

Ildo Sponholz

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ADITIVOS
REDUTORES DE ÁGUA EM CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO**

**Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa
Catarina, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil.**

Florianópolis

1998

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Ildo Sponholz

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr

Florianópolis

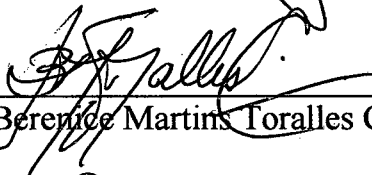
1998

FOLHA DE APROVAÇÃO

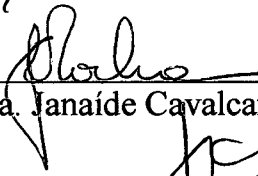
Dissertação defendida e aprovada em 28/08/1998,
pela comissão avaliadora.



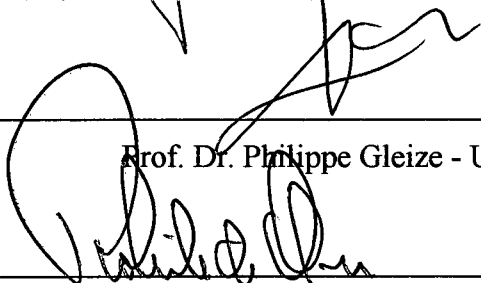
Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr - Orientador - Moderador



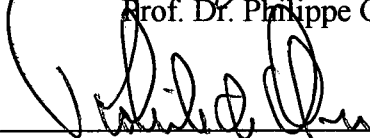
Prof. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari - UEL



Prof. Dra. Janaide Cavalcanti Rocha - UFSC



Prof. Dr. Philippe Gleize - UFSC



Prof. Dr. Roberto de Oliveira - Coordenador do CPGEC

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr, pela paciência na orientação competente e apoio na execução deste trabalho.

Aos professores e funcionários do curso de pós-graduação em Engenharia Civil, pelos ensinamentos e apoio recebido.

Aos colegas Luciana, Giovanna, Leila e Rafael, meu respeito e admiração pela dedicação no desenvolvimento da pesquisa. Aos amigos Ricardo, Gihad, Gerson, Flávio, Geralcy e Mário pela amizade e cooperação.

Aos colegas do Laboratório de Materiais (Luiz Henrique e Renato) pelo apoio e ajuda irrestritos durante a fase experimental da pesquisa.

À CAPES, pelo apoio financeiro desta pesquisa.

Às empresas que foram parceiras no desenvolvimento destas pesquisas: Cimento Itambé, Cimento Votoran, Sika, Reax, Holderchem, Mbt, Camargo Corrêa, Saibrita e Concreton, pela confiança depositada na pesquisa, que indica posturas de empresas modernas e participativas.

À Aline pelo carinho e apoio.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta pesquisa.

*Este trabalho é carinhosamente
dedicado àqueles que sempre acreditaram:*

*Meus pais, Anildo e Anita
e minhas irmãs, Iria e Ilane.*

SUMÁRIO

RESUMO	III
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	X
1- INTRODUÇÃO	1
1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2- OBJETIVOS	2
1.3- HIPÓTESES E PREMISSAS	3
1.4- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2- CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	6
2.1- DEFINIÇÃO	7
2.2- APLICAÇÕES	8
2.3- MATERIAIS CONSTITUINTES	11
2.4- COMPOSIÇÃO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO	23
2.5- PROCESSANDO O CONCRETÒ FRESCO	24
2.6- ESTRUTURA DO CONCRETO	27
2.7- PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	32
3- ADITIVOS	40
3.1- DEFINIÇÃO	40
3.2- CLASSIFICAÇÃO	41
3.3- PLASTIFICANTES	42
3.4- ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA DE ALTA EFICIÊNCIA	45
3.5- TRABALHABILIDADE	64
4- PESQUISA EXPERIMENTAL	70
4.1- SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	70
4.2- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	75
4.3- PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	79
4.4- METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	81
5- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	86
5.1- ENSAIOS EM PASTA	86
5.2- ENSAIOS EM ARGAMASSA	104
5.3- ENSAIOS EM CONCRETO	106
5.4- CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS EM PASTA E EM CONCRETO	123

6- CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
6.1- CONCLUSÕES	125
6.2- SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	128
7- ANEXOS.....	129
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172

RESUMO

Nos últimos anos o Concreto de Alto Desempenho (CAD) teve um aumento de utilização em muitos países, principalmente em edifícios altos, pontes, pavimentos, estruturas "offshore", elementos pré-fabricados e recuperação de estruturas. No Brasil, o emprego do CAD é recente e ainda muito restrito, isto devido a falta de conhecimento do meio técnico de suas vantagens em relação ao concreto convencional.

A obtenção do CAD está normalmente vinculada à utilização de aditivos redutores de água, que têm a função de dispersão das partículas de aglomerante e diminuição da demanda de água das misturas, devido à redução da tensão superficial da água e da formação de um filme lubrificante na superfície das partículas. Atualmente existem no mercado diversos aditivos com bases químicas diferentes, que podem apresentar comportamentos distintos quando utilizados em concreto. Este comportamento é influenciado principalmente pelo tipo de aditivo, dosagem e momento de colocação, tipo e marca de cimento, condições climáticas, procedimento de mistura entre outros.

A compatibilidade entre o cimento e aditivos redutores de água é um dos principais fatores determinantes para a produção otimizada de CAD. Entretanto, esta compatibilidade geralmente é medida em ensaios de concreto, que demandam tempo e grande quantidade de materiais. A presente pesquisa experimental objetiva estudar a eficiência de duas metodologias alternativas para o estudo da compatibilidade da dupla cimento-aditivo redutor de água: consistência de pastas (Método de Kantro) e consistência de argamassas (Método do Flow-Table).

Os resultados obtidos pelos métodos alternativos propostos foram comparados com ensaio de consistência (método de abatimento tronco de cone) em algumas dosagem em CAD. Observou-se boas correlações entre os ensaios em pasta e em concreto, demonstrando assim a sua viabilidade para a seleção da dupla cimento-aditivo. Ainda foram avaliadas outros parâmetros no CAD como a perda de fluidez com o tempo, influência do aditivo na resistência à compressão, teor de agregado incorporado e o aparecimento de efeitos secundários.

ABSTRACT

In recent years High-Performance Concrete (HPC) has had an increase in use in many countries, mainly in buildings, bridges, pavements, offshore and repair structures. In Brazil, the use of High-Performance Concrete is recent and still very restrict, due to the lack of technical knowledge of its advantages compared to those of ordinary concrete.

The means of obtaining High-Performance Concrete is usually linked to the use of water reducer admixtures, which have the function of causing the dispersion of the binder and the reduction in the need of water in mixtures due to the decrease in the water surface tension and the forming of a lubricating film on the particles surface. There are on the market several kinds of admixtures with different chemical bases, which can give different results when used in concrete. These results are mainly influenced by the kind of admixture, mix proportions, time of addition, type and brand of cement, weather conditions, mixture procedure, etc.

The compatibility between cement and water reducer admixtures is one of the most determinant factors to the optimized production of HPC. However, this compatibility is usually measured in concrete test, which demands time and great amount of material. This experimental research project aims to study the efficiency of two alternative methodologies to study the compatibility of the couple cement-water reducer admixtures: fluidity of paste (Kantro Method) and mortar consistence (Flow-Table Method).

The results of the proposed alternative methods were compared to those of slump test in some mixes of HPC. It could be observed good correlation between the paste and concrete tests, which demonstrated a good viability to select the couple cement-admixture. Other parameters of HPC have been evaluated, like loss of workability along time, influence of the admixture in compressive strength, incorporation of aggregates and side effects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1	Utilização do aço e concreto de alta resistência nos 100 edifícios mais altos do mundo ao longo dos anos.....	8
Figura 2-2	Influência da sílica ativa no desenvolvimento dos cristais hidratadas. a) Nos concretos sem sílica ativa, os cristais de C-H formados na interface agregado-pasta têm uma orientação preferencial; b) a presença da sílica ativa altera a orientação, pois os cristais deixam de crescer apenas na superfície do agregado.....	22
Figura 2-3	Representação diagramática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto (METHA, 1994).	30
Figura 2-4	Distribuição dos poros detectados por imagem bse ao redor do agregado e na pasta em concreto de cimento Portland (controle) e em concreto com 15 % de sílica ativa que é característico da composição de CAR (SCRIVERNER et al).....	31
Figura 2-5	Representação esquemática na modificação da zona de transição. a) Concreto fresco sem sílica ativa, com grande espaço em volta do agregado (agg) preenchido pela água, devido à exsudação e ao empacotamento deficiente dos grãos de cimento (pc) na fronteira; b) zona de transição do mesmo sistema, em estágio de maior maturidade, mostrando o preenchimento da zona de transição com o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), mas ainda com espaços vazios, alguns dos quais preenchidos com materiais aciculares provavelmente etringita (ett); c) concreto fresco com sílica ativa, cujas as partículas (sf) preenchem o espaço a volta dos agregados, anteriormente ocupado, na fase (a) pela água; d) zona de transição menos porosa, obtida com o sistema (c) em estágio de maior maturidade (MONTEIRO, 1990).	32
Figura 2-6	Efeito de várias adições na tensão de cisalhamento e na viscosidade (GJORV, 1992).	33
Figura 3-1	(a) Fórmulas típicas de tensoativos empregados com aditivos redutores de água; (b) quando um tensoativo com vários grupos polares aniônicos na cadeia de hidrocarboneto é adicionado ao sistema água cimento, a cadeia polar é adsorvida na superfície da partícula de cimento (METHA, 1994).	43
Figura 3-2	Representação diagramática de formação de flocos pelas partículas de cimento antes da adição de um tensoativo redutor de água e a dispersão dos flocos após a adição (METHA, 1994).	44
Figura 3-3	Influência do teor de C_3A (C_3S e C_2S constantes) na diminuição da fluidez de argamassa, em relação a argamassa sem aditivo, adicionando 0,2% de aditivo de lignossulfonato (MASSAZZA e TESTOLIN citado por NEVILLE (1997)).	45
Figura 3-4	Adsorção do aditivo superplastificante pela partícula de cimento.....	48
Figura 3-5	Micrografia de partículas de cimento floculadas em uma suspensão de água-cimento (a) sem aditivo presente; (b) com aditivo superplastificante.	49
Figura 3-6	Representação do Abatimento do Tronco de Cone em função do tempo (CEMENT and CONCRETE ASSOCIATION, 1978).	52
Figura 3-7	Perda da consistência em função do tempo com concretos várias relações água/cimento (CHAN e FENG e TSANG, 1996).	52
Figura 3-8	Variação do abatimento com o tempo de 04 diferentes aditivos superplastificantes (NKINAMUBANZI, BAALBAKI e AICTIN, 1997).	53

Figura 3-9	Efeito do Tipo de Cimento na Perda do Abatimento do Tronco de Cone (MAILVAGANAN (1979) apud RAABE (1991)).	54
Figura 3-10	Eficiência da dosagem ótima de superplastificante variando a relação água/cimento (CHAN e FENG e TSANG, 1996).	55
Figura 3-11	Efeito do momento de colocação de um aditivo superplastificante a base de naftaleno no abatimento do concreto (COLLEPARDI, 1994 apud DAL MOLIN, 1995).	56
Figura 3-12	Retenção do abatimento com dosagens repetidas (CHAN, FENG e TSANG, 1996).	58
Figura 3-13	Resistência à compressão do concreto em função do tempo e do abatimento (GAGNÉ, BOISVERT e PIGEON, 1996).	62
Figura 3-14	Resistência à compressão do concreto com sílica ativa em função do tempo e do abatimento (GAGNÉ, BOISVERT e PIGEON, 1996).	63
Figura 3-15	Desenho do Cone de Kantro	68
Figura 3-16	Representação gráfica do ponto de saturação.	68
Figura 4-1	Prensa hidráulica utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial de corpos-de-prova de concreto.	77
Figura 4-2	Misturador mecânico.	78
Figura 4-3	Equipamentos utilizado no método de Kantro.	79
Figura 5-1	Área de espalhamento médio para dos dois operadores em função da relação a/c.	89
Figura 5-2	Demanda da água dos cimentos fornecidos pela empresa X.	90
Figura 5-3	Demanda da água dos cimentos fornecidos pela empresa Y.	91
Figura 5-11	Área de espalhamento para o cimento CPI-S e com substituição parcial por sílica ativa e respectivamente com adição de 0,5 + 2,0 % aditivo ADT2 (P + SP %).	92
Figura 5-5	Comparação da demanda de água dos cimentos fornecidos pelas empresas X e Y.	93
Figura 5-13	Área de espalhamento (cm ²) em função do teor de aditivo adicionado.	95
Figura 5-14	Variação da área de espalhamento (cm ²) em função do teor de aditivo adicionado.	96
Figura 5-15	Área de espalhamento em função do momento da adição do aditivo.	97
Figura 5-16	Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com cimento CPI-S.	99
Figura 5-17	Área de espalhamento das pastas aditivadas obtida com cimento CII-F.	100
Figura 5-18	Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com cimento CII-Z.	101
Figura 5-19	Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com cimento CII-V.	102
Figura 5-20	Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com cimento CPV.	103
Figura 5-21	Diâmetro de espalhamento das argamassa em função da relação água/materiais cimentantes e do tipo de cimento.	105
Figura 5-22	Diâmetro de espalhamento das argamassa obtidas com cimento CII-V (Y) em função da relação água/materiais cimentantes.	106
Figura 5-23	Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CPI-S (Y).	108
Figura 5-24	Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CII-F (Y).	108
Figura 5-25	Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CII-V (Y).	109
Figura 5-26	Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CPV (Y).	109
Figura 5-27	Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CPI-S (X).	110
Figura 5-28	Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CPI-S (Y).	114
Figura 5-29	Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CII-F (Y).	115
Figura 5-30	Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CII-V (Y).	115
Figura 5-31	Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CPV (Y).	116
Figura 5-32	Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CPI-S (X).	116

Figura 5-33 Resistência à compressão de concretos obtidos com os aditivos ADT2 e ADT3.....	119
Figura 5-34 Comparação entre o custo do m ³ de concreto produzido e a resistência à compressão obtida aos 28 dias.....	120
Figura 5-35 Estado final dos corpos-de-prova de concreto que apresentaram fissuração, lançamento e perda de massa.....	122
Figura 5-36 Estado final dos corpos-de-prova de concreto feito com o cimento CPIV (Y) e o aditivo ADT1 aos 28 dias.....	122
Figura 5-37 Comparação da compatibilidade dos aditivos em pasta e em concreto obtidos com o cimento CPI-S (Y).....	123
Figura 5-38 Comparação da compatibilidade dos aditivos em pasta e em concreto obtidos com o cimento CII-F (Y).	124
Figura 5-39 Comparação da compatibilidade dos aditivos em pasta e em concreto obtidos com o cimento CPV (Y).....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1	Potencialidades teóricas da utilização de materiais estruturais (de LARRARD, 1991).	9
Tabela 2-2	Consumo de materiais para execução de um pavimento de concreto com fck de 21 e 60 MPa (DAL MOLIN e WOLF, 1990).	10
Tabela 2-3	Calor de hidratação de compostos puros (NEVILLE, 1997).	13
Tabela 2-4	Efeito do tipo de controle de umidade dos agregados sobre a resistência à compressão e no desvio padrão (SCHALLER, 1992).	15
Tabela 2-5	Evolução da resistência de corpos-de-prova cilíndricos de concretos com sílica ativa em massa (NEVILLE, 1997).	22
Tabela 2-6	Relação Ca/Si com aumento do teor de sílica ativa (REGOURD et al).	28
Tabela 4-1	Características químicas e físicas da sílica ativa.	71
Tabela 4-2	Ensaio de caracterização química do cimento.	72
Tabela 4-3	Ensaio de caracterização física do cimento.	73
Tabela 4-4	Características químicas dos aditivos.	74
Tabela 4-5	Características do agregado graúdo e miúdo.	76
Tabela 4-6	Velocidade do misturador mecânico.	77
Tabela 4-7	Representação esquemática dos ensaios em pasta.	80
Tabela 4-8	Ordem de colocação dos materiais na betoneira.	84
Tabela 5-1	Resultados médios da área de espalhamento em cm ² das 08 amostras, desvio padrão e coeficiente de variação, obtidos pelo operador 1.	87
Tabela 5-2	Resultados médios da área de espalhamento em cm ² das 06 amostras, desvio padrão e coeficiente de variação, obtidos pelo operador 2.	88
Tabela 5-3	Área de espalhamento para os cimentos fornecidos pela empresa X.	90
Tabela 5-4	Área de espalhamento para os cimentos fornecidos pela empresa Y. Cada valor representa a média de três observações experimentais.	90
Tabela 5-5	Área de espalhamento para o cimento CPI-S e com substituição parcial por sílica ativa e respectivamente com adição de 0,5 + 2,0 % aditivo ADT2 (P + SP %).	92
Tabela 5-6	Área de espalhamento (cm ²) em função do teor de aditivo utilizado (P + SP %).	94
Tabela 5-7	Variabilidade da área de espalhamento (cm ²) em função do teor de aditivo adicionado (P + SP%).	95
Tabela 5-8	Área de espalhamento (cm ²) em função do momento da adição aditivo na pasta, utilizando o cimento da marca Y.	96
Tabela 5-9	Área de espalhamento (cm ²) obtido pelas pasta feitas com a combinação cimento-aditivo. Cada valor representa a média de três observações experimentais.	98
Tabela 5-10	Diâmetro de espalhamento médio das argamassa (cm) em função da relação água/materiais cimentantes.	104
Tabela 5-11	Teor de agregado incorporado em concretos obtidos com diferentes tipos de cimento e aditivos.	111

Tabela 5-12 Resistência à compressão (MPa) obtida pela média dos dois maiores valores obtidos aos 3, 7 e 28 dias para cada combinação de aditivo-cimento inicial e para a redosagem.	112
Tabela 5-13 Custo em Reais (R\$) do concreto produzido com diferentes aditivos e cimentos.	118
Tabela 5-14 Combinações de cimento-aditivo que apresentaram problemas de incompatibilidade em concreto.	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a/c: relação água/cimento, em massa

a/(c + s): relação água/materiais cimentantes, em massa

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: *American Concrete Institute*

ASTM: *American Society for Testing Materials*

C₂S: silicato bicálcico

C₃S: silicato tricálcico

C₃A: Aluminato tricálcico

C₄AF: ferroaluminato tetracálcico

CAD: concreto de alto desempenho

CAR: concreto de alta resistência

Ca(OH)₂: hidróxido de cálcio

C-S-H: silicatos de cálcio hidratados

F_c: resistência à compressão do concreto

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

RILEM: *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur les Matériaux et les Constructions*

SA: sílica ativa

1-INTRODUÇÃO

A evolução da humanidade no campo tecnológico tem possibilitado o desenvolvimento de novos materiais com melhor desempenho técnico e funcional, obtidos com o mínimo de consumo energético e impacto ecológico. Esta tendência mundial, aliada à escassez de capital e da grande expansão populacional, motivaram pesquisas para a obtenção de materiais com maior durabilidade.

Ao longo destes anos muitas pesquisas foram realizadas com auxílio de técnicas modernas, mas ainda são necessárias investigações nos materiais desenvolvidos a fim de obter melhor desempenho com maior economia.

Nesta situação é necessário avaliar os ensaios existentes, os novos materiais desenvolvidos ou modificados, mudanças nas condições ambientais com o tempo e a dificuldade de estimar as condições de campo em ensaios laboratoriais.

Este trabalho tem o objetivo de contribuir neste panorama, com a avaliação da compatibilidade dos materiais utilizados no processo de produção de concreto de alto desempenho.

1.1- Considerações iniciais

O concreto, até pouco tempo atrás, era considerado um material de elevada durabilidade apresentando longo tempo de serviço. Contudo, a grande quantidade de estruturas que sofreram processo de deterioração acelerado, leva à necessidade de obter concretos de alta durabilidade para as condições do meio que estiverem expostas.

O concreto de alto desempenho vem ao encontro a estas necessidades apresentando alta durabilidade e resistência. No entanto, para a sua produção, é de fundamental importância o conhecimento das características físicas e químicas dos materiais utilizados, assim como da compatibilidade entre os mesmos. O processo de fabricação e avaliação devem ser adaptados com o objetivo de garantir esta melhoria. É de suma importância, para a evolução do conhecimento, a análise de obras executadas a fim de obter informações sobre o desempenho do material e assim visar possíveis melhorias na estrutura do material.

Os aditivos redutores de água, que permitiram significativos avanços tecnológicos e consideráveis benefícios econômicos na produção do concreto de alto desempenho, continuam sendo objeto de pesquisa por parte dos pesquisadores. O desenvolvimento dos plastificantes que reduzem a tensão superficial da água, reduzindo assim o teor de água dos concretos em torno de 10 %, possibilitou o desenvolvimento de misturas com a relação água/cimento na ordem de 0,40, mantendo uma trabalhabilidade adequada e com consumo de cimento não muito elevadas. Contudo, nos anos 60, deu-se um grande impulso na tecnologia dos concretos com o desenvolvimento dos superplastificantes que são capazes de reduzir em até 30 % o teor de água da mistura, obtendo concretos com a relação água/cimento na ordem de 0,30 ou menos.

Os pesquisadores puderam observar sensíveis melhorias nestes concretos através da utilização de técnicas de análise da microestrutura do material ligante e da interface com o agregado.

Outro fator que melhora sensivelmente a microestrutura do concreto de alto desempenho é a presença de adições. Como exemplo, a sílica ativa exerce efeitos físicos e químicos durante o processo de produção e hidratação do cimento, formando uma microestrutura mais compacta de poros mais refinados e diminuindo a permeabilidade por uma redução da porosidade.

Entretanto, devido a diferentes desempenhos de aditivos frente a diversos tipos e marcas de cimentos existentes no mercado, ocorrem inúmeros problemas de incompatibilidade da dupla cimento-aditivo, causando um retardamento excessivo de pega e hidratação do cimento, pouca redução do volume de água e até a ocorrência de reações expansivas.

1.2- Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo investigar as diferenças de compatibilidade da dupla cimento-aditivo com a substituição de parte do cimento por sílica ativa. Parte-se do princípio que o concreto de alto desempenho não pode ser produzido sem uma avaliação prévia da dupla cimento-aditivo, para obter uma dosagem ótima de melhor desempenho em durabilidade, resistência e com economia.

A partir do enfoque principal, apresenta-se os objetivos específicos da presente pesquisa que podem ser definidos como:

- Aprofundar estudos no tema do concreto de alto desempenho, através da discussão do estado da arte;
- Procurar fornecer informações sobre a compatibilidade dos diversos cimentos e aditivos comercializados na grande Florianópolis;
- Avaliar a compatibilidade cimento-aditivo através de ensaios de fluidez realizados em pasta, argamassa e concreto;
- Determinar comparações entre os ensaios realizados;
- Avaliar possíveis efeitos secundários com os teores de aditivos adicionados; e
- Contribuir com a desmistificação em relação ao uso dos aditivos e ao concreto de alto desempenho.

1.3- Hipóteses e premissas

Como a definição da linha de pesquisa seria voltado à análise das propriedades reológicas das misturas no estado fresco, está embasada nas premissas a seguir:

- A mudança do tipo ou marca cimento, assim como a quantidade de cimento no concreto de alto desempenho pode alterar significativamente a compatibilidade;
- A adição de sílica ativa altera as propriedades reológicas iniciais das misturas;
- O efeito dos aditivos é significativamente influenciado pelo momento da adição, tempo de mistura e quantidade de água;
- Muitos aditivos podem afetar mais de uma propriedade do concreto, às vezes afetando adversamente as propriedades desejadas.

Tomando como base as premissas citadas, foram estabelecidas as principais hipóteses desta pesquisa, apresentadas abaixo:

- Estudar a compatibilidade da dupla cimento-aditivo em pasta e argamassa, que demandam de menor quantidade de material e tempo;
- Verificar a existência de relações dos ensaios de pasta e argamassa com o ensaio de abatimento tronco-cone em concreto;
- Analisar em concretos a fluidez inicial e a sua perda com o tempo, com base nos resultados dos ensaios em pasta ou em argamassa;

- Em função da diferença da compatibilidade entre os cimentos e aditivos, avaliar o teor de agregado incorporado e uma análise econômica para uma mesma fluidez dos concretos; e
- Para o mesmo teor de aditivo adicionado, verificar a ocorrência de efeitos secundários nas misturas executadas.

Com base nas hipóteses apresentadas procedeu-se a elaboração do programa experimental, que visa verificar a compatibilidade entre os cimentos e aditivos para serem realizados em ensaio de pasta, argamassa e concreto.

O programa experimental envolveu vários tipos e marcas de cimentos e de aditivos, que estão apresentados no capítulo 4, visando avaliar a compatibilidade entre eles em pasta, argamassa e concreto. No concreto ainda foram avaliadas a influência do teor de aditivo adicionado na resistência à compressão, visando assim verificar a sua influência no retardamento de pega e na hidratação do cimento.

1.4- Organização do trabalho

O trabalho está organizado em duas partes, sendo uma teórica e a outra experimental. Na parte teórica, capítulos 2 e 3, faz-se uma revisão bibliográfica para embasar a discussão e esclarecer as hipóteses sobre as quais foi planejado o programa experimental desenvolvido posteriormente. A parte prática da presente pesquisa consiste no programa experimental desenvolvido no Laboratório de Materiais da Engenharia Civil – LMCC – da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – apresentado nos capítulos 4 e 5.

No capítulo 2 são feitas considerações gerais sobre o concreto de alto desempenho no que diz respeito à sua definição, materiais constituintes, composição, métodos de produção e vantagens de utilização. São abordados as propriedades do concreto de alto desempenho no estado fresco e endurecido, destacando-se as propriedades reológicas iniciais em função da análise da compatibilidade entre o cimento e aditivo.

No capítulo 3 procura-se tratar da ação dos aditivos redutores de água de normal e alta eficiência, sua interação física e química sobre o concreto no estado fresco e endurecido. Evidenciou-se em apontar as questões mais relevantes ao trabalho, principalmente a questão da fluidez inicial e ao longo do tempo dos concretos aditivados.

No capítulo 4 apresenta-se o programa experimental da pesquisa e a escolha das variáveis utilizadas. São apresentadas as características dos materiais utilizados e descritos os equipamentos empregados nos ensaios realizados, o planejamento dos ensaios e metodologia de execução dos mesmos.

No capítulo 5 apresenta-se os resultados obtidos dos ensaios em pasta, argamassa e em concreto e, com auxílio de análises estatísticas, são feitas considerações sobre os dados. Com estes procura-se avaliar a compatibilidade da dupla cimento-aditivo em fluidez de pastas de cimentos com adição de sílica ativa pelo ensaio de Kantro; em argamassa pelo método de Flow-Table e em concreto pelo método de abatimento tronco cone; avaliação da resistência à compressão de corpos-de-prova. Por fim, ainda foram realizadas análises de microestrutura de concretos que apresentaram expansões para tentar ajudar a esclarecer o fenômeno ocorrido.

No capítulo 6 e último, são tiradas as principais conclusões obtidas, buscando confirmar as hipóteses previstas e apresenta-se algumas recomendações de futuras pesquisas na área.

2-CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O concreto de alto desempenho é uma evolução dos concretos usados ao longo do tempo, não envolvendo praticamente qualquer novo ingrediente e nenhuma nova prática de dosagem, transporte, lançamento, acabamento e cura.

Pode-se citar que anteriormente foi denominado de “concreto de alta resistência” mas, como em muitos casos, as características principais desejadas foram a durabilidade e/ou módulo de elasticidade, optou-se por denominar concreto de alto desempenho. METHA (1996) comenta que acima de 75 % das aplicações de campo do concreto de alta resistência tem sido com o propósito de obtenção da durabilidade e não a resistência.

O concreto de alto desempenho é obtido com agregados comuns de boa qualidade, cimento Portland comum, sílica ativa (substituição parcial de cimento variando entre 5 a 20 % em massa ou em volume) e aditivos redutores de água (plastificante e superplastificantes); as vezes, ainda pode-se utilizar outros materiais cimentantes, tais como a cinza volante, sílica ativa ou a escória granulada de alto forno.

NEVILLE (1997) considera que o concreto de alto desempenho tem uma estrutura densa da pasta de cimento hidratada, com um sistema de poros descontínuo, que significa um concreto que tem alta resistência ao ataque de agentes externos.

O concreto de alto desempenho tem duas propriedades que estão interligadas, alta resistência e baixa permeabilidade, pois a alta resistência exige um volume reduzido de poros, que é obtido com a adição de partículas menores (adição de sílica ativa) preenchendo os vazios entre as partículas de cimento e entre as partículas de cimento e agregados.

O uso dos aditivos redutores de água é fundamental para dispersar as partículas sólidas e obter uma mistura trabalhável. No concreto de alto desempenho trabalha-se com uma relação muito baixa de água/cimento, menor que 0,35. Geralmente está em torno de 0,30, podendo chegar a 0,20.

Quando estas condições são atendidas, pode-se produzir um bom concreto de alto desempenho, pois apresenta-se denso, com volume de poros pequenos e que se segmentam com a cura. Uma parcela do cimento não é hidratada totalmente, o que pode ser considerado como partículas finas de agregado com alta aderência aos produtos hidratação.

METHA (1996) define que o termo concreto de alto desempenho é comumente utilizado na literatura para descrever misturas de concreto que possuem alta trabalhabilidade, resistência alta e baixa permeabilidade. O material é especificado para grandes estruturas com grande tempo de serviço que são executadas em condições severas. Exemplos disso são projetos em andamento ou recentemente completados, que foram concebidos com tempo de serviço de 100 anos ou mais, como os pilares e as principais vigas da Northumberland Strait Bridge em Canada e o forro do Channel Tunnel entre a França e o Reino Unido.

Para NEVILLE (1997) o concreto de alto desempenho não é somente um concreto de alta resistência. Suas propriedades foram extraídas do concreto de ultra-alta resistência, tais como: alto módulo de elasticidade, alta densidade, baixa permeabilidade e resistência aos ataques do meio que está inserido.

2.1- Definição

A classificação mais citada na literatura é a do Comitê 363 do American Concrete Institute (1991), que estabelece o valor de 41 MPa como sendo o mínimo para que seja considerado como concreto de alta resistência.

A ABNT publicou em 1992, uma modificação da norma NBR 8953 (1992), de classificação de concreto para fins estruturais por grupos de resistência, onde incluiu uma classe especial de concretos acima de 50 MPa. Para estes concretos, um grupo de trabalho vem tentando produzir um texto base, estruturado em experiências nacionais e internacionais, que forneça os novos parâmetros de dimensionamento.

Portanto, para fins desta pesquisa, adota-se como definição de concreto de alta resistência com base na normalização nacional; concretos com resistência à compressão superior ou igual a 50 MPa.

Existem ainda outras definições, ALMEIDA (1990) apresenta de SAUCIER (1980) e COUTINHO (1973). PAZ (1998) também apresenta a classificação de PLISKIN (1992) que está de acordo com o código francês (BAEL).

Quanto à resistência, pode-se perceber que a expressão “alta resistência” além de variar ao longo do tempo, também varia geograficamente, isto é, o concreto considerado de alta resistência para um certo local pode não ser em outro. Verifica-se, apesar das peculiaridades locais, que a resistência tem aumentado com o tempo.

GJORV (1992) comenta que, na década de 50, concretos com resistência à compressão de 35 MPa foram considerados de alta resistência. Na década de 60, foram comercializados

concretos com 40 a 50 MPa. Na década de 70, com o advento dos aditivos redutores de água e da sílica ativa tornou-se fácil produzir concretos com resistência à compressão na ordem de 100 MPa.

Atualmente, NEVILLE (1997) comenta que foram obtidos concretos com resistência à compressão de 90, 100, 120 e até 140 MPa com técnicas rotineiras e aplicados em edifícios altos e pontes.

2.2- Aplicações

Uma das principais aplicações do concreto de alto desempenho está em edifícios altos, pois permite a redução na dimensão dos elementos estruturais, principalmente nos pilares. Isto permite aumentar a área útil dos andares que produz um maior efeito nos pavimentos inferiores, térreo e garagem. Esta vantagem aumenta com o aumento da altura do edifício. Nos edifícios muito altos, os pilares de alto desempenho reduzem a oscilação por ação do vento, eliminando a necessidade de sistemas ativos e substituindo com vantagens as estruturas de aço.

A história dos edifícios mais altos do mundo tem-se voltado para ganhos de área útil, redução de obstruções com ganhos de liberdade e área de iluminação nas fachadas. A Figura 2-1 mostra a mudança gradual da aplicação de concreto de alta resistência em vez do aço, nos 100 maiores edifícios do mundo, baseado na publicação de BEEDLE (1992) citado por DAL MOLIN (1995).

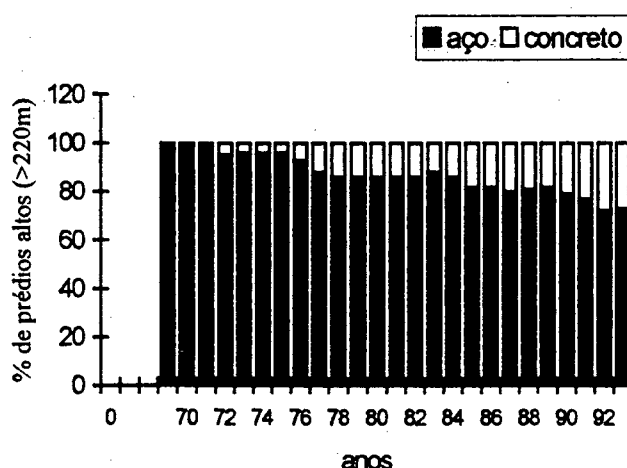


Figura 2-1 Utilização do aço e concreto de alta resistência nos 100 edifícios mais altos do mundo ao longo dos anos.

As vantagens do concreto de alta resistência em relação ao aço e ao concreto tradicional foi apresentada por de LARRARD (1991), citado por DAL MOLIN (1995). Na Tabela 2-1, na primeira linha consta a resistência dos materiais, na segunda, o custo por quilo, na terceira, altura de um pilar para resistir o peso próprio e na última linha, o vão máximo de uma viga bi-apoiada capaz de resistir ao seu peso próprio. A vantagem do concreto de alta resistência mostrada na relação dimensão/custo é 13 vezes maior à compressão e 8 vezes à flexão, em relação ao aço, e aproximadamente 5 vezes para ambas as solicitações quando comparado ao concreto tradicional.

Tabela 2-1 Potencialidades teóricas da utilização de materiais estruturais (de LARRARD, 1991).

Material	Aço	Conc. convencional	CAR
Resistência (MPa)	360	35	90
Custo (FF/kg)*	330	26	14
Altura (m)	3090	710	1730
Vão (m)	371	48	123

* FF = franco francês

DAL MOLIN (1995) menciona o trabalho de DAL MOLIN e WOLF (1990), em que realizaram um estudo de viabilidade econômica considerando a realidade brasileira (Rio Grande do Sul). Para efeito do estudo econômico comparativo entre a execução de um edifício em concreto convencional ($f_{ck} = 21$ MPa) e concreto de alta resistência ($f_{ck} = 60$ MPa), foi selecionado um edifício de 15 andares, cujo cálculo referia-se ao terceiro pavimento. Os resultados obtidos de consumo de concreto, armadura e fôrmas constam na Tabela 2-2. Os autores levaram em consideração o custo de cada material e da mão-de-obra e chegaram à conclusão de que a redução foi de 12 % da estrutura executada com concreto de alta resistência em relação ao concreto convencional, enfatizando que não foram considerados o menor peso nas fundações, maior área útil, velocidade de execução e maior durabilidade.

Outra vantagem do concreto de alto desempenho está na sua maior durabilidade. Os edifícios executados há mais de 20 ou 30 anos com o concreto convencional, estão exigindo manutenção constante para controlar o processo de carbonatação e da oxidação das armaduras, processo este que se retarda com o uso do concreto de alto desempenho.

Nos anos 60, quando o concreto aparente era comum, foram executadas grandes estruturas viárias como pontes e viadutos, que ficaram sujeitas às intempéries, apresentando sérios problemas e exigindo manutenção constante. Para estes casos, o concreto de alto

desempenho se apresenta como uma opção, pois permite o seu emprego em estruturas de concreto aparente. A superfície aparente é menos porosa, reduzindo a absorção de umidade e a formação de fungos. Além de manter seu aspecto original por mais tempo, oferece menor permeabilidade, conferindo maior proteção às armaduras e menor carbonatação.

Tabela 2-2 Consumo de materiais para execução de um pavimento de concreto com fck de 21 e 60 MPa (DAL MOLIN e WOLF, 1990)

	Concreto (m ³)			Armadura (kg)			Fôrmas (m ²)		
	fck 21	fck 60	%	fck 21	fck 60	%	fck 21	fck 60	%
PILARES	13,2	6,8	-49	2981	1192	-60	93	93	-32
VIGAS	14,9	12,1	-19	1623	1623	0	149	149	-17
LAJES	27,0	26,1	-3	994	994	0	281	281	0
TOTAL	55,1	45,0	-18	5598	3809	-32	523	523	-12

O concreto de alto desempenho confere outra vantagem que está na maior trabalhabilidade, permitindo concretagens mais fáceis em locais de difícil acesso, formas complexas, peças esbeltas ou com armaduras muito densas. Cabe esclarecer que existe uma tendência de lançar o concreto por bombeamento e com o concreto de alto desempenho a operação de bombeamento é facilitada, visto que, apresenta melhores propriedades reológicas.

Em decorrência do fato que o concreto de alto desempenho apresenta resistências iniciais maiores, oferece uma vantagem no sentido do maior reaproveitamento das fôrmas.

A leveza e a esbeltez na área de pré-moldados são características desejadas pela necessidade de transporte e montagem. E fica evidente que, com o uso do concreto de alto desempenho, pode-se obter peças mais esbeltas devido a sua maior resistência, menor permeabilidade aos agentes agressivos e maior trabalhabilidade, além de permitir a retirada antecipada das formas.

Várias outras possibilidades de aplicação são relatadas na bibliografia internacional e nacional, entre as quais:

- O comitê 363 do ACI (1992) apresenta uma série de aplicações em edifícios, pontes e cita algumas aplicações potenciais e especiais.
- ALMEIDA, GONÇALVES e SHEHATA (1995) enumeram uma série de obras executadas com concreto de alta resistência realizadas no Brasil. São recuperações

estruturais, prédios, barragens, pré-moldados, estruturas marítimas, tanques e silos, pontes, paredes diafragma, estacas, pisos industriais, entre outros.

No Brasil, é preciso reconhecer que o volume de concreto de alto desempenho aplicado ainda é pequeno, mas a diversidade de uso já é considerável.

2.3- Materiais constituintes

Conforme METHA (1996), existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados para obter concreto de alto desempenho. A escolha de materiais para a produção de concretos de alto desempenho não é uma tarefa fácil, pois ocorrem grandes variações nas suas composições e propriedades físicas e químicas.

Para GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996), a seleção dos materiais constituintes é o primeiro passo na produção de concreto. As vezes, na tecnologia do concreto convencional, não é dada a devida atenção e que pode ser a origem de problemas em muitas ocasiões.

Requisitos usados na seleção dos materiais para o concreto convencional podem não ser adequados para a produção de concreto de alto desempenho. A bibliografia especializada, ALMEIDA (1990), REUGERON E AÏTCIN (1994), DAL MOLIN (1995), GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996), METHA (1996), NEVILLE (1997), PAZ (1998), incluem diretrizes gerais de requisitos necessários dos materiais para a produção de concreto de alto desempenho. Em geral, as sugestões não são suficientes e estudos preliminares em laboratório são necessários para a seleção dos materiais.

Testes para avaliar a performance do material para produzir concreto de alto desempenho devem ser centralizados na capacidade de alcançar a resistência máxima com a demanda de água mínima, de acordo com GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996).

2.3.1- Cimento

ALMEIDA (1990) comenta que a escolha de parâmetros relativos ao cimento para produção de concreto de alto desempenho é extremamente importante, salientando que este componente influencia tanto na resistência da pasta quanto na intensidade da aderência agregado-pasta.

O FIB/CEB (1990), também afirma que o desenvolvimento da resistência potencial do concreto de alta resistência depende da escolha do cimento.

Em decorrência do grande número de marcas e classes de cimento disponíveis no mercado, tendo comportamento reológico e compatibilidade com aditivos diferentes, torna-se difícil a sua escolha para uma determinada finalidade. NEVILLE (1997) comenta que usualmente são usados cimento Tipo I (ASTM) mas, se a alta resistência inicial é requerida, pode ser usado o Tipo III. Também afirma que outros materiais cimentantes podem ser incluídos na mistura. METHA (1996) relata que os tipos de cimento que foram usados em vários projetos apresentavam baixo teor de álcalis, alta finura e alta quantidade de silicatos tricálcico (Tipo I e III da ASTM).

Em relação ao cimento Portland puro, os cimentos com adições mostram uma menor taxa de desenvolvimento da resistência inicial, menor calor de hidratação, maior fluência nas primeiras idades, que são características desejadas do ponto de vista de evitar microfissuras. São propriedades que geralmente fazem das estruturas de concreto feito com cimento com adições apresentar excelente desempenho em meios severos.

Para o ALMEIDA (1990) e ACI 363 (1991), devem inicialmente ser obtidos os certificados de controle de qualidade dos últimos 6 a 12 meses, fornecidos pelo fabricantes, verificando assim a manutenção das características básicas do cimento durante a execução da obra.

Outro aspecto levantado por ALMEIDA (1990), ACI 363 (1991) e PAZ (1998), que em um único tipo de cimento, são permitidas variações nas composições que podem provocar diferenças no concreto de alto desempenho.

Assim as características mais significativas de uniformidade para um determinado cimento na obtenção do concreto de alto desempenho são:

- Teor de C_3S não deve variar mais que 4 %;
- Perda ao fogo não variar mais que 0,5 %;
- A superfície específica (Blaine) não deve variar mais que $375 \text{ cm}^2/\text{g}$; e
- Sulfatos (SO_3) com variação limitada em $\pm 0,20 \%$.

A hidratação dos compostos do cimento podem ser influenciados pela sua finura. GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996) argumentam que a alta finura do cimento provoca uma menor eficácia em concreto de alto desempenho, que pode ser explicada pela baixa relação água/cimento usada. A hidratação rápida destes cimentos em virtude da superfície específica alta, gera um volume grande de cimento hidratado aumentando a resistência. Devido a baixa relação água/cimento, a rápida reação do cimento consome grande parte da água, fazendo com

que as reações de hidratação e pozolânicas sejam estabilizadas muito cedo, permanecendo parte do cimento não hidratado devido a falta de água. A maior taxa de resistência desenvolvida nas idades iniciais é anulada em idades avançadas.

Para SERRA (1997), as dosagens de cimento empregadas no concreto de alto desempenho variam na faixa de 400 a 500 kg/m³. De acordo com ALMEIDA (1990), as dosagens de cimento podem ser superiores a 500 kg/m³. Se a alta resistência não é necessária, é conveniente uma redução na quantidade de C₃A e aumento da quantidade de C₃S e em especial do C₂S, o que resulta numa maior resistência final. C₂S gera menor calor de hidratação, seguido do C₃S e C₃A, como mostra a Tabela 2-3.

Tabela 2-3 Calor de hidratação de compostos puros (NEVILLE, 1997).

