl: Concreto com plastificante (base química: lignossulfonato)
- Pz: Concreto com pozolana (argila calcinada)
- Ref: Concreto de referência (sem aditivo e adição)
- RILEM: Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux, systèmes de construction et ouvrages
- SPl: Concreto com superplastificante (base química: naftaleno)
- SPz: Concreto com superpozolana (metacaulim)

LISTA DE SÍMBOLOS

- 1/m: Relação cimento/agregados (miúdo + graúdo) para o concreto.
- α : Coeficiente de dilatação térmica.
- a/c: Relação água/cimento.
- a/c_{eq}: Relação água/cimento equivalente.
- Ce: Calor específico do concreto.
- CaO: Óxido de cálcio.
- CP I: Cimento *Portland* Comum tipo I.
- CPII-F-32: Cimento *Portland* Composto tipo II com filler e 32MPa de resistência.
- C-S-H: Silicato de cálcio hidratado.
- C₃A: Aluminato tricálcio (celita).
- C₃S: Silicato tricálcio (alita).
- C₂S: Silicato dicálcio (belita).
- ΔD : Limite de decisão (utilizado na análise múltipla de médias)
- D_{máx}: Diâmetro máximo característico de uma mistura com agregados.
- ϵ_s : Deformação específica proveniente da retração autógena.
- E: Módulo de elasticidade do concreto.
- f_{ck}: Resistência característica do concreto à compressão.
- f_{cj}: Resistência à compressão na idade j do concreto.
- f_{c0}: Resistência à compressão na idade de início do ensaio de fluência.
- f_{ct,sp}: Resistência à tração por compressão diametral do concreto.
- F_j: Taxa de fluência do concreto na idade de início de carregamento j (ou t₀).
- FS: Fator de segurança – mede o risco do aparecimento de fissuras de origem térmica.
- h: Difusividade térmica do concreto.
- φ : Coeficiente de fluência.
- J(t- t₀): Função de fluência específica, variando a partir do tempo t na idade de início de carregamento t₀.

M: Maturidade do concreto.

MQR: Média quadrática dos resíduos (utilizada no cálculo *ANOVA*).

n: Número de repetições em um ensaio.

Ra: Retração autógena do concreto.

Rf: Taxa de crescimento da resistência mecânica em relação à resistência inicial.

σ_y : Tensão normal na direção y provocada pelo fenômeno térmico.

σ/f_{cj} : Relação entre a tensão aplicada no ensaio e a resistência à compressão.

UR: Umidade Relativa.

Vp: Volume de pasta.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. ESTUDOS SOBRE A INFLUÊNCIA DOS ADITIVOS E ADIÇÕES NA FLUÊNCIA – VISÃO GERAL

Os aditivos químicos e as adições minerais têm como objetivo comum a melhoria do comportamento das misturas contendo aglomerantes hidráulicos, principalmente o cimento *Portland*. Dentre as melhorias esperadas, destacam-se o ganho de trabalhabilidade, incrementos na resistência mecânica e aumento da durabilidade. Os primeiros trabalhos em que houve a preocupação mais direta com os efeitos desses produtos sobre a fluência datam da década de 30 no século passado, como por exemplo, o observado na publicação de Ross (1938). Porém, somente a partir da década de 70 que uma dedicação mais explícita foi direcionada ao estudo dos efeitos das adições minerais e aditivos químicos sobre a fluência, com a publicação do renomado livro de Neville (1970).

As pesquisas nesta área foram conduzidas de maneira dispersa, na sua grande maioria sem o foco nas principais variáveis do problema e para finalidades voltadas a casos específicos, não havendo a preocupação em extrapolar os resultados para outras situações além das pesquisas. Esse fato fez com que as conclusões se tornassem de difícil generalização, sendo extremamente dependente de suposições que ensejavam fragilidade nas hipóteses propostas. Em termos evolutivos, o estudo dos efeitos dos aditivos químicos e adições minerais sobre a fluência no início ficava em segundo plano, pois a preocupação principal se voltava para os efeitos desses materiais no concreto com a finalidade na melhoria da resistência mecânica, ganhos na reologia do concreto e incrementos de durabilidade. A partir do momento em que se começou a perceber que esses materiais combinados no concreto interferiam de maneira significativa em outras propriedades é que a fluência começou a ser enfatizada nos estudos.

Apesar de todo esse tempo em que se iniciaram as pesquisas, os trabalhos ainda se defrontam com sérias limitações tecnológicas, pois os mecanismos intervenientes no comportamento da fluência têm origem microscópica e evolutiva no tempo, o que confere a este estudo um grau

de complexidade relativamente alto, motivando, por conseguinte, um caráter predominantemente empírico às pesquisas, pois as correlações causa-efeito normalmente não são obtidas em sua essência, mas de maneira indireta e muitas vezes subjetiva, a partir de experimentos de caráter macroscópico.

Neste capítulo são apresentadas as justificativas e os objetivos que motivaram a elaboração desta tese, com enfoque na lacuna ainda existente sobre o assunto. Ainda faz parte deste capítulo inicial as condições que permeiam a pesquisa, ou seja, as principais variáveis do problema, hipóteses levantadas e limitações que restringem a abrangência do tema.

1.2. JUSTIFICATIVA

As soluções de engenharia selecionadas na fase de projeto devem ser confiáveis, seguras e comprovadas pela experiência. Na escolha do material as mínimas características exigidas em projeto para o concreto (relação a/c, consumo mínimo de cimento, etc.) flexibilizam a opção por uma grande variabilidade de dosagens que podem ser adotadas com diferentes materiais. Isto admite que as estruturas, com soluções de projeto cada vez mais arrojadas, possam ser submetidas a novos produtos adicionais ao concreto, que confirmem melhor comportamento reológico e mecânico ao concreto, se devidamente dosado. Quando se tratam das adições e aditivos, comportamentos secundários, como a fluência, podem ocorrer sem que haja uma devida predição, em detrimento de exigências relativamente limitadas na fase de projeto, mais focadas na resistência mecânica e durabilidade frente a agentes agressivos. Logo, seria importante, quando utilizada uma adição ou um aditivo, conhecer *a priori* seus efeitos na fluência e conseqüentemente na estrutura para que o projeto seja executado de maneira mais segura e seu dimensionamento mais condizente com a realidade comportamental do concreto *in loco*.

Segundo Brooks e Neville (1992), o efeito das adições (sílica ativa, cinza de casca de arroz, escória de alto forno, etc.) e aditivos (plastificantes, superplastificantes, etc.) na deformação diferida é provavelmente um dos aspectos menos pesquisados da tecnologia do concreto. Alexander *et al.* (1980) comentam que concretos com superplastificante são freqüentemente utilizados em situações onde a fluência é um fator importante, e embora alguns dados têm sido publicados mais intensamente a partir dos anos 70 (CAACA, 1976; ISSC, 1978), comparativamente, pouca informação é encontrada neste campo. Brooks (1999) em seu trabalho afirma que embora possa haver algumas correlações entre as adições e aditivos com a

fluência, em muitos casos há escassez de valores de ensaios e uma grande variabilidade de resultados de fluência para um mesmo teor de aditivo ou adição quando encontrados. Todos os comentários citados nesse parágrafo embora ocorridos há mais de uma década ainda são bastante atuais, pois se observou na revisão bibliográfica, como será apresentada no capítulo 3, uma grande lacuna de resultados conclusivos e direcionados estritamente ao tema desta tese ao longo dos últimos anos.

Mais especificamente para os aditivos plastificantes, várias tentativas de quantificar o efeito sobre a fluência foram realizadas, porém com grande divergência dos resultados, como apontado nos estudos de Hope, Neville e Guruswami (1967); Hope e Brown (1970); Morgan e Welch (1971); Alexander *et al.* (1980); Neville, Dilger e Brooks (1983); Brooks e Neville (1992); Brooks (2000).

Ravindrarajah e Tam (1989) destacam que as divergências encontradas em vários estudos devem-se principalmente a grande sensibilidade da fluência a variações de outros parâmetros relacionados ao concreto, tais como: resistência, dosagem, porosidade, tipo de cimento, adição, aditivo, etc. Logo, os autores sugerem um devido estudo paramétrico, tentando fixar inclusive parâmetros externos ao concreto que interferem diretamente na fluência, como por exemplo: temperatura de lançamento, condições de cura, idade de carregamento, tempo sob carregamento, tipo de ensaio, etc.

É importante lembrar ainda que modelos de predição de fluência normalmente não consideram o efeito das adições de forma clara, muito menos dos aditivos, como observado na compilação de modelos agrupados na dissertação de Botassi (2004), na publicação de Hasparik *et al.* (2005) e no artigo de Botassi *et al.* (2010). O que se percebe em alguns modelos, como na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007) em seu anexo A, é a utilização de um coeficiente em função do tipo de cimento para representar as diferentes velocidades de hidratação, decorrentes das adições já incorporadas ao cimento. A ausência de modelos que considerem o efeito das adições e aditivos pode levar a distorções no resultado final da fluência, mesmo considerando corretamente todos os parâmetros que alimentam a expressão de predição.

1.3. OBJETIVOS

Essa tese será desenvolvida estritamente dentro do escopo dos objetivos propostos nos próximos subitens a fim de se evitar a perda do foco no desenvolvimento da pesquisa.

1.3.1. Objetivo Principal

Verificar o comportamento da fluência básica no concreto massa, variando o tipo de aditivo químico (plastificante e superplastificante), adição mineral (adição cimentícia, pozolana e superpozolana) e suas combinações aos pares na mistura, com enfoque nos resultados das primeiras idades - 1, 3 e 7 dias. Tanto a base química dos aditivos como a origem das adições foram escolhidas a partir dos seguintes critérios: aceitação de mercado e comportamento reconhecidamente diferenciado entre os mesmos no concreto.

A base química escolhida para o aditivo plastificante foi a *Lignossulfonato* e do superplastificante foi a *Naftaleno*. Já a adição cimentícia escolhida foi a *escória de alto-forno*, a pozolana adotada foi a *argila calcinada comum* e a superpozolana foi a *metacaulim*. O metacaulim foi considerado como uma superpozolana na pesquisa devido ao comportamento semelhante às pozolanas de alta reatividade, como a sílica ativa, observada na caracterização realizada no capítulo 4 e observado nas considerações relatadas nos trabalhos de Sabir, Wild e Bai (2001), Brooks e Johari (2001), Ding e Li (2002) e Dal Molin (2005).

A partir dos resultados experimentais obtidos foi realizada a análise estatística, tentando verificar o grau de influência das adições e dos aditivos selecionados na fluência e ainda constatar possíveis comportamentos semelhantes entre as dosagens avaliadas.

1.3.2. Objetivos Secundários

Outros objetivos foram propostos para complementação da pesquisa. São eles:

- Realizar uma síntese das principais pesquisas onde se tentou correlacionar as adições e aditivos com a fluência, as quais ajudaram a nortear as diretrizes desta pesquisa e determinar seu escopo.
- Levantar, quantificar e elaborar expressões que correlacionam os principais parâmetros do traço do concreto com a fluência, a partir do banco de dados de ensaios pré-existentes do Laboratório de Concreto de Furnas;

- Caracterizar outras propriedades dos concretos moldados (mecânicas, térmicas e deformacionais), por meio de um programa experimental complementar, para uso posterior em simulações computacionais e ainda para justificar os comportamentos observados na fluência;
- Avaliar o extensômetro com sensor de fibra ótica que capta deformação e temperatura em uma única cápsula embutida no concreto, utilizado pioneiramente em ensaios de fluência no Brasil;
- Utilizar os resultados obtidos no programa experimental em simulações numéricas¹ para avaliar o comportamento termotensional de estruturas de concreto, verificando assim a magnitude dos efeitos que as adições e aditivos podem provocar quando utilizadas.

1.4. HIPÓTESES LEVANTADAS

As principais hipóteses que serão verificadas e avaliadas com os resultados provenientes da pesquisa resumem-se nas listadas a seguir:

- As adições e os aditivos estudados produzem efeitos significativos na fluência do concreto quando comparado com concretos de referência, mantida fixas outras variáveis intervenientes no problema;
- O efeito combinado entre as adições e os aditivos estudados na fluência são significativos, dentro das proporções normais de uso;
- O efeito dos aditivos e das adições sobre a fluência interfere significativamente no comportamento termomecânico das estruturas de concreto, nas primeiras idades;
- Os comportamentos das adições e aditivos na fluência podem ser extrapolados a outras dosagens aplicadas a estruturas de concreto massa, em condições normais de aplicação e materiais utilizados.

¹ O programa utilizado foi desenvolvido nas teses de mestrado de Silva (2002) e Botassi (2004), denominado de PFEM_2DAT.

1.5. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As principais limitações que envolvem a pesquisa encontram-se relacionadas a seguir:

- O ensaio de fluência possui um razoável tempo de execução. Segundo a norma brasileira NBR 8224 (ABNT, 1983), utilizada como padrão para a condução dos ensaios, depois de aplicada a carga no corpo de prova, deve-se manter o carregamento por pelo menos 90 dias para cada ensaio. Logo, esse ensaio de longa duração, em relação aos demais realizados, foi o caminho crítico do planejamento experimental, sendo conduzido prioritariamente no programa de ensaios com pequena margem de folga;
- A quantidade de corpos de prova para o ensaio de fluência limita-se ao mínimo permitido de dois por dosagem, conforme preconiza a norma brasileira NBR 8224 (ABNT, 1983) e ainda segundo Carreira e Burg (2000), apesar da norma americana C512 (ASTM, 2002) recomendar no mínimo três. Quanto maior o número de CP's obviamente mais representativo será o resultado, porém mais oneroso torna a pesquisa. Os extensômetros óticos, utilizados de forma pioneira nos ensaios de fluência desta pesquisa, possuem baixa dispersão e maior precisão nos resultados apresentados em testes pilotos já realizados, não trazendo grandes riscos, sob o ponto de vista estatístico, se utilizados com baixa repetitividade por amostra para os ensaios desta pesquisa;
- As associações dos efeitos das adições e aditivos na fluência serão realizadas em CP's ensaiados em laboratório. Logo, extrapolações para a condição de campo devem ser efetuadas em estudos específicos, não presentes neste trabalho. Contudo, como a condução dos ensaios prioriza os efeitos intimamente ligados aos produtos testados, e evita que influências indiretas possam prejudicar a interpretação dos resultados, acredita-se que uma possível extrapolação em conjunto com um coeficiente de segurança, para encobrir possíveis variações probabilísticas, possa ser realizada;
- Uma série de variáveis foi restringida, pois caso contrário o programa experimental além de ficar praticamente inviável de ser realizado, abriria margem a interpretações errôneas sobre os resultados. As principais variáveis a

serem controladas² são: as condições de ensaio fixas (carregamento, dimensões do CP, etc.), as condições ambientais (umidade, temperatura, etc.), a dosagem e o tipo de fluência (básica);

- A grande diversidade de tipos de cimento, adições e aditivos, exige que a pesquisa deva se concentrar em apenas um tipo de cimento. As adições escolhidas limitar-se-ão as mais utilizadas no meio técnico, e os aditivos escolhidos são da família dos redutores de água (ou plastificantes);

Destaca-se, por fim, que o assunto proposto para a pesquisa é de grande abrangência, logo a sua devida limitação, direcionada ao escopo e hipóteses estritamente delineadas nesta tese, proporcionará um conhecimento mais aprofundado e embasado sobre o tema, mas que ainda será possível extrapolar as principais conclusões, mesmo que de forma aproximada, aos casos mais genéricos, pois haverá a preocupação em se construir um programa experimental estatisticamente consistente e confiável.

1.6. ESTRUTURA DA TESE

A tese foi estruturada em seis capítulos, incluindo este, para melhor organizar o conteúdo a ser abordado e seqüenciar o escopo do trabalho em uma ordem lógica e clara.

1.6.1. Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

Procurou-se focar às principais variáveis que motivaram o estudo: fluência, adição mineral e aditivo plastificante, contemplando as informações que deram subsídios para estruturar o programa experimental e delimitar o escopo da pesquisa, a fim de alcançar seus objetivos, sem, contudo, esgotar sobre o tema. Faz parte deste capítulo um suficiente levantamento dos principais conceitos que envolvem a fluência do concreto. Neste capítulo abordou-se ainda os conceitos, definições, classificação e efeitos gerais das adições minerais sobre o concreto. Os aditivos foram descritos a partir das suas principais características, sem aprofundar nesse assunto, mas remetendo o leitor quando necessário aos principais trabalhos para maiores detalhes, se julgar necessário.

² Essas variáveis em termos estatísticos são denominadas de fatores constantes.

1.6.2. Capítulo 3 - Efeitos das Adições e Aditivos na Fluência

Este capítulo engloba uma compilação das principais publicações que tentaram correlacionar as adições minerais e aditivos plastificantes com a fluência, realizando uma análise crítica dos mesmos. Procurou-se agrupar os trabalhos que adotaram a mesma estratégia de pesquisa e ainda verificar se os efeitos provocados pelas adições e aditivos são passíveis de serem unificados, dependendo do tipo de material. Uma extensa análise e conseqüente relato foram transcritos no capítulo, a fim de se organizar os pontos em comum entre as pesquisas e apontar os seus desacordos e conflitos. O propósito fundamental foi de se comprovar toda a complexidade que envolve o assunto, e sugerir possíveis melhorias para que as mesmas pudessem ser aplicadas já na estruturação do programa experimental desta pesquisa, evitando desperdícios e otimizando as atividades.

1.6.3. Capítulo 4 - Programa Experimental

Este capítulo abordou toda a fase de planejamento dos experimentos, contemplando desde o levantamento das principais variáveis estudadas até a estratégia adotada para suporte dos experimentos (escolha e análise dos insumos, materiais e equipamentos necessários, etc.). Foi elaborado todo o fluxograma de atividades e detalhamento de execução dos experimentos, preocupando-se em informar os principais padrões de ensaios utilizados, segundo normas brasileiras específicas, a fim de se garantir maior alcance dos resultados desta pesquisa, no que diz respeito à possibilidade de comparação com outros programas experimentais e ainda proporcionar maior confiabilidade aos resultados, uma vez que todo o processo executivo foi conduzido por padrões normatizados.

1.6.4. Capítulo 5 – Apresentação dos Resultados

Os resultados alcançados foram devidamente agrupados para posteriores análises conforme cada variável envolvida no problema (aditivos e adições) e cada propriedade avaliada. Para facilitar a compreensão e tornar os resultados mais fáceis de serem interpretados, foram elaboradas várias tabelas e gráficos comparativos dos resultados e ainda quadros resumos dos valores médios e suas variabilidades para facilitar posteriores tratamentos, como pretendidos no próximo capítulo. Realizaram-se ainda interpretações dos resultados de ensaios para se tentar justificar tecnicamente os comportamentos observados, tomando-se como base as informações obtidas na revisão bibliográfica.

1.6.5. Capítulo 6 - Tratamento e Análise dos Resultados

Inicialmente houve uma compilação geral e organizada dos resultados dos experimentos por fatores de controle (tipo de aditivo e adição), separados pela variável resposta de interesse (fluência, propriedades elásticas e mecânicas, e propriedades térmicas). Após esse prévio tratamento foram realizados testes estatísticos para verificar se há efeito diferenciado da adição e aditivo e quais possuem comportamento similar sobre as variáveis respostas estudadas, com ênfase na fluência. Ainda neste capítulo foram feitas comparações dos resultados obtidos com expressões empregadas para predição da fluência e enfatizar como se pode adequá-las a esse novo conhecimento. Por fim, realizaram-se simulações numéricas para comparação dos possíveis efeitos *in loco* provocados pelas adições e aditivos, utilizando os resultados de ensaios realizados nesta pesquisa.

1.6.6. Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações

Foram realizadas conclusões de amplitude geral e específicas para cada material avaliado sobre a fluência e as demais propriedades estudadas. Foi abordada a comparação dos resultados obtidos com os modelos de predição, a fim de se propor fatores de correção para consideração dos efeitos das adições e aditivos na fluência, e também foram verificados se esses resultados são semelhantes aos levantados junto à revisão bibliográfica. Ressaltou-se também a importância da consideração das adições e aditivos no efeito termomecânico do concreto massa por meio das simulações realizadas no capítulo anterior. Por fim, foram propostas recomendações de pesquisas futuras para dar continuidade ou implementar melhorias na idéia inicial apresentada nesta tese, além de sugerir a exploração de outros nichos não estudados, mas que foram relatados nas limitações e hipóteses da pesquisa.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se nesse capítulo um relato das principais variáveis da pesquisa: fluência, aditivo plastificante e adição mineral. Inicialmente é relatado um histórico resumido do fenômeno da fluência, seus desafios e o estágio atual do estado de conhecimento. Posteriormente, aborda-se a caracterização da fluência do concreto, incluindo definição, principais mecanismos de atuação até uma breve síntese do procedimento de ensaio. No que se refere aos aditivos plastificantes e adições minerais, foram relatados de maneira geral os principais conceitos e definições, incluindo suas respectivas classificações e como esses produtos atuam no concreto em escala micro e macro estrutural.

2.2. O ESTUDO DA FLUÊNCIA NO CONCRETO – BREVE HISTÓRICO

Nos primórdios dos projetos estruturais, o concreto, similar ao aço, era considerado como um material de comportamento elástico, o que significava dizer que se cessada a carga em uma estrutura de concreto, ela voltava ao seu estado original. Contudo, sabe-se que o concreto, em função das suas características peculiares relativa à mecânica dos sólidos, principalmente na tendência de modificação microestrutural ao longo do tempo, possui obviamente comportamento deformacional distinto dos demais. Um dos primeiros informes técnicos que se tem conhecimento da consideração de deformações de origem inelástica no concreto pode ser encontrado no trabalho de Woolson (1905 *apud* NEVILE, 1970), onde ele descreve a possibilidade do concreto dentro de um tubo de aço “fluir” sob elevado nível de tensão axial. Desconsiderando, a parte, os exageros, é interessante notar a partir deste marco que se cogitou a possibilidade do concreto endurecido se comportar não mais diretamente proporcional ao esforço aplicado, segundo determinadas condições de uso conforme inicialmente preconizado pelo matemático inglês Robert Hooke no século XVII, e sim se deformando além do esperado num comportamento hoje conhecido como viscoelástico, que resultaria em uma inclinação da

curva de tensão *versus* deformação tão branda quanto mais tempo permanecida a carga sobre o material.

Dois anos depois, o americano Hatt em um brilhante trabalho publicado nos *proceedings* da ASTM (HATT, 1907 *apud* NEVILLE, 1970), realizou testes em vigas de concreto submetidas a cargas constantes ao longo de 2 meses de ensaio, verificando deformações excessivas (quase o dobro da deformação inicial) que poderiam estar associadas ao efeito conjunto viscoelástico da fluência mais retração. Coutinho (1974) comenta que *Freyssinet* fez uma série de ensaios similares aos de Hatt, entre 1907 a 1909, mas não publicou oficialmente em um evento ou revista do meio técnico. As informações constantes desta pesquisa foram disponibilizadas nas lições de Mesnager na *École de Ponts et Chaussées*, França em 1913.

Outros grandes nomes contribuíram decisivamente para o estudo das causas, efeitos e mecanismos da fluência no concreto, como por exemplo: *White, McMillan, L'Hermitte, Thomas, Ross, McHenry, Rüsich, Carlson, Neville, Bažant, Whittmann, Young, Emborg*, entre outros citados no célebre livro sobre fluência de Neville (1970). Permitiram assim que o assunto fosse investigado e aprofundado, uma vez que foi lançado ao meio técnico-científico o desafio da melhor compreensão do fenômeno, e quais os efeitos que o mesmo pode provocar em estruturas que por ventura possam estar severamente sujeitas às suas conseqüências.

O fenômeno da fluência do concreto é bastante complexo e está relacionado com os processos físico-químicos atuantes ao longo da vida útil da estrutura. Várias vertentes de pesquisa foram sendo delineadas ao longo dos anos desde a sua descoberta. Inicialmente, grande parte dos pesquisadores concentrou-se nos efeitos da fluência em corpos de prova e estruturas em escala reduzida, especulando várias hipóteses para as causas da fluência no concreto, pois se começava a conhecer o seu efeito, mas as causas ainda não estavam claras. Com o passar dos anos, mais testes foram sendo realizados, e assim sendo conhecidos os fatores influentes, quantificando os efeitos, mas ainda as causas e os mecanismos propulsores da fluência não estavam esclarecidos e sujeitos a mais especulação do que constatação científica. Por outro lado, a modelagem matemática para a predição da fluência já possuía ferramental para ser modelada as primeiras expressões empíricas, tomando como base o banco de dados resultante dos ensaios realizados pelos percussores no assunto, ganhando forma a curva do comportamento deformacional do concreto ao longo do tempo, como citado em Bažant (1988).

Com a utilização em grande escala por parte dos centros acadêmicos dos microscópios eletrônicos e outros aparelhos capazes de revelar direta ou indiretamente características microestruturais do concreto, principalmente a partir de meados da metade do século XX, as primeiras hipóteses explicativas começaram a ser formuladas para o fenômeno da fluência a partir da microestrutura do concreto, porém ainda de forma incompleta, como abordado no clássico trabalho de Czernin (1962), que persiste até o presente momento. Tal dificuldade em se conhecer o mecanismo de desenvolvimento da fluência no concreto está associada a diversos fatores limitantes de origem técnica (equipamentos atuais, embora avançados, ainda não permitem precisão suficiente para acompanhar o fenômeno da fluência de forma clara e elucidativa em escala microscópica ao longo do tempo) como da própria origem do efeito da fluência (mecanismos físico-químicos interativos). Algumas pesquisas apontam perspectivas de hipóteses para a explicação do fenômeno a nível microscópico, como as propostas por Sierra (1980), Ulm e Acker (1997) e Bažant *et al.* (1997), porém requerem maiores testes e estudos conclusivos.

Outra vertente que teve grande avanço no ramo da fluência refere-se à sua modelagem e predição. Banco de dados cada vez mais robustos de resultados de ensaios começaram a ser utilizados para delinear expressões matemáticas, a maioria delas empíricas e semi-empíricas, permitindo assim melhores condições de se conhecer o comportamento da fluência sem maiores testes e utilizá-las em projetos estruturais de uma forma um pouco mais realista. Quando os computadores pessoais passaram a ser mais acessíveis à população, houve uma ascendência expressiva no aparecimento de novos modelos matemáticos, cada vez mais detalhistas, considerando vários fatores intervenientes de origem externa e interna à estrutura na fluência, o que permitiu a uso das regressões múltiplas não-lineares como ferramenta indispensável no campo empírico no mundo dos ensaios. Apesar das expressões de fluência serem, em sua maioria, baseadas em modelos determinísticos, expressões associadas a modelos probabilísticos vem alcançando seu espaço e ganhando maior confiabilidade para representar o fenômeno com maior segurança.

Nos dias atuais, a fluência já pode ser apresentada como um fenômeno que possui seus fatores influentes bem caracterizados e quantificados, uma modelagem matemática capaz de predizê-la junto a estruturas das mais variadas geometrias com certa precisão, porém ainda com lacunas no estado do conhecimento relacionadas ao mecanismo de atuação na escala microestrutural do concreto. Há ainda restrições no âmbito do estudo experimental, carência de pesquisa do efeito de novos materiais sobre a fluência, dificuldade na distinção dos vários

fenômenos deformacionais que ocorrem simultaneamente no concreto (retração autógena, retração hidráulica, fluência básica e por secagem, deformação elástica, etc), etc.

Os desafios não se restringem somente no campo técnico. A forma como lidar com ensaios de fluência, de maneira unificada mundialmente, ainda está longe de ser alcançada, assim como para outras propriedades do concreto. Muitas normas internacionais adotam procedimentos distintos de execução do ensaio de fluência, como por exemplo, a brasileira NBR 8224 (ABNT, 1983) e a americana C-512 (ASTM, 2002), o que dificulta sobremaneira o uso dos resultados provenientes desses ensaios em uma escala mundial. Enfim, percebe-se diante deste breve histórico que mesmo já tendo sido alcançado grande êxito em vários ramos associados ao estudo da fluência, ainda há muito o que se almejar, não só pelo que ainda não foi definitivamente resolvido, mas também pelos novos desafios que surgem com a evolução tecnológica do concreto, tanto nos aspectos de projeto e execução quanto dos novos materiais incorporados ao concreto que não param de surgir.

No campo da aplicação, a fluência tem seu lugar de destaque quando se trata de estruturas que demandam de um rigoroso controle da deformação, como em situações de estruturas de concreto protendidas, onde a perda de protensão está intimamente ligada à maior capacidade do concreto em se deformar sobre carregamento ao longo do tempo. Essa preocupação vem aumentando a partir do momento que se percebe a nítida evolução no conhecimento do fenômeno, mesmo que esta preocupação esteja mais associada à suas conseqüências do que com a sua causa. Partindo para o outro extremo das estruturas de concreto, as de grande porte, como o concreto utilizado em barragens, a fluência tem papel importante na ocorrência de fissuras de origem térmica. O concreto utilizado nessas estruturas, definido como concreto massa, deve ser dosado e seu lançamento estudado para que o calor de hidratação dos compostos cimentícios do concreto não sejam suficientes para fissurar a estrutura. A fluência no concreto massa pode ser decisiva na atuação sobre o problema térmico, pois é capaz de contribuir para redução da probabilidade de fissuras, quando for possível reduzi-la nas primeiras idades e aumentá-la em idades mais avançadas, incrementando a capacidade deformacional da estrutura. Pode ainda potencializar o aparecimento de fissuras de origem térmica quando a magnitude da fluência for aumentada nas primeiras idades e reduzida com o passar do tempo, amenizando o acúmulo de tensão de compressão na fase de aquecimento da estrutura e posteriormente contribuindo para o aumento das tensões de tração na fase de resfriamento. Toda essa problemática é considerada em aplicativos computacionais, alguns deles avançados outros nem tanto, mas todos de alguma forma tentando representar a fluência,

já que a sua omissão nas simulações pode acarretar em desvios na predição do problema *in loco*.

2.3. FLUÊNCIA NO CONCRETO

2.3.1 Definição

O fenômeno de deformação gradual ao longo do tempo, sob certo nível constante de tensão aplicada ao corpo sólido, é denominado *fluência*. As deformações dos materiais, incluindo o concreto, do ponto de vista da mecânica dos sólidos, podem se enquadrar inevitavelmente em um dos três tipos: deformação elástica, plástica ou viscosa, ou ainda combinação delas: elasto-plástica ou visco-elástica, conforme apresentada na figura 2.1. As deformações elástica e plástica estão associadas à manutenção e alteração das dimensões volumétricas do material quando cessado o carregamento, respectivamente (Figura 1.b); já a deformação viscosa está associada com a alteração volumétrica do material, mantido o carregamento no tempo (Figura 1.1.a).

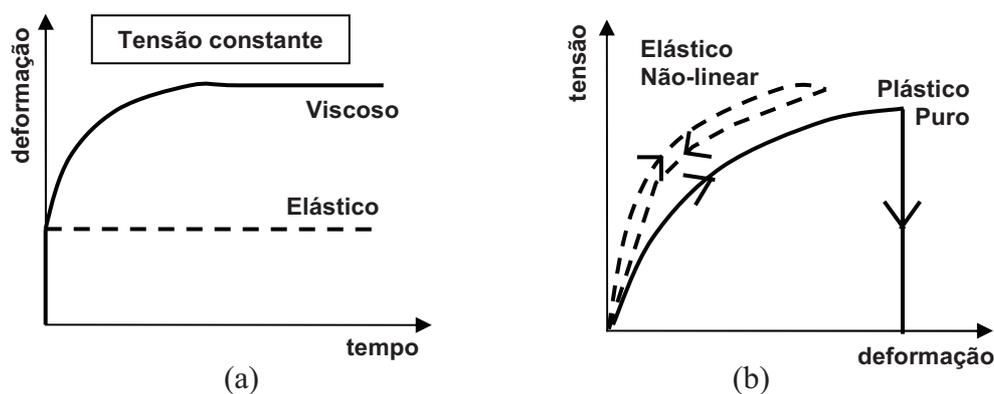


Figura 2.1: Comportamentos simplificados típicos dos sólidos sob carga. (a) Tensão constante. (b) Tensão variando.

O concreto além de possuir comportamento viscoso sob carregamento, caso haja descarregamento do material, parte de sua deformação retorna ao estágio original – efeito elástico – mas ainda acumulando parte da mesma – efeito plástico. Logo, para melhor sintetizar sua definição mediante a mecânica dos sólidos, seu comportamento seria: *visco-elasto-plástico*, correspondente ao estado viscoso da Figura 2.1.a e intermediário entre o estado plástico puro e elástico não-linear da Figura 2.1.b. Como é fato conhecido que o comportamento do concreto sob tensão é *elasto-plástico* sob certo nível de carregamento,

pode-se chamar resumidamente o comportamento da fluência como tão somente de *viscoelástico*, subtendendo-se que uma parcela da sua deformação pode ter característica plástica, comum aos concretos.

2.3.2 Mecanismos de Fluência

Diversas são as dificuldades em se conhecer detalhes do mecanismo de fluência do concreto, uma vez que sua origem se encontra na escala micro e nanométrica dos materiais, e ainda o fenômeno possui um vasto número de fatores intervenientes. Sabe-se, contudo que sua principal causa está relacionada com a presença da água na matriz cimentícia que ao ser expulsa sob carga tende a variar o volume do concreto, promovendo efeitos deformacionais significativos nas peças estruturais. Segundo Young *et al.* (1988) e Mehta e Monteiro (1994) a água na pasta já endurecida pode estar contida em pequenos vazios, que possuem dimensões inferiores a 50nm, e englobam desde meso-poros capilares até pequenos interstícios ocupados por água adsorvida pelo silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e entre suas lamelas – microporos - conforme apresentado na tabela 2.1. É interessante ressaltar que esses pequenos vazios apresentam grande representatividade em relação ao maciço da pasta hidratada, o que confirma a importância em se conhecer este efeito em detrimento do estudo da fluência no concreto como um todo. Destaca-se ainda que os macro-poros e os vazios de maiores dimensões – diâmetros acima de 50nm – apesar de não estarem ligados diretamente com o efeito da fluência, contribuem para o fenômeno, facilitando o mecanismo de migração de água para o ambiente.

Todos os modelos que tentam explicar a fluência no âmbito microscópico baseiam-se no princípio de que o meio poroso da pasta endurecida ou em fase de envelhecimento³ se encontra sob estado tensional tracionado em função das atrações inter-partículas geradas ao longo da hidratação do cimento, às quais conferem o estado aglomerado das partículas do cimento e de todas as outras que elas envolvem (agregados). Essas forças em termos energéticos são tão maiores quanto menores forem os espaços deixados pelas partículas. Sierra (1980) adotando o modelo de Feldman e Sereda (1968) propõe que a energia de ligação da água adsorvida presente entre os folhetos de C-S-H (da ordem de 1,5nm) é mais significativa do que as entre lamelas de C-S-H (grupo de folhetos com distâncias superiores a 3,0nm).

³ Quando na tese for mencionado o termo “envelhecimento” da pasta de cimento ou do concreto o autor refere-se ao processo de hidratação das partículas de cimento que está em andamento.

Tabela 2.1: Classificação dos poros da pasta de cimento endurecida. (Adaptada de Young *et al.* (1988)).

Descrição do Poro	Diâmetro	Observação
Micro-poros	$<2,5\text{nm}$ ($2,5 \cdot 10^{-3}\mu\text{m}$)	Interno às lamelas de C-S-H.
Meso-poros	$2,5\text{nm} - 50\text{nm}$ ($50 \cdot 10^{-3}\mu\text{m}$)	Poros capilares (inclui os micro-poros).
Macro-poros	$50\text{nm} - 10.000\text{nm}$ ($10\mu\text{m}$)	
Ar incorporado	$10.000\text{nm} - 100.000\text{nm}$ ($100\mu\text{m}$)	Indiretamente relacionados ao efeito da retração e fluência.
Ar aprisionado		
Microfissuras pré-existent		

A partir do princípio citado no parágrafo anterior, adota-se a idéia de que a água, tanto a adsorvida nas partículas de C-S-H quanto às presentes nos meso-poros, tende a impedir de forma mais expressiva a contração dos espaços vazios deixados pelas partículas hidratadas do que as águas presentes nos poros maiores (YOUNG *et al.*, 1988). Esses vazios maiores serão os primeiros onde haverá a perda d'água para o ambiente externo em decorrência da presença de um gradiente de umidade relativa.

Quando por algum motivo surgirem esforços externos que perturbem o equilíbrio de forças nas interfaces tensionadas da água com os hidratos do cimento, inicia-se a migração da água dos meso e micro-poros para os espaços de poros maiores, promovendo assim minúsculos movimentos entre partículas hidratadas de aglomerante que se somados resultam no efeito deformacional macroscópico de fluência. Tal evento é função: do tempo de manutenção do esforço externo, que forcem essa movimentação, das dimensões e quantidades desses vazios e de uma constante denominada *difusão*. Pode-se inferir que este estado de migração ou de *micro-difusão*⁴ da água está diretamente relacionado com o grau de hidratação das partículas de cimento, estágio este mais significativo nas primeiras idades do concreto. Esse processo de redistribuição interna de água nos poros capilares é conhecido por *fluência de curta duração* (ULM e ACKER, 1997), pois ocorre mais significativamente nas primeiras idades quando o processo de hidratação dos compostos cimentícios e de enrijecimento da pasta são mais substanciais.

Atingido boa parte da hidratação do cimento, o efeito viscoso do concreto pode estar agora associado ao deslocamento relativo das lâminas de C-S-H do cimento, e não somente à

⁴ Termo utilizado por Ullm *et al.* (2000) em sua pesquisa.

difusão da água pelos micro-poros dos compostos hidratados. Bažant *et al.* (1997) propõe a idéia de que as moléculas de água dentro dos micro-poros, fortemente aderidas por adsorção, no estágio avançado de hidratação do cimento, encontram-se sob alto estado de concentração de tensão contra as interfaces dos compostos hidratados do cimento (entre folhelho e lamelas de C-S-H). Aplicado algum esforço externo ao material, o C-S-H tenderia a se deslocar sob efeito de cisalhamento de uma lâmina em relação à outra, promovendo a relaxação nos micro-poros e levando ao efeito da fluência ao longo do tempo sob tensão macroscópica constante (*fluência de longa duração*). Esse segundo estágio de fluência, quando ocorre microcisalhamento entre folhelhos e lamelas de C-S-H, pode explicar a parcela irreversível do efeito da fluência.

2.3.3 Fatores Influentes

A presença de água no interior do maciço de concreto, mais precisamente nos micro-poros, é o principal motivo da ocorrência de fluência em uma estrutura de concreto submetido junto a um carregamento. Como a água está inerentemente aderida ao corpo do concreto, subtende-se que o efeito da fluência é praticamente inevitável quando sob carga. A partir desta linha de raciocínio, percebe-se que apesar do efeito da fluência se processar internamente ao maciço de concreto ele está também relacionado com efeitos externos, pois tanto o carregamento quanto a umidade externa ditam diretamente a capacidade da estrutura de concreto se deformar a partir do efeito da fluência.

Para facilitar, propõem-se dividir os fatores influentes em dois grandes grupos: *primários* e *secundários*. Os fatores primários estão diretamente relacionados com o efeito da fluência, ou seja, com a sua origem. Todos os outros fatores que interferem nos primários podem ser denominados secundários. É importante ressaltar que apesar do encadeamento de efeitos do primário com o secundário, ambos devem ser avaliados com a devida atenção, uma vez que tanto um quanto o outro podem interferir significativamente na fluência.

Os principais fatores primários são: umidade do concreto (interfere no mecanismo de fluência), temperatura e idade do concreto (interfere no grau de hidratação do aglomerante), materiais componentes do concreto (onde a fluência ocorre), idade de início do carregamento (a microestrutura do concreto evolui com a idade) e nível e forma de carregamento (propulsor da fluência). Já os principais fatores secundários podem ser assim destacados: condições ambientais do entorno da estrutura (temperatura, umidade, etc) e geometria da estrutura.

Nota-se neste agrupamento de fatores influentes que a maioria deles não são independentes entre si, ainda que estejam dentro do mesmo grupo (primário ou secundário), demonstrando desta forma a alta complexidade em se analisar os efeitos de cada um deles isoladamente.

Efeito da umidade

A umidade interna (fator primário) e externa (fator secundário) ao concreto influencia direta e indiretamente na fluência, respectivamente. A umidade interna serve como meio para que o concreto possa se deformar quando sujeito ao carregamento. Destaca-se, entretanto, que a parcela de água livre, utilizada para tão somente dar trabalhabilidade à mistura e que se localiza nos macro-poros, não interferem de forma significativa no processo de fluência, conforme pode ser verificado nos trechos A-B da Figura 2.2. Percebe-se ainda nesta figura que a umidade externa dita a taxa de perda de umidade interna para o ambiente, onde maiores gradientes de umidade provocam maiores níveis de deformação no material, seja por fluência ou por retração hidráulica.

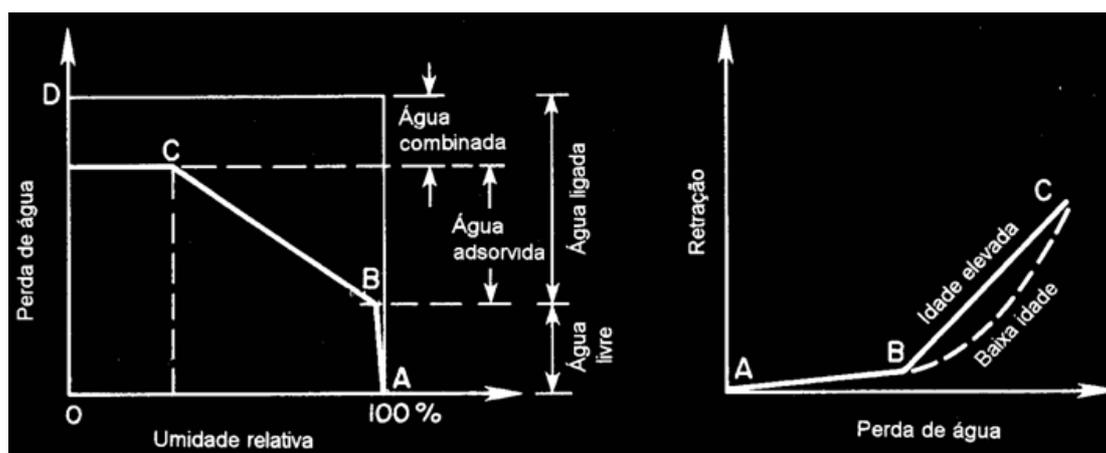


Figura 2.2: Efeito da umidade ambiente e interna do concreto na retração. Adaptado de L'Hermite (1960) *apud* Mehta e Monteiro (1994).

É importante destacar, na situação do concreto sob tensão e ainda exposto ao ambiente, que a umidade interna por si só não propicia a deformação por fluência, mas sim quando há um gradiente de umidade em relação à externa, normalmente mais alta nas primeiras idades após a moldagem do concreto. A esse efeito composto: deformação por tensão aplicada em conjunto com o gradiente de umidade, denomina-se *fluência por secagem*. Por outro lado, caso haja equilíbrio da umidade interna com a externa ou impedimento de contato do concreto com o ambiente, ainda assim poderá ocorrer a fluência, já que a umidade interna serve apenas

como meio para que a deformação por fluência ocorra e não a gera isoladamente, mas na verdade sob a presença de carga. Pode-se denominar essa *fluência de básica*, pois sua única causa é a ação do carregamento e não a migração de umidade para o exterior provocado por um gradiente de umidade. Assim o efeito combinado de fluência por secagem mais a básica é denominado de *fluência total*, conforme ilustrada na figura 2.3.

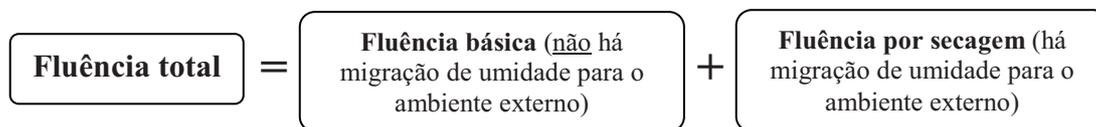


Figura 2.3: Composição da fluência total.

A fluência por secagem é mais significativa em concretos com vazios de maior dimensão (macro-poros) e em grande quantidade, pois facilita a difusão de umidade internamente a matriz cimentícia e ainda pode ocorrer em maior intensidade em peças estruturais com maior área exposta a secagem em relação ao seu volume (como lajes e grandes placas). Já a fluência básica normalmente se sobressai em concretos mais compactos, com maior presença de finos (maior consumo de aglomerante e adições), e ainda em peças estruturais de grandes volumes e de pequenas áreas de exposição ao ambiente externo, como ocorre em blocos de concreto massa.

Para exemplificar o grau de influência da umidade relativa do ar na fluência resultados apresentados por Sakata e Ayano (2000) confirmam que a fluência total pode ser reduzida em torno de 20%, quando há um aumento da umidade de 40% para 70%, na idade de 28 dias a uma temperatura de aproximadamente 20°C.

Efeito da Temperatura

A temperatura pode influenciar no processo de fluência do concreto nas primeiras idades, onde atua como um catalisador natural das reações de hidratação dos aglomerantes. Como destacado nos mecanismos de fluência, a velocidade de hidratação interfere na fluência, pois os produtos provenientes desta hidratação devem apresentar distribuição e morfologia diferenciada dependendo da temperatura de exposição. Nesta fase ocorre ainda a modificação da viscosidade do fluido e o surgimento de vapor d'água sob pressão nos micro e meso-poros (NEVILLE, 1970). Este mesmo autor relata que a fluência tende a ser maior em concretos sujeitos a maiores temperaturas, muitas vezes sendo a fluência proporcional ao efeito da temperatura até valores da ordem de 70°C, independentemente de ensaios realizados em

corpos de prova selados ou imersos em água. Outros resultados obtidos por England e Ross (1962) e Arthanari e Yu (1967) confirmaram essa linearidade para temperatura de exposição entre 20°C até 80°C. Estudos mais recentes (SAKATA e AYANO, 2000) concluíram que a relação linear também pode ser considerada até o limite inferior de temperatura de 5°C, independente da idade de carregamento do concreto.

Para idades onde a hidratação do cimento já praticamente se encontra estabilizada, o efeito da temperatura pode ainda promover aumento da fluência caso a temperatura atue no decorrer da aplicação da carga. Resultados apresentados por Brooks (1994) indicam aumentos até a temperatura de 50°C. Segundo o autor este fato pode estar relacionado com a saída da água evaporável dos meso-poros da pasta, como também com a modificação da viscosidade do fluido. Caso haja aumento da temperatura no processo de cura do concreto, antes da aplicação da carga, a fluência tenderá a ser inferior devido aos possíveis ganhos de resistência em relação ao concreto de referência. Browne (1967) relata em sua pesquisa que acréscimos de temperatura nas idades acima de 100 dias não interferem significativamente na fluência para concretos protendidos utilizados em vasos de pressão de usinas nucleares.

Sendo assim, é importante que se tenha o controle da temperatura ao se analisar outros efeitos sobre a fluência, pois ela pode interferir nos resultados de maneira expressiva, não se podendo afirmar em situação de grande variabilidade de temperatura ou em ensaios conduzidos a temperatura diferentes se a fluência foi ocasionada pela mudança na temperatura ou devido a outros motivos avaliados.

Efeito dos materiais e suas misturas no concreto

A fluência tem relação direta com a pasta de cimento e sua hidratação. Maiores volumes de pasta geram maiores valores de fluência em concretos com mesma resistência. Já os agregados⁵, devido à sua maior rigidez e inércia perante a hidratação do cimento, funcionam como um amenizador das deformações provenientes da fluência, se comportando como um esqueleto sólido que restringe as deformações.

⁵ O tipo de agregado considerado neste parágrafo refere-se ao de peso específico normal e com módulo de elasticidade inferior ao da pasta de cimento.

Para dosagens de concreto comuns⁶ o volume de pasta pode variar aproximadamente de 20% a 40%. Dentro deste intervalo a fluência pode alterar expressivamente - em torno de até quatro vezes, segundo relatos da *Concrete Society* (1973), porém não só em função da alteração do volume de pasta como também pela mudança de outras características das dosagens, com destaque para a relação água-cimento (a/c), consumo de água e de cimento.

A relação a/c tem sua ligação direta com o efeito da fluência, pois a partir dela associa-se a porosidade da pasta de cimento e ainda o montante de água armazenado no concreto. Alta relação a/c implica em maiores poros e maior volume de água retido que tendem a aumentar a fluência do concreto, como observado no trabalho de Botassi *et al.* (2010). Isto porque a água em excesso tende a sair do concreto, deixando vazios que facilitam a difusão da água interna à pasta de cimento quando endurecido, seja ela para o ambiente como para outras regiões internas, e conseqüentemente aumentam o poder deformacional no maciço do concreto quando aplicada uma carga. Esses vazios ainda reduzem a resistência mecânica do concreto, pois torna a matriz mais porosa, facilitando ainda mais a deformação por fluência. Caso seja inserida na composição do concreto um aditivo plastificante, a relação a/c pode ser reduzida e conseqüentemente alterar a fluência do concreto.

Os parâmetros associados aos agregados podem ter influência sob a fluência, uns com mais outros com menos significância. No caso do volume de agregado é óbvia sua relação com a fluência, pois ele complementa o volume de pasta de cimento. Outra característica do agregado que se mostra importante na fluência é o seu módulo de deformação. Estudos efetuados por Troxell *et al.* (1958) *apud* Mehta e Monteiro (1994) indicam alterações substanciais na fluência do concreto quando modificado o tipo litológico do agregado. Tal explicação pode estar associada a diferenças de rigidez dos agregados em relação à pasta de cimento, promovendo microfissurações na zona de transição pasta-agregado que alteram o comportamento da fluência e ainda respostas de deformações diferenciadas e tardias. A forma e a textura dos agregados pode interferir no processo de fluência, porém necessitam ser avaliados com cautela para que outros fatores intervenientes não se sobressaiam ao efeito dos agregados.

Por fim, o cimento tem especial papel interveniente na fluência. Sua composição química e morfológica pode modificar completamente o comportamento da fluência do concreto, assim

⁶ Deve-se entender por concreto comum aquele que não é de alta resistência, muito menos concreto bombeável, concreto alto adensável ou qualquer outro que fuja das proporções normalmente utilizadas na construção civil.

como de outras propriedades (resistência mecânica, comportamento reológico, etc). Tanto os cimentos compostos, que possuem outros materiais em sua composição, como a forma de produção do cimento (tempo de queima e moagem do *clinker*) propiciam mudanças características no concreto que devem ser avaliadas em particular quando se deseja verificar a fluência. Dentro dos cimentos compostos pode-se ter ainda a presença das adições minerais. Elas introduzem alterações significativas ao concreto, desde a fase fresca até em idades avançadas e, portanto, na fluência. As adições serão tratadas em um item particular desta tese, um vez que elas fazem parte de um dos objetivos da pesquisa.

Efeito do nível e forma de carregamento

Quando há variação das tensões ao longo do tempo deduz-se que possa ocorrer efeito sobreposto das deformações infinitesimais devido a cada incremento de tensão. A este princípio da-se o nome de: *superposição de efeitos*. Baseado nesta consideração admite-se a proporcionalidade das tensões com as deformações devido à fluência em intervalos de carregamento de até 30% a 40% da carga limite de ruptura do concreto. Este efeito aproximado é adotado para simplificar algo que na verdade é extremamente complexo, uma vez que os níveis de confinamento podem provocar efeitos acoplados que interfeririam na própria fluência, além de gerarem microfissuras no interior do maciço, mais especificamente na transição pasta-agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Contudo, se esse princípio não fosse aceito praticamente inviabilizaria a realização de ensaios de fluência, pois os resultados deles provenientes não poderiam ser extrapolados a outros estados de tensão e ainda tornariam muitos dos modelos de fluência mais difíceis de serem manipulados.

Acima de 40% da carga limite de ruptura, micro-fissuras mais significativas contribuem para um aumento da deformação total e para um comportamento não-linear mais acentuado. A linearidade entre a tensão aplicada e a deformação por fluência é limitada e dependente da idade de início de carregamento. Para idades recentes de carregamento (em torno de até 3 dias) a fluência apresenta comportamento não-linear expressivo e deve ser interpretada com cautela.

Nasser e Al-Manaseer (1986) comprovaram experimentalmente que a relação linear existente entre a fluência e tensão aplicada é válida também para concretos com adição de cinza volante. Porém, constatou-se que a fluência por secagem do concreto com adição em relação ao concreto sem adição reduziu com o aumento da carga aplicada, a ponto de haver redução

de mais 400%. Concretos com adição, para o nível de carregamento de 10% da resistência à compressão, possuíam valor de fluência 150% maior que a referência. Quando aplicada tensões de 50% da resistência à compressão houve redução do efeito da fluência do concreto com adição para aproximadamente 46% superior ao da referência. O mesmo efeito não foi percebido quando foram realizados ensaios de fluência básica. O comportamento apresentado neste caso foi aleatório.

Gardner e Tsuruta (2004), por meio de ensaios realizados, alertam que cuidados devem ser tomados quando se necessita considerar o princípio da superposição na fluência em situação de corpos de prova sujeitos a secagem. Eles apresentam valores de fluência 10% a 20% maiores quando o acréscimo de tensão ocorre no decorrer da exposição à secagem em relação a corpos de prova submetidos a carregamentos a idades posteriores a secagem.

O efeito provocado pela forma de carregamento na fluência pode ser bastante variável, seja pelo efeito da taxa de carregamento no tempo ou pelo estado de confinamento em que o concreto se encontra. Alguns resultados e discussões podem ser encontrados nos trabalhos de Neville (1970), Chuang *et al.* (1972), MacDonald (1972), Murcia (1995) e Botassi *et al.* (2003). Destaque pode ser dado ao estado tensional de tração, uma vez que pode ser facilmente encontrado em parte ou no todo de uma estrutura ou peça de concreto. Neville (1970) relata em alguns dos seus trabalhos que a fluência na tração possui comportamento semelhante ao da compressão, podendo alcançar valores de fluência superiores ao da compressão nas primeiras idades, mas sendo superado em idades mais avançadas.

Efeito da idade de início de carregamento

O efeito da idade de início de carregamento está atrelado ao grau de hidratação⁷ em que se encontra a pasta de cimento neste momento e pode ser associado ao nível de resistência mecânica atingido pelo concreto. Em um concreto com alto grau de hidratação que possua resistência quase que plenamente desenvolvida pode apresentar baixas taxas de deformação por fluência, porém se avaliado dois concretos diferentes de mesma resistência mecânica e proporção dos materiais a fluência entre eles pode ser completamente distinta, uma vez que há outros parâmetros envolvidos no efeito da fluência que tão somente a resistência mecânica.

De uma forma geral, quanto maior a idade de início do carregamento menor será o efeito na fluência, pois ele estará com boa parte da matriz cimentícia hidratada e mais bem formada,

⁷ Medida da hidratação do cimento relacionando a massa hidratada com a massa total de cimento.

conseqüentemente mais fortalecido estará o concreto para resistir às deformações provocadas pela solicitação a tensão do maciço, além de possivelmente haver menor quantidade de água adsorvida; água esta propulsora do fenômeno da fluência. Na figura 2.4 segue apresentado esse efeito para duas idades de início de carregamento t_1 e t_2 , sendo t_2 maior que t_1 .

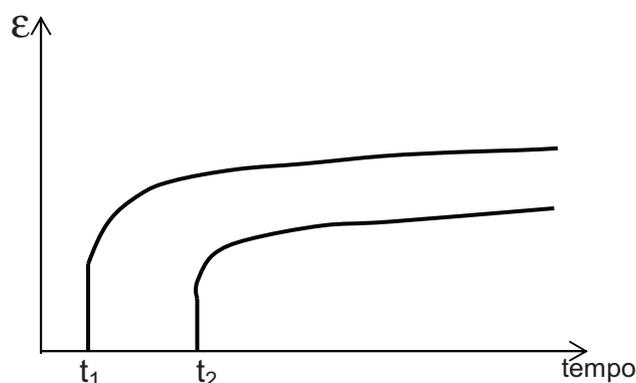


Figura 2.4: Comportamento da fluência para duas idades de início de carregamento distintas.

Uma formulação que pode associar a idade de carregamento (t_0) à taxa de fluência variando com o logaritmo do tempo $F(t_0)$ está apresentada na expressão 2.1 (maiores detalhes consultar item 5.5.2). Esta expressão é regularmente utilizada para análises tensionais conforme destacado em Gambale *et al.* (1992), Equipe de Furnas (1997) e Santos (2004), onde os coeficientes a e b são obtidos por meio de curvas ajustadas a partir de resultados de ensaio. Outras expressões envolvendo idade de início de carregamento e fluência podem ser encontradas no trabalho de Santos (2004).

$$F(t_0) = a + \frac{b}{t_0} \quad (2.1)$$

Os resultados provenientes do ensaio de fluência, conforme apresentado na Figura 2.4, devem ser avaliados com cuidado, pois o ensaio deve ser conduzido com a manutenção da relação tensão/resistência constante, o que normalmente não ocorre. Os ensaios de fluência tendem a ser realizados com um nível de tensão/resistência decrescente com a duração do ensaio, pois o valor da carga é mantida constante enquanto a resistência aumenta. Para que a relação se mantenha constante deve-se conhecer *a priori* a evolução da resistência e acompanhar o carregamento de ensaio de fluência de forma crescente na mesma taxa de crescimento da resistência. Já para o caso em que não há a manutenção da relação tensão/resistência constante e somente a carga aplicada é mantida inalterada, deve-se corrigir as deformações provenientes

do ensaio de fluência a partir da simples relação proposta por Neville (1970), denominada de R_f , conforme a expressão 2.2. Essa correção deve ser feita a partir da resistência à compressão e não por outra propriedade mecânica do concreto, pois, caso contrário, não se poderá garantir que a relação tensão/resistência foi mantida inalterada.

$$R_f = \frac{f_{cj} - f_{c0}}{f_{c0}} \quad (2.2)$$

Assim, a partir do crescimento da resistência à compressão f_{cj} com o andamento do ensaio e o concreto possuindo sua resistência inicial à compressão f_{c0} seria possível aplicar a expressão 2.2 para corrigir os resultados de fluência admitindo a proporcionalidade entre a tensão e deformação e o princípio da superposição.

A expressão 2.2, segundo Neville (1970), pode representar o efeito da idade de carregamento na fluência. Nas primeiras idades o concreto por possuir baixa resistência tende a obter grande valor de R_f ao final do ensaio. Caso seja mantida a relação tensão/resistência constante, a fluência tenderá a ser significativa. Logo, para valores elevados de R_f a fluência tende a ser grande, pois R_f representa o quanto o concreto jovem possui potencial de aumento da fluência. Por outro lado, para idades mais avançadas de início do carregamento de fluência, R_f será menor e a fluência, como já se sabe, também possuirá menores valores de deformação.

Geometria da estrutura

A geometria da estrutura pode influenciar o efeito da fluência, pois a difusão de água pelos microporos está associada às dimensões da estrutura. Dimensões elevadas dificultam a propagação do fluido pelo concreto quando submetido ao carregamento, além de manter mais homogêneo o nível de umidade no interior do maciço, tendendo assim a reduzir os efeitos da fluência por secagem. Segundo Neville (1970), em testes efetuados em corpos de prova, a fluência foi reduzida quando utilizado corpos de prova maiores para as mesmas condições de ensaio.

O efeito da geometria da estrutura pode ser representado pela espessura fictícia⁸. Ela normalmente relaciona a área exposta ao ambiente com seu perímetro, obtendo um valor

⁸ Princípio adotado por várias normas e recomendações técnicas internacionais (CEB, Eurocode, etc), inclusive a norma brasileira NBR6118/03.

unidimensional de distância relacionada a uma espessura. Maiores valores da espessura fictícia indicam uma menor propensão do concreto de se deformar por fluência por secagem.

Como já mencionado anteriormente, geometria de peças estruturais onde se privilegia maior área de exposição ao ambiente em relação ao seu volume (i.e.: lajes e placas), há a tendência da fluência por secagem ser mais significativa do que a fluência básica. Já para peças de estruturas onde o volume de concreto é mais substancial do que a sua área exposta ao ambiente, a fluência por secagem tende a se abrandar em relação à fluência básica.

2.3.4 Predição da Fluência

A predição da fluência é uma tarefa um tanto quanto difícil. Isto se deve principalmente ao grande número de variáveis intervenientes no fenômeno e que ainda são muitas vezes de difícil obtenção. Boa parte dos modelos de predição está associada às características intrínsecas do concreto, tais como: relação a/c, resistência à compressão, volume de pasta, tipo de cimento empregado, etc; e também a características extrínsecas, tais como: umidade e temperatura ambiente, dimensões da estrutura, etc. Neste grupo de modelos encontram-se a maioria das formulações preconizadas por normas e instituições internacionais (CEB, ACI, ABNT, EUROCODE, etc), bem como por renomados pesquisadores da área, tais como: Bažant, L'Hermite, Ross e Dilger, citados na dissertação de Botassi (2004).

Outros tipos de modelos de predição são ajustados aos resultados de ensaios de fluência, sendo desta forma mais restritos a algumas determinadas situações, porém sendo mais precisos nas suas previsões. Nesses modelos adotam-se formulações matemáticas para se tentar prever o comportamento da fluência, a partir de equações pré-definidas onde os coeficientes que as integram são obtidos por meio de ajuste de curvas com base em resultados de ensaios. Maiores detalhes destas e outras formulações podem ser obtidas em Santos (2004), Hasparyk *et al.* (2005) e Botassi *et al.* (2007).

As dificuldades de predição da fluência a partir de modelos pré-definidos se deparam ainda com a falta de padronização tanto no procedimento de ensaio, como na interpretação dos resultados. Como a maioria dos modelos normalmente é ajustada, mesmo que em parte, em função de um banco de dados de fluência, os resultados deles provenientes deveriam ser obtidos por meio de ensaios normalizados por um único procedimento internacional, o que na prática não ocorre. Essa dificuldade é semelhante para outros parâmetros do concreto, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, contudo, na fluência as diferentes

práticas de condução do ensaio podem gerar resultados exageradamente desproporcionais, como por exemplo, na alteração da temperatura e umidade de realização do ensaio, na forma de aplicação da carga, etc. Os resultados advindos dos ensaios e dos modelos de predição também carecem de grande cuidado e tornam alguns modelos de difícil comparação, pois a fluência pode ser representada de várias maneiras - por meio de coeficientes, funções, taxas de crescimento de deformação, etc. Isso pode ocasionar problemas, uma vez que dependendo da forma como se representa a fluência e a interpreta pode conduzir a diferentes conclusões. Frente a estas dificuldades torna-se interessante “customizar” esses modelos a situações mais restritas de aplicação, porém de melhor fidelidade na representação do comportamento da fluência, como proposto nos trabalhos de Botassi *et al.* (2007) e Botassi *et al.* (2010) para concretos massa produzido no Brasil.

2.3.5 Efeitos na Estrutura

A fluência no concreto pode ser tanto benéfica quanto indesejável, dependendo da estrutura analisada e em que situação ela está atuando. Estudos mais aprofundados podem ser encontrados em Mullick (1994) e Brooks (1994 a).

De uma forma geral, a fluência atua em estruturas de concreto reduzindo as tensões internas devido a não-uniformidade da deformação ou restrição, propiciando uma redução do aparecimento de fissuras, uma vez que ela converte tensão acumulada em deformação. Em estudos efetuados por Botassi *et al.* (2004) verificou-se o efeito amenizador da fluência nas tensões de origem térmica para um concreto massa, mesmo considerando que ela também diminui as tensões de compressão que tenderiam a aliviar as tensões de tração, como afirma Neville (1997). Tal fato está intimamente relacionado à perda de calor para o meio externo, pois quando ela é mais intensa, as tensões de tração de origem térmica atuarão logo nas primeiras idades e, por conseguinte a fluência teria o efeito benéfico de alívio dessas tensões. Caso a perda de calor seja mais branda, haverá um maior acúmulo de temperatura interna do concreto massa, o que levaria inicialmente a tensões de compressão minimizadas pela fluência mais significativa devido a baixa rigidez da estrutura. Ao se resfriar em idades mais avançadas as tensões de tração aparecerão com maior intensidade, pois a fluência atuará em um concreto com matriz cimentícia de maior rigidez devido ao estado de hidratação mais avançado.

No caso de vigas carregadas, a fluência tende a atuar no aumento da flecha, ao qual pode alcançar valores críticos de projeto como observados no trabalho de Bažant *et. al.* (2011). Em vigas protendidas (armadura ativa) a fluência causa uma diminuição da protensão dos cabos e uma conseqüente redução da eficiência da peça. Já para o caso de pilares, a fluência transfere gradualmente a carga do concreto para a armadura, o que leva a uma deformação lenta e progressiva do pilar como um todo (NEVILLE, 1970; 1997). Em pilares esbeltos deve-se ainda atentar para o efeito de 2ª ordem que a fluência em conjunto com outros fenômenos pode provocar, conforme apresentado na NBR 6118 (ABNT, 2003).

Em prédios com muitos andares, normalmente maiores que 30, pode haver problemas de fluência e retração devido à deformação diferencial inelástica, podendo chegar a valores maiores que a deformação elástica (MULLICK, 1994). Nessas estruturas, normalmente os pilares externos são mais sujeitos a intempéries (umidade e temperatura variável) que os pilares internos, por outro lado, os pilares internos normalmente são mais solicitados quanto ao carregamento que os externos, o que pode causar deformações diferenciais significativas devido à retração e fluência na estrutura como um todo.

Estudos mais recentes (SANTOS *et al.*, 2003) reforçam a importância de se verificar o efeito da fluência em direções transversais à direção de aplicação da carga, apesar de que pesquisas nesta área já vêm sendo efetuadas desde a década de 70 (NEVILLE, 1970). Cálculos tensionais envolvendo fluência são baseados, em sua grande maioria, por meio de um único coeficiente de fluência (ϕ) o qual representa de forma unidimensional o comportamento para uma estrutura espacial tridimensional. Segundo Murcia (1995), da mesma forma como se considera o efeito transversal das tensões aplicadas na direção longitudinal de uma estrutura, neste caso representado pelo coeficiente de *Poisson*, pode existir um segundo coeficiente de fluência que represente a influência temporal da carga aplicada longitudinalmente em uma direção ortogonal a mesma, gerando deformações diferidas transversais.

2.3.6 Ensaios de Fluência

A necessidade da avaliação da fluência, bem como qualquer outra propriedade que varie com o tempo, torna-se necessária quando as mesmas são expressivas em relação às deformações instantâneas. Desta forma, é interessante que engenheiros e projetistas compreendam não somente como essas deformações variam, mas também como elas podem ser medidas em laboratório e ainda como esses resultados podem ser aplicados e avaliados na condição real de

campo. Maiores detalhes sobre este assunto podem ser encontrados nos trabalhos de Mullick (1994) e Carreira & Burg (2000). Existem vários procedimentos de ensaios adotados mundialmente, tais como: NBR 8224 (ABNT, 1983) - norma brasileira, C-512 (ASTM, 2002) - americana, BS-8110 (BSI, 1997) - inglesa, CPC-12 (RILEM, 1983), etc. Todas elas diferem-se uma das outras, porém possuem características básicas semelhantes, conforme Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Resumo das principais características do ensaio de fluência.

Característica	Descrição
Tipo de Ensaio de Fluência: Básica ou por Secagem	<ul style="list-style-type: none"> • Fluência Básica: CP selado. Recomendado para concreto massa; • Fluência por Secagem: CP não-selado. Utilizado para estruturas com grande área exposta a troca de umidade com o ambiente.
Tipo de Carregamento	<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente o carregamento é de compressão (mais utilizado), porém é possível a execução em tração e flexão.
Idade de carregamento	<ul style="list-style-type: none"> • Quanto mais idades analisadas melhor será o estudo do comportamento da fluência, inclusive para adotar um melhor modelo de predição para idades mais avançadas. • Aconselha-se executar os ensaios em pelo menos 3 idades (3, 7, 28 dias), dependendo da idade de carregamento em que a estrutura estará mais sujeita aos esforços. A ASTM C 512 recomenda pelo menos 5 idades (2, 7, 28, 90 dias e 1 ano).
Tempo sobre Carga	<ul style="list-style-type: none"> • Depende da velocidade de estabilização do crescimento das deformações ao longo do tempo. Aconselha-se um tempo não inferior a 90 dias.
Meios de Leitura das Deformações	<ul style="list-style-type: none"> • Extensômetro elétrico: pode ser aderido à superfície do CP ou embutido; quando superficial é menos preciso e mais barato que o embutido; tanto o superficial quanto o embutido não são reutilizáveis. • Extensômetro ótico: grande precisão (similar ao elétrico embutido) e pode ser aplicado embutido ou aderido à superfície do CP. • Extensômetro mecânico: menos preciso, porém é utilizado em vários ensaios, logo é um meio mais barato de medida do ensaio.
Intervalo de Tempo entre Leituras de Deformação	<ul style="list-style-type: none"> • Menores intervalos de tempo nos primeiros dias (primeira semana) e mais espaçados para idades mais avançadas.
Resultados de Ensaios	<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente divide-se a deformação (adimensional) pelo valor da tensão aplicada no ensaio (1/MPa). A este valor de fluência denomina-se “fluência específica”. • Os resultados podem ser apresentados na forma de um gráfico de deformação <i>versus</i> tempo, sendo ajustada uma curva aos resultados e/ou deformação total ao final do ensaio.

O ensaio de fluência consiste basicamente, depois de moldado o corpo-de-prova com dimensões em função do diâmetro máximo do agregado e mantido em cura úmida até a idade de ensaio, colocá-lo em uma prensa com um carregamento pré-estabelecido em função de um percentual da resistência do concreto – normalmente entre 30% a 40%. Esta carga é aplicada gradativamente para que não haja problemas de impacto até o valor estipulado de tensão. A partir daí começa-se a efetuar leituras da deformação sempre com o carregamento constante, cuja tendência de crescimento das deformações vai se amenizando ao longo do tempo. É importante, quando da execução do ensaio de fluência, moldar mais corpos-de-prova para o ensaio de retração autógena onde a mesma deve ser subtraída dos resultados de fluência. Detalhes do ensaio de fluência podem ser obtidos em bibliografias específicas sobre o assunto, tais como Brooks (1994 a) e Equipe de Furnas (1997).

2.4. ADITIVOS PLASTIFICANTES

Os aditivos denominados plastificantes possuem como característica principal proporcionar ao concreto, ou a qualquer outra mistura de base cimentícia, o ganho de trabalhabilidade no estado fresco, facilitando assim sua aplicação *in loco*. A evolução desses produtos e a customização dos mesmos para aplicações nas mais variadas situações e condições vêm incentivando a criação de uma grande quantidade, tipos e marcas, conforme a necessidade do mercado. Por outro lado, a falta de conhecimento aprofundado dos mecanismos de atuação no concreto estimula o uso desses produtos a partir de testes com grande quantidade de empirismo. Neville (1970) em seu célebre trabalho, a partir dessa falta de embasamento científico, fez severas críticas ao efeito dos aditivos (redutores de água) nas propriedades do concreto, como pode ser constatado:

[...]

O problema surge desta maneira, um pouco mal definido, e isto é devido ao surgimento dos aditivos no cenário do concreto não como um agente químico cuidadosamente preparado que apresenta uma reação conhecida, mas como “medicamento” com uma composição secreta e supostamente com efeitos benéficos. Não é surpresa, entretanto, que muitos efeitos colaterais dos aditivos no concreto são desconhecidos.[...]. (NEVILLE, 1970, p.44).

A descrição dada por Neville no parágrafo anterior, apesar de se passar mais de 40 anos, ainda pode ser reconhecida como válida, pois há muitas hipóteses sobre os mecanismos de atuação dos aditivos sobre a fluência, mas poucas confirmações absolutas sobre o que se passa na interação cimento-aditivo foram devidamente comprovadas, como informado em Flatt *et al.* (1998), restando aos pesquisadores, em sua grande maioria, se aterem nas conseqüências macroscópicas sobre o efeito dos aditivos no concreto do que se emaranharem na complexidade química desses produtos e suas inter-relações com os materiais cimentícios.

É importante lembrar que a concepção original para o qual os aditivos químicos foram idealizados estavam relacionados basicamente com o ganho de plasticidade do concreto (aditivos plastificantes). Mais recentemente (por volta dos anos 80), com uso em maior escala, foram desenvolvidos os aditivos redutores de água de maior eficiência na mistura, podendo promover maior ganho de plasticidade que os aditivos plastificantes (aditivos superplastificantes). Logo, o estudo da influência desses aditivos, tanto os plastificantes como os superplastificantes, sob outras propriedades do concreto, tal como a fluência, se limitavam a poucas pesquisas e de pequena expressividade, como pôde ser constatado nos trabalhos levantados por Neville (1970) nessa época.

Neville (1997), anos depois de seu primeiro livro sobre o assunto, destaca que os aditivos, de uma maneira geral, não devem ser encarados como a solução para a falta de qualidade dos ingredientes do concreto, para proporções não adequadas da mistura, ou para o despreparo da mão-de-obra, transporte, lançamento e adensamento. Roncero (2000) comenta que os efeitos dos aditivos superplastificantes no concreto endurecido têm sido pouco analisados e os mecanismos envolvidos ainda estão longe da completa compreensão. Ramachandran (1995) afirma que existem poucos dados de ensaio a respeito da influência dos aditivos redutores de água e retardadores de pega na fluência e que a maioria deles não leva em conta os fatores influentes da propriedade de fluência. Collepardi (1995) relata em seu trabalho que existe um consenso geral, segundo ele, em que concretos com superplastificante têm aproximadamente mesmos resultados de fluência que concretos de referência, embora existam exceções, e são nelas que persistem as dúvidas sobre este estudo.

2.4.1 Definição

Os aditivos plastificantes são definidos como os produtos que, adicionados a uma mistura cimentante no estado fresco, para uma mesma relação a/c, proporcionam uma maior

trabalhabilidade. Se por outro lado, houver a necessidade de se reduzir o consumo de água, pode-se manter a trabalhabilidade inalterada, resultando na redução da relação a/c. Neste sentido os plastificantes são chamados de redutores de água.

Os superplastificantes distinguem-se dos plastificantes normais, sob o ponto de vista de seus efeitos como também das bases químicas que são compostas. A redução da relação a/c que, em média, é de 5% para um plastificante, atinge de 20% a 40% para um superplastificante, se devidamente dosado e utilizado no concreto certo. Por outro lado, a adição de um superplastificante para a mesma relação a/c pode transformar um concreto com abatimento de 10mm a 20mm em concreto fluido com abatimento superior a 200mm. (IPT, 1983)

2.4.2 Classificação

Os aditivos plastificantes (redutores de água) compõem a maioria dos tipos de aditivos químicos classificados pela norma americana C 494/C (ASTM, 1999) e pela norma brasileira EB1763 (ABNT, 1992), conforme observado no Quadro 2.2. Nesse quadro é possível ainda verificar comparativamente a classificação dos aditivos plastificantes semelhantes nas duas normas. É válido notar que na norma brasileira apesar da denominação plastificante (P) e superplastificante (SP) e suas combinações (PR, PA, SPR, SPA) podem também ser utilizados para reduzir o consumo de água. Já a norma americana, com a denominação “reductor de água” (*water reducing*), especifica que a função delimitadora da nomenclatura é a ação redutora de água, e não a de aumento da plasticidade.

Quadro 2.2: Classificação dos aditivos plastificantes - Comparativo entre a norma brasileira e a americana.

Denominação		Sigla	
Brasileira	Americana	Brasileira	Americana
Plastificante	Redutor d'água	P	A
Plastificante retardador	Redutor d'água e retardador	PR	D
Plastificante acelerador	Redutor d'água e acelerador	PA	E
Superplastificante	Redutor d'água de alto alcance	SP	F
Superplastificante retardador	Redutor d'água de alto alcance e retardador	SPR	G
Superplastificante acelerador	Redutor d'água de alto alcance e acelerador	SPA	Não tem

Na Tabela 2.2 é apresentado um comparativo dos requisitos mínimos exigidos pelas duas normas quando utilizado os aditivos para a redução de água, resistência à compressão e

tração. Analisando os valores do quadro, percebe-se que a norma brasileira é normalmente mais exigente nessas propriedades. Essa norma destaca que os aditivos plastificantes podem incorporar no máximo 3% de ar em relação ao volume do concreto, enquanto que a norma americana limita a no máximo 3,5%.

Tabela 2.2: Alguns dos requisitos de desempenho dos plastificantes – Comparativo entre a norma brasileira e a americana (em relação percentual com a referência)

Propriedades (% mín)		Tipo de aditivo (sigla brasileira)											
		P		PR		PA		SP		SPR		SPA	
		NBR	ASTM	NBR	ASTM	NBR	ASTM	NBR	ASTM	NBR	ASTM	NBR	ASTM
Redução de água		6	5	6	5	6	5	12	12	12	12	12	12
fc	12h	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	140*	NA	125*	150	NA
	3d	110	110	110	110	125	125	140	125	125	125	125	NA
	7d	110	110	110	110	110	110	125	115	125	115	125	NA
	28d	110	110	110	110	110	110	115	110	115	110	100	NA
	90d	110	NA	110	NA	100	NA	110	NA	110	NA	100	NA
	180d	NA	100	NA	100	NA	100	100	100	100	100	100	NA
fct,sp **	3d	100	100	100	100	100	110	110	110	110	110	120	NA
	7d	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	110	NA
	28d	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	NA

Notas: NA – Não se Aplica.

* Em 1 dia.

** Resistência à tração por compressão diametral. Pela ASTM os valores de resistência foram no ensaio à tração na flexão (*flexural strength*).

2.4.3 Composição Básica

Os aditivos plastificantes, normalmente provenientes de materiais orgânicos ou combinados orgânicos e inorgânicos, podem ser classificados, quanto as suas bases químicas, em três grupos, cada um dos quais pode ter como componente principal o *lignossulfonato*, *ácidos hidroxí-carboxílicos* e *carboidratos*. Cada um deles pode conter como componentes secundários outros produtos, originalmente presentes na matéria-prima ou adicionados ao

componente principal para modificar-lhes as características. Maiores detalhes sobre a composição dos plastificantes pode ser encontrado em Ramachandran (1995).

Os superplastificantes, também chamados de aditivos redutores de água de alta performance (NEVILLE, 1982; MEHTA e MONTEIRO, 1994) e desenvolvidos em meados dos anos 70, consistem basicamente em uma longa cadeia de tensoativos⁹ de grande massa molecular e número de grupos polares na cadeia de hidrocarbonetos. As principais bases químicas são os *Melamina Formaldeído Sulfonado* (conhecido como *base Melamina*), *Naftaleno Formaldeído Sulfonado* (conhecido como *base Naftaleno*) e os *lignossulfonatos* modificados (RAMACHANDRAN, 1995). Por serem tensoativos reduzem consideravelmente a tensão superficial da água circundante às partículas de cimento, aumentando acentuadamente a fluidez do concreto.

Há ainda os aditivos superplastificantes *base policarboxilato* desenvolvidos mais recentemente na década de 90, daí denominados de *3ª geração*, após a descoberta dos plastificantes (*1ª geração*) e superplastificantes (*2ª geração*). Eles possuem alta eficiência, pois permitem uma redução de água das misturas em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade em alguns casos (AÏTCIN, 2000), ou aumentam significativamente a fluidez dos concretos em maior proporção que os demais aditivos. A estrutura desses polímeros é formada geralmente por grupos carboxílicos 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. 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 (VERONEZ, 2006).

2.4.4 Mecanismo de Atuação

Há uma série de teorias envolvendo mecanismos de atuação dos plastificantes no cimento, mas percebe-se que nenhuma delas é consenso no meio acadêmico, conforme afirma Aïtcin em seu livro (AÏTCIN, 2000). Alguns defendem que a interação cimento-superplastificante é

⁹ *Tensoativos*: são substâncias que atuam na tensão superficial dos líquidos. Os sabões e detergentes diminuem a tensão superficial da água, pois diminuem a atração entre as moléculas de água. (ROSSETTI, 2005)

apenas de natureza física; outros defendem uma abordagem química; e ainda há os que defendem a idéia de atuação dos superplastificantes nas fases do cimento *Portland* (C_3S , C_2S e C_3A). Apesar da falta de consenso, alguns princípios de atuação, sobretudo os de natureza física, são relatados na maioria das bibliografias, como descritos a seguir:

- Redução da tensão superficial da água (*tensoativos*);
- *Defloculação* das partículas de cimento através da mudança na carga elétrica dos mesmos;
- Repulsão eletrostática entre as partículas de cimento que inicialmente se encontravam com cargas opostas (efeito de atração);
- Efeito *estérico* promovido pelas longas cadeias moleculares dos superplastificantes que impedem o contato entre partículas de cimento.

Uma tendência natural de todo o cimento é de se flocular¹⁰ em contato com a água. Nesses conglomerados de cimento e água ocorre o aprisionamento da água que é impedida de lubrificar a mistura e, conseqüentemente, de dar maior trabalhabilidade à pasta de cimento. Logo, o efeito defloculante dos aditivos plastificantes, citado anteriormente, permite que a água seja mais bem aproveitada na lubrificação e hidratação do cimento.

Outros efeitos de natureza química e atuantes nas fases do cimento são também adotados por vários autores, pois os efeitos macroscópicos observados ajudam indiretamente a induzir às hipóteses levantadas. Alguns exemplos desses efeitos podem ser destacados: atuação dos plastificantes na precipitação da gipsita (gesso), que confere a pega do cimento, retardando seu efeito; adsorção de moléculas de superplastificantes no C_3S , retardando o desenvolvimento do calor de hidratação do cimento (Ramachandran, 1995).

2.4.5 Efeitos nas Propriedades Reológicas

O efeito mais contundente dos aditivos plastificantes e superplastificantes é a melhoria na *trabalhabilidade* (também conhecido por aumento da fluidez) da mistura aglomerante-água, otimizando a quantidade de água para que lubrifique adequadamente a massa cimentícia em crescente hidratação, e proporcionando muitas vezes a redução do consumo de água (quando esse é o objetivo, muda-se o nome dos plastificantes para *redutores de água*).

¹⁰ Floculação: existem forças de atração entre arestas, cantos e superfícies, carregados positiva e negativamente, quando os compostos ou minerais cristalinos são finamente moídos.

Quando o objetivo é aumentar a fluidez, esses aditivos podem alcançar altos ganhos de plasticidade no estado fresco, mas com intensidades variadas, dependendo principalmente do traço do concreto e as condições do entorno (temperatura e umidade). O ganho de plasticidade por meio dos aditivos não pode ser feito de forma indiscriminada, pois se sabe que superdosagens desses aditivos podem transformar o concreto em uma massa fluida sem coesão, gerando grande exsudação de água e segregação dos agregados em relação à matriz cimentícia, como também alterar a pega do aglomerante. Se, por outro lado, os aditivos forem utilizados em quantidade relativamente bem inferiores à massa de aglomerante, o efeito poderá ser inócuo, principalmente se outros condicionantes favorecerem a redução do tempo de início de pega.

Muitas vezes os aditivos superplastificantes e, principalmente, os plastificantes possuem efeito retardador ou acelerador de pega, inerente da própria formulação do aditivo, sendo conhecido normalmente pelo nome de *polifuncional*. Pode ocorrer ainda outros efeitos secundários no estado fresco, como por exemplo, a incorporação de ar, apontado nos trabalhos de Anon (1967), Tam (1971) *apud* Rixom e Mailvaganan (1999) e Ramachandran (1995).

Toda essa interação dos aditivos plastificantes e superplastificantes com a massa de aglomerante inevitavelmente alterará a morfologia dos produtos provenientes da hidratação do cimento, uns mais outros menos significativamente. Segundo Dodson (1967) e Ciach e Swenson (1971), o *lignossulfonato* provoca alterações na morfologia do C-S-H e do hidróxido de cálcio obtidos pela hidratação do C₃S e do C₂S, favorecendo a formação de compostos lamelares, concorrendo, portanto a justificar efeitos no concreto no estado endurecido.

2.4.6 Efeitos nas Propriedades do Concreto Endurecido

Fato importante notado por diversos autores é que tanto os aditivos plastificantes quanto os superplastificantes alteram a formação da matriz cimentícia. Esta alteração promoverá inevitáveis modificações no estado endurecido do concreto que podem ser externadas por meio de ensaios, tais como: resistência à compressão, massa específica, permeabilidade, etc.

Roncero (2000), com a ajuda de um massivo programa experimental, percebeu que os superplastificantes alteram o processo de hidratação e morfologia das partículas de hidratos formadas. Nas primeiras horas, depois de moldado o concreto, a autora constatou, por meio de micrografias, que o gel formado pela hidratação do cimento apresentou aspecto “esponjoso”

devido ao efeito dispersivo do aditivo, mesmo depois de algumas horas de moldado os corpos de prova utilizados na análise. Apesar disto, este efeito proporciona ao cimento maior compacidade devido a melhor dispersão e hidratação das partículas de cimento. Outro aspecto observado pela autora foi a menor velocidade na formação das partículas de C-S-H. Isto pode proporcionar maior quantidade de água livre na composição do concreto e, por conseguinte maior facilidade da mesma movimentar-se dentro do corpo sólido do concreto.

É consenso que os compostos C_3A e C_3S , presentes no cimento, podem apresentar retardamento no processo de hidratação nas primeiras horas sob presença de aditivos superplastificantes. Isto pode interferir na distribuição dos hidratos formados, bem como na configuração espacial e formato dos micro e meso poros formados na pasta de cimento. Esses poros por onde permeiam a água, sob estado de confinamento, em uma situação de ensaio de fluência, podem modificar seu comportamento dependendo do uso do aditivo selecionado para o concreto. O trabalho efetuado por Collepardi, Maciallis e Solinas (1973) apontou que em um plastificante base *lignossulfonato* houve significativa alteração da distribuição dos poros para raios acima de $7,5nm^{11}$. Os volumes dos poros de raios acima de $7,5nm$ foram menores para o concreto com o plastificante, mas o volume de vazios como um todo praticamente não foi alterado. Essa configuração diferenciada dos poros na matriz cimentícia do concreto endurecido pode provocar mudanças nas suas propriedades.

Segundo Neville (1970), pode-se ainda deduzir perante o raciocínio apresentado no parágrafo anterior que caso um concreto apresente alta fluência ele também pode apresentar alta perda de água quando sob tensão. Alguns ensaios realizados por Roncero (2000), onde foram utilizados corpos de prova para avaliar o índice de umidade, demonstram este fenômeno. Concretos com diferentes aditivos superplastificantes apresentaram maior índice de umidade que o concreto de referência. Para idades mais avançadas, em que a taxa de hidratação é bem menor que nas primeiras idades, o efeito dos aditivos químicos tem sua ligação mais acentuada com a fluência, principalmente devido à capacidade e retenção de umidade em sua estrutura. Fato este associado com a alteração das dimensões e distribuição dos poros na microestrutura do concreto por meio dos aditivos.

Quando os aditivos plastificantes e superplastificantes são utilizados para redução do consumo de água no concreto, conseqüentemente haverá redução significativa da porosidade

¹¹ Ou 75 Angstroms. Essa dimensão dos poros enquadra-se no intervalo dos meso-poros, influentes na fluência, segundo Young *et al.* (1988).

e permeabilidade, contribuindo para o aumento da resistência mecânica e sua durabilidade. Tal fato pode ser invertido se analisado para idades mais recentes de moldagens. Ramachandran (1995) comenta que para a idade de 1 dia concretos com plastificantes apresentaram resistência à compressão inferiores ao concreto de referência, mantendo a relação a/c fixa. A explicação deste fenômeno é justificada pelo próprio autor como sendo o possível retardamento de hidratação para idades mais recentes. Rixom (1999) afirma que ao se utilizar um superplastificante para aumentar a trabalhabilidade do concreto, a ponto de torná-lo bombeável, a resistência à compressão para 1, 7 e 28 dias aumentam de forma significativa independente da relação a/c considerada.

Em termos globais, os aditivos plastificantes e superplastificantes influenciam nas propriedades do concreto endurecido da seguinte forma:

- quando utilizados como redutores de água, obviamente há um aumento expressivo nas propriedades mecânicas, principalmente nas primeiras idades conforme exigência de norma. A durabilidade do concreto melhora em função da redução dos vazios na matriz, dificultando a entrada de agentes agressivos. Para as propriedades elásticas, principalmente o módulo de elasticidade, esses aditivos tendem a aumentar levemente o seu efeito, pois reduzem de forma branda o volume de pasta e geram um aumento na rigidez da matriz cimentícia;
- quando utilizados para melhoria da trabalhabilidade, sem alterar a relação a/c, os concretos com esses aditivos possuem uma leve melhora das propriedades mecânicas para idades mais avançadas – maiores que 7 dias – em função da matriz apresentar melhor hidratação dos seus compostos, e tendência de leve redução para idades mais recentes – menores que 3 dias – em função dos possíveis efeitos retardadores na formação do C-S-H (Rixom e Mailvaganam, 1999). A durabilidade deve ser possivelmente beneficiada em decorrência da melhor formação dos hidratos do cimento, propiciando a formação de vazios menores que dificultam a entrada de agentes agressivos. O módulo de elasticidade deve sofrer pequena alteração para idades mais avançadas, aumentando seu efeito para idades mais jovens, quando a matriz cimentícia possui maior relevância na rigidez do compósito concreto.

Os efeitos dos aditivos plastificantes e superplastificantes sobre a fluência serão tratados com maiores detalhes em separado no capítulo 3, pois faz parte de um dos assuntos principais

desta tese. Nele serão abordados os possíveis efeitos diretos e indiretos desses aditivos sobre a fluência, procurando distingui-los, mas compilando sob um enfoque crítico os principais trabalhos que tentaram este feito para que o programa experimental proposto nesta tese seja conduzido da melhor maneira possível.

2.5. ADIÇÕES MINERAIS

O uso da adição no concreto possui um forte apelo ligado à sustentabilidade devido a sua procedência em muitos casos como subproduto de um processo produtivo. Como se sabe boa parte das adições, por exemplo: escória de alto-forno, sílica ativa e cinza volante, são provenientes de resíduos gerados da fabricação de alguns produtos industrializados. Esses resíduos se devidamente aproveitados podem deixar de poluir o meio ambiente, economizar energia, e ainda ser uma fonte de renda, quando comercializados como adição ao cimento, caso seja comprovada a sua funcionalidade para este fim. Há outras adições, como por exemplo, as argilas calcinadas e o metacaulim¹², que possuem sua industrialização como finalidade primária no processo produtivo garantida pelo mercado, devido aos benefícios comprovados no concreto. É importante lembrar que existem outras adições minerais que estão sendo testadas já para aplicação em larga escala, como a cinza de casca de arroz, entre outros resíduos.

Outro aspecto que pode agregar status às adições minerais de produtos que prezam pela sustentabilidade refere-se à maior eficiência de atuação junto aos compostos cimentícios. Se devidamente dosados, esses materiais podem reduzir significativamente o consumo de cimento e ainda proporcionar maior durabilidade às estruturas de concreto, reduzindo a emissão final de gases tóxicos decorrentes dos processos de fabricação dos produtos de maior impacto e os gastos com manutenção ao longo da vida útil das estruturas.

Desta forma, a respeito dessa grande preocupação mundial com os impactos ambientais associado aos interesses financeiros, cada vez mais as adições minerais vêm sendo aplicadas com êxito, porém sem conhecer muitas vezes os efeitos secundários que elas podem causar nas propriedades do concreto, principalmente naquelas onde a determinação por meio de ensaios é difícil, onerosa ou complexa, como é o caso da fluência. O comportamento do

¹² O Metacaulim pode ter como insumo básico a argila caulínica calcinada ou o caulim beneficiado proveniente da indústria produtora de papel (Dal Molin, 2005). Este último possui forte apelo ecológico devido a possíveis reduções no impacto ambiental por ele gerado.

concreto com adições minerais frente a deformação por fluência possui sua complexidade em função dos vários fatores intervenientes nesta propriedade e ainda ao desempenho diferenciado dessas adições junto ao cimento *Portland* comum.

2.5.1 Definição

Adição mineral é qualquer material, composto por finas partículas sólidas, do tamanho das partículas de cimento ou até mesmo menores, adicionado ao aglomerante hidráulico, ou substituindo parte dele, a fim de proporcionar alguma modificação no comportamento da mistura no estado fresco e/ou endurecido. Sua composição química varia muito em função da matéria-prima utilizada e forma de produção, logo seus efeitos no concreto são os mais variados o possível. Já sua micro-estrutura, apesar do nome possuir o termo “mineral”, sugerindo que sua micro-estrutura seja cristalina, possui certo grau de *amorficidade*¹³ que garante sua reatividade com os produtos provenientes da hidratação do cimento (efeito pozolânico) ou até mesmo reações diretas com a água (efeito cimentício).

2.5.2 Classificação

As adições possuem classificação diversificada em função de sua composição química, mineralógica, morfológica, como também dependente da forma de atuação físico-química no concreto (efeito cimentante, pozolânico ou *filer*). Entende-se por **efeito cimentante** como aquele em que a adição, independente do cimento, forma em contato com a água produtos cimentantes, como o C-S-H de menor densidade, normalmente de forma mais lenta. Já o **efeito pozolânico**, ocorrido em adições com origem silocosa ou sílico-aluminosa, possui pouco ou quase nenhuma propriedade cimentícia, mas quando a adição é finamente moída e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio¹⁴ (HC) do cimento hidratado, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes (ABNT, 1992). Por fim, o **efeito filer** é considerado em uma adição mineral altamente fina que não possui interação química com os compostos cimentantes, sendo sua ação oriunda do efeito físico de empacotamento granulométrico dos vazios deixados pelos aglomerantes e ainda atuação como pontos de nucleação para início da hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2005).

¹³ Material amorfo é oposto ao material cristalino. Sua micro-estrutura não possui uma organização das moléculas, como ocorrem nos materiais cristalinos.

¹⁴ O hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento também é conhecido pelo nome de *Portlandita*.

Dentro deste contexto Mehta e Monteiro (1994) *apud* Dal Molin (2005) agruparam as adições minerais segundo os seus comportamentos com o aglomerante hidráulico. Mediante este agrupamento, a sílica ativa e o metacaulim¹⁵ foram classificados como pozolanas de alta reatividade ou *superpozolanas*, devido ao grande poder reativo com os compostos provenientes da hidratação do cimento; a argila calcinada e a cinza volante com baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$) como *pozolana comum*; e a escória de alto-forno moída como *cimentante*. Esse agrupamento pode ser resumido no Quadro 2.3. Há outras subclassificações que não serão abordadas nesta tese, mas que podem ser verificadas em Mehta e Monteiro (1994) e Ramachandran (1995).

Quadro 2.3: Classificação das principais adições minerais (Adaptado de Dal Molin (2005)).

Classificação	Efeito preponderante	Exemplo	Composição química
<i>Pozolanas Comuns</i>	Efeito pozolânico	Argila calcinada, Cinza volante	Maior parte de vidro de silicato, contendo alumínio, ferro e álcalis.
<i>Superpozolanas</i>	Efeito pozolânico potencializado	Metacaulim, Sílica ativa	Material com grande parte de sílica amorfa.
<i>Cimentantes</i>	Efeito cimentante	Escória de alto-forno, argila calcinada ou cinza volante com alto teor de CaO.	Silicatos vítreos contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e sílica.
<i>Filer</i>	Efeito filer	Pó de pedra	Independe

A *sílica ativa* é composta de partículas extremamente finas de diâmetro de até $0,1\mu\text{m}$ (em torno de 100 vezes mais fina que o cimento) com alto índice de *amorficidade* o que configura sua alta reatividade. Sua composição química preponderante é o óxido de silício, variando em teores de 85% a 98%. O *Metacaulim* pode ser fabricado com partículas inferiores a $2\mu\text{m}$ e de grande *amorficidade*, sendo sua composição química preponderante de aluminossilicatos. Ambas as superpozolanas reduzem o tamanho dos vazios do concreto deixados pelo cimento

¹⁵ Subtende-se que os autores se referiram ao metacaulim de alta reatividade, semelhante ao encontrado em diversos trabalhos, dentre eles: Ramlochan *et al.* (2000) e Brooks e Johari (2001).

tornando-o com aspecto microestrutural mais compacto, inclusive na zona de transição pasta-agregado, onde normalmente é um ponto onde as microfissuras se propagam.

A *argila calcinada* apesar de sua aparente semelhança com o Metacaulim possui uma finura média maior, maiores teores de materiais inertes (quartzo, por exemplo) e conseqüente menor grau de *amorficidade*. Semelhante a argila calcinada a *cinza volante com baixo teor de óxido de cálcio* apresenta mediano grau de *amorficidade* devido a presença de compostos cristalinos e finuras, que apesar de normalmente inferiores ao cimento, são em média superiores aos diâmetros das superpozolanas.

A *escória de alto-forno*, de natureza diferenciada das demais citadas anteriormente, possui características cimentantes em função dos altos teores de cálcio em sua composição na forma de CaO (37% a 40%). Sua finura oscila aproximadamente em torno de 10µm a 45µm (LOHTIA e JOSHI, 1995). Outras adições que possuem características pozolânicas ainda são capazes de reagirem com a água, efeito cimentante, em função de uma presença mediana de CaO (acima de 10%), conferindo um comportamento intermediário entre uma pozolana e uma adição cimentante (i.e.: argila calcinada e cinza volante com alto teor de cálcio).

As normas brasileiras e americanas enfatizam as adições minerais com comportamento pozolânico, criando procedimentos distintos, porém de conteúdos bastante similares: NBR 12653 (ABNT, 1992) e C618 (ASTM, 1989). O efeito pozolânico é observado inclusive em adições com alto teor de óxido de cálcio (até 40% de CaO), adições essas normalmente classificadas como cimentantes, porém em menor intensidade (Lohtia e Joshi, 1995). O Quadro 2.4 e a Tabela 2.2 apresentam a classificação e as exigências químicas que enquadram as adições pozolânicas nas respectivas classificações.

Quadro 2.4: Classificação segundo norma brasileira e associação com a norma americana.

Denominação	Classe	
	Brasileira	Americana
Pozolanas Naturais e Artificiais como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.	N	N
Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral.	C	F
Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores. Nesta classe a adição poderá apresentar propriedades aglomerantes , ou seja, comportamento cimentante.	E	C

As exigências mínimas para as adições pozolânicas pelas normas brasileiras e americanas são bem próximas, como observado na Tabela 2.3. Logo, uma adição mineral classificada como pozolânica pela norma brasileira possivelmente se enquadrará na mesma classificação americana, salvo a sigla que poderá ser diferente. Outras exigências que a norma americana atribui para classificação da adição, a norma brasileira faculta a consideração das mesmas em função da aplicabilidade (i.e.: redução da expansão devido à reatividade álcali-sílica).

Tabela 2.3: Comparativo de alguns requisitos mínimos exigidos pela norma brasileira e americana.

Propriedades	Norma Brasileira (NBR 12.653)			Norma Americana (ASTM C618)		
	N	C	E	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
SO_3	$\leq 4,0\%$	$\leq 5,0\%$	$\leq 5,0\%$	$\leq 4,0\%$	$\leq 5,0\%$	$\leq 5,0\%$
Teor de umidade	$\leq 3,0\%$	$\leq 3,0\%$	$\leq 3,0\%$	$\leq 3,0\%$	$\leq 3,0\%$	$\leq 3,0\%$
Perda ao fogo	$\leq 10,0\%$	$\leq 6,0\%$	$\leq 6,0\%$	$\leq 10,0\%$	$\leq 6,0\%$	$\leq 6,0\%$
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	NA	NA	NA
Material retido na # 45 μm	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$
Índice de atividade pozolânica com o cal aos 7 dias	$\geq 6\text{MPa}$	$\geq 6\text{MPa}$	$\geq 6\text{MPa}$	$\geq 5,5\text{MPa}$	$\geq 5,5\text{MPa}$	NA
Água requerida	$\leq 115\%$	$\leq 110\%$	$\leq 110\%$	$\leq 115\%$	$\leq 105\%$	$\leq 105\%$

Nota: NA = Não se Aplica.

2.5.3 Função no Concreto

As qualidades comprovadas das principais adições minerais disponíveis no mercado estão associadas em sua grande maioria à melhoria das propriedades mecânicas, com ênfase para a resistência do concreto, e aumento da durabilidade, com ênfase na redução da permeabilidade. Como as adições normalmente apresentam finura compatível ou menor que a do cimento, elas são empregadas para reduzir o tamanho médio dos vazios¹⁶, e conseqüentemente, tornar a matriz cimentícia mais resistente, uma vez que haverá melhor hidratação das partículas de

¹⁶ Processo normalmente conhecido pelo nome de “refinamento dos poros”.

cimento e maior número de ligações entre os produtos provenientes das misturas dos aglomerantes hidráulicos com as adições. Outro efeito benéfico conhecido das adições é a melhoria na zona transição pasta-agregado; região esta onde normalmente há concentração de tensão sofrida pelo concreto, e ainda a redução do consumo de cimento, proporcionando muitas vezes economia na fabricação do concreto, se devidamente aproveitada as qualidades dessas adições.

As melhorias, tanto no concreto quanto em argamassas, citadas no parágrafo anterior somente poderão se concretizar se devidamente aplicadas na mistura. Devida a sua elevada finura, as adições minerais normalmente necessitam de maior quantidade de água para lubrificá-las no estado fresco, apesar de algumas adições, como a escória de alto-forno, em quantidades adequadas mantém, ou até mesmo melhoram, a trabalhabilidade quando adicionada a um concreto de referência. Quando houver maior necessidade de água na mistura o desempenho das adições diminuem, em função do aumento dos vazios, o que quase inevitavelmente induz a inserção na mistura de um aditivo para aumentar a plasticidade.

As adições podem também ser inseridas na mistura para melhoria das propriedades no estado fresco, mas esta melhora decorre de uma consequência secundária, pois normalmente visa-se melhoria nas propriedades do estado endurecido do concreto. Outra melhoria que vem ganhando espaço como objetivo de uso das adições minerais refere-se ao aumento da durabilidade. Já é comprovado que algumas adições minerais podem combater efeitos nocivos ao concreto, tais como: reação álcali-sílica, reações com sulfetos, penetração de agentes agressivos ao concreto, etc.

2.5.4 Efeitos nas Propriedades Reológicas

Concretos contendo adições minerais normalmente possuem melhor coesão no estado fresco. As adições evitam a exsudação de água e a segregação de agregados quando devidamente dosadas. Metha (1989) afirma que as adições promovem ganho de trabalhabilidade quando são incorporadas ao concreto em função da redução do atrito entre as partículas de agregados. Este efeito, segundo o autor, pode ser explicado pelo aumento do volume de pasta quando adicionada a adição, uma vez que ela é misturada ao aglomerante em substituição por peso. Como boa parte das adições possui menor massa específica que o cimento, há uma tendência de aumento do volume de pasta (cimento + adição + água). Essa situação foi verificada em vários trabalhos envolvendo o estudo da influência das adições minerais na fluência do

concreto, que por questões estratégicas não parece ser a mais adequada, uma vez que o volume de pasta é o principal agente onde ocorre a fluência. Ressalta-se, entretanto, que muitas vezes a adição é incorporada mantendo o volume de pasta fixo. Logo, o efeito descrito por este autor não é verídico nessas condições.

Vale lembrar ainda que adições com elevada finura em relação ao cimento, exigem aumento do consumo de água para lubrificar as partículas da mistura, como comentado anteriormente. Ding e Li (2002) verificaram que para as superpozolanas, como a sílica ativa e metacaulim, em teores em torno de 5% na massa de material cimentante não modificaram substancialmente o abatimento. Contudo, para teores acima de 5% há a tendência nítida de perda de abatimento, principalmente para a sílica ativa.

Outro efeito significativo das adições nas propriedades do concreto no estado fresco, refere-se ao tempo de pega. Adições pozolânicas, como a cinza volante, e cimentantes, como a escória de alto-forno, tendem a retardar o início da pega do aglomerante. Isso se deve, entre outros fatores, à redução da quantidade de cimento no concreto e às interações que as adições podem promover junto ao sulfato de cálcio (gesso) utilizado. Por outro lado, as superpozolanas possuem uma tendência de aumento do tempo de início de pega. Em função da sua alta reatividade, essas adições incrementam a taxa de hidratação do aglomerante, principalmente nas primeiras idades, contribuindo para a redução do tempo de pega e início mais recente do aumento da rigidez do maciço.

2.5.5 Efeitos nas propriedades do concreto endurecido

A incorporação de adições minerais no concreto influencia na taxa de hidratação do cimento e, conseqüentemente, no desenvolvimento da resistência, principalmente nas primeiras idades. O desenvolvimento da resistência do concreto contendo adições é dependente de vários fatores, tais como: tipo e nível de substituição da adição ao cimento, dosagem do concreto, condições ambientais, etc. Pelo fato das adições promoverem o refinamento dos poros da matriz cimentícia e melhoria na zona de transição pasta-agregado, o concreto tende de um modo geral, a possuir maior resistência mecânica e melhor durabilidade.

Em concretos com cimento comum a zona de transição é geralmente menos densa que em concreto contendo alguma adição misturada ao cimento. Nesta região, em concretos sem adição, ocorre ainda a presença de grande quantidade de cristais de hidróxido de cálcio que podem ser consumidas se inseridas as adições minerais. Como resultado da melhoria na zona

de transição, esta região fica menos propensa a microfissurações induzidas pela mudança na incompatibilidade dimensional entre os agregados e a pasta de cimento, devido às variações de umidade e temperatura, comuns ao concreto.

Khatib e Wild (1996) realizaram um interessante trabalho para avaliar o comportamento da distribuição dos poros na microestrutura de pastas contendo metacaulim em diferentes proporções (0%, 5%, 10% e 15%) nas idades de 3, 7, 14, 28, 90 e 365 dias, por meio de ensaio de *porosimetria* por intrusão de mercúrio. Resultados das pastas com metacaulim apontaram para uma clara redução do volume de poros até a idade de 14 dias e um súbito aumento do volume até 28 dias, quando após essa idade voltava-se a haver redução do volume de vazios – Figura 2.5. Os autores especulam que o possível motivo desse aumento parcial do volume dos poros seja devido à retomada da formação do hidróxido de cálcio (HC), proveniente da hidratação do cimento, interrompida até a idade de 14 dias pelo seu consumo por meio da adição de metacaulim. Sabe-se que o HC possui dimensões bem superiores as partículas de metacaulim o que provocaria como consequência natural o aumento do volume de vazios na pasta na presença de grande quantidade de HC. Notou-se ainda que o refinamento dos poros foi mais significativo até a idade de 14 dias para todas as misturas contendo metacaulim, atingindo diâmetros da ordem de 20nm¹⁷, onde coincidiu com a idade de maior aumento da resistência à compressão da pasta. Outros autores corroboraram com as idéias apresentadas neste trabalho - Bredy, Chabannet e Pera (1989); Kostuch, Walters e Jones (1993). Dessa maneira pode-se estimar que a fluência deva ser mais influenciada nas primeiras idades, o que motivaria a se estudar mais detalhadamente tal comportamento para a adição de metacaulim.

As superpozolanas, de uma maneira geral, tendem a ganhar resistência em relação ao concreto de referência, em função do alto poder reativo destas com o cimento. Mas esse efeito pode não levar a um aumento final de resistência em relação à referência, se corrigida a quantidade de água na mistura em função da maior afinidade das superpozolanas pela mesma. Concreto com pozolana comum tende a ter um acréscimo de resistência em relação à referência, mas de forma mais lenta que quando utilizada as superpozolanas. Já as adições cimentantes tendem a reagir mais lentamente que a própria referência, quando adicionadas em substituição, levando a resistências iniciais mais baixas, porém para idades mais avançadas o concreto recupera

¹⁷ Os autores desse trabalho denominaram os poros com esse diâmetro de *micro-poros*. Já Mehta e Monteiro (1994) classificam como *micro-poros* aqueles que possuem dimensão média de 50nm. Essa classificação é importante, pois a partir dos micro-poros os efeitos da retração e fluência se tornam mais significativos.

resistência, podendo ultrapassar a resistência do concreto de referência, se mantida a relação a/c.

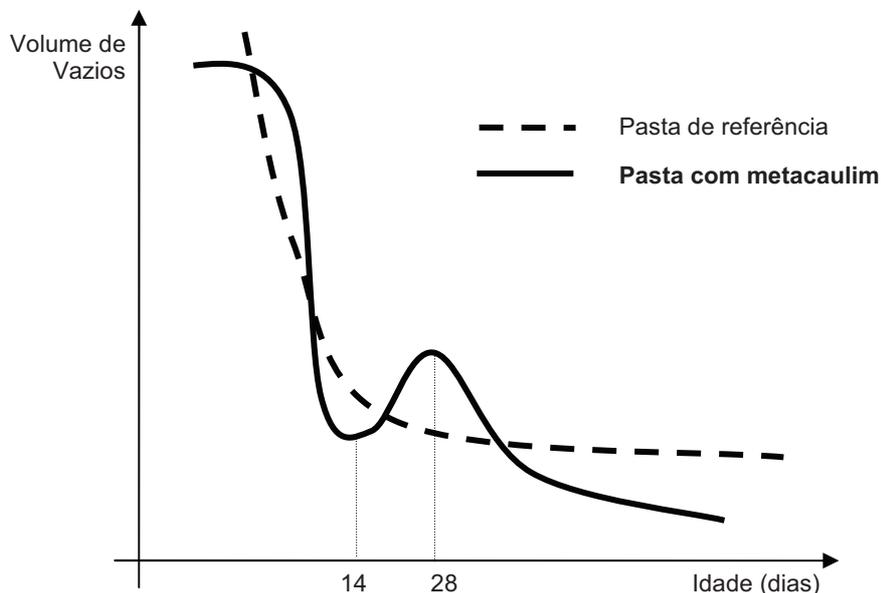


Figura 2.5: Comportamento do volume de vazios com a idade em pastas de aglomerantes, baseado no trabalho de Khatib e Wild (1996).

Outro aspecto interessante, abordado por Jin e Li (2003), refere-se à ductilidade do concreto primeiras idades (2 e 3 dias) quando contendo adições minerais. Este efeito pode ser avaliado por meio do comportamento da resistência com a deformação. Os gráficos obtidos apresentaram um comportamento interessante de grande deformação, depois de atingida a resistência máxima do concreto sem significativa perda de resistência, mesmo para o concreto de referência na idade de 2 dias. Os concretos contendo sílica ativa e escória de alto forno apresentaram, entretanto, as maiores deformações pós-pico nas idades de 2 e 3 dias – comportamento mais dúctil - maiores inclusive do que o concreto de referência. O metacaulim apresentou maior resistência, porém menor deformação pós-pico – comportamento mais frágil. Essa capacidade, apresentada pelas adições nas primeiras idades, sugere que o concreto com essas adições tendem a absorver maiores níveis de energia, ou seja, acumular maiores níveis internos de tensão, sem provocar danos significativos às suas microestruturas. Este efeito quando considerado no concreto massa, se for possível de aplicá-lo, seria benéfico para a redução dos riscos ao aparecimento de fissuras de origem térmica, em função das grandes solicitações deformacionais provenientes do calor gerado pelos aglomerantes. Os autores

desta constatação explicam que esse efeito de deformação contínua sem grande perda de resistência pós-pico é reflexo direto do processo de hidratação do aglomerante. Como boa parte dos produtos de hidratação está em formação, a ligação molecular entre eles não é forte o suficiente para resistir aos níveis de tensão externos ao material, promovendo desta maneira deformações significativas no concreto. Exceção a essa regra ocorreu com o metacaulim que acelerou a hidratação do aglomerante, aumentando a sua resistência, mas diminuindo significativamente a deformação pós-pico. É válido ainda especular que esse reflexo do aumento de ductilidade pode retratar também significativas mudanças na fluência do concreto com a inserção dessas adições.

Como o comportamento da rigidez dos concretos, representada normalmente pelo módulo de elasticidade, possui forte ligação com a resistência mecânica, é de se esperar que concretos que adquirem maiores resistências iniciais por meio da inserção de, por exemplo **superpozolanas**, tendem a possuir maior módulo de elasticidade. Esta relação entre o módulo de elasticidade e a resistência deixa de ocorrer quando ocorre a modificação substancial do volume de pasta (ou agregados), consumo de água ou qualquer outra proporção na dosagem do concreto de referência com a inserção dessas adições. As adições que reduzem a taxa de hidratação da mistura do aglomerante nas primeiras idades, tais como as **pozolanas comuns** e as adições **cimentantes**, promovem redução da resistência mecânica, e conseqüentemente, a diminuição do módulo de elasticidade. Já para idades mais avançadas, essas adições tendem a aumentar a resistência e o módulo de elasticidade em relação à referência, mas em proporção mais modesta.

Outro aspecto que é claramente observado quando inserida as adições minerais ao concreto é a redução da permeabilidade. Fato este conseqüente da redução do tamanho médio dos poros por onde algum fluido possa penetrar dentro da matriz cimentícia. Esse efeito tende a aumentar a durabilidade das estruturas de concreto, pois dificulta a entrada de agentes agressivos dentro do maciço, como também de ar e umidade. Por outro lado, algumas adições (principalmente às pozolanas e as superpozolanas) podem reduzir a durabilidade da estrutura em função da diminuição do hidróxido de cálcio da matriz cimentícia, que, por conseguinte, reduz o *pH* do meio, favorecendo a despassivação da armadura.

Os efeitos das adições minerais sobre a fluência serão tratados com maiores detalhes no capítulo 3, pelo mesmo motivo já justificado para os aditivos plastificantes, uma vez que o

enfoque principal desta tese é avaliar a interferência desses materiais no comportamento deformacional diferido do concreto ao longo tempo.

CAPÍTULO 3: EFEITOS DAS ADIÇÕES E ADITIVOS NA FLUÊNCIA

3.1. INTRODUÇÃO

Pretende-se neste capítulo mais do que um levantamento das principais linhas de pesquisa, que tentaram correlacionar as adições minerais e aditivos plastificantes com a fluência, realizar uma compilação crítica das mesmas, organizando os seus conteúdos, programa experimental e resultados para que se possa estabelecer um melhor delineamento experimental desta tese.

Inicialmente será abordada uma análise de ordem genérica sobre os possíveis efeitos dos aditivos plastificantes na fluência para posteriormente relatar com maiores detalhes sobre os trabalhos, suas nuances, pontos em comum e divergências, culminando com a apresentação de uma tabela que sintetiza as principais pesquisas. Para as adições minerais, a estrutura do capítulo é semelhante, porém houve uma preocupação em específico com a grande potencialidade de alteração da dosagem pela incorporação das adições, o que interfere na interpretação dos resultados, justificando assim a análise posterior em separado dos resultados por grupos de adições (pozolana, superpozolana e cimentante).

3.2. ADITIVOS PLASTIFICANTES

3.2.1 Aspectos Gerais da Interferência na Fluência

Fazendo-se uma breve resenha de alguns estudos relacionados com a influência dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência, nota-se um reduzido número de resultados de ensaios conclusivos, com escassos tratamentos estatísticos, gerando dúvidas sobre a confiabilidade das considerações propostas pelos autores e se, portanto, seria possível extrapolar as conclusões a outras situações. Segundo Ramachandran e Malhotra (1995), muitos pesquisadores têm publicado sobre a influência dos aditivos superplastificantes na fluência do concreto, mas, em cada caso, diferentes concretos, carregamentos e condições

ambientais (umidade e temperatura) foram adotados, tornando a comparação direta muito difícil.

A associação mais intuitiva para verificar o efeito dos aditivos na fluência é constatar se eles alteram a resistência mecânica. Caso haja um aumento da resistência à compressão, em uma determinada idade, devido à inserção de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, a fluência diminuiria como consequência natural do aumento de rigidez da matriz cimentícia. Este tipo de associação deve ser avaliada com cautela, porque a resistência à compressão não é causa de nenhuma outra propriedade do concreto, muito menos da fluência, mas sim, uma consequência de alterações no concreto, sejam devidas a sua mistura ou a modificação das condições e situações do entorno. O aumento da resistência em função do uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes ocorre principalmente em função da redução do consumo de água (quando utilizado como redutor de água). Essa alteração na mistura pode, entretanto, afetar a fluência de maneira imprevista, pois o próprio aditivo pode alterar a composição e morfologia dos produtos provenientes da hidratação, não podendo desta forma correlacionar diretamente com a resistência. A mesma cautela deve ser tomada quando os aditivos são utilizados somente para alteração da trabalhabilidade, não devendo haver associação da fluência com a resistência mecânica, sob o risco de uma conclusão errônea tomada por meio de uma concepção genérica e limitada sobre o fato.

Admite-se como ponto de partida que a migração e difusão da água presente na pasta de cimento hidratado ou em fase de hidratação, mais especificamente a adsorvida nas partículas de C-S-H, é o principal fator no efeito da fluência, como já destacado no capítulo 2. Logo, a facilidade e/ou dificuldade deste movimento de água internamente ao concreto e em relação ao entorno, no ambiente externo, interfere decisivamente na fluência. Assim, é possível fazer uma associação entre os efeitos dos aditivos com a fluência, pois esses produtos químicos são capazes de alterar a tensão superficial dos fluidos¹⁸, a morfologia e a velocidade de formação dos produtos de hidratação do cimento, alterando o comportamento da percolação de água dentro do corpo sólido do concreto (NEVILLE, 1970; RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1995; RONCERO, 2000).

A presença dos aditivos químicos, mais precisamente dos superplastificantes, pode afetar as forças superficiais existentes entre a água e o gel resultante da hidratação do cimento, e propiciar, sob carregamento constante devido a esforço externo, uma facilidade no movimento

¹⁸ Tais produtos são conhecidos como “dispersantes”.

de umidade dentro do concreto, o que implica em um possível aumento da fluência quando comparado com um concreto de referência. Este fato deve ser avaliado com ressalva, pois tende a ser mais expressivo nas primeiras idades do concreto.

Uma interessante estratégia para verificar o efeito dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência foi proposta por Brooks (2000). Ele relata que na situação de concretos com e sem aditivos de mesma trabalhabilidade e relação tensão/resistência aplicada no ensaio de fluência, ocorrerá quase que inevitavelmente a alteração da proporção dos materiais, mais especificamente o volume de pasta. Desta forma, foi proposta uma relação para corrigir essa alteração, pois assim se poderia avaliar o efeito direto dessas adições, independente do resultado causado pela alteração do volume de pasta, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.1. Nesta forma de análise o autor pressupõe que o efeito direto dos aditivos, já descontando o efeito do aumento do volume de pasta, na fluência incremental, em média, 20% da fluência do concreto de referência.

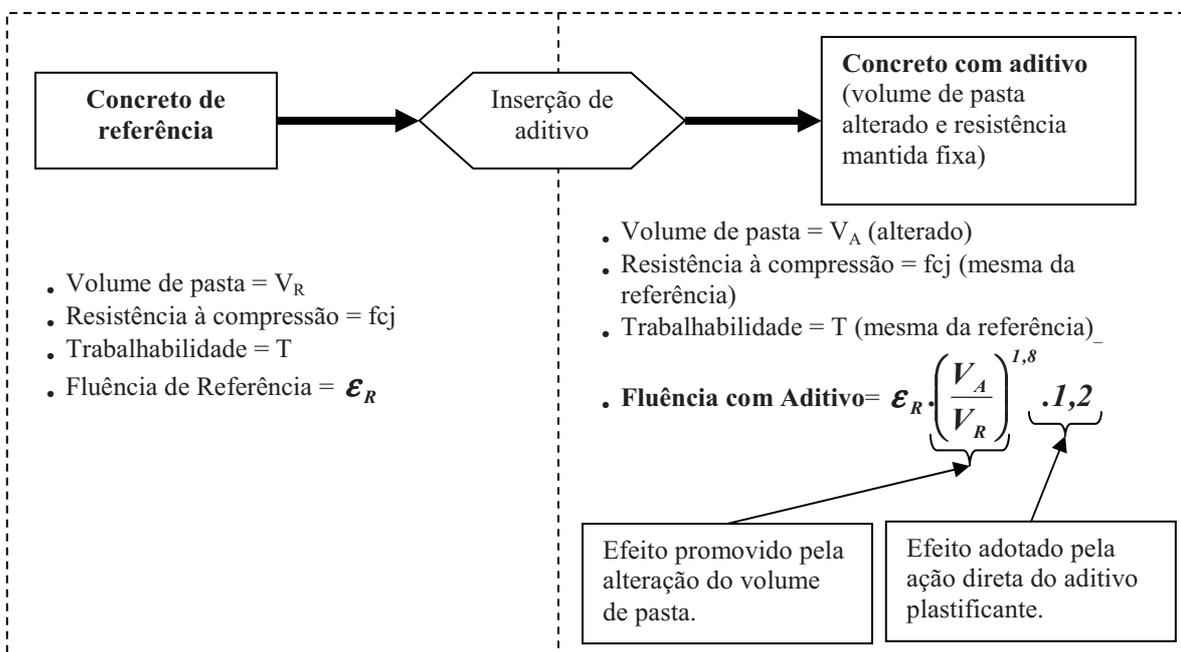


Figura 3.1: Efeitos dos aditivos plastificantes na fluência segundo Brooks (2000).

A proposta para a correção do volume de pasta, apresentada anteriormente, é baseada no princípio adotado por Pickett (1956) e Neville (1964), razoavelmente independente do tipo de agregado, relação a/c e duração do ensaio de fluência. O valor do expoente que é elevado na

relação entre volumes de pasta deve ser ajustado para cada tipo e situação de concreto analisado, mas confirma a grande influência desta variável sobre a fluência. Em outros testes, como o efetuado por Botassi *et al.* (2010), confirmam a grande influência da alteração do volume de pasta na fluência e que a mesma deve ser avaliada como um efeito independente da possível ação dos aditivos.

Para idades mais avançadas, em que a taxa de hidratação é bem menor que nas primeiras idades, o efeito dos aditivos químicos na fluência pode também ser expressivo, principalmente devido à capacidade e retenção de umidade em sua estrutura. Fato este associado com a alteração das dimensões e distribuição dos poros na microestrutura do concreto por meio dos aditivos, como já comentado.

Percebe-se, de uma forma geral, a partir do exposto, que para avaliar o efeito dos aditivos plastificantes nas propriedades do concreto, com ênfase na fluência, é um tanto quanto complexa, pois as variáveis intervenientes no problema inevitavelmente se interagem. Logo, é de se esperar que os trabalhos sobre esse assunto cheguem a conclusões distintas entre eles, dependendo dos fatores em que se pretende enfatizar, não podendo, desta forma, generalizar comportamentos de fluência junto aos aditivos no concreto. Frente a esta problemática, foram resumidas no Quadro 3.1 as principais variáveis que podem interferir no efeito da fluência. A partir delas será feita a compilação dos trabalhos, para que assim se possam analisar os casos de uma maneira mais organizada e independente, capaz ainda de diagnosticar as principais pendências nos planejamentos dos experimentos e possíveis conclusões específicas de cada caso.

A partir do Quadro 3.1 é possível ainda ressaltar a grande variedade de situações com que os aditivos plastificantes podem ser utilizados no concreto, o que justifica, portanto, a grande dispersão de estratégias de pesquisas dos trabalhos avaliados. A seguir serão apresentadas essas situações típicas adotadas nas pesquisas levantadas, tentando agrupá-las para que assim possa-se tentar definir algumas considerações de ordem mais generalizadas sobre os efeitos dos aditivos plastificantes na fluência.

Quadro 3.1: Principais variáveis abordadas nos trabalhos para avaliar os efeitos dos aditivos plastificantes na fluência.

Premissas das Pesquisas	Variáveis Avaliadas
<ul style="list-style-type: none"> • Verificar o efeito sobre a fluência em dosagens com <u>resistências semelhantes</u> (efeito plastificante do aditivo); • Verificar o efeito sobre a fluência em dosagens com <u>resistências diferentes</u> (efeito redutor de água do aditivo); • Verificar o efeito sobre fluência <u>mantido o volume de pasta e relação a/c fixos</u>; • Verificar o efeito sobre a fluência sob <u>condições de ensaio variáveis</u> (umidade e temperatura); • Verificar o efeito sobre a fluência de <u>concretos de tipos diferentes</u> (Convencional, CAD, argamassas, leve, etc); • A fluência representada por meio do coeficiente de fluência (<i>relação entre a deformação diferida por deformação elástica</i>), deformação total ao final do ensaio, ou fluência específica (<i>deformação diferida dividida pela tensão aplicada</i>). 	<p>Variáveis de Controle*:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quantidade e tipo de plastificante; • Volume de pasta (Vp); • Relação a/c; • Resistência à compressão (fcj); • Idade de início do ensaio; • Condições ambientais (umidade e temperatura); • Condições de ensaio (Relação tensão aplicada/resistência à compressão); <p>Variáveis Respostas**:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fluência básica; • Fluência por secagem; • Resistência à compressão; • Módulo de elasticidade;

Notas: * Também conhecido por variável independente.

** Também conhecido por variável dependente.

3.2.2 Efeito dos Aditivos Mantendo a Dosagem Inalterada

A forma mais prudente em se avaliar o real efeito dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência seria por meio da manutenção da proporção dos materiais fixa (mesma dosagem). Nessa situação, inevitavelmente ocorrerá mudanças nas propriedades do concreto, como por exemplo, um possível aumento da resistência mecânica e trabalhabilidade. Ainda desta forma, cuidados na condução dos experimentos devem ser tomados, pois dependendo do tipo de fluência em que se deseja avaliar (básica, por secagem ou total) podem conduzir a resultados completamente diferentes. Deve-se atentar quanto a forma de condução dos ensaios, mantendo a relação tensão aplicada no ensaio com a resistência à compressão fixa, pois assim é possível comparar ensaios de fluência com cargas aplicadas diferentes, considerando o efeito aproximadamente linear entre tensão e deformação por fluência, para níveis de tensão em torno de no máximo 40% da resistência à compressão.

Os poucos trabalhos que seguem de forma aproximada essa linha experimental apresentaram resultados conflitantes, como observados em Brooks (2000), Rixom e Mailvaganam (1999) e Alexander *et. al.* (1980) (ver Quadro 2.5). Os resultados apontam um aumento da fluência básica, por secagem e total, em média de 14%, mas apresentando uma grande variabilidade entre trabalhos (aumentos de 7% a 56%) nas idades de início de carregamento variando de 7 dias a 28 dias. Essa grande oscilação de aumentos ocorre, principalmente, devido a presença de outros fatores que afetam a fluência serem diferentemente adotados pelos autores, como por exemplo, as condições de cura e condução do ensaio. Sendo assim, qualquer generalização e agrupamentos de resultados devem ser considerados com cautela, como as observadas no trabalho de Brooks (2000).

3.2.3 Efeito dos Aditivos Mantendo a Trabalhabilidade e Resistência Fixas

Em boa parte dos trabalhos avaliados, houve a estratégia em se manter a trabalhabilidade e resistência à compressão fixas quando inserido o plastificante ou o superplastificante (Neville, 1970; Brooks e Neville, 1992; e Rixom e Mailvaganam, 1990). Essa forma de condução dos experimentos é semelhante ao princípio adotado em estudos de dosagens, pois se consegue reduzir o consumo de água, aumentando a durabilidade, e diminuir o consumo de cimento, reduzindo os custos de fabricação do concreto. Em geral, houve a tendência média de aumento de 16% das fluências, englobando a básica, por secagem e total, com a inserção dos aditivos, mas em níveis percentuais bem variados (houve reduções de fluência abaixo de 30% a aumentos da ordem de 60%), em função de peculiaridades de execução do planejamento experimental, particular de cada autor. A idade preponderante de início do ensaio foi de 28 dias, com alguns poucos ensaios iniciando na idade de 3 dias. Essa falta de consenso nos resultados pode ser atribuída a uma série de fatores críticos:

- Quando a resistência e a trabalhabilidade são mantidas fixas em um traço com plastificante, o volume de pasta do concreto tende a reduzir em função da necessidade de menor consumo de água, mas o consumo de cimento pode ser mantido fixo, aumentado ou reduzido, e ainda a relação a/c pode ser reduzida ou mantida fixa, conforme estratégia adotada pelo autor. Essas combinações de situações levam a resultados completamente diferentes de fluência;
- As condições ambientais na cura e sob carregamento do ensaio (temperatura ambiente, umidade, etc) foram as mais variadas o possível;

- A relação tensão aplicada no ensaio e a resistência à compressão foram as mais variadas. Em muitos trabalhos essa relação ainda não foi permanecida fixa quando adicionado o aditivo;
- Percebeu-se alguns resultados de fluência representados por deformação específica ($\times 10^{-6}$), enquanto que o aconselhado é a deformação por tensão aplicada ($\times 10^{-6}/\text{MPa}$), conhecida pelo nome de fluência específica. Ensaio com resultados de fluência representados por deformações absolutas altas, não correspondem necessariamente a uma fluência alta, pois depende da carga aplicada;
- As formas de realização do ensaio não foram as mesmas: variadas formas de corpos de prova (cúbicos, cilíndricos, etc), velocidade de aplicação de carga diferenciada, etc.

É importante destacar que nos trabalhos em que houve a correção do efeito da redução do volume de pasta, quando inseridos os aditivos, apresentado na figura 2.5, a maioria dos resultados apresentou aumento da fluência para os concretos com aditivos. Esse modelo de correção, apesar de simplificado, quando aplicado nos demais trabalhos apresentaram aumento da fluência. O efeito ocorre em síntese, por que ao manter a resistência e a plasticidade fixas, como comentadas no parágrafo anterior, tende a reduzir o consumo de água e possivelmente também o de cimento. Assim, essa redução do volume de pasta contribui para redução da fluência por efeito indireto da aplicação do aditivo, e não pela sua ação química direta no traço do concreto de referência, como essa tese vem enfatizando. É lógico ainda que outros efeitos colaborem para a grande variabilidade dos resultados verificados, mas dificilmente serão passíveis de serem corrigidos para generalizar as conclusões, devido a falhas na descrição dos experimentos ou ausência de modelos confiáveis até o momento.

3.2.4 Efeito dos Aditivos Mantendo a Dosagem Fixa e Trabalhabilidade Variando

No levantamento realizado, quando os aditivos foram utilizados para ganho de trabalhabilidade, mantida a dosagem inalterada, percebe-se que as fluências básica e total tendem a ser maior com os aditivos. Esse aumento, entretanto, varia razoavelmente de 7% a 34%, como observado nos trabalhos citados por Brooks (2000) e Rixom e Mailvaganam (1990). Em situação similar, mas com fluência na tração Brooks e Jiang (1995) observaram que na idade de 7 dias a fluência básica aumentou cerca de 56%. Por outro lado, esses autores

observaram que a fluência total reduziu inesperadamente em 47%, porém não entraram em detalhes sobre o motivo desse resultado. O que pode ser observado foi a baixa idade em que esses resultados foram obtidos; após 15 dias do andamento do ensaio. Isso evidencia que mudanças no comportamento da fluência do concreto poderia ocorrer se mantido o ensaio por mais tempo, como as apontadas por Neville (1970).

3.2.5 Efeito dos Aditivos Utilizados para Redução do Consumo de Água

Já quando o aditivo é inserido no concreto de referência para reduzir o consumo de água, mantida fixa a plasticidade (aditivos redutores de água), inevitavelmente a dosagem irá alterar, reduzindo o volume de pasta. Nesta situação os resultados de fluência tenderam a redução da fluência em até 50% (BROOKS e NEVILLE, 1992; RIXOM e MAILVAGANAM, 1990). Contudo, este efeito deve ser considerado com ressalva, pois desta forma pode-se atribuir a redução da fluência em função da diminuição do volume de pasta e água na matriz cimentícia e não devido ao efeito direto do aditivo plastificante. Se corrigido este efeito pode-se chegar a resultados de aumento da fluência em relação à referência, conforme constatado por meio de alguns resultados do próprio Brooks e Neville (1992).

Os trabalhos onde foi estudado o efeito do aumento de plasticidade e manutenção da resistência à compressão do concreto sob ação dos aditivos químicos, o comportamento observado foi de tendência de aumento da fluência total e redução da fluência básica, principalmente na idade de 28 dias. A fluência total maior deve estar associada à melhor capacidade do concreto reter água em seu interior, gerando maiores gradientes de umidade interno-externo que potencializam a fluência por secagem e, conseqüentemente a fluência total. Já a fluência básica é reduzida mais em detrimento da maior parcela de fluência ser direcionada para a fluência por secagem.

3.2.6 Efeito do Tipo de Aditivo

Nos poucos trabalhos onde houve a comparação dos aditivos plastificantes base *lignossulfonato* e *ácido carboxílico*¹⁹, não se percebeu grande diferença na fluência entre os mesmos, como observado por Brooks (2000) após análise estatística. No trabalho de Neville (1970) houve uma leve tendência dos concretos com plastificante base *ácido carboxílico* terem fluência superiores ao concreto com plastificante base *lignossulfonato*. Já no trabalho

¹⁹ Aditivo com efeitos reológicos no estado fresco semelhantes ao de base lignossulfonato conforme observado no trabalho de Rixom e Mailvaganam (1999).

de Brooks e Neville (1992) a conclusão foi contrária para a fluência básica. Devido a pequena quantidade de observações dos trabalhos, e algumas delas contraditórias, citados anteriormente, as afirmações supracitadas parecem frágeis e requerem maiores confirmações. No caso dos aditivos superplastificantes encontrados (base *naftaleno* e *melamina*), os escassos resultados encontrados de concretos com diferentes tipos desses aditivos não foram suficientes para averiguar distinção genérica entre seus efeitos sobre a fluência. Como a maioria dos trabalhos envolvendo superplastificantes na fluência foram com aditivos base *naftaleno* o que pode ser observado é que há uma nítida tendência de aumento da fluência, ao se utilizar esse tipo de superplastificante, até mesmo nas situações de redução do volume de pasta da dosagem em decorrência da inserção do aditivo, conforme já justificado anteriormente.

3.2.7 Efeito dos Aditivos em Diferentes Idades de Carregamento

Ao verificar o efeito dos aditivos plastificantes na fluência para diferentes idades de carregamento, foi observado que em idades mais avançadas (28 dias) o aumento percentual da fluência por secagem do concreto com aditivo em relação à referência foi maior, em média, que o aumento percentual da fluência por secagem do concreto com aditivo plastificante em relação à referência nas primeiras idades (3 e 7 dias). Esse resultado pode ser uma conseqüência do maior refinamento dos poros pelos aditivos plastificantes quando atingem sua plenitude em idades mais avançadas. Com isso, há a tendência de mais água ficar retida nos micro-poros do concreto, aumentando as chances de se ter uma maior fluência relativa quando o concreto estiver sob carga, já que o propulsor da fluência internamente ao concreto é proveniente da migração de água nos vazios de seu maciço. É válido relatar, entretanto, que a fluência do concreto com aditivo nas primeiras idades, em termos absolutos, é bem maior do que a fluência em idades mais avançadas. Logo, mesmo que haja um maior aumento percentual da fluência em idades mais avançadas devido à inserção dos aditivos, é nas primeiras idades que os aditivos promovem maiores deformações específicas absolutas, sendo, portanto fundamental a análise desses efeitos em ambas as idades.

Uma conseqüência interessante que surge da possível constatação relatada no parágrafo anterior, é a chance dos aditivos plastificantes reduzirem os riscos de fissuras de origem térmica. Se constatado que os aditivos plastificantes aumentam em maior nível percentual a fluência para idades mais avançadas, haverá uma maior contribuição para a redução do acúmulo das tensões internas nas estruturas de concreto promovidas pelos aditivos, reduzindo

o risco dessas tensões serem superiores à resistência do concreto e, conseqüentemente, diminuindo as chances do aparecimento de fissuras de origem térmica. Lembrando ainda que há a tendência de aumento da resistência à compressão quando utilizado os aditivos plastificantes, mesmo sendo utilizados para aumento da plasticidade.

Estudos efetuados por Khalil e Ward (1977) *apud* Collepari (1995), constataram que ao se comparar resultados de fluência de concreto com e sem aditivo tomando como referência de início de ensaio o mesmo grau de hidratação de ambos concretos, eles indicaram que, independente do tipo de cimento ou da presença de *lignossulfonado*, a fluência foi praticamente a mesma. Essa forma diferente de se avaliar a fluência, desvinculando a idade de início de ensaio para um equivalente em grau de hidratação, pode ajudar a alimentar modelos físico-químico para análise viscoelástica do concreto, porém devem ser conduzidos com todo o critério para evitar que outras variáveis intervenientes na fluência possam prejudicar o estudo, como por exemplo, a umidade interna do concreto.

3.2.8 Síntese dos Trabalhos Pesquisados

Ao se analisar o efeito dos aditivos plastificantes e superplastificantes sobre a fluência total (básica + por secagem), percebe-se nitidamente que esse efeito é mais substancial do que sobre a fluência básica na maioria dos trabalhos, principalmente na situação quando os corpos de prova são submetidos a cura úmida e posteriormente a secagem durante o ensaio. Diante deste fato, pode-se supor que os aditivos potencializam mais a fluência por secagem do que a fluência básica. Mas, por outro lado, caso os corpos de prova ficassem submetidos a secagem antes de entrar em ensaio, o efeito dos aditivos na fluência total perderiam significância e se aproximariam do efeito sobre a fluência básica, como observado nos resultados dos trabalhos compilados no Quadro 3.2.

A maioria dos trabalhos pesquisados foi realizada em concreto convencional. Nos trabalhos onde houve a identificação do tipo de cimento, o mais encontrado foi o tipo I (segundo a ASTM C 150), equivalente ao cimento CP I. Apesar de aparentemente o uso deste tipo de cimento não ser tão comum nos dias atuais, sob o ponto de vista metodológico de pesquisa esse cimento é mais indicado, pois não possui em sua mistura adições minerais, que como se sabe pode ser outro fator influente na fluência.

No Quadro 3.2 apresentam-se resumidamente os estudos de casos referentes à influência dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência encontrados neste levantamento. Para

facilitar a compreensão e otimizar as informações, foi adotada uma legenda com as seguintes siglas, também encontradas na Lista de Siglas:

- Relação água/cimento: a/c ;
- Volume de pasta: V_p ;
- Relação tensão aplicada no ensaio/resistência à compressão: σ/f_{cj} ;
- Umidade Relativa: UR .

As referências dos trabalhos levantados no Quadro 3.2 são as seguintes:

- Referência 1: Neville (1970);
- Referência 2: Brooks (2000);
- Referência 3: Brooks e Neville (1992);
- Referência 4: Rixom e Mailvaganam (1999);
- Referência 5: Ramachandran (1995);
- Referência 6: Alexander, *et. al.* (1980);
- Referência 7: Brooks e Jiang (1997);
- Referência 8: Brooks (1999).

É importante salientar ainda que os resultados de fluência dos concretos com aditivos apresentados no Quadro 3.2 são representados em relação ao concreto de referência na forma percentual. Assim, quando os valores de fluência com aditivos forem acima de 100%, isso equivalerá a um aumento da fluência na presença dos aditivos em comparação com o concreto de referência. Ao contrário, se os resultados forem inferiores a 100%, equivalerá a redução da fluência na presença dos aditivos em relação à referência. Por exemplo: se o valor apresentado for de 120%, equivale a um aumento de 20% na fluência ao adicionar o aditivo em relação à referência. Essa forma de apresentação é adotada pela maioria dos autores pesquisados, como também pela norma brasileira EB-1763 (ABNT, 1992) e americana C 494/C (ASTM, 1999) para representar os efeitos dos aditivos em outras propriedades, como as citadas no item 2.4.2 desta tese.

Quadro 3.2: Levantamento de casos da influência dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência.

Tipo / Base Química	Aditivo		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Plasticidade	Função Resistência	Cura	Sob carga					
Ácido Hidrocarboxílico	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Úmida	Sujeita a 94% de UR	3 e 28 dias	$\sigma/fcj=0,3$ (fixa) Vp (variável) a/c (fixa)	28d: 122% a 154% 3d: 94% a 133%	<ul style="list-style-type: none"> Foram testadas 2 marcas de aditivo p/ 2 traços; Testado também com argamassa: 141% a 136%. 	1
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Úmida	Sujeita a 94% de UR	3 e 28 dias	$\sigma/fcj=0,3$ (fixa) Vp (variável) a/c (fixa)	28d : 107% a 149% 3d: 101% a 130% (Fluência Total)	<ul style="list-style-type: none"> Este trabalho reuniu resultados de diversos autores; Houve correção do traço de referência para compensar Vp. 	2
Lignossulfonato	Variável	Variável	Não informado	Não informado	Não informado	σ/fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Básica: 126% \pm 24% Total: 117% \pm 10%		
Ácido Hidrocarboxílico	Variável	Variável	Não informado	Não informado	Não informado	σ/fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Básica: 115% \pm 28% Total: 118% \pm 27%		
Naftaleno	Variável	Variável	Não informado	Não informado	Não informado	σ/fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Básica: 130% \pm 32% Total: 116% \pm 27%		
Melamina	Aumento	Possível ganho	Não informado	Não informado	Não informado	σ/fcj (variável) Vp (fixo) a/c (fixo)	Total: 107% \pm 2%	<ul style="list-style-type: none"> Este trabalho reuniu resultados de diversos autores; Houve correção do traço de referência para compensar Vp. 	2
Copolímeros	Aumento	Possível ganho	Não informado	Não informado	Não informado	σ/fcj (variável) Vp (fixo) a/c (fixo)	Básica: 108% \pm 18% Total: 132% \pm 25%		
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Água até 14 dias	Sujeita a 94% de UR	28 dias	σ/fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 134% a 166%	<ul style="list-style-type: none"> Foi utilizado agregado leve; Duração do ensaio=100dias. 	3
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	33% UR	33% UR	28 dias	σ/fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 100% a 135%		
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Vapor d'água por 26 dias	Sujeita a 94% de UR	28 dias	σ/fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 113% a 154%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio=150dias. 	3
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Vapor d'água por 2 dias	Sujeita a 94% de UR	3 dias	σ/fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 98% a 135%		

Quadro 3.2: Levantamento de casos da influência dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência. (Continuação)

Tipo / Base Química	Aditivo		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Plasticidade	Função Resistência	Curra	Sob carga					
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Sujeita a 95% de UR	Sujeita a 95% de UR	7 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 80% a 100%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio=100 dias; Conteúdo de C₃A variável. 	3
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Sujeita a 95% de UR	Sujeita a 95% de UR	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 98% a 119%		
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Sujeita a 95% de UR	Sujeita a 95% de UR	7 e 28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 7 dias: 107% 28 dias: 112%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio=90 dias. 	3
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Sujeita a 95% de UR	Sujeita a 35% de UR	7 e 28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 7 dias: 117% 28 dias: 102%		
Lignossulfonato	Aumento	Mantida Fixa	Vapor d'água por 21 dias	Sujeita a 50% de UR	14 e 28 dias	Não informado, mas subentende-se que Vp e a/c foram fixos	Total: 14 dias: 144% 28 dias: 134%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio=56 dias. 	3
Lignossulfonato	Aumento	Mantida Fixa	Vapor d'água	Vapor d'água	28 dias	Não informado, mas subentende-se que Vp e a/c foram fixos	Total: 93%		
Ácido Hidrocarboxílico	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Mantida na água por 14 dias e então a 33% e 94% de UR	Sujeita às condições de 33% e 94% de UR	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	P/33% UR: 60% a 112%. P/94% UR: 81% a 107%	<ul style="list-style-type: none"> Foi utilizado agregado leve; Duração do ensaio=100 dias. 	3
Ácido Hidrocarboxílico	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Mantida na água por 26 dias e então a 33% e 94%	Sujeita a 94% de UR	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 123% a 155%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio=150 dias. 	
Ácido Hidrocarboxílico	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Vapor d'água por 2 dias e então 94% de UR	Sujeita a 94% de UR	3 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 88% a 132%		3
Ácido Hidrocarboxílico	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Sujeita a 95% de UR	Sujeita a 95% de UR	7 e 28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 7 d: 70% a 97% 28 d: 91% a 132%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio=100 dias. 	3

Quadro 3.2: Levantamento de casos da influência dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência. (Continuação)

Tipo / Base Química	Aditivo		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Plasticidade	Função	Cura	Sob carga					
Naftaleno	Aumento	Mantida Fixa	CP selado	Sujeita a 65% de UR	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (fixo) a/c (fixo)	Total: 100%	• Duração do ensaio=40 dias.	3
Naftaleno	Mantida Fixa	Aumento	CP selado	Sujeita a 65% de UR	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (Não Inform.)	Total: 100%		
Naftaleno	Aumento	Mantida Fixa	Imerso em água	Imerso em água	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Básica: 87% a 117%	• Duração do ensaio=300 dias.	
Naftaleno	Aumento	Mantida Fixa	Imerso em água	Sujeita a 65% de UR	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 104% a 133%	• Foi alterado o consumo de cimento.	3
Naftaleno	Aumento	Mantida Fixa	Imerso em água	Imerso em água	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Básica: 93% a 105%	• Duração do ensaio=400 dias.	
Naftaleno	Aumento	Mantida Fixa	Imerso em água	Sujeita a 65% de UR	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 92% a 121%	• Foi alterado o consumo de cimento.	3
Melamina	Aumento	Mantida Fixa	Vapor d'água	Sujeita a 50% de UR	8 dias	σ /fcj (variável) Vp (fixo) a/c (fixo)	Total: 110%	• Duração do ensaio=20 meses.	3
Naftaleno	Mantida Fixa	Aumento	Vapor d'água	Imerso em água ou Sujeita a 50% de UR	1 dia	σ /fcj (fixo) Vp (aumento) a/c (aumento)	Básica: 127% Total: 90%	• Duração do ensaio=1 ano.	
Naftaleno	Mantida Fixa	Aumento	Vapor d'água	Imerso em água ou Sujeita a 50% de UR	2 dia	σ /fcj (fixo) Vp (aumento) a/c (aumento)	Básica: 149% Total: 134%		3
Naftaleno	Mantida Fixa	Aumento	Imerso em água	Imerso em água ou Sujeita a 65% de UR	28 dias	σ /fcj (fixo) Vp (aumento) a/c (aumento)	Básica: 129% a 152% Total: 105% a 140%	• Duração do ensaio=340 dias.	
Naftaleno	Aumento	Mantida Fixa	Imerso em água até dia 7, depois 45% a 60% UR	Sujeita a 45% a 60% de UR	28 dias	σ /fcj (fixo) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 69% a 97%	• Duração do ensaio=90 dias.	3
Copolimero	Aumento	Mantida Fixa	Imerso em água	Imerso em água ou Sujeita a 65% de UR	28 dias	σ /fcj (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Básica: 81% a 115% Total: 123% a 156%	• Duração do ensaio=180 dias.	3

Quadro 3.2: Levantamento de casos da influência dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência. (Continuação)

Tipo / Base Química	Aditivo		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Função		Cura	Sob carga					
	Plasticidade	Resistência							
Ácido Hidrocarboxílico (com retardador)	Mantida Fixa	Aumento	Imerso em água	Imerso em água	28 dias	Vp (variável) a/c (variável)	σ/fc_j (fixo): 78% a 112%; σ/fc_j (var.): 78% a 84%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio= 180 dias; O tipo de agregado foi alterado. 	3
Ácido Hidrocarboxílico (com retardador)	Aumento	Mantida Fixa	Imerso em água	Imerso em água	28 dias	σ/fc_j (variável) Vp (variável) a/c (variável)	92% a 105%		
Plastificante (Tipo A, segundo ASTM)	Mantida Fixa	Aumento	CP selado	CP selado	30 dias	Vp (variável) a/c (variável)	σ/fc_j (fixo): 89% a 97%; σ/fc_j (var.): 50% a 61%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio= 100 dias. 	3
Plastificante (Tipo A, segundo ASTM)	Mantida Fixa	Aumento	Sujeito a umidade ambiente	Sujeito a umidade ambiente	56 dias	Vp (variável) a/c (variável)	σ/fc_j (fixo): 65% a 82%; σ/fc_j (var.): 34% a 46%	<ul style="list-style-type: none"> Não foi especificada a umidade do ambiente; Duração do ensaio= 100 dias. 	3
Plastificante (Tipo D, segundo ASTM)	Aumento	Mantida Fixa	Imerso em água	<ul style="list-style-type: none"> Imerso em água; Sujeito à 65% UR 	28 dias	σ/fc_j (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Básica: 65% a 100%; Total: 100% a 162%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio= 180 dias. 	3
Lignossulfonato	Aumento	Não informado, mas há possível ganho.	Vapor d'água à 98% UR	CP Selado	28 dias	σ/fc_j (fixo) Vp (fixo) a/c (fixo)	Básica: 112%, mas não houve diferença estatística	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio= 56 dias; A medida foi em deformação absoluta 	4
Lignossulfonato	Aumento	Não informado, mas há possível ganho.	Não informado	50% de UR	Não informado	σ/fc_j (Não informado) Vp (fixo) a/c (fixo)	Secagem: 115% (84 dias) a 134% (115 dias)	<ul style="list-style-type: none"> Não se sabe se é fluência específica. 	4
Lignossulfonato	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Não informado	3 situações: 35%, 50% e 95% de UR	28 dias	σ/fc_j (fixo) Vp (variável) a/c (variável)	Secagem: 35% UR: 102% a 117%; 50% UR: 67% a 117%; 95% UR: 98% a 119%;	<ul style="list-style-type: none"> Não foi informada a duração do ensaio; A unidade de fluência utilizada foi $10^{-6}/MPa$ 	4

Quadro 3.2: Levantamento de casos da influência dos aditivos plastificantes e superplastificantes na fluência. (Continuação)

Tipo / Base Química	Aditivo		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Plasticidade	Função	Cura	Sob carga					
Ácido Hidrocarboxílico (com retardador)	Mantida Fixa	Mantida Fixa	Não informado	95% UR	28 dias	σ/fc_j (fixo) Vp (variável) a/c (variável)	Secagem: 68% a 149%	<ul style="list-style-type: none"> O próprio autor aponta dificuldades de comparação dos resultados. 	4
Ácido Hidrocarboxílico	Mantida Fixa	Aumento	Não informado	95% UR	Não informado	σ/fc_j (Não informado) Vp (variável) a/c (reduziu)	60% a 72%	<ul style="list-style-type: none"> O autor comenta que o resultado não expressa a realidade do efeito do aditivo. 	4
Melamina	Mantida Fixa	Aumento	Não informado	Não informado	28 dias	σ/fc_j (fixo) Vp (reduziu) a/c (reduziu)	Total: 98%	Se for corrigido o efeito da redução do Vp a fluência aumenta;	4
Naftaleno	Mantida Fixa	Aumento	Não informado	Não informado	28 dias	σ/fc_j (fixo) Vp (reduziu) a/c (reduziu)	Total: 101%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio=334 dias. 	
Lignossulfonato	Redução (de 8cm p/ 4cm)	Aumento	Não informado	Não informado	28 dias	σ/fc_j (fixo) Vp (reduziu) a/c (reduziu)	Total: 105%		5
Lignossulfonato	Não informado	Não informado	Imerso em água com cal	Imerso em água com cal	Mesma idade equivalente (igual grau de hidratação)	σ/fc_j e Vp (Não informado) a/c (fixo)	Aumento da fluência básica, mas não informado quanto.	<ul style="list-style-type: none"> Cimento utilizado CPI; Realizado em argamassa. 	
Lignossulfonato e Ácido Hidrocarboxílico	Não informado	Não informado	50% UR	50% UR	12 horas	σ/fc_j e Vp (Não informado) a/c (fixo)	Ligno: Aumentou a básica e por secagem; Ácido: Redução de ambas.	<ul style="list-style-type: none"> Foi realizado em pasta de cimento CPV. 	5
Melamina	Grande aumento	Até 28 dias a resistência é igual	Vapor de umidade	23°C ± 2°C e 50% UR	28 dias	σ/fc_j (fixo) Vp (fixo) a/c (fixo)	Aumento médio de 110%, desde 1 dia até 20 meses de ensaio	<ul style="list-style-type: none"> Concreto de alta resistência (65MPa aos 28 dias) 	6
Lignossulfonato	Aumento	Mantida Fixa	100% UR	21°C ± 2°C e 55% ± 5%UR	7 dias	$\sigma/fc_j=0,3$ (fixo) Vp (fixo) a/c (fixo)	Básica: 156% Total 53%	<ul style="list-style-type: none"> Fluência à tração; Duração do ensaio = 150 dias. 	7
Lignossulfonato, Naftaleno, Melamina e Copolímeros	Não informado	Não informado	Não informado	Não informado	Não informado	σ/fc_j (variável) Vp (fixo) a/c (fixo)	120% ± 23%	<ul style="list-style-type: none"> O autor agrupou resultados de vários aditivos. 	8

3.3. ADIÇÕES MINERAIS

3.3.1 Tipos de Efeito na Fluência

As adições minerais quando inseridas no concreto podem interferir em uma série de fatores que tem relação direta com a fluência. Logo, é importante inicialmente ter em mente qual estratégia a se tomar para estudar o assunto, a fim de se delimitar as variáveis de interesse e manter o controle experimental. Dos vários autores pesquisados percebe-se essa dispersão de estratégias, motivando, assim, a organizar os trabalhos levantados a partir das premissas de cada um e, principalmente, tentando descobrir como foi tratada cada variável significativa na fluência, similar ao realizado para os aditivos plastificantes. No Quadro 3.3 são apresentadas as principais situações estudadas nos trabalhos pesquisados e quais as variáveis de interesse foram consideradas.