Composto	Calor de hidratação (J/g)
C ₃ S	502
C ₂ S	260
C ₃ A	867
C ₄ AF	419

Ressaltando a importância das quantidades de C₃S e C₂S, nas reações estequiométricas, temos:

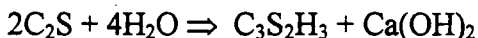
Para o C₃S



As massas envolvidas:

$$100 + 24 \Rightarrow 75 + 49$$

Para o C₂S



As massas envolvidas:

$$100 + 21 \Rightarrow 99 + 22$$

Analisando em função das massas, os dois silicatos necessitam praticamente da mesma quantidade de água para hidratação, mas o C₃S produz mais do que o dobro da quantidade de

hidróxido de cálcio, quando comparado com o C_2S . Isto representa na pasta endurecida uma menor durabilidade quanto ao ataque de águas ácidas e/ou sulfatadas.

Fica evidente pelo exposto, que a escolha do cimento mais adequado a ser utilizado no concreto de alto desempenho exige um grande conhecimento técnico e experiência do tecnologista.

2.3.2- Agregados

METHA (1996) relata que, para a produção de concreto de alto desempenho, são imprescindíveis agregados duros, sadios, densos e limpos.

Atenção insuficiente é dada para a graduação do agregado e a compatibilidade pasta-agregado que são essenciais para o concreto de alto desempenho. Sempre que é viável economicamente, um controle mais rigoroso na forma do agregado, tamanho e graduação que são recomendados pelos códigos, devem ser impostos de modo a obter o maior empacotamento do ponto de vista de necessitar o mínimo de pasta para a mistura de concreto que forneça adequada trabalhabilidade.

A escolha dos agregados para o emprego em concreto de alto desempenho baseia-se no atendimento das exigências prescritas nas normas atuais para concretos convencionais (NBR 7211, 1983; NBR 12654, 1992). Muito além de atender estas exigências, outros aspectos devem ser considerados como segue:

2.3.2.1- Agregado miúdo

Um dos requerimentos usados na escolha do agregado miúdo baseia-se na menor demanda de água. Agregado miúdo de partículas arredondadas e textura lisa demandam menor quantidade de água e por esta razão são preferidos para o concreto de alta resistência de acordo com o ACI 363 (1991).

Como o concreto de alto desempenho possui baixa relação água/cimento, este possui uma quantidade de finos geralmente alta, sendo recomendável o uso de menor quantidade de areia e/ou um módulo de finura maior. A bibliografia recomenda (ALMEIDA, 1990; ACI 363, 1991; DAL MOLIN, 1995; NEVILLE, 1997; PAZ, 1998;) valores de módulo de finura na faixa de 2,7 a 3,2.

É imprescindível que haja um controle rigoroso do agregado miúdo, pois pequenas variações na umidade e/ou granulometria podem ser responsáveis por variações significativas nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, como relata GJORV (1992). de LARRARD cita o trabalho de SCHALLER et al (1992), onde comenta sobre o controle da quantidade de água da mistura para evitar grandes variações de resistência e trabalhabilidade, como apresentado na Tabela 2-4. Com um controle rigoroso da umidade dos agregados é possível produzir um CAD de boa qualidade estrutural e com baixo desvio padrão.

Tabela 2-4 Efeito do tipo de controle de umidade dos agregados sobre a resistência à compressão e no desvio padrão (SCHALLER, 1992).

Concreteira	Sensor de umidade em todos os silos de agregados	Resistência à compressão	Desvio Padrão
Gurgy	Sim	81,6 MPa	2,6 MPa
Passy	não	73,7 MPa	7,6 MPa

2.3.2.2- Agregado graúdo

Considerando que os agregados ocupam de 60 a 80 % do volume do concreto, deve ser dada atenção aos possíveis efeitos que possam influenciar no concreto no estado fresco e endurecido.

Para METHA (1994), os agregados não participam das reações químicas complexas com a água e geralmente são tratados como materiais de enchimento inerte no concreto. NEVILLE (1997), por outro lado, afirma que o agregado não é um inerte na exata concepção da palavra e suas propriedades físicas, térmicas e, as vezes, também químicas têm influência no desempenho do concreto.

De acordo com ALMEIDA (1990) e METHA (1994) as características que mais influenciam os agregados são:

- Resistência a compressão;
- Módulo de elasticidade;
- Granulometria / dimensão máxima / módulo de finura;
- Forma e textura superficial;
- Natureza mineralógica;

- Absorção;
- Porosidade; e
- Tipos de substâncias deletérias presentes.

Estas características são oriundas da composição mineralógica da rocha matriz, das condições de exposição às quais a rocha foi submetida antes de gerar o agregado e dos tipos de operação e equipamentos usados para a produção dos agregados.

2.3.2.2.1- Resistência à compressão

ALMEIDA (1990) comenta que para a produção de concreto de alta resistência, a alta resistência do agregado é uma condição necessária mas não suficiente. A resistência deverá ser mais elevada do que a classe da resistência que se pretende obter. Enfatiza que no interior do concreto já existe um campo heterogêneo de tensões antes da aplicação do carregamento externo, provocado pela contração da pasta no processo de endurecimento.

O FIP/CEB (1990) destaca que a capacidade do agregado freqüentemente limita a resistência do concreto de alta resistência. Utilizando agregados convencionais pode-se obter concreto com resistência na ordem de 120 a 140 MPa.

2.3.2.2.2- Módulo de elasticidade

Para pastas de cimento com baixas relações água/cimento, a ligação interfacial entre o agregado e a pasta de cimento, é normalmente alta e as propriedades elásticas do agregado se tornam importantes no desempenho do concreto. Ainda não existe um consenso sobre a influência do módulo de elasticidade. ALMEIDA (1990) comenta que enquanto alguns pesquisadores recomendam altos módulos de elasticidade sejam necessários para obter concreto de alto desempenho, outros recomendam um módulo de elasticidade semelhante a pasta ou argamassa do concreto, para não criar diferença de concentrações de tensões ao redor do agregado.

2.3.2.2.3- Dimensão máxima característica

De modo geral, os materiais mais grossos, devido a sua menor superfície específica, vão necessitar de menos água, obtendo assim uma mesma trabalhabilidade com uma menor relação água/cimento.

Para os concretos de alto desempenho, existem vários estudos apontando à obtenção de maiores resistências com agregado graúdo de dimensão máxima variando entre 9,5 mm a

25 mm. Alguns autores têm defendido a adoção de dimensões máximas menores em função da maior superfície específica que reduz a concentração de tensões médias de aderência. DAL MOLIN (1995) reforça que quanto menor o agregado, menor a superfície capaz de reter a água durante a exsudação do concreto fresco, o que propicia uma zona de transição de menor espessura e conseqüentemente um concreto mais resistente.

Os agregados graúdos com menor dimensão máxima são provavelmente menos fissurados e com falhas, que podem advir durante o processo de beneficiamento das rochas.

PAZ (1998) comenta que foi possível obter ganhos de resistência à compressão com o emprego de agregados graúdos (granito 3 e diabásio) de menor dimensão máxima característica. No entanto, obteve o inverso com a utilização de agregados graúdo (granito 1 e 2), onde foi possível observar um aumento da resistência à compressão dos concretos produzidos.

2.3.2.2.4-

Distribuição granulométrica

Para ALMEIDA (1990) a distribuição granulométrica influencia a relação água/cimento (alterando a demanda de água), que afeta a resistência da fase pasta. Para JENNIGNS (1988) citado por DAL MOLIN (1995), o empacotamento dos grãos tem como resultado a alteração da fração volumétrica do agregado a ser incorporado em uma mistura de concreto.

Segundo METHA (1994), sob ponto de vista da trabalhabilidade das misturas de concreto, com certos materiais, a menor percentagem de vazios (massa específica máxima compactada) não é a mais satisfatória; o ideal é um volume de vazios um pouco maior do que o volume mínimo.

2.3.2.2.5-

Forma e textura superficial

NEVILLE (1997) comenta que a forma do agregado graúdo depende da natureza mineral de origem, do tipo de britador e da relação de redução do britador. Tal pesquisador salienta que a forma e a textura superficial do agregado têm considerável influência sobre a resistência do concreto e efeitos maiores sobre a resistência à flexão que são significativos no caso de concreto de alta resistência. O fato ainda não está completamente explicado sobre a influência da forma e da textura do agregado na evolução da resistência do concreto, mas comenta-se que agregados angulares com superfície áspera, proporcionam melhor entrosamento com a pasta de cimento que agregados lisos e arredondados.

METHA (1994) salienta que a forma e a textura dos agregados influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco que endurecido, comparando as partículas lisas e arredondadas versus textura áspera, angulosa e alongados, que requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e isto significa um aumento de custo do concreto.

PAZ (1998) comenta que a influência da forma do agregado graúdo no desempenho à compressão dos concretos estudados cresce com o aumento da relação água/materiais cimentantes. As maiores perdas de resistência à compressão foram constatadas em maiores relações água/materiais cimentantes.

2.3.2.2.6- Reatividade

O uso de agregados graúdos não inertes, tais como, calcário e argila expandida, melhoram as características da zona de transição devido a uma aderência química entre o agregado e a pasta.

METHA (1996) comenta que estruturas feitas com concretos contendo agregados de calcário ou argila expandida têm mostrado melhor durabilidade em meios agressivos.

2.3.3- Água

A dosagem de água empregada no concreto de alto desempenho varia, em geral, entre 110 a 160 Kg/m³. De acordo com o ACI 363 (1991), os requisitos de qualidade da água são os mesmos que para os concretos convencionais.

2.3.4- Aditivos

Um estudo mais detalhado das influências dos aditivos redutores de água no concreto de alto desempenho será discutido no capítulo 3.

2.3.5- Adições minerais

Em todo estudo de composição de concreto de alto desempenho deve ser considerada a contribuição de materiais pozolânicos. A estes materiais são atribuídas as seguintes propriedades:

- Reduzir a quantidade de água necessária para um dado abatimento, embora existam exceções;

- Aumentar a durabilidade;
- Elevar as resistências em idades avançadas;
- Diminuir a liberação de calor de hidratação; e
- Gerar economia de custo e/ou energia.

A definição das adições minerais está confusa na literatura. COUTINHO citado por ALMEIDA (1990) define como: “produtos naturais ou artificiais constituídos essencialmente por sílica e alumina que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contém constituintes que, às temperaturas ordinárias, se combinam, em presença da água, com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. São substâncias dotadas de grande reatividade com o hidróxido de cálcio, mas insolúveis e inertes na água”.

As variações nas propriedades físicas e/ou químicas das adições minerais, mesmo dentro dos limites estabelecidos nas normas, podem provocar alterações significativas nas propriedades do concreto de alto desempenho. Ensaio constantes devem ser realizados para observar possíveis variações.

As propriedades mais desejadas das adições minerais são:

- Finura alta;
- Uniformidade;
- Alta atividade pozolânica; e
- Compatibilidade com outros constituintes.

Neste trabalho, comenta-se somente a influência da sílica ativa, que foi utilizada para a produção do concreto de alto desempenho.

2.3.5.1- Sílica ativa

A sílica ativa é relativamente um novo material pozolânico, que tem recebido grande atenção dos pesquisadores. É um subproduto obtido da produção de silício-metálico, ligas de ferro-silício ou de outros produtos silicosos em fornos elétricos a arco.

O silício-metálico puro é produzido pela redução do quartzo com carvão natural, à temperatura de aproximadamente 2000 °C, produzindo monóxido de silício gasoso (SiO). O SiO é transportado a zonas de temperaturas mais baixas (na parte superior do forno), onde

entra em contato com o ar, se oxida, formando o dióxido de silício (SiO_2) que se condensa em forma de partículas esféricas. O diâmetro das partículas é $0,1 - 0,12 \mu\text{m}$ e sua área específica de $15.000 - 25.000 \text{ m}^2/\text{Kg}$.

Sendo um resíduo industrial de fácil coleta quando comparado a escória, ganhou rápida aceitação. NAWY (1996) comenta que o uso nos EUA é limitado em aproximadamente 20.000 toneladas e no mundo 150.000 toneladas, enquanto a escória é de 7 milhões de toneladas nos EUA e 60 milhões no mundo. No Brasil, DAL MOLIN (1995) apresenta os dados da ABRAFE (1993), onde estima-se uma captação potencial de 150.000 toneladas ano.

A sílica ativa está disponível no mercado (DAL MOLIN, 1995; NAWY 1996) das seguintes formas:

- Natural, sem nenhum tratamento após a captação e filtragem. Tem massa unitária de $192 - 300 \text{ kg/m}^3$;
- Densificada, através da compactação das partículas após a filtragem. A massa unitária é $500 - 700 \text{ kg/m}^3$;
- Sob forma de lama, onde a sílica ativa é pré-misturada com água. Tem a massa unitária de $1.300 - 1.400 \text{ kg/m}^3$, quando misturada com 40 a 60% de água;
- Pré-misturada com cimento, com teores variando de 6,5 a 8% de sílica ativa sobre a massa de cimento;
- Micropelotizada, similar à densificada, porém é adicionada uma pequena quantidade de água para produzir aglomerações maiores. A massa unitária é aproximadamente de 700 kg/m^3 .

A proporção de sílica ativa usada em concretos varia de 5 a 20% em massa ou volume de cimento, dependendo da resistência e trabalhabilidade requerida. Contudo, a demanda de água aumenta significativamente com o aumento da proporção de sílica ativa. Os aditivos redutores de água são necessários para manter a relação água/materiais cimentantes baixa e dispersar as partículas extremamente finas, produzindo concreto de alto desempenho trabalhável.

2.3.5.2- Princípio de funcionamento no concreto

A sílica ativa produz efeitos físicos e químicos na microestrutura do concreto.

2.3.5.2.1- *Efeito físico*

Aumenta a densificação da microestrutura com o preenchimento dos vazios pelas partículas de sílica ativa, que é denominado efeito microfiller. Segundo DAL MOLIN (1995) citando o trabalho de DASTROL (1984), em um mistura com 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento, há a presença de 300.000 a 400.000 partículas por grão de cimento.

Em virtude das partículas que se dispersam nos espaços entre e em volta dos grãos de cimento, provocando uma distribuição uniforme dos produtos de hidratação, obtêm-se assim, uma estrutura mais densa, menos porosa e a formação de poros menores. Este efeito é denominado de refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação, que diminui a permeabilidade, aumentando a resistência e durabilidade dos concretos. A introdução de materiais muito finos, faz com que ocorra um maior número de cristais de hidróxido de cálcio, que são menores e mais dispersos pelo concreto.

Além da densificação da matriz na região da interface, ALMEIDA (1990) cita que alguns autores acrescentam a redução do índice de orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio, segundo a Figura 2-2. O efeito é a alteração da microestrutura da zona de transição.

A adição da sílica ativa ao concreto infere na movimentação das partículas de água em relação ao sólido da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que normalmente fica retido sob os agregados. Também contribui pela redução da espessura da zona de transição pela redução da exsudação. ALMEIDA (1990) e DAL MOLIN (1995) atribuem à sílica ativa o fortalecimento da aderência entre pasta e agregados, que ocasiona um aumento de desempenho do concreto, tanto mecânico como em relação à durabilidade.

2.3.5.2.2- *Efeito químico*

A sílica ativa é uma pozolana de alta reatividade que reage rapidamente com o hidróxido de cálcio, para formar um silicato de cálcio hidratado adicional. Não existe ainda um consenso entre os pesquisadores sobre o início da reação pozolânica. DAL MOLIN (1995) trata este assunto com maiores detalhes. Variações podem também ser explicadas em função das características mineralógicas e granulométricas da sílica ativa utilizada.

NEVILLE (1997) relata que, em consequência da grande reatividade da sílica ativa, ocorre o uso rápido da água da mistura, ocorrendo a auto-secagem. Este autor enfatiza que a estrutura densa da pasta de cimento hidratada dificulta o ingresso de água do exterior. Em

muitos casos, o processo de hidratação é interrompido antes, em comparação ao cimento Portland sem adições, conforme mostra a Tabela 2-5.

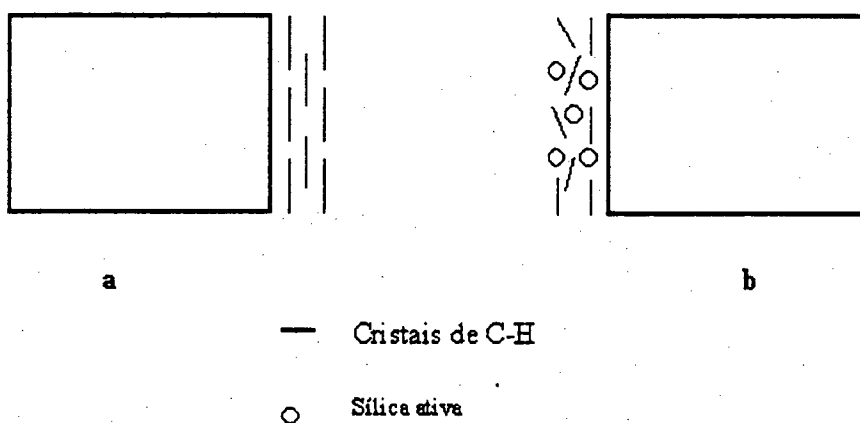


Figura 2-2 Influência da sílica ativa no desenvolvimento dos cristais hidratados. a) Nos concretos sem sílica ativa, os cristais de C-H formados na interface agregado-pasta têm uma orientação preferencial; b) a presença da sílica ativa altera a orientação, pois os cristais deixam de crescer apenas na superfície do agregado.

Tabela 2-5 Evolução da resistência de corpos-de-prova cilíndricos de concretos com sílica ativa em massa (NEVILLE, 1997)

Idade	Resistência de concretos com os teores de sílica ativa (MPa)			
	0 %	10 %	15 %	20 %
1 dia	26	25	28	27
7 dias	45	60	63	65
28 dias	56	71	75	74
56 dias	64	74	76	73
91 dias	63	78	73	74
182 dias	73	73	71	78
1 ano	79	77	70	80
2 anos	86	82	71	78
3 anos	88	90	85	88
5 anos	86	80	67	70

2.4- Composição dos concretos de alto desempenho

A composição dos concretos de alto desempenho, em termos de materiais constituintes, é praticamente idêntica ao concreto convencional, recebendo aditivos e adições. As proporções médias usuais dos materiais para produzir 1 m³ de concreto de alto desempenho estão dentro dos seguintes limites:

400 Kg	<	Cimento	<	500 Kg
1000 Kg	<	Agregado graúdo	<	1100 Kg
650 Kg	<	Agregado miúdo	<	750 Kg
1 %	<	Superplastificantes	<	2 % do peso de cimento
120 Kg	<	Água	<	160 Kg
7 %	<	Silica ativa	<	15 % do peso de cimento

NEVILLE (1997) reforça que não existem proporções de mistura padrão ou mesmo típicas de concreto de alto desempenho. A variação das propriedades físicas e químicas dos materiais e da sua interação na mistura, como também de fatores externos, tais como condições climáticas e humanas, fazem com que deva-se seguir diretrizes definidas por cada método de proporcionamento e ensaios laboratoriais se fazem necessário.

Pode-se destacar alguns métodos propostos ou utilizados por ALMEIDA (1990); REUGERON e AİTCIN (1994); DOMONE e SOUTSOS (1994); MONTEIRO e HELENE (1994); METHA e AİTCIN (1994); DAL MOLIN (1995); de LARRARD, BOSC, CATHERINE et al. (1997).

REUGERON e AİTCIN (1994) comentam que a otimização da composição do concreto de alto desempenho é, no presente, mais uma arte do que uma ciência, mas seus princípios básicos devem ser bem conhecidos. A atual tecnologia oferece muitos meios para a sua obtenção. Os autores consideram por exemplo, que a relação água/materiais cimentantes pode ser baixada pelo aumento do volume de materiais cimentantes no concreto de alto desempenho ou pelo decréscimo da quantidade de água de amassamento ou ainda por ambos ao mesmo tempo, com ajuste da consistência com a dosagem adequada de aditivo redutor de água.

GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996) afirmam que não existe método disponível de dosagem de concreto de alto desempenho tão simples quanto o proposto para o concreto

convencional. Esta situação leva o tecnologista a consultar a bibliografia existente para verificar as dosagens usadas com sucesso em outros trabalhos, servindo de ponto de partida e completando a tarefa em laboratório para ajuste final.

2.5- Processando o concreto fresco

2.5.1- Produção

A produção do concreto de alto desempenho pode ser feita tanto na obra como em concreteiras. Para manter a precisão da dosagem, é recomendável que se faça em usinas onde existe um maior controle de produção. Deve ser observado ainda, de acordo com o ACI 363 (1991), o tipo de balança para cada material, determinação da umidade do agregado miúdo, condições climáticas, seqüência de colocação dos materiais, tipo de misturador e tempo de mistura.

2.5.2- Transporte

O transporte do concreto de alto desempenho pode ser feito de várias formas, dependendo das condições de uso, dos ingredientes da mistura, acessibilidade, capacidade requerida, tempo de entrega e condições climáticas. Deve ser observado ainda, que o trânsito congestionado nas grandes cidade exige o uso de aditivos retardadores de pega. Outro problema é a eficiência dos aditivos redutores de água (superplastificantes) que mantém a trabalhabilidade por um período de no máximo 30 a 60 minutos, dependendo do tipo.

2.5.3- Lançamento

O lançamento do concreto de alto desempenho é mais simples devido a melhoria da trabalhabilidade, promovida pelo superplastificante e pela sílica ativa. O equipamento para o lançamento do concreto deve ser de capacidade adequada para executar eficientemente a sua função e mantenha a homogeneidade da mistura de concreto.

2.5.4- Adensamento

Seguido do lançamento, é necessário um adequado adensamento para eliminar as bolhas de ar e outros defeitos. O ACI 363 (1991) recomenda que a vibração interna é o método mais indicado para o concreto de alta resistência. METHA (1996) comenta que adequada vibração do concreto fresco é benéfico para reduzir os vazios de ar aprisionados e trazer o excesso de água para a superfície onde é perdida pela evaporação. A revibração do concreto fresco ainda no estado plástico, é fortemente recomendado para reduzir/eliminar qualquer retração plástica e fissuras. A revibração é a última chance de destruir os caminhos pelo qual a água e os agentes agressivos acham seu meio de penetrar da superfície para o interior do concreto.

2.5.5- Cura

A cura envolve o processo de manter uma quantidade satisfatória de umidade e temperatura durante o período de hidratação dos materiais cimentantes antes que o concreto torne-se suficientemente resistente e impermeável. Para o desenvolvimento da microestrutura homogênea é recomendada uma temperatura de cura na faixa de 5 a 25 °C, de acordo com METHA (1996). O processo de cura é considerado essencial para garantir a durabilidade adequada de superfícies expostas, desenvolvimento da resistência e controle da fluência e retração.

NEVILLE (1997) tem escrito sobre a importância da cura no concreto de alto desempenho, sendo que a cura úmida é absolutamente necessária e deve continuar até a resistência à tração seja maior que a resistência à fissuração. NEVILLE (1997) tem especificado muito claramente que membrana de cura não é adequada para o concreto de alto desempenho. Todas as membranas para cura impedem a saída da água, o que é ideal quando a relação a/c é maior que 0,42, pois a quantidade de água na mistura é adequada para a hidratação completa do cimento.

Todavia, no concreto de alto desempenho com baixas relações a/c, é essencial água adicional do exterior para o interior do concreto. Nos casos em que é impossível a cura úmida, a membrana pode ser aplicada temporariamente no período máximo de 5 horas, para prevenir o desenvolvimento das fissuras de retração plástica. Mas logo que a significativa hidratação ocorreu, é essencial água externa para ingressar dentro do concreto e isto pode ser garantido por meio de colocação de estopas úmidas recobertas com plástico.

2.5.6- Controle

METHA (1996) comenta que qualquer definição de concreto deve incluir longa durabilidade em condições de serviço. Por razões ecológicas e econômicas, no futuro, todos os concretos serão de alto desempenho. No passado, a alta durabilidade estava associada com alta resistência. Porém não é a alta resistência, mas a estabilidade dimensional e livre de fissuras durante o tempo de serviço, que são ingredientes-chaves para o alto desempenho.

O controle de qualidade é fundamental para assegurar o alto desempenho do concreto nas estruturas. Atualmente a maioria das normas de construção usa a resistência à compressão do concreto não lançado como ferramenta de controle de qualidade. Este teste não retrata a qualidade do concreto e da estrutura, por não levar em consideração fatores como lançamento, adensamento e cura.

MARTINS, DAL MOLIN e FERNANDEZ-GOMEZ (1997) fazem uma avaliação da influência de diferentes diâmetros de corpos-de-prova extraídos de concreto de alta resistência. Concluíram que os testemunhos de 75 mm de diâmetro apresentaram uma resistência média à compressão aproximadamente 17 % superior em relação aos testemunhos de 100 mm de diâmetro e de 5 % superior com relação aos de 50 mm de diâmetro. No trabalho são citadas as pesquisas de SMITTER (Apud HOSTALET (1995) e por GUTSCHOW (1995)) que obtiveram resultados idênticos. Ainda, os corpos-de-prova extraídos apresentaram maiores resistências que os moldados e os resultados coincidem com os descritos por AGUADO (1996).

NEVILLE (1997) acredita que o uso de concreto de alto desempenho pode nos ensinar a fazer concreto convencional de boa qualidade. Argumentou para este fato a necessidade de se fazer uma cura adequada, controle de qualidade dos materiais e nos procedimentos de execução.

NEVILLE (1997) comenta que um alto nível de controle resulta em baixa variabilidade das propriedades do concreto e também uma boa reputação ao fornecedor do concreto de alto desempenho.

2.6- Estrutura do concreto

2.6.1- Macroestrutura

A macroestrutura é uma análise a olho nu da estrutura do concreto. Na macroestrutura do concreto são observadas perfeitamente duas fases distintas: agregados e a matriz.

2.6.2- Microestrutura

A microestrutura é uma análise de uma porção da macroestrutura aumentada microscopicamente. A análise a nível da microestrutura revela a existência de mais uma fase entre a matriz e o agregado, que é denominada de zona de transição. As propriedades mecânicas dependem não somente das propriedades da pasta de cimento e dos agregados, mas das propriedades da zona de transição, que é considerado o “elo fraco” do concreto.

Tendo o objetivo de produzir um concreto de alto desempenho é fundamental o entendimento do comportamento das 03 fases e da interação entre elas.

2.6.2.1- Microestrutura da pasta de cimento hidratado

Os compostos anidros (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF) do cimento Portland, quando em contato com a água se decompõem para formar os produtos de hidratação.

Para METHA e MONTEIRO (1994), a hidratação do C_3S e C_2S com a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) produz de 50 a 60 % do volume de sólidos de uma pasta de cimento. A morfologia de C-S-H varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. As diferenças na morfologia foram atribuídos ao tempo de formação, espaço disponível, relação C/S e o grau de polimerização. A composição é variável e a relação C/S varia entre 1,5 a 2.

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), os cristais de hidróxido de cálcio constituem de 20 a 25 % do volume de sólidos da pasta de cimento. O hidróxido de cálcio contribui pouco para a resistência mecânica da pasta de cimento hidratada, exceto nas primeiras idades e quando é atacado por sulfatos, ocorre uma expansão devido a formação de sulfoaluminatos a partir do C_3A , o que pode resultar numa degradação da pasta endurecida. Por outro lado, o hidróxido de cálcio confere alcalinidade que é responsável pela passivação das armaduras imersas na pasta de cimento

A reação do C_3A é rápida e, para evitar isso, adiciona-se gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ao clínquer do cimento, que irá reagir com C_3A para formar sulfoaluminatos de cálcio, conhecido como etringita e monosulfoaluminatos. Estes ocupam um volume de 15 a 20 % de sólidos da pasta hidratada (METHA, 1994).

O C_4AF é o composto que menos contribui para a resistência do cimento. A sua hidratação não é facilmente entendida, por não ser um composto químico, mas uma solução sólida com composição variável C_2F e C_6A_2F e seus compostos não são distinguíveis dos obtidos do C_3A .

2.6.2.1.1- *Microestrutura das pastas de alto desempenho*

O alto desempenho pode ser obtido através de várias formas: adição de polímeros, cura em autoclave, redução da relação a/c e adição de partículas ultrafinas. A microestrutura é caracterizada pela baixa porosidade e formação incompleta de hidratados cristalinos.

A sílica ativa, como já mencionado anteriormente, tornou-se uma das mais eficientes formas de incorporar partículas ultrafinas no concreto que, além do efeito filler, possui alta atividade pozolânica reagindo com hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos de cálcio.

A quantidade de hidróxido de cálcio diminui e a Tabela 2-6 mostra que a relação Ca/Si do C-S-H diminui com o aumento do teor de sílica ativa, conforme apresenta MONTEIRO (1990) o trabalho de REGOURD et al.

Tabela 2-6 Relação Ca/Si com aumento do teor de sílica ativa (REGOURD et al)

Cimento	Relação Ca/Si do C-S-H
Cimento Portland	1,60
Cimento Portland + 13 % sílica ativa	1,30
Cimento Portland + 28 % sílica ativa	0,90

A baixa relação Ca/Si permite que C-S-H tenha maior capacidade de incorporar íons, tais como álcalis e alumínio, portanto aumentando a resistência do concreto de íons agressivos e da reação álcali-agregado.

2.6.2.2- Microestrutura da zona de transição

A zona de transição nos sistemas de cimento Portland é diferente da matriz da pasta de cimento. As características da zona de transição podem ser determinadas com auxílio de várias técnicas, incluindo observações em modelo de espécies de compósitos (agregado-pasta). MONTEIRO (1990) relata uma série de observações feitas por diversos pesquisadores.

É imprescindível uma descrição da zona de transição do concreto convencional, para mostrar a mudança que ocorre na zona de transição no concreto de alto desempenho, que apresenta as seguintes características:

- A zona de transição é mais rica em hidróxido de cálcio e etringita do que a matriz e ainda o hidróxido de cálcio apresenta-se orientado, como mostrado na Figura 2-3; e
- A porosidade da zona de transição é maior que da matriz e é observado um gradiente de porosidade diminuindo na direção da matriz.

A microestrutura da zona de transição do concreto convencional está aparentemente ligada com a formação de um filme de água ao redor do agregado no concreto fresco, que é provocado pela segregação e ao efeito parede que interfere no empacotamento eficiente dos grãos de cimento.

Nos concretos de alto desempenho, com resistência à compressão na ordem de 100 MPa com adição de sílica ativa, consideráveis mudanças na microestrutura acontecem na zona de transição. A zona de transição do concreto de alto desempenho apresenta uma estrutura densa, com partículas de C-S-H em contato com o agregado. Poucos poros capilares são visualizados e não existem grandes quantidades de hidróxido de cálcio e etringita.

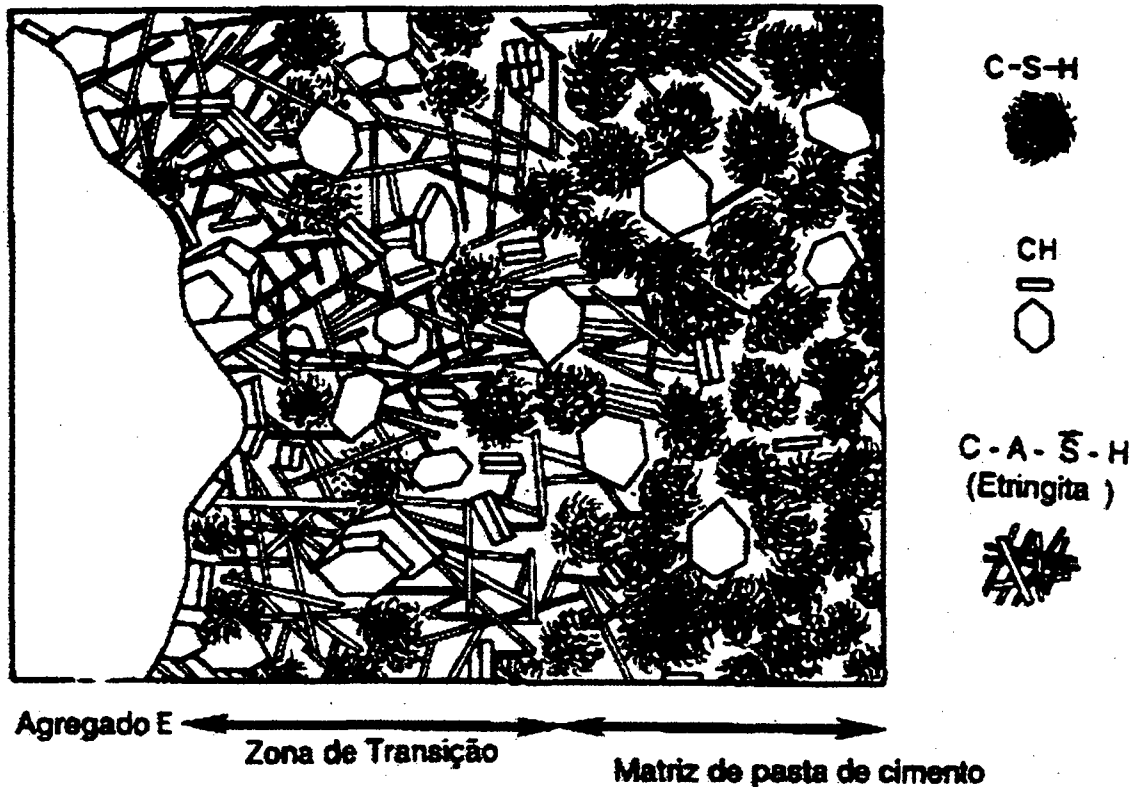


Figura 2-3 Representação diagramática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto (METHA, 1994).

MONTEIRO (1990) cita o trabalho de SCRIVENER et al., que quantificou a microestrutura interfacial de um concreto de alta resistência com sílica ativa, mostrando que a porosidade na zona de transição é reduzida, conforme mostra a Figura 2-4.

A adição de pozolanas, em especial da sílica ativa, conduz à uma redução da quantidade de hidróxido de cálcio na zona de transição, que é acompanhada pela densificação da microestrutura interfacial.

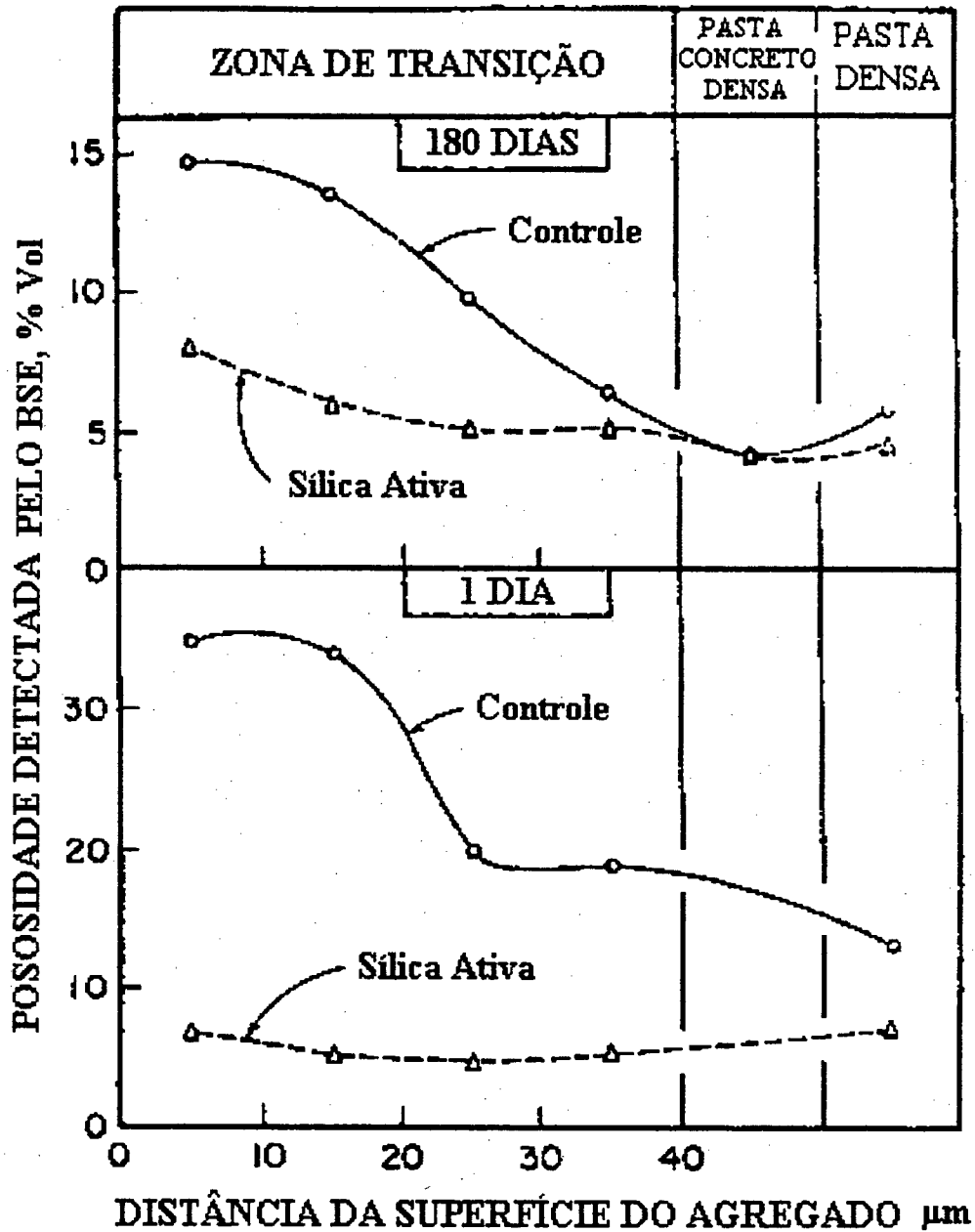


Figura 2-4 Distribuição dos poros detectados por imagem bse ao redor do agregado e na pasta em concreto de cimento Portland (controle) e em concreto com 15 % de sílica ativa que é característico da composição de CAR (SCRIVERNER et al)

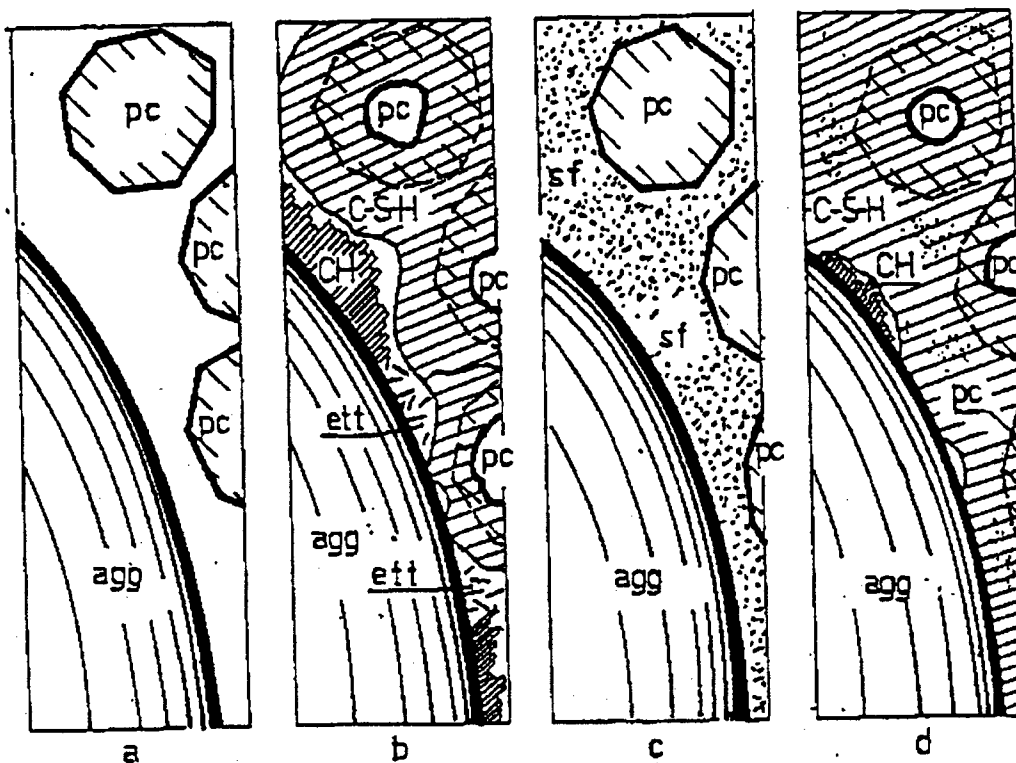


Figura 2-5 Representação esquemática na modificação da zona de transição. a) Concreto fresco sem sílica ativa, com grande espaço em volta do agregado (agg) preenchido pela água, devido à exsudação e ao empacotamento deficiente dos grãos de cimento (pc) na fronteira; b) zona de transição do mesmo sistema, em estágio de maior maturidade, mostrando o preenchimento da zona de transição com o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), mas ainda com espaços vazios, alguns dos quais preenchidos com materiais aciculares provavelmente etringita (ett); c) concreto fresco com sílica ativa, cujas as partículas (sf) preenchem o espaço a volta dos agregados, anteriormente ocupado, na fase (a) pela água; d) zona de transição menos porosa, obtida com o sistema (c) em estágio de maior maturidade (MONTEIRO, 1990).

2.7- Propriedades do concreto de alto desempenho

2.7.1- No estado fresco

A condição principal do CAD no estado fresco é obter a trabalhabilidade, para facilitar o lançamento sem segregação ao ar ou debaixo da água, com o volume mínimo de ar incorporado. Deve ser fluido e não apresentar excessiva retardamento no estado de pega.

Os concreto de alto desempenho são geralmente mais coesos e viscosos em relação aos concretos convencionais. ALMEIDA (1990) comenta que existem recomendações de que

o abatimento indicado para a execução de um determinado serviço para o concreto convencional seja acrescido de até 05 cm no caso de uso de concreto de alto desempenho.

No concreto de alto desempenho, as baixas relações água/cimento, a presença de sílica ativa e aditivos redutores de água afetam as propriedades do concreto fresco de modo que nem o comportamento estático ou dinâmico podem ser comparado ao concreto convencional.

Os métodos convencionais são válidos para dar uma indicação da trabalhabilidade (plástica ou fluida), mas não fornecem uma informação sobre a coesão do concreto. GJORV (1992) relata que concretos com quantidades diferentes de sílica ativa e aditivos redutores de água podem ter o mesmo abatimento e não a mesma coesão.

A trabalhabilidade do concreto de alto desempenho no estado fresco pode ser obtida por um viscosímetro, pois o comportamento do concreto é semelhante a um líquido de Bingham. O modelo de Bingham é definido por duas constantes reológicas: viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento.

A Figura 2-6 mostra os efeitos nas propriedades reológicas com a adição de incorporadores de ar, plastificantes, superplastificantes e da mudança da relação água/cimento.

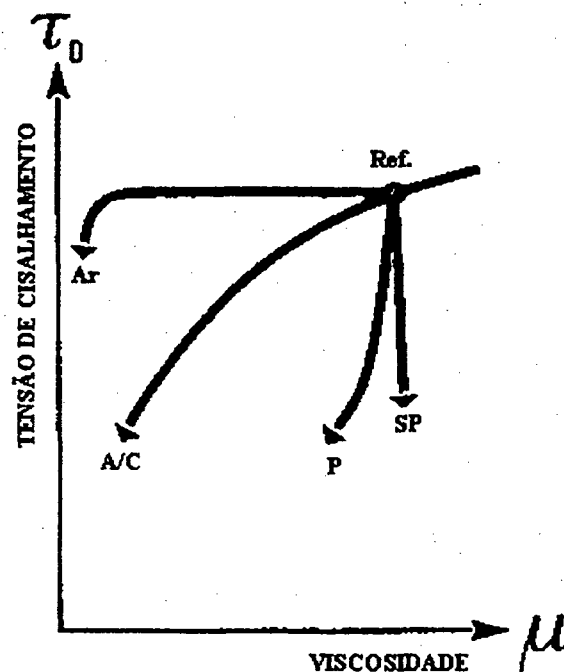


Figura 2-6 Efeito de várias adições na tensão de cisalhamento e na viscosidade (GJORV, 1992).