Quadro 3.3: Estratégias adotadas nos trabalhos levantados para avaliar os efeitos das adições minerais na fluência.

Diretrizes das Pesquisas	Variáveis Avaliadas
<ul style="list-style-type: none"> • Verificar o efeito sobre a fluência em dosagens com <u>resistências semelhantes</u>; • Verificar o efeito sobre fluência <u>mantido o volume de pasta e relação a/c fixo</u>; • Verificar o efeito sobre a fluência sob <u>condições de ensaio variáveis</u> (umidade e temperatura); • Verificar o efeito sobre a fluência de <u>concretos de tipos diferentes</u> (Convencional, CAD, argamassas, leve, etc); • A adição foi substituída parcialmente ao cimento com base em um <u>percentual em volume ou peso</u>; • Inserção ou alteração da <u>quantidade de aditivo plastificante</u> quando inserida uma adição mineral ao concreto de referência. 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Variáveis de controle</u>: tipo e Percentual de aditivo e adição (substituição em volume ou peso), volume de pasta, relação a/c, resistência à compressão, idade do concreto, condições ambientais, condições de ensaio (forma e tamanho do CP). • <u>Variáveis resposta</u>: fluência em relação ao concreto de referência, resistência à compressão, propriedades mecânicas em geral, retração autógena e hidráulica.

Assim como os aditivos plastificantes, as adições minerais quando incorporadas ao concreto de referência normalmente induzem a alteração da sua dosagem. Essa modificação por si só já é capaz de modificar substancialmente a fluência, como também outras propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Sabe-se, entretanto, que as adições minerais são capazes ainda de mudar as propriedades do concreto, mesmo que se consiga manter a proporção do concreto fixa. Isto ocorre porque modificações micro-estruturais na pasta de cimento ocorrem ao se adicionar uma adição mineral.

Logo, é possível dizer que o efeito das adições na fluência com a alteração da dosagem é um efeito indireto, pois a proporção dos materiais no concreto afeta de maneira generalizada outros parâmetros que interferem na fluência, dificultando que se saiba quais as causas são mais influentes na fluência, além da própria adição. Já quando ao se tentar manter fixa a proporção dos materiais que compõe o concreto, a adição incorporada à mistura do aglomerante deverá ser a causa principal das possíveis alterações na fluência, e assim podendo ser chamada de efeito direto.

Os efeitos indiretos, provenientes da alteração da dosagem quando inserida uma adição mineral, normalmente promovem um aumento do volume de pasta e ainda um possível aumento do consumo de água, pois ao se substituir parte em peso do cimento por adição, que possui normalmente massa específica inferior à do cimento, o volume do conjunto será maior, necessitando ainda mais água para hidratar e lubrificar as partículas do aglomerante composto. Desta forma, há uma tendência natural de aumento da fluência. Algumas metodologias de estudo de dosagem, como a utilizada no Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas, trabalham com a proporção de aglomerante no concreto (cimento + adição) por meio da definição de cimento equivalente, para evitar a alteração do volume de pasta e manter a proporção dos materiais no concreto em volume inalterada. Assim, quando se adiciona uma adição mineral, ela substitui parte do volume do cimento de tal forma que o volume de aglomerante permaneça constante. Essa forma de manutenção do volume constante de pasta não foi verificada em muitos trabalhos levantados, podendo assim concluir que em boa parte das publicações não houve um estudo efetivo do efeito direto das adições na fluência, ou então que os valores encontrados estão acima do esperado. Para se tentar corrigir o efeito do aumento do volume de pasta, alguns autores resolveram utilizar o princípio de Pickett (1956) abordado no trabalho de Brooks (2000) e descrito no item 3.2.1 desta tese.

3.3.2 Associação da Resistência Mecânica com a Fluência

As adições na maioria das vezes são utilizadas para aumento de resistência mecânica, mais especificamente resistência à compressão, e ainda para melhoria da durabilidade do concreto. Em função disto, em grande parte dos trabalhos publicados sobre o assunto a resistência mecânica é incrementada com o uso da adição. Nessa situação há a possibilidade da fluência ser reduzida devido à melhoria de rigidez da matriz cimentícia. Porém, esse fenômeno não funciona como uma regra bem definida, uma vez que o aumento de resistência, devido à inserção de uma adição, pode vir acompanhado de um aumento do volume de pasta e de consumo de água, ou até mesmo do uso de aditivos plastificantes para a melhoria da trabalhabilidade.

Mehta (1989) conclui em seu trabalho que não há uma influência direta da incorporação das adições ao cimento com a fluência do concreto, independentemente do tipo de adição aplicada. O autor afirma que a fluência, assim como qualquer propriedade dependente da evolução de hidratação do material cimentício, é amplamente influenciada pelo tipo e quantidade de agregados, e pela resistência do concreto (relação a/c, cura, etc). Portanto, como a adição ao cimento altera o desenvolvimento da resistência, ela pode alterar, desta maneira, a fluência no concreto. É importante destacar que o foco da comparação do autor, semelhante ao já destacado por Lohtia e Joshi (1995) e Luther e Hansen (1989), não é a influência direta das adições na fluência, fixando a dosagem, mas por meio da modificação da dosagem para alcançar maiores valores de resistência e, por conseguinte, alterando o comportamento da fluência. Vale lembrar que quando se altera a quantidade ou tipo de adição, como constatado nesses trabalhos, provavelmente pode alterar também a quantidade e/ou tipo de aditivo para alcançar certa plasticidade, perdendo sentido a análise da influência direta da adição na fluência, pois surge aí outra variável significativa no problema, como comentado anteriormente.

Na figura 3.2 é representado o processo de análise da influência das adições na fluência, segundo a estratégia de análise preconizada por Mehta em sua publicação. Para fins práticos esse método de análise deve ser interpretado de forma mais ampla, pois a inserção de alguma adição mineral gera normalmente, como efeito natural, a alteração de alguns parâmetros no estado fresco e endurecido e, assim, não se pode avaliar o efeito direto da adição sobre a fluência, mas sim, de um somatório de efeitos indiretos conseqüentes desta adição, tais como:

possível alteração da relação a/c , aumento do volume de pasta, alteração do consumo de água, redução do consumo de aglomerante para um mesmo fck , etc.

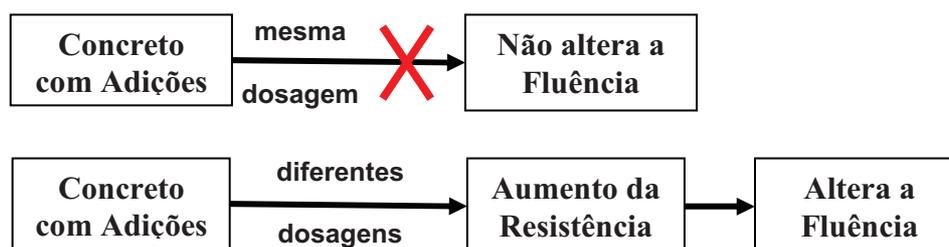


Figura 3.2: Relação indireta existente entre as adições e a fluência no concreto, segundo Mehta (1989).

Este tipo de análise, comentado por Mehta (1989), não é o mais apropriado para o estudo da influência das adições na fluência do concreto, principalmente do ponto de vista metodológico do planejamento experimental. Quando se deseja selecionar um concreto pela resistência, inserindo adições minerais na mistura, elas interferem de maneira óbvia na resistência do concreto e, por conseguinte a fluência tenderá a se alterar em função deste fato. Para se avaliar mais adequadamente esta influência, deve-se primeiramente ter definido qual interferência das adições na fluência o pesquisador deverá focar: os efeitos diretos ou indiretos. Os raros trabalhos onde houve a preocupação no experimento em avaliar o efeito direto da adição na fluência, com pelo menos a manutenção do volume de pasta constante foram: Buil e Acker (1985); Li, *et al.* (2002) e Akkaya *et al.* (2007). Nos demais o foco do planejamento experimental não se preocupava diretamente com a manutenção da dosagem inalterada: Ghosh e Timusk (1981), Nasser e Al-Manaseer (1986), Luther e Hansen (1989); Mehta (1989); Ravindrarajah e Tam (1989); Swamy e Mahmud (1989); Bilodeau e Malhotra (1992); Brooks *et al.* (1992); Khayat e Aïtcin (1992); Sivasundaram *et al.* (1992); Lothia e Joshi (1995); MacGregor (1998); Brooks (1999); Brooks (2000) e Brooks e Johari (2001).

Para avaliar o efeito das adições na fluência pode-se ainda trabalhar com a resistência fixa. A manutenção da resistência fixa nos estudos de dosagem é muito utilizada quando há exigências de projeto que motivem tal ação. Em decorrência deste fato, o concreto possivelmente ganhará em durabilidade e economia de cimento, pois as adições proporcionarão uma série de benefícios ao concreto já conhecidos. Os poucos autores de trabalhos que resolveram adotar essa estratégia (Ghosh e Timusk, 1981; Nasser e Al-Manaseer, 1986; Luther e Hansen, 1989; MacGregor, 1998) ficaram sujeitos a resultados de fluência conflitantes, pois ao se manter a resistência inalterada as dosagens foram

substancialmente modificadas; com isso não se sabe se a fluência foi alterada mais pela ação direta da adição ou pelo efeito indireto da alteração da dosagem. Essa forma de avaliação da fluência aparentemente possui seu caráter prático, pois permite obter o efeito da adição associado a um parâmetro de fácil obtenção que é a resistência à compressão. Contudo, não será possível extrapolar os resultados para outras situações similares de resistência, pois a proporção dos materiais do concreto poderá variar totalmente para uma mesma resistência e, conseqüentemente, a fluência também poderá alterar.

3.3.3 Efeito das Condições do Ensaio

Quando se pretende realizar a comparação da fluência de concretos com e sem adição mineral as condições operacionais do ensaio, desde a fase de cura até mesmo a condução do processo de ensaio e ainda a forma de apresentação do resultado de fluência interferem na conclusão dos estudos. Cura em ambiente úmido, como na câmara a vapor, retarda potenciais variações volumétricas do concreto em detrimento da manutenção higroscópica da umidade interna do concreto, mas que podem ocorrer quando expostas a secagem durante o ensaio de fluência. Neste caso a matriz cimentícia formada junto com a adição mineral normalmente reduz os diâmetros dos poros que, conseqüentemente dificulta a secagem interna do concreto e promove menores fluências totais do que em um concreto sem adição, com maiores poros. Contudo, pode haver um aumento da fluência por secagem em função da presença de maior quantidade de água retida no concreto se submetido à secagem. Ou seja, dependendo do histórico de cura antes de iniciado o ensaio de fluência o comportamento dos resultados podem ser os mais variados, como constatado no trabalho já citado de Tamtsia e Beaudoin (2000).

A forma de execução do ensaio é outra grande preocupação, conforme relatado no parágrafo anterior. Foi verificado em boa parte dos trabalhos levantados que ao se adotar uma determinada carga fixa para início do ensaio de fluência - baseado em um percentual da resistência do concreto nesta idade – achando que haverá a manutenção constante da relação entre a tensão aplicada no ensaio pela resistência do concreto, na verdade dificilmente acontecerá, como comentado no item 2.3.3 desta tese. Há o efeito natural do aumento da resistência que promove a redução da relação mencionada, caso a tensão aplicada permaneça fixa no ensaio, como já havia alertado Acker (1982), gerando resultados de fluência menores do que se efetivamente fosse mantida a relação fixa. Esse efeito é tão pronunciado quanto

maior for o crescimento da resistência durante o ensaio de fluência; situação essa que ocorre com muita frequência e de forma mais significativa com as adições minerais, principalmente nas primeiras idades. Ainda assim, trabalhos demonstram que mesmo mantendo a relação carga aplicada no ensaio pela resistência fixa, os resultados comparativos de fluência com e sem adição poderão ser alterados, como observado no trabalho de Nasser e Al-Manaseer (1986). Uma observação importante ainda percebida pelos autores foi a redução do efeito relativo da adição de cinza volante sobre a fluência quando comparado com o concreto de referência. A medida que ensaios de fluência com maiores relações carga/resistência eram realizados, menores eram os efeitos da adição comparado com a referência. Se extrapolado este fato ao campo prático, equivaleria dizer que quanto mais for solicitada uma estrutura de concreto, menor o efeito da adição de cinza volante deverá ser esperado na fluência em relação ao concreto sem adição.

Foram percebidas nas publicações analisadas que os resultados de fluência foram apresentados de diversas formas (coeficiente de fluência²⁰, fluência específica, deformação absoluta e deformação incluindo a parte elástica) e isso pode ser um grande inconveniente quando se deseja comparar o efeito das adições em relação ao concreto de referência. Ao se utilizar a deformação absoluta, grandes variações nos resultados serão encontradas, pois esses valores não estão associados à carga aplicada no ensaio, assim como para o coeficiente de fluência. Logo, o aconselhado é apresentar os valores na forma de fluência específica, dividindo-se os valores de deformação diferida pela tensão aplicada²¹.

3.3.4 Influência das Superpozolanas

As superpozolanas possuem certas características peculiares de melhoria de desempenho no concreto fresco e endurecido mesmo quando aplicadas em pequenas quantidades, comparado com as demais adições minerais. Ganho de resistência e durabilidade são duas dessas qualidades notoriamente reconhecidas, desde que sejam devidamente aplicadas ao concreto. Porém, quando se trata do comportamento viscoelástico, as informações relacionadas às superpozolanas não são unânimes. O que se pode afirmar é a tendência dessas adições no refinamento dos poros na pasta de cimento, em função da sua extrema finura, que, por conseguinte altera o comportamento da fluência do concreto. Sabe-se, entretanto, que isso não

²⁰ Relação entre a deformação ao final do ensaio de fluência e a deformação elásticas (inicial ao ensaio).

²¹ Normalmente a unidade utilizada é 10^{-6} /MPa.

é suficiente para explicar o comportamento das superpozolanas na fluência, pois a água interna na mistura, propulsora da fluência, pode sofrer interações químicas e físicas com os aglomerantes e com os materiais formados na hidratação.

A sílica ativa e o metacaulim são utilizados com frequência para concretos de alta resistência. Como esse tipo de concreto possui normalmente baixa relação a/c , o uso de superplastificante é quase que obrigatório. Somado a isso se acrescenta o efeito da alteração do volume de pasta quando substituída parcialmente a adição em peso no cimento e do próprio consumo de água, que é propulsor do fenômeno da fluência. O perfil deste concreto foi observado na maioria dos trabalhos levantados; o que equivale a dizer que os resultados de fluência provenientes destas publicações não expressam em sua maioria somente o efeito direto das adições sobre a fluência, como informado anteriormente, mas o efeito conjunto das adições somado aos efeitos indiretos provocados pelas alterações de outras variáveis que também interferem na fluência, como volume de pasta, consumo de água, etc. Essa situação foi encontrada também em outros trabalhos de adições com pozolanas comuns e adições cimentantes, como será relatado mais adiante.

Outra característica importante dos concretos com as superpozolanas refere-se à taxa de hidratação, que muitos autores relacionam com a resistência à compressão. O fenômeno observado por Lohtia e Joshi (1995) e Khayat e Aïtcin (1992), bem como por outros autores, foi que quando o concreto possui baixa relação a/c (aproximadamente inferior a 0,4) a resistência do concreto com adição nas primeiras idades (por volta de 3 dias) será mais elevada do que o concreto de referência. Em idades mais avançadas o efeito do ganho de resistência torna-se mais brando para esta situação. Já para concretos com relação a/c maiores não é observado ganho substancial na resistência nas primeiras idades, havendo maiores ganhos para idades mais avançadas. Esse fenômeno pode se refletir diretamente sobre os resultados de fluência, uma vez que, as superpozolanas aumentarem a rigidez da microestrutura da pasta, que tende a inibir a deformação diferida. Isso pode explicar a redução da fluência obtidas nos trabalhos de Khayat e Aïtcin (1992), Brooks e Johari (2001) e Li *et al.* (2002). A redução na fluência nesta situação observada, para concretos com sílica, foi em torno de 20% a 30%, em teores de adição menores que 10%, tanto para fluência básica quanto para secagem. Já para o único resultado com metacaulim, a redução foi substancial e de aproximadamente 70% em relação à referência, no teor de adição de 15% em concretos com resistência acima de 87MPa.

Como as superpozolanas são extremamente finas em relação ao cimento comum, elas possuem um ponto ótimo de substituição na matriz cimentícia e normalmente inferior às demais adições, como já mencionado. Se adicionada as superpozolanas acima deste nível, segundo Lohtia e Josh (1995) que é em torno de 15%, a matriz cimentícia fica supersaturada de superpozolana não-reativa com cimento e que terá basicamente como função o efeito *filler* e aumentar ainda mais o volume de pasta sem incremento de rigidez da pasta de aglomerante. Isto promoverá possivelmente uma maior tendência deformacional da matriz cimentícia e, conseqüentemente, maiores resultados de fluência. A esse comportamento soma-se ainda a maior necessidade de consumo de água e aditivo plastificante, aumentando ainda mais o efeito sobre a fluência. Esse comportamento possivelmente justifica os altos valores de fluência encontrados para as adições de sílica ativa observados nos trabalhos de Buil e Acker (1985), Tazawa e Yonekura (1986), Brooks (1999) e Brooks (2000). Os aumentos observados nesses trabalhos variaram em torno de 30% para a fluência básica em teores de 25% a 50% de sílica, até 110% para a fluência por secagem com 30% de sílica ativa.

Outro aspecto que pode contribuir para a explicação de um possível crescimento da fluência em concretos com superpozolanas é o aumento substancial de micro-poros na matriz cimentícia, como abordado no trabalho de Khatib e Wild (1996), citado nesta tese. Isso equivale a dizer que aumentando esses micro-poros maior será a potencialidade de ocorrer a fluência, possivelmente em maior proporção para a fluência por secagem, conforme comentado por Neville (1970), pois mais água ficará aderida nesse poros, beneficiando um comportamento viscoso da matriz cimentícia sob carregamento à diferentes níveis de umidade.

3.3.5 Influência das Pozolanas Comuns

Conforme comentado no capítulo 2, na família das pozolanas comuns podemos destacar a *argila calcinada* e a *cinza volante* com baixo teor de cálcio como as adições de grande aplicação na construção civil. Ambas possuem composições químicas semelhantes²², finura de mesma ordem de grandeza e atividade pozolânica moderada, função da maior presença de material inerte cristalino e menor finura, quando comparadas com as superpozolanas. Como a taxa de reação das pozolanas com os compostos do cimento normalmente é mais lenta do que a das superpozolanas, comportamento semelhante é esperado nas propriedades mecânicas,

²² Ver tabela 2.7 no trabalho de Liduário (2006), p. 36.

principalmente nas primeiras idades. Quanto ao tamanho médio das partículas, as pozolanas comuns tendem a possuir maiores valores do que os superpozolanas, gerando vazios maiores que alteram a taxa de hidratação devido à menor área de contato para iterações com outros compostos químicos. Como esses vazios interferem na umidade interna, é de se esperar que a fluência seja também afetada. Sendo assim, essa mescla de fatores que atuam no campo da fluência do concreto associadas às pozolanas fazem com que os estudos para se tentar correlacioná-las se tornem uma árdua tarefa, exigindo um minucioso programa experimental para evitar que variáveis secundárias possam encobrir a efetiva ação das pozolanas na variável de interesse.

Com base na compilação dos trabalhos sobre a influência das pozolanas comuns sobre a fluência não se pôde perceber alguma tendência de crescimento ou redução devidamente definida. Pelas várias conclusões obtidas dos trabalhos, observaram-se divergências acentuadas nas constatações. O delineamento do planejamento experimental pode ser apontado como principal motivador de tais divergências. A quantidade de água e volume de aglomerante devem ser prioritariamente padronizados nos estudos; o que não foi verificado em muitos deles. Outro ponto importante a se preocupar refere-se à taxa de carregamento no ensaio de fluência. Estudos realizados pelos autores Nasser e Al-Manaseer (1986) apontaram que há uma redução percentual gradual do aumento da fluência do concreto com adição em relação à referência, quando se aumenta a taxa relativa entre a carga aplicada no ensaio e a resistência do concreto. Isso serve como alerta, independente do tipo da adição a ser estudada, para que os níveis de carregamento sejam pré-estabelecidos nos estudos e que eventuais comparações de resultados devam considerar o efeito observado.

O que normalmente é defendido para as adições pozolânicas comuns no seu efeito sobre a fluência é o aumento nas primeiras idades, onde a resistência à compressão do concreto com adição é inferior à referência e ocorre o aumento do volume de pasta, e para idades mais avançadas há uma redução da fluência em decorrência das reações pozolânicas criarem um matriz cimentícia mais compacta e resistente. Sabe-se que essa generalização não é apropriada, em função do grande número de variáveis intervenientes no problema, mas será tomada como guia explicativo do fenômeno. O que foi possível perceber, por meio de alguns dos trabalhos para ensaios de fluência conduzidos na idade de 28 dias, é que os concretos com cinza volante apresentaram redução variável da fluência básica e por secagem em relação ao concreto de referência (entre 25% a 50%), possivelmente devido aos ganhos de resistência do concreto com a adição (GHOSH e TIMUSK, 1981; BROOKS, 1999; BROOKS, 2000). Por

outro lado, sabe-se que esses percentuais de redução provavelmente foram potencializados por outros fatores, como por exemplo: a falta de manutenção constante da taxa da carga aplicada no ensaio em relação à resistência do concreto; ou foram amenizados em decorrência da alteração da quantidade de pasta e volume de água do concreto.

Já em outros trabalhos onde a fluência no concreto aos 28 dias com cinza volante tendeu a crescer – indo no sentido contrário ao princípio defendido - ocorreu basicamente por motivos indiretos como: não houve o crescimento da resistência à compressão como esperado (RAVINDRARAJAH E TAM,1989); o aumento substancial do volume de pasta associado com o uso de aditivos superplastificantes (MacGREGOR, 1998), ao qual se supõe que aumentam a fluência.

Para idades iniciais o único trabalho que realizou ensaio de fluência para concreto com cinza volante (AKKAYA *et al.*, 2007) apresentou um aumento modesto de 15%. Porém a duração do ensaio foi extremamente curta (8 dias), podendo-se subtender, desta forma, que os aumentos deveriam ser bem mais significativos se o ensaio fosse continuado. Um trabalho citado por Lohtia e Josh (1995) se contrapõe ao anterior, informando que houve grande redução da fluência nas primeiras idades ao inserir a cinza volante, porém é importante destacar que o concreto utilizado foi de alta resistência e ao se inserir a adição houve ganho de resistência nas primeiras idades e redução da relação a/c. Todos esses fatores possivelmente superpostos explicam o resultado diferente do preconizado.

Outros fatores intervenientes no efeito das pozolanas comuns na fluência e pesquisados por alguns autores demonstram que o teor da adição pode interferir de maneira variada (LOHTIA e JOSHI, 1995; RAVINDRARAJAH e TAM, 1989), como também a própria origem da adição. Estudos conduzidos por Sivasundaram *et al.* (1992) apontam que a fluência pode variar em mais de 2 vezes dependendo da procedência da cinza volante utilizada. Entretanto, neste trabalho em específico, dos sete tipos de adições estudadas, as composições químicas e aspectos físicos das mesmas variaram significativamente. Os concretos que obtiveram maiores fluências foram aqueles em que o teor de óxido de cálcio estava acima do limite para uma adição do tipo F ²³ ou com área específica baixa, o que justifica adequadamente essa variabilidade.

²³ Sem tendência de ser cimentante, como a adição tipo “E”, segundo norma brasileira NBR 12.653 (ABNT, 1992).

Se realizada uma comparação entre uma pozolana comum e uma superpozolana, é de se esperar que o concreto com pozolana tenha tendência a possuir maior fluência do que o concreto com superpozolana, uma vez que as reações da adição comum com os compostos do cimento são, na maioria das vezes, mais lentas, permitindo deformações mais acentuadas sobre carga. No trabalho de Luther e Hansen (1989) esse fenômeno foi constatado ao se comparar concretos de f_{ck} igual a 54MPa com cinza volante e sílica ativa. O concreto com cinza volante apresentou fluência 12% superior ao concreto com sílica ativa na idade de 28 dias. Nesta mesma idade para concreto com f_{ck} igual a 70MPa a cinza volante apresentou menores valores de fluência. Fato este aparentemente contrário ao esperado, mas que pode ser explicado pelo maior aumento de resistência do concreto com cinza volante após os 28 dias (aumento de aproximadamente 30%) em relação à sílica ativa (aumento de apenas 8%), pois a cinza utilizada neste trabalho possui alto teor de óxido de cálcio, ou seja, com comportamento semelhante a uma adição cimentante.

3.3.6 Influência das Adições Cimentantes

As adições com características cimentantes (alto teor de CaO) por reagirem com água de forma mais lenta e necessitarem normalmente de maior volume de adição incorporado ao cimento, reduzem suas resistências nas primeiras idades e isso deve-se refletir no comportamento da fluência. Já em idades mais avançadas, por volta de 90 dias, os concretos com substituição parcial por essa adição podem alcançar resistência mais elevadas do que o concreto de referência sem adição em função de sua matriz mais densa, logo, mais uma vez, é de se esperar alteração no comportamento da fluência. A escória de alto forno e a cinza volante com alto teor de óxido de cálcio são duas das principais adições com característica cimentante aplicadas mundialmente, e por isso, da importância em se conhecer melhor o efeito das mesmas sobre o comportamento na fluência. Alterações sobre a fluência são esperadas devido às características químicas e morfológicas das adições cimentantes serem distintas dos cimentos comuns, alterando assim o processo de hidratação ao qual está diretamente relacionado com as deformações diferidas.

Concretos contendo teores de escória entre 50% a 75% apresentaram em alguns trabalhos levantados fluência reduzida em torno de 20% a 50% em relação ao concreto de referência para a idade de 28 dias (BROOKS, 1999; BROOKS, 2000), mesmo havendo aumento do volume de pasta. Este evento possivelmente está associado ao maior ganho de resistência para

o concreto com escória durante o ensaio do que para o concreto de referência, tornando as deformações diferidas para a escória menores, uma vez que normalmente a tensão de início do ensaio é mantida constante ao longo de todo o experimento. Conclusão semelhante foi obtida em um trabalho utilizando cinza volante tipo “E” (com efeito cimentante) de 3 fabricantes distintos (BILODEAU e MALHOTRA, 1992). Contrário ao esperado foi obtido por Nasser e Al-Manaseer (1986), ao qual apresentou a fluência com a adição de cinza volante tipo “E” 72% maior, em média, que a referência. Esse fato ocorrido, possivelmente é explicado em função de uma sobreposição de causas que favoreceram de maneira indireta a dosagem com cinza volante, como por exemplo: foi utilizada uma combinação de plastificante com superplastificante na dosagem com adição. Mesmo com trabalhos que dificultam a generalização do comportamento da fluência com adições cimentantes para a idade de 28 dias, citado anteriormente, pode-se especular que há uma tendência de redução mais aceita, como observado na compilação de vários resultados realizado por Brooks (1999) que tende a ser mais pronunciada a medida que maior volume desta adição mineral é substituída ao cimento na dosagem.

Em idades mais recentes de início dos ensaios de fluência – 3 dias e 14 dias – o concreto com adição cimentante possui inevitavelmente resistência mecânica inferior ao concreto de referência, em decorrência da hidratação da mistura adição-cimento estar inferior à do cimento naquela idade, logo espera-se uma maior deformação por fluência, pelo menos no início do ensaio. Esse comportamento pôde ser observado em Mehta (1989) e foi tão mais significativo quanto maior a taxa de substituição do cimento por adição cimentante, chegando a um aumento da fluência de 60% em relação a referência para a idade de ensaio de 10 dias. Evento contrário foi percebido nos trabalhos de Brooks *et al.* (1992) e Li *et al.* (2002). Nesses trabalhos a fluência básica reduziu para ensaios de fluência iniciados nas idades de 14 dias e 3 dias, respectivamente. A causa desse comportamento pode estar associada a maior taxa de crescimento da hidratação do cimento no concreto com adição. Como nas primeiras idades a resistência mecânica ainda é baixa para o concreto com adição, a taxa de hidratação do aglomerante, por outro lado, tenderá a atingir maiores índices de crescimento do que do concreto de referência, permitindo que no ensaio de fluência do concreto com adição inicie com maiores deformações iniciais, pois a hidratação ainda é baixa, e finalize com valores de fluência inferiores à referência devido ao maior aumento de rigidez em relação à referência, como constatado no trabalho de Brooks *et al.* (1992) e ilustrado na Figura 3.3.

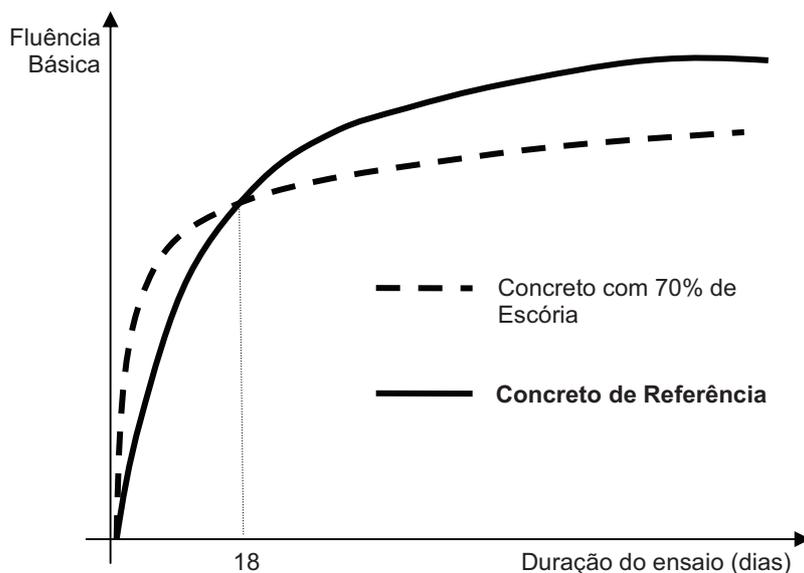


Figura 3.3: Comportamento da fluência sobre o efeito da escória de alto-forno na idade de início de carregamento 14 dias (Baseado no trabalho de Brooks *et al.* (1992)).

Ainda nas primeiras idades foi possível verificar no trabalho de Li *et al.* (2002), citado no parágrafo anterior, que o efeito combinado da escória com a sílica ativa reduziu ainda mais a fluência básica, mas manteve praticamente inalterada a redução da fluência por secagem já obtida com apenas a escória de alto forno. Os resultados finais de deformação diferida estão resumidos na Tabela 3.1. O fato da fluência básica ter reduzido para o concreto com adição possivelmente deve estar associado a maior hidratação desse concreto durante o ensaio de fluência, dando a falsa impressão de que a fluência é menor que a referência, pois a carga aplicada durante o ensaio deve acompanhar a evolução da resistência à compressão, mantendo a relação tensão/resistência sempre constante, como já comentado no item 2.3.3 desta tese.

Tabela 3.1: Redução das deformações em relação ao concreto de referência na idade de ensaio de 3 dias (Baseado no trabalho de Li *et al.* (2002)).

Ensaio	Escória de alto-forno (65% em subst.)	Sílica ativa (10% em subst.)	Escória (65%) + Sílica ativa (10%)
Fluência básica	- 14%	- 31%	- 43%
Fluência total	- 23%	- 24%	- 25%

3.3.7 Efeito do Teor das Adições na Fluência

Ao verificar todo o apanhado de trabalhos envolvendo o efeito das adições minerais na fluência percebe-se certo comportamento semelhante em boa parte dos grupos de adições: pozolanas, superpozolanas e cimentantes²⁴, que motivaram a elaboração deste item. Um dos fatores relacionados às adições que possui grande relevância na atuação sobre a fluência é o teor na mistura com o cimento. Logo, em termos gerais percebeu-se as seguintes tendências:

- *Pozolanas Comuns e Adições Cimentantes*: Ao aumentar o teor em substituição ao cimento a fluência final²⁵ tende a reduzir, pois as taxas de crescimento da resistência da matriz cimentícia (cimento + adição) serão superiores às da referência, que normalmente ocorrem mais cedo. Esse efeito se torna mais acentuado se a idade de início do ensaio estiver próxima à idade de 28 dias, pois normalmente a resistência do concreto de referência já foi alcançada e da dosagem com adição será desenvolvida em parte durante o ensaio de fluência. Se considerado que essas adições tendem a aumentar o volume de pasta, conforme muitos pesquisadores assim o fizeram, a redução possivelmente seria abrandada, minimizando o efeito anteriormente citado, até mesmo podendo inverter essa tendência;
- *Superpozolanas*: Ao aumentar o teor da adição, acima de certo limite²⁶, em substituição ao cimento a fluência final tende a aumentar, uma vez que esse tipo de adição traz consigo uma série de alterações na dosagem que contribuem para um aumento na fluência, mesmo que de forma indireta, como por exemplo: tendência de uso de superplastificante, aumento do volume de pasta sem aumento significativo da rigidez da matriz, aumento do número de microporos que são os propulsores da fluência, etc. Abaixo do limite de substituição mencionado, as superpozolanas não possuem um comportamento bem definido ao aumentar o seu teor no cimento, pois há efeitos que se contrapõem ao resultado da fluência: ao aumentar a quantidade de sílica ativa, por exemplo, a matriz cimentícia fica mais compacta e tende a reduzir a fluência, porém

²⁴ As principais superpozolanas citadas internacionalmente são o metacaulim e a sílica ativa, já os cimentantes são a escória de alto forno e cinza volante com alto teor de óxido de cálcio.

²⁵ Deformação ao final do ensaio.

²⁶ Segundo Lohtia e Josh (1995), em torno de 15%. Acima deste limite a adição terá como efeito preponderante de *filler*.

aumenta-se o número microporos que potencializam a fluência, principalmente a básica.

É importante enfatizar que o efeito provocado pela taxa de crescimento da resistência antes ou durante o ensaio de fluência, conforme citado anteriormente, é um fenômeno que deve ser eliminado quando se deseja verificar o efeito direto das adições na fluência. Isso porque a maioria dos ensaios aplica uma carga de ensaio inicial constante que vai se tornando cada vez menos expressiva em relação ao aumento da resistência. Logo, para manter a relação tensão/resistência fixa ao longo do ensaio a carga aplicada deve ser constantemente corrigida em função do crescimento da resistência.

Brooks (2000) em uma tentativa de generalizar os comportamentos quando se altera o teor de adição agrupou uma série de resultados de trabalhos e convencionou algumas expressões que culminaram no gráfico da Figura 3.4. Como era de se esperar o comportamento desses gráficos obtidos por regressão dos valores de ensaio apresentaram grande dispersão em relação aos resultados de ensaios, na ordem de grandeza de $\pm 40\%$, demonstrando que resultados que poderiam tender a reduzir a fluência, como é o caso da adição de escória, pode incrementar a fluência, conforme for a condução do experimento.

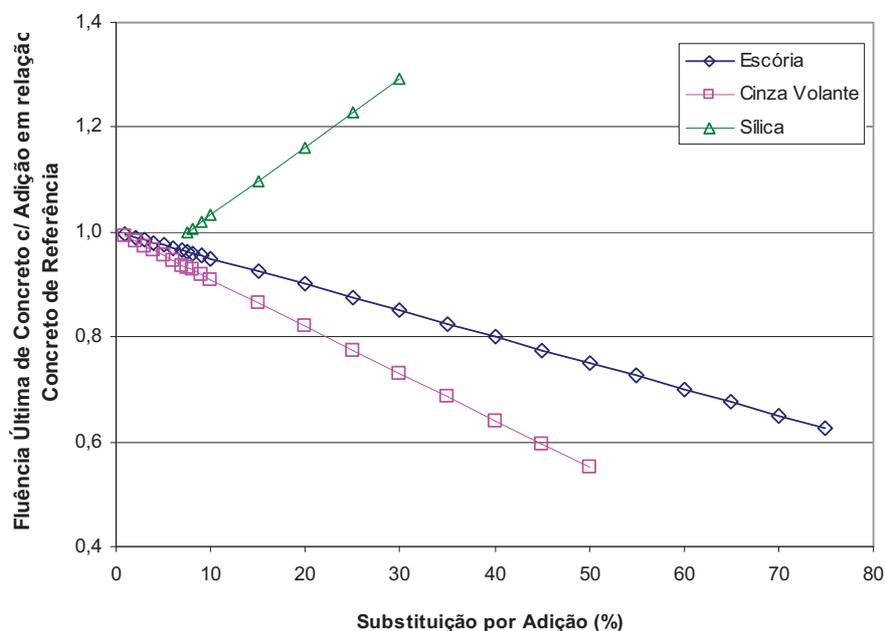


Figura 3.4: Efeito das adições minerais na fluência segundo Brooks (2000).

É importante ressaltar que as generalizações aqui apresentadas surgiram a partir de uma gama muito variada de trabalhos com condições experimentais peculiares a cada objetivo proposto. Logo, de uma maneira geral é difícil deixar claro se os comportamentos observados tiveram a sua origem nos efeitos diretos das adições na fluência, como abordado nesta tese ou mais provenientes de efeitos indiretos de alteração da dosagem, execução diferenciada dos procedimentos de ensaio, alteração das condições ambientais, tratamento variado dos resultados, etc.

3.3.8 Síntese dos Trabalhos Pesquisados

No Quadro 3.4 apresentam-se resumidamente as publicações a respeito da influência das adições na fluência que deram embasamento às considerações abordadas em parte desta tese, observados até o presente momento. Nota-se nitidamente neste levantamento de trabalhos que a maioria deles foi realizada em ensaios de fluência com idade de 28 dias, com aumento da resistência à compressão em quase a metade dos casos e redução do consumo de cimento em detrimento do aumento do volume de pasta, a partir da inserção das adições minerais. Na coluna onde são apresentados os resultados de fluência foi adotado, similar ao realizado para os aditivos, valor percentual relativo ao concreto de referência. Resultados acima de 100% indicam que o concreto com adição aumenta a fluência em relação à referência e abaixo de 100% indica redução da fluência com o uso da adição.

As referências dos trabalhos levantados foram as seguintes:

- Referência 1: Brooks (2000);
- Referência 2: Lohtia e Joshi (1995);
- Referência 3: Ghosh e Timusk (1981);
- Referência 4: Buil e Acker (1985);
- Referência 5: MacGregor (1998);
- Referência 6: Ravindrarajah e Tam (1989);
- Referência 7: Luther e Hansen (1989);
- Referência 8: Sivasundaram, Carette e Malhotra (1992);
- Referência 9: Bilodeau e Malhotra (1992);
- Referência 10: Brooks, Wainwright e Bonkendakji (1992);
- Referência 11: Khayat e Aïtcin (1992);
- Referência 12: Li, Wee, Wong (2002);
- Referência 13: Mehta (1989);
- Referência 14: Nasser e Al-Manaseer (1986);

- Referência 15: Brooks e Johari (2001);
- Referência 16: Swamy e Mahmud (1989);
- Referência 17: Akkaya *et al.* (2007);
- Referência 18: Brooks (1999).

Por fim, ressalta-se que a listagem apresentada anteriormente refere-se aos poucos trabalhos onde houve a preocupação formal em se tentar associar as adições e seus efeitos na fluência. Outras pesquisas que tratam do assunto de forma indireta não foram apresentadas, pois cria-se mais especulação para explicar os fenômenos e gera-se mais hipóteses a serem respondidas do que esclarecimentos desejados no momento.

Quadro 3.4: Levantamento de casos da influência das adições minerais na fluência.

Tipo	Adição Mineral		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Função		Cura	Sob carga					
	Consumo de Cimento	Resistência							
Escória de Alto Forno (EAF)	Não informado	Redução	Úmida até os 2 dias	Contato direto c/ o ambiente	28 dias	$\sigma/f_{cj}=0,15$ (fixa) Vp (fixa) a/c = 0,65(fixa)	Básica: 80% a 90% Total: 150%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 120 dias; Teor EAF = 30% a 50%. 	1
Escória de Alto Forno (EAF)	Não informado	Não informado	Não informado	Não informado	Não informado	σ/f_{cj} (fixa) Vp (fixa) a/c (não inf.)	50%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 150 dias; Teor EAF = 75%. 	1
Escória de Alto Forno (EAF)	Não informado	Não informado	Imerso em água	39% UR a 58% UR	28 dias	σ/f_{cj} (variável) Vp (variável) a/c (variável)	Total: 130%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 100 dias; Teor EAF = 35%; Houve testes alterando o S0₃. 	1
Escória de Alto Forno (EAF)	Redução	Até 35% de EAF, aumenta. P/ 68% de EAF, diminui.	Vapor d'água	50% UR e 95% UR	7,28 e 90 dias	$\sigma/f_{cj}=0,25$ (fixa) Vp (aumento) a/c = 0,51 (fixa)	Básica: 50% Total: 70%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 100 dias; Teor EAF = 70%; Def total inclui retração. EAF várias proced. 	1
Cinza Volante (CV)	Redução	Aumento	Não informado	90% UR	28 dias	$\sigma/f_{cj}=0,2$ (fixa) Vp (fixo) a/c (variável)	Total: 55%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 150 dias; Teor CV = 50%. 	1
Cinza Volante (CV)	Não informado	Aumento	3 dias imerso em água	50% UR	3 dias	σ/f_{cj} (não inf.) Vp (fixo) a/c (redução)	Total: 75%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 1 ano; Teor CV = 20%. 	1
Sílica Ativa (SA)	Redução	Aumento (CAR de 70MPa)	CP Selado	CP Selado e a 50% UR	28 dias	σ/f_{cj} (variável) Vp (fixo) a/c (redução)	Básica: 140% Total: 130%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 640 dias; Teor SA = 25%; Utilizou-se aditivo. 	1
Sílica Ativa (SA)	Redução	Aumento	Imerso em água	Imerso em água e 50% UR	28 dias	$\sigma/f_{cj}=0,3$ (fixo) Vp (fixo) a/c (fixo)	Básica: 140% Total: 210%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 800 dias; Teor SA = 30%; Utilizou-se aditivo. 	1
Sílica Ativa (SA)	Não informado	Aumento (Concreto de Alta Resist)	Selado e Secagem	Selado e Secagem	1 e 28 dias	σ/f_{cj} (fixo) Vp (fixo) a/c (redução)	Básica: 100% Total: 30%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 200 dias; Teor SA = 7,4%; Utilizou-se aditivo. 	1

Quadro 3.4: Levantamento de casos da influência das adições minerais na fluência. (Continuação)

Tipo	Adição Mineral		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Função		Cura	Sob carga					
	Consumo de Cimento	Resistência							
Sílica Ativa (SA)	Não informado (quando inserida a adição o tipo de cimento mudou)	Aumento (Concreto de Alta Resist)	5 dias imerso em água	Exposto de 45% a 60% UR	7 dias	$\sigma/f_{cj}=0,3$ (fixo) Vp (fixo) a/c (redução)	Total: 80%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 360 dias; Teor SA = 9,1%; Utilizou-se aditivo. 	1
Sílica Ativa (SA)	Não informado	Aumento (Concreto de Alta Resist)	Cura úmida (100%UR)	50% UR	28 dias	$\sigma/f_{cj}=0,4$ (fixo) Vp (fixo) a/c (redução)	Total: 70%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do Ensaio = 427 dias; Teor SA = 8,8%; Utilizou-se aditivo. 	1
Cinza Volante (CV)	Redução	Não informado	Não informado	Não informado	Não informado	σ/f_{cj} (não inf.) Vp (aumentou) a/c (não inf)	CV <15%; 100%; CV>15%: Leve aumento.	<ul style="list-style-type: none"> Poucas Informações 	2
Cinza Volante (CV)	Redução	Aumento (Concreto de Alta Resist)	Não informado	Secagem	Primeiras Idades (não especificado)	σ/f_{cj} (não inf.) Vp (não inf) a/c (redução)	Secagem: 17%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio = 180 dias; 	2
Cinza Volante (CV)	Redução	Mantida Fixa	7 dias em cura úmida + 21 dias c/ 50% UR	50% RU e 23°C	28 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (variável) a/c (redução)	Total: fck=20MPa: 58% fck=35MPa: 57%	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio > 7 meses; Foram testadas várias Cinzas; Cimento Eq. fixo. 	3
Sílica Ativa (SA)	Redução	Aumentou 43% (Concreto de Alta Resist.)	Cura úmida até dia 5 e depois selado c/ 20°C e 50% UR	Selado c/ 20°C e 50% UR	28 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (fixo) a/c (redução)	Básica: 130%	<ul style="list-style-type: none"> Utilizou-se aditivo; Resultado em def. específica; A carga de ensaio permaneceu fixa; 	4
Sílica Ativa (SA)	Redução	Aumentou 43% (Concreto de Alta Resist.)	Cura úmida até dia 2 e depois mantido dentro de saco plast.	Selado c/ 20°C e 50% UR	28 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (fixo) a/c (redução)	Total: 110%	<ul style="list-style-type: none"> A deformação foi corrigida pois \square/f_{cj} não foi etc; Teor SA = 25%; 	4
Cinza Volante (CV)	Redução	Mantida Fixa (40 MPa)	Cura úmida	25°C e 65% UR	3, 7, 14 e 28 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (aumento) a/c (redução)	Total: 3 dias: 100%; 7 dias: 100%; 14 dias: 110%; 28 dias: 125%	<ul style="list-style-type: none"> Foi descontada a retração por secagem; Abatimento fixo; Somente a carga permaneceu fixa 	5

Quadro 3.4: Levantamento de casos da influência das adições minerais na fluência. (Continuação)

Tipo	Adição Mineral		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Função		Cura	Sob carga					
	Consumo de Cimento	Resistência							
Cinza Volante (CV)	Redução	Mantida Fixa (70 MPa)	Cura úmida	25°C e 65% UR	3, 7, 14 e 28 dias	σ /fcj (redução) Vp (aumentou) a/c (redução)	Total: Não alterou,, independente da idade	<ul style="list-style-type: none"> Foi descontada a retração por secagem; Abatimento fixo; Somente a carga permaneceu fixa 	5
Cinza Volante (CV)	Redução	Redução (Ref. 25MPa)	Cura úmida	28°C e 75% ± 15%UR	28 dias	σ /fcj (redução) Vp (aumentou) a/c (redução)	Total: 20% de CV; 152%; 40% de CV; 133%;	<ul style="list-style-type: none"> Duração do ensaio 90 dias; Como o volume de pasta aumentou a fluência efetiva deve ser menor. 	6
Cinza Volante (CV)	Redução	Aumentou (p/ 20% de CV) Reduziu (p/ 40% de CV) (Ref. 35MPa)	Cura úmida	28°C e 75% ± 15%UR	28 dias	σ /fcj (redução) Vp c/ CV é maior a/c (variável)	Total: 20% de CV; 88%; 40% de CV; 96%	<ul style="list-style-type: none"> A CV apresentou aparente baixa reatividade; O crescimento inicial da fluência c/ adição foi maior que referência. 	6
Cinza Volante (CV) e Sílica Ativa (SA)	Cinza Volante c/ mais cimento que a Sílica Ativa (não há referência)	Mantida fixa (fck=54MPa)	3 semanas c/ CP's imersos em água+cal e depois em vapor até 28º dia	23°C ± 1,7°C e 50% ± 5% UR	28 dias	σ /fcj (redução) Vp c/ CV é maior a/c (variável)	Total: CV 112% da SA	<ul style="list-style-type: none"> Não há concreto de referência; Foram comparados concretos c/ CV e SA; CV do tipo "E" segundo NBR12653; Foram utilizados aditivos diferentes para CV e SA. 	7
Cinza Volante (CV) e Sílica Ativa (SA)	Cinza Volante c/ mais cimento que a Sílica Ativa (não há referência)	Mantida fixa (fck=70MPa)	3 semanas c/ CP's imersos em água+cal e depois em vapor até 28º dia	23°C ± 1,7°C e 50% ± 5% UR	28 dias	σ /fcj (não inf.) Vp (fixa) a/c (fixa)	Total: CV 70% da SA	<ul style="list-style-type: none"> Duração dos ensaios=1 ano; Foi utilizado alto teor de CV(58%); Utilizou-se aditivos. 	8
Cinza Volante (CV)	Não há concreto de referência. Foram testados 6 tipos diferentes de cinza	Concretos de Altas Resistências	Não informado	Não informado	Não informado	σ /fcj (redução) Vp (aumentou) a/c (fixa)	Grande oscilação de resultados entre as cinzas: > 2 vezes		

Quadro 3.4: Levantamento de casos da influência das adições minerais na fluência. (Continuação)

Tipo	Adição Mineral		Condições Ambientais		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Função		Cura	Sob carga					
	Consumo de Cimento	Resistência							
Cinza Volante (CV)	Redução	Redução (28 dias)	Cura úmida	Ambiente úmido	Não informado	σ/f_{cj} (redução) Vp (aumentou) a/c (fixa)	Houve redução da fluência para a CV tipo "E".	<ul style="list-style-type: none"> Duração dos ensaios=146 dias; Foram testados 3 tipos de CV; Utilizou-se aditivos. 	9
Escória de Alto Forno (EAF)	Redução	Aumento após 56 dias	Cura úmida	Não Informado	14 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (aumentou) a/c (fixa)	Básica e Secagem: Houve uma redução da fluência	<ul style="list-style-type: none"> Duração dos ensaios=70 dias; Os teores de EAF variaram de 30% a 70%; 	10
Sílica Ativa (SA)	Não informado	Aumento (CAR de 69 a 124MPa)	Cura úmida	Não informado	28 dias	$\sigma/f_{cj}=0,15$ Vp e a/c (não informado)	Redução da Fluência	<ul style="list-style-type: none"> Duração dos ensaios=4 meses; 	11
Sílica Ativa (SA)	Redução	Aumento	Cura úmida	30°C ± 2°C e 65% ± 5% UR	3 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (fixa) a/c=0,3 (fixa)	Básica: 55% Secagem: 70%	<ul style="list-style-type: none"> Duração dos ensaios=120 dias; Houve o desconto da retração; Teor de SA: 10%. 	12
Escória de Alto Forno (EAF)	Redução	Aumento	Cura úmida	30°C ± 2°C e 65% ± 5% UR	3 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (fixa) a/c=0,3 (fixa)	Básica: 86% Secagem: 80%	<ul style="list-style-type: none"> Teor de EAF: 65%. 	12
Mistura de Sílica + Escória	Redução	Aumento	Cura úmida	30°C ± 2°C e 65% ± 5% UR	3 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (fixa) a/c=0,3 (fixa)	Básica: 57% Secagem: 75%	<ul style="list-style-type: none"> Teor de SA: 10%; Teor de EAF: 65%; Subst. em peso. 	12
Cinza Volante (CV)	Redução	Não informado	Não informado	Não informado	10 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (aumentou) a/c (não inf.)	20% CV: 100% 30% CV: 140% 50% CV: 160%	<ul style="list-style-type: none"> CV com alto teor de cálcio (Tipo E) Segundo autor, conclusão semelhante pode ser dada à EAF. 	13
Cinza Volante (CV)	Redução	Mantida fixa	Cura úmida	Não informado	28 dias	σ/f_{cj} (redução) Vp (aumentou) a/c (fixa)	Secagem: P/20%CV: 172%	<ul style="list-style-type: none"> CV com alto teor de cálcio (Tipo E) Duração do ensaio=120 dias; Utilizou-se aditivo. 	14

Quadro 3.4: Levantamento de casos da influência das adições minerais na fluência. (Continuação)

Tipo	Adição Mineral		Início de Ensaio	Variáveis de Controle	Resultados de Fluência	Observações	Ref.
	Função						
	Consumo de Cimento	Resistência					
Metacaulim (MC)	Redução	Aumento (Ref. 87MPa e 15% MC 103,5MPa)	Condições Ambientais		σ/fcj=02 (redução) Vp (aumento) a/c (redução)	Básica: 30% Secagem: 37%	15
			Cura	Sob carga			
Cinza Volante (CV)	Não há concreto de referência	Aumento (fc _k =20, 40 e 60MPa)	Cura úmida a 20°C±2°C	21°C±1°C e 65%±5% UR	σ/fcj (redução) Vp (aumento) a/c (redução)	Em relação ao concreto de 20MPa o concreto de 60MPa: 20%	16
Cinza Volante (CV) e Sílica Ativa (SA)	Redução, mas mantido cimento equivalente constante	Redução	Não informado	Não informado	σ/fcj (redução) Vp (fixo) a/c (fixo)	20% CV: 115% 20% CV+ 8%SA: 120%	17
Escória de Alto Forno (EAF)	Redução	Possível redução	Não informado	Não informado	σ/fcj (Não inf.) Vp (Não inf.) a/c (Não inf.)	60%	18
Cinza Volante (CV)	Redução	Não informado	Não informado	Não informado	σ/fcj (Não inf.) Vp (Não inf.) a/c (Não inf.)	60%	18
Sílica Ativa (SA)	Redução	Não informado	Não informado	Não informado	σ/fcj (Não inf.) Vp (Não inf.) a/c (Não inf.)	Até 15% SA: 80% Maiores teores: 130%	18

CAPÍTULO 4: PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Avaliar o efeito das adições e aditivos na fluência pode ser uma tarefa um tanto quanto ambiciosa devido ao grande número de adições e aditivos existentes no mercado, bem como a variedade de produtos disponíveis que podem ser adicionados na mistura do concreto. Em função desse grande número de combinações possíveis, faz-se necessário adotar uma estratégia associada aos objetivos da pesquisa para delimitar o programa experimental, mas sem prejudicar a representatividade e a possibilidade de extrapolação a outros casos. Isto implica numa possível adoção de uma classe de cimento em específico e alguns tipos de adições minerais mais aplicados na engenharia civil, bem como de aditivos plastificantes usuais do mercado.

O programa experimental foi concebido para atender os objetivos propostos e responder à boa parte das hipóteses definidas nesta tese, não se esquecendo das limitações de ordem operacional, listadas no capítulo 1. Para tanto, os passos que antecedem os experimentos foram cuidadosamente delineados, com o propósito de minimizar esforços, sempre com a preocupação de se manter uma coerência com os fundamentos técnicos e científicos.

A par dessa situação, o programa de ensaios foi definido com base em uma estratégia voltada para uma melhor análise dos resultados a partir do uso de técnicas estatísticas, capazes de proporcionar maior confiabilidade aos resultados obtidos. As técnicas utilizadas foram a *Análise de Variância* em conjunto a *Análise Múltipla de Médias*. Elas foram utilizadas para verificar o grau de influência dos fatores supostamente influentes nas variáveis respostas estudadas e ainda verificar se dentro desses fatores é possível agrupá-los em resultados comuns.

Este capítulo contemplará desde o levantamento dos fatores controláveis que se pretende verificar o efeito sobre as variáveis respostas, passando pela estratégia a ser adotada para adequação dos experimentos, incluindo ainda informações sobre toda a montagem das etapas

que farão parte do programa de ensaios. Sendo assim, a pesquisa proposta estará embasada em resultados voltados a responder as questões levantadas, garantindo que os mesmos serão confiáveis a ponto das conclusões expostas possam ser extrapoladas a situações externas a esta pesquisa.

Foi incluído neste capítulo ainda os resultados de caracterização dos materiais utilizados durante o programa experimental, pois a partir desses resultados foi possível validá-los as condições exigíveis das estratégias adotadas pela pesquisa e ainda concentrar nos próximos capítulos somente os resultados do programa experimental, principal motivador desta tese. Foram apresentados resultados da caracterização dos aglomerantes – cimento e adições – para que pudessem ser avaliados se estão de acordo com as condições mínimas exigíveis segundo padrões da ABNT e ainda atenderem as composições químicas presumíveis. Essas caracterizações ainda foram realizadas para os agregados e aditivos plastificantes, incluindo ainda testes de validação do equipamento inovador para medições de deformações – sensor de fibra ótica - nos ensaios de fluência, retração autógena e coeficiente de dilatação térmica.

4.2. VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O termo “variável dependente” e “independente” apesar de bastante difundido no meio técnico não é o mais utilizado em experimentos quando tratados estatisticamente, como se pretende aqui. Independentemente de qual seja a terminologia adotada, uma das primeiras fases do planejamento experimental é verificar o escopo que se pretende estudar. Neste programa de ensaios atenção especial será dada na variável resposta: fluência do concreto, associado aos efeitos provocados pelos fatores controlados, que nesta pesquisa serão os tipos de adições minerais e os tipos de aditivos químicos plastificantes, a serem descritos em detalhes neste item, conforme ilustrado na Figura 4.1.

Ainda a respeito da Figura 4.1 é possível perceber que há os “fatores constantes”. Esses são os fatores que deverão permanecer inalterados nos ensaios, pois interferem significativamente nos resultados e de forma já reconhecida, como observado na revisão bibliográfica. Os “fatores não-controlados” são aqueles em que não se consegue manter estritamente fixos durante os ensaios, mas procura-se limitá-los a intervalos aceitáveis e conhecidos, assim pode-se posteriormente associá-los às variáveis respostas ou então utilizá-los para justificar as variabilidades encontradas nos resultados.

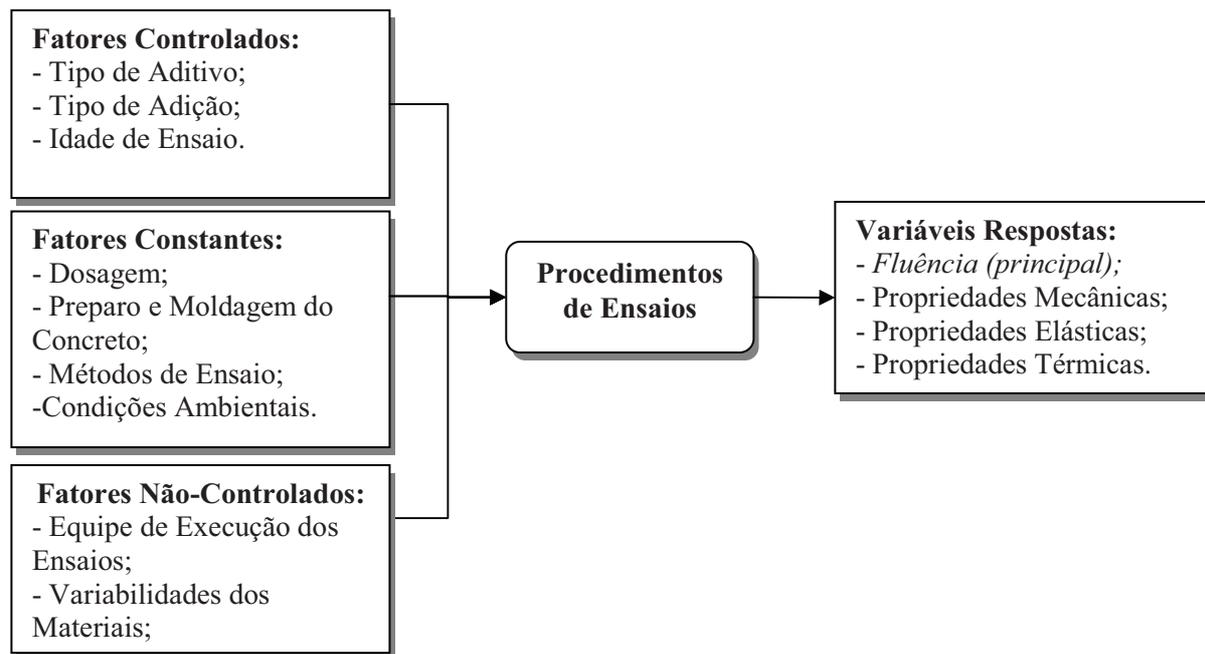


Figura 4.1: Parâmetros envolvidos nos experimentos.

4.2.1. Fatores Controlados

Os fatores escolhidos para verificar o efeito sobre as variáveis de resposta são:

- Tipo de aditivo químico (plastificantes);
- Tipo de adição mineral;
- Idade de ensaio.

Eles serão manipulados intencionalmente para verificar o efeito sobre a fluência básica e outras propriedades do concreto, daí a denominação de fator controlável, referindo-se a possibilidade de controle intencional sobre a variável resposta.

A família de aditivos químicos escolhida para a realização dos ensaios foi a utilizada para ganho de plasticidade no estado fresco. Por isso, serão denominados daqui para frente como aditivos plastificantes. Não haverá alteração do consumo dos aditivos plastificantes ao longo do programa experimental, embora entre os dois tipos estudados os consumos recomendados pelo fabricante dos plastificantes serão diferentes.

Os diferentes tipos de adições minerais previstos possuirão quantidades a serem adicionadas aos concretos distintas em função de suas características peculiares de atuação na mistura. Como se pretende manter a dosagem inalterada, logo haverá a necessidade de se implementar

uma estratégia, a ser apresentada no item 4.3, para evitar que haja a variação de outros parâmetros influentes nas variáveis resposta. Caso contrário, não se saberá dizer se o efeito nos resultados de ensaios foi promovido pelos fatores de controle ou decorrentes de outros parâmetros que não permaneceram fixados no programa experimental.

A idade de ensaio é um fator de grande expressividade no experimento e reconhecidamente um dos principais influentes na maioria das propriedades do concreto. Apesar desse reconhecimento temporal relativamente bem dominado do efeito da idade do concreto, pouco se sabe o seu efeito conjunto com as adições e aditivos na fluência, uma vez que, principalmente nas primeiras idades, impera um comportamento não linear no concreto, dificultando qualquer tipo de extrapolação.

4.2.2. Variáveis de Resposta

As variáveis de resposta refletem o comportamento do concreto sob efeito dos fatores de controle citados anteriormente, ou seja, elas são as conseqüências da alteração dos níveis dos fatores de controle. As variáveis de resposta a serem estudadas do concreto são:

- fluência básica e retração autógena;
- propriedades mecânicas: resistência à compressão e tração por compressão diametral; e elásticas: módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson;
- elevação adiabática de temperatura;
- propriedades térmicas: calor específico, difusividade térmica e coeficiente de dilatação térmica; e
- propriedades físicas: absorção, massa específica e porosidade do concreto.

O foco principal dos resultados está concentrado na fluência básica, apesar de outras propriedades estarem contidas nas variáveis de resposta, às quais serão utilizadas em simulações *termotensionais* para possíveis situações de campo.

4.2.3. Fatores Constantes

Os fatores constantes deste experimento foram assim escolhidos, pois já se conhecem os seus efeitos na variável de resposta, além de serem altamente significativos nos resultados esperados. Caso os mesmos não se mantenham fixos, corre-se o risco de seus efeitos sejam

maiores que os dos fatores de controle sob a variável resposta. Sendo assim, foram mantidos inalterados nos ensaios executados:

- volume de pasta no concreto;
- consumo de água da mistura;
- consumo de cimento equivalente²⁷;
- relação a/c equivalente (a/c_{eq});
- preparação do concreto e moldagem dos corpos-de-prova;
- execução dos ensaios; e
- condições Ambientais (umidade e temperatura²⁸).

É importante enfatizar que o controle desses fatores, mantido a níveis relativamente constantes, é de fundamental importância para uma adequada análise dos resultados que advirão dos ensaios planejados, evitando possíveis distorções que impeçam que haja conclusões satisfatórias com base no escopo desta pesquisa. No caso das condições ambientais, será procurado respeitar os intervalos de variação conforme os procedimentos de ensaios assim os exigirem

4.2.4. Fatores Não Controlados (Ruídos)

Esses fatores dificilmente podem ser controlados em função da aleatoriedade associada a eles, devendo, contudo, serem administrados adequadamente para evitar grandes distorções nos resultados. São esses os principais fatores responsáveis pelo erro experimental (variabilidade), conforme preconiza o modelo estatístico. Para esta pesquisa foi detectado os seguintes e mais propensos fatores não controlados:

- situação dos equipamentos utilizados (betoneira, balança, dosadores, prensas, equipamentos de ensaios em geral, aquisitores de dados de ensaio, etc); e
- equipe de moldagem dos corpos-de-prova e execução dos ensaios.

No que se refere aos equipamentos para realização dos ensaios, os mesmos serão utilizados conforme procedimentos específicos e mantidos em situação de uso normal com controle de

²⁷ Quando se diz que o consumo de cimento equivalente é fixo, deve-se saber que o volume de aglomerante não se alterará com a inserção da adição, como será descrito mais a frente.

²⁸ Apesar de variáveis em relação ao tempo, a umidade e temperatura devem ser mantidas dentro de certo intervalo, conforme preconiza a norma NBR 8224/83.

calibração dos equipamentos, uma vez que o Laboratório de Concreto de Furnas, onde foram realizados os ensaios, possui acreditação ISO 9001 (ABNT, 2008).

4.2.5. Interações entre as Variáveis

As interações entre os fatores controláveis serão estudadas nesta pesquisa, a partir de uma matriz de combinações das dosagens com as adições e aditivos de forma randômica para evitar que o efeito dos fatores não controláveis induza a um comportamento irreal do fenômeno estudado. No tratamento estatístico dos resultados provenientes desses ensaios, por meio de análise de variância, serão efetuados testes para confirmação de tais efeitos, se comprovadamente significativos.

A principal interação a ser estudada será entre o tipo de aditivo e o tipo de adição, pois essa combinação de produtos é praticamente inevitável na maioria dos concretos, principalmente ao se adicionar uma adição mineral que altere sensivelmente a trabalhabilidade da dosagem.

4.2.6. Níveis dos Fatores de Controle

Defini-se como níveis dos fatores de controle o conjunto de valores que os fatores podem assumir a fim de verificar o grau de influência sobre a variável resposta. O Quadro 4.1 apresenta um resumo dos níveis e uma breve descrição dos mesmos. Os teores de aditivos e adição no concreto para cada nível serão fixos, pois caso contrário haveria novos fatores de controle (teor de adição e aditivo), aumentando de forma significativa a quantidade de ensaios, e a complexidade de tratamento e interpretação dos resultados.

Quadro 4.1: Fatores de controle com seus respectivos níveis de variação.

Fator de Controle	Nº de Níveis	Descrição dos Níveis
Tipo de Aditivo*	3	Sem aditivo, Plastificante e Superplastificante.
Tipo de Adição*	4	Sem adição, Metacaulim, Argila Calcinada e Escória.
Idade de Início de Ensaio	3	1, 3 e 7 dias

* Os teores são fixos para cada tipo de aditivo e adição.

Foi adotado para os níveis do aditivo: um plastificante (base *lignossulfonato*), classificado pela norma brasileira EB1763 (ABNT, 1992) como sendo do tipo “P”, e um superplastificante (base *naftaleno*), classificado pela mesma norma como sendo do tipo “SP”. A escolha desses tipos de aditivos redutores de água deve-se exclusivamente ao histórico de aplicação

apresentado ao longo dos últimos anos na construção de barragens, tendendo assim a preservar o enfoque prático ao escopo desta pesquisa.

Princípio similar foi adotado para a seleção dos tipos de adições (outro fator de controle) a serem empregados nesta pesquisa. Utilizou-se como critério de escolha a classificação preconizada pela norma brasileira NBR 12.653 (ABNT, 1992), similar ao apresentado por Dal Molin (2005). Nesta classificação foi selecionada uma adição cimentante (escória de alto forno), uma adição pozolânica comum (argila calcinada) e uma superpozolana (metacaulim), conforme descrição apresentada na revisão bibliográfica desta tese.

A escolha das idades para início dos ensaios (1, 3 e 7 dias) foram motivadas devido às poucas pesquisas existentes nas primeiras idades em função da não linearidade do comportamento da fluência, conforme observado nos trabalhos levantados no capítulo 3. A idade de 28 dias foi incluída para outras propriedades facilmente obtidas por meio de ensaios rápidos e baratos, justificando assim poderem ser inseridas no programa experimental.

4.3. ESTRATÉGIA ADOTADA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Um ponto fundamental que requer melhor delimitação nas estratégias do estudo experimental refere-se à quais fatores influentes na fluência deverão permanecer inalterados (isso já foi descrito nos sub-itens anteriores) e como se conseguirá mantê-los fixos, mudando somente os de interesse. Conforme comentado na revisão bibliográfica, são vários os fatores que interferem no fenômeno da fluência, abrangendo desde fatores ambientais (temperatura, umidade, etc), composição do concreto (dosagem do concreto), condições de pré e pós-concretagem (adensamento, tipo de cura, tipo de fôrma, etc), tipo dos materiais componentes do concreto (tipo dos agregados, cimento, etc) até a geometria da peça de concreto analisada. Nesse emaranhado de fatores, muitos deles interconectados, é fundamental que se organize os mesmos de tal forma que não haja sobreposição de efeitos, a ponto de não se saber se o resultado provocado pelas adições e aditivos na fluência foi em decorrência dos tipos de materiais utilizados - fatores de controle considerados neste programa - ou devido a alterações em outros fatores, tal como a dosagem.

Mais especificamente no que se refere à composição do concreto, é de conhecimento geral que o volume de pasta está intimamente ligado ao efeito da fluência: concreto com maior

volume de pasta possuirá maior efeito na fluência, mantido os outros fatores que interferem no problema fixo. Ainda a respeito da composição do concreto, salienta-se que o efeito provocado pela alteração do consumo de água na dosagem afeta potencialmente à fluência, uma vez que ele tem papel fundamental na hidratação dos compostos cimentícios, como também na disposição e tamanho dos vazios, sejam eles na escala micro, meso ou macro estrutura da pasta gerada. Assim, é importante ressaltar que para se verificar o efeito do tipo da adição e aditivo no concreto, a proporção dos materiais deve permanecer constante, caso contrário, não se poderá saber se houve o efeito direto das adições e aditivos na fluência, ou se foi devido ao efeito indireto desses produtos somados a alteração da dosagem. Por outro lado, adotada essa premissa, propriedades normalmente mantidas fixas, como a resistência à compressão, serão alteradas, uma vez que são conseqüências naturais da modificação do traço, como a própria fluência.

A manutenção do fator constante “dosagem do concreto” fixo, conforme pretendido no programa experimental, requer a adoção de um princípio muito conhecido por Furnas em seus estudos de dosagem. O princípio se baseia na adoção de um consumo de cimento equivalente quando se adiciona alguma adição mineral em substituição parcial ao cimento (EQUIPE DE FURNAS, 1997). Desta forma, a proporção dos aglomerantes em relação aos agregados poderá permanecer fixa.

O cimento equivalente permanece constante ao se inserir um percentual, em substituição, de adição mineral quando o volume de aglomerante²⁹ do concreto de referência (somente com cimento) é mantido fixo mesmo ao se inserir a adição. A idéia é converter o percentual de substituição em volume do cimento da dosagem de referência pelo mesmo volume em adição, continuando no total com volume de aglomerante fixo, ou, em outras palavras, o cimento equivalente inalterado. O fluxograma da Figura 4.2 resume o princípio.

²⁹ Entende-se por aglomerante a todo material aglutinador de agregados para formar um compósito único e sólido. No caso desta tese o aglomerante é composto por cimento mais adição.

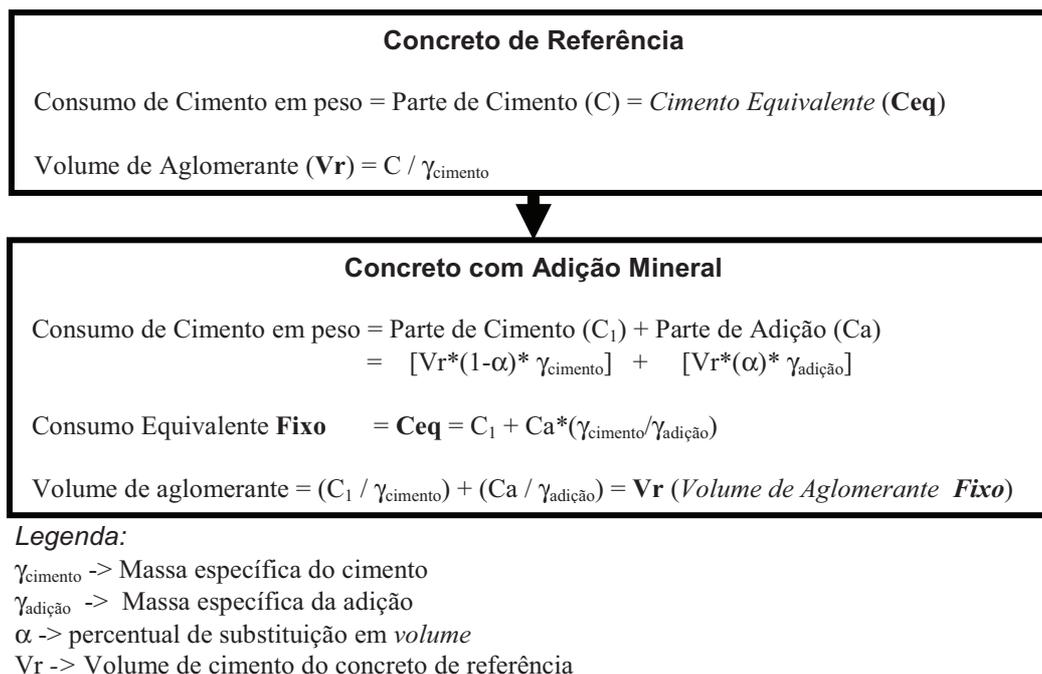


Figura 4.2: Princípio do Cimento Equivalente.

É comprovado a partir da Figura 4.2 que o consumo de cimento equivalente, em peso, permanecerá inalterado. Logo, se mantido fixo o consumo de água, a relação a/ceq será também constante, e assim toda a dosagem permanecerá constante, inclusive o volume total de agregados, mesmo que haja a introdução de uma adição mineral no concreto de referência.

Por questões óbvias, quando mantida a dosagem inalterada, haverá uma provável variação da trabalhabilidade do concreto, mas que de uma forma geral não deverá influenciar de forma expressiva no efeito da fluência, contanto que seja ajustada as dosagens previamente para se ter entre os extremos de trabalhabilidade - maior e menor - no programa experimental ainda factíveis de serem aplicados em campo. Para isso, será adotado mesmo procedimento de moldagem e adensamento, tentando tornar os corpos-de-prova moldados o mais homogêneo o possível, não exercendo, entretanto, energia de adensamento elevada, pois tenderia a tornar a pasta dos concretos semelhantes em termos de distribuição dos poros, e anulando uma das qualidades do uso dos aditivos químicos em relação ao concreto de referência, já que energia de adensamento elevada melhora substancialmente o adensamento do concreto ou pode provocar a segregação exagerada dos agregados em relação à pasta.

É importante ainda relatar o efeito que tais misturas (aditivos e adições) irão provocar nas propriedades do concreto, além do efeito principal a ser estudado na fluência. A resistência à compressão é uma delas. Ao se alterar a composição do traço, e não sua proporção, a

resistência à compressão, como outras propriedades, possivelmente irá mudar de valor, o que não consiste em dizer que houve um equívoco no plano da pesquisa, uma vez que tanto a fluência como a resistência à compressão são conseqüências da proporção e composição da dosagem. Assim, os efeitos associados da fluência em relação a outras propriedades não serão priorizados sob o aspecto da estratégia da pesquisa, o que resulta em dizer que algumas dessas propriedades serão monitoradas por meio de ensaios, porém não serão mantidas fixas para a avaliação da fluência, pois tornaria o programa experimental inviável tecnicamente, uma vez que a manutenção da resistência à compressão, por exemplo, alteraria provavelmente o traço do concreto (fator constante na pesquisa) e que tem forte associação com a fluência.