O teste de abatimento continua sendo utilizado extensivamente pela sua grande facilidade. Alcança o limite prático em torno de 180 a 200 mm, dependendo do tamanho máximo do agregado.

A perda de abatimento com o tempo é mais rápida que no concreto convencional e pode ser combatida de várias formas, como será apresentado no capítulo 3. No entanto, o tempo entre a mistura e o lançamento do concreto deve ser o menor possível.

A massa específica real é um pouco superior a dos concretos convencionais, assim como o teor de ar incorporado. O tempo de pega é geralmente um pouco retardado em relação aos concretos convencionais, fatores que são influenciados pelas altas dosagem de aditivos redutores de água.

A redução ou até mesmo a ausência da exsudação exigem a necessidade de uma cura extremamente cuidadosa.

2.7.2- No estado endurecido

2.7.2.1- Resistência a compressão

DAL MOLIN (1995) relata que a resistência à compressão pode ser considerada como a propriedade mais importante do concreto, por estar diretamente relacionado com a estrutura interna do concreto, indicando uma estimativa do desempenho em termos mecânicos, e indiretamente, da durabilidade.

SÁNCHEZ (1997) indica que, para a determinação desta propriedade, a tendência nos EUA é a adoção de corpos-de-prova de $\varnothing 7,5 \times 15$ cm, mantendo a relação diâmetro/altura igual a 2. Os resultados fornecem uma boa correlação com os corpos-de-prova usuais. Além disso, o consumo de material e mão-de-obra são reduzidos e qualquer prensa pode ser utilizada.

Para ALMEIDA (1990), a resistência à compressão dos concretos é influenciada por uma série de fatores:

- Natureza e dosagem do aglomerante
- Granulometria;
- Máxima dimensão, forma, textura superficial dos agregados
- Resistência e rigidez das partículas;
- Relação água/cimento;
- Porosidade;

- Relação cimento/agregados;
- Idade;
- Grau de adensamento;
- Condições de cura; e
- Condições do ensaio.

2.7.2.2- Resistência à tração

Apesar da resistência à tração geralmente aumentar com o acréscimo da resistência à compressão, o aumento não é diretamente proporcional ao aumento da resistência à compressão.

2.7.2.3- Módulo de deformação (Elasticidade)

Por apresentar uma argamassa com maior rigidez e maior aderência pasta-agregado, o concreto de alto desempenho possui um módulo de deformação superior ao concreto convencional. No entanto, o módulo de deformação não aumenta com a mesma intensidade da resistência à compressão. O módulo de elasticidade pode chegar a 50 GPa, mas geralmente se situa na faixa de 30 a 40 GPa.

2.7.2.4- Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson do concreto de alto desempenho é praticamente igual em relação ao concreto convencional, situando-se na faixa de 0,15 a 0,23. O trabalho de DAL MOLIN (1995) analisa o coeficiente de Poisson para concretos de alta resistência e obteve um valor médio de 0,19.

2.7.2.5- Fluência

A fluência é extremamente menor no concreto de alto desempenho em relação ao concreto convencional, devido aos seguintes fatores:

- Argamassa de melhor qualidade;
- Agregado mais selecionado;

- Microfissuração interna reduzida;
- Relação água/materiais cimentantes baixo; e
- Menos poros capilares.

2.7.2.6- Aderência

A aderência entre o concreto e as barras de armaduras de aço é sensivelmente melhorada, devido à diminuição de uma zona de transição existente, semelhante com o que ocorre entre a pasta e o agregado. A adição de aditivos redutores de água e adições minerais influenciam a aderência, e de modo geral, (ALMEIDA, 1990) constatou que a aderência do concreto-armadura de aço é inversamente proporcional à relação água/materiais cimentantes e diretamente proporcional a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade.

2.7.2.7- Resistência à abrasão

A resistência à abrasão é outra característica extremamente melhorada em relação ao concreto convencional. É diretamente proporcional a resistência à compressão e é influenciada pela natureza do aglomerante e do agregado. NEVILLE (1997) comenta que a boa resistência à abrasão do concreto não é somente devido a alta resistência à compressão do concreto, mas também devido à boa aderência entre o agregado graúdo e a matriz, que impedem o desgaste diferencial da superfície.

2.7.2.8- Durabilidade

A durabilidade pode ser definida como a capacidade de resistir aos agentes agressivos, conservando a sua forma original, qualidade e utilização quando exposto em um meio.

A durabilidade do concreto é melhorada devido a diminuição da permeabilidade, pela modificação da porosimetria, por meio da diminuição da porosidade total e a faixa do tamanho do poro e do fechamento das conexões dos poros. Estas características diminuem a movimentação do fluido pelo concreto, que são causadores responsáveis da expansão, fissuração e corrosão da armadura.

2.7.2.9- Permeabilidade

A baixa permeabilidade é uma das principais propriedades do concreto de alto desempenho. Isto se deve ao fato do concreto de alto desempenho possuir uma estrutura densa da pasta de cimento hidratada, com um sistema de poros descontínuos, que significa possuir alta resistência ao ataque de agentes externos.

Pode-se afirmar que a permeabilidade dos concretos depende de vários fatores, tais como:

- Relação água/materiais cimentantes;
- Tipo e diâmetro dos agregados;
- Dosagem, tipo e granulometria do cimento;
- Adensamento;
- Condições de cura;
- Idade; e
- Condições de cura.

Todos os processos de deterioração são governados pela permeabilidade do concreto. Ainda, o hidróxido de cálcio é o componente facilmente solúvel e que é muito vulnerável ao ataque químico. O uso de materiais pozolânicos se mostra muito efetivo na redução do teor de hidróxido de cálcio.

Apesar da maior parte da literatura consultada optar pelo ensaio de permeabilidade como parâmetro definidor da durabilidade do concretos, ainda não existe um consenso sobre o tipo de ensaio a ser realizado (no que diz respeito ao tipo de fluido, água ou gás), aplicação ou não de pressões altas ou baixas, dimensões dos corpos-de-provas e tempo de ensaio.

2.7.2.10- Porosidade

A porosidade nos concretos de alto desempenho é bastante diminuída. ALMEIDA (1990) comenta que há indícios que os poros remanescentes sejam menos contínuos, mais segmentados, conferindo uma baixa permeabilidade.

A porosidade é influenciada pela adição de sílica ativa através do efeito filler, pela reatividade e pelo uso de aditivos redutores de água que possibilita a redução da relação água/materiais cimentantes.

2.7.2.11- Resistência à carbonatação

A carbonatação é um fenômeno indesejável no concreto armado, visto que, a proteção das armaduras contra a corrosão é garantida originalmente pela alta alcalinidade da pasta de cimento. A carbonatação reduz o pH para valores próximos a 9,0, fazendo com que a proteção da passivação deixe de existir.

Ocorre um aumento significativo na resistência à carbonatação para o concreto de alto desempenho. A carbonatação é um fenômeno muito complexo e a velocidade depende de muitas variáveis, tais como:

- Relação água/materiais cimentantes;
- Dosagem, tipo e finura do cimento;
- Duração e condições de cura;
- Porosidade, permeabilidade e a compacidade da pasta de cimento endurecida;
- Resistência à compressão; e
- Presença de fissuras.

2.7.2.12- Retração

O concreto sofre vários tipos de contração, geralmente denominado de retração.

A primeira ainda acontece no estado plástico, chamado de retração plástica, que é afetada pelo volume de água perdido pela superfície do concreto exposto. O concreto de alto desempenho tem baixa quantidade de água e desenvolve poros capilares muito pequenos. Além disto, não ocorre a exsudação e isto leva a fissuras de retração plástica, caso a perda de água pela superfície não seja impedida.

O segundo tipo de retração ocorre no concreto endurecido, chamada de retração de secagem, que ocorre devido a perda da água pela evaporação no concreto. No concreto de alto desempenho praticamente não há retração de secagem, pois os capilares são muito pequenos.

A retração autógena é o terceiro tipo, que é em consequência da hidratação continuada do cimento através da sua massa e não somente a sua superfície. Esta retração é encorajada pela baixa relação água/cimento. A sílica ativa que reage muito rápido, rapidamente consome a água e contribui para a auto-dissecação. A retração autógena pode ser reduzida pela substituição de uma quantidade de cimento por filler de calcário.

Uma consequência da retração autógena no concreto de alto desempenho é o desenvolvimento de microfissuras internas pela massa do concreto e isto pode ser prevenido pela cura úmida.

Em síntese, as microfissuras devido à retração plástica e microfissuras devido à retração autógena podem representar um problema para a proteção da armadura.

2.7.2.13- Resistência ao fogo.

O concreto de alto desempenho apresenta baixa resistência ao fogo, devido à baixa permeabilidade que impede a saída do vapor formada pela água da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 1997).

3-ADITIVOS

O crescente aumento do uso dos aditivos é devido a capacidade de proporcionar aos concretos e argamassas notáveis melhorias físicas e econômicas.

No início, a diferença entre a evolução do desenvolvimento dos aditivos e do conhecimento técnico dos engenheiros de obra, ocasionou diversos insucessos a nível de utilização e por isto sofreram discriminação de uso.

Mesmo que os aditivos não sejam baratos, nem sempre representam um aumento de custo, pois podem resultar em economias, tais como: custo de adensamento, possibilidade da redução do teor de cimento, melhoria da durabilidade, etc.

Entre os países de maior utilização dos aditivos, pode-se citar: Japão, Alemanha e Estados Unidos, que realizaram diversos estudos nas décadas de 70 e 80, propiciando o desenvolvimento de produtos de melhor desempenho e a formulação de normas que definem o seu comportamento.

Observa-se um crescimento no emprego de aditivos a nível nacional, principalmente dos aditivos superplastificantes, viabilizando o Concreto de Alta Resistência, o Concreto de Alto Desempenho e o Concreto Fluido.

3.1- Definição

A NBR 11768 (EB-1763/1992) define os aditivos como “produtos que adicionados em pequena quantidade (menos que 5% da quantidade da massa de cimento) a concretos de cimentos Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”.

A ASTM C 125 (ACI 212.3R, 1989) considera o aditivo como um material, além da água, agregados, cimentos hidráulicos e fibras, empregado como um constituinte do concreto ou argamassa e adicionado na betoneira imediatamente antes ou durante a mistura.

O Comitê ACI 212 (1992) lista algumas finalidades importantes para as quais os aditivos são empregados, como por exemplo:

- aumentar a trabalhabilidade do concreto sem aumentar o teor da água;

- reduzir a exsudação e a segregação;
- retardar ou acelerar o tempo de pega;
- acelerar a velocidade de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades;
- retardar a taxa de evolução de calor;
- aumentar a durabilidade em condições específicas de exposição; e
- aumentar a resistência aos ciclos de gelo e degelo.

3.2- Classificação

Os aditivos são classificados pelas alterações que provocam nas propriedades do concreto fresco e/ou endurecido. Esta classificação muitas vezes não é fácil em função de apresentar várias características, o que torna necessário determinar ou atribuir-lhes uma função principal.

A NBR 11768 (EB-1763/1992) classifica os aditivos para concreto e argamassa, conforme segue:

- A – Aceleradores;
- R – Retardadores;
- P – Plastificantes;
- IAR – Incorporadores de ar;
- SP – Superplastificante;
- PR – Plastificantes retardador; e
- SPR – Superplastificante retardador.

A classificação da ASTM C 494 (1992), divide os produtos químicos redutores da água e modificadores de pega em sete tipos.

- Tipo A – Redutor da água;
- Tipo B – Retardador;
- Tipo C – Acelerador;
- Tipo D – Redutor da água e retardador;

- Tipo E – Redutor da água e acelerador;
- Tipo F – Redutor da água de alta eficiência; e
- Tipo G – Redutor da água de alta eficiência e retardador.

A diferença entre os plastificantes e superplastificantes é que, quando comparados a uma mistura de concreto de referência de uma determinada consistência, o primeiro deve ser capaz de reduzir o consumo de água em ao menos 5 % e o último em ao menos 12 % (NBR 11768 (EB-1763/1992)).

O American Concrete Institute, através do Comitê 212, publicou o estado da arte e diretrizes para o uso de aditivos químicos no concreto, que são:

- ACI 212.1R-81 – aditivos redutores de água e reguladores de pega;
- ACI 212.2R-89 – aditivos para concreto fluido;
- ACI 212.3R-91 – aditivos químicos para concreto; e
- ACI 212.4R-93 – guia para uso de aditivos redutores de alta eficiência (superplastificantes).

3.3- Plastificantes

Os plastificantes têm a função de reduzir o teor de água da mistura em torno de 5 % a 10 %, podendo chegar até 15 % em concreto de elevada trabalhabilidade. As finalidades dos plastificantes podem ser:

- Reduzir a relação água/cimento, mantendo a trabalhabilidade desejada; e
- Aumentar a trabalhabilidade com a mesma relação água/cimento.

Os principais tipos de aditivos plastificantes são:

- Ácidos lignossulfônicos e seus sais; e
- Ácidos carboxílicos hidroxilados e seus sais.

A Figura 3-1 (a) mostra as fórmulas típicas de tensoativos empregados como aditivos redutores de água.

Os principais componentes ativos dos aditivos plastificantes são tensoativos, que se concentram na interface entre duas fases não miscíveis alterando as forças físico-químicas

atuantes nessa interface. Esses componentes são adsorvidos nas partículas de cimento, como mostra a Figura 3-1 (b), conferindo uma carga negativa, que resulta numa repulsão entre as partículas, ou seja, uma defloculação com a estabilização da dispersão; as bolhas de ar também são repelidas e não podem aderir às partículas de cimento. Os plastificantes aumentam a superfície do cimento que pode se hidratar inicialmente e a água disponível para hidratação, porque com a floculação um pouco de água fica aprisionada e partículas de cimento entram em contato entre si; as partes em contato não ficam disponíveis para o início da hidratação (AÏTCIN, 1992).

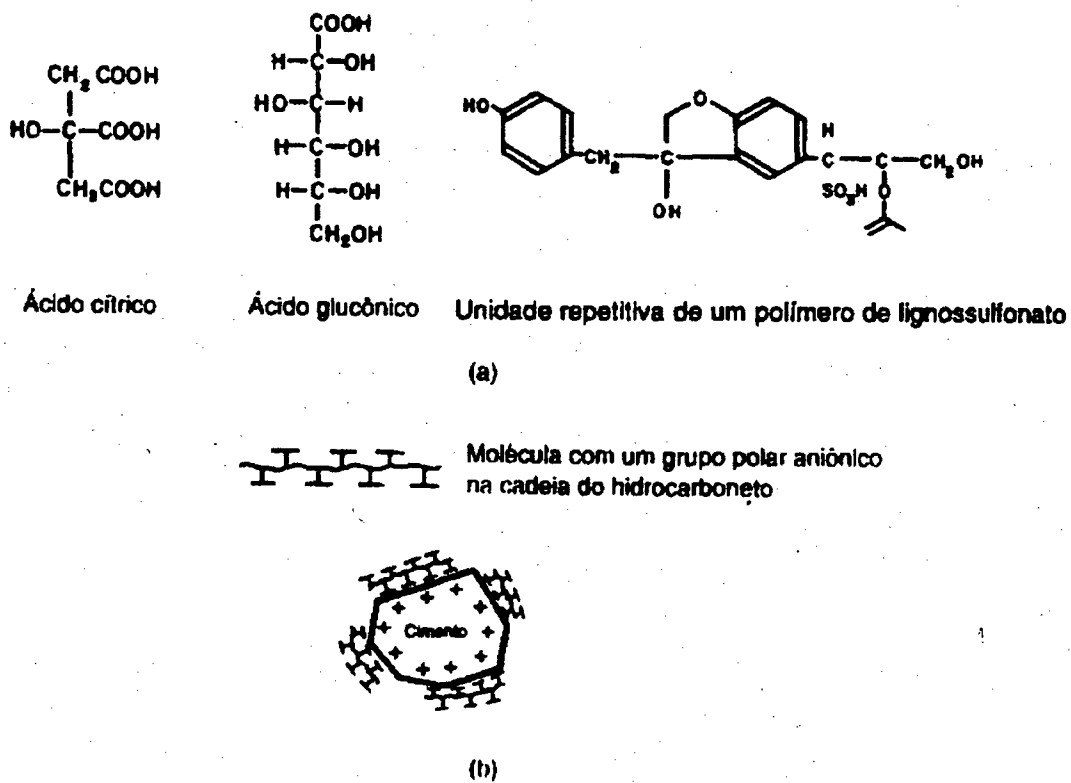


Figura 3-1 (a) Fórmulas típicas de tensoativos empregados com aditivos redutores de água; (b) quando um tensoativo com vários grupos polares aniônicos na cadeia de hidrocarboneto é adicionado ao sistema água cimento, a cadeia polar é adsorvida na superfície da partícula de cimento (METHA, 1994).

Além disso, as cargas eletrostáticas dão origem a uma camada de moléculas de água orientadas que impedem que as partículas de cimento se aproximem muito umas das outras. Por causa disto, as partículas de cimento adquirem grande mobilidade e a água fica livre da influência restritiva do sistema floculado, ficando disponível para lubrificar a mistura e aumentando a trabalhabilidade.

Os aditivos plastificantes têm influência sobre a velocidade de hidratação do cimento, sendo que a natureza dos produtos de hidratação formados não é alterada. Porém, podem provocar algum retardamento da pega, riscos de segregação e de exsudação.

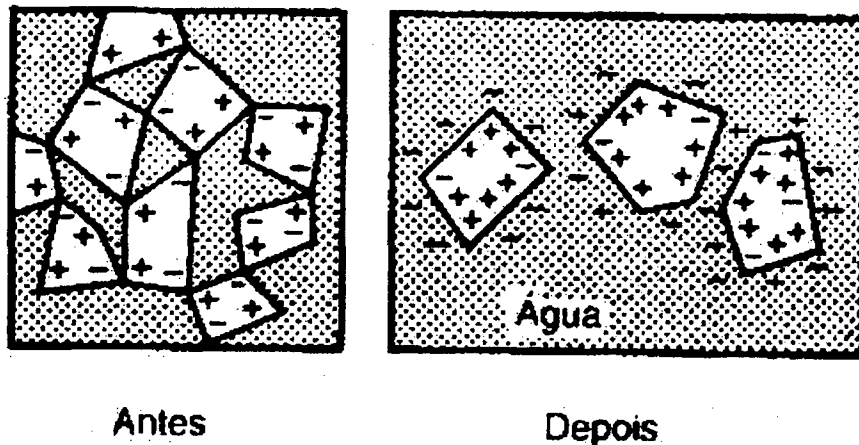


Figura 3-2 Representação diagramática de formação de flocos pelas partículas de cimento antes da adição de um tensoativo redutor de água e a dispersão dos flocos após a adição (METHA, 1994).

A eficiência do plastificante depende da composição do cimento, sendo maior quando usados com cimentos com baixo teor de álcalis ou baixo teor de C_3A . A Figura 3-3 mostra um exemplo, onde NEVILLE (1997) cita o trabalho de MASSAZZA e TESTOLIN de melhoramento da trabalhabilidade de mistura para teores de aditivo à base de lignossulfonato, em função do teor de C_3A do cimento Portland usado. A Figura 3-3 mostra um aumento de abatimento com a redução do teor de C_3A .

É observada uma melhora de trabalhabilidade quando o aditivo é adicionado na mistura com um pequeno atraso.

A ação dispersante do plastificante tem também algum efeito sobre a dispersão do ar na água de modo que o aditivo, principalmente os que têm lignossulfonato como agente, podem ter algum efeito incorporador de ar. Isto ocasiona uma redução da resistência, mas por outro lado aumenta a trabalhabilidade (AÏTCIN, 1992).

É fundamental que se façam misturas experimentais com os materiais que serão efetivamente usados na obra, para determinar o tipo e quantidade de aditivo a fim de serem otimizadas as propriedades do concreto.

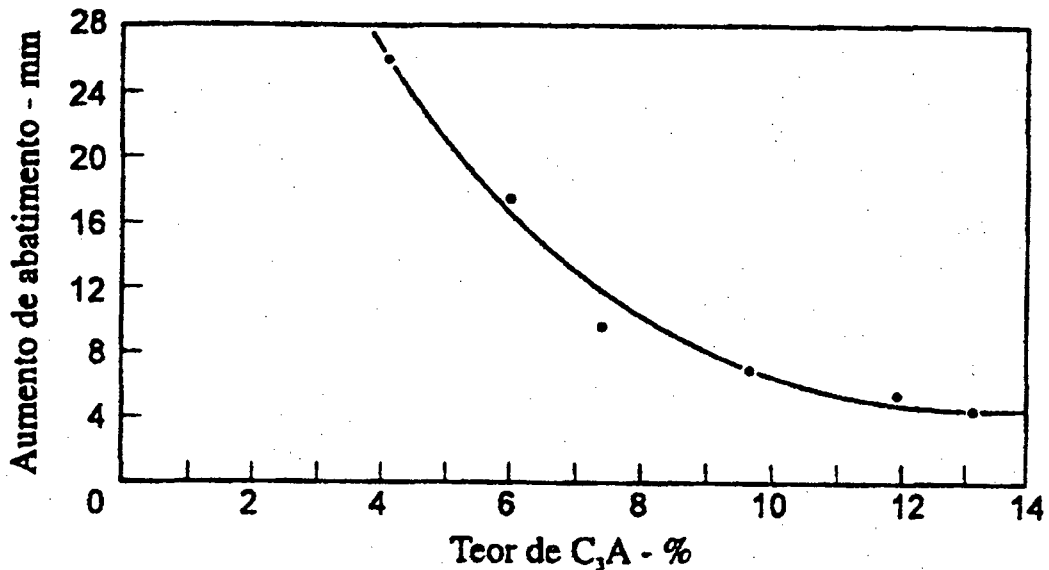


Figura 3-3 Influência do teor de C₃A (C₃S e C₂S constantes) na diminuição da fluidez de argamassa, em relação a argamassa sem aditivo, adicionando 0,2% de aditivo de lignossulfonato (MASSAZZA e TESTOLIN citado por NEVILLE (1997)).

3.4- Aditivos redutores de água de alta eficiência

Os aditivos redutores de água de alta eficiência são também denominados superplastificantes, por serem capazes de reduzir a quantidade de água de amassamento em 12% ou mais, para produzir um concreto de determinada consistência.

Os superplastificantes têm sido usados no Japão desde a década de 60, na Europa desde 1972 e nos Estados Unidos desde 1976.

Os superplastificantes são tensoativos aniônicos de cadeia longa, com massa molecular elevada (20.000 a 30.000) e com um grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarbonetos. Quando adsorvidos pelas partículas de cimento, o tensoativo confere uma forte carga negativa, a qual ajuda a reduzir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e aumentar a fluidez do sistema (METHA, 1994).

Os aditivos redutores de água de alta eficiência são requeridos para a produção de concreto de alto desempenho/alta resistência/fluído. A grande quantidade de partículas de cimento com a baixa quantidade de água de amassamento requer alta dosagem de aditivos redutores de água de alta eficiência para deflocular e dispersar as partículas de cimento em suspensão. Quando é adicionada sílica ativa a estes concretos, que aumenta

consideravelmente o consumo de água, são necessários os aditivos para manter a baixa relação água/materiais cimentantes e a trabalhabilidade.

Existe uma quantidade muito grande de produtos comerciais e seus efeitos no concreto são descritos pelos fabricantes. A forma de atuação destes produtos ainda não está completamente esclarecida e o desempenho dos aditivos redutores de água de alta eficiência, numa composição com materiais específicos, deve ser analisada através de ensaios realizados previamente, para a utilização do produto em obras, principalmente em função da compatibilidade aditivo-cimento.

3.4.1- Características físicas

Os aditivos redutores de água de alta eficiência são comercializados em forma de pó ou em solução aquosa. Recomenda-se que os aditivos em pó sejam inicialmente diluídos em água para a sua melhor dispersão no concreto.

Os aditivos redutores de água de alta eficiência na forma líquida apresentam-se geralmente:

- Massa específica em torno de $1,2 \text{ kg/dm}^3$;
- Cor castanha embora existam variações;
- Cheiro característico; e
- Teor de sólidos em torno de 40 %, apesar de existir produtos com teor de sólidos de até 20%.

3.4.2- Características químicas

Os superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias, de acordo com a sua composição química (BUCHER, 1988; RAABE, 1991; DAL MOLIN, 1995; PAZ, 1998) e que são os seguintes:

CATEGORIA A: Condensados de Formaldeído Melamina Sulfonados (SMF). Estes foram desenvolvidos pelos alemães e podem apresentar uma tendência a retardar a pega do cimento e, eventualmente, incorporar uma pequena quantidade de ar.

CATEGORIA B: Condensado de Formaldeído Naftaleno Sulfonados (SNF). Estes foram desenvolvidos pelo japoneses e praticamente não interferem no tempo de pega do cimento e não incorporam ar segundo os autores citados. No entanto,

GJORV (1992) e RAABE (1991) afirmam que os aditivos da categoria A incorporam menos ar que os da categoria B.

CATEGORIA C: Lignosulfonatos Modificados (MLS). Estas substâncias geralmente incorporam ar e retardam o tempo de pega em diversas intensidades.

CATEGORIA D: Outros, como ácidos e ésteres sulfônicos e ésteres carboidratos.

Das categorias mencionadas, somente as duas primeiras são mundialmente utilizadas, pois apresentam maior eficiência como redutores de água e menor incidência de efeitos colaterais.

Todas as categorias podem apresentar variações nas suas composições químicas, isto pode ocorrer devido:

- a adição intencional de produtos que modifiquem o tempo de pega do concreto;
- pela interferência no processo de síntese do superplastificante;
- no comprimento da cadeia polimérica;
- número de grupos sulfônicos; e
- com variações no anel naftalênico no caso do SNF.

É freqüente encontrar aditivos com mais de uma base química (SMF + SNF, SNF + lignosulfonato purificado, etc.), onde tem-se observado um efeito sinérgico da combinação de ambos com relação ao feito das substâncias atuando isoladamente.

Os aditivos superplastificantes são geralmente comercializados em forma líquida (diluídos em água) e com adição de substâncias que melhoram a sua estabilidade de estocagem e corrigem o pH de forma evitar problemas de manuseio.

3.4.3- Ação dos aditivos redutores de água de alta eficiência

Os aditivos redutores de água de alta eficiência são polímeros que interagem fisicamente e quimicamente com as partículas de cimento.

3.4.3.1- Interação física

A interação física ocorre quando o aditivos redutores de água de alta eficiência são usados para dispersar as partículas finas. Isto pode acontecer através de 03 formas (GAGNÉ, BOISVERT e PIGEON, 1996; RILEM TC158-AHC, 1997):

- 1- Adsorção das moléculas de aditivos redutores da água de alta eficiência pelas forças de Van der Waals e eletrostáticas nas partículas;
- 2- Redução das forças de atração entre partículas com cargas opostas (defloculação) e a introdução da força repulsiva entre partículas devido a alta carga negativa conferida as partículas pela adsorção do aditivos redutores de água de alta eficiência (dispersão); e
- 3- Formação de um filme entre moléculas de polímeros adsorvidos e partículas vizinhas.

A ação dos superplastificantes é fundamental para a dispersão das partículas de cimento, através da adsorção de suas moléculas nos grãos de cimento, causando a repulsão entre os mesmos, como mostra a Figura 3-4 (MEHTA, 1994). As moléculas têm o carácter iônico dissociando-se na água e originado ânions orgânicos. A adsorção aumenta com o aumento da massa molecular média do polímero. Quanto maior for a adsorção melhor a dispersão das partículas de cimento e mais homogênea será a microestrutura da pasta de cimento, o que traz uma maior resistência e durabilidade em relação as pastas de cimento com microestruturas heterogêneas.

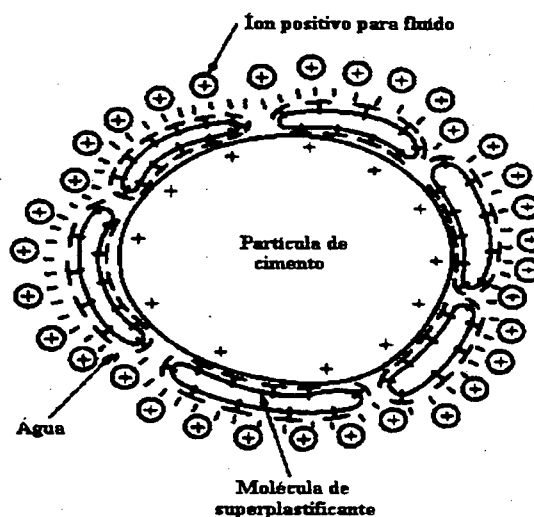


Figura 3-4 Adsorção do aditivo superplastificante pela partícula de cimento.

A dispersão reduz ainda as interações entre as partículas individuais, diminuindo a consistência da pasta – viscosidade é mais baixa e trabalhabilidade é melhor.

Da mesma maneira que ocorre com os aditivos plastificantes, a dispersão dos aglomerados de cimento em partículas menores reduz a retenção da água, que pode ser então utilizada para aumentar a trabalhabilidade do sistema, chamado de efeito redutor da água. Desta forma, é necessário uma menor quantidade da água para obtenção da mesma trabalhabilidade ou, pode obter-se concreto mais trabalhável com a mesma quantidade de água.

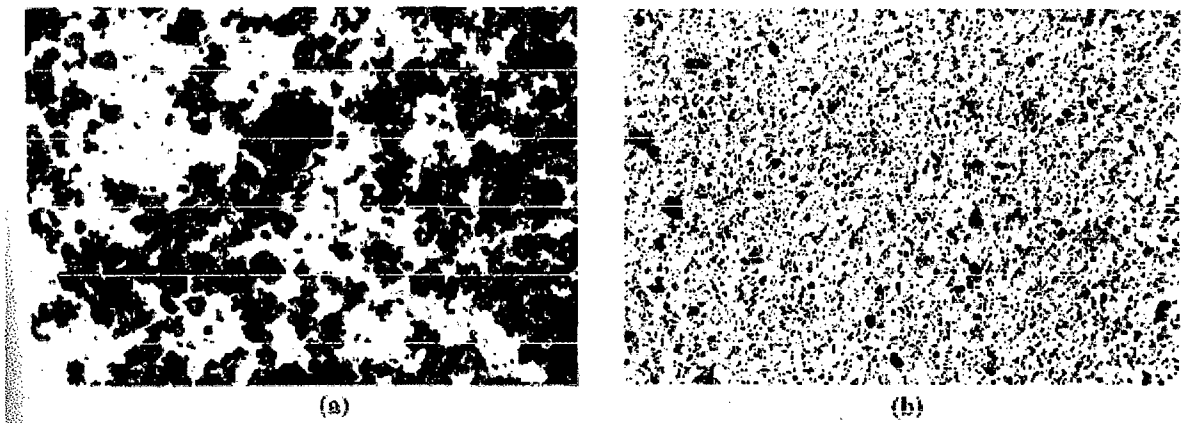


Figura 3-5 Micrografia de partículas de cimento flocladas em uma suspensão de água-cimento (a) sem aditivo presente; (b) com aditivo superplastificante.

3.4.3.2- Interação química

A interação química ocorre na hidratação das partículas de cimento. A estrutura fundamental da hidratação da pasta de cimento não é afetada (NEVILLE, 1997), porém os aditivos redutores de água de alta eficiência interagem com o C_3A , que é o primeiro componente do cimento a hidratar-se e sua reação controlada através da adição de sulfato de cálcio.

Uma certa quantidade de aditivo redutor de água de alta eficiência é necessária durante a mistura para obter a trabalhabilidade desejada, no entanto, é imprescindível que o aditivo redutor de água de alta eficiência não seja todo fixado pelo C_3A . Se a fixação ocorrer é porque o gesso não libera íons sulfatos suficientemente rápido para reagir com C_3A . Quando os íons sulfatos são liberados vagorosamente, o cimento e o superplastificante são ditos incompatíveis.

NEVILLE (1997) mostra que é fundamental o controle do fator de solubilidade do sulfato de cálcio em um dado cimento. O sulfato de cálcio pode-se apresentar de três modos, dependendo das matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento, que são:

- Sulfato de cálcio dihidratado (gipsita) ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);
- Sulfato de cálcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), obtida pela desidratação do gesso à 120°C ; e
- Anidrita (CaSO_4), obtida pela desidratação do gesso à 170°C .

Cada um destes apresenta diferentes taxas de solubilidade, sendo a da anidrita dependente da sua estrutura (HUYNH, 1996).

A maioria das normas de cimento normalmente especificam a quantidade máxima de sulfato no cimento. No entanto, podem existir outras fontes de sulfato além da adição ocorrida na moagem, como do carvão ou óleo utilizado nos fornos do cimento e que apresentam uma baixa solubilidade.

Isto mostra que cimentos contendo a mesma quantidade de sulfatos (SO_3), dependendo da sua origem, disponibilizam uma quantidade diferente de sulfatos para reagir com o C_3A nos estágios iniciais. Se a quantidade de sulfato for insuficiente, o sulfato presente no final da molécula dos aditivos redutores de água de alta eficiência será fixado e não contribuirá na melhora da trabalhabilidade da mistura. Isto explica a adição após a mistura inicial (retardada), que pode não ser suficiente e das complicações que podem surgir no processo de mistura.

O problema da incompatibilidade descrito pode também existir no concreto convencional, mas é muito mais acentuado no concreto de alto desempenho. A explicação para este fato é que, no concreto de alto desempenho, trabalha-se com relações água/cimento muito baixas, de maneira que uma menor quantidade de água está disponível para receber os íons sulfatos e a alta quantidade de cimento por m^3 de concreto faz com que exista mais C_3A , cuja reação deve ser controlada para garantir a trabalhabilidade desejada (NEVILLE, 1997).

Diante do exposto, pode-se perceber que a determinação da dosagem dos aditivos redutores de água de alta eficiência é uma tarefa complexa, com implicações no custo, na reologia do concreto fresco e nas propriedades mecânicas nas primeiras idades.

3.4.4- Efeito dos aditivos no concreto de alto desempenho

3.4.4.1- Concreto no estado fresco

Os principais aspectos do concreto no estado fresco, que podem ser afetados pela utilização de aditivos redutores de água de alta eficiência encontram-se descritos a seguir.

3.4.4.1.1- Consistência

A consistência é provavelmente a propriedade do concreto que tem recebido maior número de pesquisas relativas ao uso do superplastificante. Tem como princípio a sua alteração, permitindo reduções na água de amassamento.

Vários fatores podem afetar a consistência do concreto, mas o mais importante é a sua perda com o tempo. A alta taxa de perda de consistência, comparada aos concretos convencionais, é a grande dificuldade da propagação do uso dos aditivos superplastificantes. No entanto, diversas pesquisas estão sendo realizadas, incentivadas pelos fabricantes de aditivos.

Os outros fatores que determinam a velocidade com que a consistência diminui, são: tipo de aditivo, dosagem e momento de colocação na mistura, tipo e consumo de cimento, relação água/cimento, condições climáticas, procedimento de mistura (tempo de mistura, tipo de betoneira e velocidade de mistura), consistência inicial e presença de outros aditivos (RAMACHANDRAN, BEAUDOIN e SHIHUA, 1989).

3.4.4.1.2- Tipo de superplastificante

Observa-se, de um modo geral, pelos estudos realizados que, concretos com superplastificante à base de melamina perdem a consistência com uma velocidade mais acentuada do que a base naftaleno. A Publicação 45030 da CEMENT and CONCRETE ASSOCIATION (1978) salienta que podem ocorrer variações no período de retenção da consistência, que depende do método de mistura e ensaio utilizado para a sua determinação, conforme mostra a Figura 3-6.

Mesmo com um único tipo de superplastificante, podem ocorrer variações no comportamento. Este fato pode ser atribuído a variações nos tipos de cátions associados com o superplastificante e seu peso molecular.

CHAN, FENG e TSANG (1996) mostram na Figura 3-7 a perda de consistência de concretos com várias relações água/cimento e três tipos de aditivo. A figura mostra que a perda da consistência é maior nas baixas relações água/cimento.

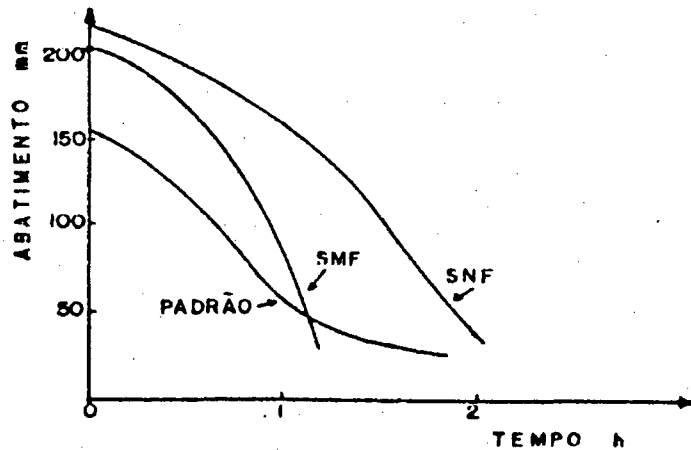


Figura 3-6 Representação do Abatimento do Tronco de Cone em função do tempo (CEMENT and CONCRETE ASSOCIATION, 1978).

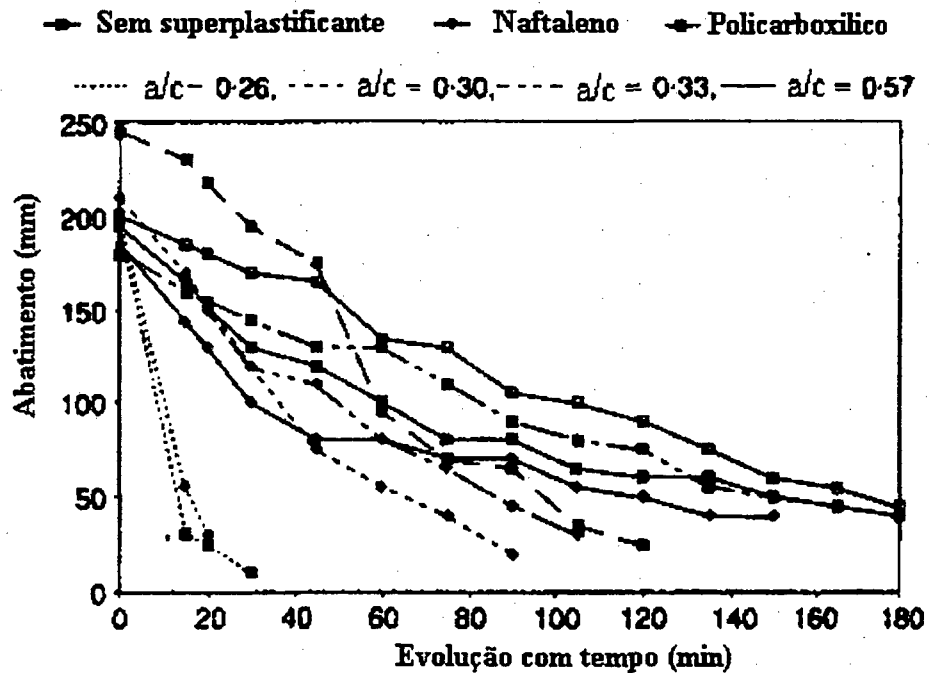


Figura 3-7 Perda da consistência em função do tempo com concretos várias relações água/cimento (CHAN e FENG e TSANG, 1996).

NKINAMUBANZI, BAALBAKI e AICTIN (1997) comparam o desempenho de 04 aditivos superplastificantes em concreto de alto desempenho em relação ao tempo, como

mostra a Figura 3-8. Pode-se perceber uma variação de comportamento dos aditivos à base melamina ao longo do tempo.

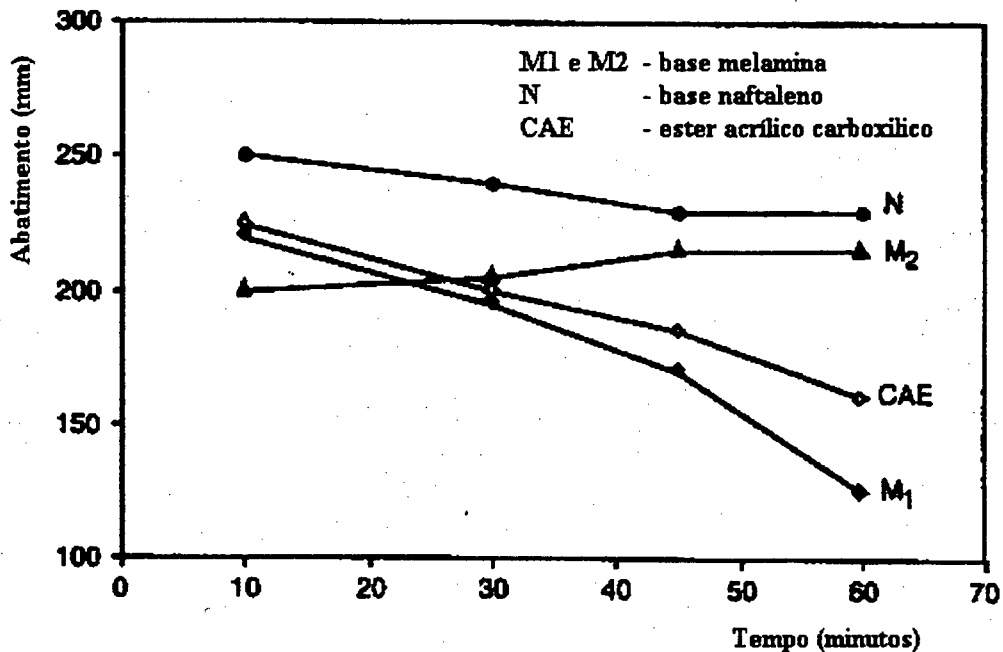


Figura 3-8 Variação do abatimento com o tempo de 04 diferentes aditivos superplastificantes (NKINAMUBANZI, BAALBAKI e AICTIN, 1997).

3.4.4.1.3- Tipo de cimento

Todos os tipos de cimentos Portland apresentam um aumento da trabalhabilidade com a adição de superplastificante, mas a eficiência varia em função do conteúdo de sulfatos, aluminatos e álcalis, bem com à forma do sulfato de cálcio utilizado como regulador de pega do cimento. Quanto maior o conteúdo de álcalis, maior a velocidade das reações e, portanto, maior será a perda de consistência. O mesmo acontece com a presença de superplastificante que acelera as reações entre C_3A e o sulfatos. Cimentos com quantidade maior de C_3A perdem mais rapidamente a consistência inicial, conforme é mostrado na Figura 3-6.

Concretos com cimento de maior finura apresentam uma menor eficiência do aditivo em função da diminuição da concentração específica das moléculas adsorvidas na superfície das partículas de cimento.