4.4. INSUMOS, EQUIPAMENTOS E DEMAIS RECURSOS LABORATORIAIS

Serão utilizados nesta pesquisa materiais componentes do concreto de fácil aquisição e presente em quantidade suficiente para que não ocorram dificuldades futuras decorrentes da modificação do traço ou materiais componentes do concreto de referencia da pesquisa. Os materiais utilizados e suas principais características encontram-se apresentadas nos itens a seguir.

4.4.1. Agregados

O agregado graúdo obtido possui diâmetro máximo de 32mm; sua composição mineralógica é *quartzo-micaxisto*, proveniente da Pedreira Araguaia situada na região centro-oeste brasileira, mais especificamente em Aparecida de Goiânia - GO. O agregado miúdo utilizado é do tipo areia artificial de mesma composição mineralógica do agregado graúdo com granulação fina e alto teor de pulverulentos (situação típica de areia utilizada na construção de barragens). Esse alto teor de pulverulento (superior ao limite de 5%) contribui para o efeito de fluência, pois retém maior consumo de água na pasta e promove o efeito filer. Apresenta-se na Tabela 4.1 um resumo das principais características ensaiadas dos agregados. Detalhes do ensaio granulométrico dos agregados graúdos e miúdos encontram-se descritos nas Figuras A.1 e A.2 apresentadas no apêndice A desta tese.

Tabela 4.1: Resultados de caracterização dos Agregados.

Ensaio	Brita 32mm	Areia Artificial
Absorção de água (%)	0,6	0,1
Módulo de Finura	7,71	2,71
Massa Específica Saturada Seca (kg/m ³)	2630	2570
Índice de Forma	2,4	---
Teor de Material Pulverulento (%)	---	14,98

4.4.2. Aglomerantes

O cimento escolhido para compor a pesquisa é do tipo CPII-F-32, em função do seu baixo teor de adição, pois assim pode-se estudar de maneira mais fiel o efeito das adições sobre um concreto de referência. Sua composição química e as suas principais propriedades mecânicas encontram-se resumidas nas Tabelas A.1 e A.2, respectivamente, do Apêndice A. Destaca-se que essas propriedades obtidas em ensaios atendem as especificações da norma brasileira NBR 11.578 (ABNT, 1991).

As caracterizações químicas e físicas das adições minerais encontram-se resumidas nas Tabelas A.3 e A.4, respectivamente, do Apêndice A. A escória de alto forno apresentou alto teor de óxido de cálcio e as adições de metacaulim (superpozolana) e argila calcinada (pozolona comum) apresentaram alto teor de óxidos de silício e alumínio, como se era esperado. Quanto a finura, as adições de metacaulim (9.800cm²/g) e argila calcinada (7.930cm²/g) apresentaram valores superiores ao cimento de referência (4.900cm²/g) e a escória de alto forno (4.850cm²/g) é praticamente a mesma. Foram realizados ainda ensaios de *difração de raio X* para verificação do grau de *amorficidade* das adições (vide Apêndice A – Figuras A.3 a A.5) e ensaios de *granulometria a laser* das adições e do cimento para constatação dos diâmetros médios das partículas (Tabela A.5 e Figura A.6 do Apêndice A). Destaca-se que essas propriedades de caracterização atendem em sua maioria as exigências mínimas abordadas na Tabela 2.2, referente à norma brasileira NBR 12.653 (ABNT, 1992).

As características físico-químicas obtidas para as adições minerais utilizadas na pesquisa (conforme resultados apresentados nas Tabelas A.3 e A.4 do Apêndice A) estão consistentes com os valores apresentados pelas principais referências - Lohtia e Joshi (1995), Mehta (1989), etc - e recomendações técnicas sobre o assunto - NBR 12.653 (ABNT, 1992) e ASTM C494 (ASTM, 1999). Destaca-se as boas propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de atividade pozolânica para a argila calcinada bem próximas as obtidas para o metacaulim.

O metacaulim segundo os resultados de caracterização apresentou as partículas de menores diâmetros, o que deve ajudar a conferir a essa adição sua alta reatividade. Já a argila calcinada apresentou partículas finas um pouco superiores as do metacaulim, o que confere a esta adição significativas propriedades mecânicas além da esperada nesta pesquisa. A escória apresentou granulometria semelhante ao do cimento, porém com partículas de dimensões levemente inferiores. Percebe-se ainda segundo os resultados de caracterização que as partículas das adições minerais com diâmetro de até aproximadamente 6 μm encontraram-se em maior quantidade do que as partículas do cimento. Isso justificaria a maior finura dessas adições e boa parte das suas propriedades benéficas comentadas no capítulo 2 desta tese.

Em relação ao calor de hidratação das adições, a argila calcinada (pozolana) e a escória de alto forno apresentaram os menores valores combinados ao cimento, conforme síntese observada na Tabela 4.2. Foram realizados o ensaio de calor de hidratação do cimento e sua combinação com as adições na mesma proporção utilizada no concreto (10% para o metacaulim, 30% para a pozolana e 50% para a escória em volume) a partir da garrafa de *Langavant*. Os gráficos de calor de hidratação dessas combinações estão agrupados na Figura A.7 do Apêndice A. O metacaulim apresentou os maiores valores de calor de hidratação confirmando sua potencialidade reativa com os compostos do cimento. Já a escória apresentou a menor taxa de calor de hidratação e o menor valor absoluto, desde as primeiras horas do ensaio até o término. A pozolana apresentou taxa de calor hidratação semelhante a do cimento e do metacaulim até a idade de 24 horas, depois não acompanhou a mesma evolução dos mesmos gerando um calor de hidratação intermediário, maior que a escória, porém menor que a do cimento.

Tabela 4.2: Calor de hidratação do cimento e das suas combinações com as adições.

<i>Idade (horas)</i>	Calor de hidratação (J/g)			
	<i>Cimento</i>	<i>Cimento + 10% Metacaulim</i>	<i>Cimento + 30% Argila Calcinada</i>	<i>Cimento + 50% Escória AF</i>
24	191	196	183	107
48	208	221	183	150
72	207	221	178	162
168	215	225	181	181

4.4.3. Aditivos Químicos

Os aditivos escolhidos para compor o programa experimental do projeto estão descritos na Tabela 4.3. Os critérios utilizados para a escolha desses produtos foram a facilidade de disponibilidade no mercado e pequeno efeito secundário, normalmente encontrados em aditivos polifuncionais.

Tabela 4.3: Aditivos químicos utilizados na pesquisa.

Tipo de Aditivo	Marca	Descrição Básica*
Plastificante	Plastiment 322 N	<ul style="list-style-type: none"> • Plastificante de pega normal, redutor de água; • Composição Básica: Sais sulfonados de <i>base Lignossulfonato</i>; • Intervalos de aplicação: 0,25% a 0,50%; • Densidade à 25°C: 1,21 a 1,25 kg/l; • pH: 8 a 10.
Superplastificante	Sikament SM 251	<ul style="list-style-type: none"> • Superplastificante de pega normal, redutor de água; • Composição Básica: Sais sulfonados de <i>base Naftaleno</i>; • Intervalos de aplicação: 0,60% a 1,50%; • Densidade à 25°C: 1,18 a 1,22 kg/l; • pH: 7 a 9.

* Dados fornecidos pelo fabricante *Sika* do Brasil – Manual Junho de 2005.

4.4.4. Sensores de Deformação e Temperatura

Os sensores utilizados para monitoramento da deformação e temperatura são de fibra ótica. O princípio de funcionamento dos mesmos está associado ao monitoramento da franja de luz que é refletida por ranhuras, criadas na fibra por meio de raio laser, quando o sensor é submetido a deformações. As deformações afastam ou aproximam as ranhuras, alterando o comprimento de onda da franja refletida, cujo princípio é denominado de *Redes de Bragg*. O controle do comprimento de onda da luz refletida permite determinar qual a deformação sofrida pelo sensor. A proteção da fibra ótica, onde se localizam os sensores de temperatura e deformação, é envolta em uma cápsula metálica com dois anéis externos (Figura 4.3) os quais asseguram que o sensor sofra as mesmas deformações do concreto, uma vez que ele estará embutido e aderido mecanicamente dentro do maciço que ficará sujeito aos efeitos deformacionais.

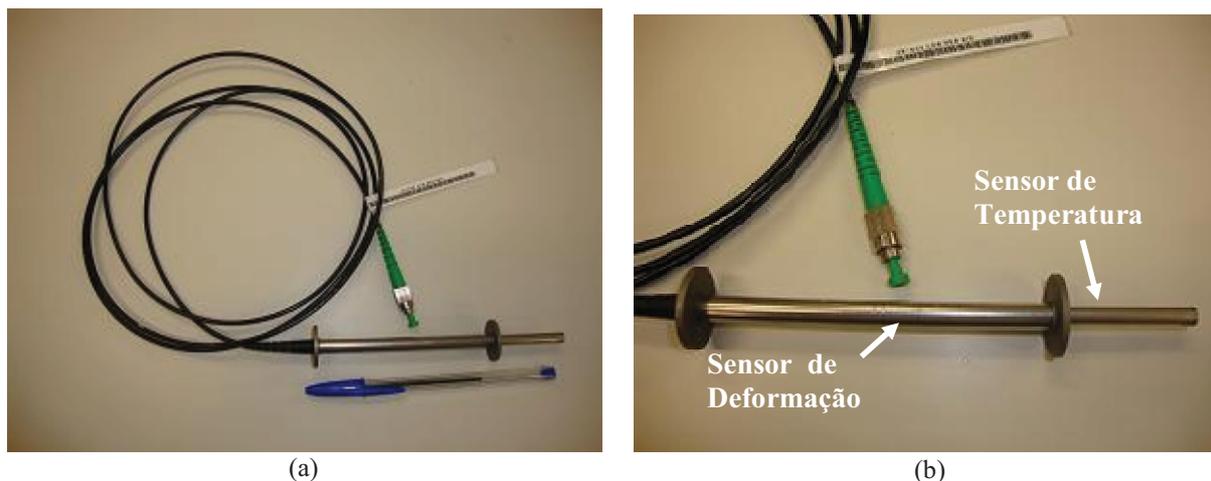


Figura 4.3: Extensômetro óptico utilizado na pesquisa. (a) Sensor com o cabo e o conector. (b) Detalhe da capsula com os sensores de temperatura e deformação.

Este produto foi desenvolvido exclusivamente para esta pesquisa e customizado às exigências dos ensaios de fluência, retração e coeficiente de expansão térmica, a partir de relatos técnicos dos pesquisadores junto ao fabricante³⁰. Ele oferece grau de precisão similar ao extensômetro elétrico tipo *Carlson*, um dos mais difundidos pelo mundo. Existem várias vantagens teóricas associadas ao uso de sensores óticos, tal como a imunidade a possíveis campos elétricos, que podem gerar distorções na obtenção dos resultados ao longo da transmissão no fio para o equipamento processador dos dados, como pode ocorrer nos casos de extensômetros elétricos. Cuidados especiais devem ser tomados na dobra dos cabos de fibra ótica e no conector que liga o sensor ao aparelho. Respeitada essas condições e as de manuseio do equipamento, e do sensor, previamente definidas pelo fabricante, o funcionamento é relativamente simples e pode ser facilmente assimilado com um treinamento adequado junto ao técnico responsável pela preparação dos extensômetros nos moldes e pelas leituras durante o ensaio.

O equipamento adquirido para esta pesquisa – modelo *Benchtop FS-5200* – possui um canal de leitura passível de expansão para mais canais e dotado de software operacional criado pelo fabricante. Ele possui como principal função emitir feixes de luz para os sensores que, ao se depararem com as ranhuras, seus comprimentos de onda luminosos são alterados e captados pelo aparelho quando os feixes são refletidos de volta. O equipamento processa essas informações e as traduz como resposta ao usuário por meio de comprimentos de ondas de luz refletida apresentados em uma tela sensível ao toque, conforme se pode observar na Figura

³⁰ Esse produto foi desenvolvido sob encomenda para o Laboratório de Concreto de Furnas pelo fabricante português *Fiber Sensing* sob o intermédio do representante no Brasil *Gavea Sensors*.

4.4. As principais especificações técnicas do aparato (sensores e unidade de medição) encontram-se resumidas na Tabela 4.4.

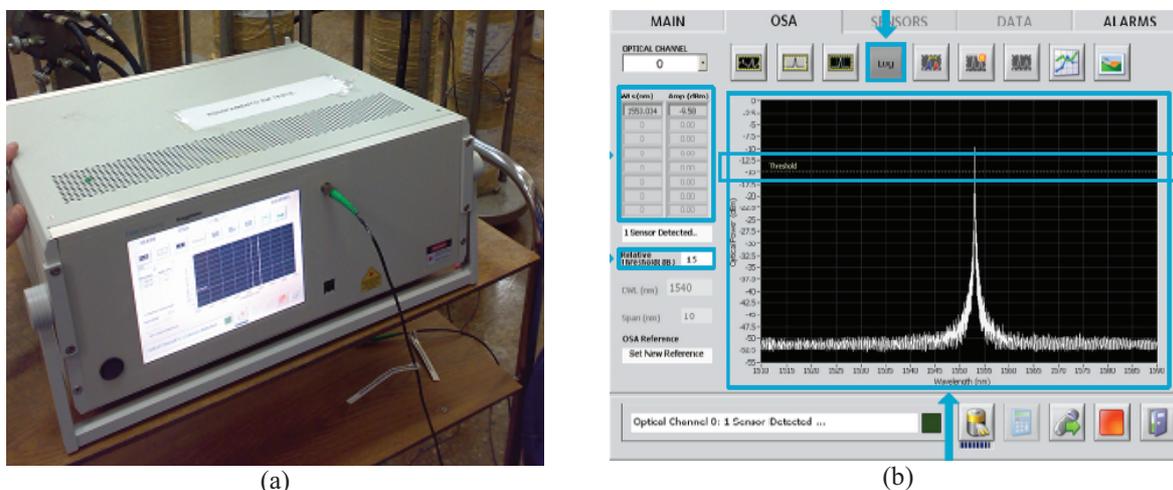


Figura 4.4: Aparelho emissor e receptor dos sinais óticos. (a) Vista geral do aparelho em funcionamento. (b) Tela de visualização dos dados que funciona também como painel de operação.

Tabela 4.4: Especificações técnicas do aparato de monitoramento de deformações e temperatura fabricado pela *Fiber Sensing*.

Produto	Descrição
Sensor de deformação e temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Princípio de funcionamento</i>: Propagação de luz através de fibra ótica; • Ficam juntos em uma mesma capsula metálica; • Sensibilidade: $1,2 \text{ pm}/\text{m}^{31}$ (p/deformação) e $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (p/ temperatura); • Temperatura e Umidade de operação: -20°C a 80°C e 90% de umidade relativa; • Intervalo limite de operação: $\pm 2\text{m}\epsilon^{32}$ (p/ deformação) e -10°C a 80°C (p/ temperatura); • Pode ser customizado para várias aplicações distintas.
Unidade de Medição <i>Benchtop FS-5200</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Princípio de funcionamento</i>: Emite e capta ondas de luz por meio de um laser de varredura de alta potência; • Interface por meio de tela sensível ao toque; • 1 canal de medição expansível para mais 24; • Resolução/Exatidão: 1pm; • Permite leituras de até 25 sensores por segundo por canal em série (efeito denominado de <i>multiplexação</i>).

³¹ $1\text{pm}/\text{m}$ equivale a $1 \text{ picometro por metro}$, ou seja, 1.10^{-12} metros por metro (deformação relativa) de comprimento de onda refletida.

³² $1\text{m}\epsilon$ equivale a $\text{milímetro por metro}$, ou seja, 1.10^{-3} metros por metro (deformação relativa) de comprimento de onda refletida.

É interessante notar que os sensores apesar de sua extrema sensibilidade à deformação e temperatura, representada pela alteração no comprimento de onda refletida, como observado na Tabela 4.4, os valores necessários para a finalidade em específico neste projeto de pesquisa fazem com que a precisão exigível seja menos substancial. Deve-se destacar que a precisão em termos de comprimento de onda não equivale necessariamente à mesma precisão em termos de deformação. A correlação entre deformação e comprimento de onda é expressa a partir do índice de refração efetivo do núcleo da fibra e da distância espacial da rede de Bragg. Para fins de ensaio onde se requer verificar as oscilações deformacionais no concreto são da ordem de $1\mu\text{m}/\text{m}$ (deformação específica de 1 micrometro por metro ou $10^{-6}\text{m}/\text{m}$) para a deformação e $0,1^\circ\text{C}$ para a temperatura, o nível de precisão de que o aparato suporta plenamente é da ordem de até $\frac{1}{4}$ de micrometro para a deformação e centésimos de graus Celsius para a temperatura, indicando assim que o aparato (sensores e unidade de medição), em termos de precisão, supera as necessidades operacionais dos ensaios pretendidos para o programa experimental.

Como os resultados são apresentados em comprimento de onda de luz o equipamento permite a conversão para temperatura e deformação a partir de expressões fornecidas pelo fabricante que devem ser inseridas a partir de algumas constantes de fábrica. Pode-se optar, como adotado por esta pesquisa, em se converter as leituras em temperatura e deformação após a entrada em planilha específica elaborada e testada com base nas instruções de trabalho do Laboratório de Concreto de Furnas, detentora do equipamento. Essa forma de tratamento dos dados mostrou-se mais segura para evitar possíveis equívocos no procedimento de leitura dos sensores, uma vez que a configuração do aparelho é passível de alteração ao longo dos ensaios e, assim, vulnerável a modificações involuntárias pelo técnico responsável no manuseio do aparelho.

Para avaliar o grau de confiabilidade dos resultados deste novo sensor foi montado um experimento piloto, onde foi embutido um extensômetro elétrico tipo *Carlson*, tomado como referência, e um extensômetro ótico em corpos-de-prova de mesmo traço de concreto e submetidos às mesmas condições de tratamento durante os ensaios de fluência, na idade de início de carregamento de 6 dias, e retração autógena, padronizados pelas normas brasileiras que regem esses procedimentos de ensaios. Os resultados de retração autógena e fluência básica provenientes dos sensores óticos mostraram-se completamente aderentes aos resultados do extensômetro *Carlson* como pode ser observado na Figura 4.5.a e 4.5.b, respectivamente.

A diferença relativa entre as leituras por meio dos dois extensômetros nos ensaios de retração autógena e fluência foi em média de 5%. Isso indica, mesmo de forma preliminar, que os valores de temperatura e deformação fornecidos pelos sensores óticos, os quais foram aplicados em grande quantidade no programa experimental, são confiáveis para serem utilizados nos ensaios de fluência, retração autógena e coeficiente de dilatação térmica.

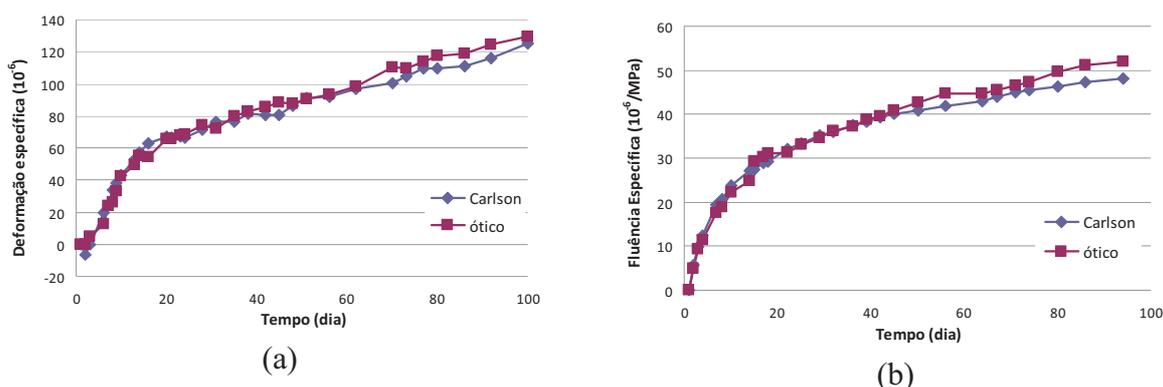


Figura 4.5: Primeiro ensaio piloto para validação do sensor ótico: Resultado de retração autógena (a) e fluência básica (b). (Botassi *et al.* 2010)

Como este primeiro teste piloto de validação do extensômetro ótico foi realizado para somente uma dosagem em específico e com poucos corpos-de-prova, resolveu-se realizar uma contra-prova de testes a fim de verificar não só a compatibilidade dos resultados entre os extensômetros ótico e *Carlson* mas também se o comportamento entre os corpos de prova com o extensômetro ótico estão semelhantes entre si. Neste segundo teste ainda foram feitas algumas melhorias no processo operacional de medição das deformações e a criação de uma nova planilha de registro dos resultados de fluência e retração autógena. Foi utilizada uma nova dosagem neste segundo teste, agora com a adição de metacaulim, pois se sabe que esta adição promove alterações microestruturais significativas na pasta de cimento que deverão ser captadas, por meio de deformações, pelos sensores óticos. A idade de início de carregamento do ensaio de fluência foi de 3 dias, idade esta recente e com grandes valores deformacionais.

Os resultados de ensaio de fluência a partir das leituras médias em ambos extensômetros neste segundo teste, já descontados o efeito da retração autógena, ficaram bem próximos como pode ser observado na Figura 4.6.a. A diferença relativa entre as leituras médias nos dois extensômetros foi em média de 6%, estando a maioria dos valores dentro da própria faixa de resolução das leituras dos equipamentos. Quando analisado os resultados individuais dos dois corpos de prova de fluência com extensômetro ótico (Figura 4.6.b) percebe-se que os mesmos

estão bem próximos, demonstrando coerência no comportamento da curva de ensaio e boa reprodutibilidade dos resultados em termos estatísticos. A diferença média entre as leituras foi de 9% e o coeficiente de variação³³ médio entre as leituras foi de 6%.

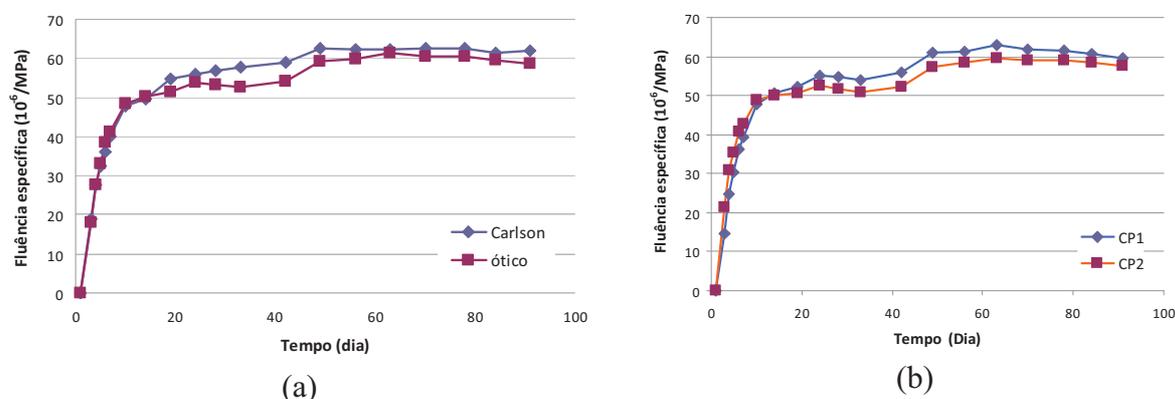


Figura 4.6: Gráfico comparativo entre os extensômetros ótico e Carlson (a) para o novo ensaio piloto e entre CP's (b). (Botassi *et al.* 2010).

Como síntese dos testes comparativos para a validação dos extensômetros óticos pode-se afirmar que o comportamento das curvas dos resultados dos ensaios de fluência e retração, provenientes dos extensômetros ótico e Carlson é bastante similar, comprovando que ambos os sensores são susceptíveis de captar satisfatoriamente o comportamento deformacional do concreto que os envolve, mesmo para dosagens diferentes, como as utilizadas nesses experimentos. (BOTASSI *et al.*, 2010)

4.5. PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES

No fluxograma da Figura 4.7 apresentam-se as principais macro-atividades relacionadas com o estudo experimental. Depois de caracterizadas na primeira fase as propriedades dos materiais que irão compor o concreto (agregados, cimento, adições e aditivos), é iniciado o estudo de dosagem do concreto de referência (sem aditivo e adição), denominado segunda fase da pesquisa, onde poderá se adotar uma determinada resistência característica (f_{ck}) e uma idade de controle para estabelecimento da proporção dos materiais que deverá ser mantida constante ao longo do programa experimental. Esta resistência deverá estar compreendida em um intervalo de valores característicos de concreto aplicado a barragens. Quanto a idade de controle, ela será fixada em 28 dias, pois mesmo para grandes obras, como barragens, a idade

³³ Medida de dispersão equivalente à relação entre o desvio padrão com a média das diferenças entre leituras.

de referência para determinação da resistência do concreto pode variar desde pequenas idades, em torno de 14 dias, até idades mais avançadas, por volta de 180 dias, dependendo basicamente dos fatores logísticos da obra, ou seja, quando ocorrerá a desforma, até critérios de solicitação da estrutura - quando a estrutura poderá estar sujeita aos primeiros carregamentos para o qual foi projetada.

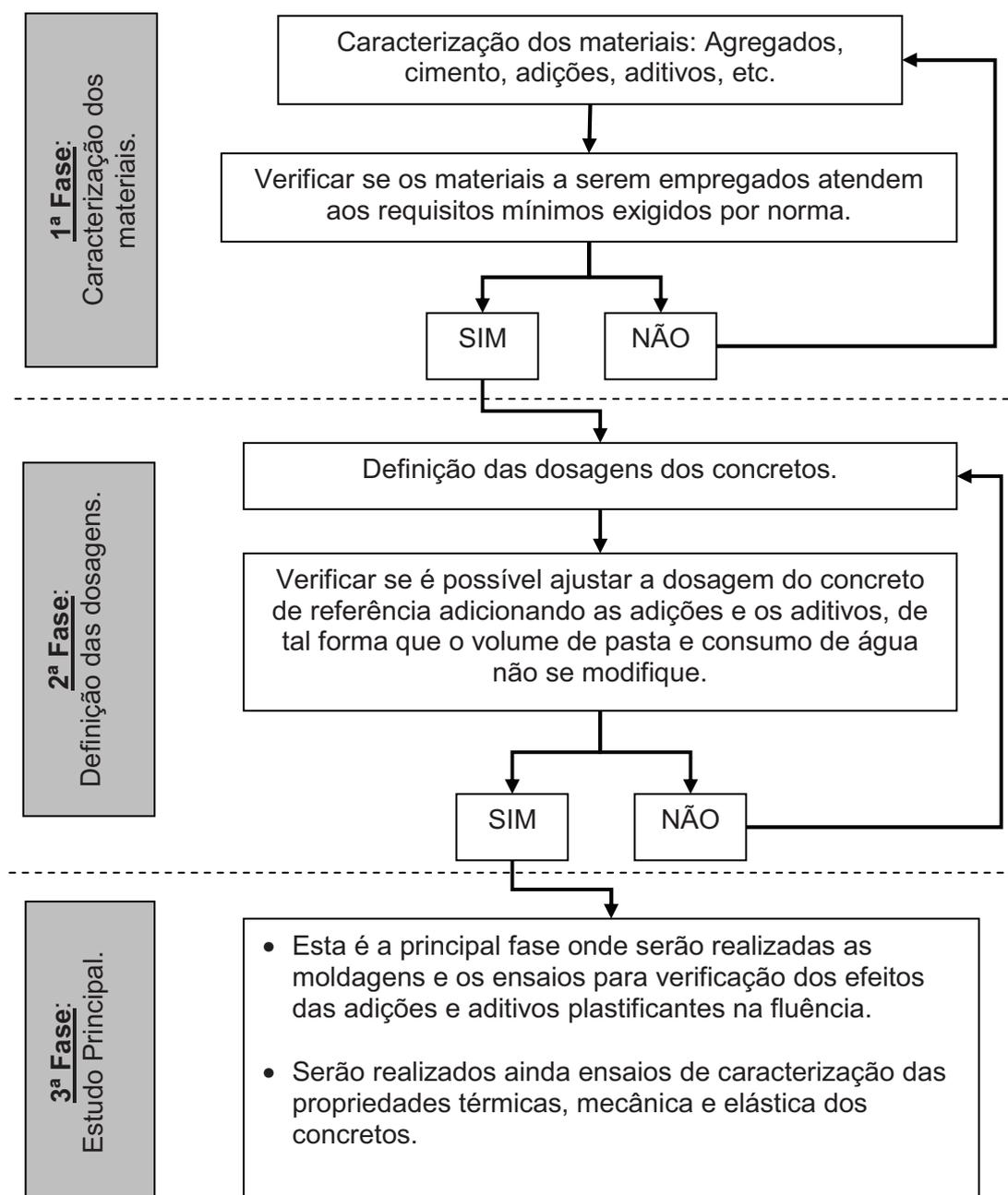


Figura 4.7: Fluxograma das macro-atividades principais do programa experimental.

Dando continuidade a segunda fase, a partir da dosagem de referência pré-estabelecida, serão adicionadas em separado as adições minerais no concreto, de tal maneira que não se modifique o volume de pasta da mistura, o consumo de água, o consumo de cimento equivalente e conseqüentemente a relação a/c_{eq} , especificados estatisticamente nesta pesquisa como fatores constantes. Esta etapa deve ser executada com bastante cuidado, pois caso os fatores constantes não permanecerem como tal não se poderá verificar o real efeito das adições e aditivos na fluência do concreto. Por outro lado, neste procedimento de introdução dessas adições, como também dos aditivos plastificantes, no concreto de referência será fundamental a verificação do comportamento do concreto fresco, ao qual inevitavelmente irá se modificar, para que o mantenha dentro de certos limites de aplicabilidade e que não interfira significativamente nas variáveis respostas da pesquisa. O concreto poderá variar seu estado fresco desde uma consistência muito fluida, com alto *abatimento*, mas sem exsudar³⁴ e segregar³⁵ a mistura, até um aspecto mais seco, equivalente a um baixo *abatimento*, mas ainda em condições de moldagem se vibrado com energia adequada.

A terceira fase compreende a principal etapa da pesquisa. Com as dosagens já caracterizadas - segunda fase da pesquisa - mantidos os fatores constantes inalterados, serão realizadas as moldagens dos corpos-de-prova para os ensaios de fluência, retração autógena, propriedades térmicas, mecânicas e elásticas. Foram selecionadas três idades de caracterização das propriedades do concreto: um, três e sete dias. Idades estas onde deve haver uma maior potencialidade dos efeitos das adições e aditivos estudados no concreto. Somente para ensaios das propriedades mecânicas (resistências à compressão e tração por compressão diametral) e módulo de elasticidade que serão avaliados também para a idade de 28 dias.

Na Figura 4.8 é apresentada a matriz de planejamento dos experimentos previstos no projeto, referente à terceira fase. Nela observa-se que os efeitos dos níveis dos fatores de controle (tipo de adição, aditivo e idade) sobre as variáveis respostas serão cruzados entre todas as combinações possíveis tomadas duas-a-duas, assim denomina-se esse modelo estatístico de *fatorial cruzado completo*, abrangendo 36 grupos de ensaios.

³⁴ Tendência de subida da água percolada dentro do maciço do concreto fresco para a superfície.

³⁵ Tendência dos agregados do concreto fresco de se assentarem sob a base da forma, em função da diferença de massa específica dos materiais constituintes do concreto.

	Concreto sem Aditivo			Plastificante (Pl)			Superplastificante (SPl)		
	1 dia	3 dias	7 dias	1 dia	3 dias	7 dias	1 dia	3 dias	7 dias
Concreto sem Adição	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Metacaulim (SPz)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Argila Calcinada (Pz)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Escória de Alto Forno (Cim)	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Legenda: Moldagens prioritárias (**sem** interação entre os fatores controláveis)
Moldagens secundárias (**com** interação entre os fatores controláveis)

X
X

Figura 4.8: Matriz de planejamento dos experimentos - 3ª fase da pesquisa.

A fim de padronizar a simbologia que será referenciada aos fatores controláveis do programa experimental (tipo de adição e aditivo), facilitando a apresentação dos resultados que estarão disponíveis nos próximos capítulos, segue abaixo a discriminação das mesmas:

- Metacaulim (Classificação: **Superpozolana**) => Simbologia: **SPz**;
- Argila Calcinada (Classificação: **Pozolana**) => Simbologia: **Pz**;
- Escória de Alto Forno (Classificação: **Cimentante**) => Simbologia: **Cim**;
- Lignossulfonato (Classificação: **Plastificante**) => Simbologia: **Pl**;
- Naftaleno (Classificação: **Superplastificante**) => Simbologia: **SPl**;
- Sem aditivo e adição (Classificação: **Referência**) => Simbologia: **Ref**.

As moldagens prioritárias, citadas na Figura 4.8, que serão realizadas inicialmente no programa experimental, referem-se àquelas dosagens em que se avaliarão os efeitos isolados dos fatores de controle (tipo aditivo e adição) sobre as propriedades do concreto, e que possuem maior probabilidade de apresentarem significância nos estudos estatísticos. Somente em um segundo estágio, aqui denominado de moldagem secundária, é que se serão avaliados os efeitos cruzados dos tipos de adições e aditivos em uma mesma dosagem sobre as propriedades do concreto. Esse desmembramento do programa experimental principal em duas partes permite que se obtenham conclusões prévias do estudo antes de finalizada a campanha de ensaios.

As moldagens provenientes das combinações de dosagens, variando a adição e o aditivo, serão realizadas simultaneamente para o grupo das três idades escolhidas a fim de se facilitar em laboratório a logística do programa experimental. Contudo, para permanecer a tendência aleatória que o planejamento estatístico exige, as moldagens para cada combinação de aditivo

e adição estudada será promovida por meio do preenchimento dos moldes dos corpos-de-prova de forma randômica a partir de cada *betonada*³⁶ de uma mesma dosagem.

Serão realizados para todas as dosagens provenientes das combinações aditivo-adição possíveis um total de 208 ensaios, conforme listagem apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Levantamento de ensaios a serem realizados.

Descrição do Ensaio	Nº de Ensaios	CP's por ensaio	Total de CP's
Fluência *	36	2	72
Retração autógena **	12	2	18
Resistência à compressão #	48	3	144
Resistência à tração #	48	3	144
Módulo e Coef. de Poisson #	48	3	144
Elevação Adiabática**	12	1	12
Calor específico**	12	2	24
Condutividade**	12	2	24
Coef. de dilatação térmica**	12	2	24
Total	240		

* Será realizado em toda a campanha de ensaios.

** Será realizado um ensaio por dosagem.

Será realizado em toda a campanha de ensaios e ainda na idade de 28 dias.

Para evitar que os efeitos dos fatores não controláveis (ruídos) sobre os fatores controláveis (tipo de aditivo e adição) dificultem a análise estatística dos resultados, optou-se também por proceder a *aleatorização* na ordem das moldagens das dosagens, distribuindo assim os possíveis efeitos dos ruídos e evitando que os mesmos possam induzir a interpretações errôneas sobre os resultados dos ensaios que advirão dessas moldagens, conforme seqüência adotada na Tabela 4.6.

³⁶ Termo utilizado quando se mistura uma determinada quantidade de materiais com cimento por meio do equipamento denominado *betoneira*.

Tabela 4.6: Aleatorização dos níveis dos fatores de controle para moldagem do programa experimental.

Moldagens Prioritárias			Moldagens Secundárias		
Ordem de Moldagem	Tipo de Aditivo	Tipo de Adição	Ordem de Moldagem	Tipo de Aditivo	Tipo de Adição
1	0	0	1	2	2
2	0	1	2	1	3
3	0	2	3	1	1
4	2	0	4	1	2
5	1	0	5	2	1
6	0	3	6	2	3

Legenda:

<i>Tipo de Aditivo:</i>		<i>Tipo de Adição:</i>	
Concreto sem Aditivo =>	0	Concreto sem Adição =>	0
Concreto com Plastificante =>	1	Concreto com Metacaulim =>	1
Concreto com Superplastificante =>	2	Concreto com Arg. Calcinada =>	2
		Concreto com Escória AF =>	3

4.6. DESCRIÇÃO DO ESTUDO EXPERIMENTAL

É importante que se conheça com um pouco mais de detalhe o estudo experimental, explorando e documentando todos os principais sub-processos que fazem parte da pesquisa, para que se permita observar os potenciais eventos que interferirão no resultado final do pacote de ensaios e ainda possibilitar que pesquisas futuras, complementares a este projeto, sejam reproduzidas com a mais fiel observância dos pormenores operacionais conduzidas neste programa experimental.

4.6.1. Estudo de Dosagem

Considerando que os materiais que irão compor a mistura do concreto (agregados, cimento, adições e aditivos) estão devidamente caracterizados e de acordo com os requisitos básicos para uso conforme normas brasileiras, parte-se para a segunda fase referente ao estudo de dosagem. Ela é considerada de fundamental importância para a pesquisa, pois o traço a ser determinado para o concreto de referência deve estar condizente com dosagens reconhecidamente aplicáveis *in loco*. Outra preocupação que será abordada neste estudo de dosagem é a questão da compatibilidade entre os componentes do concreto, pois pode ocasionar uma ampla gama de problemas se os mesmos não forem devidamente estudados. Dentre alguns desses problemas destaca-se: de ordem reológica do concreto fresco (problemas de trabalhabilidade, exsudação, aumento do consumo de água, etc), de ordem micro-estrutural

(aumento excessivo da porosidade, reações internas deletérias, problemas na zona de transição pasta-agregados, grandes alterações no tempo de pega do aglomerante, etc), etc.

O estudo de dosagem será realizado conforme seqüência apresentada na Figura 4.9. O método adotado é o utilizado por Furnas para concreto massa – Método do Módulo de Finura, descrito em detalhes no Livro de Furnas (1997). O método consiste basicamente em se determinar um conjunto de misturas com diferentes módulos de finura, e conseqüentemente com diferentes porcentagens de areia, mantida a relação cimento/agregado total constante (também conhecida como *relação 1/m*), para se escolher a mistura que apresente o máximo de resistência e que seja trabalhável. A dosagem que possuir menor relação a/c e melhor aspecto do concreto no estado fresco será denominada relação ideal.

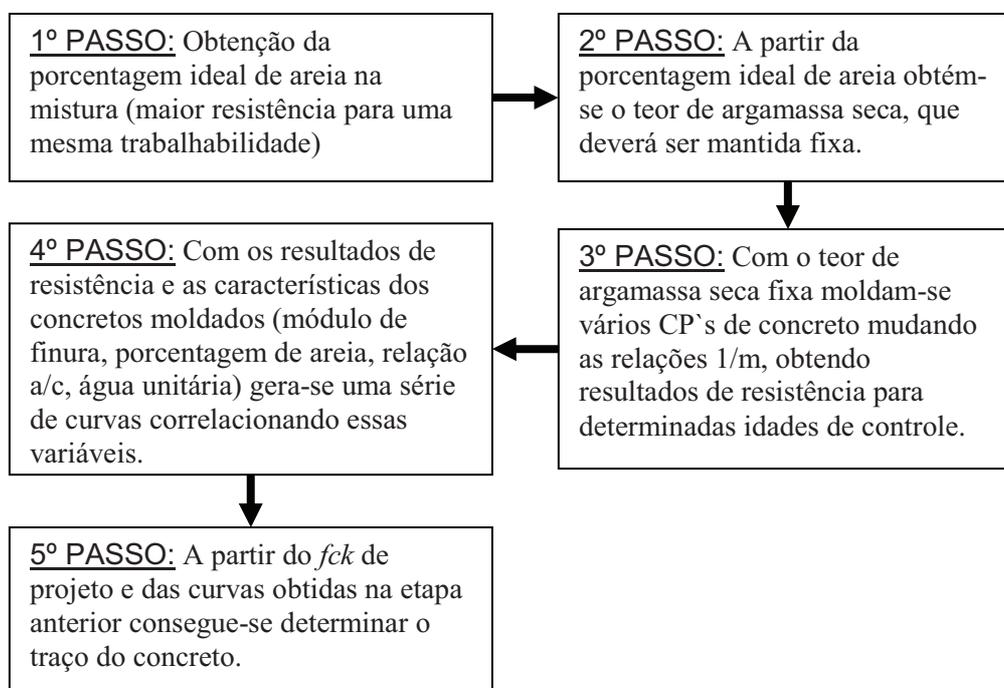


Figura 4.9: Resumo do processo de estudo de dosagem – Método do módulo de finura.

Para evitar que o concreto apresente aspecto *áspero*³⁷, caso ocorra uma variação na produção de agregados, e ainda para dificultar a segregação, adota-se a prática de diminuir o módulo de finura do concreto em 0,2 unidades, aumentando conseqüentemente o percentual de argamassa na mistura do concreto. Esta nova dosagem com uma porcentagem maior de areia é

³⁷ Descrição de um concreto com baixo teor de argamassa ou grande presença de agregado graúdo.

denominada ótima. A partir dela, mantendo o *teor de argamassa seca*³⁸ fixa, moldam-se corpos-de-prova para várias relações l/m a fim de se obter resultados de resistência na idade de controle estipulada em projeto.

Com os resultados de resistência e as características dos concretos moldados (módulo de finura, porcentagem de areia, relação a/c, água unitária) gera-se uma série de curvas, correlacionando essas variáveis, que por processo inverso consegue-se o traço do concreto a partir de seu *fck*.

O traço de referência escolhido para o estudo principal da pesquisa terá como características fixas pré-determinadas as apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Exigências básicas para o concreto de referência da pesquisa.

Tipo de Concreto:	Concreto Convencional Vibrado
<i>fck</i>:	30 MPa
Idade de Controle:	28 dias
D_{máx}:	32 mm
Abatimento do tronco de cone:	(9 ± 1) cm

Segue apresentado na Figura 4.10, baseado no método de dosagem descrito na Figura 4.9, as determinações efetivas mais detalhadas que foram realizadas para a obtenção das dosagens definidas na Tabela 4.6.

³⁸ Refere-se a relação entre o consumo de cimento mais agregado miúdo com o cimento mais os agregados, sem considerar a água unitária da mistura.

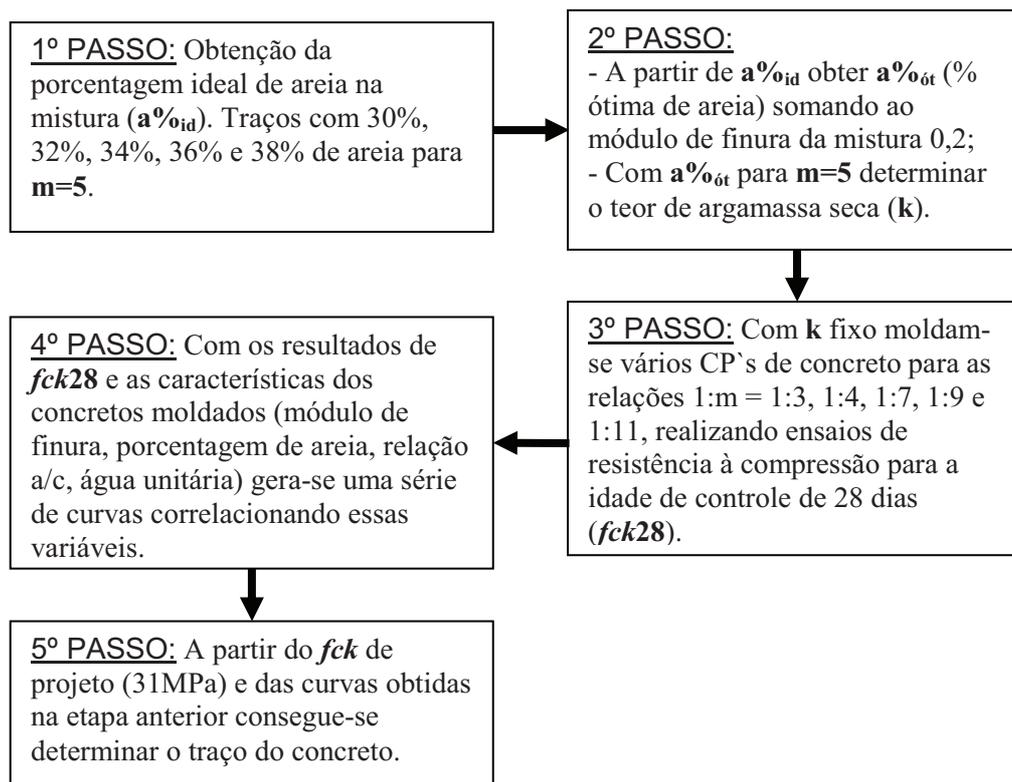


Figura 4.10: Estudo de dosagem para determinação do traço do concreto de referência ($fck=30\text{MPa}$ aos 28 dias) – Método do módulo de finura.

Ainda dentro da 2ª fase, após a obtenção do traço do concreto de referência (sem adição e aditivos), serão inseridos a esse concreto as adições e aditivos plastificantes mantendo o volume de pasta e relação a/c_{eq} fixas, a partir do princípio ilustrado na Figura 4.2, para impedir que esses fatores possam interferir na fluência. Todo o cuidado deve ser tomado ao acrescentar os aditivos e adições, pois inevitavelmente haverá alteração da reologia do concreto no estado fresco.

A adoção da proporção em que as adições minerais e os aditivos plastificantes foram inseridos no concreto de referência baseou-se nas especificações de norma e dos fabricantes, como também nas tendências de mercado. Como já abordado, as adições minerais foram inseridas em termos de substituição parcial ao cimento, logo os valores apresentados na Tabela 4.8 referem-se aos percentuais de substituição em relação ao volume de cimento do concreto de referência.

Tabela 4.8: Níveis de substituição das adições minerais e aditivos plastificantes no concreto de referência.

	Material	Quant. inserida no concreto	Referência para substituição
Adição Mineral	Argila Calcinada	30%	Volume de cimento no concreto de referência (sem aditivo e adição)
	Metacaulim	10%	
	Escória de Alto-forno	50%	
Aditivo	Plastificante	0,5%	Peso do cimento equivalente, compensado o volume adicional de água.
	Superplastificante	1,0%	

A escória de alto-forno pode ser substituída ao cimento, conforme NBR 5.735 (ABNT, 1991), até o limite 70%, neste caso sendo um tipo CPIII. Caso o percentual for inferior a 35% o cimento é classificado como CPII-E. Foi adotado nesta pesquisa o percentual de 50% para se conhecer com relativa expressividade o potencial efeito da escória nas variáveis respostas pretendidas, mas de forma moderada, uma vez que em muitas situações da prática a escória, por questões logísticas ou até mesmo de mercado, não está disponível em abundância para os fabricantes de cimento, restringindo em determinadas regiões do país o acesso ao CPIII, como é o caso atual vivido pela região centro-oeste brasileira.

O percentual escolhido para o metacaulim de 10% em substituição ao cimento além de ser um valor que se encontra dentro do especificado pelo fabricante é muito utilizado por pesquisadores na realização de outros estudos em função deste teor proporcionar ótimo desempenho de resistência e durabilidade para concretos usuais, como observado por Lidúrio (2007).

O percentual de 30% para a pozolana de argila calcinada é relativamente inferior ao observado na literatura técnica para a adição de cinza volante (em torno de 50%), pozolana esta com comportamento semelhante ao da pozolana proveniente da calcinação da argila, conforme constatada na revisão bibliográfica. Esse valor inferior ao utilizado pelas pesquisas observadas na literatura técnica foi adotado porque a argila calcinada utilizada na pesquisa apresentou um comportamento reativo maior do que o esperado, optando-se assim por uma dosagem que tente conferir em termos mecânicos um comportamento intermediário entre o metacaulim e a escória de alto-forno.

Os percentuais dos aditivos químicos observados na Tabela 4.8 foram adotados conforme o intervalo de consumo proposto pelo fabricante do produto (Tabela 4.3), e testados previamente como será apresentado no próximo capítulo. O que chama a atenção nesses valores é que o nível percentual utilizado para o plastificante (0,5%) ser inferior ao utilizado

para o superplastificante (1,0%). Esse tipo de comparação não deve ser feita, pois o superplastificante é recomendado em situações que se requer grande plasticidade do concreto, para altos consumos de cimento, sendo, portanto mais exigido a ponto de requer maior quantidade de matéria-prima para envolver toda a mistura do concreto fresco de forma mais eficiente e homogênea. É válido relatar ainda que o valor aplicado do aditivo plastificante é exatamente o limite superior recomendado pelo fabricante. Os testes feitos no laboratório apontaram que se trabalhado com teores menores, o efeito do plastificante estava sendo pouco perceptível, em função do consumo relevante de cimento no concreto de referência. Já quando testado com teores acima do limite do fabricante, o concreto fresco começava a apresentar exsudação e segregação, demonstrando que ele já havia extrapolado a sua capacidade de fornecer seus benefícios em decorrência da maior expressividade dos efeitos colaterais.

É importante ainda relatar que não foram realizados estudos para determinação dos percentuais de aditivos plastificantes a partir da determinação do ponto de saturação³⁹ no ensaio de fluidez do *funil de Marsh*, pois os testes de desempenho dos aditivos foram verificados diretamente sobre o concreto e não sobre a pasta como o processo de *Marsh* determina.

4.6.2. Procedimentos de Ensaio

Todos os ensaios foram conduzidos a partir de procedimentos padronizados pela ABNT, conforme Quadro A.1 localizado no Apêndice A. A padronização permite a comparação com outros resultados e proporciona maior credibilidade aos objetivos da pesquisa.

A desforma ocorreu 1 dia após a moldagem dos CP's e posteriormente foram conduzidos à câmara úmida, mantidas a umidade de saturação acima de 95% e temperatura controlada em $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ até a idade de ensaio, evitando assim perdas prematuras de resistência e reduzindo os possíveis efeitos da variação volumétrica do concreto, decorrentes de retração e outros fenômenos deformacionais. Maiores detalhes dos ensaios realizados encontram-se discriminados no Apêndice A.

³⁹ Refere-se a uma quantidade limite de aditivo para o qual se aumentada, a pasta de cimento não aumentaria a sua fluidez. Fluidez esta verificada por meio da viscosidade no *funil de Marsh*. Maiores detalhes verificar Aitcin (2000).

CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Após o planejamento e descrição de todo o programa experimental e ainda a definição e caracterização dos materiais a serem utilizados nos concretos – 1ª fase - é apresentado neste capítulo a compilação dos resultados do programa experimental que vai desde a definição das dosagens dos concretos – estudo de dosagem (2ª fase) – até os resultados dos ensaios provenientes das combinações das dosagens – 3ª fase, referentes à matriz de planejamento dos experimentos (Figura 4.7).

O enfoque dado neste capítulo restringe-se a apresentar os resultados do programa experimental e interpretá-los comparativamente sem a preocupação com o tratamento estatístico, que será abordado no capítulo 6. Foram avaliados os resultados a partir de justificativas técnico-científicas, a fim de contribuir em conjunto com a análise estatística para atestar os efeitos preponderantes das adições e aditivos sobre as propriedades consideradas (com destaque para a fluência), e ainda ajudar a verificar comportamentos estatisticamente semelhantes entre as dosagens na busca por grupos homogêneos, caso eles existam.

5.2. DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS E SUAS MOLDAGENS

A descrição e os passos que envolvem o estudo de dosagem foram relatados no item 4.6.1 desta tese. Primeiro procurou-se definir a dosagem do concreto de referência a partir da adoção dos parâmetros iniciais: *slump* de 9 ± 1 cm e *fck* de 30MPa aos 28 dias, conforme já apresentado na Tabela 4.7. O método adotado foi o utilizado por Furnas para concreto massa – Método do Módulo de Finura, conforme descrito em detalhes no Livro de Furnas (1997). A determinação da dosagem do concreto de referência e dos demais traços com adições encontram-se descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Dosagens obtidas para o programa experimental.

Dosagens	Ref	SPz	Pz	Cim	PI	SPI
Traço em peso - 1:	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Cimento equivalente (kg/m ³)	492	492	492	492	492	492
Cimento (kg/m ³)	492	443	345	246	492	492
Metacaulim (10% subst. em volume)	0	43	0	0	0	0
Pozolana (30% subst. em volume)	0	0	128	0	0	0
Escória AF (50% subst. em volume)	0	0	0	240	0	0
Aditivo químico (kg/m ³)	0	0	0	0	2,46	4,92
Água Unitária (kg/m ³)	231	231	231	231	229,5	228,0
Relação a/c _{eq}	0,470	0,470	0,470	0,470	0,470	0,470
Areia Artificial (kg/m ³)	476	476	476	476	476	476
Brita 32 mm (kg/m ³)	1079	1079	1079	1079	1079	1079
Módulo de Finura	6,210	6,210	6,210	6,210	6,210	6,210
% Areia em massa	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
% Areia em volume	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2

SPz = Superpozolana (Metacaulim); Pz = Pozolana (Argila Calcinada);
Cim=Cimentícia (Escória de Alto Forno); PI=Plastificante; SPI=Superplastificante.

Na tabela 5.1 é importante destacar que a definição das dosagens dos concretos com adição mineral ocorreu substituindo diretamente parte do cimento em volume pela respectiva adição, cujo percentual foi determinado conforme valores usuais da prática de tecnologia do concreto e justificados no capítulo 4. Os demais parâmetros das dosagens dos concretos com adição não foram modificados, preocupando-se em manter inalteradas as principais características das dosagens que interferem na fluência (volume de pasta, consumo de água e relação a/c_{eq}). Por questões óbvias, essa estratégia adotada gerou como consequência natural mudanças na resistência à compressão e demais propriedades do concreto, que ajudaram a explicar os efeitos das adições e aditivos na fluência e ainda contextualizar as principais características mecânicas, térmicas e deformacionais das dosagens que foram utilizadas nas simulações termotensionais.

Em relação às dosagens com a inserção dos aditivos químicos escolhidos – plastificante e superplastificante – foi alterado somente o consumo de água dos traços de concreto a partir da consideração do teor de água contido nos aditivos, conforme observado nas duas últimas colunas da direita na Tabela 5.1. O comportamento reológico no estado fresco variou significativamente como esperado. Maiores detalhes sobre as moldagens, consultar o Apêndice B.

As alterações mais substanciais nas propriedades reológicas dos concretos dosados ocorreram no abatimento do tronco de cone (*slump*), variando de 55mm para a pozolona até 140mm para a dosagem com superplastificante, todos com ar aprisionado de no máximo 1,5%. Essa variação da reologia já era esperada, pois não houve correção da quantidade de água ou uso de plastificantes nas dosagens com adições minerais. Contudo, mesmo nas situações extremas com maior e menor *slump*, as dosagens se mostraram possíveis de serem lançadas e não apresentaram aspectos que as reprovasses do ponto de vista reológico (segregação, exsudação, teor de ar aprisionado, aspecto visual, etc.).

Para cada dosagem estudada foram moldados os corpos de prova (CP) listados na Tabela 5.2. conforme cada ensaio proposto.

Tabela 5.2: Quantitativo de CP's por dosagem do programa experimental.

Descrição do Ensaio		Idades avaliadas	CP's por ensaio (dimensão)	Total de CP's
Propriedades Deformacionais	Fluência	1, 3 e 7 dias	2 (15x30cm)	6
	Retração autógena	contínuo*	2 (15x30cm)	2
Propriedades Mecânicas	Resistência à compressão	1, 3, 7 e 28 dias	3 (15x30cm)	12
	Resistência à tração	1, 3, 7 e 28 dias	3 (15x30cm)	12
	Módulo de elasticidade	1, 3, 7 e 28 dias	3 (15x30cm)	12
Propriedades Térmicas	Elevação Adiabática	contínuo*	1 (70x60cm)	1
	Calor específico	7 dias	2 (20x40cm)	2
	Condutividade	7 dias	2 (20x40cm)	2
	Coef. de dilatação térmica**	91 dias	2 (15x30cm)	2
Total Geral por Dosagem				49

* Inicia-se em uma determinada idade e de forma contínua é monitorado.

** Será aproveitado o CP de retração, uma vez que ele não será danificado.

Todo o processo de moldagem dos CP's do concreto de referência, assim como de todas as dosagens pertencentes ao programa experimental, ocorreu de forma padronizada conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2003) em três betonadas, uma vez que o volume necessário de concreto para a moldagem completa de cada dosagem era de aproximadamente 600 litros e a capacidade efetiva da betoneira se limitava a 200 litros. Algumas fotografias que ilustram a etapa de moldagem encontram-se na Figura 5.1. A sala de dosagem utilizada no processo de moldagem é climatizada, com temperatura controlada de aproximadamente 23°C e umidade relativa acima de 75%. Quanto ao lançamento dos concretos durante a moldagem foi utilizado

o *vibrador de imersão* tipo “agulha”, mesmo para os concretos mais plásticos, mantendo uniforme o processo para todas as dosagens.



Figura 5.1: Moldagem da dosagem de referência: (a) Abatimento; (b) Ensaio de ar aprisionado; (c) Moldagem dos CP's 15x30cm; (d) Vista geral das moldagens; (e) Moldagem dos CP's de fluência; (f) Detalhe da moldagem com extensômetro embutido; (g) Moldagem dos CP's das propriedades térmicas; (h) Moldagem do CP da adiabática; (i) Final das moldagens.

Os corpos de prova, após a desforma no dia posterior a moldagem, foram mantidos em câmara úmida até a idade do respectivo ensaio para que houvesse uma suficiente hidratação dos aglomerantes no concreto e evitar proeminentes oscilações volumétricas dos CP's decorrentes de gradientes de umidade enquanto estivessem neste ambiente. Todos os processos de moldagem e realização dos ensaios foram repetidos de maneira similar para todas as dosagens conforme descrição apresentada no capítulo 4.

5.3. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Foram apresentados os resultados médios por idade e ainda a medida estatística de variabilidade por meio do coeficiente de variação⁴⁰ para facilitar a representação gráfica dos resultados, uma vez que a apresentação dos valores individuais dificulta uma análise global. As linhas que unem os resultados médios dos gráficos não fazem parte de uma curva contínua de valores, elas somente foram traçadas para representar a tendência de comportamento médio ao longo das idades avaliadas. Encontram-se discriminados nas Tabelas C.1 a C.3 do Apêndice C todos os resultados individuais obtidos do programa experimental referente às propriedades mecânicas.

5.3.1. Resistência à Compressão

Os resultados médios de resistência à compressão e suas respectivas medidas de variabilidade encontram-se resumidas na Tabela 5.3. Para facilitar a interpretação dos resultados, eles foram desmembrados em dois gráficos: um somente com os resultados referentes às dosagens com adição ou aditivo e outro com os resultados das dosagens combinadas adição-aditivo, conforme observado nas Figuras 5.2 e 5.3.

Pelo gráfico da Figura 5.2 percebe-se que todas as adições e aditivos quando avaliados em separado retardaram o ganho de resistência à compressão na idade de 1 dia. Contudo, para idades mais avançadas – 28 dias - houve uma tendência dos aditivos e adições promoverem aumento da resistência, acima do concreto de referência. Já para idades intermediárias – 7 dias – não há um comportamento bem definido: enquanto a adição cimentante e o superplastificante apresentaram menores resistências que a referência, as demais adições foram superiores na idade de 7 dias. O comportamento dos resultados no contexto geral pode ser explicado pelas alterações na taxa de hidratação dos compostos quando utilizadas adições e aditivos e ainda devido à mudança provocada na microestrutura da matriz do aglomerante.

Quando avaliado o efeito das adições e aditivos em conjunto (Figura 5.3) não foram percebidas grandes alterações na resistência à compressão. Entretanto, observou-se a redução da variabilidade dos resultados aos 28 dias se aproximando do valor médio de 38MPa, o qual atenderia com folga a especificação de f_{ck} igual a 30MPa determinado no estudo de dosagem.

⁴⁰ Equivalente ao desvio padrão dividido pela média dos resultados por amostra.

Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

Variável Resposta: f_{cj}		Idade (dia)			
		1	3	7	28
Referência (Ref*)	Média (MPa)	12,28	20,96	27,22	33,39
	Coef. Variação (%)	3%	7%	1%	6%
Metacaulim (SPz)	Média (MPa)	7,85	19,06	30,32	39,01
	Coef. Variação (%)	3%	5%	4%	4%
Argila Calcinada (Pz)	Média (MPa)	5,43	19,58	31,44	37,21
	Coef. Variação (%)	3%	5%	3%	2%
Superplastificante (SPI)	Média (MPa)	6,79	19,84	23,69	32,96
	Coef. Variação (%)	2%	11%	6%	10%
Plastificante (PI)	Média (MPa)	6,32	22,73	28,33	34,07
	Coef. Variação (%)	4%	1%	3%	7%
Escória de AF (Cim)	Média (MPa)	3,94	15,10	24,34	37,49
	Coef. Variação (%)	7%	2%	2%	2%
Metacaulim + Plast. (SPz + PI)	Média (MPa)	8,45	23,61	31,42	38,73
	Coef. Variação (%)	19%	1%	7%	6%
Metacaulim + Superplast. (SPz + SPI)	Média (MPa)	10,19	20,17	30,76	36,63
	Coef. Variação (%)	2%	4%	2%	9%
Argila Calc. + Plast. (Pz + PI)	Média (MPa)	6,05	24,04	30,10	40,56
	Coef. Variação (%)	5%	1%	7%	5%
Argila Calc. + Superplast. (Pz + SPI)	Média (MPa)	6,10	22,10	28,20	36,75
	Coef. Variação (%)	13%	5%	11%	3%
Escória + Plast. (Cim + PI)	Média (MPa)	2,45	11,85	25,82	37,60
	Coef. Variação (%)	9%	1%	1%	10%
Escória + Superplast. (Cim + SPI)	Média (MPa)	1,96	14,66	26,94	37,56
	Coef. Variação (%)	1%	2%	3%	2%

* A descrição das simbologias utilizadas encontra-se no item 4.7 e na lista de símbolos da tese

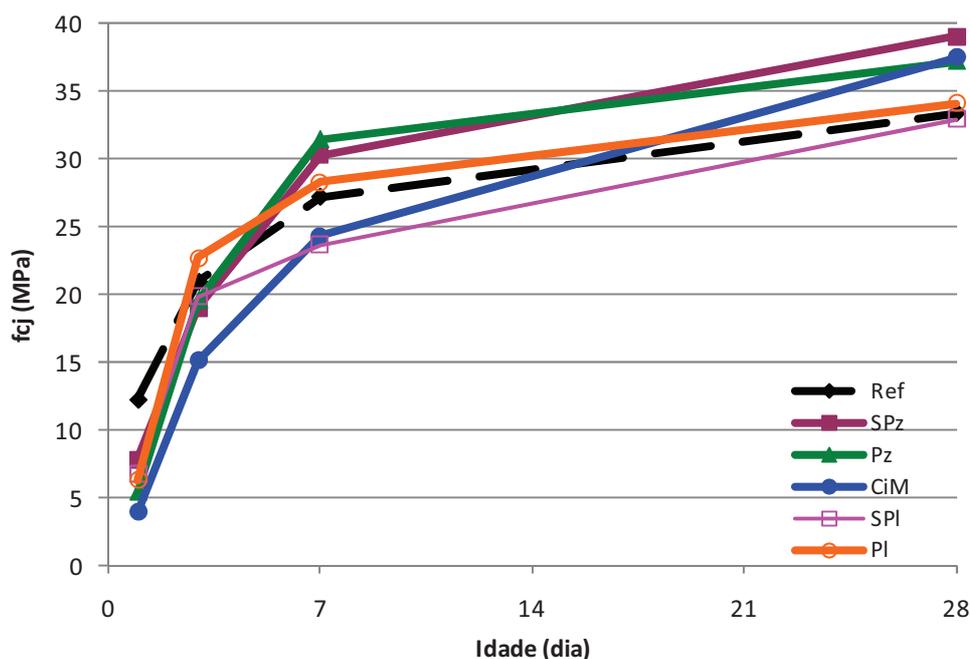


Figura 5.2: Resistência à compressão média das dosagens *sem a combinação aditivo-adição*.

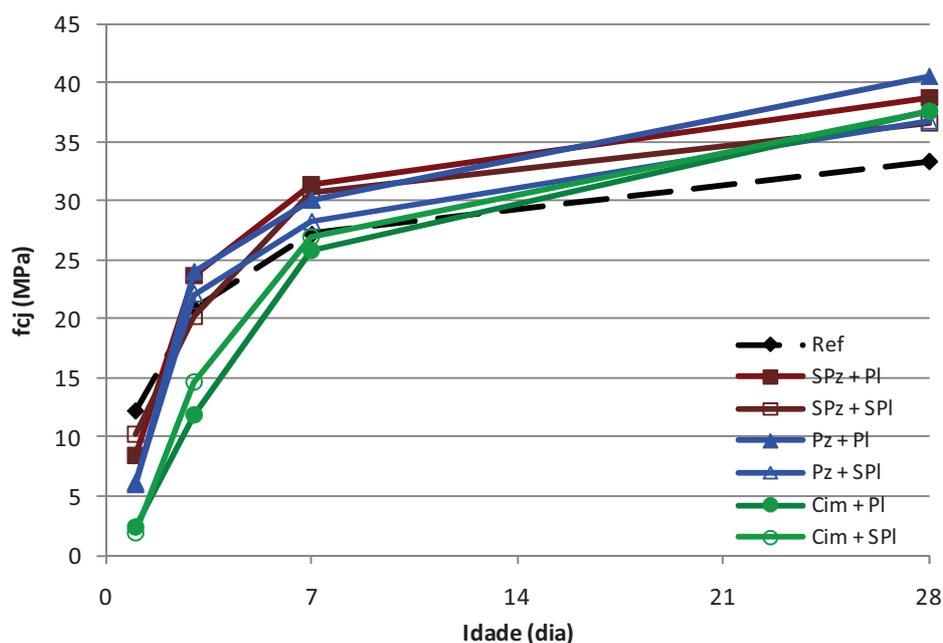


Figura 5.3: Resistência à compressão média das dosagens *com combinação aditivo-adição*.

5.3.2. Resistência à Tração

Os resultados médios de resistência à tração na compressão diametral e suas respectivas medidas de variabilidade encontram-se resumidas na Tabela 5.4. Os resultados por meio de gráficos foram apresentados em duas figuras (Figuras 5.4 e 5.5) para facilitar a interpretação dos resultados, similar ao realizado para a resistência à compressão.

É possível perceber no gráfico da Figura 5.4 que todas as adições e aditivos testados retardaram o ganho de resistência à tração na idade de 1 dia, similar ao obtido para a resistência à compressão. Já para a idade de 28 dias houve inversão de comportamento, com o concreto de referência apresentando menor valor médio que os demais. Apesar de ser aparentemente pequena a diferença de resistência à tração entre os concretos na idade de 28 dias, não ultrapassando mais do que 0,5MPa, esse valor em termos práticos é significativo, principalmente quando da análise do problema térmico em concreto massa, caso comprovado estatisticamente que essa diferença se reflita em campo na estrutura. Já para as dosagens com adição e aditivos misturados no mesmo traço (Figura 5.5) destaque deve ser dado para a dosagem de escória com plastificante a qual atingiu os maiores valores nas idades de 7 dias e 28 dias, como também para as demais dosagens com misturas, que em média apresentaram leve aumento da resistência aos 28 dias quando comparados com as dosagens de adições e aditivos em separados.

Tabela 5.4: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Variável Resposta: $f_{ct,sp}$		Idade (dia)			
		1	3	7	28
Referência (Ref)	Média (MPa)	1,37	2,03	2,31	2,54
	Coef. Variação (%)	9%	12%	2%	6%
Metacaulim (SPz)	Média (MPa)	0,94	1,67	2,59	3,05
	Coef. Variação (%)	12%	6%	7%	3%
Argila Calcinada (Pz)	Média (MPa)	0,92	2,07	2,72	2,89
	Coef. Variação (%)	6%	4%	6%	10%
Superplastificante (SPI)	Média (MPa)	0,70	2,17	2,34	2,73
	Coef. Variação (%)	9%	2%	16%	3%
Plastificante (PI)	Média (MPa)	1,10	2,06	2,95	2,97
	Coef. Variação (%)	19%	8%	9%	12%
Escória de AF (Cim)	Média (MPa)	0,77	1,81	2,13	3,35
	Coef. Variação (%)	6%	4%	17%	7%
Metacaulim + Plast. (SPz + PI)	Média (MPa)	1,56	2,09	2,57	3,27
	Coef. Variação (%)	6%	18%	4%	2%
Metacaulim + Superplast. (SPz + SPI)	Média (MPa)	1,09	2,07	2,63	2,83
	Coef. Variação (%)	4%	6%	8%	6%
Argila Calc. + Plast. (Pz + PI)	Média (MPa)	0,96	2,10	2,53	3,12
	Coef. Variação (%)	13%	15%	9%	5%
Argila Calc. + Superplast. (Pz + SPI)	Média (MPa)	0,82	1,98	2,81	3,12
	Coef. Variação (%)	11%	4%	6%	3%
Escória + Plast. (Cim + PI)	Média (MPa)	0,42	1,45	3,11	3,84
	Coef. Variação (%)	4%	10%	2%	3%
Escória + Superplast. (Cim + SPI)	Média (MPa)	0,41	1,57	2,44	2,88
	Coef. Variação (%)	5%	28%	16%	8%

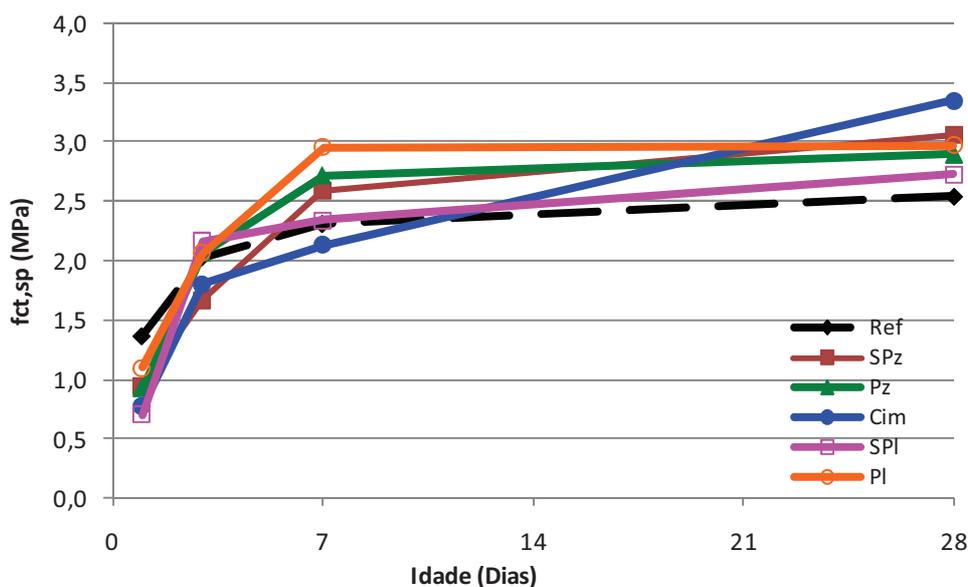


Figura 5.4: Resistência à tração por compressão diametral média das dosagens sem a combinação aditivo-adição.

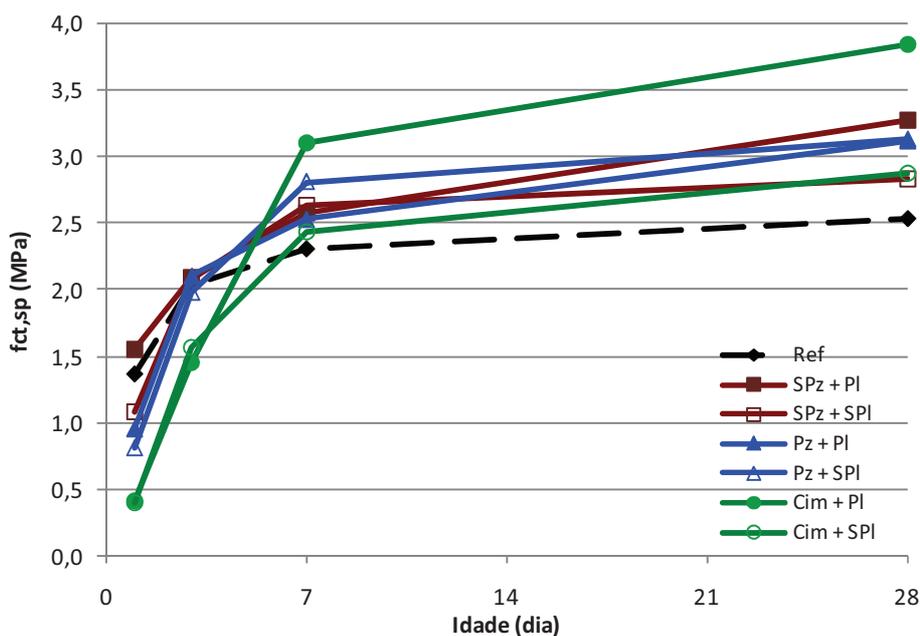


Figura 5.5: Resistência à tração por compressão diametral média das dosagens com combinação aditivo-adição.

5.3.3. Módulo de Elasticidade

Os resultados médios do módulo de elasticidade e suas respectivas medidas de variabilidade encontram-se resumidas na Tabela 5.5. Os resultados por meio de gráficos foram apresentados em duas figuras (Figuras 5.6 e 5.7) para facilitar a interpretação dos resultados, similar ao realizado para a resistência à compressão.

Por meio da Figura 5.6 é possível perceber que os resultados de módulo de elasticidade dos concretos com adições e aditivos na idade de 1 dia são inferiores em média ao concreto de referência. Essa redução do módulo em idades muito recentes pode trazer conseqüências indesejáveis do ponto de vista do problema térmico em concreto massa, pois ocorrerá menor desenvolvimento de tensão de compressão, benéfica ao combate das tensões de tração geradoras de fissuras. Para idades mais avançadas – 28 dias - há também uma leve redução do módulo de elasticidade que agora pode contribuir ao combate de fissuras de origem térmica, mas não tão expressiva como ocorreu nas primeiras idades. As mudanças no módulo de elasticidade ocorridas para as dosagens com adições e aditivos em relação à referência são exclusivamente decorrentes de alterações nas microestruturas dos concretos, pois a proporção geral dos materiais foi mantida constante. As principais alterações microestruturais referem-se à modificação na taxa de hidratação dos aglomerantes, refinamento dos poros, principalmente

para as adições minerais, melhoria na zona de transição e alterações na distribuição dos vazios do concreto.

Tabela 5.5: Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.

Variável Resposta: E		Idade (dia)			
		1	3	7	28
Referência (Ref)	Média (GPa)	12,9	14,8	16,7	25,2
	Coef. Variação (%)	8%	11%	3%	6%
Metacaulim (SPz)	Média (GPa)	9,5	13,3	17,5	24,0
	Coef. Variação (%)	3%	25%	2%	2%
Argila Calcinada (Pz)	Média (GPa)	7,8	14,8	17,8	22,3
	Coef. Variação (%)	1%	2%	4%	4%
Superplastificante (SPI)	Média (GPa)	9,8	16,9	18,5	22,2
	Coef. Variação (%)	9%	7%	5%	1%
Plastificante (PI)	Média (GPa)	11,5	14,1	16,3	22,7
	Coef. Variação (%)	8%	3%	3%	4%
Escória de AF (Cim)	Média (GPa)	8,97	12,07	14,70	21,53
	Coef. Variação (%)	1%	2%	2%	1%
Metacaulim + Plast. (SPz+PI)	Média (GPa)	12,97	16,19	23,13	23,60
	Coef. Variação (%)	2%	2%	12%	1%
Metacaulim + Superplast. (SPz+SPI)	Média (GPa)	10,97	15,20	19,50	20,23
	Coef. Variação (%)	8%	4%	1%	4%
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	Média (GPa)	9,37	15,37	18,27	20,93
	Coef. Variação (%)	5%	2%	4%	6%
Argila Calc. + Superplast. (Pz+SPI)	Média (GPa)	8,23	12,90	15,97	20,87
	Coef. Variação (%)	11%	8%	1%	1%
Escória + Plast. (Cim+PI)	Média (GPa)	5,87	12,63	14,80	23,37
	Coef. Variação (%)	6%	0%	4%	5%
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	Média (GPa)	5,63	14,87	17,87	24,40
	Coef. Variação (%)	11%	2%	4%	5%

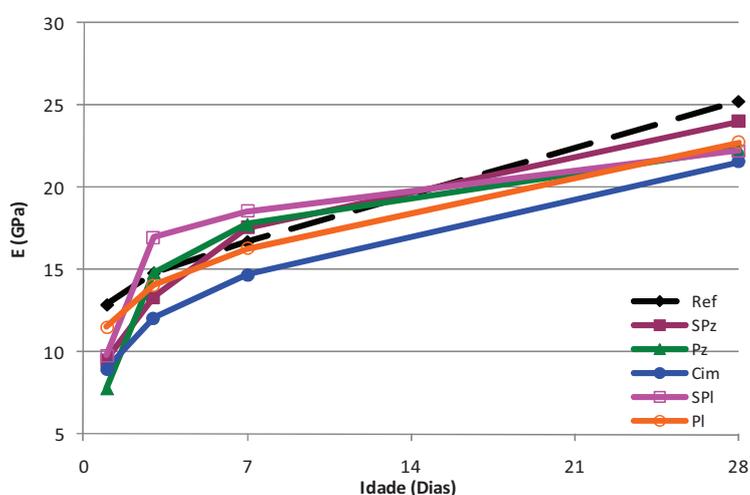


Figura 5.6: Módulo de elasticidade médio das dosagens *sem a combinação aditivo-adição*.