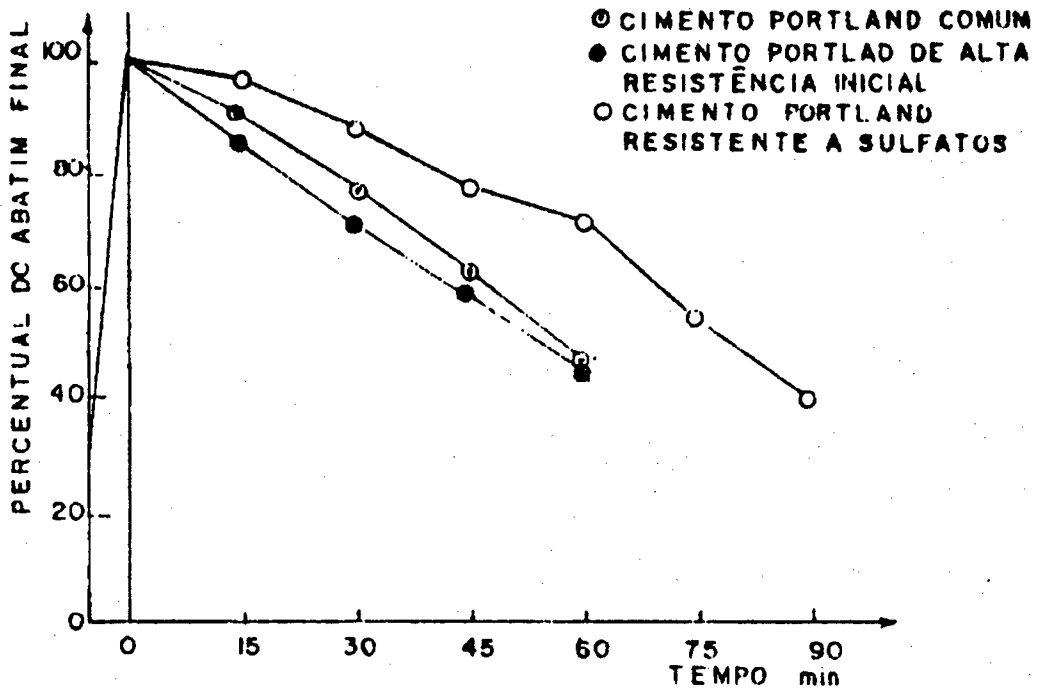


Figura 3-9 Efeito do Tipo de Cimento na Perda do Abatimento do Tronco de Cone (MAILVAGANAN (1979) apud RAABE (1991)).

3.4.4.1.4- Consumo de Cimento

A questão ainda está contraditória. RAABE (1991) cita alguns trabalhos realizados que mostram conclusões diferentes para a perda de consistência com o tempo e conclui-se que a questão ainda necessita de novas pesquisas.

Em relação ao poder fluidificante do aditivo, normalmente atribui-se maior eficiência a misturas cujo consumo de cimento se situe entre 300 e 450 Kg/m³.

3.4.4.1.5- Relação água/cimento

CHAN e FENG e TSANG (1996) mostram na Figura 3-10 que a eficiência de 04 superplastificantes na dispersão é diferente e esta diferença é maior quanto menor a relação água/cimento. Baseado na figura pode-se concluir que os aditivos a base de melamina e naftaleno são mais efetivos na dispersão do cimento em baixas relações água/cimento.

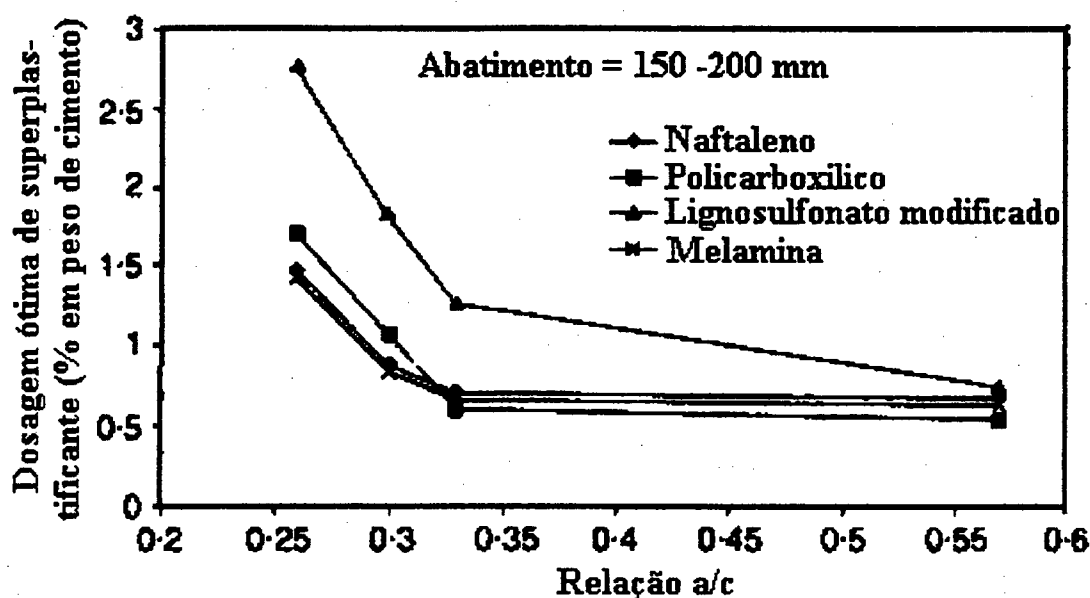


Figura 3-10 Eficiência da dosagem ótima de superplastificante variando a relação água/cimento (CHAN e FENG e TSANG, 1996).

3.4.4.1.6-

Compatibilidade com Outros Aditivos

Praticamente, todos os tipos de aditivos são compatíveis com os superplastificantes. No entanto, em alguns casos, pode ser incrementados efeitos secundários, sendo recomendado testes preliminares de compatibilidade.

Com os incorporadores de ar por exemplo, podem haver dificuldades na obtenção de um tamanho e espaçamento dos vazios adequados para uma boa proteção contra o gelo/degelo. Atualmente, devido às novas pesquisas em desenvolvimento, surgem no mercado novos incorporadores de ar capazes de interagir com os superplastificante sem que resulte em alterações na estabilidade do sistema de vazios (BAEKAMARK et al., 1994 apud DAL MOLIN 1995).

3.4.4.1.7-

Momento de Adição do Superplastificante

Em função da perda de consistência com o tempo, acredita-se que o superplastificante deva ser incorporado à mistura o mais próximo possível do momento de descarga do concreto.

Como o C_3A hidratado absorve quantidades bem inferiores de aditivo, é recomendado um atraso no momento de adição do superplastificante em relação a água de amassamento, permanecendo então na fase aquosa um maior teor de superplastificante que é capaz de promover uma dispersão mais eficiente dos silicatos.

DAL MOLIN (1995) cita o trabalho de COLLEPARDI (1994) que mostra o efeito do momento de adição do aditivo superplastificante a base de naftaleno no abatimento inicial do concreto. Pode-se observar um aumento de 100% no abatimento inicial com a adição retardada de 1 minuto em relação à adição na água de amassamento, como mostra a Figura 3-11.

RAMACHANDRAN E MALHOTRA (1984), afirmam que a colocação do superplastificante após o período entre 5 a 50 minutos após o cimento estar em contato com a água, resulta geralmente em valores decrescentes de abatimento.

3.4.4.1.8- Consistência inicial do concreto

A consistência inicial não diminui linearmente com a dosagem de aditivo. Existe um limite de consistência abaixo do qual ocorre segregação.

DAL MOLIN (1995) comenta sobre vários estudos realizados com aditivos superplastificante que mostraram a tendência de quanto menor a fluidez inicial maior é a perda com o tempo. Dessa forma, WHITING (1980) recomenda utilizar abatimentos iniciais maiores compatíveis em função do tempo de lançamento.

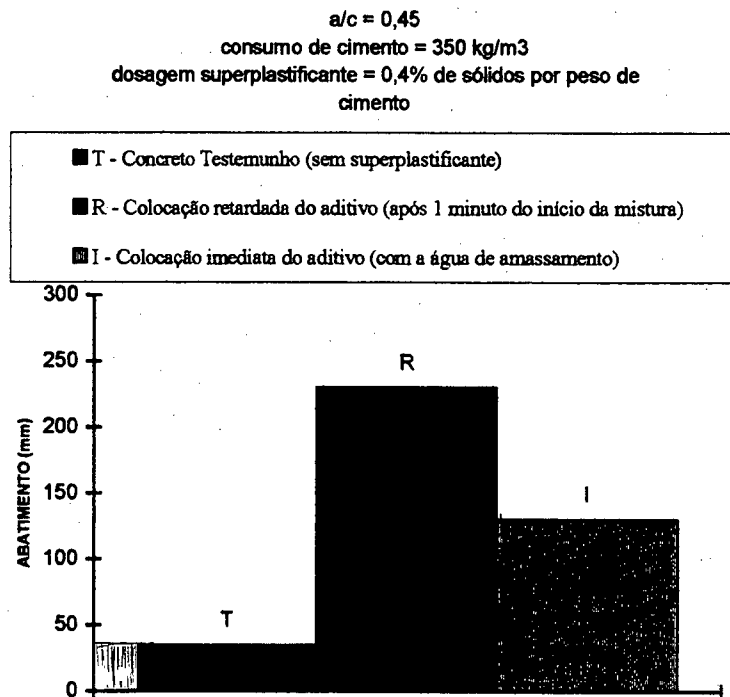


Figura 3-11 Efeito do momento de colocação de um aditivo superplastificante a base de naftaleno no abatimento do concreto (COLLEPARDI, 1994 apud DAL MOLIN, 1995).

3.4.4.2- Métodos para Controlar a Perda de Consistência com o Tempo

A viabilidade de produção dos Concreto de Alto Desempenho, Concreto de Alta Resistência e Concretos Fluídos com o uso de aditivos redutores de água de alta eficiência fica seriamente prejudicada pela perda de consistência com o tempo.

Um método é adicionar o superplastificante no momento da descarga do concreto (RILEM TC 158-AHC, 1997; RAMACHANDRAM, BEAUDOIN e SHIHUA, 1989). Técnica que vem sendo adotada com sucesso em países de clima quente. Neste procedimento são encontrados problemas, tais como:

- dificuldade de controlar com precisão a dosagem de aditivo e a consistência inicial que pode variar com o tempo despendido no transporte (pré-hidratação do cimento);
- possibilidade de tornar a mistura muito rija, já que o consumo de água é baixo;
- absorção de parte do aditivo com água de molhagem dos agregados; e
- desgaste excessivo do equipamento.

3.4.4.2.1- *Uso com outros aditivos*

A introdução de um aditivo redutor de água comum tem como objetivo minimizar o problema de perda de consistência, reduzir a dosagem de aditivo redutor de água de alta eficiência e gerar economia (ALMEIDA, 1984; AITCIN, 1992).

3.4.4.2.2- *Redosagem*

A redosagem com SP em diferentes intervalos de tempo é uma forma de recuperar a perda da consistência com o tempo (RAMACHANDRAM, BEAUDOIN e SHIHUA, 1989).

A redosagem parece ser uma prática bastante aceitável junto aos consumidores de aditivo, apesar de ocorrer uma perda de capacidade do superplastificante em manter a consistência com o aumento do número de redosagens. Contudo, tem-se recomendado não redosar por mais de duas vezes o concreto, devido o alto custo do aditivo. É recomendado cautela contra a segregação quando são feitas duas ou três redosagem para manter a consistência (METHA e MONTEIRO, 1994).

CHAN, FENG e TSANG, 1996 realizaram um estudo para verificar o efeito da forma da redosagem sobre o abatimento dos concretos, como mostra a Figura 3-6. Neste estudo, em

diferentes intervalos de tempo pré-determinados, eram adicionados novas quantidades de aditivo para recuperar o abatimento original. Concluíram que, no caso de redosagens realizadas em intervalos de tempo igual, as quantidades necessárias eram similares. Entretanto, o volume acumulado de aditivo necessário para retornar o abatimento inicial era dependente do intervalo de tempo adotado (intervalo de tempo maior, a dosagem acumulada necessária foi menor).

3.4.4.2.3- Retardadores de pega

Uma prática comum para atenuar a perda de consistência consiste na adição de um aditivo retardador de pega (GJORV,1992; RAMACHANDRAM, BEAUDOIN e SHIHUA, 1989).

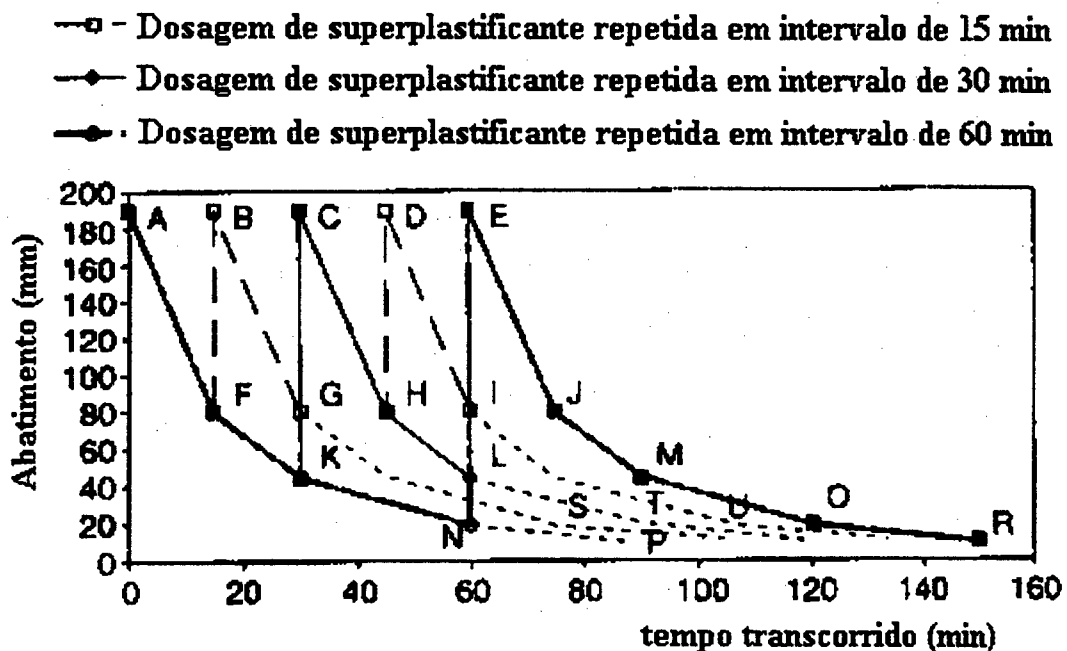


Figura 3-12 Retenção do abatimento com dosagens repetidas (CHAN, FENG e TSANG, 1996).

O uso simultâneo de um aditivo retardador e um aditivo redutor de água de alta eficiência é complicado, pois a reatividade do cimento é bastante influenciada pelos fatores climáticos (AITCIN, 1992; RAVINA, 1995), e o efeito final é a produção de concreto com baixas resistências iniciais ou agravamento da perda de abatimento (DAL MOLIN, 1995).

Pela sua natureza, são supostos aos aditivos retardadores a diminuição da taxa de hidratação do cimento e conseqüentemente da perda da consistência com o tempo. No entanto, em misturas com agitação contínua eles pode acelerar (RAVINA, 1995).

3.4.4.2.4-

Uso de materiais cimentícios

No concreto de alto desempenho, os materiais cimentícios suplementares desempenham grande importância e melhoram as propriedades reológicas como também as propriedades no estado endurecido.

A influência dos materiais cimentícios suplementares, usados em combinação com SP, na perda da trabalhabilidade do concreto de alto desempenho, revela que a cinza volante (RAVINA, 1995) e a escória melhoram a perda de consistência, as pozolanas naturais são desfavoráveis e que a sílica ativa não tem nenhum efeito, exceto em dosagens superiores a 10 % quando é desfavorável (RILEM TC 158-AHC, 1997).

Estas generalizações devem ser tomadas com precauções pois estes efeitos dependem do valor da consistência inicial, tipo e quantidade de SP adicionado, tipo e quantidade de materiais cimentícios adicionados, momento de adição do SP, temperatura e a presença de outros aditivos na mistura.

3.4.4.2.5-

Divisão da dosagem do aditivo

A divisão da dosagem é especialmente adequada para o concreto produzido em concreteiras durante o seu transporte. A consistência inicial do concreto com a primeira adição de superplastificante deve estar em torno de 50 mm e a redosagem parece ser mais efetiva quando for feita no intervalo de tempo menor que 70 minutos.

3.4.4.2.6-

Temperatura

Observa-se que a variação da temperatura produz um efeito marcante na consistência inicial como na taxa de perda da consistência com o tempo dos concretos com superplastificantes.

As dosagens de superplastificantes necessárias aumentam a medida que a temperatura diminui em até 30% (WHITING, 1980). No entanto, constatou-se que temperaturas abaixo de 22 °C prolongam o estado de máxima trabalhabilidade, enquanto uma perda drástica do abatimento ocorre a temperaturas acima 32 °C (MAILVAGANAM, 1979 apud DAL MOLIN, 1995).

Outra solução para o problema da perda da consistência é a redução da temperatura inicial do concreto.

3.4.4.2.7-**Novos aditivos**

Vêm sendo desenvolvidos novos aditivos redutores de água de alta eficiência capazes de manter a consistência do concreto por um período de tempo mais longo, de 1 a 2 horas. Estes aditivos poderão em breve resolver as principais limitações práticas do uso em obras.

3.4.4.3-**Exsudação e Segregação**

Como o concreto de alto desempenho tem baixas relações água-cimento, praticamente não existe segregação e exsudação (METHA e MONTEIRO, 1994).

Em concreto de alto desempenho com consistência muito elevada pode ocorrer a segregação, caso a composição da mistura não tenha sido modificada, para assegurar uma quantidade suficiente de partículas finas. Para prevenir a segregação é recomendada a adição de materiais finos, como a sílica ativa e a escória. Estes também inibem a exsudação, mas aparece o risco da fissuração por retração plástica (RILEM TC 158-AHC, 1997).

Em casos de baixas relações água-cimento, a dosagem de aditivo pode ser aumentada além do limite operacional como um meio de promover e reter a consistência do concreto por um período de tempo. Contudo surgem efeitos adversos, tais como: segregação e/ou exsudação, retardamento de pega e endurecimento e a incorporação de ar.

3.4.4.4-**Tempo de pega**

Normalmente os aditivos redutores de água de alta eficiência retardam o tempo de início e fim de pega. A norma ASTM C-494 (1992) permite que o período de pega seja antecipado em um hora ou atrasado em um hora e meia comparativamente sem aditivo, tanto de início quanto fim de pega.

O tempo de retardo depende fundamentalmente do tipo e dosagem do aditivo redutor de água de alta eficiência e da temperatura.

Quanto a dosagem dos aditivos, o período de retardo de pega continua sendo um dos grandes problemas gerado pela utilização de altas dosagens como forma de obter a consistência desejada e reduzir a perda da consistência como o tempo.

3.4.4.5- Incorporação de ar

Os aditivos redutores de água de alta eficiência geralmente aumentam o teor de ar incorporado das misturas de concreto de alto desempenho. Os aditivos à base de melamina normalmente incorporam uma quantidade de ar menor que os demais aditivos (RAABE, 1991; GJORV, 1992). Alguns SP têm dificuldades em garantir um sistema de ar incorporado adequado para produzir adequada proteção ao congelamento, isto acontece, devido a coalescência das bolhas pequenas para formar bolhas maiores e com isso aumentam o fator de espaçamento (RAABE, 1991; GJORV, 1992).

3.4.5- Concreto no estado endurecido

Os aditivos redutores de água são utilizados no concreto de alto desempenho com o objetivo de diminuir a relação água/cimento, o que faz com que as propriedades mecânicas (METHA e MONTEIRO, 1994) e a durabilidade sejam melhoradas. Não ocorre nenhuma mudança significativa na morfologia das partículas de cimento hidratado com a adição dos aditivos redutores de água.

GAGNÉ, BOISVERT e PIGEON (1996) analisaram as propriedades mecânicas de concretos de alta resistência com relação água/materiais cimentantes igual a 0,30 no estado endurecido, feito com cimento Portland tipo I (ASTM) e observaram uma considerável variação com a dosagem de aditivo redutor de água de alta eficiência (nível de consistência), mas o mesmo não foi observado em concretos com sílica ativa. Os concretos de alta fluidez feitos com cimento Portland tipo I (ASTM) contendo dosagem relativamente alta de aditivos redutores de água de base química naftaleno, apresentaram menores resistências à compressão, maior permeabilidade do ar e menor resistência ao congelamento. Foram observadas reduções mais significativas na resistência à compressão em dosagens de aditivo redutor de água de alta eficiência maiores que 1,1 % (expressa em relação entre a massa sólida seca de aditivo redutor de água de alta eficiência e a massa de cimento). A interação física em dosagens superiores à concentração de saturação mantiveram seus efeitos igual a concentração de saturação do cimento-aditivo usado.

Estes resultados são devidos às mudanças nos efeitos físicos pela alteração da fluidificação e pela interação química do aditivo redutor de água de alta eficiência no processo de hidratação do cimento. Isto está representado na Figura 3-13.

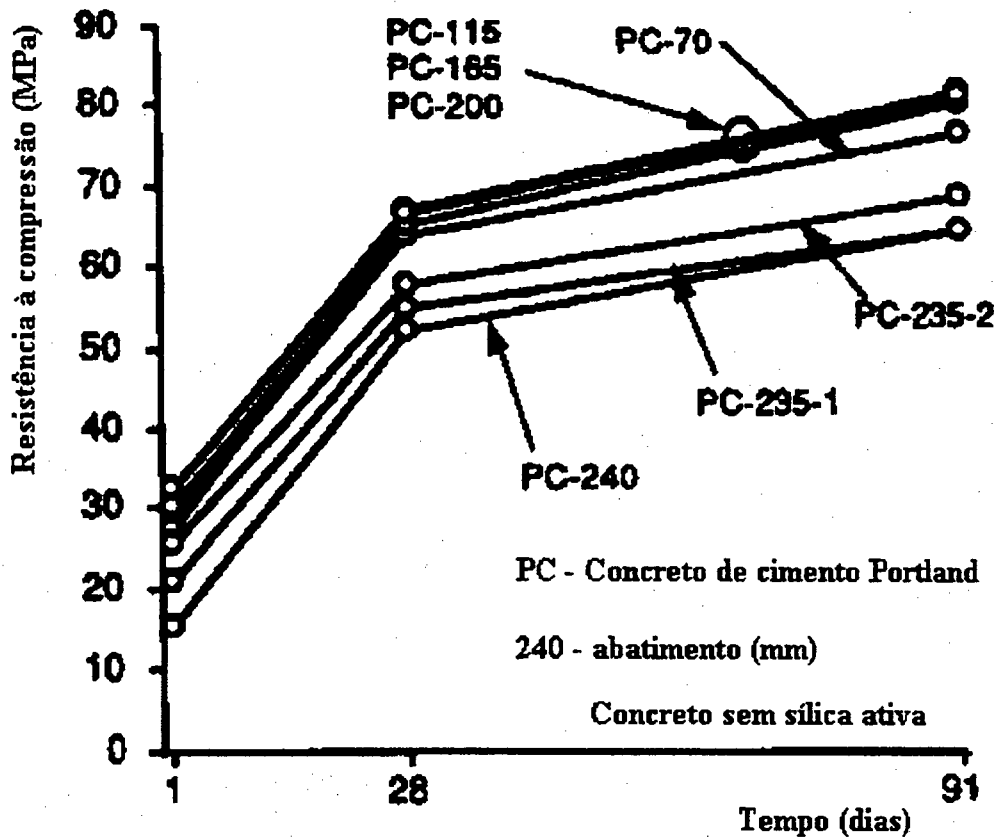


Figura 3-13 Resistência à compressão do concreto em função do tempo e do abatimento (GAGNÉ, BOISVERT e PIGEON, 1996).

Entre as causas físicas, deve ser considerada a exsudação interna nos concretos com baixas relações água/cimento, mas com alta fluidez, que ocorre quando os grãos de cimento sedimentam (caem) da suspensão defloculada. O risco de correr exsudação interna é maior em pastas contendo grandes quantidades de aditivos redutores de água de alta eficiência, pois o efeito retardador aumenta a instabilidade dos grãos de cimento, em função do bloqueio da formação das primeiras ligações físicas entre as partículas. A exsudação interna pode reduzir a qualidade da zona de transição entre a pasta-agregado e afetar um pouco as propriedades do concreto, que se deve a facilidade da formação de um filme espesso de água durante o período de indução na base das partículas de agregado graúdo.

O interação química também precisa ser considerada, pois em altas dosagens de aditivos redutores de água de alta eficiência, ocorre uma redução da taxa de hidratação do C_3A , C_3S e C_2S , devido a adsorção excessiva (RAMEZANIANPOUR, SIVASUNDARAM e MALHOTRA, 1995). A Figura 3-13 mostra que em altas dosagens de aditivos redutores de água de alta eficiência resulta em resistências á compressão menores nas primeiras idades e permanece até aos 91 dias.

As propriedades do concreto de alta resistência feitos com sílica ativa (7,5% em massa de cimento) não foram significativamente afetadas pela consistência ou dosagem de aditivos redutores de água de alta eficiência. Isto ocorre em parte pelo aumento da estabilidade e coesividade da pasta de cimento com sílica ativa e um menor risco de ocorrer exsudação interna. A Figura 3-14 mostra que a resistência à compressão não é afetada.

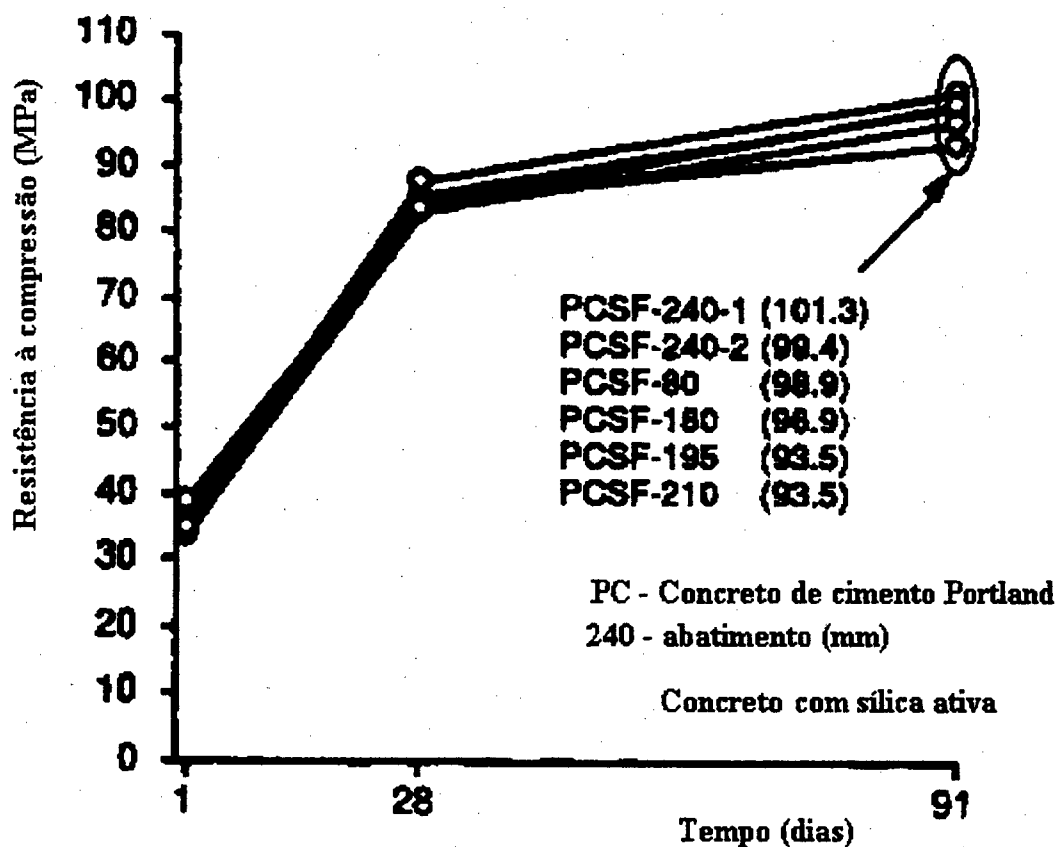


Figura 3-14 Resistência à compressão do concreto com sílica ativa em função do tempo e do abatimento (GAGNÉ, BOISVERT e PIGEON, 1996).

Além disso, a sílica ativa tem um efeito fluidificante quando usado em concreto de baixas relações água/cimento com aditivos redutores de água de alta eficiência. Um volume menor de aditivo redutor de água de alta eficiência é requerido para obter a mesma consistência.

São necessárias investigações a nível microestrutural para identificar os mecanismos físicos e químicos que possam influenciar nas propriedades do concreto de alto desempenho com alta consistência.

Devido as poucas pesquisas realizadas, ainda falta um consenso entre os pesquisadores com relação à influência dos aditivos redutores de água nas propriedades do concreto endurecido, justificadas pela diversidade de materiais, dosagens e metodologias utilizadas na realização dos experimentos.

3.5- Trabalhabilidade

Nas últimas décadas tem ocorrido uma grande expansão na faixa de materiais usados na fabricação do concreto, principalmente de materiais cimentantes suplementares, bem como, na inovação de métodos de produção do concreto. Ensaio práticos têm mostrado que as propriedades importantes observadas em pesquisas laboratoriais são obtidas na prática. Contudo, o principal objetivo das pesquisas e do desenvolvimento técnico tem sido o desempenho e as propriedades do produto final no estado endurecido, principalmente a resistência à compressão e a durabilidade.

O processo de produção e o comportamento do concreto de alto desempenho no estado fresco, freqüentemente difere consideravelmente do concreto convencional. Torna-se necessário que o processo de mistura e os parâmetros de avaliação sejam adaptados no sentido de assumirem o novo significado dos indicadores no controle de qualidade.

A trabalhabilidade é a característica mais importante do concreto fresco e que afeta a resistência mecânica e a durabilidade, caso não corresponda às necessidades de produção, tais como, bombeamento, adensamento e acabamento. A trabalhabilidade é definida como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade (ASTM C 125, (ACI 212.3R, 1989)). A trabalhabilidade não é uma propriedade intrínseca do concreto, mas deve ser relacionada ao tipo de construção e métodos de lançamento, adensamento e acabamento (METHA e MONTEIRO, 1994).

A trabalhabilidade é uma propriedade composta de dois componentes:

- A fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade da massa; e
- A coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação.

A consistência oferece uma descrição quantitativa intrínseca do comportamento do concreto, sendo representada pela fluidez ou a mobilidade do concreto fresco.

A coesão é a propriedade que reflete a capacidade de manter sua homogeneidade durante o processo de lançamento e adensamento.

Para a medida da consistência, o ensaio universalmente conhecido é o de abatimento do tronco de cone (NBR 7223, 1993), que mede a redução da altura de uma massa de concreto de forma cônica compactada após a retirada do molde sob a ação do próprio peso.

O ensaio de abatimento é adequado para controlar a uniformidade de produção (somente para comparar amostras com consistência similar), contudo, não é conveniente para medir a consistência de concretos muito fluidos ou muitos secos.

Quando são adicionados aditivos redutores de água de alta eficiência ou normais na mistura, o concreto pode exibir baixas consistências (abatimentos superiores a 200 mm), quando o ensaio perde sua efetividade. O aumento da fluidez promovida pelo aditivo é em função da adsorção das moléculas pelas partículas de cimento, da diminuição (eliminação) das forças de defloculação e decréscimo da tensão superficial da água.

Além disso, os métodos para determinação da consistência têm recebido diversas críticas:

- Que o resultado está vinculado ao equipamento utilizado e é influenciado pela sensibilidade do operador;
- Os métodos não cobrem toda a faixa de consistências do concreto; e
- Determinam somente um parâmetro da mistura, o que não é suficiente para estabelecer a similaridade de comportamento do concreto no estado fresco, uma vez que a coesão pode variar para misturas de mesmo abatimento.

Ainda no caso dos concretos de alto desempenho, percebe-se que um pequeno acréscimo de água ou aditivo pode ocasionar um grande aumento da fluidez e nestes casos dificultando a obtenção da consistência desejada. No entanto, continua sendo utilizado extensivamente pela sua facilidade de uso em laboratório e na obra.

Portanto, é mais realística a avaliação da trabalhabilidade em base dos parâmetros dos materiais plásticos. Na reologia, a taxa de deformação do concreto fresco é avaliada e o tempo torna-se um nova variável. O modelo de Bingham é o mais adequado para definir o comportamento estrutural de pastas, argamassas e concretos. O modelo de Bingham pode ser definido por duas constantes reológicas: tensão limite de cisalhamento e a viscosidade plástica. O modelo de Bingham é representado pela expressão:

$$T = T_0 + M \cdot V$$

Onde: T_0 = tensão limite de cisalhamento;

M = viscosidade plástica; e

V = taxa de cisalhamento

A tensão limite de cisalhamento corresponde ao valor de tensão, abaixo da qual a pasta se comporta como um sólido elástico. Este parâmetro proporciona a coesão ao concreto, responsável pela capacidade de manter na posição original sob pequenas tensões.

A viscosidade plástica indica a estabilidade do concreto, a sedimentação e a segregação, agindo como restrição ao movimento relativo dos grãos.

Diante do apresentado, o concreto inicia o escoamento quando lhe é aplicado uma tensão de cisalhamento que supere os efeitos de superfície devido aos grãos finos e o atrito entre os grãos grossos.

Para a determinação dos parâmetros reológicos do concreto existem diversos métodos propostos, como o de TATTERSALL (RAABE, 1991), denominado de Método dos Dois Pontos, que mede o torque para diversas velocidades, com o reometro BTRHEOM, de HU e de LARRARD (1996), com o reometro de prato de FERRARIS e GAIDIS (1992),

Na prática, seu emprego se restringe ao meio acadêmico, pois o seu alto custo, tamanho e peso do equipamento inviabilizam sua aplicação na obra.

Uma investigação precisa da reologia do concreto no estado fresco é dificultada pelo grande volume de materiais necessários, equipamentos para medição de grande escala e geralmente muito sofisticados e pela falta de reprodutibilidade das matérias primas (FERRARIS e GAIDIS, 1992). Tais pesquisadores investigaram o componente reológico mais ativo, que é a pasta de cimento. A identificação dos componentes ativos na reologia do concreto não é fácil, pois além da pasta de cimento, o concreto contém ar incorporado e uma quantidade de areia fina (menor que 100 μm). O comportamento dos grãos de areia pode em um tempo funcionar como um lubrificante e em outro momento como uma partícula de areia na fase lubrificante, onde reduz a fluidez.

No concreto de alto desempenho usa-se um teor elevado de superplastificante para conseguir uma baixa relação água/materiais cimentantes, sendo fundamental estabelecer uma combinação adequada da dupla cimento-superplastificante, que proporciona um período maior de retenção da fluidez. (NEVILLE, 1997). Para GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996) a compatibilidade entre o cimento e o superplastificante é um dos principais fatores na escolha do cimento e conseqüentemente do superplastificante para o concreto de alto desempenho. Sugerem ensaios preliminares em argamassa e em pastas, pois os ensaios em concreto são complicados.

A dosagem necessária pode ser estabelecida junto com a avaliação da compatibilidade. Normalmente determina-se a redução do teor de água para se obter uma mesma trabalhabilidade em comparação a mistura sem aditivo, pelo ensaios mini-abatimento de

Kantro (WHITING, 1980; LIBORIO, SILVA, MELO e AMARAL, 1997; NEVILLE, 1997; BUCKER, 1988) e ou o cone de Marsh (AICTIN, 1992; de LARRARD, 1992; GUTIÉRREZ e CÁNOVAS, 1996; DE LARRARD, BOSCH, CATHERINE e DEFLORENNE, 1997; NEVILLE, 1997)

3.5.1- Métodos para a avaliação de aditivos

Quando o objetivo é avaliar a compatibilidade cimento-aditivo, são atualmente empregados vários tipos de ensaios: ensaios em pasta pelo Método de Kantro e Cone de Marsh e; ensaio em argamassa pelo método do Flow-Table.

A seguir será apresentada uma breve descrição destes métodos.

3.5.1.1- Método de Kantro

O ensaio de Kantro utiliza de um tronco de cone feito de material translúcido (acrílico) cujas dimensões internas são: altura = 6,00 cm, diâmetro inferior = 4,00 cm e diâmetro superior = 2,00 cm, munido de um corpo cilíndrico externo para facilitar o manuseio, como mostra a Figura 3-15. A medida da consistência é dada pela área da projeção horizontal do corpo-de-prova no estado de repouso medida através da leitura dos 04 raios ortogonais. O cone é assento sobre uma placa de vidro (plano liso), nivelado horizontalmente. Após seu preenchimento com a pasta de cimento e posterior rasamento, o molde tronco de cone é levantado, permitindo que a pasta flua livremente até o seu equilíbrio em estado de repouso. As áreas dos corpos-de-prova experimentais de pasta de cimento, medidas pela projeção após a retirada do molde, podem estar na faixa entre 12,60 cm² (base do molde) até, aproximadamente, 200 cm².

O ensaio de Kantro é um teste rápido que exige uma pequena quantidade de material, de maneira que muitos testes de desempenho podem ser realizados em poucas horas por uma pessoa.

É o método mais simples e fácil de quantificar de maneira absoluta o poder fluidificante de um aditivo e alterações de fluidez de pastas de cimento com o tempo. Este procedimento apresenta a vantagem de medir apenas o efeito do aditivo (em determinada concentração) sobre cimento e sem a interferência dos agregados que possam influenciar, embora o método não defina o teor do aditivo mais adequado para um determinado concreto.

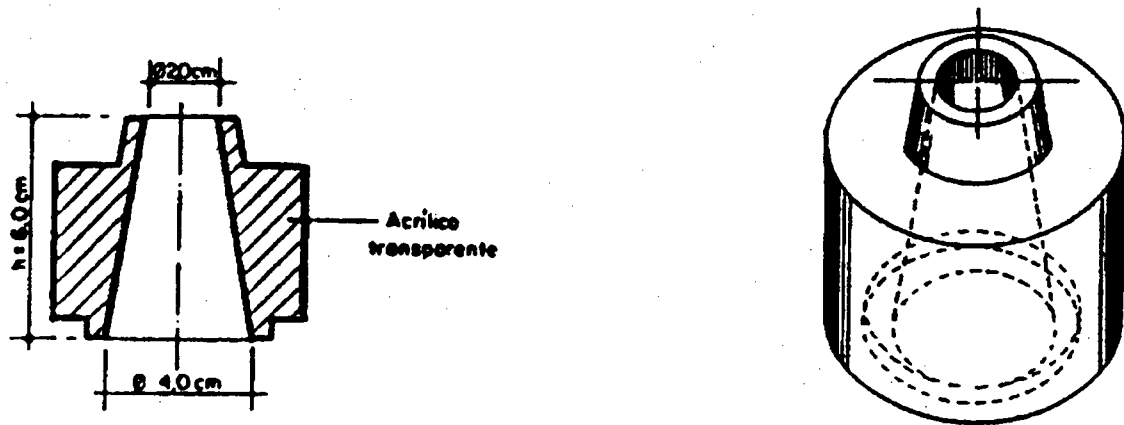


Figura 3-15 Desenho do Cone de Kanro

3.5.1.2- Cone de Marsh

O Cone de Marsh consiste de um recipiente metálico tronco de cone com capacidade de 2.000 cm³, com diâmetro superior de 155 mm, com altura de 290 mm e abertura do diâmetro inferior de 80 mm. A medida da fluidez da pasta é dado pelo tempo que leva para fluir através da abertura inferior.

O ensaio de Cone de Marsh é um procedimento simples e rápido de quantificar a fluidez de pastas aditivadas. Do ensaio pode-se obter o ponto de saturação do ativo, que a partir do qual não melhora significativamente a fluidez da pasta, como mostra a Figura 3-16.

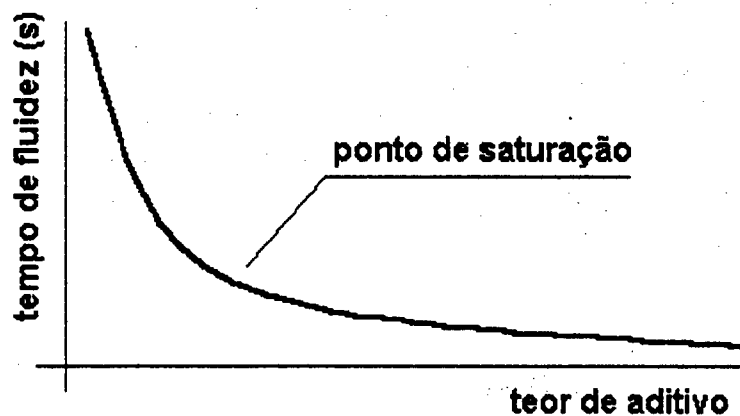


Figura 3-16 Representação gráfica do ponto de saturação.

3.5.1.3- Método do Flow-Table

O ensaio do Flow-Table (NBR7215, 1982) consiste em encher uma forma tronco-cônica em 03 camadas compactadas com um soquete aplica 15, 10 e 5 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos, respectivamente na primeira, segunda e terceira camadas. Terminada a compactação é removido o excesso de material que ultrapassar a borda superior e alisado com a régua. Após retirar a fôrma na vertical com cuidado e submeter a mistura a 30 golpes da mesa em 30 segundos, que provocará o abatimento do tronco de cone da argamassa. Neste momento é medida o diâmetro de espalhamento da base do tronco de cone de argamassa.

4-PESQUISA EXPERIMENTAL

Conforme citado no capítulo 1, a pesquisa experimental tem como objetivo investigar um dos maiores problemas encontrados na produção de concreto de alto desempenho que é a compatibilidade entre cimento e aditivos redutores de água, que pode ocasionar uma série de implicações no comportamento do concreto no estado fresco e endurecido e na relação custo/benefício, como já foi abordado nos capítulos 2 e 3. Visa caracterizar a compatibilidade entre cimento-aditivos redutores de água, usando metodologias descritas no capítulo 3. Neste trabalho foram adotados os seguintes ensaios:

- Em pasta – Método de Kantro;
- Em argamassa – Método do Flow-Table; e
- Em concreto – Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (NBR 7223/82).

Em concreto, ainda foram feitas análises de resistência à compressão e a análise econômica.

A presente pesquisa experimental objetiva também analisar se as metodologias em pasta e/ou em argamassa são adequadas para verificar a compatibilidade entre cimento-aditivos redutores de água, visto que a metodologia em concreto demanda de tempo e envolve uma grande quantidade de materiais.

Relata-se a seguir, os materiais utilizados, equipamentos, procedimentos e os dados obtidos durante a pesquisa experimental.

4.1- Seleção e caracterização dos materiais

A seleção dos materiais constituintes de um concreto de alto desempenho é uma tarefa muito difícil, quando se quer obter uma garantia de sucesso. Na literatura existem recomendações gerais que ajudam a seleção rápida dos materiais potencialmente aptos para uso em concreto de alto desempenho. Uma seleção inadequada de qualquer um dos materiais empregados vai ocasionar uma série de implicações, podendo até inviabilizar o sucesso de obter um bom concreto de alto desempenho.

Faz parte dos objetivos desta pesquisa experimental, a utilização de técnicas, equipamentos e materiais de uso corrente na construção civil, tornando assim possível a reprodução e aplicação dos concretos desenvolvidos.

4.1.1- Cimento

Houve uma grande preocupação inicial com a seleção dos cimentos Portland. A escolha procedeu-se em função das marcas e tipos mais representativos, que são comercializados na região da grande Florianópolis. Foram escolhidos duas marcas que serão denominados por X e Y, e de cada marca foram escolhidos cinco tipos que foram denominados por CPI-S, CPII-F, CPII-Z, CPIV e CPV. A caracterização destes cimentos foi feita pelas próprias indústrias e os resultados dos ensaios químicos estão apresentados na Tabela 4-2 e dos ensaios físicos estão apresentados na Tabela 4-3.

4.1.2- Sílica ativa

A sílica ativa utilizada no presente trabalho foi fornecida por uma indústria nacional, em forma de pó, não condensada, proveniente de um mesmo lote de produção. Os resultados da caracterização foram fornecidos pela indústria e a Tabela 4-1 apresenta suas características químicas e físicas.

Tabela 4-1 Características químicas e físicas da sílica ativa.

Ensaio Físicos		Ensaio Químicos	
Massa específica (g/cm ³)	2,2	Óxido de Silício (SiO ₂)	95,10
Superfície específica (m ² /g)	19,0	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	0,09
Tamanho médio das partículas (µm)	0,35	Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,10
Umidade (%)	0,67	Óxido de Cálcio Total (CaO)	0,24
pH	8,47	Óxido de Magnésio (MgO)	0,43
		Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,23
		Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,93

Tabela 4-2 Ensaio de caracterização química do cimento.

Cimento	Ensaio químicos												
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.Fogo	CaOL.	R. Ins.	C ₃ A	Eq. Alc.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
X - CP I-S-32	4,16	19,89	2,44	63,80	3,63	2,13			3,29	1,51	0,45	6,90	0,46
X - CP II-F	4,63	20,46	2,52	62,28	3,01	2,14			4,74	1,57	1,61		0,51
X - CP II-Z	6,44	23,53	2,71	57,18	2,75	2,12			5,41	1,40	10,22		0,56
X - CP IV-32	9,82	29,13	3,40	46,59	2,62	2,00			2,61	1,31	25,19		0,68
X - CP V	4,26	20,36	2,48	63,21	3,56	2,47			3,31	1,40	0,71	7,10	0,51
Y - CP I-S-32	4,35	18,62	3,20	60,45	5,70	2,65	0,98	0,01	3,67		0,89		0,53
Y - CP II-F	4,31	18,19	3,42	59,66	5,80	2,69	0,86	0,00	4,80		1,03		0,33
Y - CP II-Z	6,85	22,14	3,36	53,98	5,13	2,77	0,81	0,00	4,60		8,82		0,40
Y - CP IV-32	10,92	29,46	3,66	44,27	4,39	2,39	1,51	0,00	2,98		25,18		0,93
Y - CP V	4,72	19,30	3,39	60,31	5,92	3,07	0,83	0,00	2,10		0,39		0,41

Tabela 4-3 Ensaio de caracterização física do cimento.

CIMENTO	Ensaio Físicos												
	Blaine m2/kg	Tempo de pega (min)		#200 %	#325 %	Resistência à compressão (MPa)				Composição potencial			
		Início	Final			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
X - CP I-S-32	316	220	310	1,20	5,70	14,00	29,60	37,30	44,50	64,84	8,19	6,90	7,42
X - CP II-F	321	230	325	2,80	11,30	12,30	26,40	32,70	41,30				
X - CP II-Z	356	240	330	2,80	11,80	10,50	23,50	30,20	38,70				
X - CP IV-32	383	260	370	0,90	3,80	11,90	24,60	31,00	43,30				
X - CP V	395	185	265	0,10	1,40	19,60	37,70	43,40	49,20	57,62	14,99	7,10	7,54
Y - CP I-S-32	330	227	296	0,90	6,90	13,61	26,25	32,64	43,06				
Y - CP II-F	299	300	380	4,10	14,70		24,30	31,50					
Y - CP II-Z	434	265	345	1,70	10,40		25,80	35,20					
Y - CP IV-32	466	235	306	1,98	5,65		24,83	30,43	42,92				
Y - CP V	484	170	230	0,10	1,00	22,10	39,00	48,20		53,47	15,08	6,78	10,31

Água

- Normal: para a produção dos concretos de alto desempenho foi utilizado água potável proveniente da rede de abastecimento público;
- Destilada: para os ensaios em pasta e argamassa foi utilizado água destilada, que está livre de sais, hidratos de carbono e íons de cloro.

4.1.3- Aditivos redutores de água

Foram empregados aditivos redutores de água, do tipo plastificante e superplastificante, provenientes de um mesmo lote de 04 fabricantes nacionais, disponíveis no mercado. Todos os aditivos redutores de água foram fornecidos na forma líquida. As características destes produtos foram fornecidas pelos fabricantes e encontram-se na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 Características químicas dos aditivos.

Marca	Tipo	Base química	PH	Densidade	Resíduo sólido	Cor
ADT1	P	- *	8 a 10	1,16	42,65	Castanho escuro
ADT1	SP	melamina	8 a 9	1,16	26,00	Verde claro
ADT2	P	-	6,5 - 8,5	1,18	36,34 - 40,16	Castanho escuro
ADT2	SP	melamina	11,5 - 13,5	1,275	38 - 42	Castanho escuro
ADT3	P	Lignosulfato de sódio	-	1,16	30,00	Escuro
ADT3	SP	melamina	-	1,21	38,00	Castanho
ADT4	P	-	8,5 - 10	1,07 - 1,09	17 - 22	Castanho escuro
ADT4	SP	naftaleno	8,3 - 9,8	1,16 - 1,17	30 - 35	Castanho escuro

* - não informado pelo fabricante

4.1.4- Agregados

4.1.4.1- Agregado miúdo

Utilizou-se durante a pesquisa experimental areia quartzoza lavada de rio, proveniente da região de Gaspar – SC, sendo de um único lote de produção. Para a produção dos concretos de alto desempenho a areia foi previamente secada em estufa e estocada em baldes plásticos devidamente tampados e armazenados no interior do laboratório.

Os ensaios que foram realizados para caracterizar as propriedades da areia encontram-se na Tabela 4-5.

4.1.4.2- Agregado graúdo

A seleção do agregado graúdo é um ponto fundamental para obter concreto de alto desempenho. Foi selecionado um agregado graúdo britado de composição mineralógica granítica, proveniente da região de Forquilha – São José (SC), que se apresenta bastante homogêneo e, portanto, adequado para esta investigação. O agregado graúdo era lavado, secado em estufa e armazenado em tonéis no interior do laboratório.

Os ensaios que foram realizados para caracterizar as propriedades do agregado graúdo, se encontram na Tabela 4-5.

4.2- Equipamentos utilizados

4.2.1- Balanças

Foi utilizada uma balança eletrônica com capacidade 1500 g e precisão de 0,01 g, marca MARTE - AS 5500, para a pesagem de cimento, sílica ativa, aditivos redutores de água, agregado miúdo e água destinados à confecção das pastas e argamassas. O cimento, água, sílica ativa, agregado graúdo e miúdo para a confecção dos concretos foram pesados em balança eletrônica com capacidade de carga 15000 g e precisão de 0,5 g, marca MICROWA.

4.2.2- Moldes

Os corpos-de-prova de concreto foram confeccionados em moldes metálicos, cilíndricos, de dimensões 10 x 20 cm.

Tabela 4-5 Características do agregado graúdo e miúdo.

Material	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Características Físicas	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Peneira Abertura (mm)	% Média retida acumulada	% Média retida acumulada			
19,0	0,00	0,63	Dimensão máx. caract. (mm)	2,40	19,00
12,5	0,00	55,54	Módulo de finura	2,41	6,78
9,5	0,00	83,16	Massa específica aparente (g/cm ³)	2,66	2,65
6,3	0,30	98,08	Massa unitária (g/cm ³)	1,41	1,39
4,8	0,52	99,04	Massa unit. compactada (g/cm ³)	1,62	1,52
2,4	1,54	99,04	Graduação (zona)	Média	Brita 1
1,2	12,63	99,04			
0,6	40,73	99,04			
0,3	87,15	99,04			
0,15	98,78	99,04			
<0,15	100,00	100,00			

4.2.3- Estufa

Para a secagem dos materiais foi utilizada uma estufa da marca FANEN - 315/5, com precisão de 1°C.

4.2.4- Prensa Hidráulica

A resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto, foi medida de acordo com o que estabelece NBR 5739 (ABNT, 1980), utilizando-se uma prensa hidráulica marca

AMSLER, (Figura 4-1) com controle de carga manual e escalas de 50, 250 e 500 t, com precisão de 100, 500 e 1000 kg respectivamente.



Figura 4-1 Prensa hidráulica utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial de corpos-de-prova de concreto.

4.2.5- Misturador mecânico

Para a mistura das pastas e argamassas foi utilizado um misturador mecânico, marca EMIC, com duas velocidades como mostra a Tabela 4-6, com capacidade da cuba e dimensões de acordo com o que prescreve a NBR 7215/91, conforme mostra Figura 4-2.

Tabela 4-6 Velocidade do misturador mecânico.

Velocidade	Rotação da pá (rpm)	Rotação do planetário (rpm)
Baixa (lenta)	140 ± 5	62 ± 5
Alta (rápida)	285 ± 10	125 ± 10

4.2.6- Betoneira

A mistura dos materiais para confecção dos concretos foi feita em betoneira intermitente, marca Zannoni, de eixo inclinado, com as pás solidárias à cuba e capacidade da cuba de 120 l.



Figura 4-2 Misturador mecânico.

4.2.7- Vibrador

O adensamento do concreto nos moldes metálicos foi feito com vibração mecânica através do vibrador de imersão, com frequência de 3500 e com diâmetro externo da agulha de 19 mm.

4.2.8- Flow-Table

A consistência da argamassa foi medida através da mesa para índice de consistência de acordo com o que prescreve a NBR 7215/91.

4.2.9- Slump Test

A consistência do concreto fresco foi pelo abatimento de tronco de cone de acordo com a NBR 7223/82.

4.2.10- Cone de Kantro

Para a avaliação das pastas foi utilizado um tronco de cone feito de material translúcido (acrílico), cujas as dimensões internas são: altura = 6,00 cm, diâmetro da base inferior = 4,00 cm e diâmetro da base superior = 2,00 cm, de acordo com a Figura 4-3.

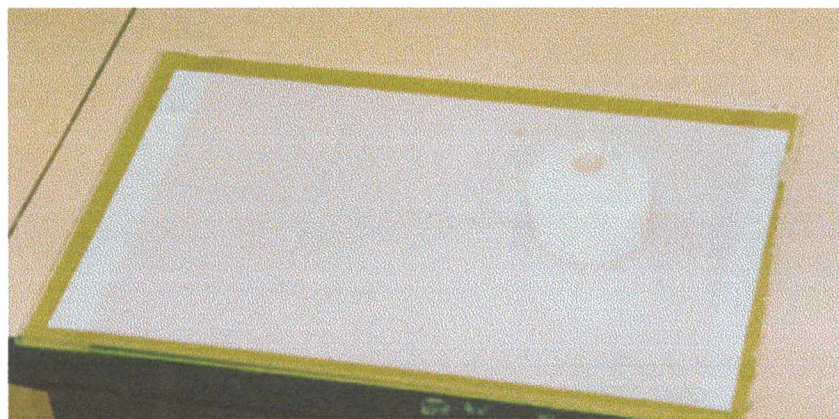


Figura 4-3 Equipamentos utilizado no método de Kantro.

4.2.11- Outros

Além dos equipamentos citados, foram utilizados outros de menor porte, tais como: haste de vidro, placa de vidro com espessura de 06 mm, espátulas metálicas, concha metálica, colher de pedreiro, funil metálico, pincéis com cerdas de náilon, soquete metálico, paquímetro graduado e béquer.

4.3- Planejamento dos ensaios

Inicialmente, foram identificadas as variáveis integrantes dos ensaios realizados nesta pesquisa experimental:

Cimento: foram utilizados cimento Portland de duas marcas comerciais existentes no mercado, sendo que, de cada marca, foram utilizados cinco tipos diferentes.

Silica Ativa: foi utilizada somente numa dosagem, em substituição volumétrica parcial de 7% de cimento.

Aditivos: foram utilizados aditivos de 04 marcas diferentes, sendo que, de cada marca foi solicitado o melhor produto da linha de aditivos redutores de água. O aditivo foi adicionado na forma de conteúdo líquido.

Tempo de mistura e colocação dos materiais: o tempo de mistura e colocação dos materiais se manteve constante para todas as misturas.

Relação água/materiais cimentantes: foram adotados em função dos resultados obtidos, sendo que, no mínimo de 03 relações para cada combinação cimento-aditivo em pasta e argamassa e uma relação água/material cimentante.

Temperatura: O trabalho foi feito no laboratório com a temperatura de 23 ± 2 °C.

Umidade do Ar: A umidade do ar ficou entre 80 ± 10 %.

Com os parâmetros estabelecidos, passou-se a execução dos experimentos. A Tabela 4-7 mostra de forma esquemática a programação dos ensaios.

Tabela 4-7 Representação esquemática dos ensaios em pasta.

Cimentos	Aditivos	Relações a/(c+s)	Número de repetições
X - CP I-S-32	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
X - CP II-F	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
X - CP II-Z	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
X - CP IV-32	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
X - CP V	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
Y - CP I-S-32	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
Y - CP II-F	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
Y - CP II-Z	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
Y - CP IV-32	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03
Y - CP V	ADT1 ADT2 ADT3 ADT4	03	03

4.4- Metodologia para execução dos ensaios

4.4.1- Ensaios em pasta

4.4.1.1- Proporcionamento dos materiais

Nesta fase inicial da pesquisa experimental, a interação entre cimento-aditivos redutores de água foi inicialmente avaliado através do ensaio em pasta, baseado no método de Kanro, que já foi discutido no capítulo 3.

Para a preparação da pasta de cimento para o ensaio, foram utilizados as quantidades de materiais descrita abaixo:

- cimento: 418,50 g;
- sílica ativa: 22,20 g (substituição em volume de 7% de cimento);
- plastificante 0,5%: 2,10 g;
- superplastificante 2%: 8,37 g;
- água destilada: usado a quantidade de acordo com a relação a/c.

O teor de plastificante foi fixado em 0,5% da massa do cimento por ser este o máximo teor recomendado pelos fabricantes. O teor de superplastificante foi fixado em 2% por ser um valor limite usual em concreto de alto desempenho. O aditivo foi adicionado na forma de conteúdo líquido.

O cimento era inicialmente pesado e acondicionado em embalagem completamente fechada; a sílica ativa era pesada e acondicionado na mesma embalagem.

A água e o aditivo eram pesados em copos de béquer de 250 e 100 ml respectivamente e posteriormente tapados com uma placa de vidro.

A ordem de colocação dos materiais na argamassadeira foi mantida constante para todas as misturas. Inicialmente, eram colocados o cimento e a sílica ativa na cuba com aproximadamente 85% da água, quando a argamassadeira era ligada durante 30 segundos na velocidade lenta e em seguida por mais 30 segundos na velocidade rápida. Neste momento a argamassadeira era desligada por 60 segundos, quando era novamente ligada na velocidade rápida durante 180 segundos. Aos 120 segundos era primeiramente adicionado o plastificante e após 30 segundos o superplastificante, sendo que ambos eram diluídos com o restante da

água. Durante os 180 segundos, a argamassadeira era desligada momentaneamente para a raspagem do material aderido na parede da cuba e na pá.

A pasta de cimento era então colocada no molde do mini-slump com auxílio de um funil e adensado com 10 golpes com auxílio de uma haste de vidro. O molde era levantado em 05 segundos e após 60 segundos eram realizadas as leituras dos quatro raios ortogonais desenhados no papel milimetrado. O molde era imediatamente lavado, secado e usado para repetição do ensaio utilizando a mesma pasta. A pasta era raspada do vidro com auxílio de uma espátula na cuba e em seguida jogada fora. Todo o material utilizado durante o ensaio era lavado e secado com um pano. A placa de vidro era limpa com auxílio de papel e uma estopa úmida com álcool.

4.4.2- Ensaios em argamassa

4.4.2.1- Proporcionalamento dos materiais

Nesta segunda fase da pesquisa experimental, a interação entre cimento-aditivos redutores de água foi avaliado através do ensaio em argamassa, baseado no método de Flow-Table, que já foi discutido no capítulo 3.

A argamassa foi proporcionado no traço 1:1 em massa, pois nos traços de concreto de alto desempenho, a quantidade de agregado miúdo varia em torno deste valor.

Para a preparação da argamassa foi utilizado a seguinte quantidade de materiais descrita abaixo:

- cimento: 604,50 g;
- sílica ativa: 31,78 g (substituição de 7% em volume de cimento);
- plastificante 0,5%: 3,02 g (na forma de conteúdo líquido);
- superplastificante 2%: 12,09 g (na forma de conteúdo líquido);
- agregado miúdo: 650 g;
- água destilada: usado a quantidade de acordo com a relação $a/(c + s)$.

O cimento era inicialmente pesado e acondicionado em embalagens completamente fechadas; a sílica ativa era pesada e acondicionada na mesma embalagem.

A água e os aditivos eram pesados em copos de béquer de 250 e 100 ml respectivamente e posteriormente tampados com uma placa de vidro.

A ordem de colocação dos materiais na argamassadeira era mantida constante para todas as misturas. Inicialmente, eram colocados o cimento e a sílica ativa na cuba com aproximadamente 85% da água, e a argamassadeira era ligada durante 30 segundos na velocidade lenta e em seguida por mais 30 segundos na velocidade rápida. Neste momento a argamassadeira era desligada por 60 segundos, quando era novamente ligada na velocidade rápida durante 180 segundos. Aos 120 segundos era primeiramente adicionado o plastificante e após 15 segundos o superplastificante, sendo que ambos estavam diluídos com o restante da água. O agregado miúdo era adicionado aos 150 segundos da mistura, com a argamassadeira em movimento. Durante os 180 segundos, a argamassadeira era desligada momentaneamente para a raspagem do material aderido na parede da cuba e na pá.

4.4.3- Ensaios em concreto

4.4.3.1- Proporcionamento dos materiais

O proporcionamento do concreto de alto desempenho é uma das etapas mais importantes do processo. Cada material precisa ser avaliado separadamente e verificando a interação na combinação entre os materiais. O proporcionamento varia de caso a caso, dependendo de muitos fatores, tais como: resistência desejada em determinada idade de ensaio, tipo de aplicação, etc.

O proporcionamento dos materiais para execução do concreto de alto desempenho foi determinado com base no método de dosagem de concreto de alta resistência de DOMONE e SOUTSOS (1994).

O método determina inicialmente o volume mínimo de vazios dos agregados, isto é, pela composição do agregado graúdo com o miúdo e que foi obtido utilizando o método da massa unitária compactada.

A definição da relação água/materiais cimentantes foi baseada nos ensaios em pasta, onde, para a relação $a/(c+s) = 0,30$, foram feitas avaliações da compatibilidade do cimento-aditivo redutor de água para todas as combinações existentes. A substituição em volume de cimento por sílica ativa foi em 7 %. A dosagem de plastificante foi de 0,5 % e de superplastificante de 2,0 %, sendo feita somente a combinação de materiais do mesmo fabricante. O aditivo foi adicionado na forma de conteúdo líquido.

A quantidade de pasta foi determinada pelo volume mínimo de vazios, com adição de um excesso de 5 %, de acordo com o referido método.

Para a avaliação do comportamento da consistência da mistura do concreto fresco foi fixado um abatimento do tronco de cone em 100 ± 15 mm.

Com o traço obtido pelo método de dosagem foram necessários ajustes, utilizando-se inicialmente a combinação de pior desempenho em pasta, pois supunha-se que as demais combinações teriam uma maior fluidez. Para manter a consistência da mistura do concreto no valor fixado para os demais aditivos que mostraram um desempenho melhor, eram adicionados gradativamente agregado graúdo e miúdo na mistura, mantido o teor de argamassa constante.

A operação de mistura foi realizada em betoneira de eixo inclinado, sem imprimação.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira em movimento era mantida constante para todas as misturas, como mostra a Tabela 4-8.

Tabela 4-8 Ordem de colocação dos materiais na betoneira.

Ordem de colocação dos materiais	Tempo (s)
100 % do agregado graúdo, 100 % do cimento, 100 % da sílica ativa e 85 % da água	0
100 % do aditivo plastificante diluído em água	90
100 % do aditivo superplastificante diluído em água	150
100 % do agregado miúdo	300

Após o período de mistura de 600 segundos, era determinado a consistência pelo abatimento do tronco de cone (NBR 7223, 1982). Determinava-se neste momento o abatimento para verificar se este encontrava-se dentro da faixa estipulada (100 ± 15 mm). Caso o valor fosse maior, eram adicionados agregado graúdo e miúdo, todavia, mantendo o teor de argamassa constante para todas as misturas. Caso contrário, a mistura era rejeitada.

A seguir, a cada 20 minutos, contados a partir do momento da primeira determinação, eram feitas mais duas determinações de abatimento da mistura de concreto. A betoneira permanecia em repouso nos períodos intermediários, tapada com pano úmido e o concreto era remisturado por 02 minutos antes de cada nova determinação.

Após a última determinação, o concreto era remisturado por 02 minutos com a redosagem de 1 % de aditivo superplastificante, tendo como o objetivo de recuperar a perda de fluidez ao longo do tempo. Transcorrido a remistura, determinava-se novamente a consistência.

Para análise da resistência à compressão eram moldados três corpos-de-prova cilíndricos, em formas metálicas de 10 x 20 cm, de acordo com a norma NBR 5738 (1984). O processo de adensamento adotado era mecânico, com vibrador de imersão e realizado em camada única.

Após a moldagem, os corpos-de-prova eram cobertos e mantidos no ambiente de laboratório por aproximadamente vinte e quatro horas. As formas foram retiradas 24 horas após a moldagem e os corpos-de-prova eram identificados e colocados submersos em água saturada com hidróxido de cálcio a uma temperatura de 23 ± 2 °C até a data de ruptura, sendo que, eram retirados da água duas horas antes do ensaio.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão era feito o capeamento dos corpos-de-prova de concreto com enxofre, em conformidade com a NBR 5739 (1980).

No ensaio de resistência á compressão era reduzido ao máximo a excentricidade da aplicação da carga com a utilização de uma rótula mais sensível e de dimensão adequada ao tamanho dos corpos-de-prova.

5-APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no programa experimental (capítulo 4) e feita sua análise com base na revisão bibliográfica apresentada.

5.1- Ensaios em pasta

5.1.1- Ensaios preliminares

Inicialmente foram analisados alguns parâmetros que poderiam influenciar nos resultados finais ao ensaio do método de Kantro, conforme segue:

- Variabilidade do ensaio;
- Influência do operador;
- Demanda da água do cimento;
- Influência da Sílica Ativa na demanda da água;
- Variação de teores de aditivo adicionados;
- Adição retardada do aditivo.

5.1.1.1- Variabilidade do ensaio

Estudou-se a variabilidade entre os áreas de espalhamento das misturas de pastas feitas com cimento CII-F, sendo o ensaio constituído de 08 amostras com quatro relações água cimento, obtidas pelo operador 1.

Os valores obtidos encontram-se no Anexo 01 e os resultados finais na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 Resultados médios da área de espalhamento em cm² das 08 amostras, desvio padrão e coeficiente de variação, obtidos pelo operador 1.

Amostra	0,33	0,37	0,41	0,45
1	22,902	45,662	72,004	104,771
2	21,033	44,177	77,364	97,640
3	24,410	49,326	75,813	100,285
4	23,758	46,868	73,516	107,510
5	24,629	43,007	75,813	94,168
6	23,974	53,779	67,199	92,456
7	23,758	49,950	77,754	105,680
8	25,293	45,363	80,116	101,174
Média	23,72	47,27	74,95	100,46
Desvio Padrão	1,29	3,54	4,01	5,45
c.v. (%)	5,46	7,5	5,35	5,42

O número de repetições foi definido a partir deste ensaio, após realizado teste estatístico para verificação da hipótese de normalidade. Calculou-se o número de repetições da amostra utilizando a seguinte expressão (NANNI, 1981):

$$N = (Z_{\alpha/2})^2 \cdot (CV)^2 / (Er)^2$$

onde,

N = número de repetições;

Er = erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10 %;

CV = coeficiente de variação médio das oito amostras, calculado em 5,93 %;

$Z_{\alpha/2}$ = valor tabelado que, para um nível de significância de 5 %, tem o valor de 1,96.

Portanto, o número de repetições da amostra deveria ser no mínimo de $n = 1,35$, ou seja, 2 exemplares por variável ensaiada. No entanto, em favor da segurança foi adotado o número de repetições igual a 3, que conduz a uma redução do erro relativo para aproximadamente 6,8 %.

5.1.1.2- Influência do operador

Estudou-se a variabilidade entre os áreas de espalhamento das misturas de pastas ensaiadas com diferentes operadores, sendo o ensaio constituído de 06 amostras com quatro relações água-cimento.

Os valores obtidos pelo operador 2 encontram-se no Anexo 2 e os resultados finais na Tabela 5-2 e pelo operador 1 encontram no Anexo 1 e os resultados finais na Tabela 5-1.

Tabela 5-2 Resultados médios da área de espalhamento em cm^2 das 06 amostras, desvio padrão e coeficiente de variação, obtidos pelo operador 2.

Amostra	0,33	0,37	0,41	0,45
1	23,974	48,089	72,004	95,896
2	26,193	57,413	72,380	102,067
3	23,758	51,528	72,758	90,338
4	23,328	47,172	70,880	97,640
5	24,629	48,397	71,254	102,965
6	23,974	50,269	73,136	105,225
Média	24,31	50,61	72,07	99,02
Desvio Padrão	1,01	3,75	0,87	5,48
c.v. (%)	4,17	7,41	1,21	5,54

Para verificar a influência de operador no ensaio do método de Kantro, foi realizado um teste de comparação de médias para cada relação água cimento, cujos os resultados mostraram que não há diferença significativa entre as médias obtidas pelos operadores. Neste trabalho, todos os testes estatísticos foram feitos adotando um nível de significância de $\alpha=0,05$. Verifica-se que existe uma boa repetibilidade dos dados obtidos, mantendo praticamente o coeficiente de variação constante e sendo independentemente da relação água/cimento.

Para comprovar estatisticamente a influência do operador na equação linear obtida pela média dos resultados obtidos experimentalmente, como mostra a Figura 5-1, foi realizada uma análise de comparação de equações lineares, comprova que as equações lineares não diferem significativamente entre si. Este resultado demonstra que não existe influência do operador nos resultados obtidos no ensaio de Kantro que pode ser atribuída, em parte pelo

treinamento dos operadores e pela padronização do ensaio. No entanto, se fazem necessários estudos inter-laboratoriais para confirmar esta conclusão.

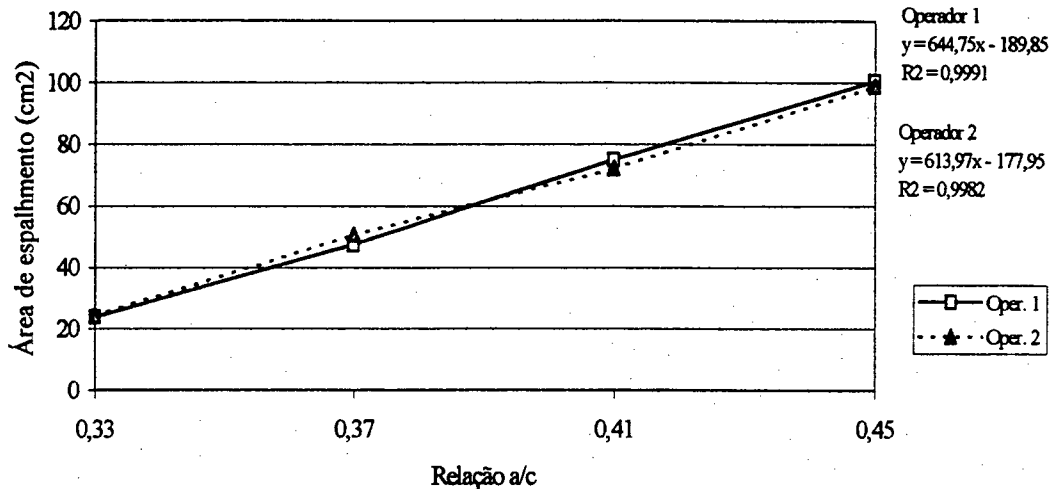


Figura 5-1 Área de espalhamento médio para dos dois operadores em função da relação a/c.

5.1.1.3- Demanda de água do cimento

Para verificar a influência do tipo e marca de cimento na demanda de água, realizou-se uma análise de todos os cimentos utilizados na pesquisa experimental pelo método de Kantro.

Era empregada a quantidade de água necessária para obter pastas sem presença de aditivos com fluidez equivalente entre si, conforme o tipo de cimento. A relação água/cimento variou numa faixa de 0,33 a 0,49.

A demanda de água dos cimentos fornecidos pela empresa X pelo método de Kantro encontram-se no Anexo 3 e os resultados finais médios na Tabela 5-3.

Para melhor entendimento dos resultados foi criada a Figura 5-2, que compara a demanda da água dos cimentos fornecidos pela empresa X, onde percebe-se que os cimentos CPI-S e CPII-F apresentam uma maior fluidez da pasta (representada pela área de espalhamento) em comparação aos demais e o cimento CPIV apresentou a menor fluidez para uma mesma relação a/c.

Tabela 5-3 Área de espalhamento para os cimentos fornecidos pela empresa X.

Relação a/c	CPI-S	CPII-F	CPII-Z	CPIV	CPV
0,33	29,224	26,420	19,634	-	12,566
0,37	40,150	47,782	37,392	18,095	24,192
0,41	69,765	73,516	53,131	30,434	43,883
0,45	100,285	96,766	78,538	43,007	62,560
0,49	-	-	-	62,210	-

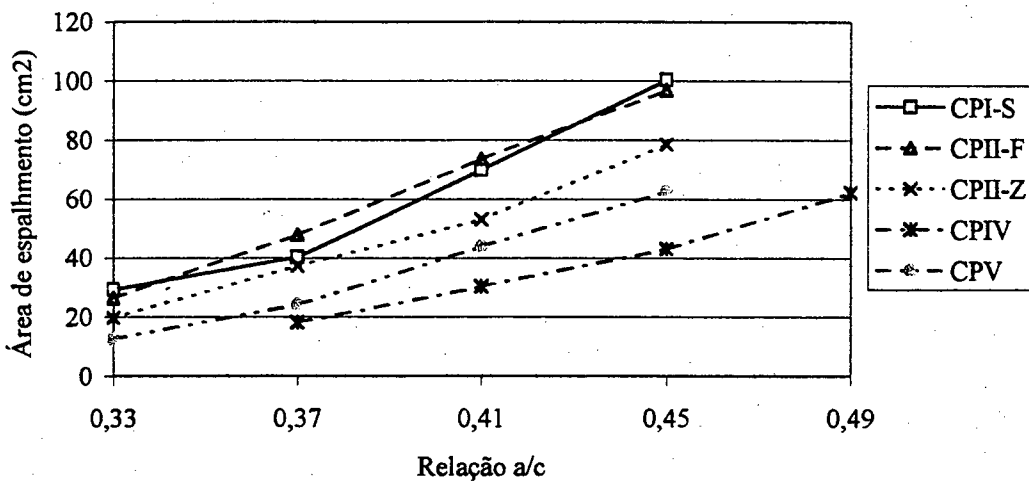


Figura 5-2 Demanda da água dos cimentos fornecidos pela empresa X.

A demanda de água dos cimentos fornecidos pela empresa Y pelo método de Kantro encontram-se no Anexo 4 e os resultados finais médios na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 Área de espalhamento para os cimentos fornecidos pela empresa Y. Cada valor representa a média de três observações experimentais.

Relação a/c	CPI-S	CPII-F	CPII-Z	CPIV	CPV
0,33	26,193	23,328	20,029		12,566
0,37	45,065	43,007	31,172	20,228	25,741
0,41	65,395	69,027	51,211	31,172	40,997
0,45	87,414	113,566	68,293	48,397	59,104
0,49				63,969	

Para melhor entendimento dos resultados foi criada a Figura 5-3, que compara a demanda de água dos cimentos fornecidos pela empresa Y, onde verifica-se que os cimentos CPI-S e CPII-F apresentam uma maior fluidez da pasta em comparação aos demais e o cimento CPIV apresentam a menor fluidez para uma mesma relação a/c.

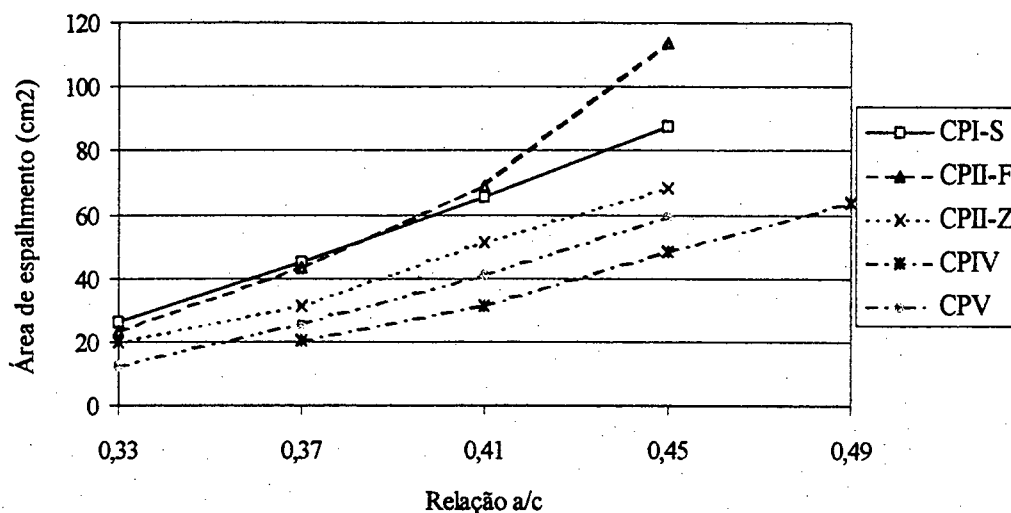


Figura 5-3 Demanda da água dos cimentos fornecidos pela empresa Y.

A Figura 5-5 compara a demanda da água dos 05 tipos de cimentos fornecido pelas duas empresas. Percebe-se que não existe uma diferença significativa na demanda da água para um mesmo tipo de cimento fornecido pelas duas empresas.

5.1.1.4- Influência da Sílica Ativa na demanda da água

Estudou-se a influência da substituição parcial de cimento por sílica ativa num teor de 7 % em volume (o mesmo teor que será usado em estudos posteriores) na demanda da água em pasta. Além disso, verificou-se o comportamento da fluidez das pastas com a adição de aditivo (0,5 % de plastificante + 2,0 % de superplastificante). O estudo foi realizado utilizando o cimento CPI-S fornecido pela empresa X.

Os valores obtidos encontram-se no Anexo 5 e os resultados finais na Tabela 5-5.

Para melhor entendimento dos resultados obtidos foi criada Figura 5-11, que compara a demanda da água fornecidos pela pasta de cimento pura, com a substituição parcial em 7 % em volume por sílica ativa e com adição de aditivo. Percebe-se, pela análise da Figura 5-11, uma clara tendência de diminuição da fluidez quando adiciona-se sílica ativa a pasta. Para uma mesma relação a/c, a pasta de cimento aditivada apresenta o dobro da área de espalhamento em relação a pasta aditivada com substituição, enquanto para uma mesma área

de espalhamento, a pasta de cimento com substituição necessita de uma quantidade da água aproximadamente de 15 % maior em relação a pasta pura. Portanto, não é observado um efeito fluidificante da sílica ativa em pastas de cimento, que pode ter sido anulado devido a alta finura da sílica ativa e assim necessitar de maior quantidade de água.

Tabela 5-5 Área de espalhamento para o cimento CPI-S e com substituição parcial por sílica ativa e respectivamente com adição de 0,5 + 2,0 % aditivo ADT2 (P + SP %).

Pasta	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45
CPI-S				18,66	31,42	61,51		
CPI-S + ADT2	63,62	197,30	303,25					
CPI-S + SA						16,26	22,48	31,92
CPI-S + SA + ADT2	18,47	89,92	160,60					

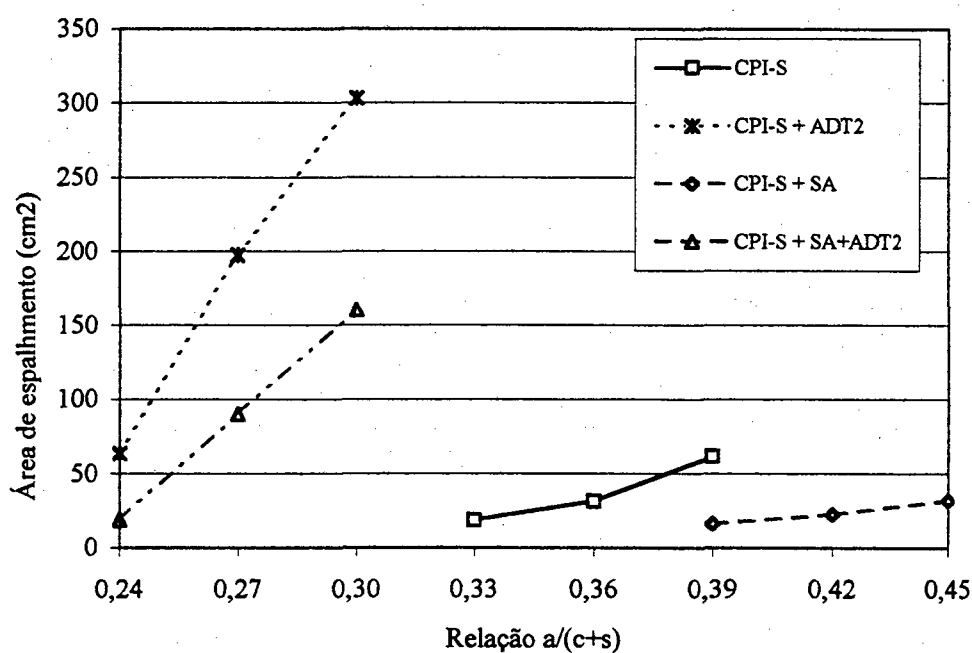


Figura 5-11 Área de espalhamento para o cimento CPI-S e com substituição parcial por sílica ativa e respectivamente com adição de 0,5 + 2,0 % aditivo ADT2 (P + SP %).

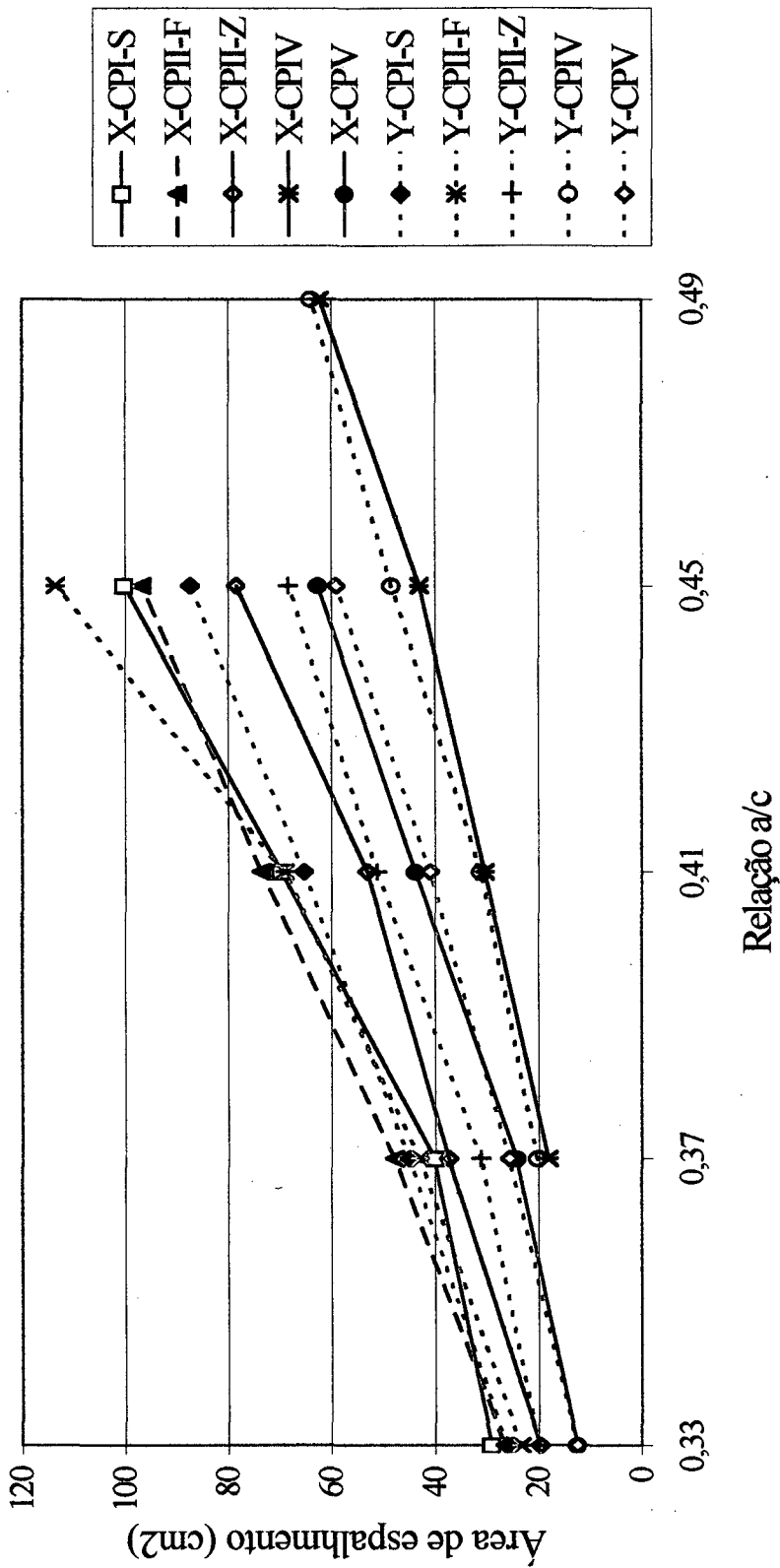


Figura 5-5 Comparação da demanda de água dos cimentos fornecidos pelas empresas X e Y.

5.1.1.5- Variação de teores de aditivo adicionados

Este estudo foi realizado com o objetivo de identificar o comportamento da fluidez da pasta de cimento com substituição parcial por sílica ativa em função do teor de aditivo adicionado. Foi utilizado neste estudo o cimento CPI-S da empresa Y com a adição de 0,5% de plastificante sozinho e juntamente com a adição de 1, 2 e 3% de superplastificante. A relação a/c+s utilizada foi de 0,33.

Os valores obtidos encontram-se no Anexo 6 e os resultados finais na Tabela 5-6.

De acordo com a Tabela 5-6, a fluidez é influenciada pelo teor de aditivo adicionado, conforme observado na Figura 5-13. Observa-se claramente que, o aumento linear da área de espalhamento, quando é adicionado 0,5 % de aditivo até 0,5 + 2,0 %. De 0,5 + 2,0 % a 0,5 + 3,0 % a fluidez manteve-se praticamente constante. Isto indica que obteve-se o teor de saturação da pasta para os aditivos utilizados neste trabalho através do método de Kantro.

Tabela 5-6 Área de espalhamento (cm²) em função do teor de aditivo utilizado (P + SP %).