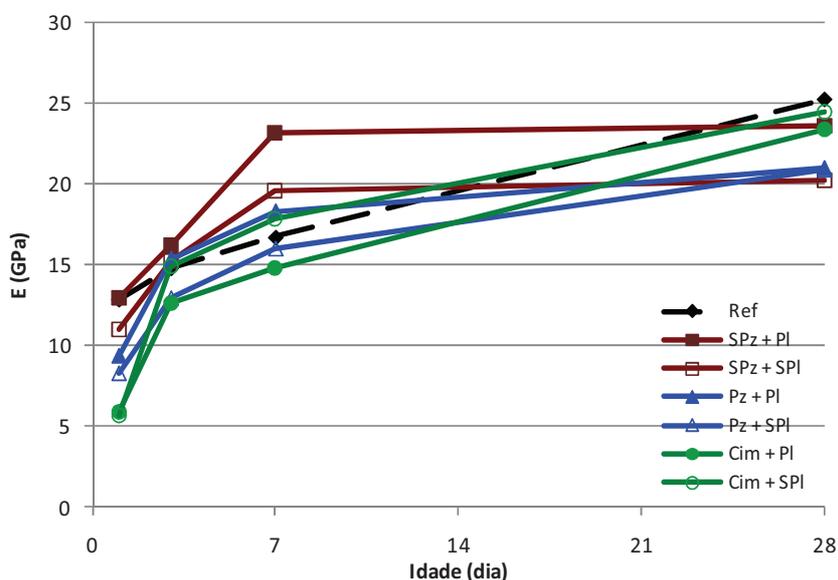


Figura 5.7: Módulo de elasticidade médio das dosagens *com combinação aditivo-adição*.

Para as dosagens com o uso simultâneo de adição e aditivo (Figura 5.7) a mudança mais significativa foi observada na idade de 7 dias para a dosagem com metacaulim e plastificante, cujo aumento substancial do módulo pode contribuir na geração de tensões de compressão benéficas caso o concreto massa esteja ainda na fase de aquecimento devido a geração interna de calor.

5.4. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS

Como destaque das propriedades térmicas ressalta-se o ensaio de elevação adiabática. Ele além de ser um ensaio fundamental para verificar o potencial calor que as dosagens podem gerar, a fim de se avaliar o problema térmico no concreto massa, permite também acompanhar de forma indireta a velocidade de hidratação dos compostos cimentícios em função da sua correlação com o calor gerado nas reações. Os resultados dos ensaios foram expressos na forma de elevação adiabática da temperatura, e ainda por meio da maturidade do concreto, como será apresentado adiante.

As demais propriedades têm como foco principal a avaliação do problema térmico em concreto massa, conforme apresentadas no capítulo anterior e retratadas em detalhes no

trabalho de Liduário (2006). É importante ressaltar que as análises dos efeitos que os resultados das propriedades térmicas interferem no problema térmico foram realizadas de forma independente neste capítulo. Somente uma análise conjunta, por meio de simulações térmicas, é que se poderá avaliar de maneira global os efeitos das adições e aditivos no problema térmico com um todo. Essas análises serão apresentadas no capítulo 6 utilizando o programa computacional desenvolvido por Silva (2002) e Botassi (2004).

Encontram-se discriminados nas Tabelas C.4 a C.8 do Apêndice C todos os resultados individuais obtidos do programa experimental referente às propriedades térmicas.

5.4.1. Elevação Adiabática de Temperatura

Como o ensaio de elevação é de difícil execução, para cada dosagem avaliada foi moldado apenas um corpo de prova. O histórico de ensaios que Furnas já realizado há vários anos demonstra que o processo de ensaio permite uma boa repetitividade (GAMBALE *et al.*, 2004), sendo desnecessária a amostragem de tamanho maior que 1 por dosagem. Os resultados em termos de elevação adiabática de temperatura encontram-se resumidos na forma de gráficos - Figuras 5.8 a 5.11. Como a elevação adiabática de temperatura está intimamente ligada ao grau de hidratação dos aglomerantes hidráulicos, devido à reação exotérmica que ocorre na presença de água, foram associados aos resultados desses ensaios o potencial calor de hidratação dos mesmos.

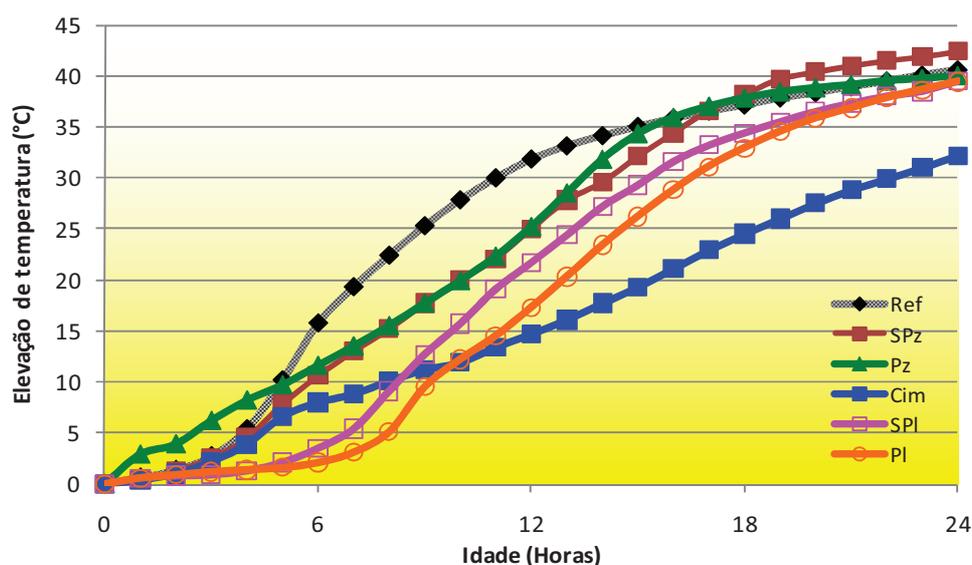


Figura 5.8: Elevação adiabática de temperatura nas primeiras 24 horas de ensaio – Dosagens sem combinação entre aditivos e adições.

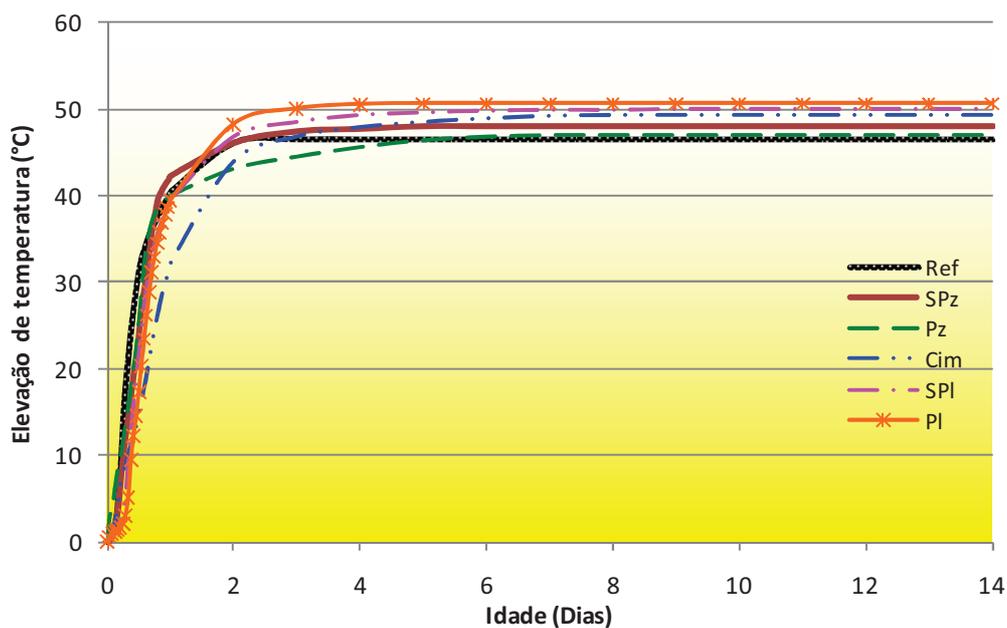


Figura 5.9: Elevação adiabática de temperatura até a idade de 14 dias – Dosagens sem combinação entre aditivos e adições.

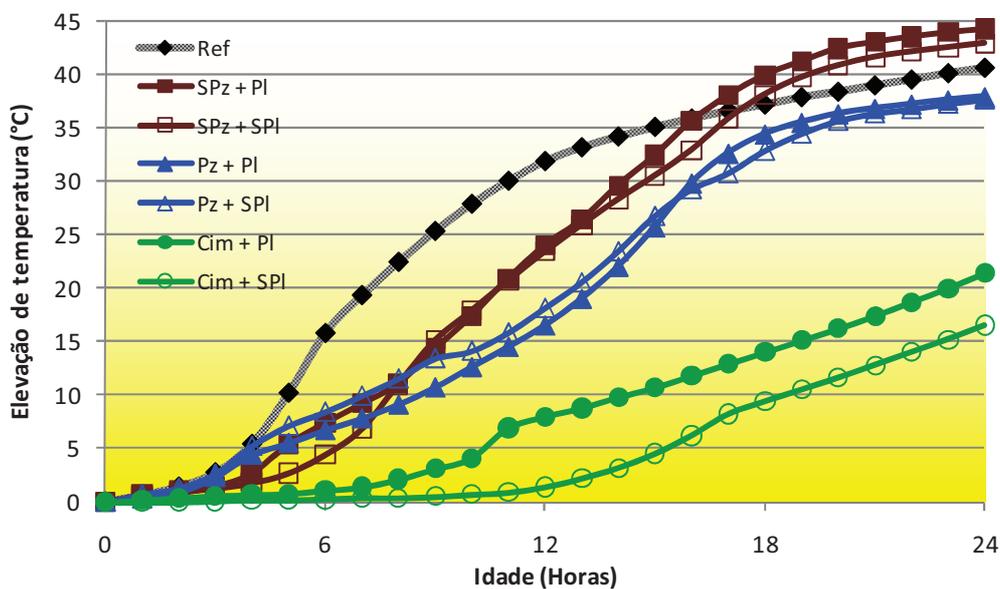


Figura 5.10: Elevação adiabática de temperatura nas primeiras 24 horas de ensaio – Dosagens com combinação entre aditivos e adições.

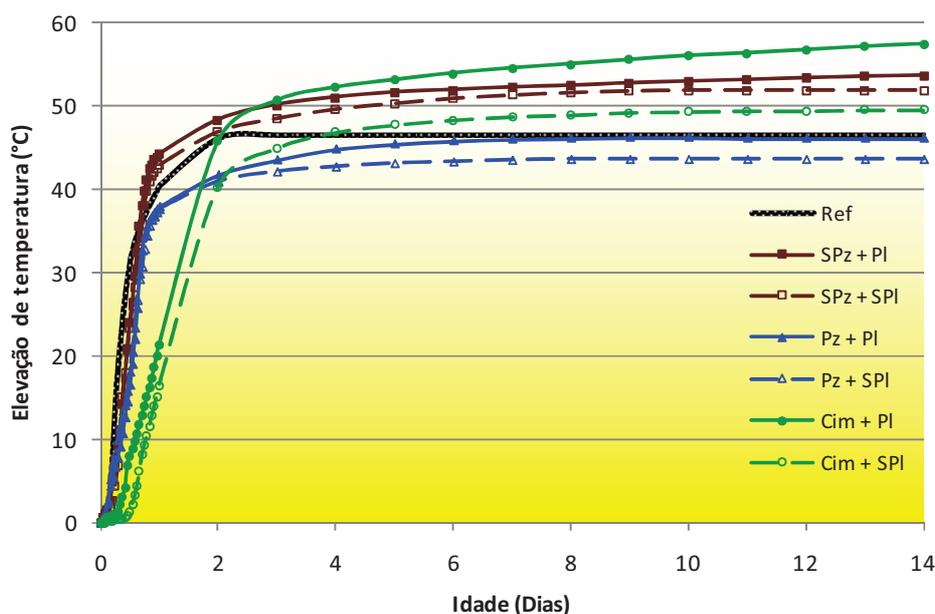


Figura 5.11: Elevação adiabática de temperatura até a idade de 14 dias – Dosagens com combinação entre aditivos e adições.

Os gráficos das Figuras 5.8 e 5.9 para as dosagens sem mistura adição-aditivo demonstram que nas primeiras 24 horas de ensaio as dosagens com aditivo e adições apresentaram menor hidratação que o concreto de referência, com exceção da pozolana que apresentou maior hidratação até a 5ª hora. Houve grande retardo na geração de calor de hidratação para os concretos com aditivos plastificantes até 8 horas após a moldagem do CP. As dosagens com adição cimentícia e com pozolana obtiveram menor calor de hidratação em relação à referência até idades maiores – 3 e 5 dias, respectivamente - similar ao ocorrido na determinação do calor de hidratação dessas misturas descritas no capítulo 4. Esse retardo na hidratação pode ser refletido no comportamento das propriedades mecânicas e possivelmente nas propriedades deformacionais, uma vez que a matriz ainda em formação estará mais propensa a deformações substanciais quando sob carregamento. Após 6 dias de ensaio, o calor de hidratação liberado pelo concreto de referência é superado pelas demais dosagens, levando a se concluir que ocorrerá um maior número de reações de hidratação entre os compostos e conseqüentemente o aumento do número de ligações entre os mesmos, contribuindo para o incremento na resistência mecânica dos concretos com adição e aditivo, como observado nos ensaios.

Já as dosagens com o uso simultâneo de adição e aditivo apresentaram comportamentos bem distintos dos resultados de ensaios de elevação adiabática, conforme se pode observar nas Figuras 5.10 e 5.11. Nas primeiras 24 horas as dosagens com escória combinada com

plastificante e superplastificante apresentaram aproximadamente metade do calor gerado pela referência. Quando adicionado os aditivos à dosagem com pozolana também houve redução na geração do calor de hidratação, porém em menor proporção do que a cimentícia. A dosagem com adição de metacaulim não apresentou redução significativa na geração de calor quando adicionado os aditivos, pelo contrário, houve leve aumento na geração ao final das 24 horas iniciais de ensaio. Quando analisadas estas mesmas dosagens após as primeiras 24 horas no ensaio de elevação adiabática as que continham metacaulim e escória foram as que se apresentaram maiores resultados que a referência, chegando ao máximo de 57°C para a dosagem com escória combinada com plastificante enquanto que a referência obteve 47°C aproximadamente no 14º dia. Esses aumentos na elevação contribuíram para o crescimento da resistência mecânica em idades anteriores a 28 dias e conseqüentemente no combate ao problema termomecânico do concreto massa.

Outra forma de se representar o processo de hidratação, baseando-se nos ensaios de elevação adiabática, está apresentado nos gráficos da Figura 5.12 e 5.13, a partir da propriedade denominada *maturidade*. Ela corresponde ao somatório do produto entre o incremento de temperatura e o tempo ao longo do ensaio e expressa indiretamente o grau de hidratação dos aglomerantes no concreto. Sendo assim: quanto maior a maturidade obtida, pode-se dizer que mais compostos hidratados terá a matriz cimentícia da dosagem. Foram selecionadas as idades de 1, 3 e 7 dias para expressar a maturidade dos concretos, pois corresponde às idades de início do ensaio de fluência, ajudando a explicar melhor os fenômenos deformacionais previstos nesta tese, além da idade de 14 dias, idade esta quando a temperatura no ensaio de elevação adiabática praticamente se estabilizou na maioria das dosagens.

Para as dosagens com adições e aditivos em separado, observa-se que o concreto de referência até a idade de 3 dias (Figuras 5.12.a e 5.12.b) apresentou maior maturidade em relação aos concretos com adições e aditivos, conseqüência observada também nos menores resultados das resistências mecânicas realizadas neste programa experimental. Já para a idade de 7 dias (Figura 5.12.c) as dosagens com superpozolana, superplastificante e plastificante apresentaram resultados de maturidade levemente superiores as de referência, e as adições de pozolana e cimentícia ficaram abaixo da referência. Na idade de 14 dias (Figura 5.12.d) somente a adição de pozolona ficou abaixo da referência. Percebe-se que nas idades de 7 e 14 dias os resultados de maturidade não tiveram um comportamento correspondente com as propriedades mecânicas. Isto pode ser explicado em função das maiores taxas de geração de calor ocorrerem nas primeiras idades – por volta de até 4 dias - ficando mais fácil de serem

captadas pelo ensaio de elevação adiabática do que nas idades mais avançadas em que as variações de temperatura adiabática entre dosagens foram relativamente menores, além de outros fenômenos que contribuem para alteração das propriedades mecânicas não serem passíveis de representação pela maturidade por não gerarem calor ou ainda devido ao calor ser pouco expressivo (*i.e.*: efeito *filler*, alterações diferenciadas na microestrutura da pasta, melhorias na zona de transição, etc.).

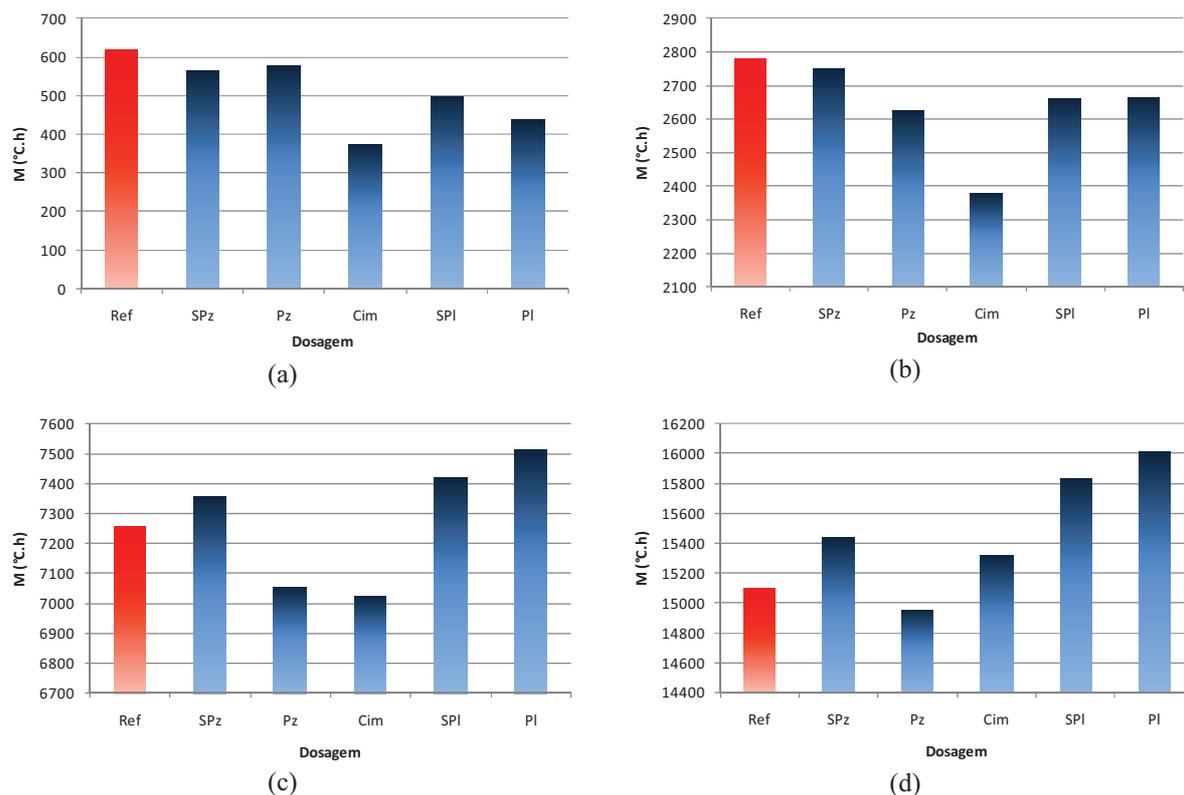


Figura 5.12: Maturidade do concreto para as *Dosagens sem combinação entre aditivos e adições* até a idade de 1 dia (a), 3 dias (b), 7 dias (c) e 14 dias (d).

Para as dosagens com o uso conjunto de adição mineral e aditivo plastificante no mesmo traço a maturidade na idade de 1 dia foi significativamente inferior à referência, principalmente as que continham escória de alto forno (Figura 5.13.a). Em idades superiores a dosagem que se sobressai das demais em ganho de maturidade foi a com metacaulim associada a aditivos plastificante e superplastificante, confirmando a melhora nas propriedades mecânicas. Já as dosagens com pozolana apresentaram menor maturidade em relação à referência nas quatro idades analisadas, mas obtiveram melhoras nas propriedades mecânicas acima da referência, concluindo-se que o ensaio de elevação adiabática não é suficiente para prever o comportamento mecânico do concreto.

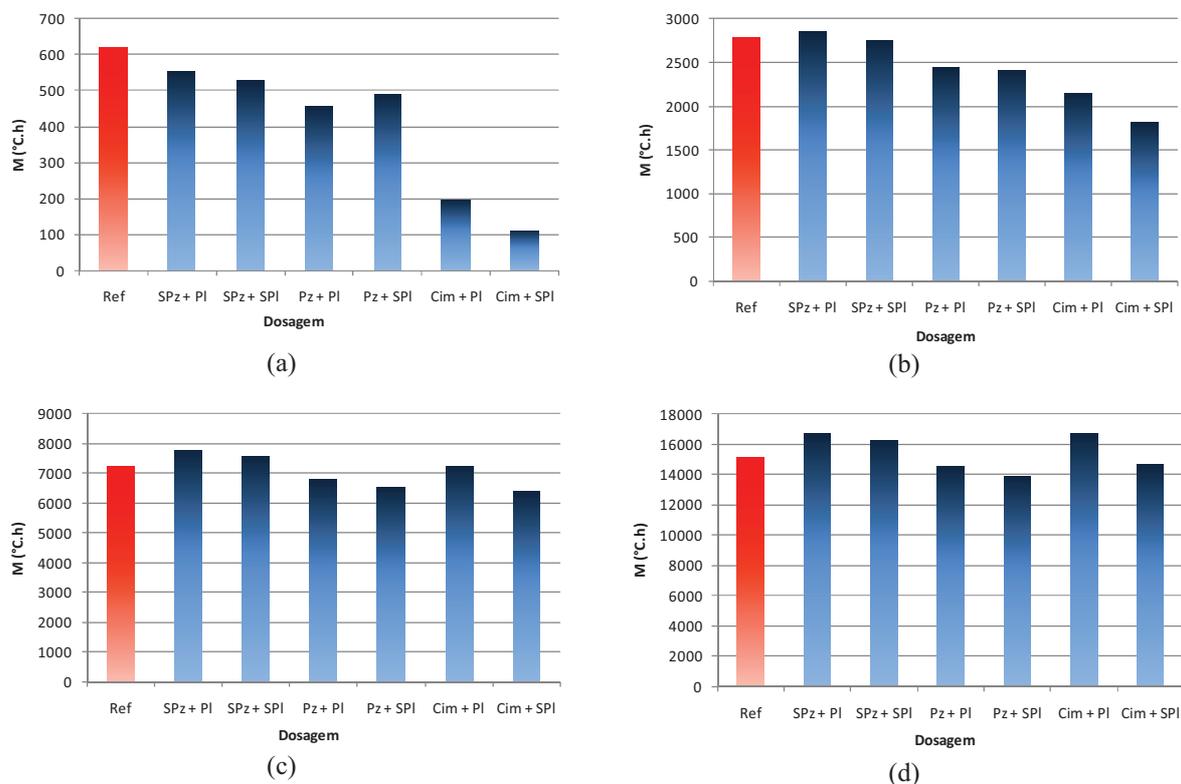


Figura 5.13: Maturidade do concreto para as *Dosagens com combinação entre aditivos e adições* até a idade de 1 dia (a), 3 dias (b), 7 dias (c) e 14 dias (d).

5.4.2. Calor Específico

Os resultados de calor específico das dosagens estudadas encontram-se resumidos na Tabela 5.6 e nos gráficos das Figuras 5.14 e 5.15.

Tabela 5.6: Resultados dos ensaios de calor específico.

Dosagens	Média (J/(kg.°C))	Coef. Variação (%)
Referência (Ref)	1114	0,2%
Metacaulim (SPz)	1185	1,2%
Argila Calcinada (Pz)	1214	0,8%
Superplastificante (SPI)	1214	1,7%
Plastificante (PI)	1238	0,3%
Escória de AF (Cim)	1207	2,6%
Metacaulim + Plast. (SPz+PI)	1209	0,4%
Metacaulim + Superplast. (SPz+SPI)	1163	0,9%
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	1141	2,1%
Argila Calc. + Superplast. (Pz+SPI)	1233	2,0%
Escória + Plast. (Cim+PI)	1098	1,0%
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	1172	0,8%

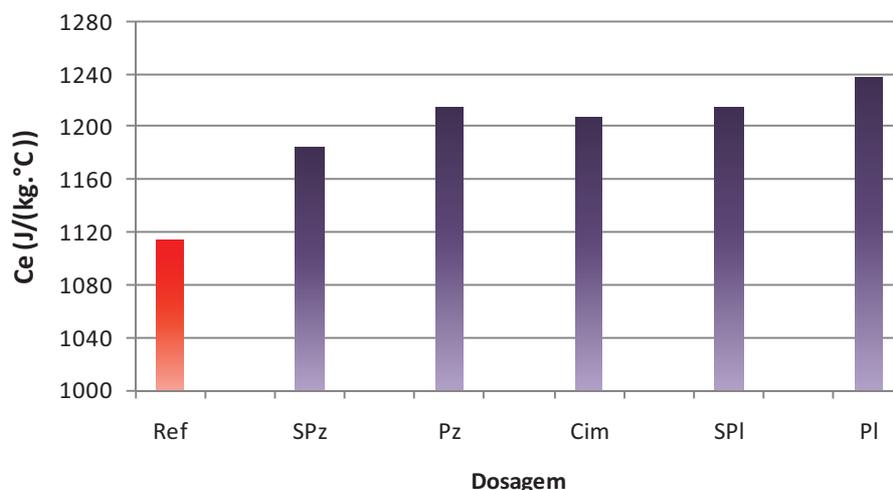


Figura 5.14: Calor específico das dosagens *sem as combinações adição-aditivo*.

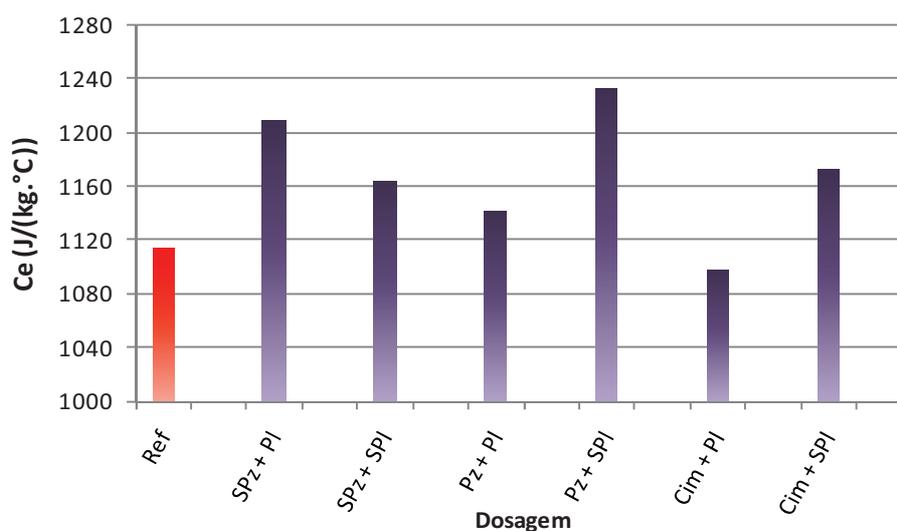


Figura 5.15: Calor específico das dosagens *com as combinações adição-aditivo*.

As dosagens com aditivos e adições utilizados tanto em conjunto quanto em separados apresentaram maiores valores de calor específico do que o concreto de referência, com exceção da dosagem com escória e plastificante levemente inferior a referência. Apesar de pequeno, em função da manutenção da proporção dos materiais nas dosagens inalteradas, esse quase unânime aumento do calor específico com a inserção de aditivo e adição pode contribuir para alterações no problema térmico do concreto massa, uma vez que maiores resultados de calor específico indicam que o concreto estará menos susceptível a mudanças de

temperatura com o fluxo de calor interno ao maciço, apesar da maioria das dosagens com aditivos e adições apresentarem maiores elevações adiabáticas de temperatura, que potencializam o problema térmico.

4.4.3. Difusividade Térmica

Os resultados de difusividade térmica das dosagens estudadas encontram-se resumidos na Tabela 5.7 e nos gráficos das Figuras 5.16 e 5.17. Os resultados foram apresentados no Sistema Internacional de unidades.

Tabela 5.7: Resultados dos ensaios de difusividade térmica.

Dosagens	Média (m ² /dia)	Coef. Variação (%)
Referência (Ref)	0,0755	0,1%
Metacaulim (SPz)	0,0729	2,3%
Argila Calcinada (Pz)	0,0634	0,1%
Superplastificante (SPI)	0,0738	1,7%
Plastificante (PI)	0,0735	1,4%
Escória de AF (Cim)	0,0660	2,5%
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	0,0692	0,0%
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	0,0662	0,4%
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	0,0666	1,1%
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	0,0715	0,7%
Escória + Plast. (Cim+PI)	0,0652	1,4%
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	0,0654	0,2%

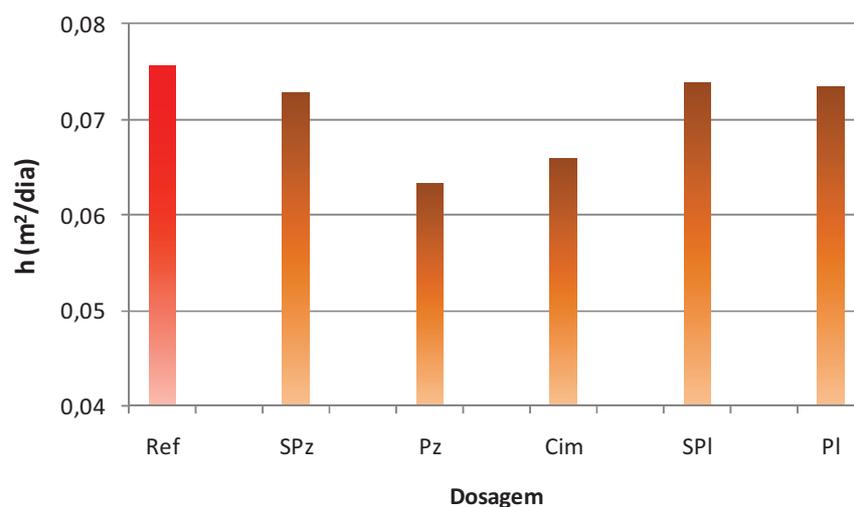


Figura 5.16: Difusividade térmica das dosagens *sem a combinação aditivo-adição*.

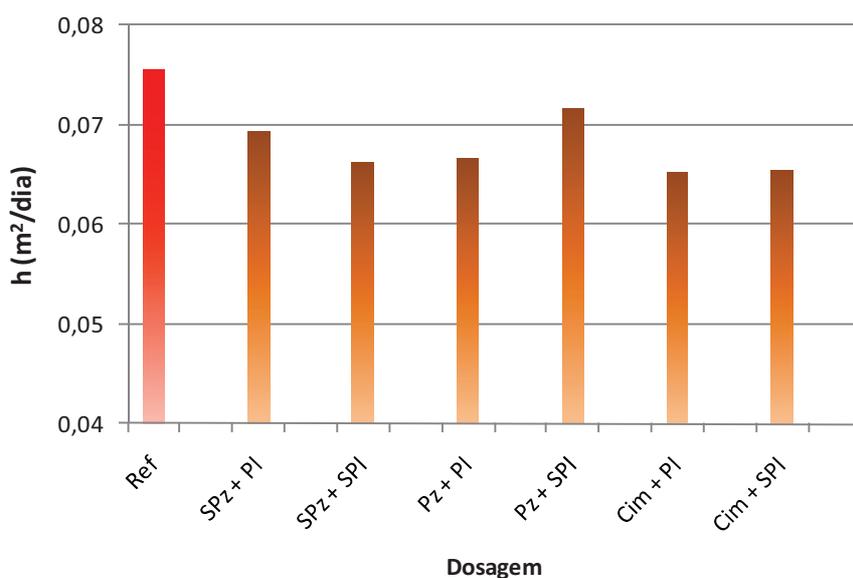


Figura 5.17: Difusividade térmica das dosagens com a combinação aditivo-adição.

Os resultados do gráfico nas Figuras 5.16 e 5.17 apontam que as dosagens com aditivo e adições, adicionados em separados e em conjunto, apresentaram leve redução dos resultados de difusividade térmica em relação à referência. Essa pequena redução, se comprovada estatisticamente, representa que os concretos com aditivos e adições contribuem para dificultar a propagação de calor no interior de maciços de concreto. Isso do ponto de vista do problema térmico, quando analisado de forma isolada das demais propriedades térmicas, indica que o concreto deve reter por mais tempo o calor gerado internamente, favorecendo uma dissipação mais lenta do calor, dando tempo para o concreto alcançar maiores níveis de resistência à tração e combater os esforços de tração proveniente do esfriamento do concreto após as primeiras idades.

5.4.4. Coeficiente de Dilatação Térmica

Os resultados do coeficiente de dilatação térmica das dosagens estudadas encontram-se resumidos na Tabela 5.8 e nos gráficos das Figuras 5.18 e 5.19.

Os valores dos coeficientes de dilatação das dosagens com apenas adições minerais apresentaram resultados levemente superiores ao concreto de referência, exceto para a adição cimentante, como observado no gráfico da Figura 5.18. Já as dosagens com aditivos plastificantes obtiveram uma leve redução em relação à referência. Em termos práticos, apesar das diferenças serem relativamente pequenas, se considerado os resultados extremos obtidos

nos ensaios para calcular o potencial incremento de tensão em função do aumento de temperatura obtido no ensaio de elevação adiabática destes concretos, percebe-se que há a possibilidade de aumento das tensões da ordem de 1,0 MPa (mantidas as outras propriedades inalteradas e iguais a 25GPa para o módulo de elasticidade e uma variação térmica de 40°C). Logo, essa variação alcançada somente pelo coeficiente de dilatação não pode ser desprezada, cabendo ao próximo capítulo verificar se estatisticamente os resultados obtidos são distintos ou referem-se a um mesmo comportamento.

Tabela 5.8: Resultados dos ensaios de coeficiente de dilatação térmica.

Dosagens	Média ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Coef. Variação (%)
Referência (Ref)	8,2	11,9%
Metacaulim (SPz)	8,8	5,2%
Argila Calcinada (Pz)	8,4	4,2%
Superplastificante (SPI)	7,8	0,9%
Plastificante (PI)	7,8	4,4%
Escória de AF (Cim)	7,6	7,4%
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	9,3	0,5%
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	9,0	1,3%
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	8,9	4,6%
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	9,0	1,0%
Escória + Plast. (Cim+PI)	10,2	2,2%
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	9,1	0,3%

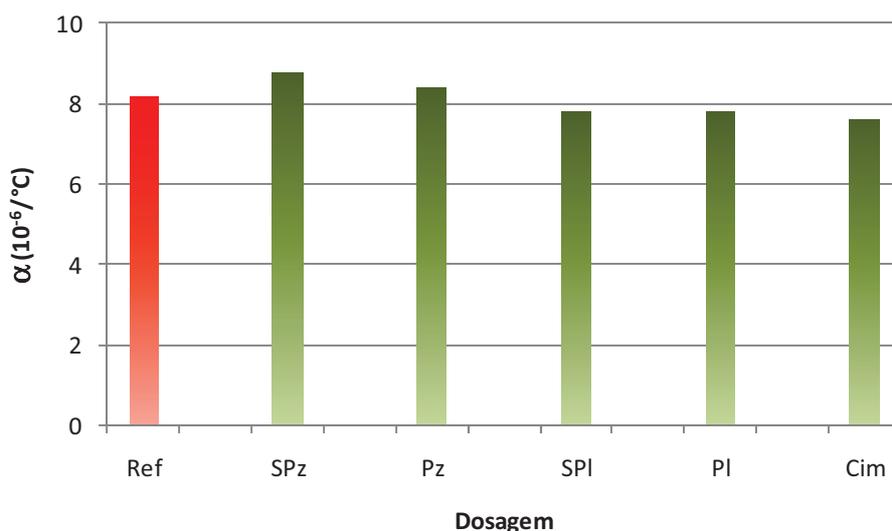


Figura 5.18: Coeficiente de dilatação térmica das dosagens *sem a combinação aditivo-adição*.

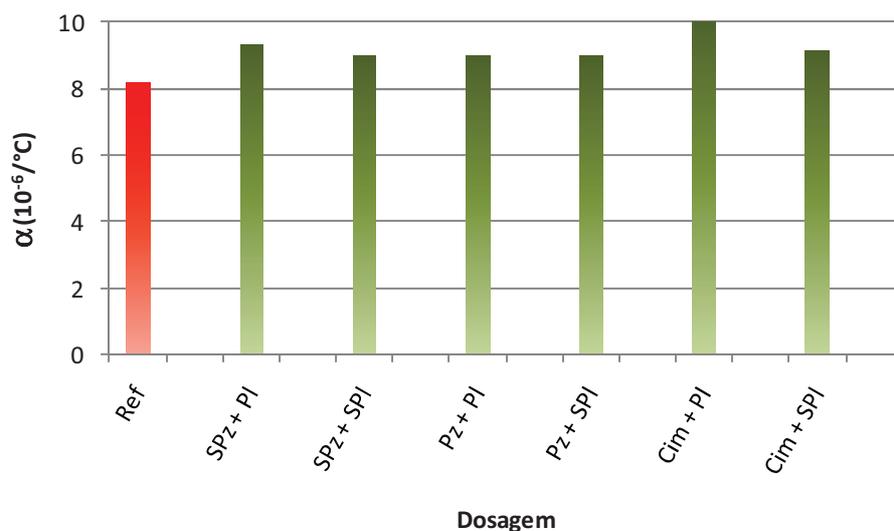


Figura 5.19: Coeficiente de dilatação térmica das dosagens *com a combinação aditivo-adição*.

Quando analisados os resultados o coeficiente de dilatação térmica das dosagens com o uso simultâneo de adição e aditivo no mesmo traço (Figura 5.19) os mesmo apresentaram valores superiores à dosagem de referência. Tal fato pode ser explicado pela maior compacidade da matriz cimentícia quando esses materiais são adicionados ao concreto.

É importante lembrar que os ensaios do coeficiente de dilatação térmica foram executados aproveitando os mesmos corpos de prova do ensaio de retração autógena após sua finalização, por volta de 90 dias. Logo, os efeitos medidos das adições e aditivos referem-se a uma idade mais avançada e não nas primeiras idades como foi caracterizada a maioria das propriedades analisadas nesta tese.

5.5. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DEFORMACIONAIS

Tanto o ensaio de retração autógena quanto o de fluência requerem que sejam conduzidos com o acompanhamento sistemático da deformação ao longo do tempo. Para tentar facilitar e simplificar o número de resultados dessas propriedades a partir de um único valor optou-se pela representação a partir do coeficiente de uma curva ajustada aos valores de ensaios, conforme será detalhado mais a frente.

Todos os resultados individuais obtidos do programa experimental referente a essas propriedades encontram-se discriminados nas Tabelas C.9 a C.10 do Apêndice C.

5.5.1. Retração Autógena

Os resultados de retração autógena foram apresentados em relação à taxa de crescimento da deformação, a partir do ajuste de uma curva na forma logarítmica sobre os valores de deformação dos ensaios. Essa taxa de crescimento equivale ao coeficiente (R_a) que multiplica o logaritmo do tempo, conforme ilustrado na Figura 5.20. Quanto maior for esse coeficiente mais substancial será a retração autógena. Essa forma de representação é bastante útil, pois é possível obter o crescimento da deformação diferenciada ao longo do tempo, uma vez que a inclinação da curva logarítmica (reta tangente em um ponto da curva) tende a reduzir com o passar do tempo, enquanto que se a retração fosse representada pela deformação última de ensaio não seria possível captar o histórico e a taxa de crescimento da deformação.

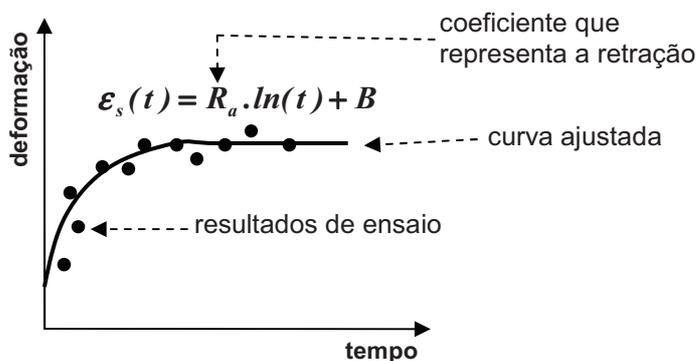


Figura 5.20: Forma de representação da retração autógena a partir dos resultados de ensaio.

O ensaio de retração autógena inicia-se assim que ocorre a desforma dos CP's, pois desta maneira é possível captar toda a evolução deformacional até idades mais avançadas – em torno de 90 dias – não sendo necessário, portanto, realizar ensaios para idades diferenciadas, como são feitas para a maioria das propriedades mecânicas e para a própria fluência. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 5.9 e nos gráficos das Figuras 5.21 e 5.22.

Os resultados de retração autógena dos concretos com apenas adição mineral, apresentados no gráfico da Figura 5.21, foram bem superiores ao concreto de referência, alcançando para a adição de escória (adição cimentante) o dobro de retração em relação à referência, enquanto que para os concretos com aditivos plastificantes foram obtidas as menores taxas de retração autógena. Esse aumento substancial para as dosagens com adições minerais possivelmente ocorreram em função do aumento da finura do material aglomerante na mistura cimento-adição, promovendo maior o consumo interno de água nas reações de hidratação e ainda

devido à redução no tamanho dos micro-poros na matriz cimentícia que induzem a maiores tensões superficiais e dificultam a difusão de água pelos seus espaços vazios.

Tabela 5.9: Resultados dos ensaios de retração autógena.

Dosagens	Média ($10^{-6}/\ln(t)$)	Coef. Variação (%)
Referência (Ref)	55,7	10,9%
Metacaulim (SPz)	100,0	3,1%
Argila Calcinada (Pz)	91,7	9,8%
Superplastificante (SPI)	39,9	9,6%
Plastificante (PI)	37,4	1,4%
Escória de AF (Cim)	114,7	0,4%
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	72,8	3,5%
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	75,5	2,6%
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	94,8	11,5%
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	86,5	8,8%
Escória + Plast. (Cim+PI)	113,0	2,4%
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	103,9	6,0%

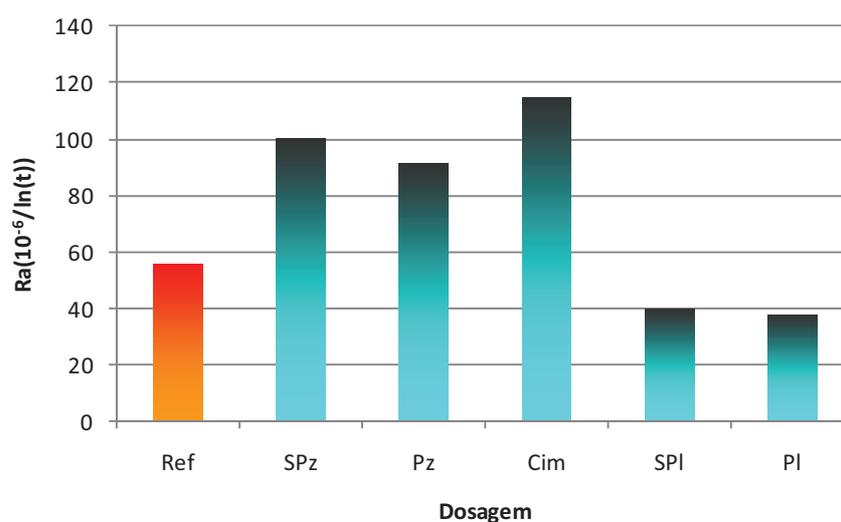


Figura 5.21: Taxa de retração autógena das dosagens *sem a combinação aditivo-adição*.

Por outro lado, o comportamento das dosagens com apenas aditivos plastificantes, que apresentaram redução na retração autógena, pode ser explicado pelo excesso de água que na dosagem de referência era necessária para o ganho de plasticidade e ajudar na hidratação dos compostos, mas que agora, na presença dos aditivos, essa água além da necessária para as reações de hidratação, ocupa mais espaços na pasta, promovendo um aumento na quantidade de macro e meso-poros⁴¹ que inicialmente funcionam como um “pulmão” de umidade interna,

⁴¹ Poros maiores também conhecidos por capilares, conforme descrição dada na Tabela 2.1.

evitando uma intensa retração enquanto a água estiver presente, e reduzindo as forças capilares, em detrimento dos maiores vazios presentes na pasta. Outra explicação pode estar associada a uma possível redução da tensão superficial da água sobre os vazios capilares causada pelos aditivos plastificantes, que normalmente ocorre no concreto fresco, a qual reduz a capacidade de sucção sobre os vazios – constrição - quando acontece a difusão de umidade em função do consumo de água na hidratação do cimento. A redução da retração autógena na presença de aditivos plastificantes foi relatada em alguns trabalhos levantados por Collepari (1995).

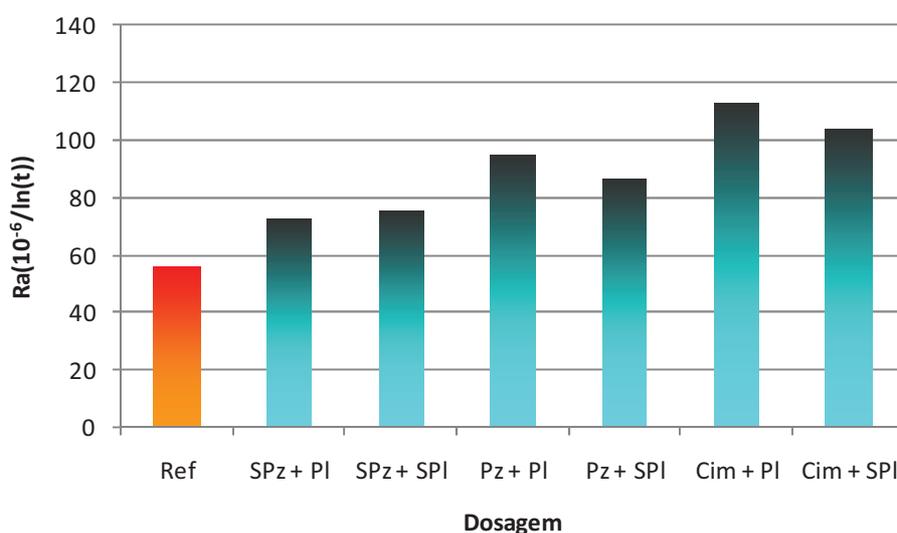


Figura 5.22: Taxa de retração autógena das dosagens *com a combinação aditivo-adição*.

As dosagens onde ocorreu a mistura de adição e aditivos apresentaram todas elas retração autógena superior a referência (Figura 5.22), demonstrando a prevalência dos efeitos das adições minerais, muito embora tenha ocorrido redução da retração para as dosagens com metacaulim quando adicionado os aditivos estudados.

É importante destacar que o efeito elevado da retração autógena nas dosagens com adições minerais é tão significativo em termos deformacionais quanto os resultados de fluência básica a serem avaliados a seguir. Este fato dificulta a diferenciação dos resultados provenientes exclusivamente do efeito do carregamento (fluência) em relação aos resultados de deformação advindos da retração autógena, principalmente na idade muito recente de carregamento de 1 dia, quando ambos comportamentos deformacionais são bem significativos.

5.5.2. Fluência Básica

De maneira análoga a retração autógena, a fluência foi retratada por meio de um coeficiente obtido a partir do ajuste de uma curva em relação aos resultados de ensaios. Esse coeficiente (F_j) representa a taxa com que o concreto se deforma por fluência básica em relação ao logaritmo do tempo para uma determinada idade de início de aplicação da carga de ensaio j^{42} , conforme ilustrado na Figura 5.23. Um das primeiras instituições a representar a fluência desta forma foi o *Bureau of Reclamation* (U. S. BUREAU OF RECLAMATION, 1956). A expressão, denominada função de fluência ($J(t-t_0)$), composta por esse coeficiente (F_j) retorna a fluência específica, equivalente à deformação proveniente da fluência por unidade de tensão, admitindo o princípio da superposição de efeitos. Esse princípio é válido para tornar possível a representação do fenômeno da fluência em outros níveis de tensão dentro do limite de linearidade, normalmente aceito até 30% a 40% da resistência mecânica do concreto na idade de início do carregamento.

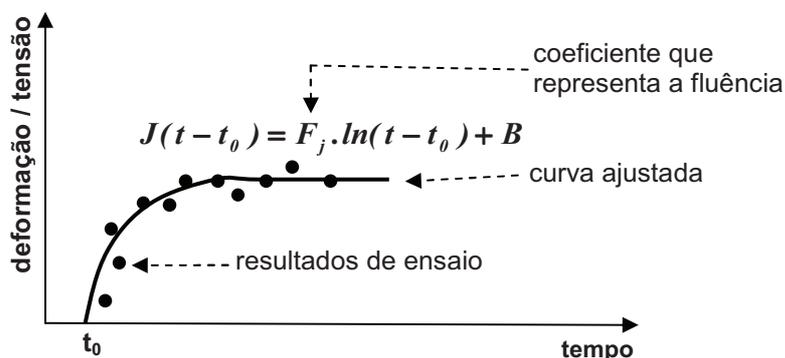


Figura 5.23: Forma de representação da fluência básica a partir dos resultados de ensaio.

Os resultados de fluência encontram-se resumidos na Tabela 5.10 e nos gráficos das Figuras 5.24 e 5.25. Para a obtenção dos resultados de fluência foi descontada a deformação de origem autógena. Resultados individuais de fluência específica provenientes dos ensaios podem ser observados na Tabelas C.11 a C.13 do Apêndice C.

Para as dosagens com alta retração autógena (com adições minerais) nas idades de 1 e 3 dias houve uma tendência de oscilação incomum nas leituras de deformação no ensaio de fluência,

⁴² Nesta tese a representação de início de ensaio é feita pela simbologia “ t_0 ”, mas como há uma forte associação com a letra j , baseada na norma brasileira NBR6118 (ABNT, 2003), optou-se pela representação da Fluência por meio da simbologia “ F_j ” e não “ F_{t_0} ”.

após um determinado período de ensaio. Essas oscilações mesmo excluídas dos resultados finais, não geraram grande prejuízo na determinação do ajuste de curva de fluência após vários testes comprobatórios.

Tabela 5.10: Resultados dos ensaios de fluência básica.

Variável Resposta: F_j		Idade de início de carregamento (dia)		
		1	3	7
Referência (Ref)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	20,51	11,96	10,49
	Coef. Variação (%)	14%	8%	20%
Metacaulim (SPz)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	45,71	11,61	4,25
	Coef. Variação (%)	0,3%	17%	14%
Argila Calcinada (Pz)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	32,36	8,37	4,68
	Coef. Variação (%)	35%	6%	9%
Superplastificante (SPI)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	50,65	14,49	9,83
	Coef. Variação (%)	16%	11%	4%
Plastificante (PI)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	34,29	11,53	7,95
	Coef. Variação (%)	11%	5%	4%
Escória de AF (Cim)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	85,40	7,49	2,44
	Coef. Variação (%)	26%	7%	52%
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	28,24	7,75	4,97
	Coef. Variação (%)	4,8%	16%	13%
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	40,56	21,72	8,04
	Coef. Variação (%)	17%	10%	7%
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	9,51	5,30	3,44
	Coef. Variação (%)	31%	34%	6%
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	30,44	3,06	2,08
	Coef. Variação (%)	64%	3%	31%
Escória + Plast. (Cim+PI)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	98,41	15,44	7,20
	Coef. Variação (%)	5%	9%	20%
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	Média ($10^{-6}/\ln(t)$.MPa)	159,11	7,98	4,35
	Coef. Variação (%)	2%	50%	24%

Os resultados de fluência passaram ainda por uma correção nos seus valores de deformação em decorrência de uma limitação do procedimento de ensaio o qual aplica um valor de carga de ensaio, referente a um percentual da resistência à compressão, constante ao longo de todo o ensaio por aproximadamente 90 dias. Contudo, sabe-se que no ensaio de fluência a relação tensão aplicada pela resistência deve ser mantida fixa, e para tanto, os resultados de ensaio devem ser corrigidos em função do ganho de resistência obtido a partir do ensaio de resistência à compressão para várias idades. Sendo assim, baseado nos resultados de resistência à compressão apresentados no item 5.3.1 e a partir desse princípio apresentado na expressão 2.2, foram efetuadas as correções nos resultados.

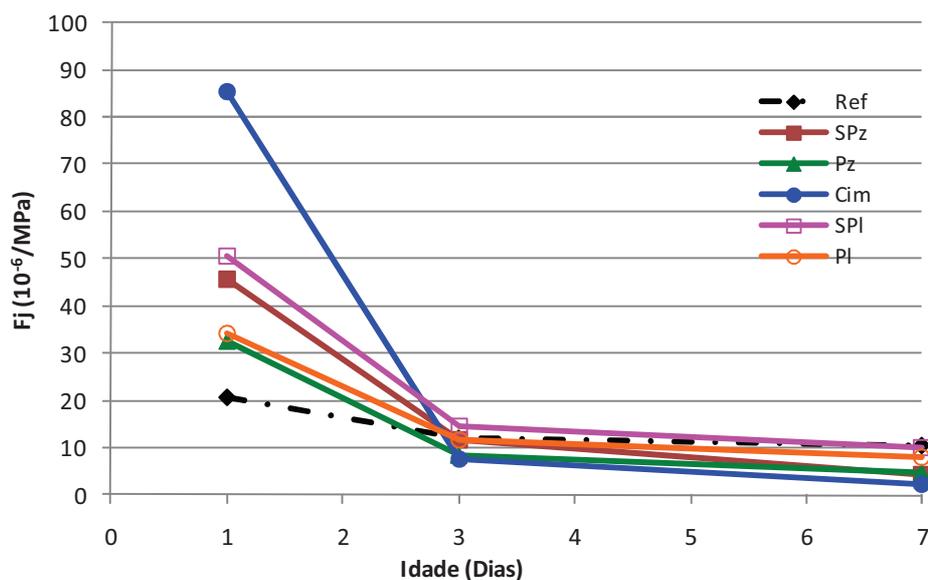


Figura 5.24: Taxa de fluência básica das dosagens *sem a combinação aditivo-adição*.

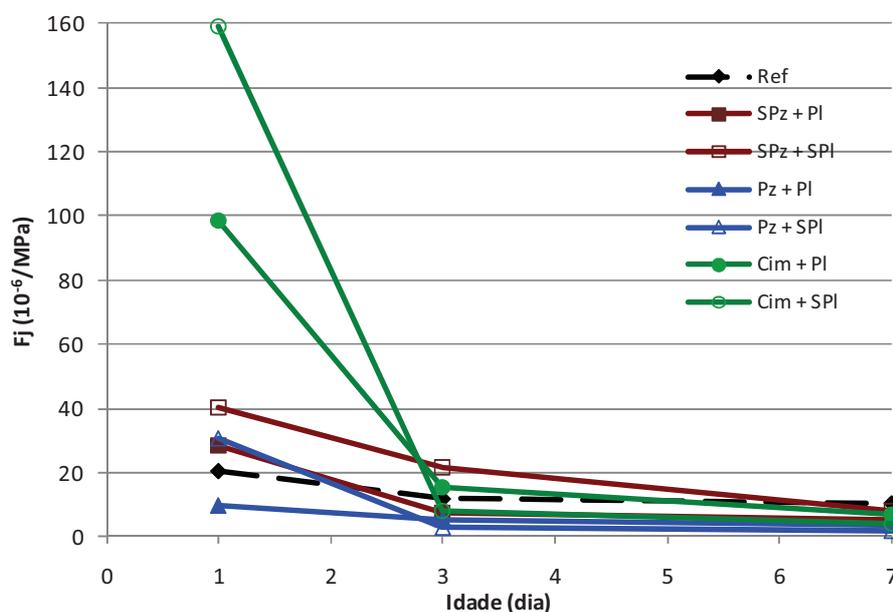


Figura 5.25: Taxa de fluência básica das dosagens *com a combinação aditivo-adição*.

Dosagens com o uso de adições e aditivos em separado

Pelo gráfico da Figura 5.24 observa-se que na idade de 1 dia de início de carregamento a fluência de todos os concretos com aditivos e adições utilizados em separado foram substancialmente superiores à referência, mesmo havendo grande variação dos resultados

apontada pelo coeficiente de variação, com destaque para a fluência do concreto com adição cimentícia de escória que alcançou uma taxa de fluência quatro vezes maior que a referência. Na idade de 3 dias, a taxa de fluência dos concretos oscilaram em relação à referência: duas dosagens (com pozolona e outra com adição cimentícia) apresentaram fluência inferiores à referência, outras duas próximas à referência (com superpozolana e plastificante) e uma com valor nitidamente superior (dosagem com superplastificante). Já para a idade de 7 dias, os resultados de fluência das dosagens com adições e aditivos tenderam a ser inferiores à referência, apesar da grande variabilidade nos resultados individuais que serão analisados com maior rigor estatístico no próximo capítulo.

O grande aumento da fluência na idade de 1 dia de início de carregamento está coerente com os resultados apontados pelo ensaio de elevação adiabática dos concretos. Esses ensaios demonstraram que o baixo calor de hidratação gerado nas primeiras 24 horas pelas dosagens com aditivos e adições conduziram a uma matriz cimentícia menos densa e resistente aos esforços provenientes no ensaio de fluência, gerando grandes deformações ao longo do tempo. Dos únicos dois trabalhos levantados na revisão bibliográfica desta tese em que se procurou verificar o efeito das adições e aditivos da fluência na idade de 1 dia (BROOKS e NEVILLE, 1992; AKKAYA *et al.*, 2007) apontam o aumento observado nesta pesquisa, porém de forma mais branda.

Para a idade de 3 dias de início do carregamento a falta de uniformidade no comportamento da fluência para as dosagens com aditivos e adições utilizados em separado pode ser um reflexo de uma situação de transição, onde a matriz cimentícia ainda encontra-se em formação, havendo portanto, efeitos químicos e físicos simultâneos se interagindo. Ainda assim é possível perceber que há uma leve tendência de redução da fluência, se agrupados os resultados com adições minerais, cujo comportamento possivelmente esteja associado ao superior ganho de rigidez na matriz cimentícia e melhor formação dos compostos hidratados em relação à referência, mesmo com algumas adições ainda retardando o processo de hidratação. Os aditivos, se agrupados os resultados de fluência na idade de 3 dias, apresentaram leve tendência de aumento da fluência, possivelmente pela sua capacidade de retardo na formação dos compostos hidratados e ainda devido a maior presença de água livre na matriz cimentícia que matem um “estoque” de água e aumenta a capacidade deformacional sob carga. É válido destacar, segundo o levantamento dos trabalhos envolvendo análise do efeito das adições e aditivos na fluência, que para as adições minerais na idade de 3 dias houve alguns trabalhos, como por exemplo Li, Wee, Wong (2002), apontando redução na

fluência e para os aditivos plastificantes há mais trabalhos relatando aumento na fluência (NEVILLE, 1970; BROOKS e NEVILLE, 1992), similar aos resultados obtidos nesta tese.

Na idade de início do carregamento de 7 dias a redução generalizada da fluência para as dosagens com adições e aditivos pode ser explicada pela melhor formação dos compostos hidratados da matriz cimentícia, tornando-a mais compacta, reduzindo o tamanhos dos poros e melhorando inclusive a zona de transição pasta-agregados.

Se analisado o comportamento dos concretos com aditivos e adições com a idade de início de carregamento, percebe-se a tendência de redução da fluência em relação à referência. Assim, caso seja possível extrapolar esse comportamento, pode-se deduzir que ao iniciar o carregamento em uma estrutura para idades igual ou superior a 7 dias, os concretos com adições e aditivos apresentarão menor tendência deformacional, devido exclusivamente à fluência básica, do que se o concreto não tivesse esses produtos incorporados, mantidas inalteradas as dosagens. Este comportamento pode ajudar na tomada de decisão quando há a necessidade do emprego de uma determinada adição ou aditivo no concreto de uma estrutura que exigir um nível mínimo de deformação, como por exemplo, em estruturas de concreto massa da casa de força de usinas hidroelétricas, mais especificamente na região do entorno da turbina.

Dosagens com o uso de adições e aditivos em conjunto

Pelo gráfico da Figura 5.25 observa-se que na idade de 1 dia de início de carregamento a fluência das dosagens com o uso em conjunto de adição e aditivo apresentou modificações significativas de comportamento. Tanto as dosagens de metacaulim, quanto as de pozolana misturadas aos aditivos plastificante e superplastificante tenderam a reduzir seus efeitos sobre a fluência para a idade de início de carregamento de 1 dia quando comparados aos efeitos provocados sem a mistura com os aditivos, mas ainda superior a referência (exceto para a dosagem com pozolana e plastificante que atingiu a metade do valor de fluência da referência). Já a adição cimentícia combinada com os aditivos plastificantes apresentou maior fluência quando comparado com o uso isolado desta adição mineral na idade de início de carregamento de 1 dia. O aumento da fluência com o uso desta adição em conjunto com os aditivos plastificante já era esperado, pois essa combinação na dosagem provocou grande retardo nas reações de hidratação, conforme já apresentado nas Figuras 5.10 e 5.13.a.

Já as dosagens com misturas de adições e aditivos para as idades de início de carregamento de 3 e 7 dias tenderam a apresentar redução da fluência (exceto para as dosagens de metacaulim com superplastificante e escória com plastificante na idade de 3 dias) em relação ao concreto de referência, semelhante ao observado para o uso das adições e aditivos em separado comentado anteriormente. Isso se deve possivelmente as melhorias microestruturais que esses materiais proporcionam, contribuindo para uma matriz cimentícia mais densa e capaz de opor com maior vigor as tendências deformais impostas pela aplicação do carregamento.

5.6. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES COMPLEMENTARES

A função desses resultados é de se tentar captar alguma alteração nas propriedades básicas do concreto: absorção, índice de vazios e massa específica sob a ação das adições e aditivos que justifique o comportamento perante as outras propriedades avaliadas nesta tese. Os resultados encontram-se resumidos nos gráficos das Figuras 5.26 e 5.27 e podem ser observados com mais detalhes na Tabela C.14 do Apêndice C. A massa específica obtida refere-se ao concreto no estado saturado, situação comum de ser considerada nos cálculos térmicos.

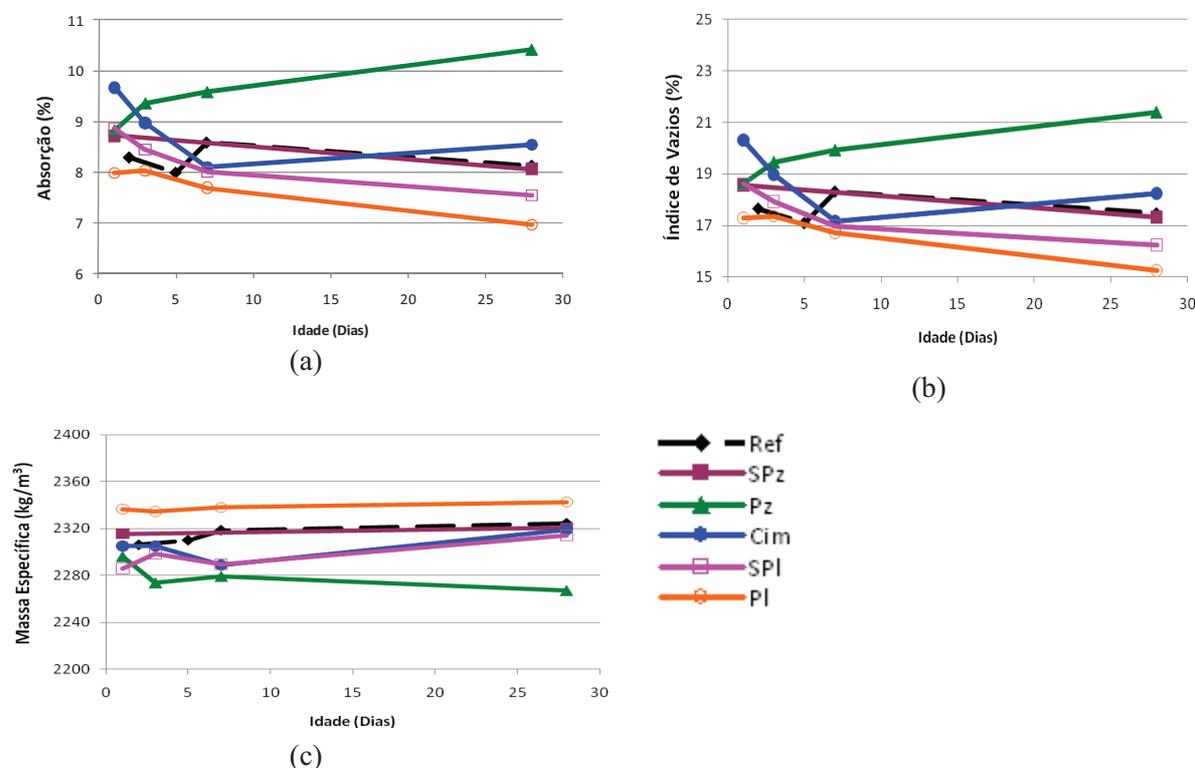


Figura 5.26: Propriedades complementares das dosagens *sem a combinação aditivo-aditivo*: (a) Absorção; (b) Índice de vazios; (c) Massa específica saturada.

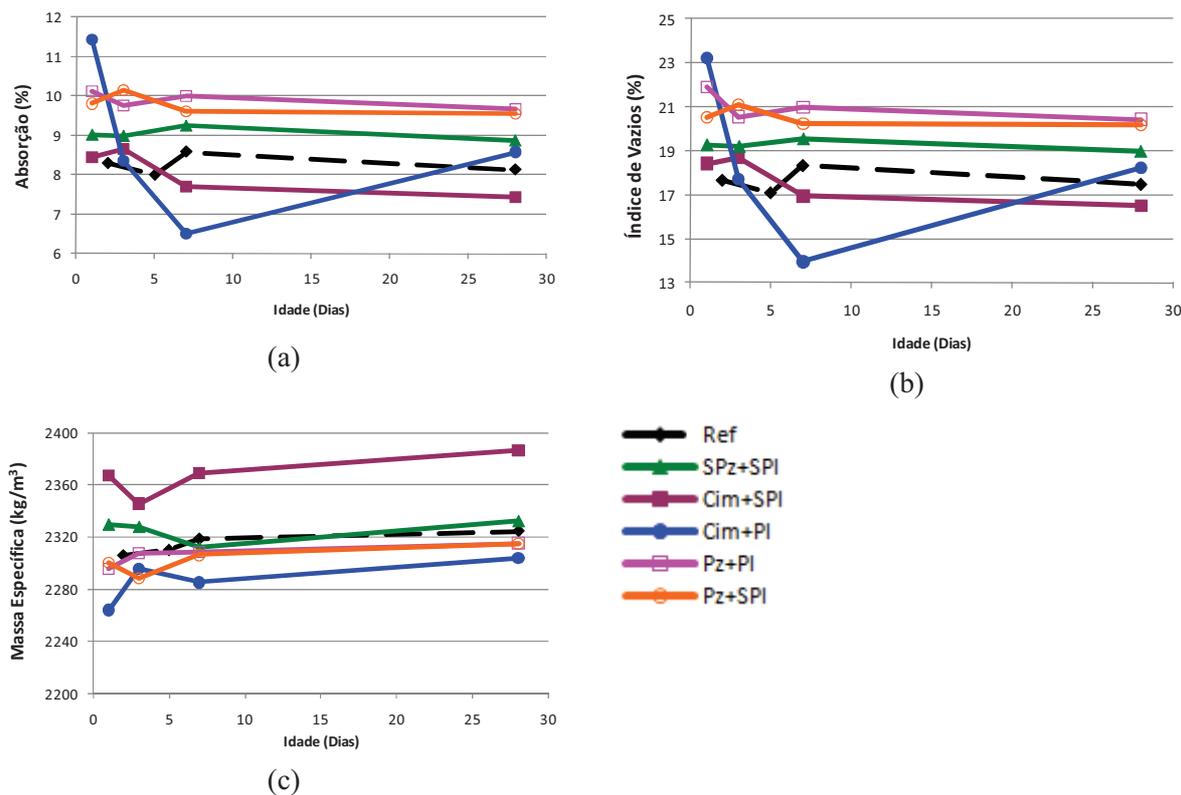


Figura 5.27: Propriedades complementares das dosagens *com a combinação aditivo-adição*: (a) Absorção; (b) Índice de vazios; (c) Massa específica saturada.

Pelo gráfico das Figuras 5.26.a e 5.26.b é possível perceber que houve uma leve tendência de redução da absorção e índice de vazios dos concretos com a idade, como era de se esperar. Para o concreto com adição cimentícia ocorreu uma queda da absorção e índice de vazios até a idade de 7 dias e posterior aumento na idade de 28 dias, possivelmente em decorrência da formação tardia de compostos hidratados de maior dimensão, como o hidróxido de cálcio, gerando maiores vazios. Já a dosagem com pozolana (argila calcinada) obteve um leve crescimento da absorção e índice de vazios com a idade, possivelmente decorrente de alguma reação expansiva ou formação de compostos hidratados de maior dimensão do que as provenientes do cimento *portland* comum. Os resultados de absorção e índice de vazios devem ser avaliados com ressalvas, pois o procedimento de ensaio que conduz a determinação de tais propriedades pode deixar de captar parte do volume da água presente nos micro-poros e a água adsorvida na matriz aglomerante mesmo com o processo acelerado de secagem e saturação dos CP's por meio da secagem em estufa e saturação em água quente. Este processo de ensaio pode ainda alterar a formação da microestrutura do concreto falseando a determinação dos resultados.

Os resultados de massa específica no estado saturado do concreto (Figura 5.26.c) apresentaram quase que uma estabilidade quando avaliados em função da idade. Algumas variações em relação ao concreto de referência ocorreram entre as idades de 3 e 7 dias, mas que praticamente convergiram na idade de 28 dias para um valor médio de 2320 kg/m³, com exceção do concreto com pozolana que apresentou leve redução da massa específica possivelmente em decorrência da menor densidade da pozolona comparada com os demais aglomerantes, maior tamanho das partículas e do maior índice de vazios apresentado. O controle da massa específica do concreto no estado endurecido é bastante comum quando se deseja verificar o atendimento das especificações de estabilidade das barragens de gravidade em relação ao seu peso.

Quando analisado os resultados ao longo das idades das dosagens com misturas de adição e aditivo no mesmo traço (Figura 5.27) percebe-se comportamentos semelhantes em relação às dosagens de adições e aditivos em separado: tendência de redução da absorção e índice de vazios. Já para a massa específica houve a tendência de aumento das dosagens na idade de 28 dias, comprovando que o efeito de “densificação” da matriz cimentícia é mais pronunciado quando se utiliza adição e aditivo na mesma dosagem. Entretanto, quando analisado os efeitos entre dosagens um comportamento diferenciado foi observado na dosagem de escória com plastificante. Nela houve a redução do índice de vazios quase que pela metade nas primeiras idades (7 dias) e posteriormente houve um acréscimo. Tal fato pode ser explicado, como comentado anteriormente, pelo processo de hidratação que nos primeiros dias que geram compostos hidratados de pequenas dimensões como o C-S-H, que reduzem os vazios da matriz, e posteriormente são formados compostos maiores gerando, por conseguinte, maiores vazios, como é o caso do hidróxido de cálcio.

Em termos gerais não foi observada uma associação nítida dos efeitos das adições e aditivos nessas propriedades físicas analisadas com a fluência possivelmente pelo fato das mesmas não conseguirem captar os fenômenos na escala microscópica com eficiência, como por exemplo a interferência nos espaços interlamelares de C-S-H ou na distribuição dos vazios na matriz cimentícia. O que se consegue perceber é que as adições e aditivos interferem nos vazios da matriz, sejam eles utilizados em separado ou juntos na mesma dosagem, e que essa interferência tem papel importante nas alterações dos resultados de fluência observados na pesquisa.

CAPÍTULO 6: TRATAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO

O foco principal deste capítulo é o tratamento dos resultados a partir de ferramentas estatísticas, as quais proporcionam maior confiabilidade às conclusões apresentadas nesta tese. Inicialmente foram avaliadas sobre quais propriedades as adições e aditivos interferem significativamente, com destaque para a fluência, incluindo seus possíveis efeitos combinados. Posteriormente, foram agrupados os resultados que estatisticamente apresentaram-se semelhantes para que assim se pudessem interpretá-los não mais em separado, mas conjuntamente. Os resultados obtidos de fluência foram comparados ainda com modelos de predição para tentar verificar se os mesmos conseguem de alguma forma contemplar os efeitos das adições e aditivos ou se necessitam de possíveis ajustes para adequar a uma predição mais coerente com os resultados de ensaios. Por fim, foram apresentadas simulações do uso de algumas das dosagens do programa experimental em uma estrutura de concreto propensa ao problema térmico, tentando-se verificar a potencialidade dos efeitos das adições e aditivos não somente sobre as propriedades em separado, mas principalmente sobre seus efeitos atuando em conjunto, como de fato ocorre, em uma situação real *in loco*.

6.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

O enfoque desta análise estatística é comprovar pelo método de análise de variância que os efeitos das adições e aditivos utilizados neste programa experimental interferem efetivamente sobre as diversas variáveis de resposta equivalentes às propriedades: fluência, retração, propriedades mecânicas e térmicas, conforme foram avaliadas em separado nos próximos sub-ítem.

A técnica estatística de análise de variância, também conhecida pela sigla em inglês *ANOVA*⁴³, consiste em verificar em termos gerais o quão os efeitos dos fatores de controle são significativos em relação aos efeitos dos ruídos sobre a variável de resposta. Entende-se por fatores de controle todas as variáveis do programa experimental que foram intencionalmente alteradas para verificar o efeito sobre a variável de resposta⁴⁴; já os ruídos, também conhecidos por erro aleatório, referem-se a qualquer efeito externo aos fatores de controle pela qual não consegue manter totalmente blindada a interferência sobre a variável de resposta (ex.: efeito da variabilidade produzida pelas oscilações da temperatura ambiente). Sendo assim, quanto maior for a variabilidade, medida pelas médias quadráticas (variância), ocorrida entre os níveis dos fatores de controle e menor for a oscilação da variável de resposta dentro de cada nível (ruído), mais significativo será o efeito do fator de controle sobre a variável de resposta. Por outro lado, se o efeito dos erros aleatórios forem tão expressivos quanto o efeito provocado pelos níveis dos fatores controláveis isso poderá ser um indício de que o fator de controle não é significativo. Maiores detalhes sobre a *ANOVA* podem ser encontrados nos capítulos 13 e 14 do livro de Montgomery e Runger (2009) ou ainda no caderno de engenharia de Nanni e Ribeiro (1991).

A análise de variância, com base no programa experimental, foi realizada a partir da combinação completa do tipo de aditivo plastificante (em dois níveis: plastificante e superplastificante) e adição mineral (em três níveis: pozolana, superpolana e cimentante), conforme já devidamente discriminadas no capítulo 4. A esta técnica em específico, em que são avaliadas todas as combinações possíveis de dois fatores de controle, tomadas dois a dois, é conhecida como *Two-Way ANOVA* e pode ser observada em detalhe nas mesmas literaturas técnicas citadas no parágrafo anterior.

A análise ANOVA foi realizada por meio de planilhas em MS-Excel (MICROSOFT, 2007) elaboradas especificamente para o desenvolvimento desta pesquisa e validadas com o auxílio do *software* Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

⁴³ *Analysis Of Variance*. Técnica muito utilizada em Planejamento de Experimentos, conforme abordado em Montgomery e Runger (2009).

⁴⁴ A definição e explicação desses termos já foram apresentadas no capítulo 4 desta tese.

6.2.1. Efeito Sobre a Fluência e Retração Autógena

Fluência

As Tabelas 6.1 a 6.3 agrupam os resultados individuais de fluência básica por corpo de prova obtidos no programa experimental apresentados no capítulo 5 nas respectivas idades de início de carregamento (t_0) de 1, 3 e 7 dias respectivamente já no formato matricial para a análise de variância. A análise foi separada por idade de início de carregamento, pois já é consenso na literatura técnica de que esse fator de controle é significativo na fluência, dispensando-se assim nova análise.

Tabela 6.1: Resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}).\ln(t)] -t_0=1$ dia.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	22,51	31,67	44,85
		18,51	36,90	56,45
	SPz	45,80	29,20	45,50
		45,62	27,28	35,62
	Pz	40,40	7,41	44,32
		24,32	11,61	16,56
	Cim	101,33	101,82	156,90
		69,47	95,00	161,32

Tabela 6.2: Resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}).\ln(t)] -t_0=3$ dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	11,25	11,91	15,65
		12,67	11,15	13,33
	SPz	12,99	6,90	23,27
		10,23	8,61	20,17
	Pz	8,03	6,56	3,12
		8,71	4,04	3,00
	Cim	7,14	14,43	5,15
		7,84	16,45	10,81

Tabela 6.3: Resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}) \cdot \ln(t)] - t_0 = 7$ dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	11,99	8,16	9,53
		8,99	7,74	10,13
	SPz	4,68	5,41	7,62
		3,82	4,53	8,46
	Pz	4,98	3,29	2,54
		4,38	3,59	1,62
	Cim	1,54	6,17	5,07
		3,34	8,22	3,63

A partir dos resultados de fluência foram realizados os testes de hipóteses com auxílio da análise de variância, obtendo os resultados detalhados nas Tabelas D.1 a D.3 do Apêndice D. No princípio da *ANOVA* são formuladas hipóteses para verificar a representatividade dos fatores controláveis (neste caso: aditivos e adições) na variável de resposta (fluência): se os fatores controláveis são significativos o valor da coluna F-calculado, apresentados no Apêndice D, deve ser superior ao F-tabelado, caso contrário os fatores controláveis provavelmente não interferem na variável de resposta. O valor de F-tabelado refere-se à distribuição estatística F dependente do número de níveis dos fatores controláveis e do tamanho das amostras (calculados com o nome de graus de liberdade).

Os resultados provenientes da análise de variância indicam que as adições minerais utilizadas interferem significativamente na fluência, como também quando combinados com os aditivos plastificantes, para as três idades de início de carregamento de 1, 3 e 7 dias. Já os aditivos plastificantes utilizados em separado alteram a fluência básica de forma significativa apenas na idade de início de carregamento de 1 dia. Para as outras idades os aditivos não se mostraram significativos em alterar a fluência, muito embora quando misturados com as adições minerais ocorreram modificações substanciais.

Observa-se nas tabelas de análise de variância de que os efeitos dos aditivos e adições são mais relevantes na idade de início de carregamento de 1 dia do que nas demais idades. Isto porque na idade de 1 dia a matriz cimentícia encontra-se em pleno estágio de formação e a capacidade deformacional sob carga é altamente influenciada por este fator. Foi observada ainda nesta idade de carregamento alta variabilidade nos resultados de fluência individuais (observável na média quadrática do erro aleatório da Tabela D.1). Dentre as principais causas que podem explicar essa grande variabilidade individual de resultados entre CP's, destaca-se a própria não-linearidade deformacional do concreto em idades tão recentes de início do

carregamento, a qual é dependente da retração autógena significativa e da alta taxa de hidratação dos compostos cimentícios que se encontra nas primeiras idades.

O fato do uso dos aditivos plastificante e superplastificante nas dosagens estudadas ser significativo apenas na idade de carregamento de 1 dia demonstra que para as outras idades analisadas a alteração microestrutural promovida pelos mesmos não é suficiente para modificar os mecanismos propulsores da fluência no concreto de referência a ponto de se gerar resultados estatisticamente distintos.

De maneira geral percebe-se nas Tabelas 6.1 a 6.3 que o efeito combinado adição-aditivo sobre a fluência é mais substancial nas idades de início de carregamento de 3 e 7 dias. Em alguns casos para a idade de início de carregamento de 3 dias ao se misturar adição com aditivo houve o aumento médio dos efeitos sobre a fluência (escória com plastificante e metacaulim com superplastificante) e em outros ocorreu a redução (metacaulim com plastificante, pozolana com plastificante e superplastificante). Já para a idade de início de carregamento de 7 dias a dosagem de pozolana com os aditivos plastificante e superplastificante reduziram a fluência quando comparadas com os resultados das mesmas utilizadas em separado. As explicações para o aumento da fluência quando utilizados aditivos e adições em conjunto na mesma dosagem podem estar relacionadas com o aumento ainda maior do refinamento dos poros, que reconhecidamente aumentam a fluência, e também devido ao retardo acentuado da hidratação na matriz cimentícia que conduz a uma menor resistência à deformação diferida sobre carga. Por outro lado, o efeito inibidor da combinação adição-aditivo observado em algumas dosagens pode ser explicado pelo aumento da rigidez da matriz cimentícia decorrente do maior número de ligações dos compostos hidratados. Isto se deve a uma possível melhora na dispersão e dissolução mais eficiente do aglomerante (cimento+adição) quando utilizado em conjunto com um aditivo plastificante ou superplastificante.

Retração autógena

Encontra-se na Tabela 6.4 os resultados individuais de retração autógena por corpo de prova já no formato para a análise de variância. Esses mesmos valores foram utilizados para correção dos resultados de ensaio de fluência, conforme preconiza a norma brasileira NBR 8224 (ABNT, 1983).

Tabela 6.4: Resultados de retração autógena ($10^{-6}/\ln(t)$).

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	60,0	37,7	42,6
		51,4	37,0	37,2
	SPz	102,2	71,0	74,1
		97,8	74,61	76,9
	Pz	85,3	87,1	81,1
		98,0	102,5	91,8
	Cim	115,0	111,1	108,3
		114,3	114,9	99,5

A partir desses dados de entrada foram realizados os testes de hipóteses com auxílio da análise de variância, obtendo os resultados apresentados na Tabelas D.4 do Apêndice D. Observou-se que as adições e aditivos utilizados interferem significativamente na retração autógena, bem como a combinação desses materiais, com ênfase para as adições minerais que promoveram um aumento expressivo, enquanto os aditivos plastificante e superplastificante que reduziram o efeito sobre a retração autógena. A combinação adição-aditivo embora estatisticamente significativa na retração autógena foi balizada pela ação das adições minerais, que se mostraram preponderantes sobre esta propriedade.

A interferência das adições e aditivos estudados na retração autógena confirma o já observado para a fluência básica, pois ambos possuem mecanismos semelhantes advindos da difusão de água pelos microporos da matriz cimentícia.

6.2.2. Efeito Sobre as Propriedades Elásticas e Mecânicas

Resistência à compressão

As Tabelas 6.5 a 6.8 resumem os resultados individuais de resistência à compressão por corpo de prova obtidos no programa experimental apresentados no capítulo 5 nas respectivas idades de ensaio de 1, 3, 7 e 28 dias, já no formato matricial para a análise de variância em cada uma delas. A análise foi separada por idade de ensaio, pois já é consenso na literatura técnica, assim como é para a fluência, de que esse fator de controle é significativo na resistência à compressão, como também nas demais propriedades mecânicas avaliadas nesta pesquisa.

Tabela 6.5: Resultados de resistência à compressão (MPa) - t=1 dia.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	12,34	6,62	6,65
		12,66	6,14	6,95
		11,84	6,21	6,76
	SPz	7,72	6,60	10,33
		7,70	9,20	9,99
		8,13	9,56	10,24
	Pz	5,64	6,28	5,59
		5,30	5,73	7,03
		5,34	6,13	5,68
	Cim	4,03	2,45	1,98
		4,15	2,67	1,94
		3,63	2,24	1,97

Tabela 6.6: Resultados de resistência à compressão (MPa) - t=3 dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	20,74	22,9	20,25
		22,60	22,94	17,49
		19,55	22,34	21,79
	SPz	17,86	23,45	20,98
		19,54	23,40	20,14
		19,78	23,98	19,38
	Pz	20,63	24,20	23,42
		19,24	24,13	21,33
		18,88	23,79	21,55
	Cim	14,85	11,97	14,95
		15,46	11,81	14,46
		15,00	11,77	14,57

Tabela 6.7: Resultados de resistência à compressão (MPa) - t=7 dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	27,46	28,44	23,94
		27,23	27,29	22,22
		26,96	29,25	24,92
	SPz	28,85	33,50	30,43
		30,93	31,78	31,55
		31,17	28,97	30,29
	Pz	30,31	30,50	27,32
		31,70	32,01	25,77
		32,32	27,80	31,50
	Cim	24,05	25,68	27,7
		24,02	25,81	26,98
		24,96	25,97	26,15

Tabela 6.8: Resultados de resistência à compressão (MPa) - t=28dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	31,09	36,54	35,17
		33,72	33,75	34,59
		35,35	31,93	29,13
	SPz	39,8	39,55	32,62
		37,41	35,91	38,44
		39,81	40,72	38,82
	Pz	37,02	41,34	38,03
		38,09	38,26	35,83
		36,52	42,07	36,40
	Cim	37,88	41,39	37,2
		37,75	37,13	36,89
		36,83	34,28	38,6

A partir dos resultados de resistência à compressão foram realizados testes de hipóteses com auxílio da análise de variância, obtendo os resultados detalhados no Apêndice D nas Tabelas D.5 a D.8. Foi observado a partir da análise de variância que as adições minerais utilizadas interferem significativamente na resistência à compressão em todas as idades analisadas. Contudo, os aditivos plastificante e superplastificante demonstraram que produzem efeito diferenciado na resistência à compressão somente nas idades de 1 e 3 dias. Para as idades de 7 e 28 dias os aditivos apresentaram pequena representatividade na resistência à compressão, bem como quando utilizados combinados com as adições minerais. O fato da resistência à compressão ser influenciada pelos aditivos somente nas primeiras idades (1 e 3 dias) explica indiretamente em parte o motivo pelo qual o resultado de fluência básica quando adicionado esses aditivos foi significativo apenas para a idade de início de carregamento de 1 dia, quando ainda a matriz apresenta baixa rigidez em detrimento do retardo na hidratação dos aglomerantes.

Resistência à tração

As Tabelas 6.9 a 6.12 resumem os resultados de resistência à tração por compressão diametral obtidos no programa experimental apresentados no capítulo 5 nas respectivas idades de ensaio de 1, 3, 7 e 28 dias, já no formato matricial para a análise de variância em cada uma delas.

Tabela 6.9: Resultados de resistência à tração (MPa) - t=1 dia.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	1,31	1,32	0,69
		1,29	1,07	0,65
		1,51	0,91	0,77
	SPz	1,00	1,60	1,13
		0,81	1,62	1,09
		1,01	1,45	1,05
	Pz	0,98	1,10	0,90
		0,88	0,89	0,84
		0,91	0,88	0,72
	Cim	0,73	0,41	0,43
		0,80	0,44	0,39
		0,77	0,41	0,40

Tabela 6.10: Resultados de resistência à tração (MPa) - t=3 dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	1,92	2,11	2,16
		2,31	2,21	2,13
		1,86	1,87	2,21
	SPz	1,73	2,34	1,96
		1,55	2,29	2,2
		1,73	1,65	2,06
	Pz	2,16	2,30	2,06
		2,00	2,27	1,93
		2,04	1,74	1,95
	Cim	1,85	1,60	1,85
		1,76	1,32	1,06
		1,81	1,43	1,81

Tabela 6.11: Resultados de resistência à tração (MPa) - t=7 dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	2,36	2,66	2,78
		2,26	3,15	2,16
		2,31	3,05	2,09
	SPz	2,67	2,47	2,71
		2,39	2,58	2,79
		2,70	2,67	2,39
	Pz	2,87	2,76	2,82
		2,55	2,53	2,64
		2,73	2,29	2,96
	Cim	2,38	3,02	2,77
		1,88	3,15	2,54
		2,13	3,15	2,00

Tabela 6.12: Resultados de resistência à tração (MPa) - t=28dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	2,41	3,23	2,71
		2,48	3,14	2,82
		2,72	2,55	2,65
	SPz	3,10	3,28	2,70
		2,95	3,33	3,02
		3,10	3,21	2,78
	Pz	2,67	3,29	3,03
		2,78	3,02	3,24
		3,22	3,04	3,10
	Cim	3,18	3,71	2,71
		3,52	3,86	3,13
		3,34	3,94	2,79

A partir dos resultados de resistência à tração foram realizados os testes de hipóteses com auxílio da análise de variância. Detalhes dessa análise estatística podem ser observados no Apêndice D - Tabelas D.9 a D.12. Os resultados desta análise indicam que as adições e aditivos utilizados em separado e conjuntamente interferem de forma significativa na resistência à tração por compressão diametral para a idades de ensaio de 1 dia. Já para as idades de 3 e 7 dias não houve um comportamento bem definido quanto ao efeito das adições e aditivos nessa propriedade, provavelmente porque essas idades configuram um estágio transitório evolutivo da resistência, que culmina na idade de 28 dias apresentando efeito significativo e superior de ambos materiais (adições e aditivos em separado e combinados) sobre a resistência à tração do concreto de referência. O aumento final da resistência à tração das dosagens com adições e aditivos na idade de 28 dias confirma a ideia de que eles ajudam a combater o problema térmico.

Módulo de elasticidade

As Tabelas 6.13 a 6.16 resumem os resultados de módulo de elasticidade obtidos no programa experimental apresentados no capítulo 5 nas respectivas idades de ensaio de 1, 3, 7 e 28 dias, já no formato matricial para a análise de variância em cada uma delas.

Tabela 6.13: Resultados de módulo de elasticidade (GPa) - t=1 dia.

Aditivo				
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	12,2	11,0	9,7
		14,1	11,0	8,9
		12,3	12,6	10,7
	SPz	9,4	12,9	10,0
		9,3	13,3	11,3
		9,8	12,7	11,6
	Pz	7,9	9,00	8,3
		7,7	9,20	7,3
		7,8	9,9	9,1
	Cim	8,9	5,5	6,3
		9,0	5,9	5,5
		9,0	6,2	5,1

Tabela 6.14: Resultados de módulo de elasticidade (GPa) - t=3 dias.

Aditivo				
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	14,0	13,6	18,0
		16,6	14,4	15,8
		13,8	14,2	17,0
	SPz	13,0	16,6	15,2
		10,2	15,8	14,6
		16,8	16,2	15,8
	Pz	15,1	15,6	12,0
		14,7	15,5	14,0
		14,7	15,0	12,7
	Cim	12,3	12,7	15,1
		11,8	12,6	14,9
		12,1	12,6	14,6

Tabela 6.15: Resultados de módulo de elasticidade (GPa) - t=7 dias.

Aditivo				
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	17,3	15,8	19,6
		16,5	16,4	17,8
		16,3	16,7	18,2
	SPz	17,8	25,9	19,4
		17,6	20,5	19,3
		17,2	23,0	19,8
	Pz	18,3	17,4	15,9
		17,0	18,7	15,8
		18,0	18,7	16,2
	Cim	14,8	14,7	17,5
		15,0	14,2	17,5
		14,3	15,5	18,6

Tabela 6.16: Resultados de módulo de elasticidade (GPa) - t=28dias.

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	26,2	23,3	19,5
		23,6	23,3	19,2
		25,9	21,6	19,0
	SPz	23,8	23,8	19,8
		24,6	23,7	21,1
		23,6	23,3	19,8
	Pz	20,2	21,9	21,0
		18,6	19,5	20,6
		19,1	21,4	21,0
	Cim	21,7	22,0	24,4
		21,4	23,8	25,5
		21,5	24,3	23,3

A partir dos resultados de ensaio de módulo de elasticidade foram realizados os testes de hipóteses com auxílio da análise de variância, obtendo os resultados que se encontram detalhados no Apêndice D, Tabelas D.13 a D.16. A análise demonstrou que as adições e aditivos utilizados interferem significativamente no módulo de elasticidade, bem como a combinação desses materiais, para as quatro idades avaliadas. Isso demonstra que o comportamento elástico também sofre influência das adições a aditivos, mesmo mantendo-se intencionalmente fixo o volume de pasta de todas as dosagens.

6.2.3. Efeito Sobre as Propriedades Térmicas

Calor específico

Encontra-se na Tabela 6.17 os resultados de calor específico já no formato matricial para a análise de variância. Esses resultados de ensaio referem-se à média das três temperaturas de realização do ensaio, na idade de 7 dias, e ao corpo de prova na condição saturada em água com superfície seca, condição esta típica adotada em cálculos térmicos.

Detalhes dos resultados da análise de variância encontram-se relatados na Tabela D.17 do Apêndice D. A partir desses resultados conclui-se que estatisticamente as adições e aditivos, utilizados nas dosagens tanto em separado quanto em conjunto, interferem no calor específico, embora o efeito em conjunto adição-aditivo na mesma dosagem tenha demonstrado maior potencialidade de interferência no calor específico do que quando utilizados esses materiais em separado.

Tabela 6.17: Resultados de calor específico (J/(kg.°C)).

Aditivo				
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	1113	1235	1229
		1116	1240	1199
	SPz	1194	1206	1156
		1175	1212	1170
	Pz	1221	1124	1250
		1208	1158	1216
	Cim	1184	1105	1178
		1229	1090	1165

Difusividade térmica

Encontra-se na Tabela 6.18 os resultados de difusividade térmica já no formato matricial para a análise de variância. Esses resultados de ensaio referem-se à média das três temperaturas de realização do ensaio na idade de 7 dias.

Tabela 6.18: Resultados de difusividade térmica (m²/dia).

Aditivo				
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	0,076	0,073	0,073
		0,076	0,074	0,075
	SPz	0,072	0,069	0,066
		0,074	0,069	0,066
	Pz	0,063	0,066	0,071
		0,063	0,067	0,072
	Cim	0,065	0,066	0,066
		0,067	0,065	0,065

A partir dos valores de difusividade foram realizados os testes de hipóteses com auxílio da análise de variância, cujos resultados estão discriminado na Tabela D.18 do Apêndice D. Pode-se verificar que as adições minerais utilizadas interferem significativamente na difusividade térmica, bem como a combinação desses materiais com os aditivos estudados. Já os aditivos utilizados em separado nas dosagens não demonstraram influência sobre a difusividade.

Coefficiente de dilatação térmica

Encontra-se na Tabela 6.19 os resultados de coeficiente de dilatação térmica já no formato matricial para a análise de variância. Esses resultados de ensaio referem-se à média de quatro

leituras realizadas em câmaras com temperaturas ambiente distintas na idade de aproximadamente 90 dias.

Tabela 6.19: Resultados de coeficiente de dilatação térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

		Aditivo		
		Ref	PI	SPI
Adição	Ref	8,86	8,03	7,85
		7,48	7,55	7,75
	SPz	9,71	9,27	8,90
		9,20	9,34	9,07
	Pz	8,65	9,23	8,89
		8,15	8,65	9,02
	Cim	8,02	10,02	9,16
		7,22	10,33	9,12

A partir dos resultados de ensaio foram realizados os testes de hipóteses com auxílio da análise de variância, obtendo os resultados apresentados na Tabelas D.19 do Apêndice. Observou-se que as adições e aditivos utilizados interferem significativamente no coeficiente de dilatação térmica, bem como a combinação desses materiais. Todos os resultados das dosagens com adição-aditivo combinados foram superiores em média em relação à referência.

6.3. AGRUPAMENTO DOS RESULTADOS DE FLUÊNCIA ESTATISTICAMENTE SEMELHANTES

A análise em *grupos homogêneos* consiste em verificar quais dosagens utilizadas no programa experimental promovem resultados de fluência estatisticamente semelhantes, uma vez que, como comprovado no item anterior, a fluência é afetada quando há a inserção de aditivos e adições minerais no concreto. O agrupamento das dosagens por resultados semelhantes de fluência contribuirá para que em futuros estudos de dosagem se tenha *a priori* a flexibilidade de se utilizar diferentes tipos de adições e aditivos a partir de fluências equivalentes.

O estudo dos grupos homogêneos pode ser realizado de diversas formas. O adotado nesta tese foi o método da *comparação múltipla das médias*, apresentado com maiores detalhes em Nanni e Ribeiro (1991) e Montgomery e Runger (2009). Esse método consiste, em termos gerais, na comparação dos resultados médios de ensaio com um intervalo de dados, conhecido por limite de decisão (ΔD). Este limite é calculado a partir da estimativa do desvio padrão das médias do conjunto universo de resultados em um mesmo grupo. Para tanto, é necessário o

valor da média quadrática dos resíduos (MQR), obtida nas tabelas de análise de variância, apresentadas no Apêndice D, e ainda do número de repetições (n) consideradas, ou seja, o número de CP's por ensaio, conforme apresentado na expressão 6.1. Caso a diferença das médias entre dois resultados de fluência for inferior ao ΔD pode-se considerar que essas duas médias possivelmente fazem parte do mesmo grupo, caso contrário, os fatores controláveis (adições e aditivos) promovem efeitos diferenciados na fluência.

$$\Delta D = \sqrt{MQR/n} \quad (6.1)$$

Como o foco principal desta pesquisa é analisar o efeito das adições e aditivos na fluência, a análise dos grupos homogêneos para as outras propriedades (retração autógena, propriedades mecânicas e elásticas, e propriedades térmicas) não foi abordada nesta tese.

6.3.1. Efeito das Adições Mineraias

A verificação dos grupos homogêneos a partir das dosagens com adições mineraias avaliou não somente os efeitos semelhantes das adições sobre a fluência, mas também os resultados semelhantes de fluência quando há a inserção dos aditivos estudados nas dosagens.

Concreto sem aditivo

O valor obtido para o limite de decisão ΔD e a comparação com as médias dos resultados de fluência para as dosagens com somente adições mineraias (sem aditivos) encontram-se detalhadas na Tabela D.20 do Apêndice D. Os resultados na forma de gráficos, já apresentando os possíveis agrupamentos, encontram-se ilustrados na Figura 6.1 para as idades de início de carregamento (t_0) de 1, 3 e 7 dias. Para a separação nos gráficos dos grupos de dosagem com resultados de fluência semelhantes foram traçadas linhas pontilhadas verticais. Vale destacar que em alguns gráficos ocorreu a situação de uma mesma dosagem fazer parte em mais de um grupo homogêneo. Nessa condição optou-se por unir esses grupos, considerando que todos eles fazem parte de um só grupo de dosagens com fluências semelhantes.

Percebe-se pelos gráficos que somente a dosagem com escória de alto forno (Cim) na idade de início de carregamento de 1 dia (Figura 6.1.a) e a dosagens com adições mineraias na idade de 7 dias (Figura 6.1.c) possuem resultados estatisticamente distintos de fluência das demais dosagens nas suas respectivas idades. Conclui-se, portanto, que na idade de início de

carregamento de 1 dia as dosagens com metacaulim (SPz) e argila calcinada comum (Pz) geram resultados semelhantes de fluência em relação à dosagem sem adição (Ref) e inferiores a dosagem com escória.

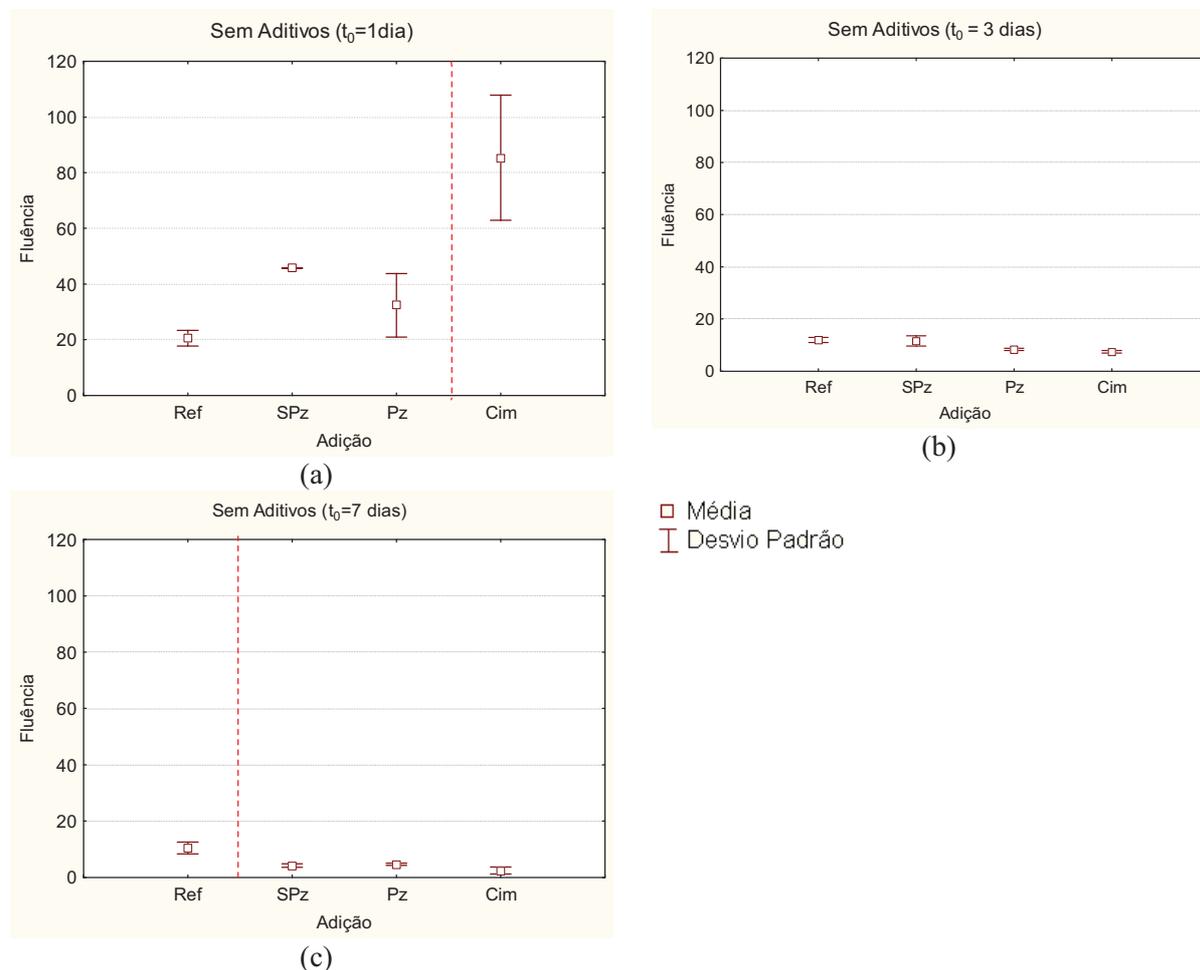


Figura 6.1: Resultados de fluência básica das dosagens *com adição mineral e sem aditivos* estatisticamente semelhantes, para a idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias.

Pode-se ainda afirmar a partir da Figura 6.1.c que independente da adição mineral utilizada elas promovem efeito semelhante sobre a fluência e inferior em relação à dosagem de referência para a idade de início de carregamento de 7 dias.

Concreto com aditivo plastificante

Detalhes das análises múltiplas das médias referentes às dosagens com aditivo plastificante associada com adições minerais para a avaliação dos grupos semelhantes encontram-se na Tabela D.21 do Apêndice D. Os gráficos da Figura 6.2 resumem os resultados obtidos dessas análises. Em termos gerais observa-se que ao adicionar o aditivo plastificante nas dosagens

com adições minerais os resultados e agrupamento não são mais os mesmos em relação às dosagens sem aditivo plastificante. Isso comprova, como já verificado na análise *ANOVA*, que o efeito combinado adição-aditivo é tão significativo na fluência quanto a análise isolada, porém eles não atuam por simples superposição de efeitos. O aumento da trabalhabilidade promovido pelo aditivo plastificante utilizado traz consigo uma melhora na dispersão dos compostos cimentícios além poder retardar as reações de hidratação nas primeiras idades, contribuindo assim para o aumento da fluência quando combinado com adições minerais, principalmente na idade de início de carregamento de 1 dia.

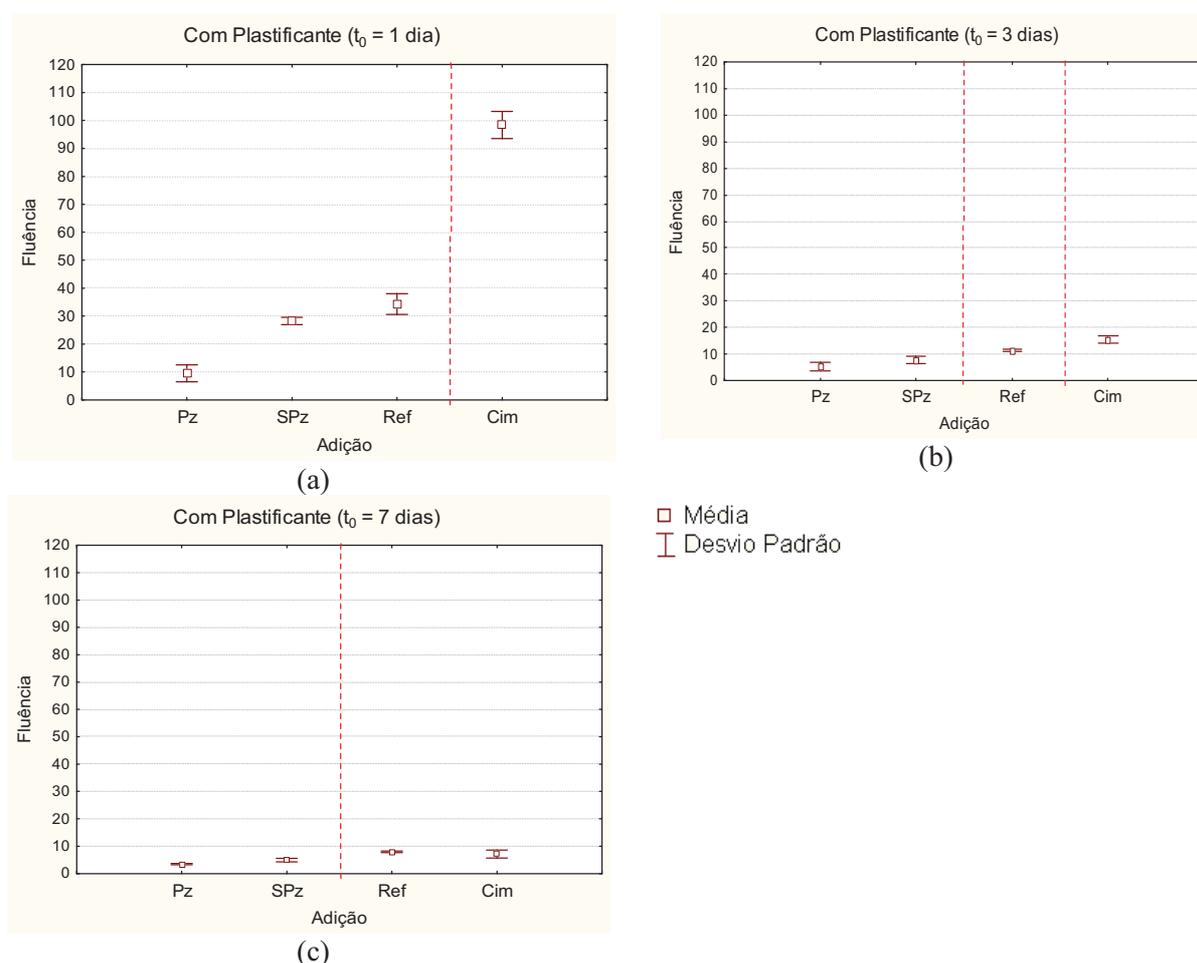


Figura 6.2: Resultados de fluência básica das dosagens *com adição mineral e aditivo plastificante* estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias.

Pela Figura 6.2.a percebe-se que as dosagens com adições de metacaulim e argila calcinada continuam apresentando resultados de fluência similares em relação à dosagem de referência na idade de início de carregamento de 1 dia, apesar das dosagens apontarem diferenças nos resultados absolutos dos ensaios.

Concreto com aditivo superplastificante

Detalhes das análises múltiplas das médias referente às dosagens com aditivo superplastificante associadas com as adições minerais para a avaliação dos grupos homogêneos encontram-se na Tabela D.22 do Apêndice D. Os gráficos da Figura 6.3 resumem os resultados obtidos dessas análises com a separação dos grupos por linhas verticais pontilhadas. Similar ao ocorrido quando adicionado o aditivo plastificante, o uso de superplastificante nas dosagens com adições minerais alteraram o efeito sobre a fluência, por motivos similares abordados anteriormente.

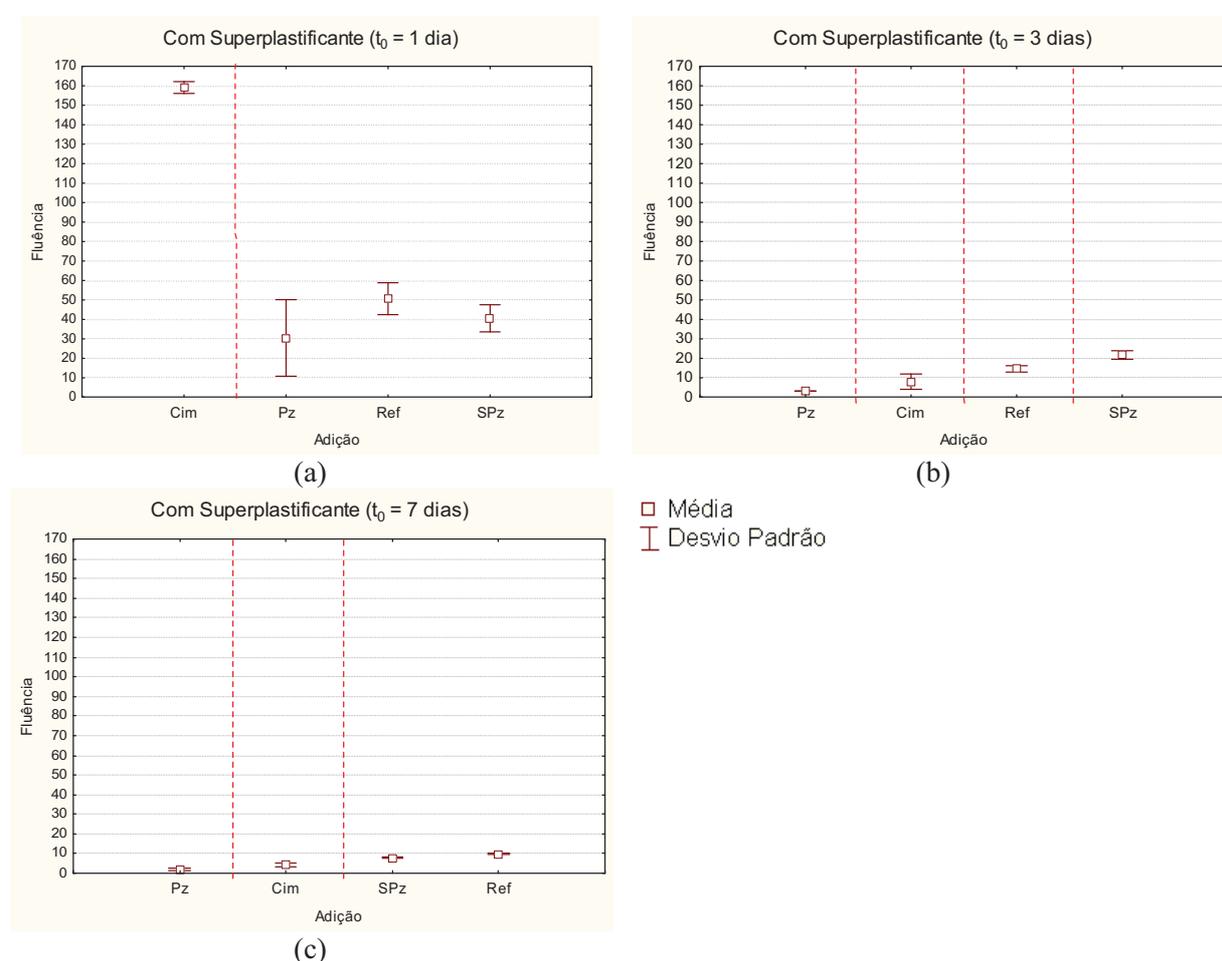


Figura 6.3: Resultados de fluência básica das dosagens *com adição mineral e aditivo superplastificante* estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias.

O uso de superplastificante contribuiu para que todas as dosagens com adições minerais gerassem efeito distinto sobre a fluência na idade de início de carregamento de 3 dias (Figura

6.3.b), o que não ocorreu quando utilizadas as adições sem aditivos (Figura 6.1.b). Situação similar foi observada na idade de início de carregamento de 7 dias (Figura 6.3.c), onde as três adições minerais geraram fluências diferentes entre si.

6.3.2. Efeito dos Aditivos Plastificantes

Serão apresentados a seguir a verificação dos grupos homogêneos (dosagens com resultados semelhantes de fluência) tomando como referência o tipo de aditivo (plastificante e superplastificante), distintamente por idade de início de carregamento: 1, 3 e 7 dias, e ainda associado com as adições minerais.

Concreto sem adição

Os gráficos da Figura 6.4 ilustram os resultados dos grupos homogêneos de fluência nas idades de início de carregamento (t_0) de 1, 3 e 7 dias para as dosagens com aditivos plastificantes e superplastificantes, sem adição mineral. Detalhes dos resultados podem ser observados na Tabela D.23, apresentada no Apêndice D.

Nota-se pelo gráfico da Figura 6.4.a que os aditivos promoveram efeito significativo na fluência apenas na idade de início de carregamento de 1 dia, como já constatado na análise de variância. Entretanto, a diferença de resultado de fluência nesta idade para a dosagem de referência em relação à dosagem com plastificante é inferior ao limite de decisão ΔD , levando-se a concluir que o efeito provocado pelo aditivo plastificante na idade de 1 dia pode ser semelhante ao do concreto de referência.

Já para as outras idades de início de carregamento de 3 e 7 dias (Figuras 6.4.b e 6.4.c) os resultados de fluência das dosagens com aditivos são estatisticamente semelhantes à dosagem de referência. Isso implica em dizer que os aditivos quando utilizados em separado das adições minerais não promovem efeito diferenciador da fluência em relação ao concreto de referência para as idades de início de carregamento de 3 e 7 dias.

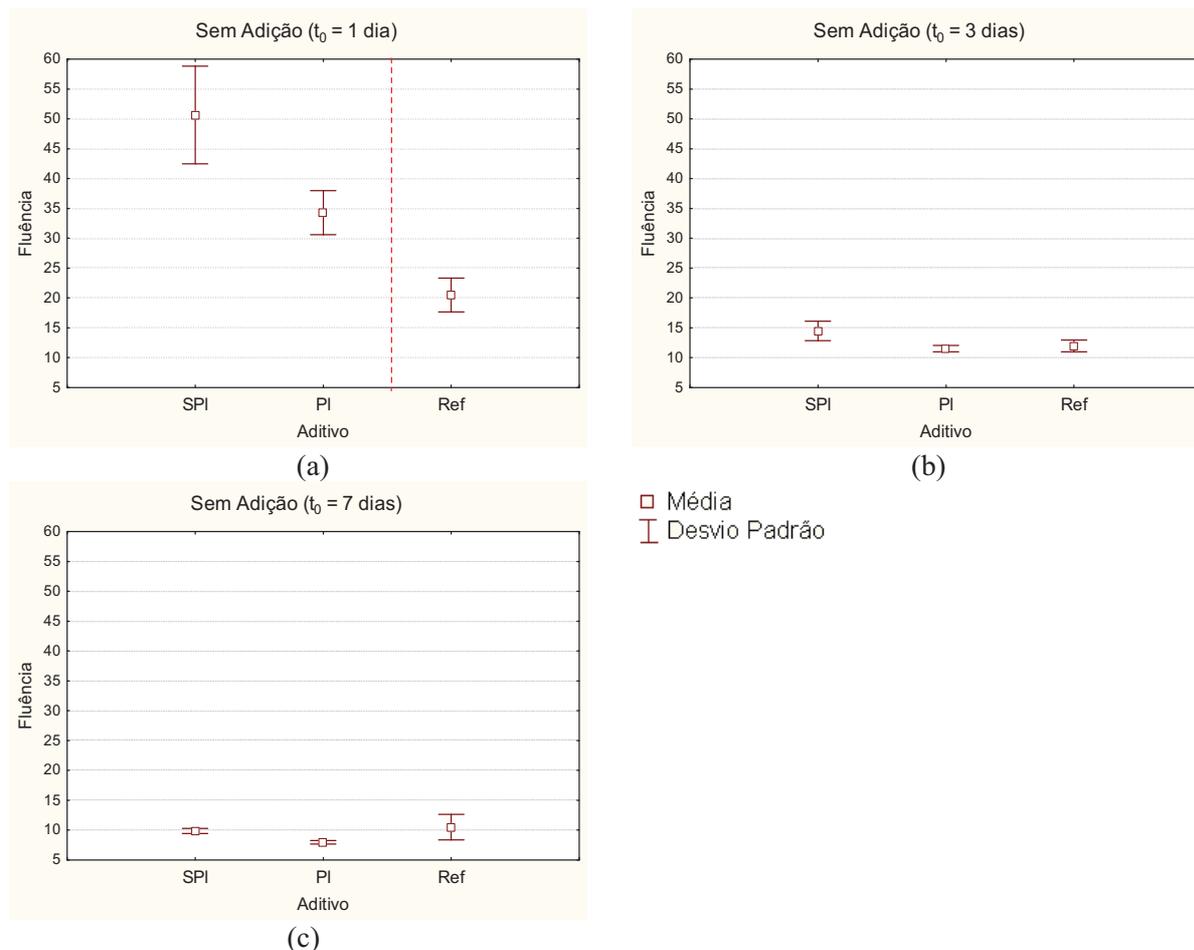


Figura 6.4: Resultados de fluência básica das dosagens *com aditivos plastificante e sem adição mineral* estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias.

Concreto com superpozolana

Os gráficos da Figura 6.5 ilustram os resultados dos grupos homogêneos de fluência nas idades de início de carregamento (t_0) de 1, 3 e 7 dias para as dosagens com aditivos (plastificante e superplastificante) em conjunto com a adição de metacaulim. Detalhes dos resultados podem ser observados na Tabela D.24, apresentada no Apêndice D.

O fenômeno que se destaca ao adicionar metacaulim é o fato dos resultados de fluência agora se mostrarem estatisticamente distintos para as dosagens com aditivos plastificante e superplastificante em todas as idades de início de carregamento. Pode-se assim afirmar que o efeito combinado metacaulim-aditivo é mais significativo na fluência do que quando utilizado somente aditivo na dosagem. Uma possível explicação para este fato se deve ao potencial modificador da matriz cimentícia que o metacaulim reconhecidamente possui, cujo efeito passa a ser mais acentuado quando utilizado um aditivo plastificante ou superplastificante.

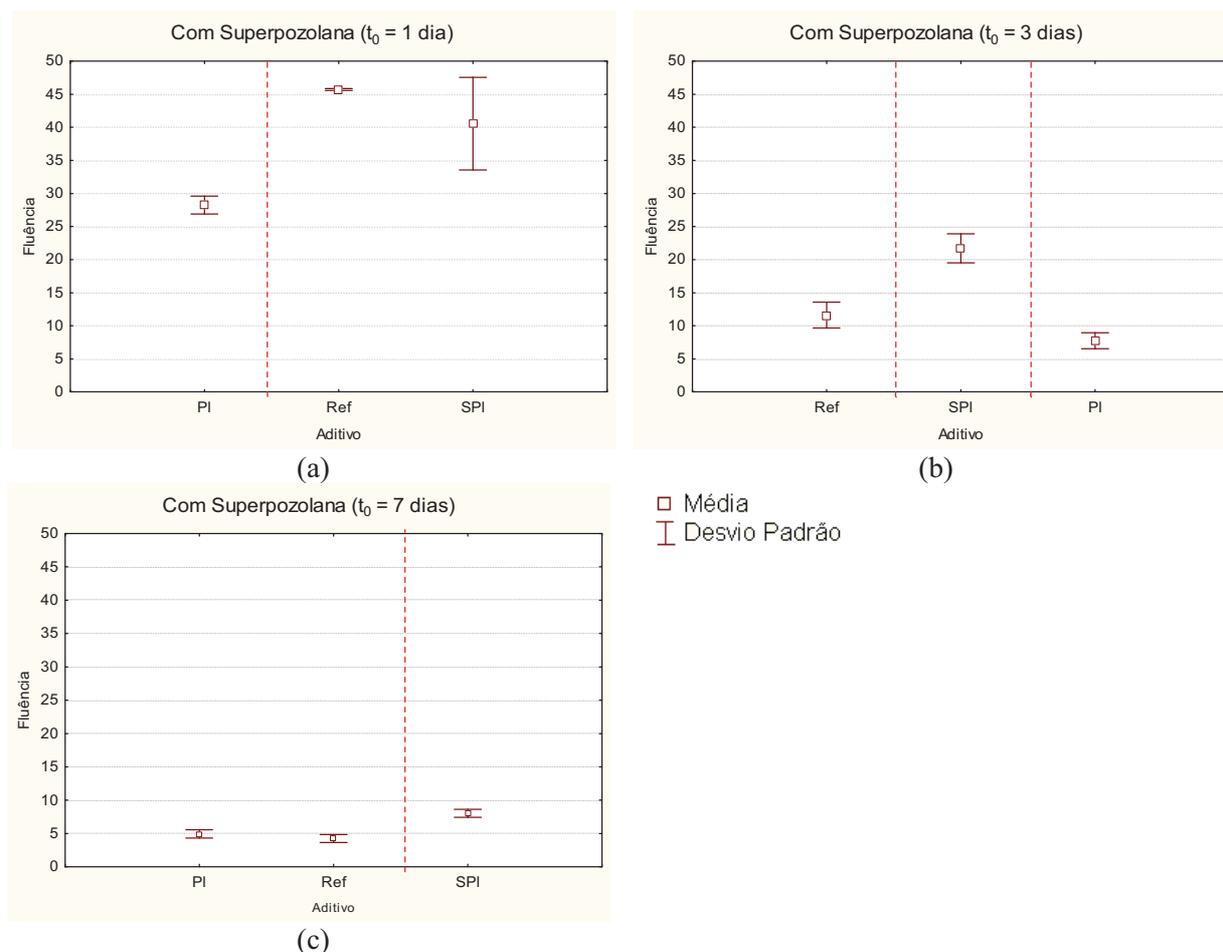


Figura 6.5: Resultados de fluência básica das dosagens *com aditivos plastificantes e adição de superpozzolana* estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias.

Concreto com pozzolana

Os gráficos da Figura 6.6 ilustram os resultados dos grupos homogêneos de fluência nas idades de início de carregamento (t_0) de 1, 3 e 7 dias para as dosagens com aditivos (plastificante e superplastificante) em conjunto com a adição de argila calcinada (pozzolana comum). Detalhes dos resultados podem ser observados na Tabela D.25, apresentada no Apêndice D.

Como observado na Figura 6.6 em todas as idades de início de carregamento as dosagens com aditivos, quando misturadas à adição de pozzolana, apresentaram resultados estatisticamente semelhantes, mesmo apresentado razoável dispersão de resultados individuais de ensaios. Em termos práticos isso equivale a dizer que independente do aditivo utilizado o efeito sobre a fluência em uma dosagem com pozzolana provavelmente será similar, devendo-se assim optar

pele aditivo que tiver melhores atributos baseados em outros parâmetros (custo, possíveis alterações em outras propriedades do concreto, etc).

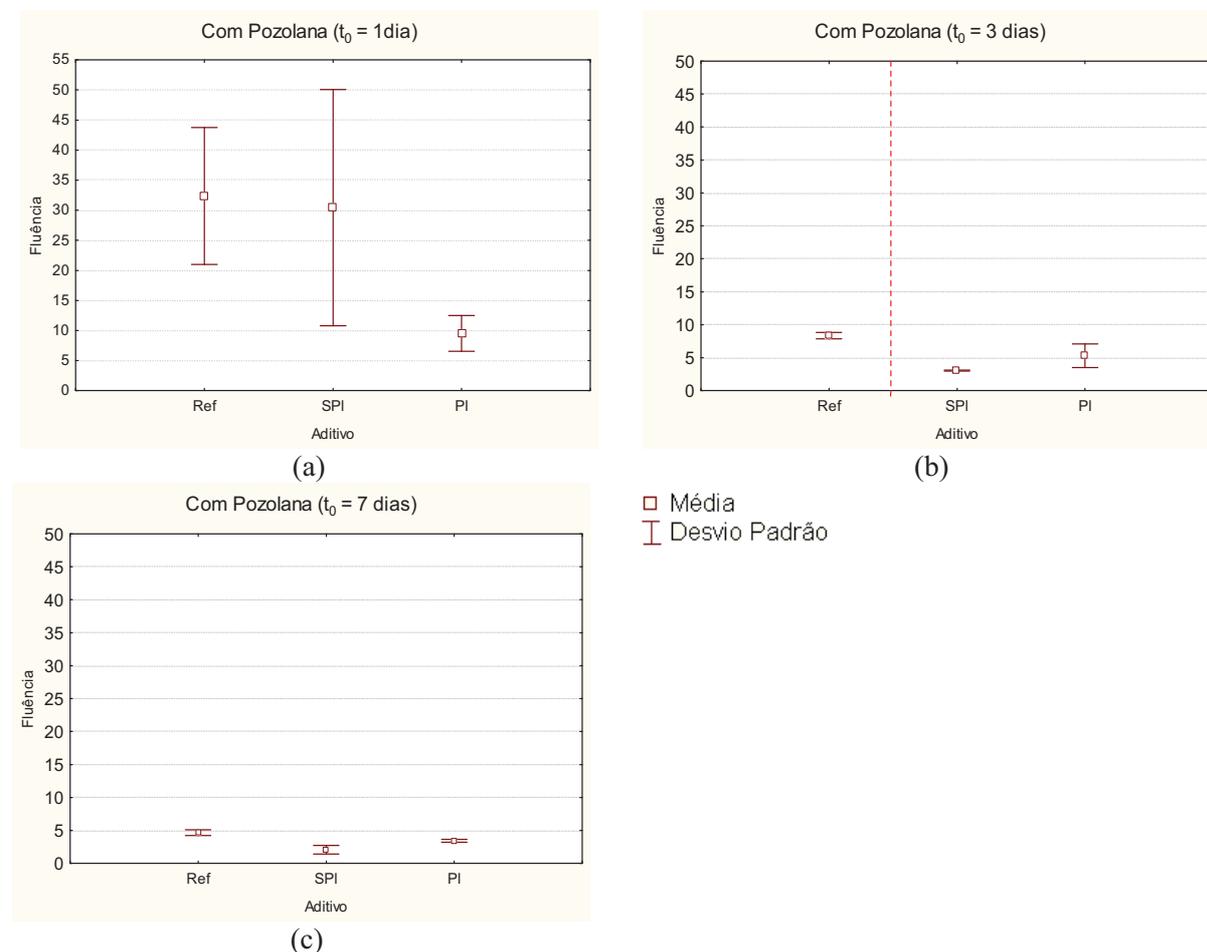


Figura 6.6: Resultados de fluência básica das dosagens *com aditivos plastificantes e adição de pozolana* estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias.

Concreto com adição cimentícia

Os gráficos da Figura 6.7 ilustram os resultados dos grupos homogêneos de fluência nas idades de início de carregamento (t_0) de 1, 3 e 7 dias para as dosagens com aditivos (plastificante e superplastificante) em conjunto com a escória de alto forno (adição cimentícia). Detalhes dos resultados encontram-se discriminados na Tabela D.26, apresentada no Apêndice D.

A partir dos gráficos da Figura 6.7 percebe-se que a escória de alto forno ao ser misturada com os aditivos estudados apresenta comportamento de fluência diferenciado com a idade de início de carregamento. Na idade de 1 dia a dosagem com escória e superplastificante

apresentou comportamento de fluência superior em relação as demais dosagens (Figura 6.7.a). Já nas idades de ensaio de 3 e 7 dias o plastificante ao ser adicionado juntamente com a escória promoveu comportamento de fluência superior a dosagem com superplastificante misturado com escória (Figura 6.7.b e 6.7.c). Em termos práticos pode-se estimar que se a estrutura for solicitada por carregamento nas primeiras horas (por exemplo, quando utilizado forma deslizante) o uso do superplastificante em uma dosagem com escória poderá provocar deformações superiores a dosagem sem esse aditivo ou utilizando aditivo plastificante de base *lignossulfonato*.

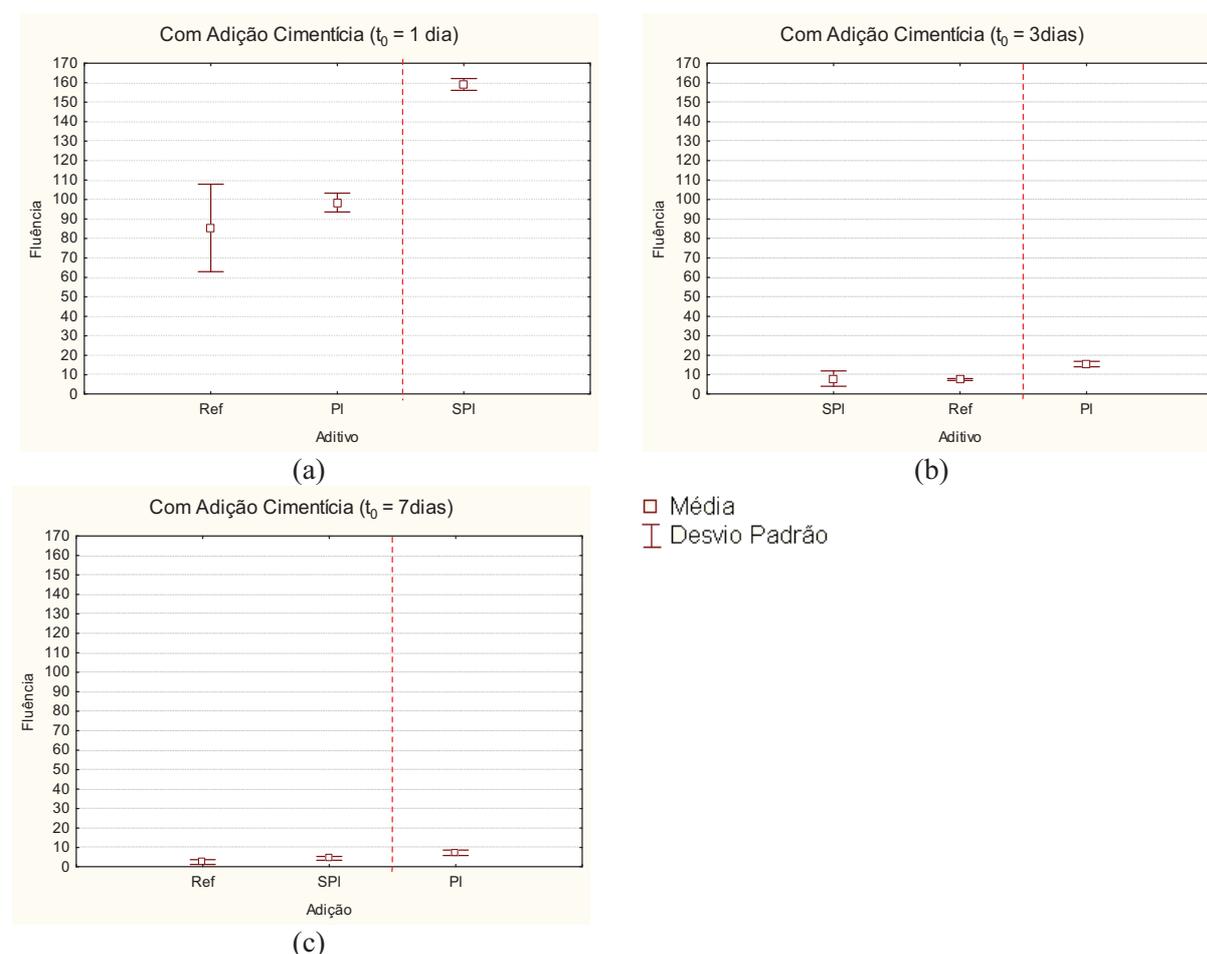


Figura 6.7: Resultados de fluência básica das dosagens *com aditivos plastificantes e adição cimentícia* estatisticamente semelhantes para idade de início de carregamento de: (a) 1 dia, (b) 3 dias e (c) 7 dias.

6.4. COMPARAÇÃO COM MODELOS DE PREDIÇÃO

Pretende-se aqui avaliar alguns dos modelos para predição da fluência mais reconhecidos internacionalmente e ainda um modelo proposto por Botassi *et al.* (2007) comparando-os com parte dos resultados obtidos no programa experimental. Pretende-se com essas comparações verificar o nível de precisão oferecido pelos modelos em relação aos resultados apresentados no programa experimental, bem como propor possíveis ajustes aos modelos em função do efeito direto promovido pelas adições e aditivos na fluência, comprovado nesta tese.

Foram escolhidos cinco modelos de predição da fluência conforme resumo apresentado no Quadro 6.1. Detalhes sobre esses modelos, com exceção do primeiro listado no quadro, deve-se reportar à dissertação de Botassi (2004). O modelo de Botassi *et al.* (2007), apesar da sua grande simplicidade, fornece resultados de fluência básica tomando como base principalmente concretos massa produzidos com insumos de origem brasileira e sob a condução das normas técnicas nacionais. Ele é bastante útil quando se deseja estimar a fluência para projetos básicos, sem necessitar de ensaios ou estudos mais elaborados. Outra grande vantagem deste modelo refere-se a formatação dos resultados de fluência no padrão logarítmico, inicialmente proposto pelo *Bureau of Reclamation* (1956), e reconhecidamente um dos modelos mais empregados na predição de fluência em concreto massa. Por outro lado, os modelos do Comitê *Euro-Internacional du Béton* - CEB - e da Associação Brasileira de normas Técnicas - ABNT - são mais elaborados, preocupando-se com o efeito da secagem e da maturidade do concreto, sendo, portanto, mais ampla a aplicação, porém mais complexo o uso dos modelos e interpretação dos resultados. O modelo do *American Concrete Institute* - ACI - destaca-se pela razoável simplicidade, quando comparado aos dois anteriores, e pela maior quantidade de dados de entrada associadas às características da dosagem do concreto. O modelo da Potência Tripla de Bažant - B3, também contempla grande quantidade de dados de entrada associado com a dosagem, mas permite ao usuário a liberdade de ajustar o modelo com resultados de ensaios. Este ainda é caracterizado por apresentar uma modelagem matemática mais apurada, baseada na Teoria da Solidificação, o que o torna o modelo mais sofisticado.

Quadro 6.1: Modelos de predição da fluência escolhidos.

Modelo de Predição	Variáveis		Descrição
	Dependente	Independentes	
Botassi <i>et al.</i> (2007)	Taxa de Crescimento da Fluência Específica (somente a básica) - F_j	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Dosagem</u>: Volume de pasta e Consumo de água; • <u>Propriedade do concreto</u>: resistência à compressão e módulo de elasticidade na idade de início do ensaio (t_0). 	Este modelo, baseado no banco de dados de Furnas Centrais elétricas, toma como referência resultado de ensaios em concretos brasileiros com os métodos reconhecidos pela ABNT. Retorna somente a fluência básica.
American Concrete Institute: ACI - 209 (ACI, 1978)	Coefficiente de Fluência (total ou básica) - φ	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Dosagem</u>: Abatimento, Relação areia/agregado total, Ar incorporado; • <u>Efeitos Extenos</u>: Umidade relativa e Geometria da estrutura; • <u>Tempo</u>: Idade de início de carregamento (t_0) e Tempo sob carga (t). 	Este modelo é recomendado para idades de início de aplicação de carga maior que 7 dias. É o modelo mais fácil de se manipular em relação aos apresentados neste trabalho. Foi considerado no modelo a umidade relativa ambiente igual a 100% para simular de maneira aproximada o efeito da fluência básica.
Comitê Euro-Internacional du Béton: CEB-FIP Model Code (CEB, 1991)	Coefficiente de Fluência (total ou básica) - φ	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Dosagem</u>: Tipo de cimento; • <u>Propriedade do concreto</u>: resistência à compressão aos 28 dias; • <u>Efeitos Extenos</u>: Umidade relativa, Histórico de temperatura Ambiente e Geometria da estrutura; • <u>Tempo</u>: Idade de início de carregamento equivalente e Tempo sob carga (t). 	Neste modelo considerada a correção da idade de início de carregamento em função do histórico de temperatura que o concreto ficou sujeito (efeito maturidade). Foi realizada adaptação no modelo, similar às realizadas para o modelo do ACI, para desconsiderar o efeito da fluência por secagem, uma vez que se subentende que o mesmo não ocorreu nos ensaios de fluência.
NBR 6118 (ABNT, 2003)	Coefficiente de Fluência (total ou básica) - φ	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Dosagem</u>: Abatimento e Tipo de cimento; • <u>Propriedade do concreto</u>: resistência à compressão na idade de aplicação da carga e última; • <u>Efeitos Extenos</u>: Umidade relativa, Histórico de temperatura Ambiente e Geometria da estrutura; • <u>Tempo</u>: Idade de início de carregamento e Tempo sob carga fictícios. 	Neste modelo faz-se a correção da idade de início de carregamento e do tempo final em função do histórico de temperatura que o concreto ficou sujeito. Foi realizada adaptação no modelo, similar às realizadas para os modelos do ACI e CEB, para desconsiderar o efeito da fluência por secagem, e ainda para obtenção das resistências à compressão por meio de uma curva ajustada aos resultados disponíveis de ensaio.
Lei do Poder Triplo de Bažant - B3 (BAŽANT e BAWEJA, 1995)	Função de Fluência ⁴⁵ (básica) – $J(t-t_0)$	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Dosagem</u>: Relação a/c, Relação agregados miúdo e graúdo, Consumo e Tipo de cimento; • <u>Propriedade do concreto</u>: resistência à compressão aos 28 dias; • <u>Tempo</u>: Idade de início de Carregamento (t_0) e Tempo sob carga (t). 	Modelo mais complexo de se manipular. Não está em função da umidade, logo, subentende-se que a fluência medida seja a básica. A base teórica fundamental deste modelo é a Teoria da Solidificação, sendo incluído fenômenos não-lineares e desvios do princípio da superposição. O autor sugere que as constantes sejam ajustadas em função de dados de ensaios para cada situação analisada.

⁴⁵ Função que associa a fluência específica com a idade de envelhecimento do concreto. Para que o modelo B3 seja comparável com o de Botassi foi obtida por meio da função $J(t-t_0)$ a taxa de fluência F_j .

A comparação entre modelos de predição é dificultada pela diversidade com que se pode representar a fluência. Alguns modelos, como os apresentados pelo ACI, CEB e ABNT, descrevem a fluência por meio do coeficiente de fluência⁴⁶ (φ); já outros, como os propostos por Botassi e Bazant, remetem-se a fluência específica⁴⁷, apesar do modelo de Botassi já pré-definir o comportamento temporal logarítmico⁴⁸, pois assim consegue-se entender a fluência também ao longo do tempo e não estática como a maioria dos modelos consideram. Em função desta peculiar dificuldade a forma comparativa adotada nesta tese para avaliar os modelos preditivos será baseada na diferença relativa dos resultados preditivos comparado com os resultados de ensaio na forma percentual. Entretanto, serão apresentados também os resultados absolutos nas unidades equivalentes a cada forma de representação da fluência adotada pelos modelos, pois assim permite-se compará-los em outras situações para pesquisas futuras.

Em função do grande número de dosagens, considerando as suas respectivas combinações de misturas e idades de início de carregamento, que totalizaram 36 resultados de fluência avaliados, foram tomadas para a comparação com os modelos as dosagens que apresentaram os mais expressivos resultados de fluência, conforme discriminação a seguir:

Idade de início de carregamento de 1 dia:

- Dosagem de referência sem adição e aditivo (Ref);
- Dosagem com adição que apresentou maior fluência (Cim);
- Dosagem com aditivo que apresentou maior fluência (SPI);
- Combinação adição-aditivo que apresentou maior fluência (Cim+SPI);

Idade de início de carregamento de 7 dias:

- Dosagem de referência sem adição e aditivo (Ref);
- Dosagem com adição que apresentou uma das menores fluências (SPz);
- Dosagem com aditivo que apresentou menor fluência (PI);
- Combinação adição-aditivo das dosagens anteriores (SPz+PI);

⁴⁶ Equivale à relação entre a deformação por fluência após certo período de tempo t , normalmente correspondente ao final do ensaio, e a deformação inicial no instante t_0 .

⁴⁷ Forma de representação da fluência dividindo a deformação diferida pela tensão que a gerou.

⁴⁸ Representado pela taxa de fluência F_j (ver item 5.5.2).

Os resultados de fluência obtidos pelos modelos comparados com os obtidos nos ensaios para as dosagens adotadas encontram-se descritos nas Tabelas 6.20 e 6.21, as quais foram separadas por idade de início de carregamento de 1 dia e 7 dias, respectivamente.

Tabela 6.20: Resultados dos modelos preditivos comparados com ensaios de fluência – *Idade de início de carregamento de 1 dia.*

Dosagem	Taxa de Crescimento da Fluência - F_j ($10^{-6}/\text{MPa}/\ln(t-t_0)$)			Coeficiente de Fluência - ϕ			
	Ensaio	Botassi	Modelo B3	Ensaio	ACI	CEB	ABNT
Ref	20,51	20,44	21,67	0,661	0,852	1,100	1,247
Cim	85,40	34,82	21,31	2,171	0,790	1,331	1,341
SPI	50,65	27,55	21,71	1,655	0,915	1,107	1,272
Cim+SPI	159,11	52,54	21,3	2,446	1,006	1,209	1,408

Tabela 6.21: Resultados dos modelos preditivos comparados com ensaios de fluência – *Idade de início de carregamento de 7 dias.*

Dosagem	Taxa de Crescimento da Fluência - F_j ($10^{-6}/\text{MPa}/\ln(t-t_0)$)			Coeficiente de Fluência - ϕ			
	Ensaio	Botassi	Modelo B3	Ensaio	ACI	CEB	ABNT
Ref	10,49	14,04	14,7	0,506	0,667	0,751	0,848
SPz	4,25	13,27	14,37	0,247	0,688	0,695	0,777
PI	7,95	13,73	14,66	0,499	0,726	0,743	0,758
SPz+PI	4,97	11,56	14,38	0,307	0,728	0,697	0,71

Em termos gerais observou-se na maioria dos resultados apresentados nas Tabelas 6.20 e 6.21, sem maiores tratamentos, que os modelos de predição de fluência se aproximaram mais dos resultados de ensaio para a dosagem de referência (sem adição e aditivo), com exceção dos modelos da ABNT e CEB na idade de 1 dia. Tal fato já era esperado, pois na maioria desses modelos não há parâmetros que se relacionam diretamente com as adições e aditivos, tendendo assim a se aproximarem mais dos resultados de ensaios provenientes de dosagens sem esses materiais. Alguns modelos consideram de maneira indireta o efeito dos aditivos plastificantes por meio do *slump* (NBR 6118 e ACI 209) e o efeito das adições minerais na alteração da idade de início de carregamento e na idade da fluência a partir do tipo aglomerante – com endurecimento rápido, médio ou lento – como observado nos modelos da NBR 6118 e CEB, uma vez que alguns tipos de adição cimentícia podem retardar o processo de hidratação, como observado na tese. Outras formas indiretas de considerar o efeito das adições e aditivos nos modelos foram observadas, como a partir da resistência à compressão e

alteração do traço do concreto, mas conforme já discutido no capítulo 3, não sendo as formas mais apropriadas, pois podem atuar de maneira independente da fluência, ou seja, a alteração da resistência e da dosagem não reflete necessariamente na mudança da fluência.

Para facilitar a comparação dos resultados dos modelos em relação aos ensaios de fluência, tomados como referência, foram elaboradas as Tabelas 6.22 e 6.23, e seus correspondentes gráficos nas Figuras 6.8 e 6.9, que demonstram a diferença percentual dos resultados de fluência obtidos pelos modelos em relação aos provenientes dos ensaios. Quanto maior for o percentual positivo ou negativo, mais distante o modelo preditivo estará do resultado de ensaio, para mais ou para menos, respectivamente; Ou por outro lado: quanto mais próximo o percentual estiver de 0%, mais próximo o modelo preditivo estará do valor de ensaio.

Tabela 6.22: Variação dos resultados dos modelos em relação aos resultados de ensaio na idade de início de carregamento de 1 dia.

Dosagem	Modelos de predição em relação aos ensaios				
	Botassi	Modelo B3	ACI	CEB	NBR
Ref	-0,3%	6%	29%	66%	89%
Cim	-59%	-75%	-64%	-39%	-38%
SPI	-46%	-57%	-45%	-33%	-23%
Cim+SPI	-67%	-87%	-59%	-51%	-42%

Tabela 6.23: Variação dos resultados dos modelos em relação aos resultados de ensaio na idade de início de carregamento de 7 dias.

Dosagem	Modelos de predição em relação aos ensaios				
	Botassi	Modelo B3	ACI	CEB	NBR
Ref	34%	40%	32%	48%	68%
SPz	212%	238%	179%	182%	215%
PI	73%	84%	45%	49%	52%
SPz+PI	132,6%	189%	137%	127%	131%

Um aspecto relevante notado nos modelos para a idade de início de carregamento de 1 dia (Tabela 6.22 e Figura 6.8) é o fato de todos os seus prognósticos de fluência apresentarem valores inferiores aos resultados reais de ensaio, exceto a dosagem de referência. Isso indica que os resultados apresentados pelos modelos poderiam ser incrementados em aproximadamente 52%, tomando a média desses percentuais, para tentar compensar os efeitos das adições e aditivos em idades recentes de carregamento.

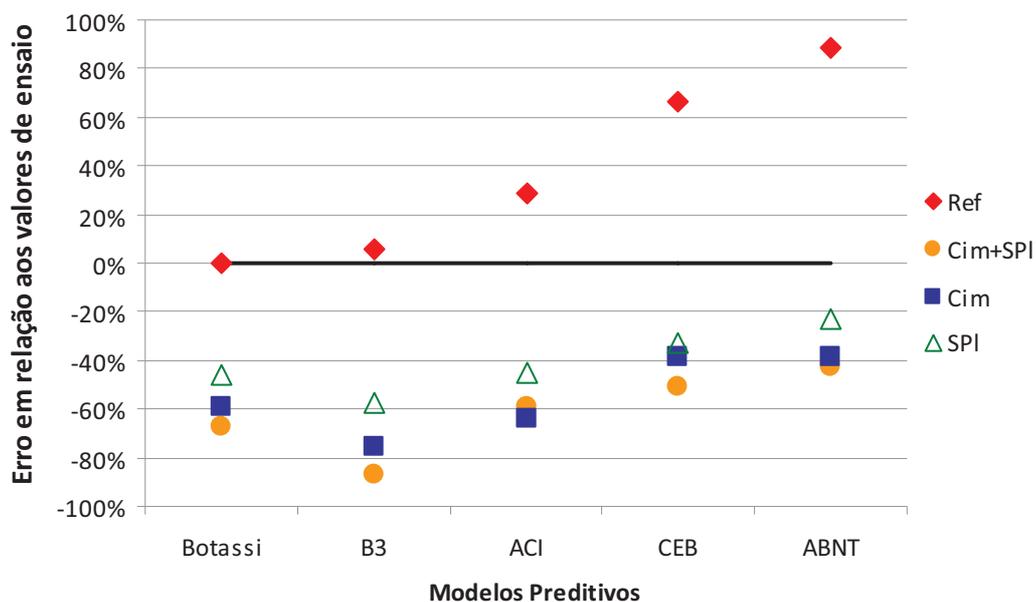


Figura 6.8: Variação dos resultados dos modelos em relação aos resultados de ensaio na idade de início de carregamento de 1 dia.

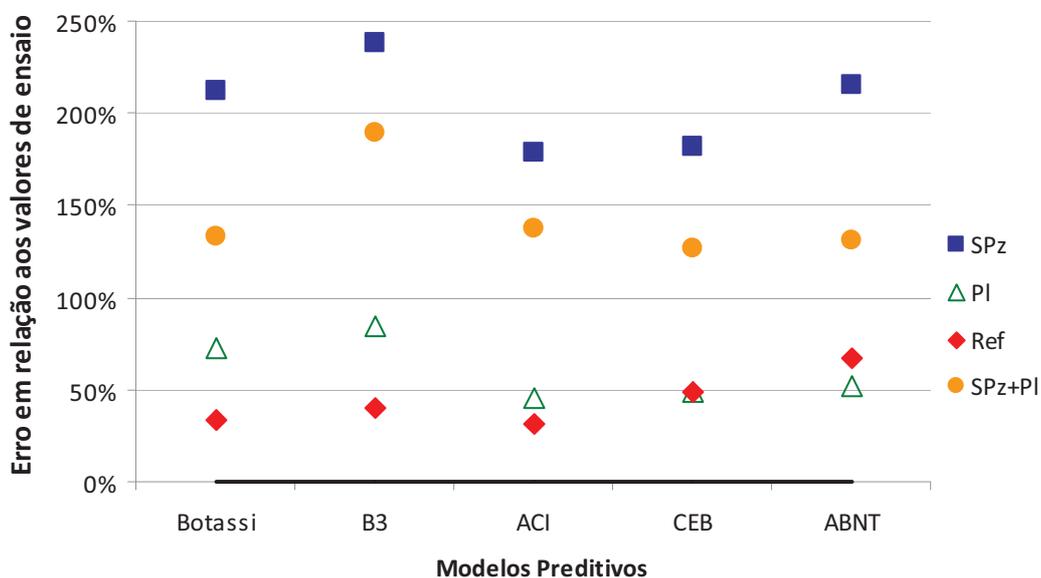


Figura 6.9: Variação dos resultados dos modelos em relação aos resultados de ensaio na idade de início de carregamento de 7 dias.

Já para os resultados apresentados pelos modelos de predição na idade de início de carregamento de 7 dias apresentaram valores superestimados (Tabela 6.23 e Figura 6.9), inclusive o referente à dosagem sem adição e aditivo (Ref), embora este em menor proporção.

Nessa situação os modelos poderiam ser corrigidos reduzindo seus valores a fim de ajustá-los aos valores de laboratório. Os modelos preditivos para a dosagem com metacaulim (SPz) na idade de início de carregamento de 7 dias (Figura 6.9) superestimaram com maior intensidade a fluência, em torno de 200% superior aos valores de ensaio. Sendo assim, o uso de modelos de predição para estimativas da fluência básica em dosagens com adições que reduzem o efeito da fluência, como é o caso constatado para o metacaulim, possivelmente tendem a superestimar em grande proporção a deformação real proveniente de carregamento constante. Em casos práticos de aplicação dos modelos este fato poderia induzir a um prognóstico de fluência superdimensionado e, conseqüentemente, distante de um projeto otimizado.