Teor de aditivo	ADT1	ADT2	ADT3	ADT4
-	14,863222	14,86322	14,86322	14,86322
0,5	28,281354	39,31685	18,95331	36,58375
0,5 + 1	85,016844	108,4713	124,1918	129,9454
0,5 + 2	122,44094	202,346	231,0671	179,1131
0,5 + 3	135,84042	218,0567	218,7056	183,8563

A variabilidade da área de espalhamento foi estudada com a combinação CPI-S da empresa Y e o aditivo ADT1, como mostram os valores obtidos no Anexo 7 e os resultados finais na Tabela 5-7. A relação a/(c+s) utilizada foi de 0,33.

Percebe-se, pela observação dos valores plotados na Figura 5-14, que não existe diferença significativa dos valores para qualquer teor de aditivo adicionado na pasta de cimento.

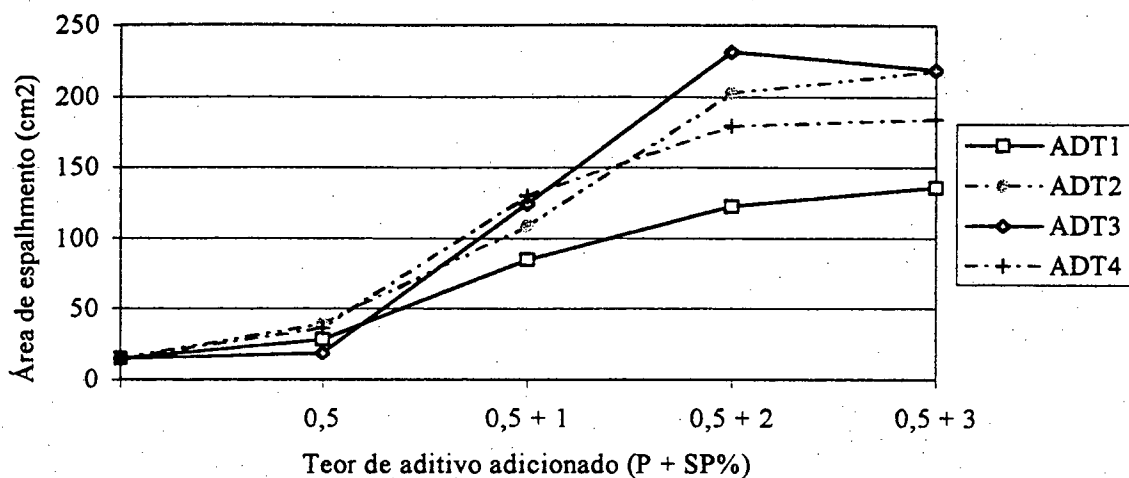


Figura 5-13 Área de espalhamento (cm²) em função do teor de aditivo adicionado.

Tabela 5-7 Variabilidade da área de espalhamento (cm²) em função do teor de aditivo adicionado (P + SP%).

Teor de aditivo	ADT1a	ADT1b	ADT1c
-	14,86322	13,86629	14,27051
0,5	27,57157	27,8062	29,59907
0,5 + 1	81,57518	87,42205	89,51017
0,5 + 2	122,4409	120,2748	115,4747
0,5 + 3	135,8404	130,9488	129,6875

5.1.1.6- Adição retardada do aditivo

Estudou-se o comportamento da fluidez de misturas de pastas de cimento com a adição do teor 0,5 + 2,0 % de aditivo em diferentes momentos do tempo.

Os valores obtidos encontram-se no Anexo 8 e os resultados finais na Tabela 5-8.

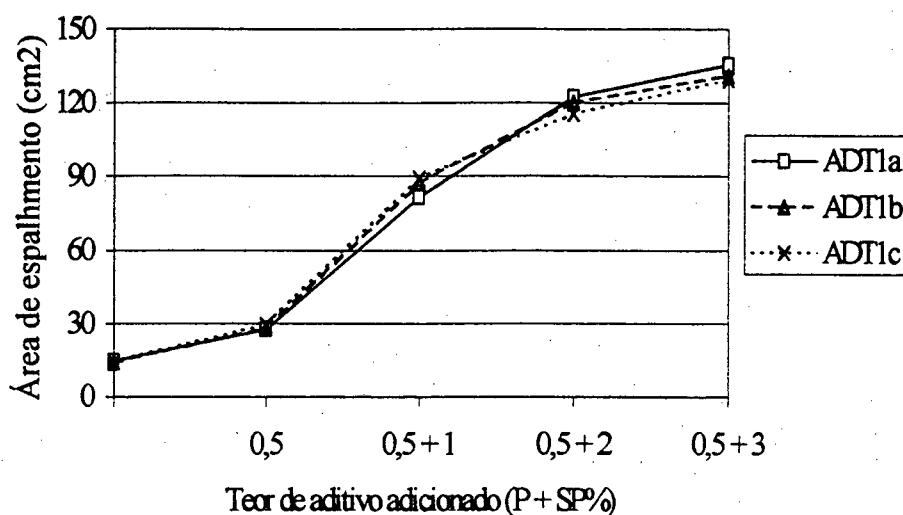


Figura 5-14 Variação da área de espalhamento (cm²) em função do teor de aditivo adicionado.

A Figura 5-15 apresenta os resultados experimentais, onde mostra a influência do momento da adição do aditivo na fluidez da pasta de cimento. Percebe-se que, para a maioria dos ensaios realizados, a adição do aditivo juntamente com a água de amassamento resultou em fluidez inicial menor comparado com adição retardada de 3 a 13 minutos após o cimento estar em contato com água. Adições de aditivo após aos 13 minutos não mostraram significativa redução da fluidez inicial. No entanto, pode-se observar para a maioria dos ensaios realizados, que o retardo de 03 minutos na adição do aditivo (tempo 0,0 da Tabela 5-8) na pasta resultou em maior área de espalhamento (fluidez).

Tabela 5-8 Área de espalhamento (cm²) em função do momento da adição aditivo na pasta, utilizando o cimento da marca Y.

Tempo(min)	CPIV-ADT3	CPIV-ADT4	CPI-S ADT1	CPII-Z ADT4	CPII-Z ADT1
-3,0*	206,43	130,72	82,96	202,97	141,29
0,0	213,82	146,36	82,61	233,71	148,49
5,0	226,97	133,77	63,90	215,88	145,84
10,0	228,98	131,73	57,81	194,82	138,17
15,0	228,31	126,23	53,47	197,31	129,49
30,0	229,75	136,34	47,94	192,98	118,85
60,0	214,82	131,48	58,61	160,05	115,00

* o aditivo era adicionado juntamente com a água de amassamento.

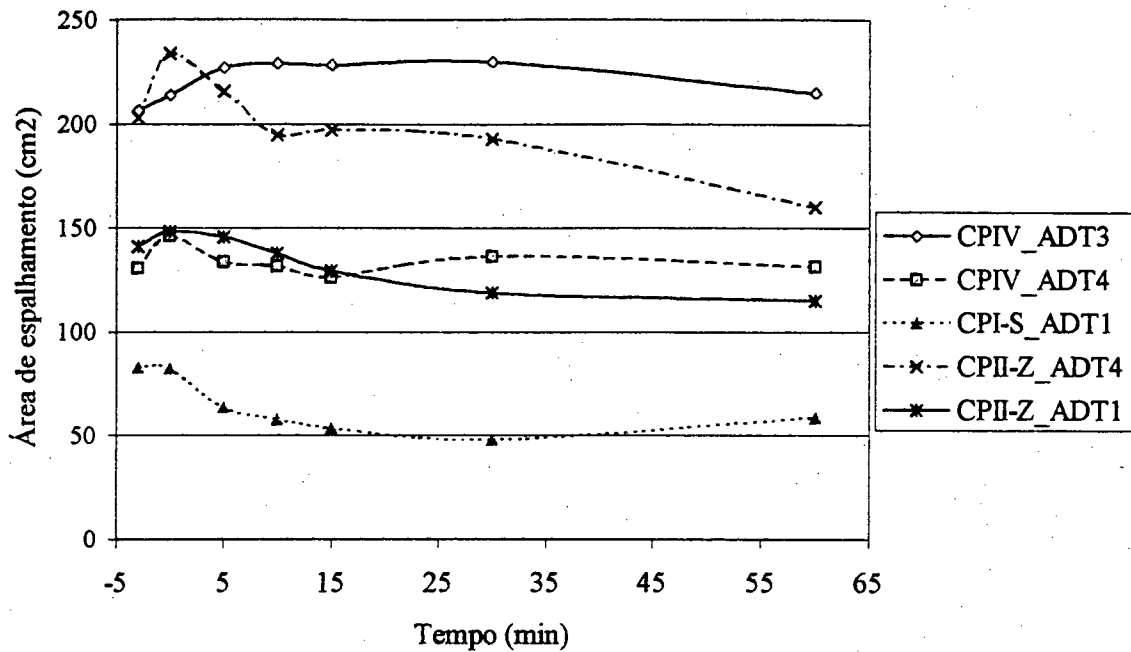


Figura 5-15 Área de espalhamento em função do momento da adição do aditivo.

5.1.2- Compatibilidade cimento-aditivo

Após verificar alguns parâmetros que poderiam influenciar os resultados obtidos pelo método de Kantro, foi verificada a compatibilidade dos cimentos com os aditivos redutores de água.

Observou-se nas pastas menos fluidas certa dificuldade em preencher o molde tronco de cone, mesmo com o auxílio dos golpes de compactação previstos na metodologia de ensaio. Isto ocorre em parte porque a pasta retorna junto à haste de adensamento e pela dificuldade da mesma em atravessar o diâmetro superior do molde.

Em pastas com alta fluidez, observou-se a segregação do material no momento de preencher o molde para a segunda determinação. Quando isto ocorria, era feita a remistura da pasta manualmente.

Os valores obtidos encontram-se no Anexo 09 e os resultados finais na Tabela 5-9.

Tabela 5-9 Área de espalhamento (cm^2) obtido pelas pasta feitas com a combinação cimento-aditivo. Cada valor representa a média de três observações experimentais.

Cimento		Empresa X				Empresa Y			
	Rel. a/(c+s)	ADT1	ADT2	ADT3	ADT4	ADT1	ADT2	ADT3	ADT4
CPI-S	0,24	17,45	117,63	113,57	22,70		110,37		23,70
	0,27	24,12	190,02	166,31	62,46	21,21	179,73	115,97	82,23
	0,30	72,90	259,99	193,83	146,12	82,47	266,42	161,86	151,76
	0,33	111,10		227,02	186,81	137,05		196,73	
CPII-F	0,24		17,52	120,44	26,67		67,01	110,52	19,64
	0,27	30,67	60,64	175,25	101,81	42,60	158,11	157,31	64,14
	0,30	87,35	110,33	183,57	161,89	98,71	252,78	189,46	144,53
	0,33	129,74				148,00			
CPII-Z	0,24			112,01			67,01	110,52	19,64
	0,27	16,72	106,28	178,40	59,64	42,60	158,11	157,31	64,14
	0,30	65,17	183,74	211,06	157,95	98,71	252,78	189,46	144,53
	0,33	121,14	209,53		217,00	148,00			
CPIV	0,27		110,37	128,84	19,17		111,69	155,65	32,26
	0,30	18,85	179,83	167,87	67,70	149,03	181,56	177,85	101,58
	0,33	89,99	266,42	211,61	156,88	175,41	222,37	202,70	184,13
	0,36	155,38				234,88			
CPV	0,24		121,04	20,57	16,40		41,02	48,50	32,72
	0,27	16,00	215,23	124,44	28,13	30,74	117,42	117,81	68,98
	0,30	49,13	281,08	167,87	95,89	85,95	175,58	163,99	108,94
	0,33	91,53				152,66			

Com o objetivo de analisar os dados da Tabela 5-9 sob o mesmo enfoque do método de Kantro, elaborou-se os gráficos que correlacionam a área de espalhamento com a relação água/materiais cimentantes em função do tipo de cimento, conforme a seguir apresentado:

O comportamento da fluidez que apresentou a pasta de cimento CPI-S aditivada em função da relação água/materiais cimentantes variou de aditivo para aditivo utilizado. Mesmo os aditivos de mesma base química (melamina) apresentaram comportamento distinto, como mostra a Figura 5-16. A compatibilidade dos aditivos à base química melamina se mostrou melhor em relação a base química de naftaleno. Somente o aditivo ADT3 apresentou variação de fluidez em função da marca do cimento utilizado, mas no entanto, os outros aditivos não mostraram diferença significativa de fluidez em pasta.

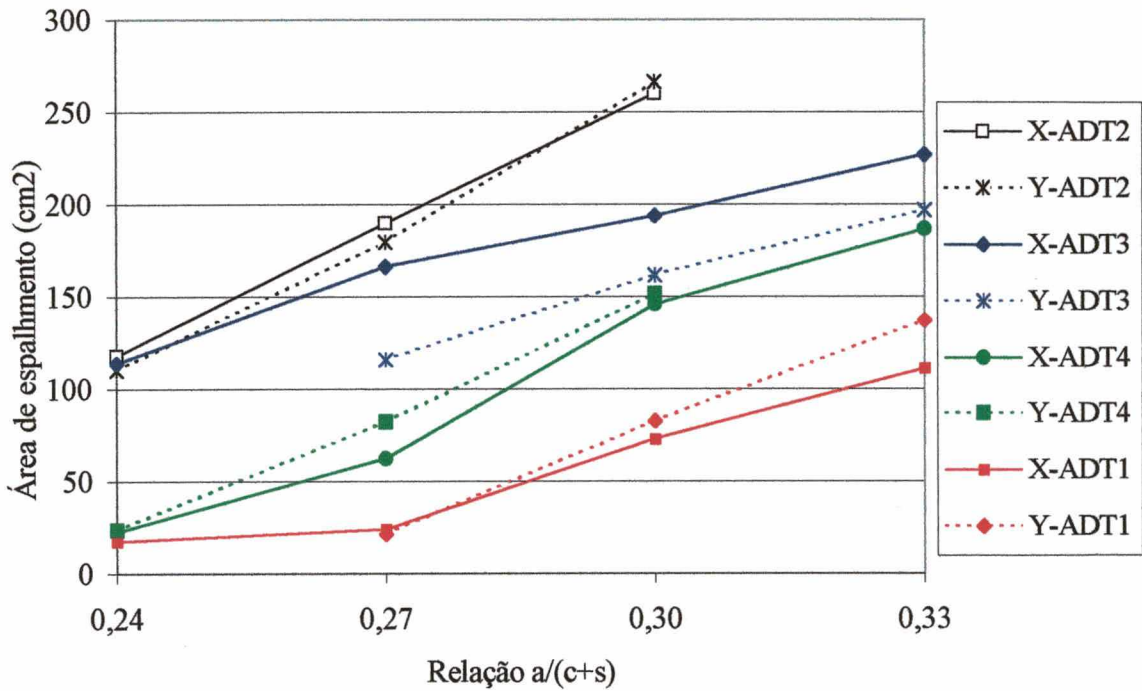


Figura 5-16 Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com cimento CPI-S.

O comportamento da fluidez que apresentou a pasta de cimento CII-F aditivada em função da relação água/materiais cimentantes variou de aditivo para aditivo utilizado. Mesmo os aditivos de mesma base química (melamina) apresentaram comportamento distinto, como mostra Figura 5-17. A compatibilidade dos aditivos à base química melamina se mostrou melhor em relação a base química de naftaleno. O aditivo ADT2 apresentou variação de fluidez em função da marca do cimento utilizado, mas no entanto, os outros aditivos não mostraram diferença significativa de fluidez.

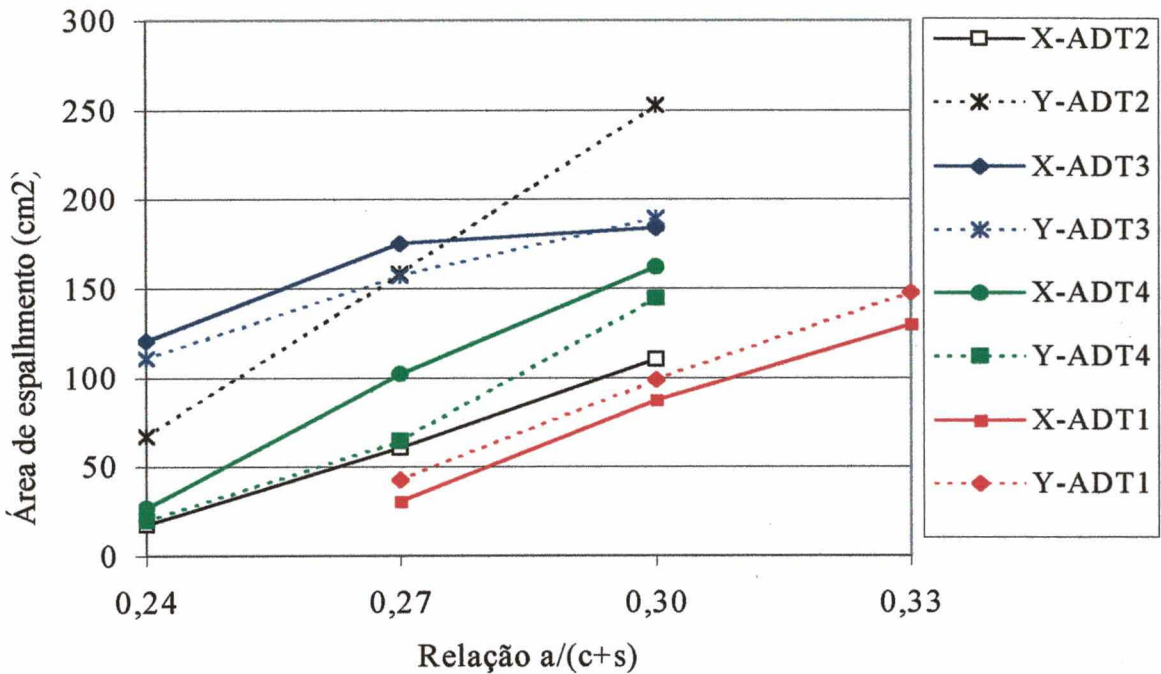


Figura 5-17 Área de espalhamento das pastas aditivadas obtida com cimento CII-F.

O comportamento da fluidez que apresentou a pasta de cimento CII-Z aditivada em função da relação água/materiais cimentantes variou de aditivo para aditivo utilizado. Mesmo os aditivos de mesma base química (melamina) apresentaram comportamento distinto, como mostra a Figura 5-18. A compatibilidade dos aditivos à base química melamina se mostrou melhor em relação a base química de naftaleno. O aditivo ADT2 apresentou variação de fluidez em função da marca do cimento utilizado, mas no entanto, os outros aditivos não mostraram diferença significativa de fluidez.

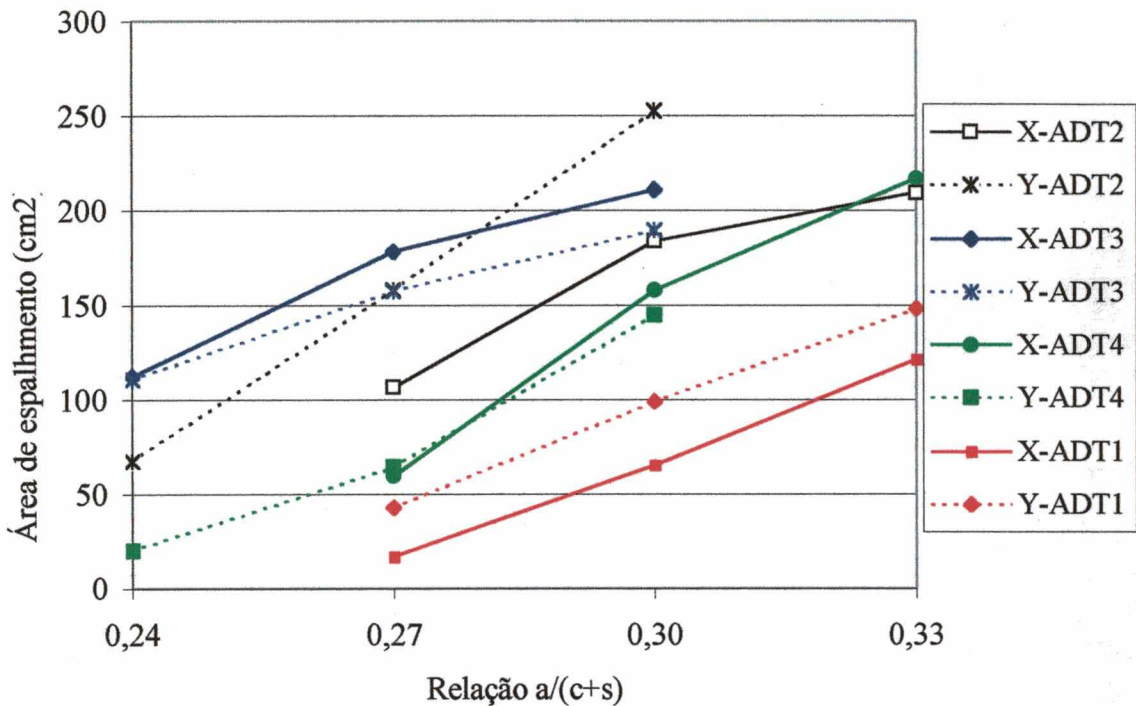


Figura 5-18 Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com cimento CII-Z.

O comportamento da fluidez que apresentou a pasta de cimento CPIV aditivada em função da relação água/materiais cimentantes variou de aditivo para aditivo utilizado, mesmo os aditivos de mesma base química (melamina) apresentaram comportamento distinto, como mostra a Figura 5-19. A compatibilidade dos aditivos à base química melamina se mostrou melhor em relação a base química de naftaleno. O aditivo ADT1 apresentou variação de fluidez em função da marca do cimento utilizado, mas no entanto, os outros aditivos não mostraram diferença significativa de fluidez.

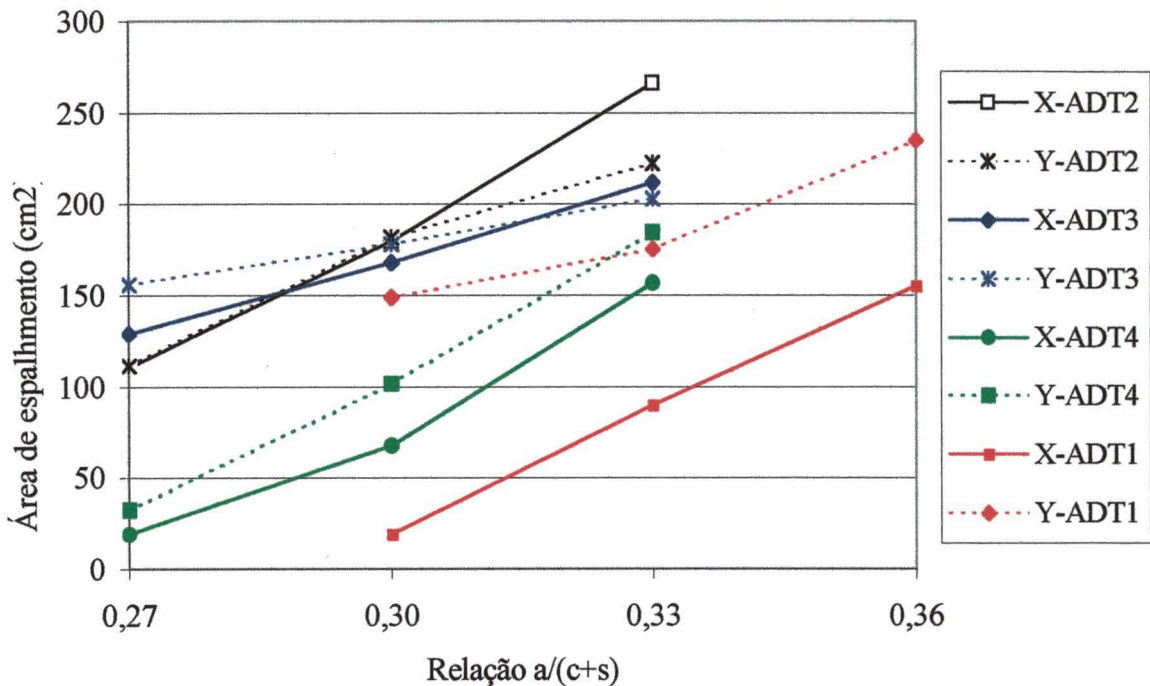


Figura 5-19 Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com cimento CPIV.

O comportamento da fluidez que apresentou a pasta de cimento CPV aditivada em função da relação água/materiais cimentantes variou de aditivo para aditivo utilizado, mesmo os aditivos de mesma base química (melamina) apresentaram comportamento distinto, como mostra a Figura 5-20. A compatibilidade dos aditivos à base química melamina se mostrou melhor em relação a base química de naftaleno. O aditivo ADT2 apresentou variação de fluidez em função da marca do cimento utilizado, mas no entanto, os outros aditivos não mostraram diferença significativa de fluidez.

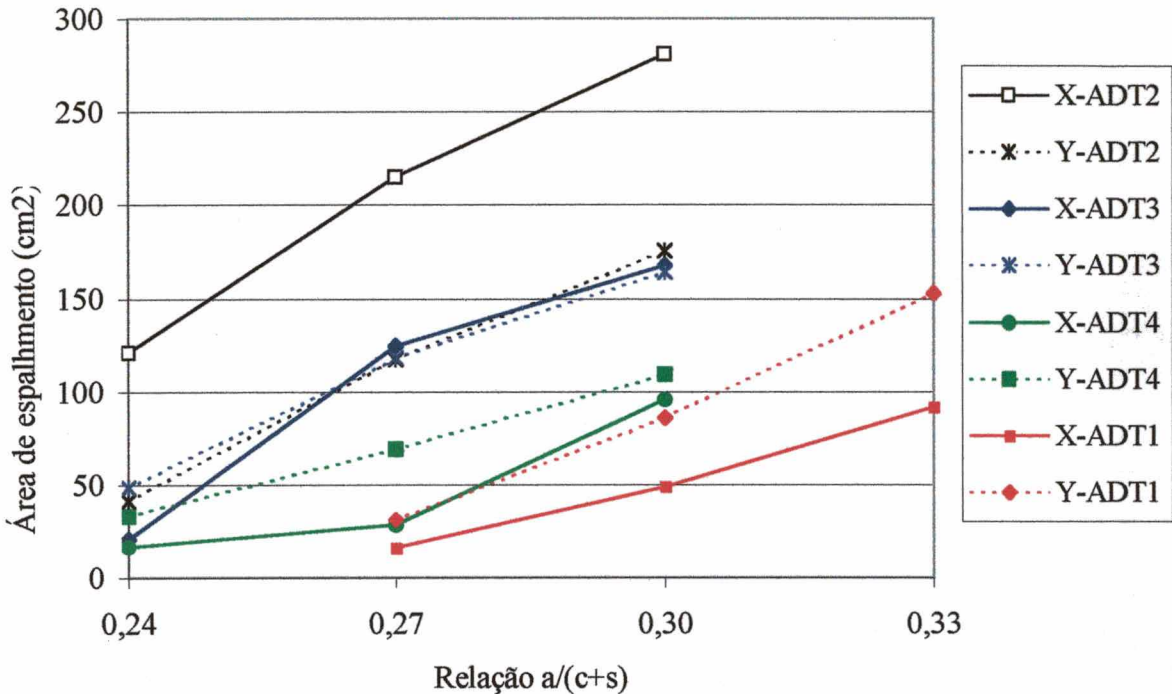


Figura 5-20 Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com cimento CPV.

Com base na Tabela 5-9 e nos gráficos anteriores podem ser feitas as seguintes observações:

Em relação ao aditivo ADT1, observa-se que as pastas aditivadas apresentaram menor desempenho para qualquer relação água/materiais cimentantes em comparação aos demais aditivos, exceto para o cimento CPIV (Y) quando mostrou um desempenho satisfatório. Para qualquer relação água/materiais cimentantes, os aditivos ADT2 E ADT3 apresentaram resultados superiores aos aditivos ADT1 e ADT4 com todos os cimentos utilizados no trabalho.

A relação água/materiais cimentantes e os teores de aditivo utilizados no presente ensaio representam uma faixa significativa de utilização dos aditivos redutores de água e a relação normalmente utilizada nos concretos de alto desempenho e/ou alta resistência.

Obteve-se misturas de pastas de cimento aditivadas com relação água/materiais cimentantes variando de 0,24 a 0,36. No entanto, obteve-se resultados para a relação água/materiais cimentantes igual a 0,30 para todas as combinações. Neste caso, pode-se comparar um melhor ou pior desempenho dos aditivos para uma mesma quantidade de água utilizada.

No anexo 10 estão apresentadas os gráficos que correlacionam área de espalhamento com a relação água/materiais cimentantes em função do tipo de aditivo de utilizado.

O fato da existência de uma pequena irregularidade do comportamento observado nas pastas de cimento aditivadas, em relação a uma suposta reta definida pelos pontos, não prejudica o trabalho. Porém deve-se verificar qual o comportamento da fluidez na pasta. Ainda deve ser levado em conta a necessidade de verificar influências do aditivo em questões importantes como a segregação, exsudação, retardamento no tempo de pega, perda de fluidez com o tempo, teor de aditivo e além do mais, a sua repercussão sobre as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

5.2- Ensaios em argamassa

Com o objetivo de verificar a validade de estender as informações obtidas pelo método de Kantro em argamassa, executou-se o ensaio de Flow-Table para verificar a compatibilidade entre os cimentos e aditivos.

Os ensaios em argamassa foram realizados a partir dos resultados obtidos em pasta, onde foi escolhido o aditivo de melhor desempenho e de pior desempenho para os cimentos procedentes da marca (Y). No entanto, para o cimento CPIV (Y) foram realizados ensaios com todos os aditivos.

Os dados obtidos pelo ensaio em argamassa estão apresentados no anexo 11 e os resultados médios na Tabela 5-10.

Tabela 5-10 Diâmetro de espalhamento médio das argamassa (cm) em função da relação água/materiais cimentantes.

Rel. a/(c+s)	CPI-S (Y)		CPV (Y)		CPII-Z (Y)		CPIV (Y)			
	ADT1	ADT2	ADT1	ADT2	ADT2	ADT4	ADT1	ADT2	ADT3	ADT4
0,300	31,62	30,50	28,40	30,18	32,15	33,12	30,80	30,18	32,98	30,82
0,270	24,90	26,25	24,28	23,92	25,25	28,92	25,45	23,90	26,08	29,20
0,240	21,32	20,32	18,78	19,35	17,75	23,65	17,70	16,75	19,00	23,15

Para melhor entendimento dos dados obtidos, plotou-se os dados em dois gráficos, sendo a Figura 5-21 com o cimento CPI-S (Y), CPV (Y) e CPII-Z (Y) e a Figura 5-22 com o cimento CPIV (Y).

As argamassas confeccionadas com o aditivo ADT4 apresentaram um efeito secundário, ou seja, uma grande quantidade de ar incorporado. Em função do método de Flow-Table ser um ensaio dinâmico, o ar incorporado acaba funcionando como pequenos rolamentos lisos dentro da argamassa, fazendo com que ocorra um aumento do diâmetro de espalhamento da argamassa sob efeito da vibração da mesa.

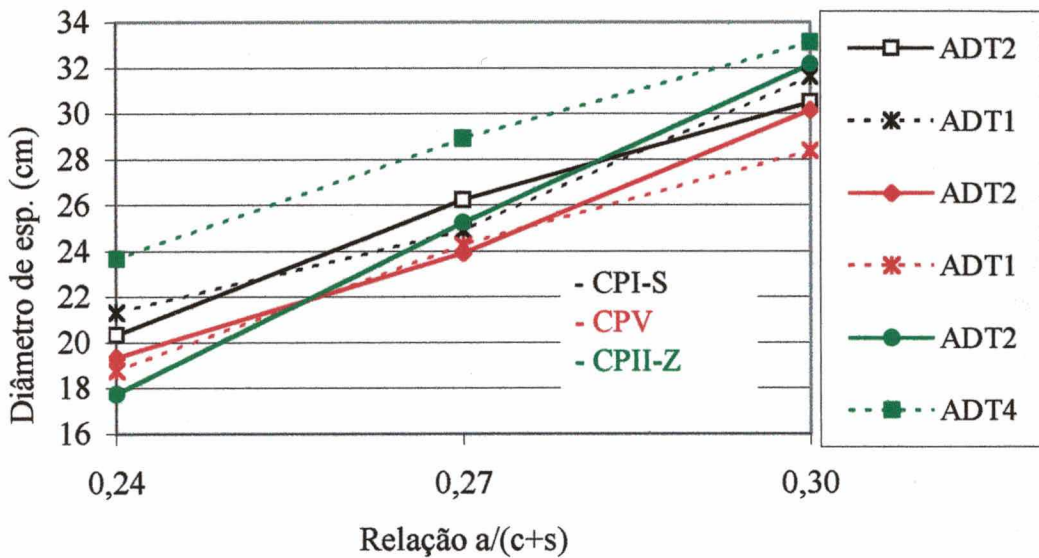


Figura 5-21 Diâmetro de espalhamento das argamassa em função da relação água/materiais cimentantes e do tipo de cimento.

Diante dos resultados obtidos, com exceção do aditivo ADT4, pode-se afirmar que não existe diferença significativa de fluidificação para qualquer combinação estudada. É interessante observar que o método do Flow-Table é um ensaio dinâmico, sendo a deformação da massa causada pela vibração da mesa. Neste caso, a coesão da mistura é alterada pela vibração, sendo distinta da existente no estado estático (método de Kantro em pasta e método do abatimento em concreto).

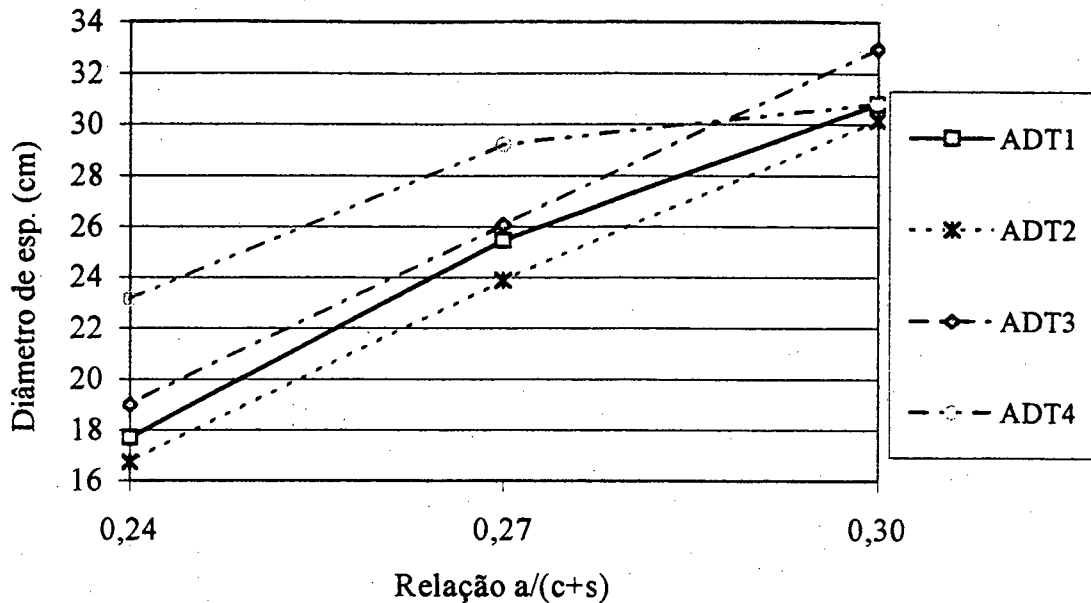


Figura 5-22 Diâmetro de espalhamento das argamassa obtidas com cimento CPIV (Y) em função da relação água/materiais cimentantes.

5.3- Ensaios em concreto

Com o objetivo de verificar a validade de estender as informações obtidas pelo método de Kantro para misturas de concreto, executou-se ensaios de abatimento do tronco de cone de Abrams, somente para o cimento CPI-S da empresa Y.

A seleção do tipo de cimento foi baseada em função de apresentar um desempenho mais definido para cada aditivo, ou seja, cada aditivo apresenta uma fluidez diferente para cada relação água/materiais cimentantes e não ocorre nenhuma sobreposição. Considerou-se conclusivas as informações fornecidas pelo método de Kantro, possibilitando identificar na pasta de cimento, o aditivo de pior e melhor compatibilidade.

Os ensaios em concretos foram realizados a partir dos resultados obtidos em pasta, onde foi escolhida a relação água/materiais de 0,30, em função de que, para todos os aditivos estudados, havia resultados de desempenho. Geralmente trabalha-se com relações água/materiais cimentantes em torno deste valor para obter concreto de alto desempenho. O teor de aditivo adicionado no concreto era 0,5 + 2,0 % (P + SP%).

A apresentação e análise dos dados obtidos segue a seqüência abaixo:

- Trabalhabilidade inicial e ao longo do tempo dos concretos de alto desempenho;
- Ajuste da dosagem;

- Evolução da resistência à compressão com o tempo; e
- Avaliação econômica.

5.3.1- Trabalhabilidade inicial e ao longo do tempo dos concretos de alto desempenho

Eram necessários ajustes no traço inicialmente obtido pelo método, utilizando-se inicialmente a combinação de pior desempenho em pasta, pois supunha-se que as demais combinações teriam um maior fluidez do concreto. Para manter o abatimento da mistura de concreto no valor fixado 100 ± 15 mm para os demais aditivos que mostraram um desempenho melhor em pasta, eram adicionados gradativamente agregado graúdo e miúdo, mantido o teor de argamassa constante. Posteriormente, era avaliado a trabalhabilidade aos 20 e 40 minutos, para avaliar a perda de abatimento ao longo do tempo dos concretos aditivados. Após aos 40 minutos, era adicionado ao concreto aditivo superplastificante num teor de 1 %, remisturado por 02 minutos e em seguida avaliado a trabalhabilidade pelo ensaio de abatimento de tronco cone.

Os resultados experimentais obtidos estão apresentados no Anexo 12. Com a confecção de gráficos para cada cimento utilizado, consegue-se mostrar a tendência da fluidez inicial, perda da fluidez ao longo do tempo e a recuperação da fluidez com redosagem para os quatro aditivos utilizados.

A perda da fluidez ao longo do tempo é de grande importância na escolha da dupla cimento aditivo na fabricação do concreto de alto desempenho, pois caracteriza uma taxa menor/maior da perda de abatimento e assim dispor de um maior/menor período para lançar o concreto.

A perda da fluidez ao longo do tempo é na atualidade um dos maiores problemas que o CAD encontra em obra. Isto pode ser resolvido adicionando novas dosagens de aditivo superplastificantes (redosagens) e a adição de aditivos retardadores. Neste estudo foi avaliado a recuperação da fluidez do concreto pela redosagem de aditivo superplastificante num teor de 1%.

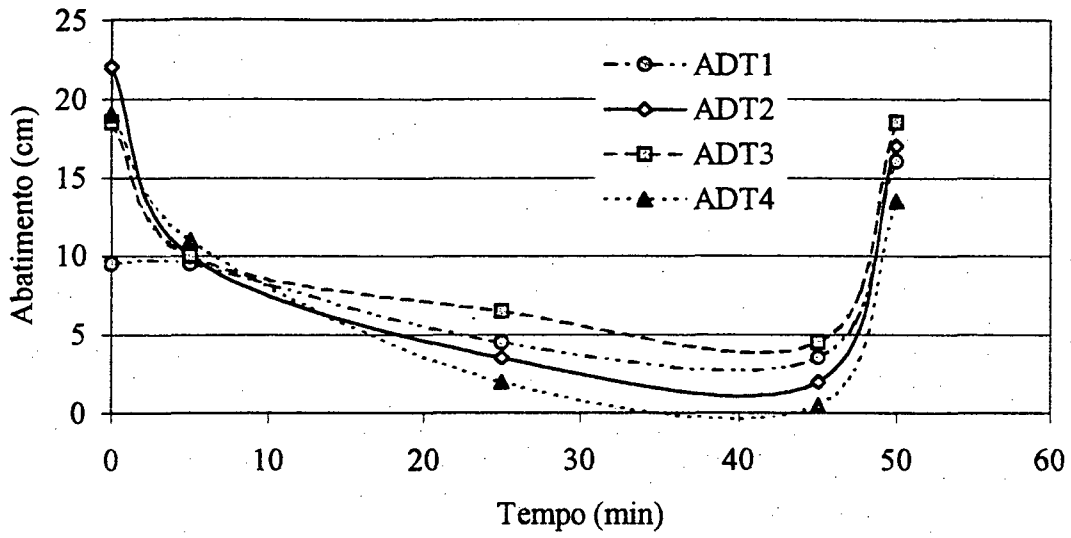


Figura 5-23 Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CPI-S (Y).

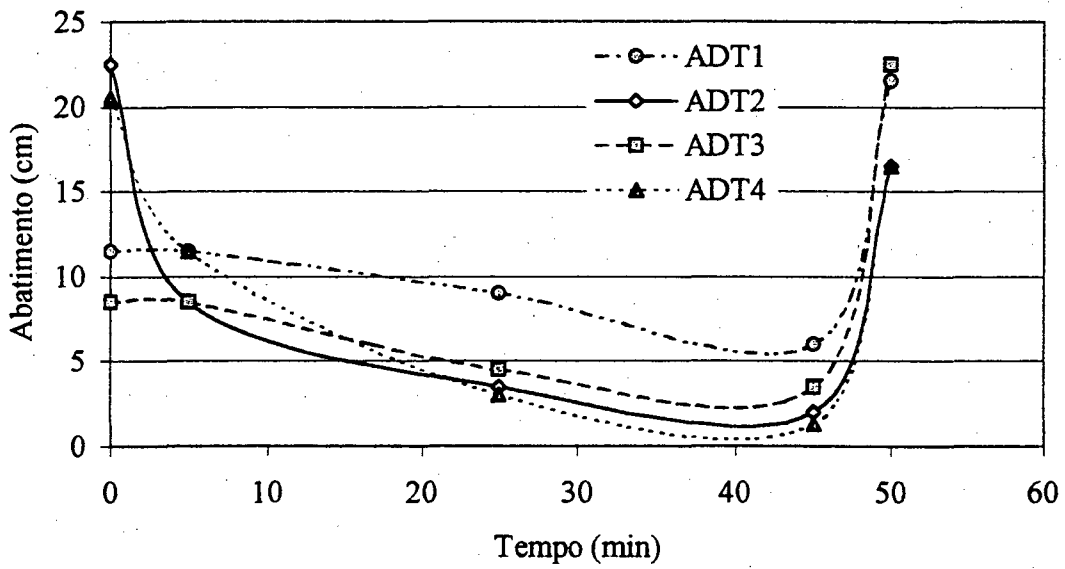


Figura 5-24 Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CPII-F (Y).

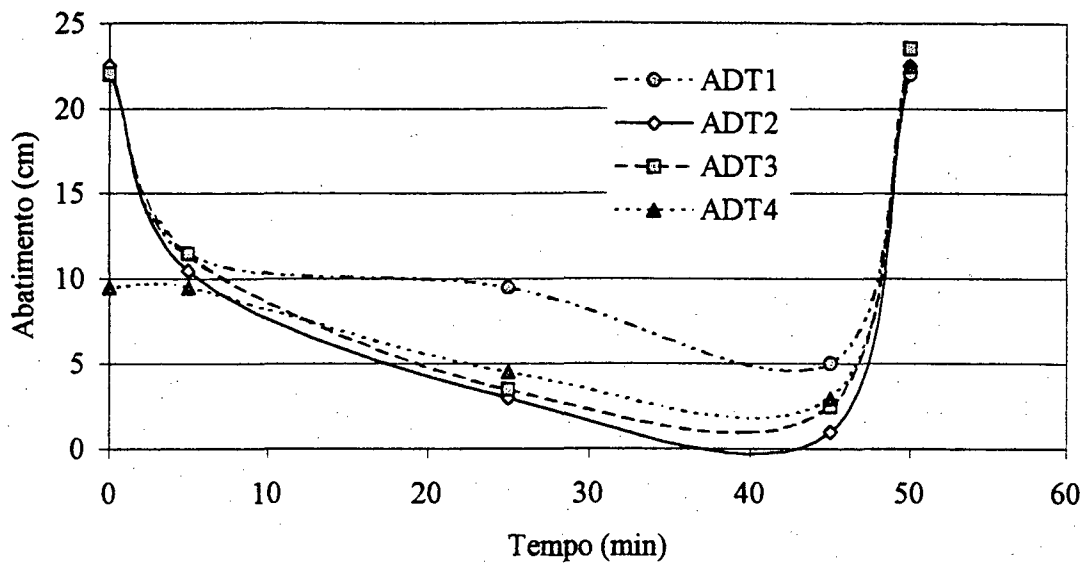


Figura 5-25 Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CIPV (Y).

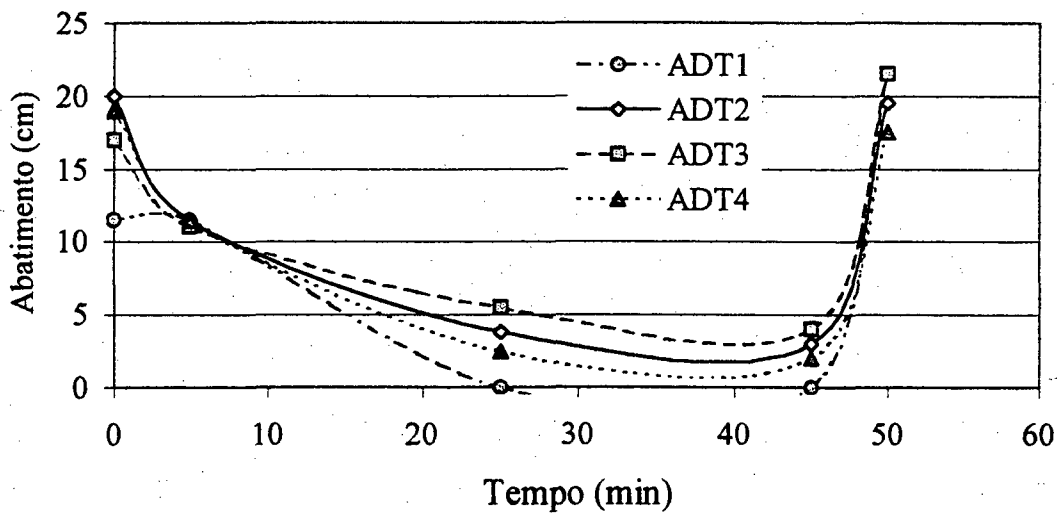


Figura 5-26 Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CPV (Y).

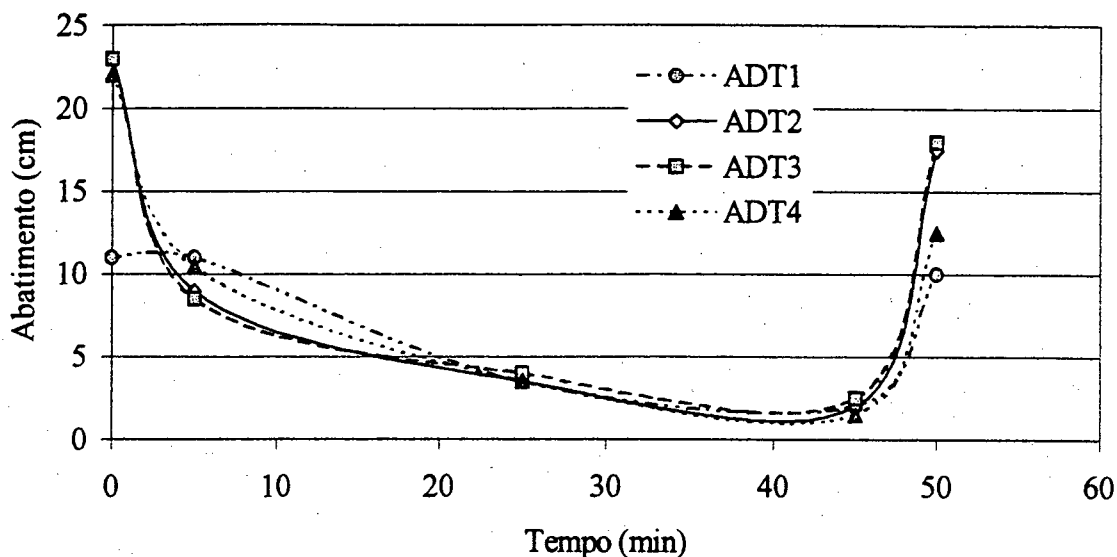


Figura 5-27 Perda da fluidez com o tempo de concretos feitos com o cimento CPI-S (X).

Percebe-se, claramente, pela observação das figuras (Figura 5-23 a Figura 5-27) que os concretos feitos com cimentos mais puros (CPI-S e CPV) mostraram menor perda de fluidez com o aditivo ADT3, enquanto que os concretos feitos com cimentos contendo adições (CPII-F e CPIV) mostraram menor perda de fluidez com o aditivo ADT1.

O desempenho da redosagem teve um comportamento semelhante para os aditivos ADT2 e ADT3, pois os concretos apresentaram abatimentos superiores ou iguais a 165 mm para todos os cimentos. No entanto, os aditivos ADT1 e ADT4 não obtiveram o mesmo desempenho para o cimento CPI-S (X), mas os cimentos produzidos pela empresa (Y) mostraram abatimentos superiores ou iguais a 160 mm.

A redosagem deveria proporcionar um alto abatimento, maior que 150 mm, para a fácil colocação do concreto de alto desempenho com vibração normal. O abatimento inicial adotado de 100 ± 15 mm menor que 150 mm, foi em função de verificar o desempenho da dupla cimento-aditivo em incorporar um teor de agregado maior ou menor para assim obter um abatimento semelhante para todas as misturas efetuadas.

Observações visuais do concreto aditivado mostraram que não ocorreu segregação e exsudação durante sua colocação nos moldes. No entanto, nos concretos com retardamento da hidratação inicial do cimento pode ter ocorrido exsudação interna, que ocorre em concreto com alto abatimento, quando os grãos de cimentos começam a sedimentar da suspensão defloculada e assim acaba-se formando um filme espesso de água debaixo das partículas de agregado graúdo. A exsudação interna pode ser identificada em investigações microestruturais.

5.3.2- Ajuste da dosagem

Para obter a mesma trabalhabilidade do concreto com as várias combinações de cimento aditivo feitas no trabalho experimental, eram adicionados gradativamente agregados miúdo e graúdo, de modo a manter o teor de argamassa constante.

Os resultados experimentais obtidos estão apresentados no Anexo 12.

Para um melhor entendimento dos resultados foi calculado o teor de agregados incorporados (m), conforme mostra a Tabela 5-11, onde percebe-se claramente a influência do tipo de cimento empregado para a fabricação do concreto de alto desempenho. Para um mesmo tipo de cimento, a análise de compatibilidade dos aditivos pode ser avaliada em função da incorporação de maior ou menor quantidade de agregados, respeitado a proporção entre os agregados graúdo e miúdo, obtendo assim concretos com a mesma trabalhabilidade.

Para os concretos feitos com aditivo ADT4 evidenciou-se o efeito secundário que foi a grande quantidade de ar incorporado. Em função deste efeito ocorre a incorporação de maior quantidade de agregados, visto que as bolhas de ar incorporadas funcionam como pequenos rolamentos e ajudando a obter uma maior fluidez do concreto.

Entre os cimentos, pode-se perceber que os cimentos CPI-S e CII-F (Y) apresentaram maior compatibilidade com os aditivos estudados. A diferença entre o teor de agregado incorporado para o cimento de melhor compatibilidade e o de pior compatibilidade varia conforme o aditivo usado. Para o aditivo ADT1 foi de 36%, ADT2 foi de 29%, ADT3 foi de 35,68% e para ADT4 foi de 44,00%.

Tabela 5-11 Teor de agregado incorporado em concretos obtidos com diferentes tipos de cimento e aditivos.

Cimentos	Aditivos			
	ADT1	ADT2	ADT3	ADT4
CPI-S (Y)	2,732	2,946	2,915	2,946
CII-F (Y)	2,960	3,095	2,960	3,222
CPIV (Y)	2,500	2,654	2,615	2,269
CPV (Y)	2,170	2,473	2,284	2,436
CPI-S (X)	2,823	3,190	3,099	3,282

5.3.3- Evolução da resistência à compressão com o tempo

Os ensaios de resistência à compressão do concreto foram feitos de acordo com a norma NBR 5738 (1984) para as etapas de moldagem e cura dos corpos de prova e de acordo com a NBR 5703 (1980) para a ruptura.

Com o objetivo de identificar possíveis variações na resistência à compressão do concreto em relação ao teor de aditivo adicionado, moldou-se corpos-de-prova para o teor de 0,5 + 2,0% de aditivo e posteriormente moldou-se corpos-de-prova com a redosagem de 1% de aditivo superplastificante na mesma mistura.

Para a relação água/materiais cimentantes de 0,30, foram moldados três corpos-de-prova para cada idade de 3, 7 e 28 dias, inicialmente para o teor de aditivo inicial e posteriormente para a redosagem.

O valor da resistência à compressão em MPa de cada amostra provém da média dos dois maiores valores mencionados no Anexo 12, conforme mostra a Tabela 5-12.

Tabela 5-12 Resistência à compressão (MPa) obtida pela média dos dois maiores valores obtidos aos 3, 7 e 28 dias para cada combinação de aditivo-cimento inicial e para a redosagem.

Cimento	Aditivo	re/dosagem	3 dias	7 dias	28 dias
CPI-S (Y)	ADT1	d	50,29	62,71	77,99
CPI-S (Y)	ADT1	r	51,57	62,39	67,96
CPI-S (Y)	ADT2	d	52,52	63,35	81,49
CPI-S (Y)	ADT2	r	52,52	62,07	84,20
CPI-S (Y)	ADT3	d	62,71	77,03	94,22
CPI-S (Y)	ADT3	r	63,09	74,01	95,50
CPI-S (Y)	ADT4	d	6,21	48,07	82,13
CPI-S (Y)	ADT4	r	3,18	4,46	75,44
CPII-F (Y)	ADT1	d	52,84	62,71	75,44
CPII-F (Y)	ADT1	r	45,52	56,02	77,67
CPII-F (Y)	ADT2	d	52,84	64,30	71,14
CPII-F (Y)	ADT2	r	54,27	65,57	86,26
CPII-F (Y)	ADT3	d	63,19	72,90	87,86
CPII-F (Y)	ADT3	r	47,75	67,48	70,03

CPII-F (Y)	ADT4	d	12,00	50,93	63,82
CPII-F (Y)	ADT4	r	3,88	6,21	70,03
CPIV (Y)	ADT1	d	37,08	73,05	77,99
CPIV (Y)	ADT1	r	0,00	42,65	*
CPIV (Y)	ADT2	d	27,06	53,16	68,12
CPIV (Y)	ADT2	r	*	*	*
CPIV (Y)	ADT3	d	56,09	73,05	88,49
CPIV (Y)	ADT3	r	52,20	68,44	83,08
CPIV (Y)	ADT4	d	5,41	48,38	76,08
CPIV (Y)	ADT4	r	1,43	5,73	34,06
CPV (Y)	ADT1	d	53,48	63,66	70,67
CPV (Y)	ADT1	r	53,16	67,64	82,76
CPV (Y)	ADT2	d	59,53	74,49	83,08
CPV (Y)	ADT2	r	62,23	77,19	96,77
CPV (Y)	ADT3	d	70,19	81,65	86,90
CPV (Y)	ADT3	r	70,03	82,44	79,58
CPV (Y)	ADT4	d	36,93	66,69	90,72
CPV (Y)	ADT4	r	3,02	33,11	87,86
CPI-S (X)	ADT1	d	59,21	63,03	78,94
CPI-S (X)	ADT1	r	49,66	57,30	73,21
CPI-S (X)	ADT2	d	59,84	62,39	76,40
CPI-S (X)	ADT2	r	55,71	65,26	75,44
CPI-S (X)	ADT3	d	58,25	61,75	85,31
CPI-S (X)	ADT3	r	55,71	62,87	74,17
CPI-S (X)	ADT4	d	43,45	50,29	61,12
CPI-S (X)	ADT4	r	2,55	*	*

* - concretos que apresentaram reações expansivas e não foram obtidos valores de resistência à compressão.

Para melhor entendimento dos resultados obtidos na Tabela 5-12 foram feitos gráficos comparando a resistência à compressão de concretos confeccionados com diferentes aditivos para um mesmo cimento e ainda visualizando de forma fácil a influência do teor de aditivo adicionado para cada idade.

Os valores das resistências à compressão obtidas com o concreto aditivado e com o concreto redosado posteriormente varia de caso para caso. Este assunto não está completamente esclarecido pelos pesquisadores que possuem pontos de vista diferentes para este assunto.

O incremento da resistência à compressão obtido pode ser atribuído geralmente ao aumento da área efetiva disponível para a hidratação, propiciado pelo efeito dispersivo do aditivo e ao melhor adensamento proporcionado pelo concreto aditivado, mesmo que possua um abatimento igual ao concreto convencional. Nesta situação, o volume de ar incorporado na mistura como efeito secundário do aditivo e o possível atraso no desenvolvimento das reações de hidratação do cimento tenham sido superado pelos efeitos benéficos citados acima. Pela observação da face lateral dos corpos-de-prova é visível o aumento de vazios provenientes da incorporação de bolhas de ar.

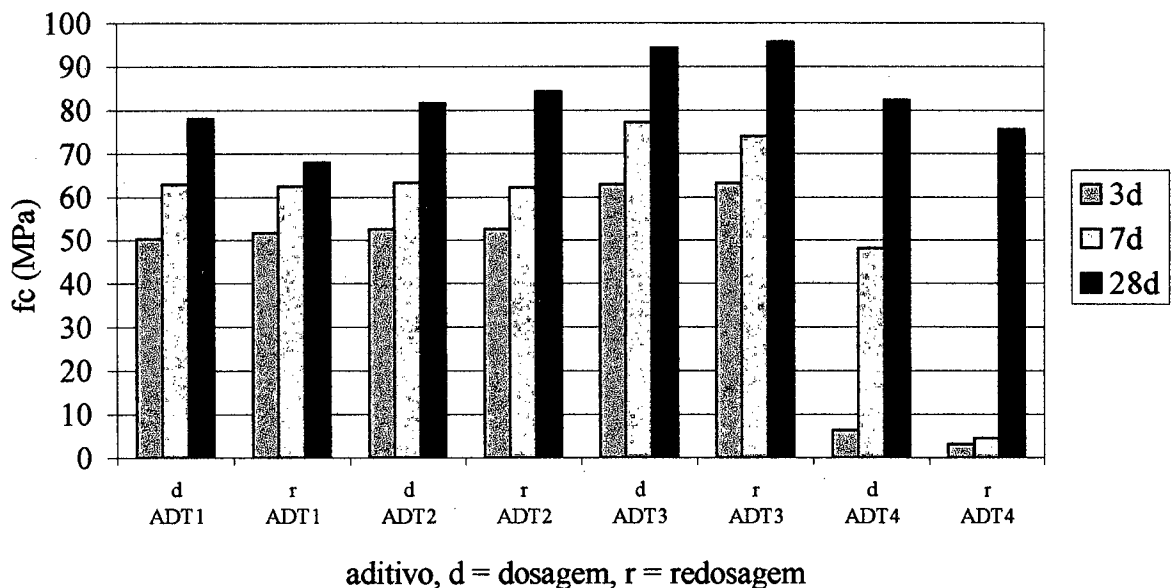


Figura 5-28 Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CPI-S (Y).

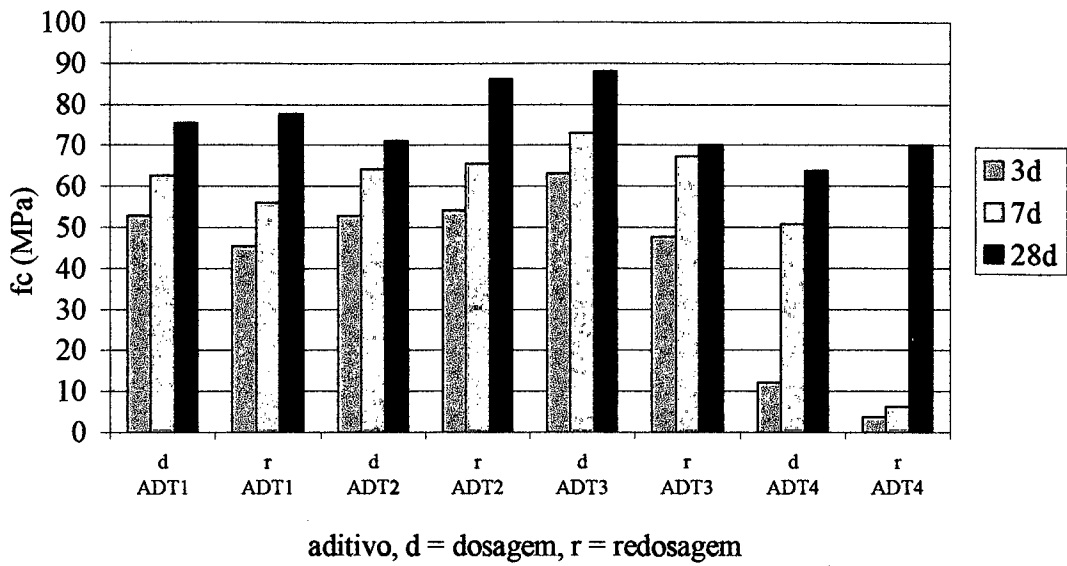


Figura 5-29 Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CII-F (Y).

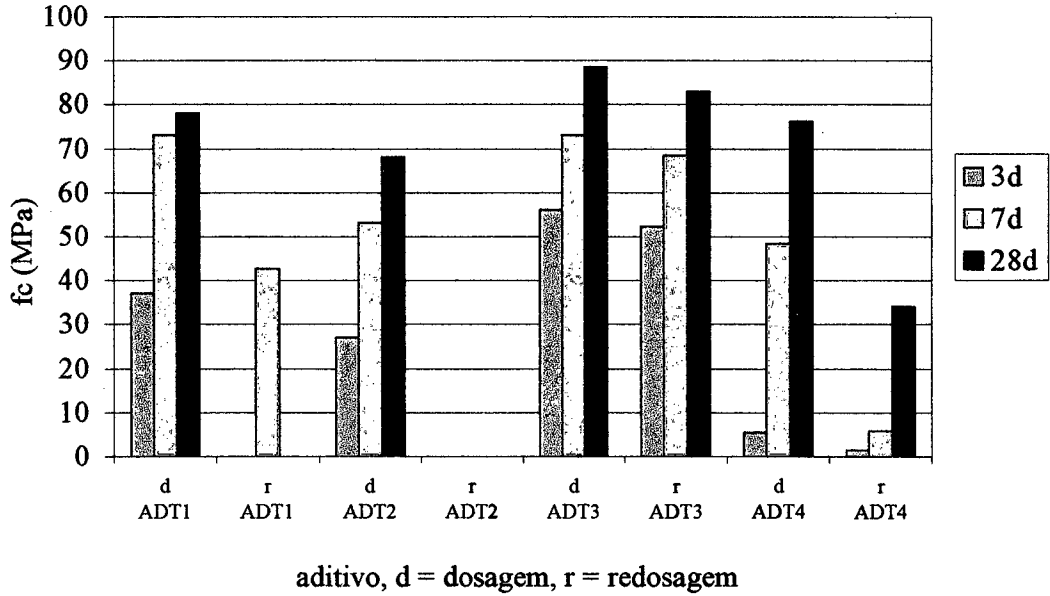
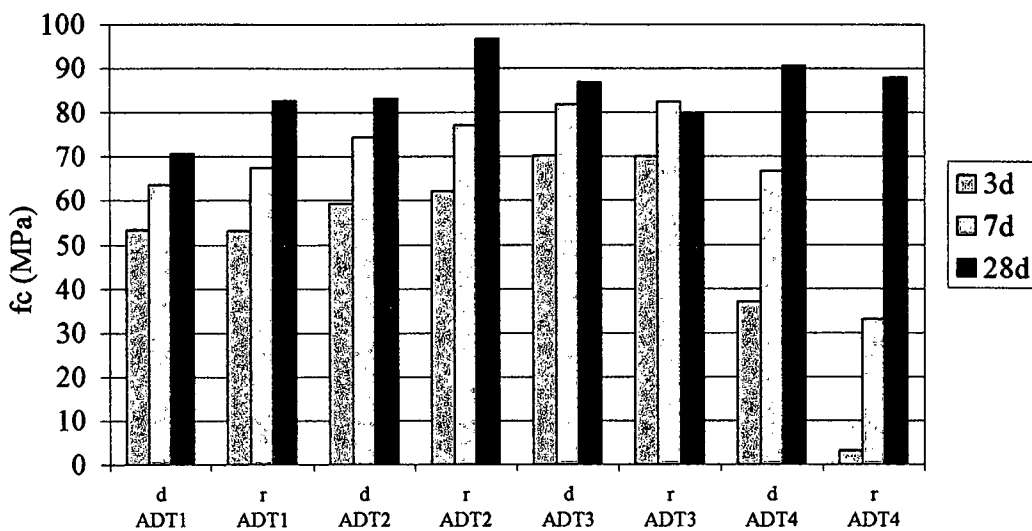
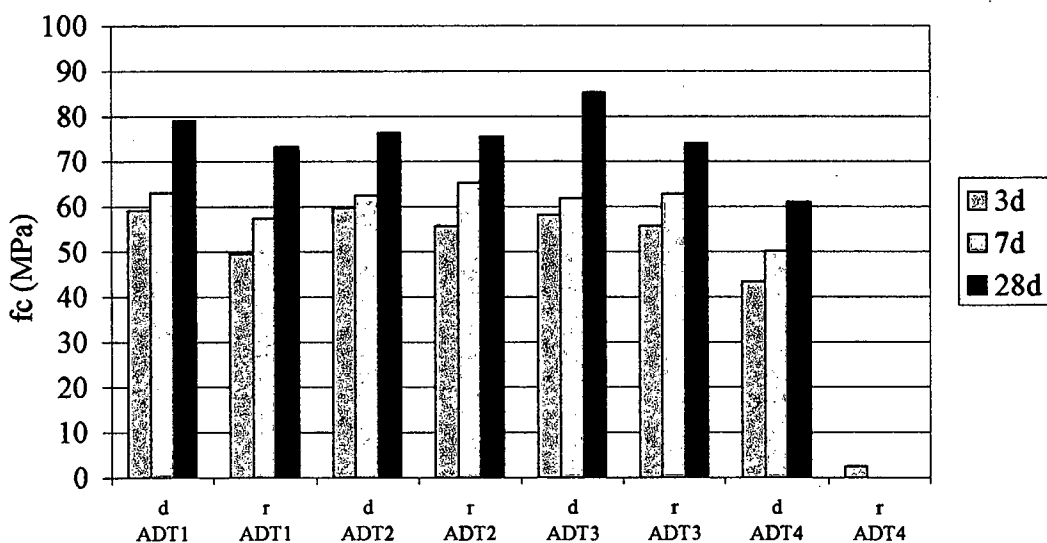


Figura 5-30 Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CIV (Y).



aditivo, d = dosagem, r = redosagem

Figura 5-31 Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CPV (Y).



aditivo, d = dosagem, r = redosagem

Figura 5-32 Resistência à compressão de concretos aditivados obtidos com cimento CPI-S (X).

A interação química do aditivo com partículas de cimento mais reativas, em especial com C₃A, reduz substancialmente a taxa de hidratação inicial, especialmente de aditivos a base de naftaleno é o que foi confirmado pelo GAGNE, BOISVERT e PIGEON (1996). O

efeito da retardação da hidratação do cimento é diretamente proporcional com sua concentração de aditivos e mais pronunciado em cimentos com baixos teores de C_3A , pois maior quantidade de aditivo é adsorvido pelas outras fases (C_3S) e reduzindo sua taxa hidratação superficial. Para manter a taxa de hidratação inicial, o teor de aditivo adicionado na mistura de concreto deve ser em relação a quantidade de clínquer presente no cimento e não em função dos materiais cimentantes.

O provável efeito de atraso no desenvolvimento das reações de hidratação ocasionado pelo aditivo superplastificante apresenta mais seu efeito quando se trata de cimentos com adições, como no caso do cimento CII-F e CIV. Como as reações de hidratação do clínquer são atenuadas devido a presença do aditivo, parte da pozolana permanece na mistura a espera de hidróxido de cálcio liberado pelo clínquer, para então prosseguir as reações. Cabe citar que o cimento pozolânico mesmo sem a presença de aditivo desenvolve mais lentamente as reações de hidratação, principalmente nas primeiras idades.

Pode-se observar na Tabela 5-12 e nos gráficos anteriores que, à medida que as reações de hidratação se desenvolvem, a diferença relativa entre os valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova com a dosagem e redosagem do aditivo diminuem. Possivelmente em idades superiores aos 28 dias deve-se anular a diferença entre o grau de hidratação entre o concreto com a dosagem de aditivo e o redosado.

A Figura 5-33 mostra a evolução da resistência à compressão dos concretos obtidos com os aditivos ADT2 e ADT3 para a dosagem inicial de aditivo, que pela observação das figuras anteriores têm mostrado uma maior velocidade de crescimento inicial da resistência à compressão. Estes aditivos mostraram uma menor influência no retardamento do tempo de pega e na incorporação de ar, mostrando assim a melhor compatibilidade da dupla cimento-aditivo para a confecção de concreto de alto desempenho com as dosagens de aditivo utilizadas. Na prática isto têm um significado importante, pois oferece maior reaproveitamento das fôrmas e conseqüentemente maior velocidade de construção da edificação.

Deve-se salientar que os efeitos do concreto aditivado sobre a resistência à compressão dependem do aditivo utilizado, do fabricante, da base química e dos teores empregados. Os concretos aditivados que mostraram uma redução significativa na resistência nas primeiras idades necessitam de um estudo sobre o teor de aditivo empregado. Talvez utilizando teores menores de aditivo poderiam ser atenuado os efeitos de redução da resistência à compressão inicial, mas não estaria-se trabalhando em termos de teor ótimo de fluidificação.

A determinação da dosagem ótima de aditivo é um trabalho complicado, com implicações no custo, na reologia do concreto fresco e nas propriedades mecânicas iniciais do concreto.

5.3.4- Avaliação econômica

A partir do proporcionamento final dos concretos efetuados com a mesma relação água/materiais cimentantes, teor de aditivo adicionado e com fluidez igual, prosseguiu-se fazendo uma análise de custo por m³ de concreto de alto desempenho produzido, como mostra a Tabela 5-13, considerando o custo unitário dos cimentos e dos aditivos iguais.

Tabela 5-13 Custo em Reais (R\$) do concreto produzido com diferentes aditivos e cimentas.

Cimento	Aditivo			
	ADT1	ADT2	ADT3	ADT4
CPI-S (Y)	168,31	162,37	163,19	162,37
CPII-F (Y)	162,02	158,56	162,02	155,49
CPIV (Y)	183,33	171,79	175,42	170,62
CPV (Y)	187,00	176,29	182,78	177,53
CPI-S (X)	165,70	156,25	158,47	154,10

Na Figura 5-34 apresenta-se uma comparação de custo do concreto por metro cúbico produzido e a resistência à compressão obtido aos 28 dias com objetivo de identificar a dupla cimento-aditivo de melhor desempenho. Observa-se que existe uma diferença significativa de custo dos concretos produzidos com diferentes tipos de cimento. Contudo, a diferença de custo para um mesmo cimento é pequena em função da consideração de custo médio igual para todos os aditivos utilizados. Pode-se verificar, após pesquisa de preço no mercado, uma diferença significativa de preço dos aditivos entre marcas e fornecedores.

Após identificar os concretos de melhor desempenho ainda é necessário verificar a ocorrência de efeitos secundários, tais como o retardamento de pega e a excessiva incorporação de ar.

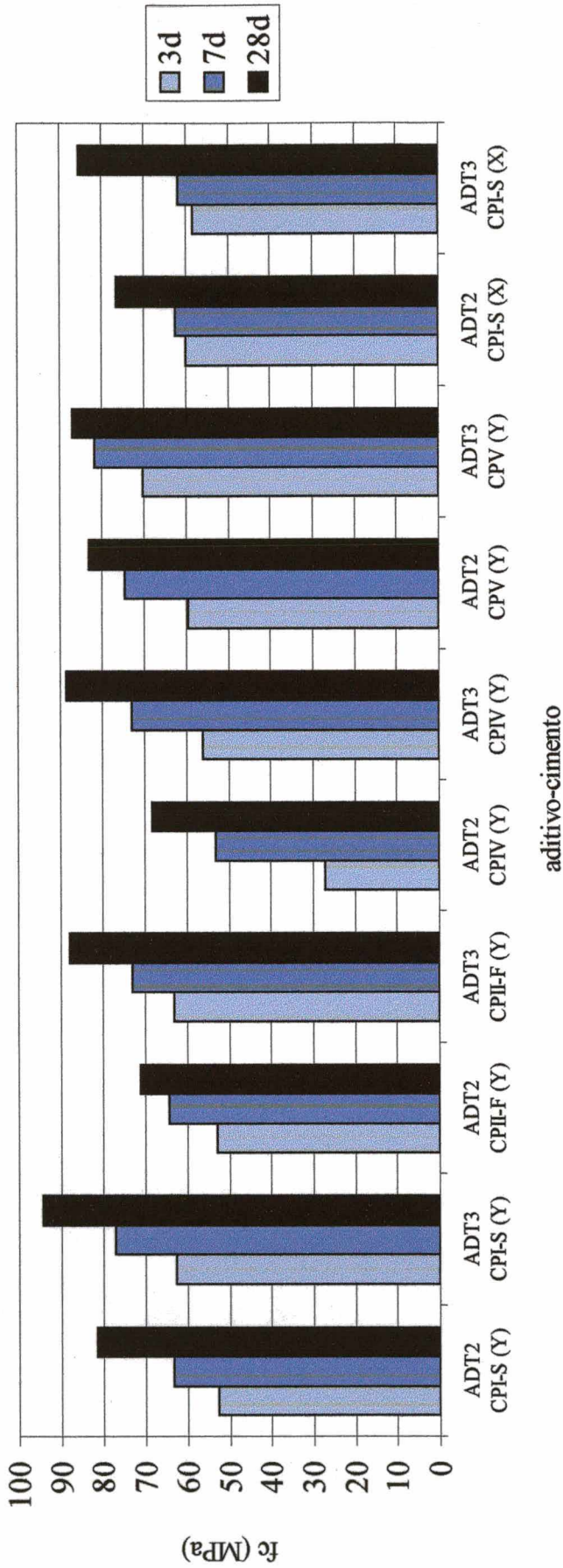


Figura 5-33 Resistência à compressão de concretos obtidos com os aditivos ADT2 e ADT3.

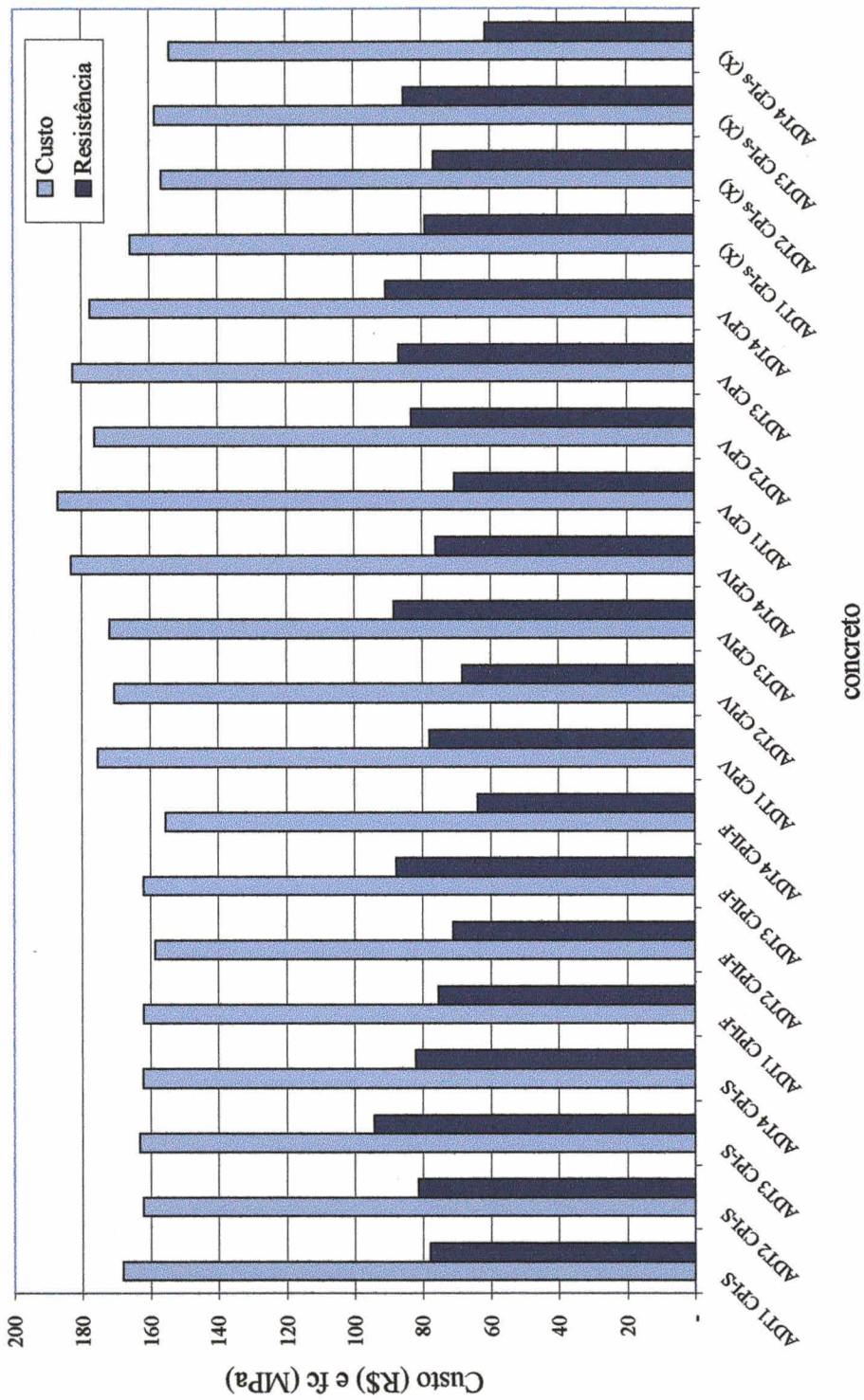


Figura 5-34 Comparação entre o custo do m³ de concreto produzido e a resistência à compressão obtida aos 28 dias.

5.3.5- Problemas de incompatibilidade cimento aditivo

As combinações de cimento aditivo apresentadas na Tabela 5-14 apresentaram problemas de incompatibilidade em misturas de concretos efetuadas.

Tabela 5-14 Combinações de cimento-aditivo que apresentaram problemas de incompatibilidade em concreto.

Cimento	Aditivo	Re/dosagem
CPIV (Y)	ADT1	redosagem
CPIV (Y)	ADT2	redosagem
CPI-S (X)	ADT4	redosagem

A Figura 5-35 mostra o estado dos corpos-de-prova que apresentaram problemas de incompatibilidade da dupla cimento-aditivo através da ocorrência de reações expansivas, levando ao pipocamento e fissuramento da matriz, à fragilização e ao lascamento das camadas exteriores e chegando até a completa desintegração do material, provando o colapso do corpo-de-prova.

A Figura 5-36 mostra o estado dos corpos-de-prova aos 28 dias confeccionado com cimento CPIV (Y) e o aditivo ADT1, sendo o primeiro com o teor de 0,5 + 2,0 % (P + SP %) de aditivo e o segundo com a redosagem de 1 % de aditivo superplastificante. Pode-se observar na figura que o primeiro corpo-de-prova apresentando em vários pontos na face lateral um pipocamento da massa de concreto, enquanto o segundo com um maior teor de aditivo apresentando pipocamento e lascamento do concreto na face lateral do corpo-de-prova. Isto mostra claramente a influência do teor de aditivo na reação expansiva causada no concreto.

Diante do problema evidenciado durante a pesquisa experimental, que não foi objeto de estudo inicial, sugere-se a necessidade de estudos aprofundados no sentido de verificar o aparecimento de efeitos secundários em concreto quando são adicionados novos teores de aditivos para recuperar a fluidez perdida com o tempo e da incompatibilidade cimento-aditivo. Como apresentado no capítulo 3, a redosagem é uma prática bastante comum junto aos consumidores de aditivos. Porém, somente existe uma recomendação de tomada de cautela contra a segregação quando são feitas duas ou três redosagem para manter a fluidez.



Figura 5-35 Estado final dos corpos-de-prova de concreto que apresentaram fissuração, lançamento e perda de massa

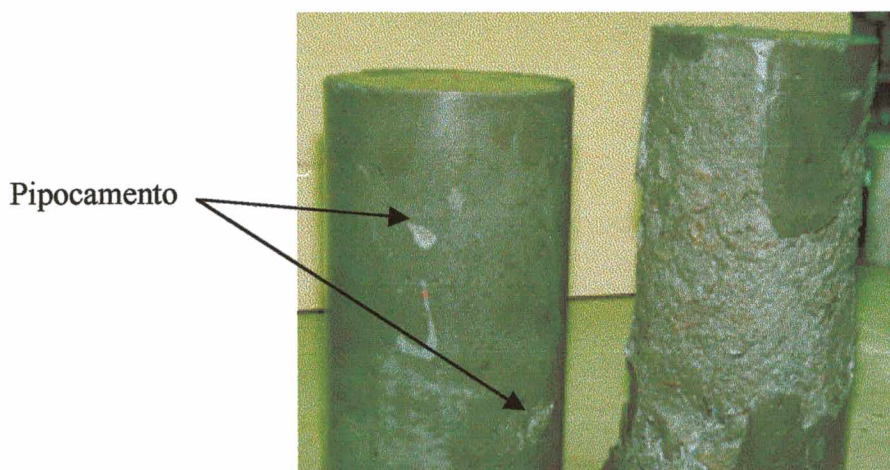


Figura 5-36 Estado final dos corpos-de-prova de concreto feito com o cimento CPIV (Y) e o aditivo ADT1 aos 28 dias.

5.4- Correlação entre os ensaios em pasta e em concreto

A seguir são comparados desempenhos dos aditivos em pasta e em concreto, para verificar a compatibilidade da dupla cimento-aditivo nos dois ensaios realizados neste trabalho experimental.

Para verificar a correlação entre os ensaios em pasta e em concreto, realizou-se uma análise dos dados obtidos para uma mesma relação água/materiais cimentantes de 0,30, que foi adotada para o concreto de alto desempenho. A Figura 5-37, Figura 5-38 e Figura 5-39 comparam área de espalhamento da pasta obtida pelo método de Kantro e o abatimento do tronco de cone em concreto. A avaliação foi feita para os cimentos CPI-S (Y) e CPII-F (Y) e CPV (Y) em função da melhor qualidade dos dados obtidos no abatimento inicial do concreto, ou seja, o valor do abatimento apresentou diferenças de valores entre os concretos aditivados e ainda valores em torno de 18 cm, que pode ser considerado o valor limite do ensaio para obter dados confiáveis.

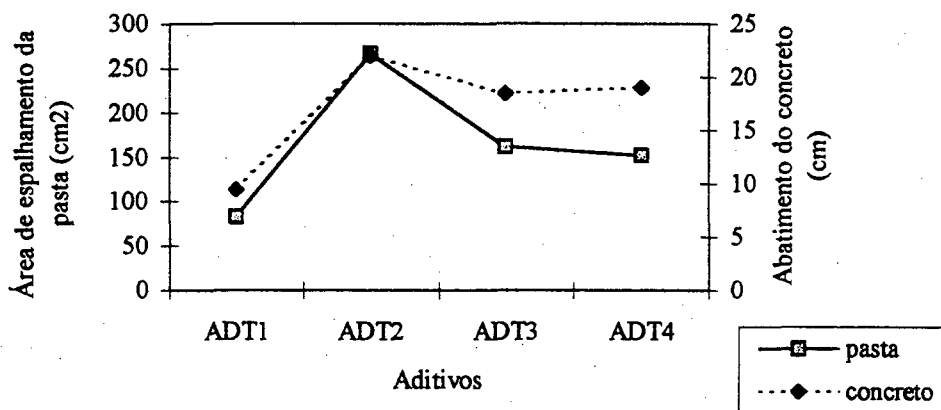


Figura 5-37 Comparação da compatibilidade dos aditivos em pasta e em concreto obtidos com o cimento CPI-S (Y).

Percebe-se claramente pela observação das figuras, que o concreto confeccionado com ADT4 apresentou valores ligeiramente superiores do abatimento do concreto quando comparado aos demais em relação à pasta. Isto pode ser influenciado pela incorporação da grande quantidade de ar incorporado, que foi observado visualmente. Este ar incorporado pelo aditivo ADT4 funciona como pequenos rolamentos no interior do concreto, fazendo com que o atrito estático entre as partículas seja diminuído e assim aumentando o abatimento tronco cone do concreto medido.

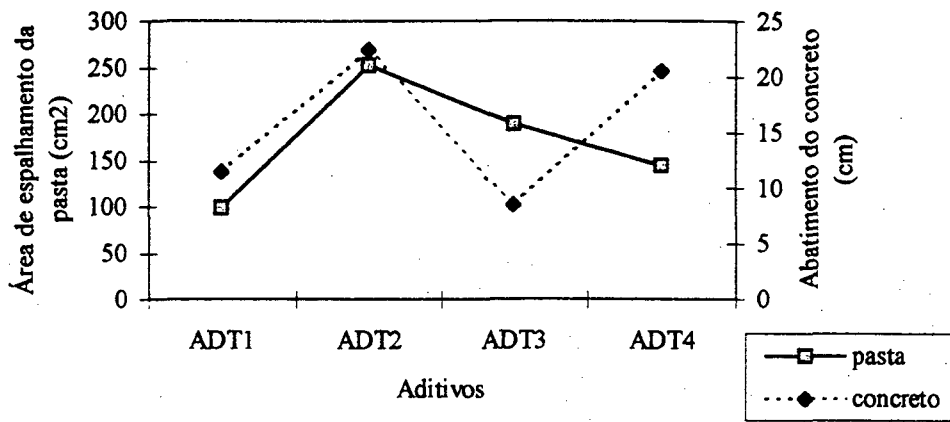


Figura 5-38 Comparação da compatibilidade dos aditivos em pasta e em concreto obtidos com o cimento CII-F (Y).