Por outro lado, percebe-se nas Figuras 6.8 e 6.9 que os resultados provenientes dos modelos para as dosagens com os aditivos estudados nesta pesquisa, em ambas as idades de início de carregamento avaliadas, apresentaram melhor predição do que com as dosagens de adição mineral. É possível então inferir que a predição de fluência a partir de dosagens com menor alteração no traço, como por exemplo, quando utilizado somente aditivos para aumento da trabalhabilidade, possa apresentar resultados mais próximos dos valores reais obtidos em ensaio.

Por fim, observou-se que as predições da fluência nas dosagens com adição mineral em conjunto com aditivos (Cim+SPl e SPz+Pl) estimaram resultados mais próximos das dosagens com somente adição mineral (Cim e SPz, respectivamente), demonstrando que os modelos preditivos são mais influenciados pelo comportamento da adição mineral do que do aditivo plastificante ou superplastificante.

6.5. APLICAÇÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIOS À SITUAÇÃO DE CAMPO

O objetivo deste item é avaliar os efeitos de algumas adições e aditivos, a partir das dosagens caracterizadas nesta tese, sobre o comportamento térmico ao longo do tempo em uma estrutura típica de barragem iniciado durante a concretagem. Essa interferência é esperada, pois a inserção desses materiais nas dosagens promoveu, como observado no capítulo 5, inevitáveis mudanças em várias propriedades do concreto, com destaque para a fluência, foco principal desta pesquisa. O software utilizado nas simulações, ainda no formato de protótipo, mas já utilizado em várias pesquisas e casos práticos, foi o desenvolvido a partir das

dissertações de Silva (2002) e Botassi (2004), cuja denominação é resumida pela sigla PFEM-2DAT⁴⁹. Ele permite realizar simulações de concretagem de grandes estruturas em camadas, analisando o comportamento do campo de temperatura ao longo do tempo, como também de deformação e tensão, considerando a viscoelasticidade do concreto para que ao final possa-se verificar o risco do aparecimento de fissuras de origem térmica.

Foram selecionadas para este estudo de caso 3 dosagens do programa experimental: a de referência, a que apresentou maior resultado de fluência (dosagem com adição de escória de alto-forno em conjunto com superplastificante) e outra dosagem com um dos menores resultados de fluência (adição de pozolana e plastificante), pois assim se verificará o quanto a fluência, em conjunto com outras propriedades intervenientes no problema térmico, pode influenciar na formação de fissuras de origem térmica por meio da inserção das adições e aditivos. O problema térmico em concreto massa se resume no fenômeno do fluxo de calor na estrutura gerado preponderantemente pelo calor de hidratação dos aglomerantes que ao se resfriar, após exaurido parcialmente o poder exotérmico dos compostos cimentícios, tende a se contrair e ocasionar tensões de tração decorrentes de restrições deformacionais internas e externas ao maciço que poderão ultrapassar sua resistência e, assim, surgir as fissuras.

A estrutura de concreto escolhida para as simulações é compatível com a dosagem estipulada no programa experimental desta tese. Foi analisado um dos muros da calha do vertedouro de uma barragem, como por exemplo, a apresentada na Figura 6.10. Esta estrutura em concreto armado possui como função principal a delimitação do fluxo da água vertente à jusante do vertedouro e ainda resistir a grandes cargas hidráulicas estáticas e dinâmicas intermitentes ao longo de sua vida útil da estrutura decorrentes do acionamento sazonal do vertedouro. Apesar de o concreto nesse caso necessitar de armadura ele ainda pode estar exposto ao problema térmico devido ao seu grande consumo de cimento, em relação ao concreto massa, e ainda devido ao seu expressivo volume. O fenômeno térmico poderá interferir em seu desempenho, pois as fissuras facilitarão a degradação acelerada das armaduras por corrosão além de apresentar risco de tornar a estrutura menos rígida e estruturalmente fragilizada.

⁴⁹ *Program Finite Element Method 2 Dimensional* – Análise Termomecânica Bidimensional. Maiores detalhes sobre esse programa pode ser obtido na dissertação de Botassi (2004).



Figura 6.10: Foto dos muros da calha do vertedouro. (a) Visão geral da calha. (b) Detalhe do muro.

A partir dos dados típicos desse muro retirado de um projeto real foram definidas as dimensões da seção transversal da estrutura, conforme Figura 6.11. É possível verificar nessa figura a malha gerada automaticamente pelo software PFEM-2DAT. A malha é composta por 521 elementos finitos triangulares com 3 nós cada, totalizando 298 nós capazes de retornar o campo de temperaturas com o tempo. Percebe-se nesta figura que foi considerada na simulação a fundação em rocha, como ocorre em campo para que assim possa-se ter uma representação na análise mais condizente com a realidade referente à interação térmica e mecânica superestrutura/fundação.

A caracterização completa das dosagens a serem utilizadas nas simulações já foi apresentada no capítulo 5 e, portanto, não será exposta neste item. As propriedades da rocha, que serve como fundação nas simulações, foram estimadas a partir de dados obtidos no livro da Equipe de Furnas (1997) e resumidos na Tabela 6.24. O tipo litológico escolhido para a caracterização da rocha é o mesmo proveniente dos agregados para a confecção dos concretos estudados nesta tese, pois é comum em grandes obras de infraestrutura o aproveitamento desses materiais na própria composição do concreto.

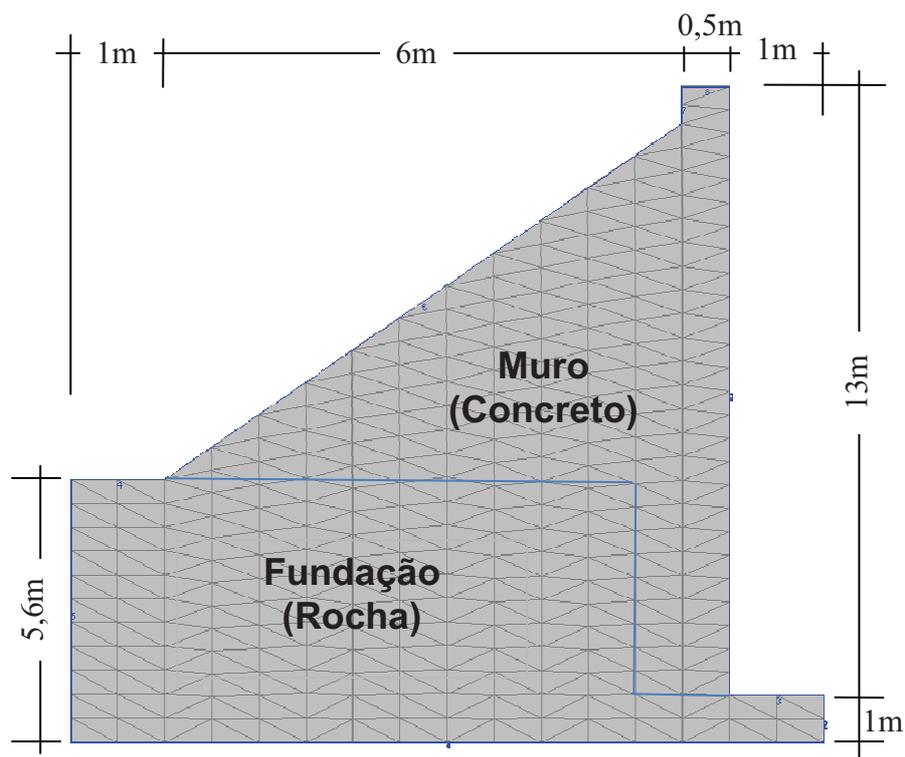


Figura 6.11: Dimensões e malha de elementos finitos da seção do muro.

Tabela 6.24: Caracterização estimada das propriedades da rocha utilizada na fundação.

Propriedades	Descrição	Valor
Física	Densidade (kg/m^3)	2630
	Módulo de Elasticidade (GPa)	45,0
Mecânicas	Coef. de Poisson	0,21
	Coef. de Dilatação ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	11,5
Térmicas	Condutiv. Térmica ($\text{J/s.m.}^{\circ}\text{C}$)	2,0
	Calor Esp. $\text{J}/(\text{kg.}^{\circ}\text{C})$	800

As condições do entorno da estrutura foram estimadas conforme apresentado na Tabela 6.25. A temperatura ambiental foi considerada oscilando ao longo dos dias na forma de uma senoidal, atingindo seu máximo às 13:00 e o mínimo à meia noite. Este fenômeno interfere de maneira mais expressiva na região próxima à superfície de grandes estruturas e pode ser decisivo no aparecimento de fissuras térmicas superficiais. As condições de contorno para o problema tensional foram determinadas restringindo as deformações com apoio do 1º gênero no entorno da fundação em rocha, conforme apresentadas na Figura 6.12. O total de dias avaliados nas simulações foi de 200 dias com intervalos de análise de 4 horas.

Tabela 6.25: Condições de contorno do problema térmico.

Temperatura de Lançamento (°C)	25°C	
Temperatura Ambiente (°C)	Máx (13:00)	31°C
	Min (0:00)	17°C
Coef. de Convecção Térmica (W/m ² .°C)	50	
Temperatura da Fundação (°C)	24	

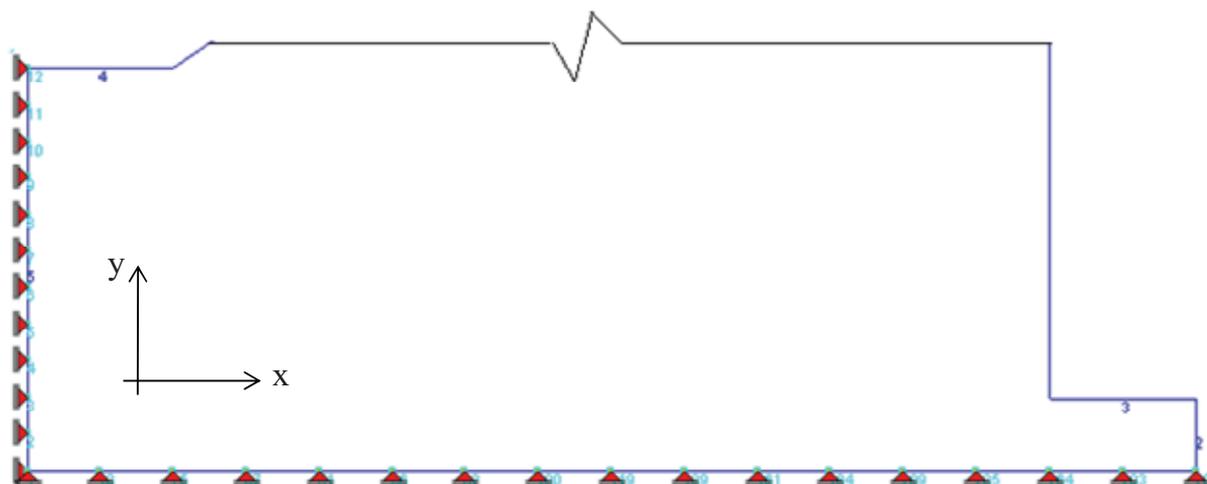


Figura 6.12: Estabelecimento dos contornos com deformações restringidas para simulação tensional.

Foram definidas 2 regiões para apresentação dos resultados de análise térmica e tensional: próximo ao centro do maciço de concreto (núcleo) e outro no mesmo nível, porém à 50cm da superfície da direita do muro, por onde haverá escoamento d'água pelo vertedouro. Nos gráficos das Figuras 6.13 e 6.14 está apresentada a evolução da temperatura com o tempo pós-concretagem para o núcleo e o ponto próximo à superfície do muro, respectivamente.

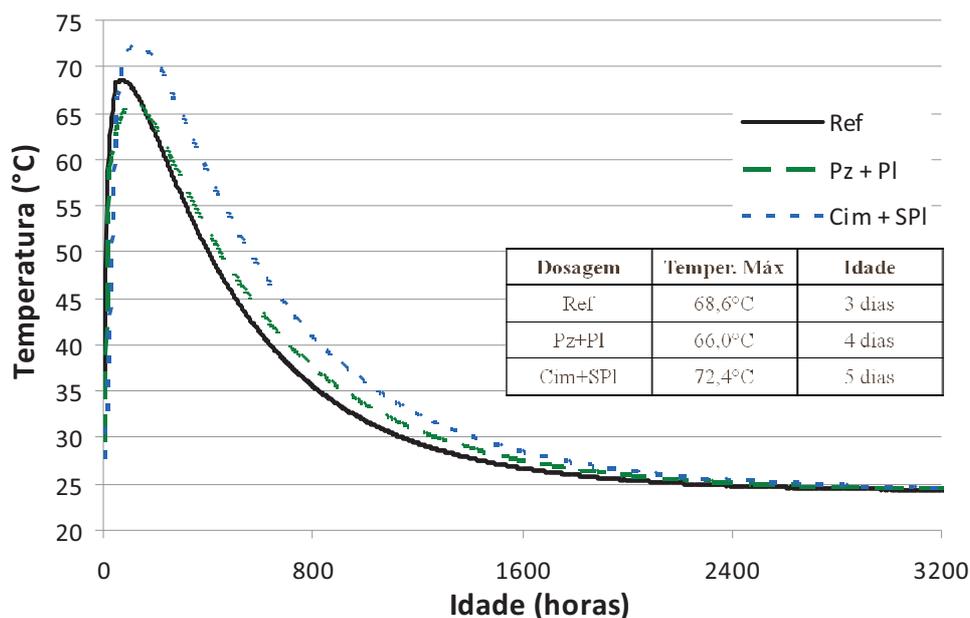


Figura 6.13: Evolução da temperatura na região central do muro.

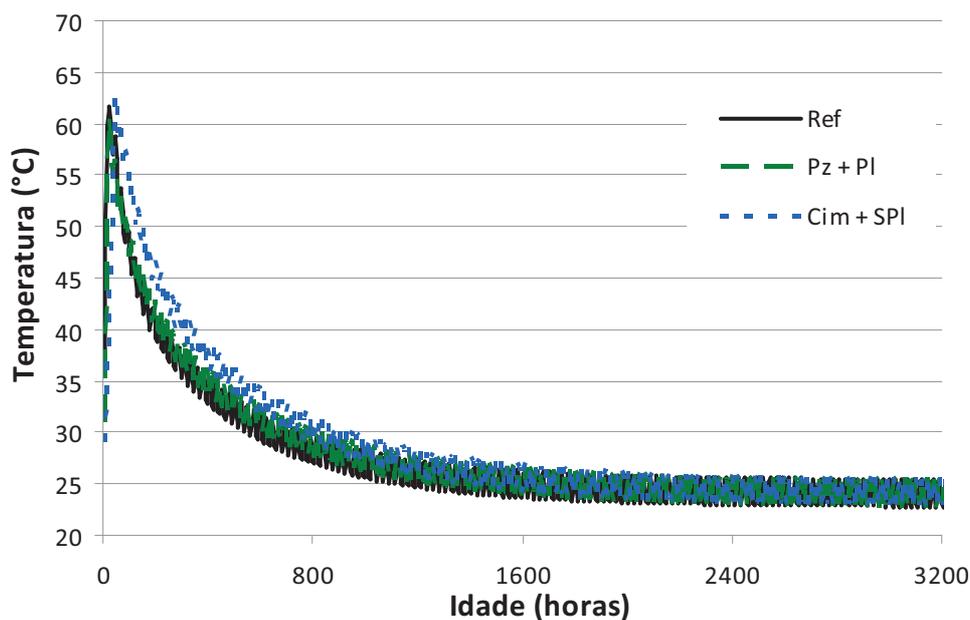


Figura 6.14: Evolução da temperatura na região próxima à superfície do muro.

Nota-se inicialmente que o efeito da oscilação da temperatura ambiente, considerada na simulação, só foi captado no gráfico de temperatura para o ponto de análise próximo à superfície. O maior valor de temperatura na estrutura foi obtido para a dosagem com escória misturada com superplastificante (Cim+SPI) após decorridos 5 dias da concretagem e igual a 72°C, enquanto que a dosagem com pozolana e plastificante (Pz+PI) alcançou a menor

temperatura máxima dentre as dosagens com 66°C na idade de 4 dias. O fato da dosagem com escória ter apresentado temperatura superior à dosagem de referência pode ser invertido na prática se reduzido o consumo de aglomerante, considerando os ganhos de resistência típicos ao se inserir adições minerais.

As temperaturas próximas a superfície da estrutura oscilaram em decorrência da variação climática do ambiente, apresentando menor pico de temperatura quando comparado com seu núcleo, mas com queda de temperatura mais brusca pós-pico, o que pode contribuir para um maior risco de fissuras de origem térmica.

Para exemplificar o efeito da temperatura na seção transversal do muro foram obtidas por meio do programa PFEM_2DAT as *isocores* (escalas de cores em conjunto com curvas que representam o gradiente de temperatura em um determinado instante). Foi escolhida a idade de 4 dias depois de finalizada a concretagem do muro por ser o instante de alcance da temperatura máxima para a dosagem de referência, obtendo os resultados apresentados na Figura 6.15. Nota-se que as isocores da dosagem com escória e superplastificante (Figura 6.15.b) representaram maior acúmulo de calor em seu maciço após decorridos 2 dias de concretagem.

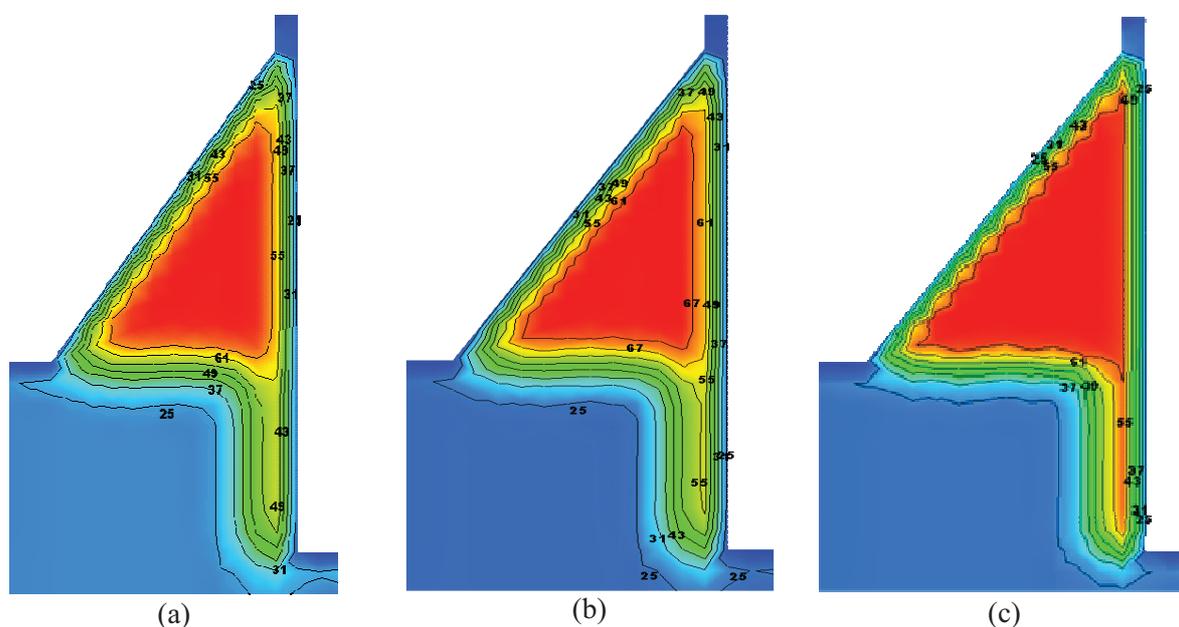


Figura 6.15: Isocores de temperatura 4 dias após finalizada a concretagem do muro. Dosagem: (a) referência, (b) com a mistura de escória de alto-forno e superplastificante, e (c) com a mistura de pozolona e plastificante.

Estão apresentados nos gráficos das Figuras 6.16 e 6.17 os resultados de tensão normal de origem térmica na direção y variando com o tempo pós-concretagem no núcleo e na região próxima à superfície do muro, respectivamente, para as dosagens analisadas. Foi adotada a tensão normal na direção y para apresentação dos resultados em função da configuração geométrica da estrutura e das condições de contorno definidas nas simulações que provocaram os maiores níveis de tensão nessa direção. Adotou-se ainda a tensão de compressão como positiva e a de tração como negativa.

O maior nível de tensão de compressão e tração foi alcançado para a dosagem com escória e superpozolana (Cim+SPl), tanto no núcleo quanto próximo à superfície da estrutura. Já a dosagem com pozolana e plastificante (Pz+Pl) apresentou menor tensão de compressão, embora maior que a referência, e aproximadamente a mesma tensão última de tração da dosagem sem adição e aditivo (Ref). É interessante notar nos resultados da Figura 6.16 que a tensão de compressão da dosagem Pz+Pl alcançou valor próximo ao obtido pela dosagem Cim+SPl, muito embora o pico de temperatura da dosagem Pz+Pl tenha sido 6°C inferior a dosagem Cim+SPl. Tal fato pode ser explicado em parte pela alta fluência da dosagem Cim+SPl (aproximadamente 16 vezes maior do que a obtida na dosagem Pz+Pl) na idade de início de carregamento de 1 dia, que reduz significativamente as tensões benéficas de compressão no problema térmico. Este fenômeno ocorrido para a dosagem com menor fluência (Pz+Pl) contribui para que as tensões posteriores de tração sejam amenizadas em função do maior acúmulo de tensão de compressão na fase de aquecimento do concreto.

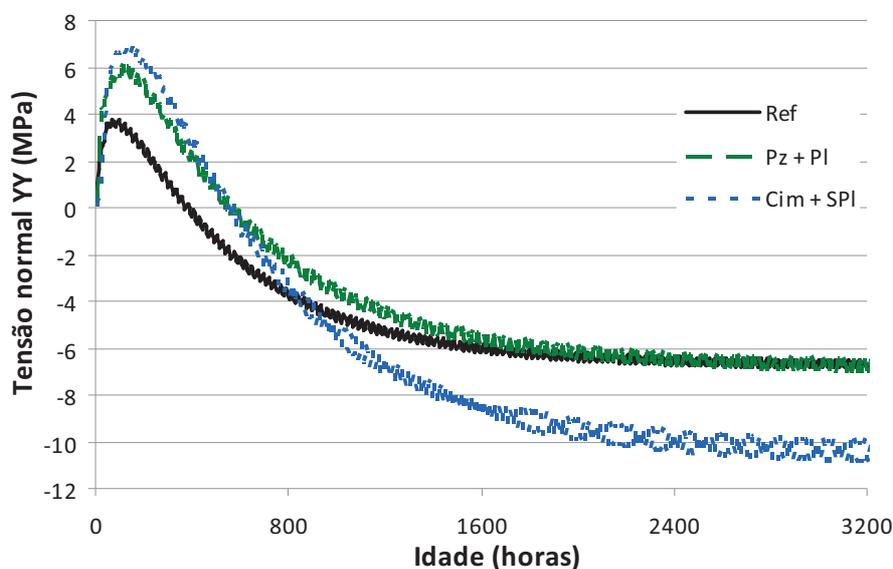


Figura 6.16: Evolução da tensão na região central do muro.

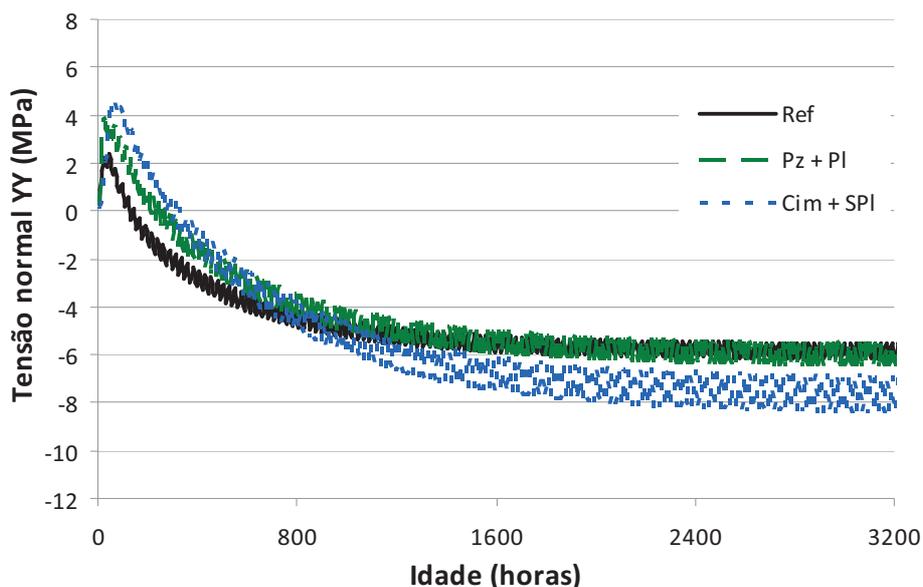


Figura 6.17: Evolução da tensão na região próxima à superfície do muro.

Para que seja possível comparar as tensões solicitantes com as suas respectivas resistências à tração das dosagens estudadas por meio de um único valor foi definido um fator de segurança FS , correspondente à relação da diferença entre a tensão solicitante σ_y e a resistente (resistência à tração na flexão $f_{ct,f}$), conforme apresentada na expressão 6.2. Foi estimada a resistência à tração na flexão com a idade para análise do risco de fissuras de origem térmica a partir dos resultados de ensaio disponíveis para a tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$), conforme correlação empírica proposta pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003).

$$FS = \frac{\sigma_y + f_{ct,f}}{f_{ct,f}} \quad (6.1)$$

Assim, obtiveram-se os fatores de segurança para cada dosagem nas duas regiões da seção transversal do muro, conforme apresentadas nas Figuras 6.18 e 6.19. Conforme convenção positiva para os valores de resistência à tração e as tensões solicitantes de compressão, e negativa para as tensões de tração, o FS no início tende a ser positivo, pois desta forma as tensões normais de compressão no maciço se somam ao efeito da resistência à tração, gerando maior segurança. Quando as tensões solicitantes começam a tracionar a estrutura, ficando σ_y com sinal negativo, tende a reduzir gradativamente o FS e com isso aumenta o risco de fissuras. Deste modo, para FS positivo ($FS > 0$) o risco de fissuras de origem térmica é menor,

e quando FS torna-se negativo ($FS < 0$) as chances de surgimento de fissuras são iminentes, tanto maiores quanto mais negativo for este fator.

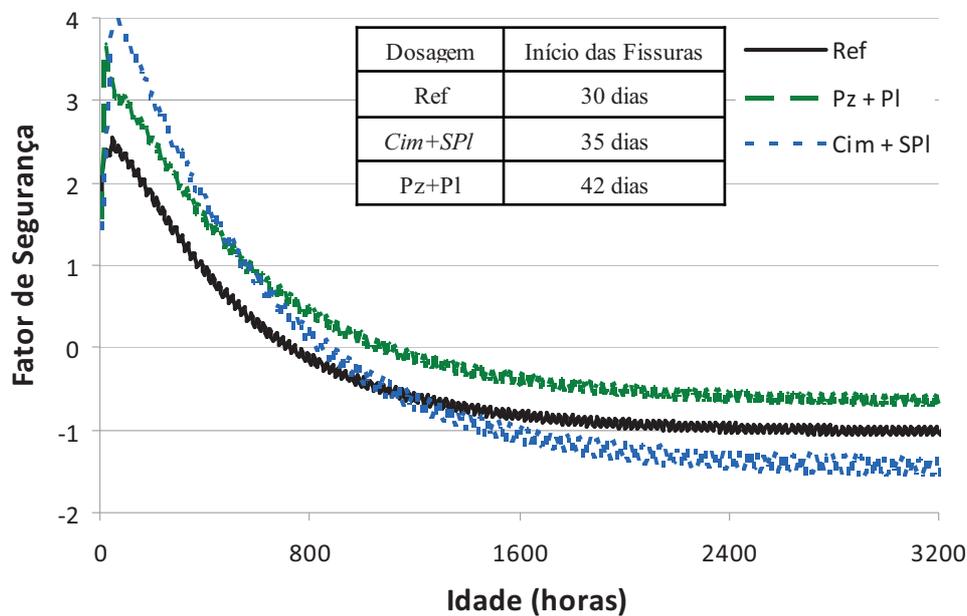


Figura 6.18: Fator de segurança na região central do muro.

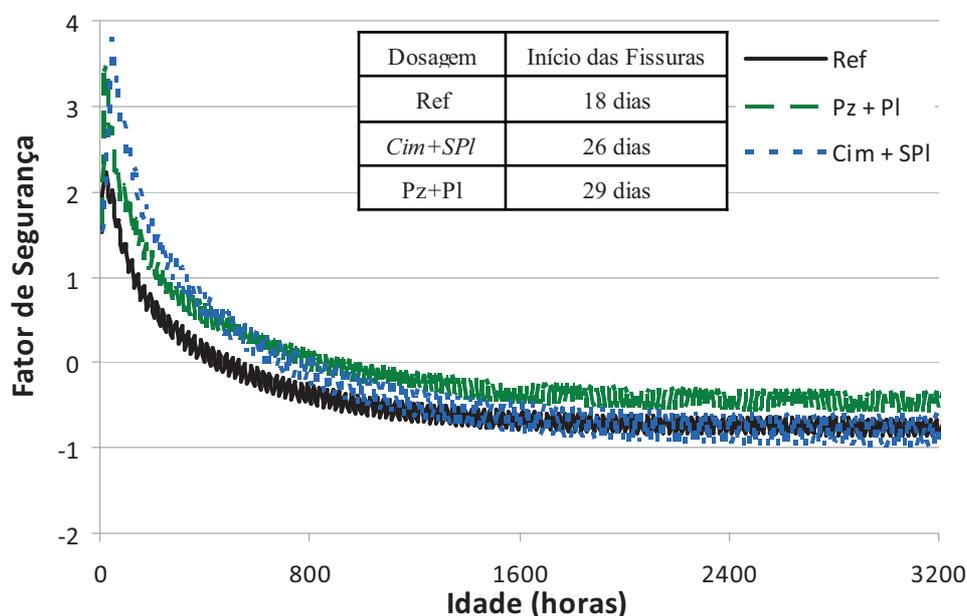


Figura 6.19: Fator de segurança na região próxima à superfície do muro.

Se comparado inicialmente o concreto de referência (Ref) nos gráficos das Figuras 6.18 e 6.19 percebe-se que o aparecimento de fissuras de origem térmica em ambas as regiões da seção

transversal podem ocorrer mais cedo, pois o fator de segurança (FS) a partir de certa idade passou a ser negativo antes das demais dosagens (Cim+SPI e PZ+PI), indicando o alto risco de aparecimento de fissuras precoce. Entretanto, próximo à superfície esse fenômeno deve ocorrer primeiro, uma vez que FS tornou-se negativo mais rapidamente do que no núcleo.

Ao analisar o gráfico da Figura 6.18 percebe-se que o efeito das dosagens, combinando aditivo e adição, reduziram o risco de fissuras de origem térmica em relação ao concreto de referência, porém ainda insuficiente para eliminar esse risco. Possivelmente se as dosagens fossem otimizadas para uma mesma resistência do concreto de referência, reduzindo os consumos de aglomerante, o risco seria ainda menor. A dosagem que apresentou mais tardio risco de fissuração de origem térmica (42 dias) foi a com pozolana e plastificante (com menor fluência). Interessante notar que apesar dessa dosagem gerar menores picos de temperatura em relação à dosagem de referência ela acumulou maior nível de tensão de compressão nas primeiras idades em função da menor fluência, contribuindo para que em idades mais avançadas o nível de tensão de tração no maciço fosse amenizado. Já a dosagem com escória e superplastificante que possui alta fluência na idade de início de carregamento de 1 dia e baixa fluência para idades de 3 e 7 dias em relação à dosagem de referência contribuiu para apresentar as maiores tensões finais de tração que culminaram com alto risco de fissuração do concreto. Efeito semelhante foi observado para a região próxima à superfície (Figura 6.19), apesar de menos acentuado.

Em síntese para as situações avaliadas nesta tese, percebeu-se a tendência que as dosagens com alta fluência nas primeiras idades de carregamento e baixas nas idades mais avançadas, como no caso da adição cimentícia com aditivo superplastificante em relação à dosagem de referência, possuem maior potencialidade de geração de tensões de tração, mesmo que em idades mais avançadas. Isto pode estar associado à redução das tensões benéficas de compressão nas primeiras idades decorrentes da alta fluência, a qual poderia amenizar as tensões de tração que surgem na fase de resfriamento do concreto massa. Já as dosagens que tendem a reduzir a fluência nas primeiras idades, como observado, por exemplo, para a adição de pozolana e plastificante, favorecem para que haja maior acúmulo de tensão de compressão na fase de aquecimento do concreto e, por conseguinte, menores níveis de tração nas idades mais avançadas, reduzindo os riscos de fissuras de origem térmica. Vale enfatizar que essas conclusões foram constatadas para a abordagem dada nesta pesquisa, mas que devem ser analisadas para cada situação em particular, pois o problema térmico em concreto massa é função de uma série de parâmetros que podem variar caso a caso.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma síntese conclusiva das principais constatações verificadas ao longo da pesquisa e que culminaram com a elaboração da tese. Esta síntese é concatenada em tópicos para facilitar a compreensão, uma vez que o volume de informações gerados na pesquisa é alto e requer tal organização. As conclusões tiveram como foco associar os objetivos descritos no capítulo 1 com os resultados principais obtidos, fechando assim o ciclo da pesquisa. Procurou-se também responder às hipóteses levantadas a fim de se deixar claro a contribuição desta pesquisa para o incremento do estado da arte sobre o tema abordado. Por fim, foram apresentadas recomendações para pesquisas futuras, pois foi observado ao longo da investigação sobre o tema tópicos a serem melhores explorados em futuros estudos que nesta tese não puderam ser averiguados para que não se perdesse o foco principal no escopo central da pesquisa.

7.2. CONCLUSÃO GERAL

Percebeu-se por meio dos resultados médios de ensaios obtidos e comprovado estatisticamente de que no geral há aumento substancial da fluência básica com o uso de adições minerais e aditivos plastificantes na idade de início de carregamento de 1 dia, mesmo mantendo-se o volume de pasta, consumo de água e relação a/c na dosagem de concreto massa inalterados, além das condições ambientais fixas, com destaque para a temperatura e umidade. Dentre os principais motivos que justificam esse comportamento pode-se destacar a alta interferência desses materiais na taxa de hidratação que normalmente em idades tão recentes como a pesquisada nesta tese são inferiores ao concreto de referência (verificar item 5.4.1), permitindo assim que o esqueleto sólido da matriz cimentícia ainda em formação seja mais permissível a deformações permanentes decorrentes da fluência, tornando ainda mais substancial o comportamento viscoelástico do concreto. Há ainda que se destacar o efeito do

refinamento dos poros propagadores do fenômeno da fluência decorrente do uso de adições minerais mais finas que o cimento e ainda da melhoria na hidratação do aglomerante gerada com uso de aditivos plastificantes, que potencializaram o efeito sobre a fluência do concreto.

Para a idade de início de carregamento de 7 dias houve a inversão média do comportamento da fluência: as dosagens com adições minerais e aditivos plastificantes apresentaram fluência básica inferior ao concreto de referência (sem adição e aditivo). A redução da fluência com o uso desses materiais pode ser explicada pelo aumento médio da rigidez da matriz cimentícia observadas nos resultados de ensaio das propriedades mecânicas avaliadas, devendo se superpor aos efeitos do refinamento dos poros que normalmente tendem a aumentar a fluência. O fato das dosagens com adições minerais e aditivos plastificantes possuírem maior rigidez pode ser traduzido para o âmbito microscópico da matriz cimentícia como um maior número de contato entre as partículas hidratadas aumentando o estado de concentração de tensão e, por conseguinte, maior dificuldade em se gerar deformações permanentes decorrentes do fenômeno de fluência para um mesmo nível de tensão em relação às respectivas resistências mecânicas.

Já na idade de início de carregamento de 3 dias não houve um comportamento bem definido na fluência básica das dosagens com adições e aditivos em relação à referência: algumas se mostraram superiores e outras inferiores aos resultados da dosagem de referência. Isso pode ser justificado pelo estado transitório em que essas dosagens passam na idade de 3 dias, quando os fatores prós e contras ao fenômeno da fluência estão mais balanceados, tais como: aumento significativo da rigidez da matriz, melhor estruturação dos microporos do concreto, taxa de hidratação em pleno desenvolvimento, etc.

As conclusões gerais abordadas anteriormente possuem limitações naturais associadas aos procedimentos de ensaio, impedindo que se possa generalizar esses comportamentos a situações semelhantes fora do escopo deste projeto de pesquisa. Frente a este desafio é fundamental associar o embasamento das conclusões a uma fundamentação estatística, a qual foi realizada para propiciar maior confiabilidade aos resultados propostos nesta tese.

7.3. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

Pretendeu-se aqui detalhar melhor os resultados obtidos durante a pesquisa e ainda verificar as principais semelhanças e diferenças de comportamento encontradas na fluência básica e nas

demais propriedades quando há o uso das adições minerais e aditivos nas dosagens estudadas. Foram adotados percentuais comparativos entre os resultados de ensaios das dosagens com adições e aditivos em relação à referência para que assim possa-se ter uma idéia de ordem de grandeza dos fenômenos estudados, apesar desses valores não serem recomendados para extrapolações generalizadas, uma vez que foram adotadas várias limitações no planejamento da pesquisa para que se pudesse chegar aos resultados pretendidos.

7.3.1. O efeito das Adições Minerais na Fluência do Concreto

Por meio de análise de variância (*ANOVA*) comprovou-se que as adições minerais interferem significativamente na fluência básica nas três idades de início de carregamento de 1, 3 e 7 dias.

A dosagem com adição mineral de escória de alto-forno, na proporção de 50% em volume de cimento, foi a que apresentou maior fluência básica e estatisticamente diferenciada na idade de início de carregamento de 1 dia dentre todas as dosagens com adições e também com aditivos avaliados. A fluência básica da dosagem com escória nesta idade foi superior a dosagem de referência em mais de 300%, enquanto a dosagem com argila calcinada (pozolana comum) foi 58% maior que a dosagem de referência. O aumento tão expressivo da fluência para a adição de escória se deve principalmente ao baixo grau de hidratação do aglomerante na idade de 1 dia comprovado na análise da maturidade das dosagens realizadas no item 5.4.1 desta tese obtida a partir do ensaio de elevação adiabática de temperatura dos concretos.

Na idade de início de carregamento de 3 dias todas as adições minerais não apresentaram diferença estatística de comportamento dos resultados de fluência básica. Já na idade de 7 dias todas as dosagens com adições foram inferiores à referência em quase 200% na média, fato este comprovado por meios estatísticos. Uma possível explicação para essa redução pode estar associada às melhorias substanciais do esqueleto sólido da matriz cimentícia com adições minerais.

7.3.2. O efeito das Adições Minerais nas demais Propriedades do Concreto

As propriedades de resistência mecânica à compressão e à tração por compressão diametral apresentaram comportamentos similares ao longo das idades, porém distintos estatisticamente, para todas as adições estudadas. Na idade de 1 e 3 dias todos resultados apresentaram resistência inferior a referência, enquanto que na idade de 7 e 28 dias em todas as dosagens com adições houve o aumento de resistência em relação à referência, com exceção da escória

na idade de 7 dias ainda apresentando valor de resistência inferior à referência. Essa inversão de comportamento para a maioria das dosagens com adições, já era previsível frente aos benefícios desses materiais na melhoria das características mecânicas em idades mais avançadas se refletirem na fluência, pois é um indicativo de que a matriz cimentícia das dosagens foi melhor formada com o uso desses materiais e conseqüentemente podendo contribuir para a redução da fluência, muito embora deva-se levar em consideração outros parâmetros. A exceção de comportamento da dosagem com escória em apresentar uma maior demora na superação da resistência do concreto de referência possivelmente contribuiu para um aumento significativo de fluência desta dosagem na idade de início de carregamento de 1 dia.

O efeito sobre o módulo de elasticidade a partir das dosagens com adições, comprovado por meios estatísticos, pode ser explicado pela alteração na composição da pasta de aglomerante e não decorrente da mudança na proporção das misturas, a qual foi mantida fixa. O módulo na idade de 1 dia para as dosagens com adições apresentou resultados inferiores à referência, decorrente do retardo esperado na taxa de hidratação e ainda em função da menor massa específica das adições. Em idades intermediárias (3 e 7 dias) houve a tendência de aproximação dos resultados do módulo das dosagens com adições da dosagem de referência, porém finalizando na idade de 28 dias com valores médios inferiores à referência. *A priori* não existe uma correlação bem definida entre a fluência e o módulo de elasticidade, apesar de que ambos se complementam no comportamento deformacional do concreto e devem ser considerados nos cálculos térmicos em conjunto.

Em relação às propriedades térmicas destaca-se o comportamento das dosagens com adições no ensaio de elevação adiabática de temperatura. Com os resultados desses ensaios pode-se comprovar a influência das adições estudadas na taxa de hidratação do concreto (representada pela maturidade) e ainda explicar parcialmente o comportamento diferenciado sobre a fluência. Os resultados que mais se destacaram foi a maturidade dos concretos com adição de escória e pozolana que somente após o 7º e 14º dia, respectivamente, foram superiores à referência, enquanto que a dosagem com metacaulim já na idade de 7 dias apresentou maturidade superior à referência. Esse retardo na hidratação pode explicar o grande potencial de fluência da escória, porém para a pozolana não pode se dizer o mesmo. Esse comportamento da dosagem com pozolana está associado ao bom desempenho obtido nos resultados de ensaio de resistência mecânica, possivelmente gerando uma matriz cimentícia

mais rígida, com melhor zona de transição e, conseqüentemente, menos propensa a deformação por fluência.

Por fim, é válido ressaltar que os resultados de retração autógena das dosagens com adições minerais foram significativamente superiores à referência, enquanto que as dosagens com aditivos plastificantes obtiveram valores bem inferiores. A grande retração autógena das dosagens com adição mineral ajuda a comprovar que o efeito é também substancial da fluência básica, pois ambas propriedades estão relacionadas com o refinamento dos poros e, por conseguinte, com a migração interna de água pelos vazios (conhecido também por difusão) contribuindo assim para a alta fluência nas primeiras horas.

7.3.3. O efeito dos Aditivos na Fluência do Concreto

Por meio de análise de variância (*ANOVA*) comprovou-se que os aditivos plastificante e superplastificante interferem significativamente na fluência básica apenas na idade de início de carregamento de 1 dia. Ao se tentar verificar a distinção de efeitos provocados entre os aditivos em relação ao concreto de referência nesta idade percebeu-se que embora o superplastificante tenha se demonstrado em média 147% superior em relação à dosagem de referência, o aditivo plastificante, 67% superior à referência, não apresenta diferença estatística em relação à referência e também em relação ao superplastificante. Isso se deve à alta variabilidade de resultados individuais por CP nesta idade de início de carregamento tão recente.

Alterações mais significativas na tensão superficial das partículas em fase de hidratação aliada a melhorias na dispersão das partículas de cimento ao reagirem com água pode explicar o aumento da fluência com o uso desses aditivos, e de maneira mais substancial para o aditivo superplastificante devido ao seu efeito mais elevado no fenômeno reológico do concreto no estado fresco.

Para as idades de início de carregamento de 3 e 7 dias não foram observadas diferenças estatísticas nos resultados de fluência básica entre as dosagens com aditivos e a referência. Isso implica em dizer que os aditivos possivelmente não interferirão no comportamento deformacional da fluência básica, se utilizados de forma isolada na dosagem, no caso de solicitação de carga na estrutura em idades acima de 3 dias com base nas condições desta pesquisa.

7.3.4. O efeito dos Aditivos nas demais Propriedades do Concreto

O aditivo plastificante apresentou, para a maioria dos resultados das resistências mecânicas, valor superior a dosagem com superplastificante e ainda superior a dosagem de referência, com exceção da idade de 1 dia. Este efeito pode ajudar a explicar a tendência de maior valor médio de fluência básica para a dosagem com superplastificante em todas as idades de início de carregamento estudadas, apesar de não haver diferença estatisticamente relevante nas idades de 3 e 7 dias.

As maiores diferenças de módulo de elasticidade das dosagens com aditivos ocorreram nas idades de 3 e 7 dias. O fato da dosagem com superplastificante apresentar valor médio de módulo superior à dosagem com plastificante se deve a mudanças transitórias microestruturais na pasta de cimento, pois a proporção dos materiais nas dosagens permaneceram fixas e os valores na idade de 28 dias para ambas as dosagens foram semelhantes.

No que se refere às propriedades térmicas, destaca-se a ação dos aditivos sobre o ensaio de elevação adiabática de temperatura, pois seus efeitos foram bem distintos em relação às dosagens com adições minerais e concreto de referência. Nas primeiras 6 horas de ensaio o calor gerado pela hidratação dos compostos cimentícios com aditivos foram significativamente inferiores a de todas as outras dosagens, o que explicaria a alta fluência na idade de início de carregamento de 1 dia. Por outro lado, a partir do 7º dia a maturidade das dosagens com aditivos apresentou-se superior as demais dosagens, possivelmente decorrente do efeito benéfico dos plastificantes na melhoria da dispersão das partículas de aglomerante, conseqüentemente melhorando a reatividade entre elas. Isso contribuiu para uma redução significativa na fluência básica tornando-a ao mesmo patamar de fluência do concreto de referência, como comprovado estatisticamente no capítulo 6.

Já na retração autógena as dosagens com aditivos obtiveram comportamento peculiar em relação a todas as outras dosagens estudadas. Os aditivos provocaram redução da retração autógena ao serem adicionadas na dosagem de referência, mantido o consumo de aglomerante e água fixos. Este efeito possivelmente está associado ao excesso de água livre, antes necessária para lubrificar as partículas de aglomerante sem aditivo e que mantiveram por mais tempo os vazios saturados, inibindo altos níveis de tensão superficial nos microporos que geram grande retração autógena. Tal fato pode também ajudar a explicar os maiores níveis de fluência básica na idade de início de carregamento de 1 dia, pois essa água livre tende a

manter uma reserva de água para lubrificar os microporos e gerar maiores níveis de fluência básica, como foi constatado nos ensaios.

7.3.5. O efeito Combinado dos Aditivos e Adições na Fluência do Concreto

Verificou-se que as interações adição-aditivo dos materiais avaliados nesta tese são significativas e, portanto, interferem expressivamente nos resultados de fluência básica para as idades de início de carregamento de 1, 3 e 7 dias, muito embora os aditivos quando utilizados em separado somente se mostraram significativos na fluência na idade de 1 dia.

Essa interação se mostrou mais proeminente ao se combinar os aditivos plastificantes e superplastificantes com a escória de alto forno na idade de início de carregamento de 1 dia. Nesta situação em termos relativos a fluência básica da dosagem com escória em conjunto com superplastificante aumentou em média 86% e 211% em relação a dosagem com somente escória e com somente superplastificante, respectivamente. Por outro lado, o efeito conjunto adição-aditivo também provocou significativas reduções de fluência quando comparado com o efeito das adições e aditivos utilizados em separado. Uma das maiores reduções foi observada na dosagem de pozolana misturada com plastificante na idade de início de carregamento de 1 dia, a qual reduziu na média 70% em relação aos resultados de fluência provocados por esses mesmos materiais, porém utilizados em separado. Observou-se ainda que a interação pozolana-plastificante reduziu a fluência nas 3 idades de início de carregamento estudadas quando comparadas ao efeito provocado por essas mesmas adições em separado. Sendo assim fica nítida a grande influência da ação conjunta adição-aditivo na fluência básica.

A interação adição-aditivo também contribuiu para promover efeitos estatisticamente distintos na fluência para a idade de início de carregamento de 3 dias. Sem a utilização conjunta de adição-aditivo na mesma dosagem esses materiais em separado não conseguiram promover diferença estatística na fluência básica. Já quando atuando em conjunto, como no caso do uso do superplastificante em todas as adições minerais estudadas, o comportamento da fluência pode ser distinguido entre dosagens. Isso provavelmente se deve a melhoria conjunta mais proeminente promovida por esses materiais na matriz cimentícia.

Em uma análise global dos resultados pode-se observar que a superposição de efeitos não pode ser válida para predição do fenômeno de fluência em uma dosagem combinada (adição mineral + aditivo plastificante), somando algebricamente os resultados de fluência individuais das dosagens com adição e aditivo em separado, mantida a proporção básica do concreto

inalterada. O que se pode observar foi a tendência da fluência nas dosagens combinadas se aproximarem mais dos resultados de fluência das dosagens com adição mineral, sobrepondo o efeito dos aditivos plastificantes, principalmente na idade de início de carregamento de 1 dia. Por outro lado, isso não quer dizer que o efeito dos aditivos plastificantes na fluência é desprezível quando combinado com adições minerais, mas que ele será mais expressivo quando for iniciado o carregamento do concreto em idades mais avançadas (acima de 3 dias). Isso leva a se ponderar que os aditivos plastificantes possuem maior capacidade de influenciar na fluência antes da estrutura entrar em carregamento, possivelmente a partir da sua capacidade em alterar a microestrutura da matriz cimentícia.

7.3.6. O efeito Combinado dos Aditivos e Adições nas demais Propriedades do Concreto

De forma geral as resistências mecânicas das dosagens com adições e aditivos utilizados de forma combinada apresentaram comportamento estatisticamente diferentes em relação as dosagens com o uso desses mesmos materiais em separado, ainda que em termos de valores absolutos essas diferenças não tenham sido em média muito significativas.

A retração autógena foi influenciada pelo uso simultâneo das adições e aditivos nas dosagens avaliadas no programa experimental, conforme comprovação estatística, tendendo a se aproximar do valor de retração da dosagem com a respectiva adição mineral sozinha. Sendo assim, a inserção dos aditivos avaliados nessa pesquisa induziu a redução média da retração autógena, mas ainda mantendo valores mais próximos da retração da dosagem com somente a adição mineral.

Por fim, foi observado nos ensaios de elevação adiabática de temperatura das dosagens combinadas que houve forte mudança principalmente para as adições de escória de alto forno e pozolana com os aditivos nas primeiras 24 horas de ensaio. Ao se adicionar os aditivos nessas dosagens há um retardo mais acentuado da hidratação dos compostos cimentícios que se refletiram por conseqüência natural nas demais propriedades analisadas nesta tese, com destaque para a fluência básica já abordada. Em idades posteriores (acima dos 14 dias de ensaio) o destaque deve ser dado para as dosagens com adições de superpozolona e escória combinadas com os aditivos, os quais apresentaram significativo acréscimo da elevação adiabática de temperatura se comparados com as respectivas dosagens de adições utilizadas em separado. Esse maior acréscimo da elevação adiabática em maiores idades para as

dosagens combinadas comprova a melhora na hidratação dos compostos cimentícios quando utilizada adição e aditivo em conjunto.

7.3.7. Comparação dos Resultados de Ensaios com Modelos de Predição de Fluência

Em termos gerais observou-se que os modelos de predição de fluência para a dosagem de referência se aproximaram mais dos resultados reais de ensaio do que para as dosagens com adições minerais e aditivos químicos. Isso pode ser um forte indicio de que os modelos preditivos precisam se ajustar a esses materiais inseridos no concreto, cujo efeito é comprovadamente significativo na fluência, como foi demonstrado ao longo desta pesquisa. Para a idade de início de carregamento de 1 dia todos os modelos apresentaram prognósticos de fluência inferiores em torno de 52% em relação aos resultados reais de ensaio. Já para a idade de 7 dias os modelos apresentaram valores superestimados principalmente para as dosagens com adições minerais, oscilando entre 120% a 220% superiores aos resultados de ensaios.

Verificou-se ainda que os modelos preditivos foram mais influenciados pelo comportamento da adição mineral do que do aditivo plastificante ou superplastificante. Logo, os aditivos interferem menos na obtenção de resultados de fluência pelos modelos mais próximos dos resultados reais de ensaio para as situações estudadas nessa pesquisa.

7.3.8. Os Efeitos das Adições e Aditivos em uma Estrutura de Concreto

Percebeu-se a tendência das dosagens com alta fluência nas primeiras idades de carregamento e baixas em idades mais avançadas, como é o caso da adição cimentícia com aditivo superplastificante, possam maiores chances de apresentar problemas de origem térmica em estruturas de concreto massa, sem contemplar, entretanto, os aspectos positivos dessas adições e aditivos que poderiam aumentar a eficácia do traço (redução do consumo de água e cimento) para o combate ao problema térmico. A alta fluência inicial inibe o acúmulo das tensões benéficas de compressão nas primeiras idades, quando o concreto passa pela fase de aquecimento decorrente das reações de hidratação dos compostos cimentícios, e a baixa fluência em idades mais avançadas não reduz substancialmente o histórico de tensões de tração indesejáveis que são ocasionadas pelo resfriamento da estrutura pós-pico de temperatura. Sendo assim, dosagens que possam comportamento contrário ao citado anteriormente (baixa fluência nas primeiras idades e alta fluência em idades mais avançadas)

seriam mais eficazes no combate ao problema térmico, como foi o caso observado para a dosagem composta por pozolana comum com plastificante base *lignossulfonato* na pesquisa.

7.4. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os resultados da pesquisa confirmam o efeito expressivo das adições e aditivos na fluência quando utilizados na dosagem, tanto de forma isolada quanto combinados entre si, principalmente nas idades mais recentes de aplicação de carga, além das possíveis conseqüências na estrutura quando se trata do problema térmico em concreto massa. O que não foi possível verificar, pois não fez parte do escopo da pesquisa, foi avaliar com que intensidade a fluência é alterada caso fossem modificados os teores das adições e aditivos e o tipo de cimento, bem como as condições ambientais (temperatura) permanecendo os outros fatores intervenientes no problema constantes, incluindo a manutenção da relação tensão/resistência fixa. Testes isolados em laboratório podem até verificar esse efeito para determinadas situações específicas de campo, porém é interessante se aprofundar nesse nicho de pesquisa, para que se possa, por exemplo, conhecer qual a curva que melhor se ajusta ao comportamento da fluência ao se alterar o teor de aditivo e/ou adição.

Saindo da escala macroscópica para a microestrutural do concreto, os mecanismos que podem explicar como as adições e aditivos interferem na fluência ainda precisam ser melhores fundamentados, como também comprovados por meio de modelos e constatação laboratorial. Ensaio de microscopia eletrônica, termogravimetria, entre outros testes físico-químicos podem contribuir para a elucidação dos principais motivos e mecanismos que correlacionam os efeitos das adições e aditivos com a fluência.

Sugere-se também testes em estruturas instrumentadas de concreto *in loco* para avaliar como a fluência se comporta em escala próxima da real e sob condições ambientais diversas. Desta forma, seria possível por meio de retroanálise avaliar os modelos matemáticos de predição da fluência bem como a modelagem termotensional do problema térmico para uma situação de campo.

Propõem-se, por fim, que novos testes com os extensômetros óticos possam ser realizados a fim de customizá-los a outras aplicações de laboratório, como também para avaliar as diferenças encontradas na caracterização do concreto feita em laboratório com uma estrutura auscultada em escala real por meio desses extensômetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto endurecido - Determinação da fluência**: NBR-8224. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de Alto-Forno**: NBR-5735. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto**: NBR-11578. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos**: NBR-12653. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aditivos para Concreto de Cimento Portland**: EB-1763. Rio de Janeiro, 1992.

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

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistema de gestão da qualidade - Requisitos**. NBR NM ISO 9001: Rio de Janeiro, 2008.

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Committee N° 209. **Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures**. Detroit, 1978.

AİTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução de Geraldo P. Serra – São Paulo: Ed. Pini, 2000.

AKKAYA, Y.; OUYANG, C.; SHAH, S. P. Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete. **Cement and Concrete Composite**. Elsevier, pp. 117-123, 2006.

ALEXANDER, K. M.; BRUERE, G. M.; IVANUSEC, I. The creep and related properties of very high-strength superplasticized concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 10, Issue 2, p. 131-137, March 1980.

ASTM: AMERICAN STANDARD TEST METHOD. **Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete: C494/C**. West Conshohocken, United States, 1999.

ASTM: AMERICAN STANDARD TEST METHOD. **Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression: C512**. West Conshohocken, United States, 2002.

ARTHANARI, S.; YU, C. W. Creep of concrete under uniaxial and biaxial stress at elevated temperatures. Magazine of concrete research, V. 19, n. 60, setembro de 1967.

BAŽANT, Z. P. Material models for structural creep analysis. In: BAŽANT, Z. P. **Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete**. USA: John Wiley & Sons Ltd, 1988. p. 99-215.

BAŽANT, Z. P.; BAWEJA, S. Justification and refinement of Model B3 for concrete creep and shrinkage. Statistics and sensitivity. **Master Structures 28**, p. 415-430, 1995.

BAŽANT, Z. P.; HAUGAARD, A. B.; BAWEJA, S.; ULM, F. Micropress solidification theory for concrete creep. Aging and drying effects. **Journal of Engineering Mechanics**, USA: ASCE, 123, p. 1188-1194, 1997.

BAŽANT, Z. P.; HUBLER, M. H.; YU, Q. Excessive creep deflections: An awakening. **Concrete International**, ACI: USA. Vol. 33. Issue 8, August 2011.

BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M. A concrete incorporating high volumes of ASTM class F fly ashes: Mechanical properties and resistance to deicing salt scaling and to chloride-ion penetration. **CANMET/ACI Fourth Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**. Istanbul, Volume I, May 1992, SP-132, pp. 319-347.

BOTASSI, S. S. GAMBALE, E. A.; ANDRADE, M.A. S.; MURCIA, J.; CALMON, J. L. **Análise de fluência do concreto compactado com rolo através de medidas de deformações tridimensionais sob carga uniaxial. Um ensaio piloto**. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto. AnaisVitória ES, 2003.

BOTASSI, Sergio Santos. **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto. Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações**. Vitória-ES: UFES, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Espírito Santo, 2004.

BOTASSI, S. S. CALMON, J. L.; GAMBALE, E. A.; ANDRADE, M.A. S. **Comparação entre Resultados Obtidos por um Medidor de Tensão Instalado em um Bloco de Concreto Massa e os Valores Gerados pelo Programa PFEM_2DAT**. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto. AnaisVitória ES, 2004.

BOTASSI, S. S. CALMON, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P; ANDRADE, M. A. S. Modelo de predição da fluência com base em banco de dados do Laboratório de Concreto de Furnas: Estudos preliminares. **49º Congresso Brasileiro do Concreto**. Bento Gonçalves - RS, IBRACON, 2007.

BOTASSI, S. S. CALMON, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P; ANDRADE, M. A. S. Análise Estatística do Efeito de Adições Mineraias e Aditivos Plastificantes nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco e Endurecido: Uma Avaliação Inicial. **51º Congresso Brasileiro do Concreto**. Curitiba - PR, IBRACON, 2009.

BOTASSI, S. S. CALMON, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P; LIDUÁRIO, A. S.; GAMBALE, E. A.. Fluência do concreto massa: Análise dos modelos de predição por meio de ensaios. **52º Congresso Brasileiro do Concreto**. Fortaleza - CE, IBRACON, 2010.

BSI: BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Structural use of concrete. Code of practice for design and construction**: BS 8110. United Kingdom, 1997.

BROWNE, R. D. Properties of concrete in reactor vessels. In: Conference on prestressed concrete pressure vessels. **Proceedings of the ...** March, 1967.

BROOKS, J. J. How admixtures affect shrinkage and creep? **Concrete International**. ACI: USA. Vol. 21. Issue 4, April 1999.

BROOKS, J. J. Elasticity, Creep and Shrinkage of Concretes Containing Admixtures. In: Al-Manaseer, A. **The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage - Structural Design Effects**. ACI SP-194, Farmington Hills, Michigan, 2000.

BROOKS, J.J.; JIANG, X. The influence of chemical admixtures on restrained drying shrinkage of concrete. In: V.M. Malhotra (Ed.), **Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete**, ACI, SP-173, 1997, pp.249-265

BROOKS, J. J.; JOHARI, M. A. M. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Composite**. Elsevier, pp. 495-502, 2001.

BROOKS, J. J.; NEVILLE, A. M. Creep and shrinkage of concrete as affected by admixture and cement replacement materials. In: DAYE, M. A.; FU, C. C. **Creep and Shrinkage of Concrete: Effect of Materials and Enviroments**: ACI SP-135, USA, 1992.

BROOKS, J. J.; WAINWRIGHT, P. J.; BOUKENDAKJI; M. Influence of Slag type and replacement level on strength, elasticity, shrinkage and creep of concrete. **CANMET/ACI Fourth Int. conf. on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete**, Istanbul, Volume II, SP-132-71, 1992, pp. 1325-1341.

BUIL, M.; ACKER, P. Creep of a silica fume concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 463-466, 1985.

CEB-FIP MODEL CODE: Comité Européen Du Béton – Federation Internationale de la Précontrainte. **Bulletin d'Information N° 203**. Vienne: 1991.

CHUANG, J. W.; KENNEDY, T. W.; FERRY, E. S.; THOMPSON. **Prediction of Multiaxial Creep from Uniaxial Creep Tests**, Detroit-USA, ACI Special Publication, 1972, n. 34, págs. 701-734.

CIACH, T. D.; SWENSON, E. G. Cement and Concrete Research. Vol 1, pp. 159, 1971.

COLLEPARDI, M. M.; MARCIALIS, A.; SOLINAS, V. The influence of calcium lignosulphonates on the hydration of cements, **Il Cemento**, 70:3-14, 1973.

COLLEPARDI, M. M. Water Reducers/Retarders. In: RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixtures handbook – Properties, science and technology**. 2nd Edition. New Jersey, USA: Noyes Publications, 1995. Cap. 6, p. 286-409.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. Curso 120. Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa, Portugal, 1974.

CONCRETE SOCIETY. **Technical paper 101**, 1973.

CZERNIN, W. **Cement chemistry and physics for civil engineers**. London: Crosby Lockwood & Son Ltd, 1962.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações**. Editor: ISAIA, G. C., Volume 1, São Paulo: IBRACON, 2005.

DING, J. T; LI, Z. Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete. **ACI Materials Journal**, USA, v. 99, n. 4, p. 393-398. Jul/Aug, 2001.

DODSON, V. H. Proceedings of the International Symposium on Admixtures for Mortar and Concrete, Bruxelas – Bélgica, 1967.

ENGLAND, G. L.; ROSS, A. D. Reinforced concrete under thermal gradients. Magazine of concrete research. V. 14, n. 40, Março de 1962.

EQUIPE DE FURNAS, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico; **Concretos : massa, estrutural, projetado e compactado com rolo : ensaios e propriedades** - editor Walton Pacelli de Andrade - São Paulo: Pini, 1997.

FELDMAM R. F., SEREDA, P. J. A model for hydrated Portland cement past as deduced for sorption-length change and mechanical properties. **Materials and Structures**, v.1-6, pp. 509-520, 1968.

FLATT, R. J.; HOUST, Y. F.; OESCH, R.; BOWEN, P.; HOFMANN, H.; WIDMER, J.; SULSER, U.; MAEDER, U.; BURGE, T. A. Analysis of superplasticizers used in concrete. **Analysis Magazine**. EDP Sciences, Wiley-VCH, N° 2, pp. 28-35, 1998.

GAMBALE, E. A.; FONTOURA, J. T.; GUEDES, Q. M.; PACELLI, W. A. Resolução numérica do modelo viscoelástico linear com envelhecimento do concreto e sua aplicação no cálculo das tensões de origem térmica em barragens de C.C.R. In: XX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS E 34º REUNIÃO DO IBRACON, 1992, Curitiba PR. **Anais do XX seminário nacional de grandes barragens e 34º reunião do ibracon**, Curitiba PR.

GAMBALE, E. A.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M.; BOTASSI, S. S. Avaliação de resultados do ensaio de elevação adiabática do concreto massa com base em um novo calorímetro. **46º Congresso Brasileiro do Concreto**. Florianópolis - SC, IBRACON, 2004.

GARDNER, N. J.; TSURUTA, H. Is Superposition of creep strains valid concretes subjected to drying creep? **ACI Materials Journal**, USA, v. 101, n. 5, p. 409-449. Set/Oct, 2004.

GHOSH, R. S.; TIMUSK, J. Creep of fly ash concrete. **ACI Journal**. 63, 267-290, 1966.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S.; BOTASSI, S. S. Deformações por Retratação e Fluência. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações**. Editor: ISAIA, G. C., Volume 1, São Paulo: IBRACON, 2005.

HOPE, B. B.; NEVILLE, A. M.; GURUSWAMI, A. Influence of admixture on creep of concrete containing normal weight aggregate, **Proc. RILEM Symposium on Admixture for Mortar and Concrete**, Brussels, p. 17-32, Sept. 1967.

HOPE, B. B.; BROWN, N. H. Influence of cement composition on the creep of concrete containing admixture, **ACI Journal**, 67, pp. 673-675, 1970.

JIN, X.; LI Z. Effects of mineral admixture on properties of young concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, USA: ASCE, Sept/Oct, p. 435-442, 2003.

KHAYAT, K. H.; AİTCIN, P. C. Silica fume im concrete an overview. **CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, Istanbul, Vol. 2, 1992, pp. 835-872.

LI, H.; WEE, T. H.; WONG, S. F. Early-age creep and shrinkage of blended cement concrete. **ACI Materials Journal**, V. 99, n° 1, January-February, 2002, pp. 3-10.

LIDUÁRIO, A. S. **Contribuição ao estudo das propriedades térmicas do concreto convencional na presença das adições minerais**. 2006. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

LOHTIA, R. P.; JOSHI, R. C. Mineral Admixtures. In: RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixtures handbook – Properties, science and technology**. 2nd Edition. New Jersey, USA: Noyes Publications, 1995. cap. 10, p. 710-712.

LUTHER, M. D.; HANSEN, W. Comparison of creep and shrinkage of high-strength silica fume concretes with fly ash concretes of similar strengths. Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concretes. **Proc. 3rd International Conference**, Trondheim – Norway. Vol I, ACI SP-114, p. 573-591. Detroit, 1989.

MacGREGOR, I. D. A comparison of mechanical properties of Hong Kong medium and high-strength NPC and fly ash concretes. **CANMET/ACI Sixth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, Bangkok, May 31-June 5, 1998, pp. 129-158.

McDONALD, J. E. **An experimental study of multiaxial creep in concrete**, Detroit-USA, ACI Special Publication, 1972, n. 34, págs. 735-768.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1^a Edição. São Paulo: Editora Pini, 1994.

MEHTA, P. K. Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – Another look. Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concretes. **Proc. 3rd International Conference**, Trondheim – Norway. Vol I, ACI SP-114, pp. 2-43. Detroit, 1989.

MICROSOFT, Corporation (2007). **MS Office Excel**. [www.office.microsoft.com/pt-br].

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Ed. LTC – 4^a Edição, Rio de Janeiro.2009.

MORGAN, D. R.; WELCH, G. B.; Influence of admixture on creep of concrete, **3th Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials**, 2, Session B4, University of Auckland, New Zealand, Aug. 1971.

MURCIA, J. **Formulaciones tridimensionales de la retracción y la fluencia del hormigón. Significado y errores de las extrapolaciones unidimensionales de la fluencia**. Hormigón y Acero, España, n. 197, p. 77-90, 1995.

NANNI, L. F. & RIBEIRO, J. L. Planejamento e avaliação de experimentos. **Caderno de Engenharia 17/87**, 2^a edição, CPGE/UFGRS, Porto Alegre, Brasil, 1991.

NASSER, K. W.; AL-MANASEER, A. A. Creep of concrete containing fly ash and superplasticizer at different stress/strength ratios. **ACI Journal**, pp. 668-673. July-August, 1986.

NEVILLE, A. M. Creep of concrete as function of its cement paste content. **Magazine of concrete research**, 16, N^o 46, pp. 21-30, 1964.

NEVILLE, A. M. **Creep of concrete: plain, reinforced and prestressed**. 1st Edition. Amsterdam-Holland: North-Holland Publishing Company, 1970.

NEVILLE, A. M.; DILGER, W. H.; BROOKS, J. J. **Creep of plain and structural concrete**, Construction Press, London and New York, 1983, 361 p.

PICKETT, G. Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage, pp. 581-590, 1956.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixtures handbook – Properties, science and technology**. 2nd Edition. New Jersey, USA: Noyes Publications, 1995.

RAVINDRARAJAH, R.; TAM, C. T. Properties of concrete containing low-calcium fly ash under hot and humid climate. **CANMET/ACI Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, Trondheim, Vol. 1, 1989, pp. 139-155.

RILEM. **Measurement of deformation of concrete under compressive load: CPC 12**, Ed. E & FN Spon: UK, 1983.

RIXOM, R; MAILVAGANAM, N. **Chemical admixtures for concrete**. 3th Edition. London, UK: E e FN Spon, 1999.

RONCERO, Joana. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: Implications for high performance concretes**. 2000. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2000.

ROSS, A. D. The creep of Portland blast-furnace cement concrete. **ICE Journal** 8, 1938, pp. 43-52.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**. Elsevier, pp. 441-454, 2001.

SAKATA, K.; AYANO, T. Effect of ambient temperature and humidity on creep and shrinkage of concrete. In: MANASEER, A. **The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage – Structural Design Effects**. USA: ACI International, 2000. p. 215-235.

SIERRA, R. Répartition des différents formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C₃S et de ciment Portland. In: **Proceedings of the 7th International congress on the Chemistry of Cement**, v. 3, pp. 201-206, Paris, 1980.

SILVA, C. J. **Comportamento de estruturas metálicas e mistas em situação de incêndio – Modelagem e aplicações**. 2002. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

SIVASUNDARAM, V.; CARETTE, G. G.; MALHOTRA, V. M. Selected properties of high-volume fly ash concretes. **ACI Compilation 22, Mineral Admixtures**, 1992, pp. 69-72.

STATSOFT, Inc. (2004). **Statistica** (data analysis software system), version 7. [www.statsoft.com].

SWAMY, R. N.; MAHMUD, H. B. Shrinkage and creep behavior of high fly ash content concrete. **CANMET/ACI Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, Trondheim, Vol. 1, 1989, pp. 453-475.

TAMTSIA, B. T.; BEAUDOIN, J. J. Basic creep of hardened cement paste. A re-examination of role of water. **Cement and Concrete Composites**. Elsevier, pp. 1465-1475, 2000.

TROXELL, G. E.; RAPHAEL, J. M.; DAVIS, R. E. **Proceedings ASTM**, V. 58, p. 1101-1120, 1958.

U. S. BUREAU OF RECLAMATION. **Creep of concrete under high intensity loading**: Concrete Laboratory Report N^o C-820, Denver – Colorado, 1956.

VERONEZ, Marcelo. **Estudo da Influência do Tipo de Aditivo Superplastificante e de Adição Mineral no Comportamento Termo-mecânico dos Concretos de Alto Desempenho**. Vitória-ES: UFES, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.

ULM, F.; LE MAOU, F.; BOULAY, C. Creep and shrinkage of concrete – Kinetics Approach. In: MANASEER, A. **The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage – Structural Design Effects**. USA: ACI International, 2000. p.135-153.

YOUNG, J. F. Physical mechanisms and their mathematical descriptions. In: BAŽANT, Z. P. **Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete**. USA: John Wiley & Sons Ltd, 1988. p. 63-98.

**APÊNCIDE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E
PROCEDIMENTOS DE ENSAIO**

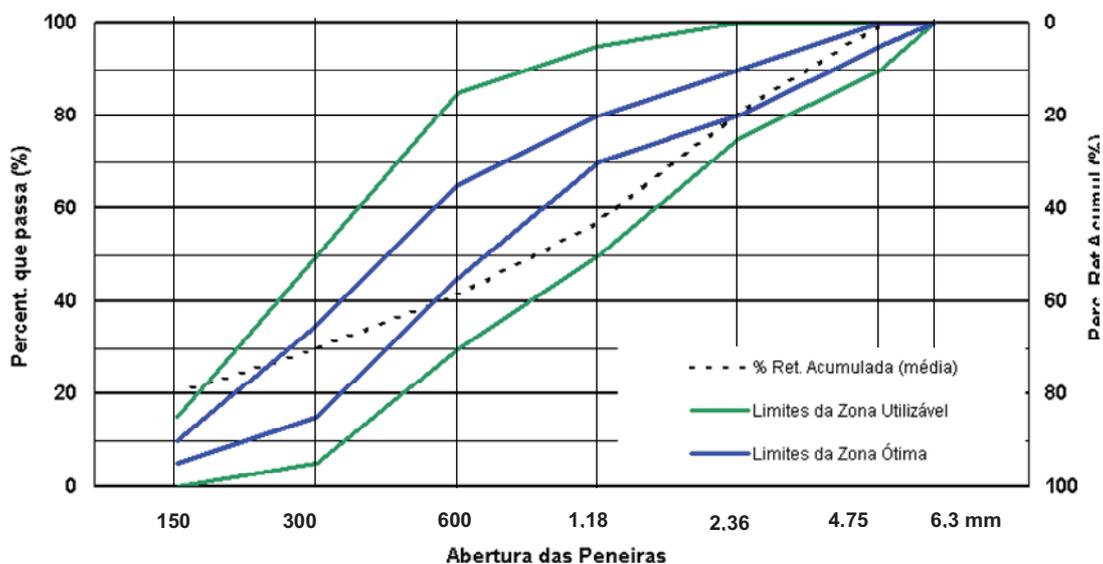


Figura A1: Curva de Distribuição Granulométrica da Areia Artificial.

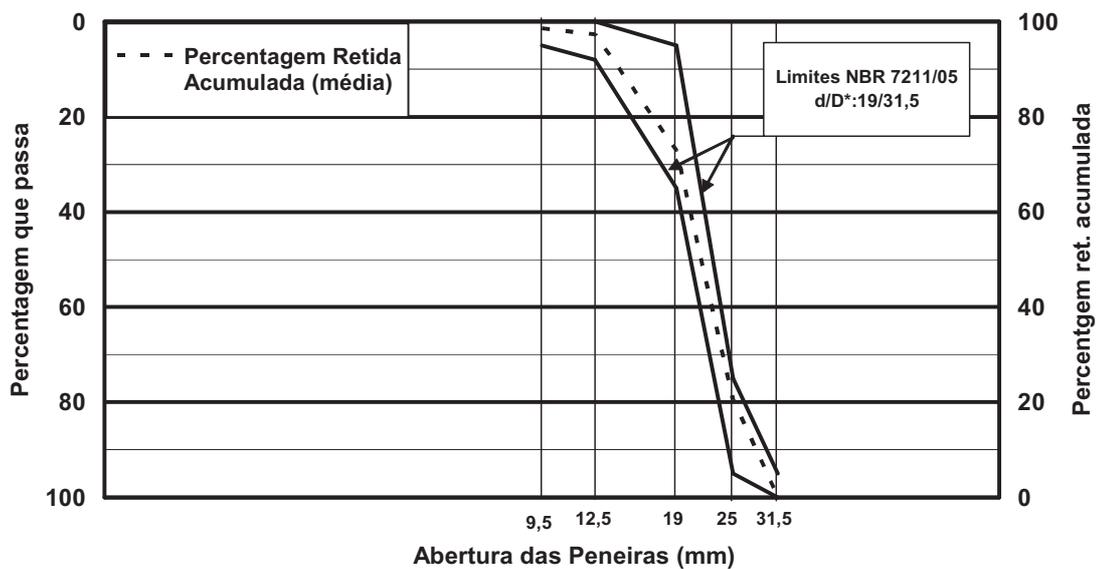


Figura A2: Curva de Distribuição Granulométrica da Brita 32mm.

Reg. 1.2560.2007

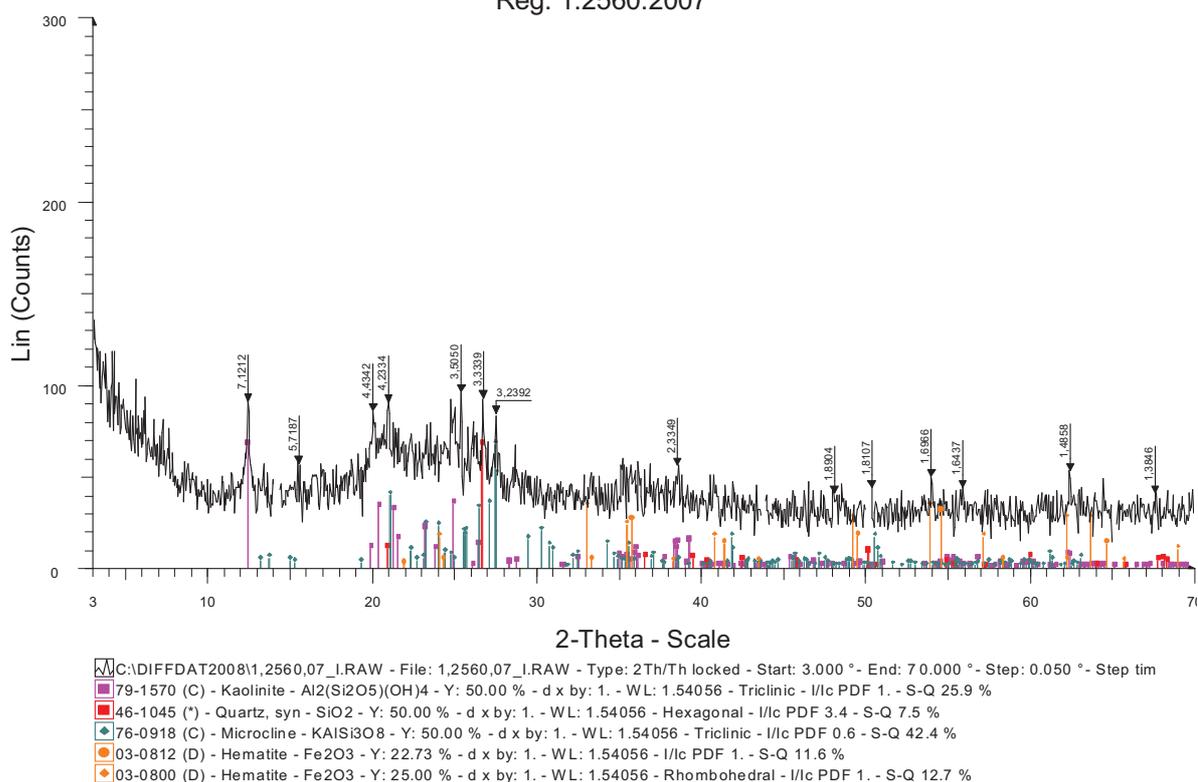


Figura A.3: Difratoograma da Argila Calcinada (Pozolana).

Reg. 1.0939.2007

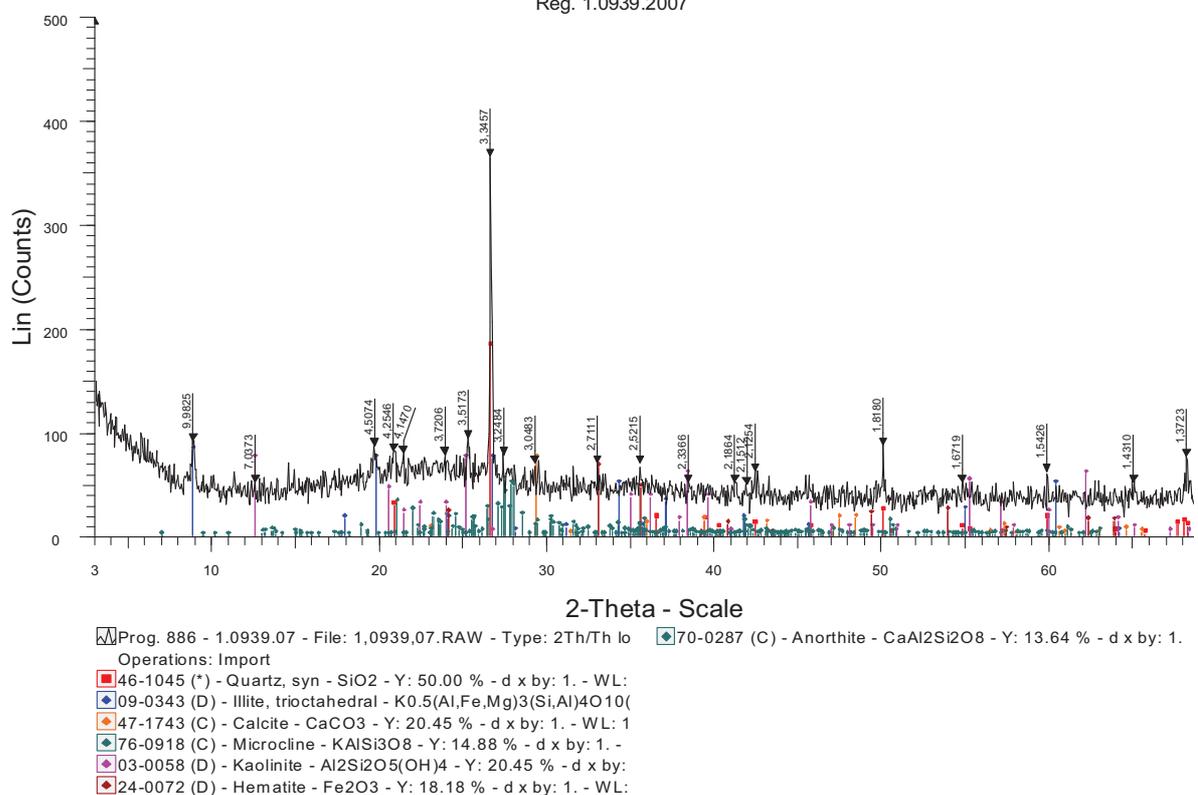


Figura A.4: Difratoograma do Metacaulim.

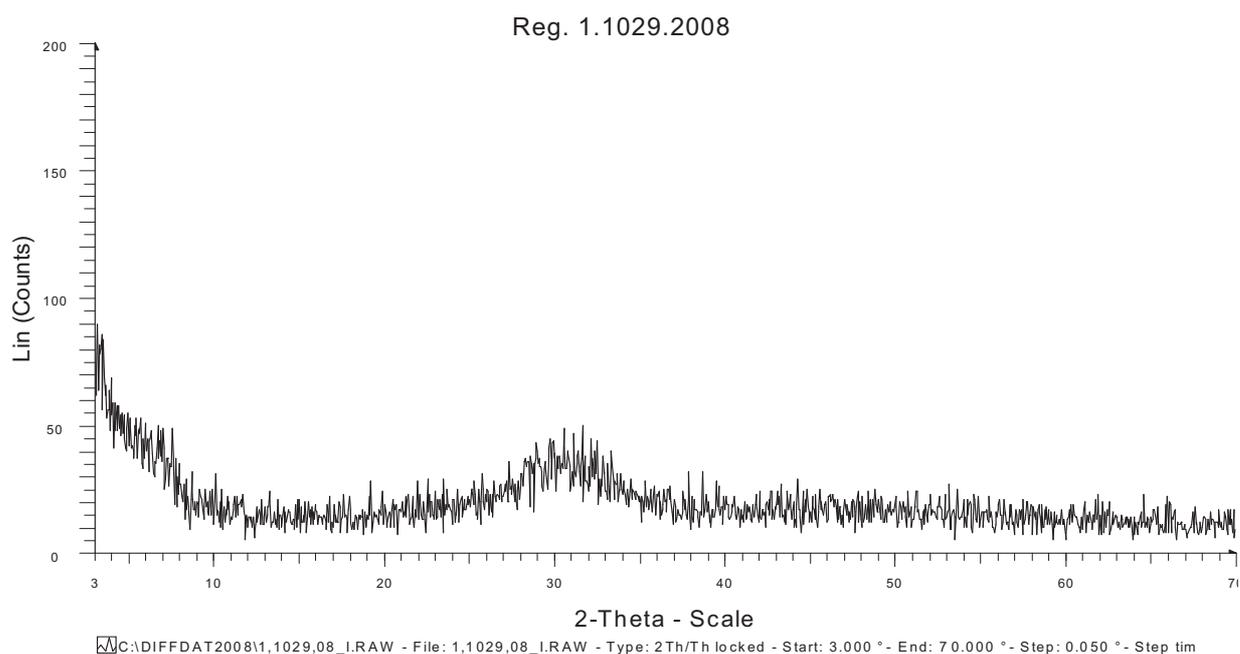


Figura A.5. Difratoograma da Escória de Alto-forno.

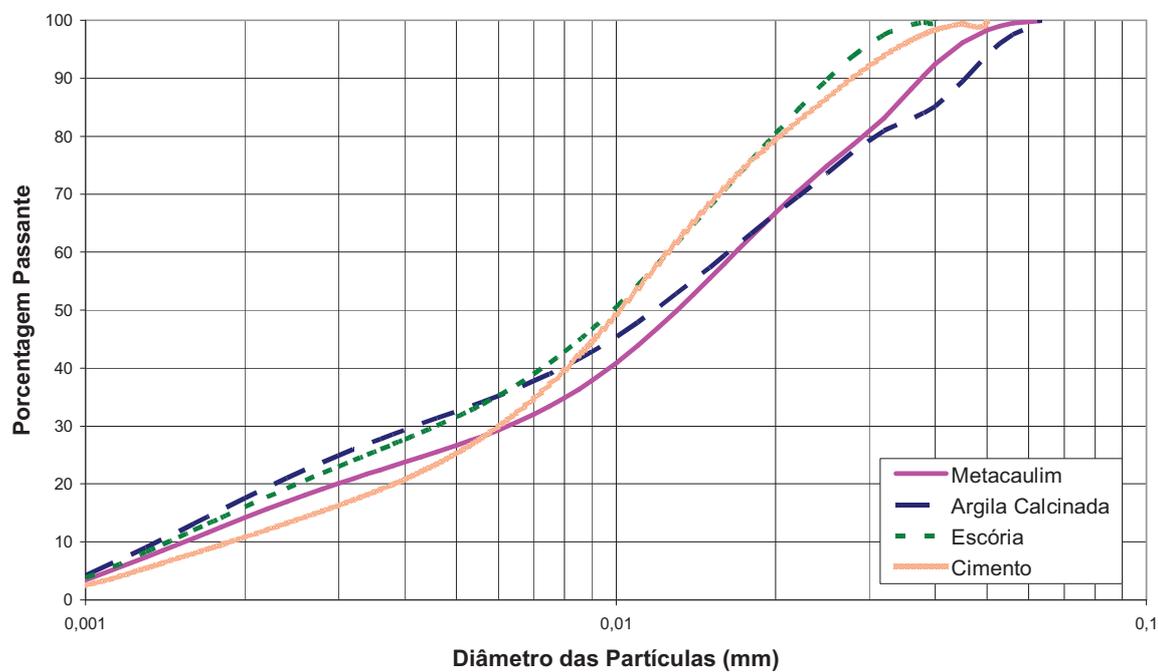


Figura A.6: Gráficos provenientes dos ensaios de granulometria a laser.

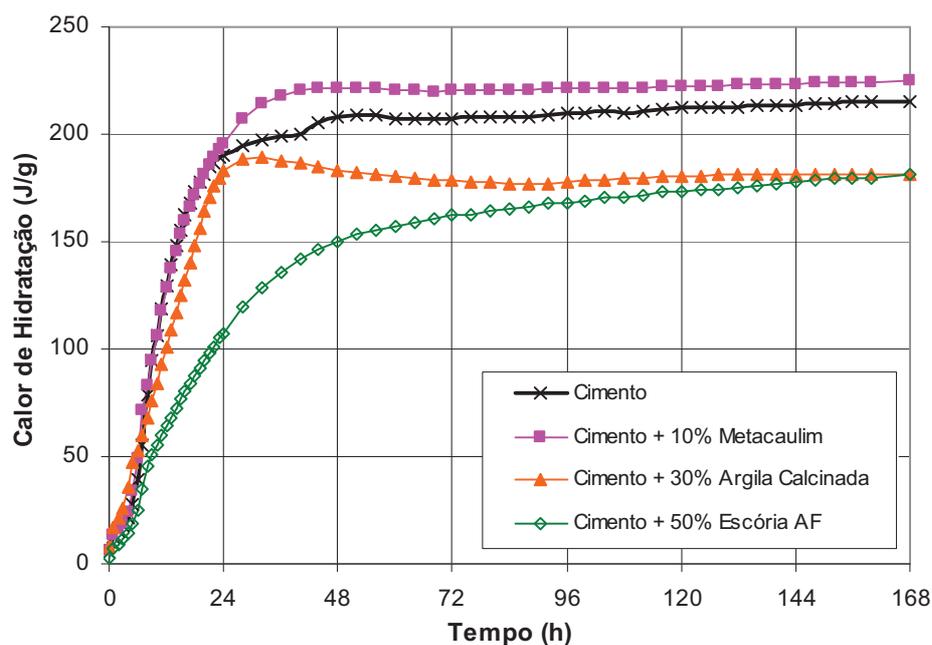


Figura A.7: Calor de hidratação do cimento e das suas combinações com as adições.

Tabela A.1: Caracterização química do cimento CII-F-32.

Análise Química		Resultados	Limites*
Perda ao fogo		5,24	<= 6,5
Resíduo insolúvel		2,31	<= 2,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)		2,42	<= 4,0
Óxido de magnésio (MgO)		1,53	<= 6,5
Dióxido de silício (SiO ₂)		18,60	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,45	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		4,53	-
Óxido de cálcio (CaO)		57,23	-
Óxido de cálcio livre (CaO)		1,6	-
Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,21	-
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,51	-
	Equiv. alcalino	0,55	-
Álcalis Solúveis em Água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,06	-
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,34	-
	Equiv. alcalino	0,29	-
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		4,11	-

* Segundo NBR 11.578 (ABNT, 1991).

Tabela A.2: Caracterização física do cimento CII-F-32.

Análise Física		Resultados	Limites*
Massa específica (g/cm ³)		3,02	-
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	2,1	<= 12
	Resíduo na peneira 325 (%)	---	---
	Área específica (cm ² /g)	4900	>= 2600
Tempo de Pega (h:min)	Início	2:30	>= 1:00
	Fim	4:00	<= 10:00
Água de Consistência - Pasta (%)		29,6	-
Expansão em Autoclave (%)		0,0	<= 0,8
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	23,6	>= 10
	7 dias	30,2	>= 20
	28 dias	39,7	>= 32 e <= 49

* Segundo NBR 11.578 (ABNT, 1991).

Tabela A.3: Caracterização química das adições minerais.

Análise Química	Resultados		
	Argila Calcinada	Metacaulim	Escória AF
Perda ao fogo	5,33	2,06	0,00
Trióxido de enxofre (SO ₃)	0,05	---	1,61
Óxido de magnésio (MgO)	0,27	0,31	7,13
Dióxido de silício (SiO ₂)	45,00	50,50	33,81
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,86	4,49	0,67
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	42,75	38,29	11,81
Óxido de cálcio (CaO)	0,49	0,55	42,78
Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,65	0,15
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,46	1,49
	Equiv. alcalino	0,96	1,13

Tabela A.4: Caracterização física das adições minerais.

Análise Física		Argila Calcificada	Metacaulim	Escória AF	Limites**
Massa específica (g/cm ³)		2,60	2,64	2,92	---
Finura	Resíduo na peneira 325 (%)	32,2	6,4	1,3	< 34,0
	Área específica (cm ² /g)	7.930	9.800	4.850	---
Índice de atividade pozolânica com a cal (MPa)		17,4	18,8	10,1	> 6
Índice de atividade pozolânica com o cimento (%)		85,6	91,3	115,8	> 75

** Segundo NBR 12653 (ABNT, 1992)

Tabela A.5: Resultados do ensaio de granulometria a laser.

Granulometria a Laser	Cimento	Metacaulim	Argila Calcificada	Escória AF
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	1,87	0,84	1,17	1,44
Dimensão Média (µm)	10,16	6,04	11,84	9,86
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)	27,91	17,62	45,58	25,13

Quadro A.1: Procedimentos de ensaios realizados no programa experimental.

Ensaio		Norma Brasileira
Classificação	Denominação	
Viscoelásticos	Fluência Básica	NBR 8224:1983 Concreto endurecido - Determinação da fluência
	Retração autóloga	
Propriedades Mecânicas	Resistência à compressão	NBR 5739:2007: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos
	Tração por compressão diametral	NBR 7222:1994: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos
Propriedades Elásticas	Módulo de elasticidade	NBR 8522:2008: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão
	Coefficiente de Poisson	
Propriedades Térmicas	Elevação adiabática de temperatura	NBR 12819:1993: Concreto e argamassa - Determinação da elevação adiabática da temperatura
	Calor específico	NBR 12817:1993: Concreto endurecido - Determinação do calor específico
	Difusividade térmica	NBR 12818:1993: Concreto - Determinação da difusividade térmica
	Coefficiente de dilatação térmica	NBR 12815:1993: Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear
Propriedades Físicas	Absorção	NBR 9778:2009: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica
	Massa específica seca, saturada e real	
	Porosidade	

A. Breve Descrição dos Ensaios

O ensaio de fluência compreende basicamente em se determinar a deformação proveniente da aplicação de carregamento constante, a partir de uma prensa servo-controlada, proporcional à resistência à compressão na idade de início do ensaio, carga essa em torno de 40% da resistência à compressão. Foram realizados ensaios em separado para as idades de início de carregamento de 1, 3 e 7 dias. A duração do ensaio foi de 90 dias, quando os efeitos deformacionais medidos, por meio do extensômetro ótico embutido, já se encontravam mais amenizados, porém não finalizados, sendo possível estipular com certa precisão um comportamento de deformação diferido no tempo por meio do ajuste de uma curva logarítmica. A fluência medida é a básica na compressão, ou seja, sem a consideração do efeito da fluência por secagem, conforme assunto abordado na revisão bibliográfica, sendo necessário, portanto, o envolvimento dos corpos-de-prova (CP) em uma jaqueta de vedação⁵⁰ conforme observado na Figura A.8. A fluência básica é um dos fenômenos deformacionais mais atuantes no concreto massa, em relação a outros tipos de concreto, logo a sua consideração neste programa experimental.

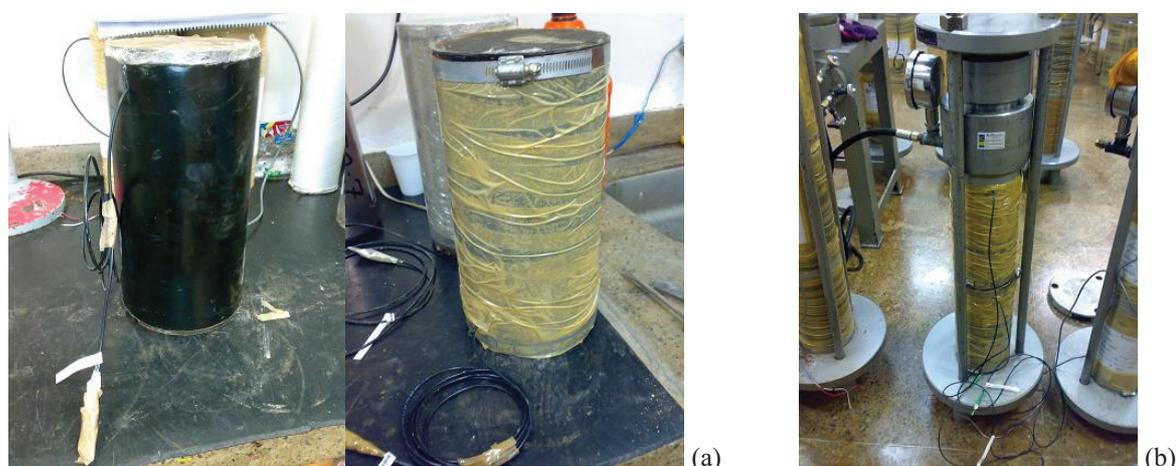


Figura A.8: Ensaio de Fluência: (a) Preparação do CP; (b) CP's submetidos ao ensaio na prensa.

Como a carga foi mantida constante ao longo do ensaio em relação a uma parcela da resistência à compressão na idade de início do carregamento, a tendência foi de ocorrer a redução das deformações, além do esperado, pois a carga aplicada no CP deveria ser mantida fixa sempre em relação ao crescimento da resistência no tempo, conforme afirma Neville

⁵⁰ Termo utilizado na NBR 8224 (ABNT, 1983) para definir a película que impede a saída de umidade do concreto para o meio externo

(1970). Para corrigir esse efeito, os resultados de deformação proveniente da fluência foram ajustados proporcionalmente em relação à redução sofrida na carga, supostamente constante, a partir do crescimento da resistência à compressão, conforme expressão 2.2 apresentado no capítulo 2 desta tese.

O ensaio de retração, ou variação, autógena reflete o efeito deformacional provocado pelas reações de hidratação, intrínsecas dos aglomerantes com a água, que tendem ao longo do tempo reduzir o volume da mistura em função do consumo de água nas reações químicas ocorridas. Este ensaio é de fundamental importância para complementar o ensaio de fluência, pois a deformação provocada pelo efeito autógeno na matriz cimentícia deve ser descontada dos resultados do ensaio de fluência, que *a priori* não teria condição de ser feito somente com o procedimento de determinação da fluência. Os CP's utilizados no ensaio de retração autógena são mantidos por apenas 1 dia na câmara úmida, para reduzir efeitos secundários como da retração plástica, quando posteriormente são envoltos por uma camada impermeável para impedir perda de umidade do concreto para o ambiente, e assim ser iniciado o monitoramento das deformações com o auxílio de um extensômetro ótico embutido no seu interior (Figura A.9). É importante que no processo de monitoramento das deformações de origem autógena que seja corrigido o efeito deformacional provocado pela temperatura em sala climatizada com os CP's sobre uma bancada sem estar sujeito a nenhum carregamento (Figura A.10).



Figura A.9: Posicionamento dos extensômetros óticos nos moldes para posterior moldagem dos CP's.



Figura A.10: CP's para ensaio de retração autógena sobre uma bancada.

Os ensaios das propriedades mecânicas, bem conhecidos no meio técnico-científico, são capazes de medir a capacidade de resistência do concreto em função de vários esforços: compressão, tração, cisalhamento, etc. Neste programa os ensaios pretendidos de resistência à compressão foram realizados a partir das idades de 1, 3, 7 e 28 dias para configurar o comportamento da resistência com a idade e corrigir os resultados de fluência em função deste ganho de resistência. O ensaio de resistência à tração por meio da compressão diametral do CP cilíndrico foi adotado no programa experimental em função da sua facilidade de execução e possibilidade de ser extrapolado para outras resistências à tração, conforme reconhecido e descrito na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003).

A avaliação do comportamento elástico foi obtida pelo ensaio de módulo de elasticidade secante nas mesmas idades da resistência à compressão. O ensaio consiste basicamente no monitoramento da deformação com o aumento de carga na prensa onde se encontra o CP. A carga aplicada estava em função do percentual de resistência à compressão de cada idade ensaiada (normalmente entre 30% a 40%), semelhante ao ensaio de fluência. A forma de medida da deformação ocorreu externamente ao concreto por meio extensômetro elétrico do tipo Strain Gage colado⁵¹, mas que não faz medidas de deformação transversal, logo não foi disponibilizado o coeficiente de Poisson para todos os ensaios de módulo de elasticidade, somente para alguns a fim de se conhecer a ordem de grandeza desse valor para os concretos estudados.

⁵¹ Extensômetro que pode ser colado ao CP externamente e funciona a partir da alteração da resistência elétrica quando deformado e submetido a passagem de corrente elétrica (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

O ensaio de elevação adiabática de temperatura do concreto mede a potencial energia, produzida na forma de calor, proveniente da hidratação do cimento a partir do monitoramento da temperatura do concreto. Essa medição de temperatura em condições normais de exposição ao ambiente do CP de concreto tende a ser menor do que se mantida em um local com baixa perda de calor. Assim, o ensaio é conduzido a partir de um grande CP inserido dentro de uma câmara que simula uma condição adiabática (calorímetro a água), acompanhando a mesma evolução de temperatura produzida pelo concreto. O ensaio se inicia logo após a moldagem do CP, ainda no estado fresco, e mantido o acompanhamento de temperatura até a idade de 28 dias. O molde metálico do CP quando em ensaio dentro da câmara fica envolto de água que é aquecida ou resfriada para acompanhar a evolução de temperatura do concreto, gerando a sensação artificial de um ambiente adiabático (Figura A.11). Este é o principal ensaio utilizado para realização do cálculo térmico em estruturas de concreto massa.

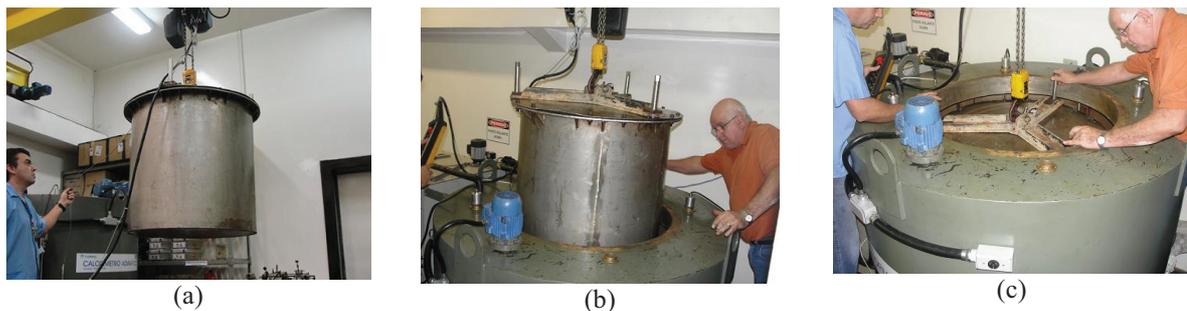


Figura A.11: Ensaio de elevação adiabática: (a) Molde metálico com concreto; (b) Condução para dentro da câmara com água; (c) Fixação do molde dentro da câmara adiabática.

O calor específico é uma das propriedades que influenciam na capacidade de armazenar calor e como tal é utilizada no cálculo térmico em estruturas de concreto. Devido ao calor específico dos concretos comuns poder variar consideravelmente de valor: 840 J/kg.K a 1260 J/kg.K, é importante que ele seja conhecido *a priori* nas análises térmicas. O ensaio é conduzido dentro de um pequeno calorímetro (Figura A.12) cuja função é abrigar o CP cilíndrico de concreto, com 20cm de diâmetro por 40cm de altura, envolto em água, possuindo um orifício central paralela a sua geratriz, feito na moldagem, que servirá para a inserção de um termômetro de quartzo no interior do CP durante o ensaio. O princípio do ensaio é aquecer a água com uma resistência elétrica, conhecendo seu calor empregado por meio de um equipamento denominado de *wattímetro*, e medir o quanto o concreto irá aquecer em termos de temperatura. A partir dessas informações e com uma série de outros

dados de entrada aplica-se uma fórmula para se chegar ao valor do calor específico (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

A difusividade térmica do concreto, a exemplo do calor específico, é um parâmetro importante nos cálculos das temperaturas de estruturas de concreto, pois expressa a capacidade de difusão do calor em todas as direções, e indica a facilidade com que o concreto sofrerá variações de temperatura. O ensaio consiste em se medir a curva de resfriamento do CP cilíndrico (20cmx40cm), no qual um sensor de um termômetro de quartzo é introduzido no orifício, até o seu centro (Figura A.13.a). O CP passa por um ciclo de temperaturas de 60°C, 40°C, 20°C e 4°C aproximadamente, sendo a menor temperatura obtida por um tanque localizado dentro uma sala climatizada a 4°C – tanque refrigerador – (Figura A.14) e as demais temperaturas obtidas dentro um tanque de aquecimento. Conhecendo-se as temperaturas de equilíbrio quando o CP muda de uma condição mais quente para mais fria, o tempo em que se deu esse equilíbrio e as dimensões do CP obtém-se o valor da difusividade.

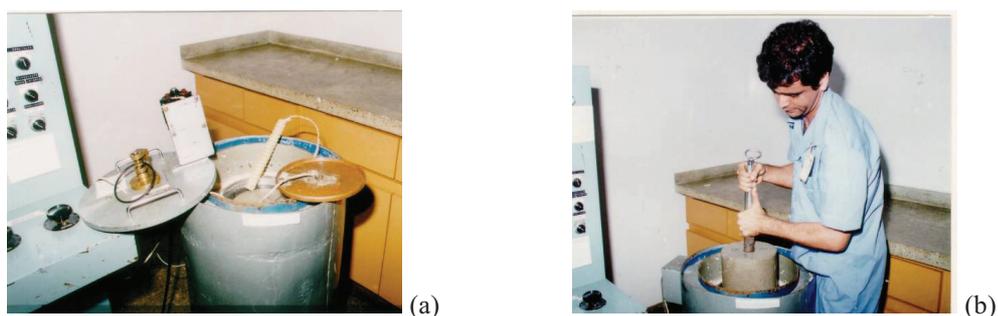


Figura A.12: Ensaio de calor específico: (a) Calorímetro com a tampa aberta; (b) Inserção do CP dentro do equipamento. (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

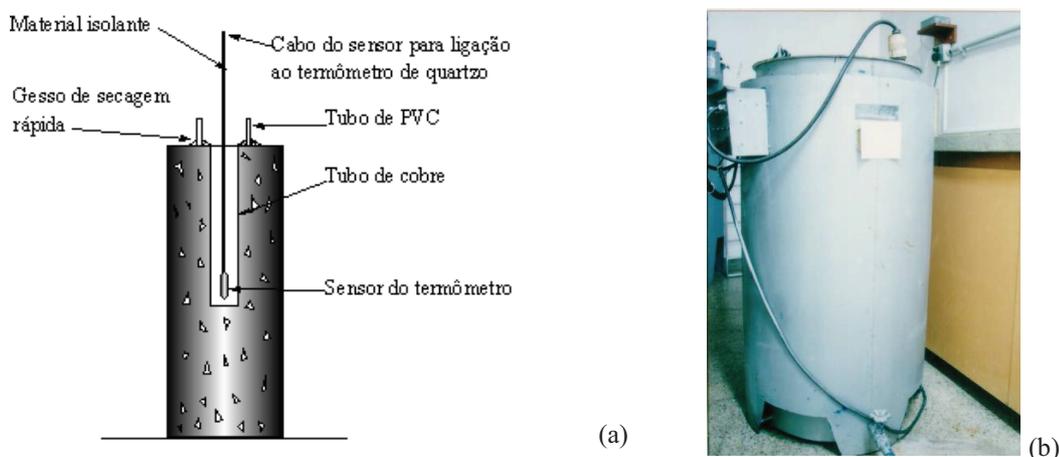


Figura A.13: Ensaio de difusividade térmica – Equipamento aquecedor: (a) Detalhe do CP dentro do equipamento; (b) Vista externa. (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

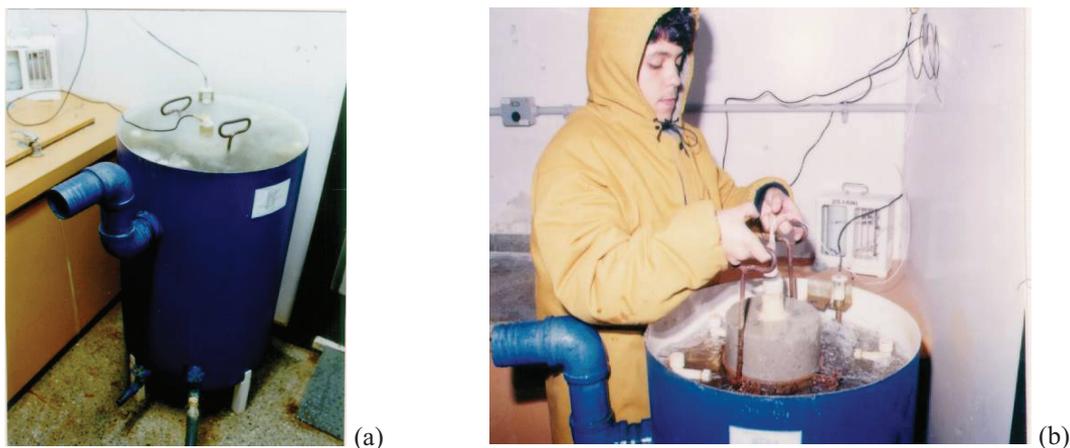


Figura A.14: Ensaio de difusividade térmica – Tanque resfriador: (a) Vista externa; (b) Imersão do CP no tanque. (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

O ensaio para determinação do coeficiente de dilatação térmica exige que os CP's sejam submetidos a ciclos de deformações variáveis, em ambientes de temperaturas diferentes e controladas. O coeficiente de dilatação térmica é definido como sendo a variação linear de um comprimento unitário, causada por uma variação unitária de temperatura. Esta propriedade é de fundamental importância na determinação das deformações e tensões de origem térmica no concreto e, portanto, deve ser obtida com a melhor precisão possível. A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003) sugere, quando não disponível por meio de ensaio, adotar seu valor igual a $10.10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$. Contudo, esse valor pode variar significativamente e sempre que possível deve ser obtido experimentalmente, como será executado neste programa experimental.

O ensaio de dilatação térmica requer que seja utilizado o extensômetro ótico embutido no concreto para a obtenção das medidas de deformação, semelhante ao realizado com extensômetro *Carlson* ilustrado na Figura A.15, quando os CP's são transferidos entre salas com temperatura média ambiente de 4°C , 23°C e 40°C . A partir da média das deformações medidas em relação às variações de temperatura em que os CP's são expostos determina-se o valor do ensaio. No caso deste programa experimental foi convencionado realizar este procedimento após o término do ensaio de retração autógena para aproveitamento dos CP's com extensômetro embutido.



Figura A.15: Extensômetro Embutido Tipo *Carlson* (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

Por fim, os ensaios das propriedades físicas do concreto foram estabelecidos para verificar possíveis oscilações dos valores de absorção, massa específica e índice de vazios no estado endurecido do concreto nas diversas dosagens estudadas. Os resultados desses ensaios podem trazer alguns indicativos de como as adições e aditivos plastificantes estão atuando na formação dos poros do concreto. Os ensaios foram executados nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias em CP's cilíndricos 10cmx20cm.

APÊNCIDE B – MOLDAGEM DAS DOSAGENS

Tabela B.1: Comportamento reológico das dosagens no estado fresco.

	S/ Aditivo			Plastificante			Superplastificante		
	Aa (%)	Slump (mm)	MU (kg/m ³)	Aa (%)	Slump (mm)	MU (kg/m ³)	Aa (%)	Slump (mm)	MU (kg/m ³)
S/ Adição	0,9	95	2303	1,2	110	2334	0,7	140	2327
Superpoz.	1,5	70	2270	0,9	80	2301	0,9	90	2294
Pozolana	1,0	55	2263	0,6	65	2294	1,0	70	2268
Cimentícia	0,6	85	2321	1,0	125	2288	0,6	130	2314

* Aa = Ar aprisionado; MU = Massa unitária.



Figura B.1: Abatimento do tronco de cone (*Slump*) de todas as combinações testadas.

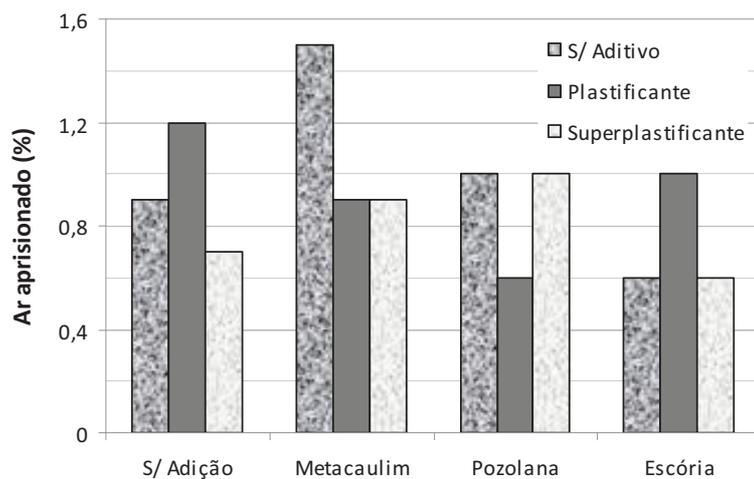


Figura B.2: Ar aprisionado no estado fresco nas dosagens estudadas. (Botassi *et al.*, 2009)

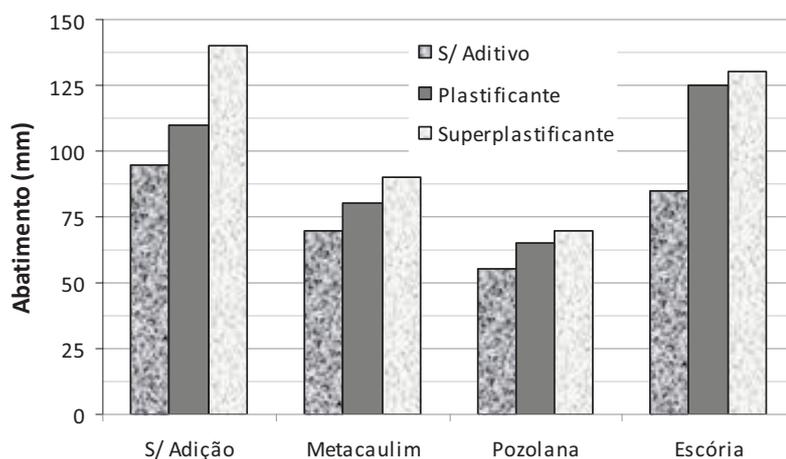


Figura B.3: Abatimento nas dosagens estudadas. (Botassi *et al.*, 2009)

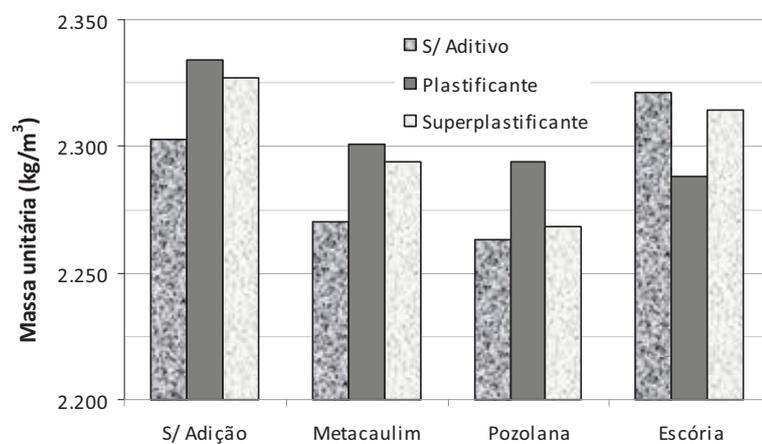


Figura B.4: Massa unitária no estado fresco nas dosagens estudadas. (Botassi *et al.*, 2009)

APÊNCIDE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS

Tabela C.1: Resultados individuais de resistência à compressão.

Variável Resposta: f_{cj} (MPa)	Idade (dia)			
	1	3	7	28
Referência (Ref)	12,34	20,74	27,46	31,09
	12,66	22,6	27,23	33,72
	11,84	19,55	26,96	35,35
Metacaulim (SPz)	7,72	17,86	28,85	39,8
	7,70	19,54	30,93	37,41
	8,13	19,78	31,17	39,81
Argila Calcinada (Pz)	5,64	20,63	30,31	37,02
	5,3	19,24	31,7	38,09
	5,34	18,88	32,32	36,52
Superplastificante (SPI)	6,65	20,25	23,94	35,17
	6,95	17,49	22,22	34,59
	6,76	21,79	24,92	29,13
Plastificante (PI)	6,62	22,9	28,44	36,54
	6,14	22,94	27,29	33,75
	6,21	22,34	29,25	31,93
Escória de AF (Cim)	4,03	14,85	24,05	37,88
	4,15	15,46	24,02	37,75
	3,63	15,00	24,96	36,83
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	10,33	20,98	30,43	32,62
	9,99	20,14	31,55	38,44
	10,24	19,38	30,29	38,82
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	6,60	23,45	33,5	39,55
	9,20	23,4	31,78	35,91
	9,56	23,98	28,97	40,72
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	5,59	23,42	27,32	38,03
	7,03	21,33	25,77	35,83
	5,68	21,55	31,50	36,40
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	6,28	24,20	30,50	41,34
	5,73	24,13	32,01	38,26
	6,13	23,79	27,80	42,07
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	1,98	14,95	27,7	37,2
	1,94	14,46	26,98	36,89
	1,97	14,57	26,15	38,6
Escória + Plast. (Cim+PI)	2,45	11,97	25,68	41,39
	2,67	11,81	25,81	37,13
	2,24	11,77	25,97	34,28

Tabela C.2: Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral.

Variável Resposta: fct,sp (MPa)	Idade (dia)			
	1	3	7	28
Referência (Ref)	1,31	1,92	2,36	2,41
	1,29	2,31	2,26	2,48
	1,51	1,86	2,31	2,72
Metacaulim (SPz)	1,00	1,73	2,67	3,10
	0,81	1,55	2,39	2,95
	1,01	1,73	2,70	3,10
Argila Calcinada (Pz)	0,98	2,16	2,87	2,67
	0,88	2,00	2,55	2,78
	0,91	2,04	2,73	3,22
Superplastificante (SPI)	0,69	2,16	2,78	2,71
	0,65	2,13	2,16	2,82
	0,77	2,21	2,09	2,65
Plastificante (PI)	1,32	2,11	2,66	3,23
	1,07	2,21	3,15	3,14
	0,91	1,87	3,05	2,55
Escória de AF (Cim)	0,73	1,85	2,38	3,18
	0,8	1,76	1,88	3,52
	0,77	1,81	2,13	3,34
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	1,13	1,96	2,71	2,7
	1,09	2,2	2,79	3,02
	1,05	2,06	2,39	2,78
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	1,60	2,34	2,47	3,28
	1,62	2,29	2,58	3,33
	1,45	1,65	2,67	3,21
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	0,90	2,06	2,82	3,03
	0,84	1,93	2,64	3,24
	0,72	1,95	2,96	3,10
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	1,10	2,30	2,76	3,29
	0,89	2,27	2,53	3,02
	0,88	1,74	2,29	3,04
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	0,73	1,85	2,38	3,18
	0,80	1,76	1,88	3,52
	0,77	1,81	2,13	3,34
Escória + Plast. (Cim+PI)	0,41	1,6	3,02	3,71
	0,44	1,32	3,15	3,86
	0,41	1,43	3,15	3,94

Tabela C.3: Resultados individuais de módulo de elasticidade.

Variável Resposta: E (GPa)	Idade (dia)			
	1	3	7	28
Referência (Ref)	12,2	14,0	17,3	26,2
	14,1	16,6	16,5	23,6
	12,3	13,8	16,3	25,9
Metacaulim (SPz)	9,4	13,0	17,8	23,8
	9,3	10,2	17,6	24,6
	9,8	16,8	17,2	23,6
Argila Calcinada (Pz)	7,9	15,1	18,3	20,2
	7,7	14,7	17,0	18,6
	7,8	14,7	18,0	19,1
Superplastificante (SPI)	9,7	18,0	19,6	19,5
	8,9	15,8	17,8	19,2
	10,7	17,0	18,2	19,0
Plastificante (PI)	11,0	13,6	15,8	23,3
	11,0	14,4	16,4	23,3
	12,6	14,2	16,7	21,6
Escória de AF (Cim)	8,9	12,3	14,8	21,7
	9,0	11,8	15,0	21,4
	9,0	12,1	14,3	21,5
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	10,0	15,2	19,4	19,8
	11,3	14,6	19,3	21,1
	11,6	15,8	19,8	19,8
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	12,9	16,6	25,9	23,8
	13,3	15,8	20,5	23,7
	12,7	16,2	23,0	23,3
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	8,3	12,0	15,9	21,0
	7,3	14,0	15,8	20,6
	9,1	12,7	16,2	21,0
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	9,0	15,6	17,4	21,9
	9,2	15,5	18,7	19,5
	9,9	15,0	18,7	21,4
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	6,3	15,1	17,5	24,4
	5,5	14,9	17,5	25,5
	5,1	14,6	18,6	23,3
Escória + Plast. (Cim+PI)	5,5	12,7	14,7	22,0
	5,9	12,6	14,2	23,8
	6,2	12,6	15,5	24,3

Tabela C.4: Elevação adiabática de temperatura – Dosagens sem mistura.

Dias	Temperatura (°C)					
	Ref	SPz	Pz	SPI	PI	Cim
0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,04	0,6	0,4	2,9	0,6	0,6	0,4
0,08	1,4	1,3	3,9	0,8	0,9	1,0
0,13	2,8	2,6	6,2	0,9	1,2	2,2
0,17	5,4	4,5	8,2	1,3	1,4	3,9
0,21	10,2	7,8	9,7	2,1	1,6	6,6
0,25	15,8	10,6	11,6	3,5	2,1	8,0
0,29	19,4	13,0	13,5	5,4	3,1	8,8
0,33	22,5	15,2	15,5	9,1	5,1	10,1
0,38	25,4	17,7	17,7	12,7	9,5	11,2
0,42	27,9	20,0	19,9	15,7	12,2	11,9
0,46	30,1	22,1	22,3	19,1	14,5	13,4
0,50	31,9	25,0	25,2	21,7	17,3	14,7
0,54	33,2	27,8	28,5	24,4	20,3	16,1
0,58	34,2	29,6	31,8	27,2	23,4	17,7
0,63	35,1	32,1	34,3	29,3	26,2	19,3
0,67	35,9	34,4	35,9	31,6	28,8	21,1
0,71	36,6	36,6	37,0	33,2	31,1	22,9
0,75	37,2	38,2	37,8	34,4	32,9	24,5
0,79	37,9	39,7	38,4	35,5	34,5	26,0
0,83	38,4	40,4	38,8	36,5	35,8	27,5
0,88	39,0	41,0	39,1	37,3	36,8	28,8
0,92	39,6	41,5	39,5	38,0	37,8	29,9
0,96	40,2	41,9	39,7	38,5	38,6	31,0
1,00	40,7	42,4	40,0	39,5	39,4	32,2
2,00	46,3	46,2	43,1	46,9	48,2	44,0
3,00	46,7	47,5	44,5	48,6	50,0	46,9
4,00	46,7	47,8	45,6	49,4	50,5	48,0
5,00	46,7	48,1	46,4	49,7	50,6	48,6
6,00	46,7	48,1	46,8	49,9	50,6	49,0
7,00	46,7	48,1	47,0	50,0	50,6	49,3
8,00	46,7	48,1	47,0	50,0	50,6	49,4
9,00	46,7	48,1	47,0	50,1	50,6	49,4
10,00	46,7	48,1	47,0	50,1	50,6	49,4
11,00	46,7	48,1	47,0	50,1	50,6	49,4
12,00	46,7	48,1	47,0	50,1	50,6	49,4
13,00	46,7	48,1	47,0	50,1	50,6	49,4
14,00	46,7	48,1	47,0	50,1	50,6	49,4

Tabela C.5: Elevação adiabática de temperatura – Dosagens com mistura.

Dias	Temperatura (°C)					
	SPz + PI	SPz + SPI	Pz + PI	Pz + SPI	Cim + PI	Cim + SPI
0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,04	0,7	0,6	0,3	0,7	0,2	0,0
0,08	0,9	1,0	0,9	1,3	0,4	0,0
0,13	1,5	1,3	2,3	2,6	0,6	0,1
0,17	2,7	1,8	4,4	5,2	0,7	0,2
0,21	5,4	2,7	5,5	7,1	0,8	0,2
0,25	7,4	4,4	6,7	8,4	1,1	0,3
0,29	9,2	6,8	7,8	9,9	1,4	0,4
0,33	11,1	11,0	9,1	11,5	2,1	0,4
0,38	14,3	15,1	10,7	13,4	3,1	0,5
0,42	17,4	17,9	12,6	14,1	4,1	0,7
0,46	20,9	20,7	14,5	15,8	6,9	0,9
0,50	24,0	23,4	16,5	18,1	8,0	1,4
0,54	26,4	25,9	19,0	20,5	8,8	2,2
0,58	29,6	28,3	22,0	23,4	9,8	3,2
0,63	32,4	30,5	25,7	26,7	10,7	4,5
0,67	35,6	32,9	29,8	29,2	11,8	6,2
0,71	38,0	35,8	32,6	30,7	12,9	8,2
0,75	39,9	38,1	34,4	32,8	14,0	9,4
0,79	41,2	39,7	35,5	34,4	15,1	10,5
0,83	42,4	40,8	36,3	35,6	16,2	11,6
0,88	43,0	41,6	36,8	36,3	17,4	12,8
0,92	43,5	42,1	37,2	36,7	18,7	14,0
0,96	43,9	42,5	37,6	37,2	20,0	15,2
1,00	44,2	42,9	37,9	37,6	21,4	16,5
2,00	48,3	46,9	41,7	40,9	45,7	40,3
3,00	50,1	48,5	43,5	42,1	50,6	44,9
4,00	51,0	49,6	44,8	42,7	52,2	46,8
5,00	51,6	50,3	45,4	43,1	53,1	47,7
6,00	51,9	50,9	45,8	43,3	53,9	48,3
7,00	52,2	51,3	46,0	43,5	54,5	48,7
8,00	52,4	51,6	46,1	43,6	55,0	48,9
9,00	52,7	51,8	46,2	43,6	55,5	49,2
10,00	52,9	51,9	46,2	43,6	56,0	49,3
11,00	53,1	51,9	46,1	43,6	56,3	49,4
12,00	53,3	51,9	46,1	43,6	56,7	49,4
13,00	53,5	51,9	46,1	43,6	57,1	49,5
14,00	53,6	51,9	46,1	43,6	57,4	49,5

Tabela C.6: Resultados individuais de calor específico.

Dosagens	Calor específico (J/(kg.°C))	
	CP1	CP2
Referência (Ref)	1113	1116
Metacaulim (SPz)	1194	1175
Argila Calcinada (Pz)	1221	1208
Superplastificante (SPI)	1229	1199
Plastificante (PI)	1235	1240
Escória de AF (Cim)	1184	1229
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	1156	1170
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	1206	1212
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	1250	1216
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	1124	1158
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	1178	1165
Escória + Plast. (Cim+PI)	1090	1105

Tabela C.7: Resultados individuais de difusividade térmica.

Dosagens	Difusividade (m ² /dia)	
	CP1	CP2
Referência (Ref)	0,076	0,076
Metacaulim (SPz)	0,072	0,074
Argila Calcinada (Pz)	0,063	0,063
Superplastificante (SPI)	0,073	0,075
Plastificante (PI)	0,073	0,074
Escória de AF (Cim)	0,065	0,067
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	0,066	0,066
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	0,069	0,069
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	0,071	0,072
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	0,066	0,067
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	0,066	0,065
Escória + Plast. (Cim+PI)	0,065	0,066

Tabela C.8: Resultados individuais de coeficiente de dilatação térmica.

Dosagens	Coef. Dilatação (10 ⁻⁶ /°C)	
	CP1	CP2
Referência (Ref)	8,86	7,48
Metacaulim (SPz)	9,09	8,45
Argila Calcinada (Pz)	8,15	8,65
Superplastificante (SPI)	7,85	7,75
Plastificante (PI)	8,03	7,55
Escória de AF (Cim)	8,02	7,22
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	8,90	9,07
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	9,27	9,34
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	8,89	9,02
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	9,23	8,65
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	9,16	9,14
Escória + Plast. (Cim+PI)	10,33	10,02

Tabela C.9: Resultados individuais de retração autógena.

Dosagens	Retração autógena ($10^{-6}/\ln$)	
	CP1	CP2
Referência (Ref)	60,0	51,4
Metacaulim (SPz)	102,2	97,8
Argila Calcinada (Pz)	85,3	98,0
Superplastificante (SPI)	42,6	37,2
Plastificante (PI)	37,7	37,0
Escória de AF (Cim)	115,0	114,3
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	74,10	76,90
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	71,0	74,6
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	81,1	91,8
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	87,07	102,49
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	108,30	99,50
Escória + Plast. (Cim+PI)	114,9	111,1

Tabela C.10: Resultados individuais da taxa de fluência básica.

Variável Resposta: F_j ($10^{-6}/\ln(t).MPa$)	Idade de início de carregamento (dia)		
	1	3	7
Referência (Ref)	22,51	11,25	11,99
	18,51	12,67	8,99
Metacaulim (SPz)	45,80	12,99	4,68
	45,62	10,23	3,82
Argila Calcinada (Pz)	40,40	8,03	4,98
	24,32	8,71	4,38
Superplastificante (SPI)	44,85	15,65	9,53
	56,45	13,33	10,13
Plastificante (PI)	31,67	11,91	8,16
	36,90	11,15	7,74
Escória de AF (Cim)	101,33	7,14	1,54
	69,47	7,84	3,34
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	45,50	23,27	7,62
	35,62	20,17	8,46
Metacaulim + Plast. (SPz +PI)	29,20	6,90	5,41
	27,28	8,61	4,53
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	44,32	3,12	2,54
	16,56	3,00	1,62
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	7,41	6,56	3,29
	11,61	4,04	3,59
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	156,9	5,15	5,07
	161,32	10,81	3,63
Escória + Plast. (Cim+PI)	101,82	14,43	6,17
	95,00	16,45	8,22

Tabela C.11: Resultados individuais de fluência específica ($10^{-6}/\text{MPa}$)
– Idade de início de carregamento de 1 dia.

Idade (dia)	Ref	SPz	Pz	Cim	PI	SPI	SPz +PI	SPz + SPI	Pz +PI	Pz + SPI	Cim + PI	Cim + SPI
1	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-13,1	-9,8	3,3	-28,0	-41,9	-21,5	-12,4	-12,4	-21	-16,9	-52,9	-55,0
3	-21,3	-15	-19,8	-34,2	-56,2	-49,7	-23,4	-29,4	-47,3	-39,5	-64,8	-105,2
4	-28,1	-53	-27,3	-104,3	-75,8	-109,2	-39,6	-69,5	-112	-41,6	-47,6	-155,8
5	-32,6	-66,5	-79,9	-157,0	-89,1	-138,5	-80,1	-82,5	-124,7	-80,7	-68,4	-190,3
6	-37,0	-72,6	-103,0	-182,3	-97,4	-179,5	-91,8	-91,8	-140,3	-94,4	-99,8	-213,7
11	-47,2	-90,8	-108,5	-171,0	-115,0	-183,6	-103,5	-100,1	-150,8	-172,5	-150,6	-303,5
15	-53,8	-114,3	-127,3	-194,7	-133,9	-192,9	-110,4	-108,3	-162	-197,7	-180,8	-352,6
21	-58,6	-144,0	-126,7	-183,2	-146,1	-195,7	-113	-121,3	-166,5	-202,0	-220,3	-495,2
26	-60,2	-149,0	-124,7	-209,1	-149,7	-197,5	-114,9	-133,6	-150,9	-201,0	-290,6	-349,7
33	-64,9	-142,0	-122,0	-220,3	-151,8	-197,6	-113,1	-138,2	-163,6	-183,7	-487,0	-553,0
40	-69,6	-149,0	-121,9	-211,5	-154,0	-196,1	-109,9	-146,7	-163,2	-178,3	-457,4	-544,9
49	-70,8	-148,0	-118,9	-234,5	-153,7	-199,7	-113,8	-148,2	-150,2	-174,8	-379,6	-529,9
54	-74,2	-150,0	-120,9	-248,5	-148,6	-207,5	-113,6	-153,6	-144,8	-170,7	-409,7	-543,2
60	-76,0	-151,0	-109,3	*	-149,9	-222,5	-76	-151	-109,3	*	-419,6	-544,3
68	-77,3	-151,2	-116,1	*	-145,2	-220,0	-77,3	-151,2	-116,1	*	-409,8	-525,8
77	-81,0	-151,1	-111,4	*	-147,8	-221,8	-81	-151,1	-111,4	*	-411,0	-533,7
84	-82,7	-149,8	-114,4	*	-147,3	-220,3	-82,7	-149,8	-114,4	*	*	*
89	-83,3	-149,2	*	*	-149,8	-218,5	-83,3	-149,2	*	*	*	*
92	-83,8	-148,7	*	*	-150,6	-214,0	-83,8	-148,7	*	*	*	*

* Finalizado mais cedo devido a limitações no ensaio.

Tabela C.12: Resultados individuais de fluência específica ($10^{-6}/\text{MPa}$)
– Idade de início de carregamento de 3 dias.

Idade (dia)	Ref	SPz	Pz	Cim	PI	SPI	SPz +PI	SPz + SPI	Pz +PI	Pz + SPI	Cim + PI	Cim + SPI
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-6,3	-14,5	-4,2	-15,6	-6,6	-20,3	-6,9	-22,7	-10,1	-3,5	-10,4	-8,7
3	-10,5	-24,3	-14,3	-20,0	-10,9	-23,3	-18,6	-30,9	-12,5	-11,3	-16,0	-17,0
4	-13,4	-29,5	-17,9	-22,5	-14,4	-25,3	-22,1	-36,7	-14,9	-14,5	-15,9	-23,1
5	-16,8	-35,0	-20,1	-22,5	-17,5	-28,4	-24,4	-41,3	-16,3	-16,5	-16,0	-27,9
9	-24,1	-37,6	-21,8	-22,6	-20,2	-39,1	-26,3	-45,5	-17,7	-18,1	-18,7	-31,0
13	-27,4	-44,8	-25,4	-25,0	-26,1	-41,7	-29,7	-53,7	-19,1	-20,9	-18,6	-33,6
19	-30,4	-46,7	-27,9	-24,7	-30,8	-46,5	-32,2	-62,0	-21,0	-19,0	-21,5	-39,3
24	-32,7	-48,0	-29,1	-26,4	-33,2	-47,7	-33,4	-66,0	-20,7	-20,4	-22,6	-44,1
31	-34,9	-50,3	-30,3	-26,1	-35,5	-50,6	-34,3	-70,9	-25,0	-19,0	-33,7	-41,9
38	-36,0	-49,8	-31,2	-26,4	-37,0	-51,5	-34,3	-73,5	-25,4	-19,7	-52,5	-45,0
47	-35,8	-49,0	-31,9	-26,8	-38,4	-52,7	-57,5	-76,9	-26,1	-19,8	-54,5	-44,0
52	-37,6	-50,6	-32,1	-29,1	-39,2	-54,5	-35,8	-78,4	-26,7	-15,3	-50,8	-41,4
58	-37,9	-55,7	-32,5	*	-40,8	-54,3	-36,5	-81,8	-27,1	-16,3	-51,7	-39,8
66	-38,7	-56,4	-32,9	*	-41,4	-57,1	-36,7	-85,2	-26,7	-18,8	-51,9	-37,6
75	-40,3	-57,8	-33,0	*	-42,9	-59,0	-37,1	-88,1	-26,6	-14,6	-51,7	-34,6
82	-40,4	-56,9	-33,4	*	-44,4	-60,5	-37,1	-89,4	-26,8	-17,8	-61,7	-32,3
87	-41,0	-56,9	-31,5	*	-45,5	-60,8	-38,1	-92,6	-26,8	-19,6	-63,4	-29,0
90	-41,2	-56,1	-30,2	*	-46,8	-62,8	-37,8	-93,4	-26,9	-26,1	-62,6	-32,4

* Finalizado mais cedo devido a limitações no ensaio.

Tabela C.13: Resultados individuais de fluência específica ($10^{-6}/\text{MPa}$)
 – Idade de início de carregamento de 7 dias.

Idade (dia)	Ref	SPz	Pz	Cim	PI	SPI	SPz +PI	SPz + SPI	Pz +PI	Pz + SPI	Cim + PI	Cim + SPI
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	-8,7	-3,0	-2,4	-1,6	-3,4	-4,9	-3,0	-4,8	-2,4	-3,0	-1,9	-3,0
5	-12,1	-5,7	-4,0	-3,2	-9,2	-9,1	-5,2	-7,8	-4,0	-4,2	-2,9	-4,8
6	-13,9	-9,7	-7,5	-4,4	-14,0	-18,7	-6,1	-13,1	-5,3	-5,5	-3,7	-9,6
7	-15,6	-10,0	-9,9	-5,0	-16,7	-21,9	-9,3	-15,2	-7,2	-5,8	-4,5	-12,8
12	-20,8	-12,5	-11,7	-6,0	-19,5	-25,4	-10,0	-16,6	-8,1	-7,0	-5,7	-14,0
15	-23,8	-13,9	-13,2	-6,4	-21,3	-27,3	-11,9	-17,7	-8,0	-7,0	-7,9	-15,4
20	-25,8	-14,7	-14,0	-6,7	-22,9	-29,9	-13,3	-20,2	-11,1	-7,4	-11,8	-35,4
22	-27,4	-16,1	-15,3	-7,1	-24,0	-31,0	-14,7	-22,9	-11,7	-7,2	-15,9	-16,1
27	-29,4	-16,0	-15,9	-8,7	-25,8	-33,3	-15,5	-24,4	-13,0	-7,7	-17,2	-16,1
29	-29,4	-15,7	-16,4	-8,9	-26,5	-33,7	-16,5	-26,1	-13,3	-7,6	-17,3	-16,2
30	-29,6	-16,1	-17,0	-8,5	-28,3	-36,1	-17,1	-27,2	-13,6	-7,1	-18,3	-16,0
32	-30,0	-17,8	-17,8	-8,7	-29,3	-36,5	-17,6	-29,0	-13,9	-6,9	-18,7	-16,0
39	-31,8	-18,3	-18,5	-8,9	-30,5	-37,9	-18,0	-30,4	-13,9	-7,5	-19,4	-15,7
48	-32,7	-18,7	-19,1	-8,9	-31,2	-38,7	-18,9	-31,0	-14,2	-9,0	-20,6	-14,7
53	-33,2	-18,9	-19,1	-9,0	-32,4	-39,6	-19,5	-32,0	-14,3	-6,9	-24,2	-16,0
57	-34,0	-19,1	-19,1	*	-33,2	-40,9	-19,9	-29,1	-14,3	-8,4	-25,3	-15,7
62	-34,3	-19,0	-19,1	*	-34,4	-42,1	-20,7	-33,0	-14,4	-10,3	-26,1	-16,8
71	-35,6	-19,8	-19,5	*	-35,3	-42,7	-20,9	-34,9	-14,6	-13,1	-27,2	-16,7
78	-38,1	-19,0	-19,8	*	-35,4	-42,8	-21,3	-35,7	-14,8	-14,3	-27,8	*
85	-38,8	-18,3	-19,2	*	-35,5	-42,8	-21,3	-35,9	-14,8	-12,3	-28,1	*
92	-40,0	-18,9	-19,2	*	-35,5	*	-21,8	-36,3	-14,9	*	-29,0	*

* Finalizado mais cedo devido a limitações no ensaio.

Tabela C.14: Resultados de absorção, índice de vazios e massa específica na situação saturada do concreto.

Propriedades Complementares		Idade (dia)			
		1	3	7	28
Referência (Ref)	Absorção (%)	8,29	7,99	8,58	8,12
	Índice de vazios (%)	17,65	17,09	18,32	17,47
	Massa espec. (kg/m ³)	2306	2310	2319	2325
Metacaulim (SPz)	Absorção (%)	8,72	*	*	8,06
	Índice de vazios (%)	18,57	*	*	17,32
	Massa espec. (kg/m ³)	2316	*	*	2321
Argila Calcinada (Pz)	Absorção (%)	8,82	9,36	9,58	10,42
	Índice de vazios (%)	18,61	19,45	19,92	21,39
	Massa espec. (kg/m ³)	2296	2274	2279	2267
Superplastificante (SPI)	Absorção (%)	8,86	8,45	8,01	7,54
	Índice de vazios (%)	18,61	17,92	16,97	16,23
	Massa espec. (kg/m ³)	2286	2298	2290	2314
Plastificante (PI)	Absorção (%)	7,99	8,04	7,70	6,97
	Índice de vazios (%)	17,29	17,37	16,71	15,26
	Massa espec. (kg/m ³)	2337	2334	2338	2343
Escória de AF (Cim)	Absorção (%)	9,67	8,97	8,11	8,54
	Índice de vazios (%)	20,32	18,98	17,16	18,24
	Massa espec. (kg/m ³)	2305	2305	2289	2319
Escória + Superplast. (Cim+SPI)	Absorção (%)	8,44	8,66	7,70	7,43
	Índice de vazios (%)	18,42	18,70	16,93	16,51
	Massa espec. (kg/m ³)	2367	2345	2369	2386
Metacaulim + Superplast. (SPz +SPI)	Absorção (%)	9,02	8,99	9,25	8,87
	Índice de vazios (%)	19,28	19,21	19,56	18,99
	Massa espec. (kg/m ³)	2330	2328	2312	2332
Argila Calc. + Plast. (Pz+PI)	Absorção (%)	10,12	9,77	10,00	9,68
	Índice de vazios (%)	21,90	20,55	20,99	20,43
	Massa espec. (kg/m ³)	2296	2308	2308	2315
Argila Calc. + Superplast. (Pz +SPI)	Absorção (%)	9,81	10,15	9,62	9,55
	Índice de vazios (%)	20,50	21,09	20,24	20,19
	Massa espec. (kg/m ³)	2300	2289	2306	2315
Escória + Plast. (Cim+PI)	Absorção (%)	11,42	8,36	6,50	8,58
	Índice de vazios (%)	23,21	17,72	13,95	18,21
	Massa espec. (kg/m ³)	2264	2296	2285	2304

* Ocorreram problemas durante a execução dos ensaios, impossibilitando a obtenção dos resultados pretendidos.

APÊNCIDE D – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Tabela D.1: Análise de variância – Fluência básica para $t_0 = 1$ dia.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	30.792,53	3	10.264,18	102,34	3,49	É significativo
Aditivo	3.619,74	2	1.809,87	18,05	3,89	É significativo
Adição x Aditivo	4.447,02	6	741,17	7,39	3,00	É significativo
Erro aleatório	1.203,57	12	100,30	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.2: Análise de variância – Fluência básica para $t_0 = 3$ dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	234,76	3	78,25	26,24	3,49	É significativo
Aditivo	18,97	2	9,48	3,18	3,89	Não Significativo
Adição x Aditivo	307,23	6	51,20	17,17	3,00	É significativo
Erro aleatório	35,79	12	2,98	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.3: Análise de variância – Fluência básica para $t_0 = 7$ dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	121,09	3	40,36	42,90	3,49	É significativo
Aditivo	1,56	2	0,78	0,83	3,89	Não Significativo
Adição x Aditivo	51,29	6	8,55	9,09	3,00	É significativo
Erro aleatório	11,29	12	0,94	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.4: Análise de variância – Retração autógena.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	13.882,7	3	4.627,55	148,00	3,49	É significativo
Aditivo	876,3	2	438,16	14,01	3,89	É significativo
Adição x Aditivo	621,9	6	103,66	3,32	3,00	É significativo
Erro aleatório	375,2	12	31,27	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.5: Análise de variância – Resistência à compressão $t = 1$ dia.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	211,50	3	70,50	219,95	2,89	É significativo
Aditivo	15,40	2	7,70	24,02	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	66,48	6	11,08	34,56	2,39	É significativo
Erro aleatório	7,69	24	0,32	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.6: Análise de variância – Resistência à compressão t=3 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	381,46	3	127,15	133,15	2,89	É significativo
Aditivo	22,63	2	11,31	11,85	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	72,47	6	12,08	12,65	2,39	É significativo
Erro aleatório	22,92	24	0,95	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.7: Análise de variância – Resistência à compressão t=7 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	173,61	3	57,87	27,20	2,89	É significativo
Aditivo	14,09	2	7,04	3,31	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	49,04	6	8,17	3,84	2,39	É significativo
Erro aleatório	51,07	24	2,13	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.8: Análise de variância – Resistência à compressão t=28 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	137,22	3	45,74	8,94	2,89	É significativo
Aditivo	18,70	2	9,35	1,83	3,28	Não Significativo
Adição x Aditivo	19,23	6	3,21	0,63	2,39	Não Significativo
Erro aleatório	122,79	24	5,12	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.9: Análise de variância – Resistência à tração t = 1 dia.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	2,22	3	0,74	78,82	2,89	É significativo
Aditivo	0,50	2	0,25	26,49	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	1,08	6	0,18	19,16	2,39	É significativo
Erro aleatório	0,23	24	0,01	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.10: Análise de variância – Resistência à tração t = 3 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	1,27	3	0,42	8,54	2,89	É significativo
Aditivo	0,02	2	0,01	0,19	3,28	Não Significativo
Adição x Aditivo	0,58	6	0,10	1,93	2,39	Não significativo
Erro aleatório	1,19	24	0,05	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.11: Análise de variância – Resistência à tração t = 7 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	0,11	3	0,04	0,73	2,89	Não Significativo
Aditivo	0,78	2	0,39	7,44	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	1,63	6	0,27	5,19	2,39	É significativo
Erro aleatório	1,26	24	0,05	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.12: Análise de variância – Resistência à tração t = 28 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	1,66	3	0,55	15,80	2,89	É significativo
Aditivo	1,16	2	0,58	16,60	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	0,90	6	0,15	4,29	2,39	Não Significativo
Erro aleatório	0,84	24	0,04	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.13: Análise de variância – Módulo de elasticidade t = 1 dia.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	130,90	3	43,63	99,72	2,89	É significativo
Aditivo	11,65	2	5,83	13,32	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	45,32	6	7,55	17,27	2,39	É significativo
Erro aleatório	10,50	24	0,44	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D-14: Análise de variância – Módulo de elasticidade t = 3 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	22,31	3	7,44	5,36	2,89	É significativo
Aditivo	9,23	2	4,62	3,32	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	40,05	6	6,68	4,81	2,39	É significativo
Erro aleatório	33,32	24	1,39	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.15: Análise de variância – Módulo de elasticidade t = 7 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	86,03	3	28,68	31,62	2,89	É significativo
Aditivo	15,18	2	7,59	8,37	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	69,98	6	11,66	12,86	2,39	É significativo
Erro aleatório	21,77	24	0,91	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.16: Análise de variância – Módulo de elasticidade t=28 dias.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	38,86	3	12,95	17,32	2,89	É significativo
Aditivo	15,97	2	7,98	10,67	3,28	É significativo
Adição x Aditivo	81,79	6	13,63	18,22	2,39	É significativo
Erro aleatório	17,96	24	0,75	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.17: Análise de variância – Calor específico.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	4.847	3	1.615,7	6,05	3,49	É significativo
Aditivo	2.384	2	1.191,9	4,46	3,89	É significativo
Adição x Aditivo	38.723	6	6.453,8	24,15	3,00	É significativo
Erro aleatório	3.207	12	267,3	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.18: Análise de variância – Difusividade térmica.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	2,63E-04	3	8,77E-05	107,1	3,49	É significativo
Aditivo	3,01E-06	2	1,50E-06	1,8	3,89	Não Significativo
Adição x Aditivo	1,16E-04	6	1,93E-05	23,5	3,00	É significativo
Erro aleatório	9,82E-06	12	8,19E-07	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.19: Análise de variância – Coeficiente de dilatação térmica.

Fonte de Variação	Somas Quadrática	Graus de Liberdade	Médias Quadrática	F calculado	F tabelado	Conclusão*
Adição	5,93	3	1,98	12,54	3,49	É significativo
Aditivo	1,65	2	0,82	5,22	3,89	É significativo
Adição x Aditivo	5,78	6	0,96	6,12	3,00	É significativo
Erro aleatório	1,89	12	0,16	* Para um nível de significância de 5%.		

Tabela D.20: Formação dos grupos homogêneos em ordem crescente de resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}).\ln(t)]$ – *Dosagens com adição mineral e sem aditivos.*

$t_0 = 1$ dia			$t_0 = 3$ dias			$t_0 = 7$ dias		
Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos
Ref	20,51	G1	Cim	7,49	G1	Cim	2,44	G1
Pz	32,36		Pz	8,37		SPz	4,25	
SPz	45,71		SPz	11,61		Pz	4,68	
Cim	85,40	G2	Ref	11,96		Ref	10,49	G2
Limite de decisão*	21,24		Limite de decisão*	3,66		Limite de decisão*	2,06	

Nota: * Foi utilizada a expressão 6.1 e parte dos dados da Tabela D.1 a D.3 para o cálculo do limite de decisão.

Tabela D.21: Formação dos grupos homogêneos em ordem crescente de resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}).\ln(t)]$ – *Dosagens com adições minerais e aditivo plastificante.*

$t_0 = 1$ dia			$t_0 = 3$ dias			$t_0 = 7$ dias		
Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos
Pz	9,51	G1	Pz	5,3	G1	Pz	3,44	G1
SPz	28,24		SPz	7,7525		SPz	4,97	
Ref	34,29			Ref	11,526	G2	Cim	7,198
Cim	98,41	G2	Cim	15,44	G3	Ref	7,949	
Limite de decisão*	21,24		Limite de decisão*	3,66		Limite de decisão*	2,06	

Nota: * Foi utilizada a expressão 6.1 e parte dos dados da Tabela D.1 a D.3 para o cálculo do limite de decisão.

Tabela D.22: Formação dos grupos homogêneos de resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}).\ln(t)]$ – *Dosagens com adições minerais e aditivo superplastificante.*

$t_0 = 1$ dia			$t_0 = 3$ dias			$t_0 = 7$ dias		
Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos
Pz	30,44	G1	Pz	3,06	G1	Pz	2,08	G1
SPz	40,56		Cim	7,98	G2	Cim	4,35	G2
Ref	50,65		Ref	14,49	G3	SPz	8,04	G3
Cim	159,11	G2	SPz	21,72	G4	Ref	9,83	
Limite de decisão*	21,24		Limite de decisão*	3,66		Limite de decisão*	2,06	

Nota: * Foi utilizada a expressão 6.1 e parte dos dados da Tabela D.1 a D.3 para o cálculo do limite de decisão.

Tabela D.23: Formação dos grupos homogêneos de resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}) \cdot \ln(t)]$ – *Dosagens com aditivos sem adição mineral.*

$t_0 = 1$ dia			$t_0 = 3$ dias			$t_0 = 7$ dias		
Aditivo	Média	Grupos	Aditivo	Média	Grupos	Aditivo	Média	Grupos
Ref	20,51	G1	Pl	11,53	G1	Pl	7,95	G1
Pl	34,29		Ref	11,96		SP1	9,83	
SP1	50,65		SP1	14,49		Ref	10,49	
Limite de decisão*		21,24	Limite de decisão*		3,66	Limite de decisão*		2,06

Nota: * Foi utilizada a expressão 6.1 e parte dos dados da Tabela D.1 a D.3 para o cálculo do limite de decisão.

Tabela D.24: Formação dos grupos homogêneos de resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}) \cdot \ln(t)]$ – *Dosagens com aditivos e adição de superpozolana.*

$t_0 = 1$ dia			$t_0 = 3$ dias			$t_0 = 7$ dias		
Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos
Pl	28,24	G1	Pl	7,75	G1	Ref	4,25	G1
SP1	40,56		Ref	11,61	G2	Pl	4,97	
Ref	45,71		SP1	21,72	G3	SP1	8,04	G2
Limite de decisão*		21,24	Limite de decisão*		3,66	Limite de decisão*		2,06

Nota: * Foi utilizada a expressão 6.1 e parte dos dados da Tabela D.1 a D.3 para o cálculo do limite de decisão.

Tabela D.25: Formação dos grupos homogêneos de resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}) \cdot \ln(t)]$ – *Dosagens com aditivos e adição de pozolana.*

$t_0 = 1$ dia			$t_0 = 3$ dias			$t_0 = 7$ dias		
Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos
Pl	9,51	G1	Pl	7,75	G1	SP1	2,08	G1
SP1	30,44		Ref	11,61	G2	Pl	3,44	
Ref	32,36		SP1	21,72	G3	Ref	4,68	
Limite de decisão*		21,24	Limite de decisão*		3,66	Limite de decisão*		2,06

Nota: * Foi utilizada a expressão 6.1 e parte dos dados da Tabela D.1 a D.3 para o cálculo do limite de decisão.

Tabela D.26: Formação dos grupos homogêneos de resultados de fluência básica $[(10^{-6}/\text{MPa}) \cdot \ln(t)]$ – *Dosagens com aditivos e adição cimentícia.*

$t_0 = 1$ dia			$t_0 = 3$ dias			$t_0 = 7$ dias		
Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos	Adição	Média	Grupos
Ref	85,40	G1	Ref	7,49	G1	Ref	2,44	G1
Pl	98,41		SP1	7,98		SP1	4,35	
SP1	159,11	G2	Pl	15,44	G2	Pl	7,20	G2
Limite de decisão*		21,24	Limite de decisão*		3,66	Limite de decisão*		2,06

Nota: * Foi utilizada a expressão 6.1 e parte dos dados da Tabela D.1 a D.3 para o cálculo do limite de decisão.