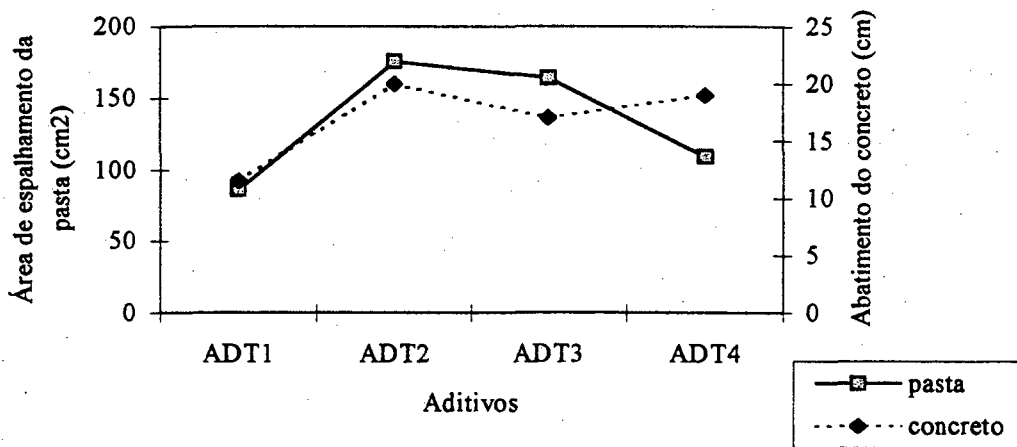


Figura 5-39 Comparação da compatibilidade dos aditivos em pasta e em concreto obtidos com o cimento CPV (Y).

Observa-se que em geral o efeito fluidificante (sensibilidade) na pasta é mais significativo do que no concreto, sendo esta consideração feita para avaliações realizadas após a mistura do material e em ensaios caracterizados como estáticos.

6-CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo estudar a compatibilidade da dupla cimento-aditivo, que é fundamental para obter as propriedades reológicas do concreto de alto desempenho.

As conclusões da pesquisa descritas a seguir, devem ser tomadas de forma indicativa, pois referem-se a resultados obtidos com materiais de qualidades específicas e com técnicas de execução descritas na pesquisa experimental. Os resultados devem ser confirmados com novas pesquisas interlaboratoriais que, através dos seus resultados, possam completar e confirmar os resultados obtidos neste trabalho experimental. Algumas sugestões para futuras pesquisas que venham a contribuir para um melhor entendimento da compatibilidade cimento aditivo, são apresentadas ao final.

6.1- Conclusões

Examinando os dados apresentados no capítulo 5, pode-se tirar algumas conclusões sobre a compatibilidade dos cimentos e aditivos utilizados, em função dos métodos propostos nesta pesquisa experimental.

6.1.1- Compatibilidade cimento-aditivo em pasta

Nesta etapa do trabalho experimental procurou-se avaliar o método de Kantro, para quantificar a compatibilidade entre os cimentos e aditivos utilizados, em função da rapidez do ensaio, exigir menos mão-de-obra e menor quantidade de material em relação ao ensaio de fluidez em concreto. Apresenta-se a seguir algumas considerações:

- Foi observada uma baixa variabilidade do método de Kantro, quando mantido constante todas as variáveis que influem no ensaio;
- Não foi observada influência significativa do operador no ensaio pelo método de Kantro;
- O método de Kantro pode ser adequado para verificar a demanda da água dos cimentos e observou-se pouca variação entre as marcas utilizadas;
- A influência da sílica ativa na fluidez em pasta pode ser analisada pelo método de Kantro, onde pode-se ressaltar uma perda de fluidez inicial em pastas elaboradas com e sem

aditivo redutor de água. Este fato está provavelmente associado a alta finura da sílica ativa que aumenta consideravelmente a demanda de água da mistura. Fica evidente a necessidade da adição de aditivos redutores de água para obter uma eficiente dispersão das partículas finas de sílica ativa e ajudar na homogeneidade da microestrutura da mistura;

- De forma geral, a adição retardada do aditivo em 03 minutos se constitui em um fator positivo no aumento da fluidez inicial da pasta e, conseqüentemente, reduz a quantidade de aditivo necessário para obter uma mesma fluidez. Este aspecto é devido possivelmente a menor adsorção de aditivo pela mistura (C₃A-gesso) pré-hidratada e o aditivo remanescente é capaz de promover com melhor eficiência os silicatos. Outra situação beneficiada pelo fato do aumento da fluidez inicial é o tempo de lançamento do concreto.

6.1.2- Compatibilidade cimento-aditivo em argamassa

Nesta etapa procurou-se avaliar em argamassa pelo ensaio de Flow-Table, a compatibilidade dos cimentos e aditivos utilizados, visando buscar ou adequar um ensaio alternativo que ainda exige menor quantidade de material, tempo e pessoal comparado ao ensaio de abatimento tronco de cone em concreto.

Em função dos dados obtidos com o método pode-se fazer as seguintes colocações:

- Os ensaios em Flow-Table não mostraram diferença significativa de fluidez para as diferentes combinações de cimento-aditivo analisadas, que tiveram um desempenho diferenciado em pasta; e
- O ADT4 apresentou maior incorporação de ar em relação aos demais, sendo este efeito indesejável influencia numa maior fluidez da argamassa, associado ao método Flow-Table ser um ensaio dinâmico.

6.1.3- Compatibilidade cimento-aditivo em concreto

Procurou-se nesta etapa do trabalho experimental validar os dados obtidos pelos outros métodos em relação à compatibilidade da dupla cimento-aditivo. Além disso, foi analisada a perda da fluidez ao longo do tempo, o teor de agregado incorporado, a resistência à compressão de corpos-de-prova aos 3, 7 e 28 dias e a ocorrência de efeitos secundários.

De forma geral, o ensaio em pasta deu uma indicação sobre o desempenho da compatibilidade da dupla cimento-aditivo em concreto, verificada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, de acordo com a hipótese admitida no capítulo 1. No entanto, o desempenho em concreto foi afetado pela incorporação de grande quantidade de ar.

Em relação aos tipos de cimentos observa-se, em relação ao teor de agregado incorporado, que o cimento CPI-S e CPII-F permitem a maior incorporação de agregado na mistura com a obtenção de altas resistências. De fato, esta análise permite verificar a influência do tipo de cimento na obtenção de CAD aditivados, onde a principal meta é obter alta durabilidade, alta resistência, misturas econômicas entre outros.

Em relação aos aditivos utilizados, os aditivos ADT2 e ADT3 de base química melamina mostraram um melhor desempenho com os cimentos utilizados, em ensaios de fluidez em pasta e em concreto. Além disso, apresentaram menores efeitos secundários de retardamento de pega e incorporação de ar. Outro aspecto considerado foi a perda de fluidez ao longo do tempo, que nos cimentos mais puros foi menor com o aditivo ADT3, enquanto que os concreto obtidos com cimentos contendo adições foi menor com o aditivo ADT1.

Os casos em que ocorreram reações expansivas dos corpos-de-prova foram em concretos que apresentaram grande retardamento de pega e hidratação inicial do cimento. Nestes casos pode-se afirmar que a dupla cimento-aditivo é incompatível para o teor de aditivo empregado. Este fato provavelmente está associado a grande quantidade de sulfato presente na mistura, que aumenta a quantidade de etringita formada e que é altamente expansiva. Outro fator que pode influenciar é o teor de aditivo adicionado na mistura. Recomenda-se cautela com a redosagem, quando se aumenta o teor de aditivo na mistura. No entanto, este assunto exige novos estudos para maiores considerações sobre o assunto.

Em função destes dados pode-se concluir que existem duplas de cimento-aditivo que apresentam melhor compatibilidade, permitindo obter dosagens otimizadas de concreto de alto desempenho. Isto justifica a necessidade de se adotar ensaios preliminares, que sejam rápidos e fáceis, para uma qualificação preliminar. No entanto, devem ser feitos ensaios preliminares com as melhores duplas obtidas, para verificar outros aspectos que não foram objeto de estudo da presente pesquisa, tais como: retardamento do tempo de pega e hidratação inicial do cimento, excessiva incorporação de ar e a ocorrência de reações expansivas.

6.2- Sugestões para futuras pesquisas

O autor a partir das observações realizadas ao longo da pesquisa, sugere uma lista de sugestões para que no futuro possam ser desenvolvidos novos trabalhos, conforme indica-se a seguir:

- Avaliar outros métodos de determinação da fluidez em concreto e em pasta;
- Avaliar possíveis variações nos tempos de início e final de pega das pasta e concretos aditivados;
- Avaliar um método que determine o teor ótimo de aditivo para um cimento;
- Avaliar o sulfato de cálcio adicionado ao cimento, sua forma e estrutura química;
- Avaliar um novo cimento específico para concreto de alto desempenho, com as suas características determinadas na produção para uma relação água/materiais cimentantes em torno de 0,30;
- Avaliar o teor de ar incorporados pelos aditivos; e
- Avaliar a perda de fluidez de pastas e concretos aditivados expostos a diferentes condições climáticas, preparados em betoneiras comuns e em caminhões.

7-ANEXOS

Anexo 1 - Variabilidade do ensaio

Ensaio de mini-abatimento - leitura dos raios e cálculo da área de espalhamento (cm²).

Amostra	Relação a/c	Área	Leitura R1	Leitura R2	Leitura R3	Leitura R4
1	0,33	22,902	2,6	2,7	2,9	2,6
	0,37	45,662	3,85	3,6	3,85	3,95
	0,41	72,004	5	4,55	4,8	4,8
	0,45	104,771	5,7	6,2	5,7	5,5
2	0,33	21,033	2,4	2,5	2,9	2,55
	0,37	44,177	3,65	3,8	3,85	3,7
	0,41	77,364	5,2	4,9	4,9	4,85
	0,45	97,640	5,7	5,9	5,3	5,4
3	0,33	24,410	2,75	2,9	2,9	2,6
	0,37	49,326	4,1	3,8	3,85	4,1
	0,41	75,813	4,6	5,15	5,2	4,7
	0,45	100,285	5,1	5,8	6,2	5,5
4	0,33	23,758	2,7	2,85	2,9	2,55
	0,37	46,868	3,9	3,75	3,9	3,9
	0,41	73,516	4,8	5,2	4,9	4,45
	0,45	107,510	5,3	5,65	6,55	5,9
5	0,33	24,629	2,5	3	3,1	2,6
	0,37	43,007	3,4	3,7	4	3,7
	0,41	75,813	4,6	4,95	5,1	5
	0,45	94,168	5,6	5,6	5,5	5,2
6	0,33	23,974	2,4	2,85	3,1	2,7
	0,37	53,779	4	4	4,6	3,95
	0,41	67,199	4,45	4,5	4,95	4,6
	0,45	92,456	5,5	5,4	5,3	5,5
7	0,33	23,758	2,5	2,5	3,1	2,9
	0,37	49,950	3,9	4,25	4,1	3,7
	0,41	77,754	5,1	4,85	4,85	5,1
	0,45	105,680	5,9	5,9	5,8	5,6

8	0,33	25,293	2,65	2,85	3,05	2,8
	0,37	45,363	3,9	3,6	4,1	3,6
	0,41	80,116	4,65	4,95	5,6	5
	0,45	101,174	5,75	5,5	5,8	5,65

Anexo 2 - Influência do operador

Ensaio de mini-abatimento - leitura dos raios e cálculo da área de espalhamento(cm²).

Amostra	Relação a/c	Área	Leitura R1	Leitura R2	Leitura R3	Leitura R4
1	0,33	23,974	2,9	2,6	2,65	2,9
	0,37	48,089	4	4,05	3,7	3,9
	0,41	72,004	4,45	4,75	5	4,95
	0,45	95,896	5,3	5,35	5,95	5,5
2	0,33	26,193	3	2,8	2,8	2,95
	0,37	57,413	4,4	4,15	4,25	4,3
	0,41	72,380	4,75	4,85	4,8	4,8
	0,45	102,067	5,5	6,2	5,65	5,45
3	0,33	23,758	2,6	2,8	2,9	2,7
	0,37	51,528	3,9	4	4,2	4,1
	0,41	72,758	4,7	4,65	5	4,9
	0,45	90,338	4,9	5	5,7	5,85
4	0,33	23,328	3	2,55	2,65	2,7
	0,37	47,172	3,75	3,9	3,95	3,9
	0,41	70,880	4,5	4,7	5	4,8
	0,45	97,640	5	6,2	5,65	5,45
5	0,33	24,629	2,9	2,7	2,75	2,85
	0,37	49,015	3,8	3,9	4,1	4
	0,41	71,254	4,8	4,75	4,9	4,6
	0,45	102,965	5,3	6	5,7	5,9
6	0,33	23,974	2,8	2,9	2,7	2,65
	0,37	48,397	3,5	4	4,05	4,15
	0,41	73,136	4,6	4,9	4,95	4,85
	0,45	105,225	5,55	5,7	5,9	6

Anexo 3 - Demanda da água do cimento fornecido pela empresa X.

Ensaio de mini-abatimento - leitura dos raios e cálculo da área de espalhamento (cm²).

Cimento	Relação a/c	Área	Leitura R1	Leitura R2	Leitura R3	Leitura R4
CPI-S	0,33	29,224	3,15	2,90	3,00	3,15
	0,37	40,150	3,70	3,70	3,45	3,45
	0,41	69,765	4,50	4,85	4,90	4,60
	0,45	100,285	5,30	5,40	5,90	6,00
CPII-F	0,33	26,420	2,90	2,70	2,85	3,15
	0,37	47,782	3,80	4,10	4,00	3,70
	0,41	73,516	4,50	5,05	5,15	4,65
	0,45	96,766	5,20	5,80	5,90	5,30
CPII-Z	0,33	19,634	2,95	2,25	2,15	2,65
	0,37	37,392	2,90	2,90	4,15	3,85
	0,41	53,131	4,30	3,90	4,05	4,20
	0,45	78,538	5,00	5,00	4,90	5,10
CPIV	0,37	18,095	2,30	2,60	2,50	2,20
	0,41	30,434	2,80	3,10	3,45	3,10
	0,45	43,007	3,50	3,80	3,85	3,65
	0,49	62,210	4,30	4,75	4,65	4,10
CPV	0,33	12,566	2,00	2,00	2,00	2,00
	0,37	24,192	2,50	2,70	3,10	2,80
	0,41	43,883	3,95	3,60	3,55	3,85
	0,45	62,560	4,10	4,50	4,80	4,45

Anexo 4 - Demanda da água do cimento fornecido pela empresa X.

Ensaio de mini-abatimento - leitura dos raios e cálculo da área de espalhamento (cm²).

Cimento	Relação a/c	Área	Leitura R1	Leitura R2	Leitura R3	Leitura R4
CPI-S	0,33	26,193	2,55	2,90	2,90	3,20
	0,37	45,065	4,00	4,30	3,60	3,25
	0,41	65,395	4,50	4,70	4,80	4,25
	0,45	87,414	5,60	4,90	5,20	5,40
CPII-F	0,33	23,328	3,90	2,40	2,10	2,50
	0,37	43,007	3,55	3,75	3,90	3,60
	0,41	69,027	4,20	5,00	5,10	4,45
	0,45	113,566	5,35	5,80	6,40	6,50
CPII-Z	0,33	20,029	2,45	2,55	2,45	2,65
	0,37	31,172	3,05	3,15	3,15	3,25
	0,41	51,211	3,85	4,10	4,20	4,00
	0,45	68,293	4,80	4,60	4,60	4,65
CPIV	0,37	20,228	2,50	2,45	2,55	2,65
	0,41	31,172	3,10	3,20	3,20	3,10
	0,45	48,397	4,00	3,55	4,05	4,10
	0,49	63,969	4,45	4,55	4,85	4,20
CPV	0,33	12,566	2,00	2,00	2,00	2,00
	0,37	25,741	2,60	2,60	3,05	3,20
	0,41	40,997	2,95	3,60	3,90	4,00
	0,45	59,104	4,05	4,30	4,60	4,40

Anexo 5 - Influência da adição de Silica Ativa na demanda da água.

Ensaio de mini-abatimento - leitura dos raios e cálculo da área de espalhamento (cm²).

Pasta	Rel. a/(c+s)	Área	Leitura R1	Leitura R2	Leitura R3	Leitura R4
CPI-S	0,33	18,66	2,20	2,50	2,70	2,35
	0,36	31,42	3,15	3,00	3,20	3,30
	0,39	61,51	4,00	4,70	4,40	4,60
CPI-S + ADT2	0,24	63,62	4,00	4,60	4,80	4,60
	0,27	197,30	7,60	8,00	8,00	8,10
	0,30	303,25	9,00	10,00	9,80	10,50
CPI-S + SA	0,39	16,26	2,30	2,00	2,40	2,40
	0,42	22,48	2,20	2,40	3,30	2,80
	0,45	31,92	2,80	3,20	3,75	3,00
CPI-S + SA+ADT2	0,24	18,47	2,00	2,50	2,80	2,40
	0,27	89,92	5,60	5,50	5,20	5,10
	0,30	160,60	7,20	7,10	7,30	7,00

Anexo 6 - Variação de teores de aditivo

Ensaio de mini-abatimento - leitura dos raios e cálculo da área de espalhamento (cm²).

Aditivo	Teor Aditivo	Relação a/c	Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4	Observação
ADT1		0,33	14,522	2,00	2,15	2,50	1,95	15,205	2,20	2,00	2,30	2,30	
	0,5	0,33	27,339	2,70	3,00	3,30	2,80	29,224	2,60	2,65	3,45	3,50	
	0,5 + 1	0,33	80,116	5,00	5,60	5,10	4,50	89,918	5,30	5,10	5,50	5,50	
	0,5 + 2	0,33	112,154	6,05	5,85	5,90	6,10	132,728	6,60	6,00	6,60	6,80	
ADT2	0,5 + 3	0,33	131,709	6,30	6,30	6,60	6,70	139,971	6,60	6,65	6,55	6,90	
	0,5	0,33	38,483	3,40	3,20	3,60	3,80	40,150	3,40	3,60	3,80	3,50	
	0,5 + 1	0,33	119,303	6,15	6,40	6,10	6,00	97,640	5,40	5,30	5,60	6,00	
	0,5 + 2	0,33	197,304	8,00	8,00	7,80	7,90	207,388	8,10	7,90	8,30	8,20	peq. Segregação
ADT3	0,5 + 3	0,33	220,347	8,25	8,75	8,40	8,10	215,767	8,15	8,40	8,45	8,15	alta segregação
	0,5	0,33	19,050	2,40	2,45	2,60	2,40	18,857	2,40	2,45	2,55	2,40	
	0,5 + 1	0,33	124,192	6,45	6,10	6,10	6,50	124,192	6,50	6,20	6,30	6,15	
	0,5 + 2	0,33	222,986	8,20	8,50	8,00	9,00	239,149	8,50	9,20	8,20	9,00	peq. Segregação
ADT4	0,5 + 3	0,33	218,378	8,25	8,00	8,50	8,60	219,033	8,00	8,20	8,80	8,40	peq. segregação
	0,5	0,33	36,316	3,10	3,50	3,80	3,20	36,852	3,30	3,20	3,80	3,40	
	0,5 + 1	0,33	127,673	6,10	6,50	6,60	6,30	132,218	6,40	6,70	6,40	6,45	
	0,5 + 2	0,33	173,776	7,30	7,10	7,55	7,80	184,450	7,70	8,00	7,50	7,45	bolhas grandes
	0,5 + 3	0,33	181,453	7,40	7,70	7,80	7,50	186,260	7,60	7,70	7,80	7,70	bolhas pequenas

Anexo 7 - Variabilidade da área de espalhamento em função do teor de aditivo

Ensaio de mini-abatimento - leitura dos raios e cálculo da área de espalhamento (cm²).

Aditivo	Teor Aditivo	Relação a/c	Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4	Observação
ADT1a		0,33	14,522	2,00	2,15	2,50	1,95	15,205	2,20	2,00	2,30	2,30	
	0,5	0,33	27,339	2,70	3,00	3,30	2,80	27,804	2,60	2,65	3,45	3,20	
	0,5 + 1	0,33	76,975	5,00	5,20	5,10	4,50	86,176	5,30	5,10	5,20	5,35	
	0,5 + 2	0,33	112,154	6,05	5,85	5,90	6,10	132,728	6,60	6,00	6,60	6,80	
ADT1b		0,33	131,709	6,30	6,30	6,60	6,70	139,971	6,60	6,65	6,55	6,90	
	0,5	0,33	13,042	1,90	2,00	2,05	2,20	14,691	2,10	2,20	2,10	2,25	
	0,5 + 1	0,33	89,079	5,40	5,60	5,20	5,10	85,765	5,40	5,30	5,00	5,20	
	0,5 + 2	0,33	119,303	5,90	6,20	6,30	6,25	121,247	6,05	6,10	6,30	6,40	
ADT1c		0,33	131,709	6,40	6,40	6,65	6,45	130,188	6,25	6,35	6,65	6,50	
	0,5	0,33	14,019	2,00	2,15	2,20	2,10	14,522	1,95	2,15	2,20	2,30	
	0,5 + 1	0,33	30,925	2,95	3,20	3,30	3,10	28,274	3,10	2,95	2,75	3,20	
	0,5 + 2	0,33	87,414	5,20	5,30	5,35	5,25	91,606	5,20	5,10	5,70	5,60	
	0,5 + 3	0,33	113,094	6,00	6,10	5,90	6,00	117,855	6,10	5,90	6,10	6,40	
	0,5 + 3	0,33	131,201	6,40	6,65	6,50	6,30	128,174	6,20	6,15	6,55	6,65	

Anexo 8 - Adição retardada do aditivo

Ensaio de mini-abatimento - leitura dos raios e cálculo da área de espalhamento (cm²).

Pasta	Tempo (min)	Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
CPIV-ADT3	-5,0	207,39	7,95	8,05	8,20	8,30	205,48	8,10	8,20	8,10	7,95
	0,0	212,52	8,20	8,10	8,40	8,20	215,12	8,20	8,10	8,50	8,30
	5,0	226,97	8,20	8,40	8,80	8,60	226,97	8,20	8,40	8,80	8,60
	10,0	226,97	8,20	8,00	9,00	8,80	231,00	8,80	8,90	8,20	8,40
	15,0	226,97	8,20	8,40	8,80	8,60	229,65	8,50	8,70	8,50	8,50
	30,0	220,35	8,50	8,00	8,40	8,60	239,15	8,40	8,50	9,00	9,00
	60,0	209,95	8,00	7,90	8,40	8,40	219,69	8,40	8,60	8,15	8,30
CPIV-ADT4	-5	127,17	6,70	6,35	6,10	6,30	134,26	6,40	6,60	6,70	6,45
	0,0	142,08	6,80	6,60	6,70	6,80	150,65	6,70	6,60	7,10	7,30
	5,0	130,69	6,50	6,30	6,50	6,50	136,84	6,50	6,70	6,70	6,50
	10,0	128,68	6,60	6,50	6,20	6,30	134,78	6,60	6,50	6,60	6,50
	15,0	120,76	6,15	6,30	6,20	6,15	131,71	6,60	6,70	6,30	6,30
	30,0	133,75	6,50	6,30	6,60	6,70	138,92	6,50	6,50	6,90	6,70
	60,0	128,17	6,60	6,50	6,20	6,25	134,78	6,60	6,30	6,40	6,90
CPI-S-ADT1	-5	79,32	5,00	5,00	5,00	5,10	86,59	5,30	5,20	5,30	5,20
	0,0	76,97	5,00	5,10	4,85	4,85	88,24	5,20	5,20	5,50	5,30
	5,0	58,76	4,40	4,50	4,20	4,20	69,03	4,50	4,70	4,80	4,75
	10,0	54,10	4,00	4,20	4,30	4,10	61,51	4,20	4,50	4,70	4,30
	15,0	51,53	3,90	4,00	4,20	4,10	55,42	4,30	4,20	4,00	4,30
	30,0	47,48	4,00	3,80	3,75	4,00	48,40	3,60	4,00	4,20	3,90
	60,0	60,47	4,60	4,50	4,25	4,20	56,74	4,00	4,10	4,60	4,30
CPII-Z ADT4	-5	207,39	8,00	8,30	8,20	8,00	198,55	7,90	8,00	8,00	7,90
	0,0	231,00	8,60	8,20	8,50	9,00	236,42	8,00	9,00	8,60	9,10
	5,0	225,64	9,50	7,50	8,50	8,40	206,11	8,00	8,50	7,90	8,00
	10,0	193,59	7,50	7,80	8,30	7,80	196,06	7,40	7,50	8,20	8,50
	15,0	194,82	7,90	8,00	7,50	8,10	199,80	7,80	8,20	8,10	7,80
	30,0	194,82	7,50	7,80	8,20	8,00	191,13	7,20	7,50	8,50	8,00
	60,0	157,25	6,70	7,00	7,60	7,00	162,86	6,80	6,90	7,70	7,40
CPII-Z ADT1	-5	143,13	6,60	6,70	6,90	6,80	139,45	6,65	6,90	6,70	6,40
	0,0	146,33	6,90	6,70	6,70	7,00	150,65	7,00	6,50	7,20	7,00
	5,0	141,02	6,80	6,70	6,70	6,60	150,65	6,80	6,70	7,00	7,20
	10,0	134,26	6,65	6,40	6,50	6,60	142,08	6,70	6,70	6,70	6,80
	15,0	124,19	6,00	6,10	6,60	6,45	134,78	6,30	6,20	6,90	6,80
	30,0	114,99	6,00	6,10	6,00	6,10	122,71	6,20	6,20	6,30	6,30
	60,0	112,15	5,90	6,00	6,00	6,00	117,86	6,00	6,00	6,20	6,30

Anexo 9 - Compatibilidade cimento-aditivo

Ensaio 1	Cimento CPL-S ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	20,029	2,4	2,6	2,5	2,6	28,274	3,1	3,1	2,9	2,9
	19,831	2,4	2,4	2,6	2,65	26,877	2,9	2,8	3	3		
	19,050	2,5	2,4	2,45	2,5	30,679	3	3	3,2	3,3		
0,30	57,749	4,2	4,4	4,1	4,45	80,116	4,8	5,2	5	5,2		
	61,861	4,4	4,3	4,6	4,45	93,310	5,3	5,5	5,5	5,5		
	61,861	3,9	4,3	4,85	4,7	82,513	5	5	5,2	5,3		
0,33	95,030	5,25	5,65	5,8	5,3	114,038	6	5,9	6	6,2		
	91,606	4,9	5,3	5,8	5,6	106,593	5,4	6,2	5,7	6		
	99,841	5,3	5,8	5,8	5,65	159,480	7	7,2	7,3	7		

Ensaio 2	Cimento CPL-S ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,255	155,587	6,8	6,9	7,3	7,15	158,363	7,1	7	7,1	7,2
	180,261	7,5	7,4	7,6	7,8	179,073	7,3	7,4	7,6	7,9		
	143,665	6,7	6,65	6,8	6,9	137,882	6,5	5,9	6,6	7,5		
0,27	187,471	7,7	7,8	7,7	7,7	186,260	7,6	7,8	7,7	7,7		
	189,906	7,7	7,5	7,9	8	186,865	7,5	7,8	8	7,55		
	194,822	7,7	7,8	7,8	8,2	194,822	7,7	7,8	8	8		
0,30	248,838	8,9	8,5	8,7	9,5	248,838	9	8,8	8,6	9,2		
	258,720	8	9,5	9,4	9,4	263,014	8,8	8,6	9,6	9,6		
	268,795	9	9	9,6	9,4	271,708	8,8	9,3	9,6	9,5		

Ensaio 3	Cimento CPL-S ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	165,695	7,1	7,15	7,2	7,6	165,125	7,1	7	7,3	7,6
	155,035	6,8	6,9	7	7,4	155,587	6,75	6,9	7,25	7,25		
	175,533	7,4	7,6	7,4	7,5	180,857	7,65	7,3	7,5	7,9		
0,30	183,248	7,35	7,6	7,8	7,8	191,129	7,6	7,4	7,8	8,4		
	194,204	7,85	7,6	7,8	8,2	194,822	7,7	7,9	7,9	8		
	198,551	8,1	7,8	7,9	8	201,056	7,7	7,8	8,4	8,1		
0,33	197,304	7,7	8,4	8,2	7,4	213,818	8,1	7,6	8,5	8,8		
	211,234	8,4	8,1	8	8,3	223,648	8,7	8,3	8,35	8,4		
	265,897	8,6	9,2	9,3	9,7	250,238	9,4	8,5	9,2	8,6		

Ensaio 4	Cimento CPI-S ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	60,474	4,8	4,5	4,15	4,1	62,210	4,3	4,5	4,6	4,4
59,787	4,3		4,3	4,6	4,25	63,262	4,5	4,3	4,6	4,55		
63,262	4,45		4,4	4,5	4,6	65,754	4,4	4,5	4,6	4,8		
0,30	128,676	6,3	6,2	6,3	6,8	134,778	6,5	6,5	6,65	6,55		
	139,971	6,6	6,6	6,7	6,8	146,333	7	6,65	6,65	7		
	157,250	7,1	7	7,3	6,9	169,712	7,4	7,4	7	7,6		
0,33	177,889	7,6	7,9	7,6	7	196,061	8	8	7,8	7,8		
	183,848	7,9	7,6	7,4	7,7	192,356	7,7	8,2	7,9	7,5		
	183,248	7,4	7,45	7,8	7,9	187,471	7,7	7,8	7,7	7,7		

Ensaio 5	Cimento CPI-Z ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	16,619	2,3	2,4	2,2	2,3	25,293	2,6	3,4	2,7	2,65
40,714	3,6		3,6	3,6	3,6	56,078	4,3	4,2	4,4	4		
17,534	2,25		2,3	2,5	2,4	27,804	3,2	2,6	2,7	3,4		
0,30	66,474	4,5	4,9	4,8	4,2	83,320	5,15	5,15	5,2	5,1		
	73,516	4,45	4,7	5,2	5	102,515	5,6	5,4	5,9	5,95		
	90,760	5,1	5,3	5,7	5,4	107,510	5,8	5,8	5,8	6		
0,33	115,462	5,85	5,8	6,5	6,1	143,135	6,4	6,8	7	6,8		
	113,566	4,6	6,15	7,6	5,7	144,729	6,5	6,9	7	6,75		
	117,375	5,85	5,7	6,5	6,4	144,197	6,9	6,8	6,9	6,5		

Ensaio 6	Cimento CPI-Z ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	13,364	1,9	2,1	2,1	2,15	15,552	1,1	2,3	3,3	2,2
13,690	2,1		2,2	2	2,05	15,205	1,95	2,25	2,3	2,3		
15,205	1,95		2,35	2,5	2	25,966	2,3	2,6	3,5	3,1		
0,27	36,316	2,95	3	3,85	3,8	64,680	4	4,4	5,2	4,55		
	61,861	4,1	4,5	4,8	4,35	79,720	4,2	4,9	5,85	5,2		
	62,210	4,2	4,5	4,7	4,4	66,474	4,5	4,6	4,5	4,8		
0,30	88,245	5,1	5,3	5,6	5,2	109,356	5,7	5,9	6,1	5,9		
	120,759	6,25	6	6,2	6,35	134,778	6,2	6,3	6,9	6,8		
	92,883	5,1	5,35	5,9	5,4	115,939	5,5	5,8	6,8	6,2		

Ensaio 7	Cimento CPII-Z ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	130,188	6,65	6,1	6,4	6,6	132,728	6	6,2	7	6,8
132,728	6,2		6,3	6,9	6,6	128,174	5,9	5,9	7	6,75		
99,399	5,5		5,7	5,8	5,5	99,399	5,3	5,5	6	5,7		
0,27	176,709	6,9	7,4	8	7,7	172,029	7,2	7,5	7,3	7,6		
	177,889	7,2	7,3	7,9	7,7	172,029	7,1	7,2	7,6	7,7		
	174,947	7,6	7,2	7,5	7,55	177,889	7,1	7	8	8		
0,30	186,260	7,55	7,6	7,9	7,75	191,742	8,1	7,6	7,7	7,85		
	166,838	7,15	7,3	7,4	7,3	179,073	7,4	7,6	7,8	7,4		
	181,453	7,3	7,4	7,9	7,8	196,061	7,7	7,5	8,1	8,3		

Ensaio 8	Cimento CPII-Z ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	18,284	2,35	2,4	2,5	2,4	18,857	2,45	2,4	2,5	2,45
34,471	3,35		3,2	3,3	3,4	33,952	3,35	3,4	3	3,4		
26,193	2,95		2,4	2,9	3,3	28,274	3,1	3	3,3	2,6		
0,27	71,628	4,6	5	4,7	4,8	77,364	5,1	4,65	5,1	5		
	119,787	6,2	5,9	6,3	6,3	129,683	6,2	6,1	6,4	7		
	101,174	5,6	5,4	5,9	5,8	111,217	5,9	5,8	6	6,1		
0,30	172,610	7,4	7,3	7,35	7,6	183,848	7,7	7,4	7,5	8		
	144,197	6,4	6,7	7,1	6,9	155,035	7	6,7	7	7,4		
	155,035	6,8	6,9	7,1	7,3	160,601	7,1	6,9	7,3	7,3		

Ensaio 9	Cimento CPII-F ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	15,205	2	2,2	2,4	2,2	16,081	2,15	2,2	2,35	2,35
15,378	2,25		2,2	2,3	2,1	20,228	2,35	2,4	3,05	2,35		
15,378	2,3		2,2	2,15	2,2	19,244	2,4	2,5	2,6	2,4		
0,30	47,172	3,6	3,6	4,4	3,9	75,427	5,1	5	4,7	4,8		
	46,263	3,6	3,75	4,2	3,8	83,725	4,85	4,5	5,8	5,5		
	59,104	4,1	3,9	4,8	4,55	79,325	5,4	4,9	4,9	4,9		
0,33	67,199	4,3	4,5	5	4,7	99,399	5,2	5,6	6	5,7		
	129,683	5,8	6,1	7	6,8	160,601	6,9	7,1	7,6	7		
	119,303	5,7	6,15	6,5	6,3	150,653	6,6	7,5	7,1	6,5		

Ensaio 10	Cimento CPII-F ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	123,699	6	6,3	6,4	6,4	117,375	5,6	6,15	6,5	6,2
75,427	4,5		4,3	5,8	5	74,660	4,7	5	4,8	5		
128,676	6,2		6,6	6,7	6,1	117,855	5,3	6	6,9	6,3		
0,30	180,261	7,3	7,9	7,8	7,3	175,533	7,1	7,6	7,9	7,3		
	191,129	7,5	7,6	8,1	8	197,304	7,8	7,6	8,3	8		
	183,248	7,35	7,5	8	7,7	174,947	7,35	7,5	7,5	7,5		
0,33	207,388	7,8	8,1	8,4	8,2	209,948	8	8	8,4	8,3		
	212,524	7,9	7,9	8,6	8,5	204,843	7,8	7,8	8,4	8,3		
	207,388	8	7,8	8,2	8,5	215,116	7,8	7,9	8,4	9		

Ensaio 11	Cimento CPII-F ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	115,462	5,65	6	6,7	5,9	117,855	5,65	6,15	6,7	6
99,841	5,2		5,65	6,1	5,6	107,510	5,5	5,2	6,25	6,45		
114,987	5,6		6,2	6,4	6	116,417	6	5,8	6,2	6,35		
0,27	175,533	7,1	7,4	7,8	7,6	179,073	7,4	7,4	7,5	7,9		
	176,121	7	7,5	8	7,45	175,533	7,2	7	7,8	7,9		
	177,889	7,3	7,4	8	7,4	186,260	7,5	7,3	7,9	8,1		
0,30	201,056	7,6	8	8,4	8	209,948	8,2	8	8,3	8,2		
	217,724	8	8,2	8,6	8,5	216,418	8	8,2	8,5	8,5		
	208,666	7,7	8	8,4	8,5	212,524	8,1	8	8,4	8,4		

Ensaio 12	Cimento CPII-F ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	71,254	4,6	4,8	5	4,65	77,754	4,6	4,5	5,4	5,4
45,962	3,8		3,7	4	3,8	58,086	4,15	4	4,65	4,4		
49,015	3,85		3,9	4,45	3,6	55,746	3,8	4,25	4,45	4,35		
0,30	146,333	6,55	6,8	7,1	6,85	157,250	6,9	6,95	7,45	7		
	165,125	7,1	7,1	7,5	7,3	173,776	7,25	7	7,7	7,8		
	147,407	6,4	6,4	7,4	7,2	157,806	6,45	6,8	7,8	7,3		
0,33	212,524	7,9	8	8,5	8,5	219,033	8,2	8,5	8,5	8,2		
	194,204	7,4	7,65	8,4	8	206,114	7,5	8	8,3	8,6		
	230,996	8,3	8,2	8,8	9	239,149	9	8,7	8,5	8,7		

Ensaio 13	Cimento CPV ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	15,033	2,2	2,1	2,2	2,25	16,619	2,25	2,2	2,4	2,35
15,904	2,15		2,3	2,3	2,25	16,438	2,3	2,15	2,3	2,4		
16,438	2		2,4	2,6	2,15	17,534	2,3	2,4	2,4	2,35		
0,30	36,316	3	3	3,8	3,8	50,894	4	4	4	4,1		
	48,089	3,75	3,65	4,2	4,05	62,911	4,3	4,5	4,7	4,4		
	38,483	3,2	3,6	3,5	3,7	58,086	4,5	4,5	4	4,2		
0,33	72,380	4,5	5,2	5	4,5	95,030	5,1	5,4	5,8	5,7		
	91,183	5,1	5,4	5,65	5,4	113,094	5,9	6	6,2	5,9		
	75,427	4,8	5	5	4,8	102,067	5,1	5,4	6,2	6,1		

Ensaio 14	Cimento CPV ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	99,399	5,6	5,2	6,2	5,5	59,445	4,2	4,1	4,5	4,6
160,601	7		7,2	7,4	7	135,293	5,9	6,6	7,4	6,35		
151,742	6,5		7,2	7,4	6,7	119,787	5,5	6,2	7	6		
0,27	206,114	7,8	7,9	8,4	8,3	189,906	7,4	7,8	8,2	7,7		
	215,116	8	8,2	8,6	8,3	207,388	7,6	8,4	8,5	8		
	235,055	8,4	8,5	8,7	9	237,780	8,7	8,5	8,6	9		
0,30	286,513	9	9,5	10,2	9,5	286,513	9,4	9,5	9,8	9,5		
	282,030	9,5	9,2	9,8	9,4	288,015	9,7	9,3	9,3	10		
	271,708	8,9	9	9,8	9,5	271,708	8,9	9,4	9,6	9,3		

Ensaio 15	Cimento CPV ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	22,902	2,6	3	2,7	2,5	20,228	2,1	2,6	3	2,45
19,050	2,35		2,3	2,8	2,4	15,205	2	2,4	2,4	2		
23,974	2,85		2,3	3,2	2,7	22,061	2,2	3	3,1	2,3		
0,27	132,728	6,3	6,4	6,7	6,6	118,819	6	6	6,4	6,2		
	132,728	6,3	6	7,1	6,6	123,699	6,5	6	6,6	6		
	123,699	5,9	6,1	6,8	6,3	114,987	5,6	5,7	6,6	6,3		
0,30	181,453	7,2	7,3	7,8	8,1	169,712	6,9	7	7,8	7,7		
	160,601	6,8	7,1	7,4	7,3	158,363	6,75	7,2	7,3	7,15		
	168,559	7	7,2	7,8	7,3	168,559	6,7	7	8,1	7,5		

Ensaio 16	Cimento CPV ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	17,165	2,15	2,4	2,5	2,3	16,438	2,4	2,2	2,2	2,35
15,378	1,9		2,3	2,5	2,15	18,474	2	2,1	2,8	2,8		
16,081	1,9		2,35	2,6	2,2	14,861	2,4	2,2	2,1	2		
0,27	26,193	2,8	2,9	3,2	2,65	28,747	2,5	3,1	3,65	2,85		
	23,974	2,3	2,8	3,4	2,55	31,668	2,55	2,9	3,9	3,35		
	25,293	2,4	2,7	3,4	2,85	32,927	2,75	2,95	3,9	3,35		
0,30	72,380	4,6	4,7	5	4,9	76,975	4,5	4,9	5,1	5,3		
	108,431	5,7	6	5,9	5,9	114,987	5,9	6	6,2	6,1		
	95,030	5,2	5,3	5,8	5,7	107,510	5,2	5,7	6,5	6		

Ensaio 17	Cimento CPIV ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,30	15,552	2,2	2,3	2,2	2,2	19,244	2,1	3	2,7	2,1
16,619	2,25		2,4	2,3	2,25	23,974	2,45	2,7	3,6	2,3		
16,081	2,25		2,1	2,3	2,4	20,830	2,5	2,6	2,7	2,5		
0,33	62,560	4,25	4,2	4,8	4,6	106,593	5,5	6	6,1	5,7		
	86,588	5,2	4,8	5,5	5,5	109,356	5,5	5,7	6,3	6,1		
	75,427	4,5	5	5,3	4,8	99,399	5,4	5,7	5,9	5,5		
0,36	170,289	6,9	7,05	7,7	7,8	186,865	6,9	7,45	8,5	8		
	130,694	6,4	6,5	6,5	6,4	157,250	6,6	7,1	7,6	7		
	133,239	6	6,65	7	6,4	153,934	6,5	7,1	7,4	7		

Ensaio 18	Cimento CPIV ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	120,759	5,9	6,4	6,5	6	104,771	5	5,7	6,6	5,8
134,778	6,1		6,2	7,2	6,7	114,987	5,8	5,9	6,3	6,2		
101,174	5,4		5,6	5,9	5,8	85,765	4,5	5,2	6	5,2		
0,30	168,559	6,8	7,3	7,9	7,3	175,533	7,3	7,3	7,7	7,6		
	187,471	7,45	7,75	8	7,7	188,078	7,35	7,7	8,1	7,8		
	179,667	7,3	7,65	7,9	7,4	179,667	7,1	7,25	8,1	7,8		
0,33	280,544	8,2	9,5	10,1	10	255,877	8,3	9	9,7	9,1		
	282,030	8,7	10,2	9,6	9,4	258,008	8,9	8,8	9,3	9,25		
	274,638	8,4	10,1	9,6	9,3	247,442	8,4	9,1	9	9		

Ensaio 19	Cimento CPIV ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	132,728	6,4	6,45	6,4	6,75	133,239	6,5	6,6	6,25	6,7
124,192	5,9		6,5	6,4	6,35	125,181	6,1	6,1	6,6	6,45		
127,172	6		6,25	6,75	6,45	128,174	5,9	6,5	6,8	6,35		
0,30	175,533	7,4	7,2	7,5	7,8	178,481	7,2	7,4	7,9	7,65		
	162,290	6,9	7,35	7,5	7	160,601	6,8	7	7,5	7,3		
	169,712	7	7	7,7	7,7	160,601	6,5	7	7,7	7,4		
0,33	204,843	7,6	7,7	8,5	8,5	207,388	7,5	8,3	8,7	8		
	212,524	7,6	8,1	9	8,2	221,664	7,8	7,8	9	9		
	212,524	7,8	8,2	8,5	8,4	217,724	8,2	8,1	8,6	8,4		

Ensaio 20	Cimento CPIV ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	20,830	2,5	2,4	3,1	2,3	22,479	2,6	2,5	3,2	2,4
17,720	2,5		2,4	2,4	2,2	20,029	2,4	2,4	2,6	2,7		
18,095	2,2		2,7	2,6	2,1	20,830	2,5	2,4	2,7	2,7		
0,30	82,111	4,9	4,6	5,5	5,45	87,829	5,15	5,1	5,7	5,2		
	55,416	4	4,3	4,5	4	59,787	4	4,3	4,5	4,65		
	57,413	4,4	4,5	4,2	4	63,615	4,1	4,55	4,75	4,6		
0,33	164,556	7,2	7,1	7,7	6,95	166,266	6,9	7,3	7,5	7,4		
	157,806	7,1	6,8	7,4	7,05	157,250	6,5	7,1	7,5	7,2		
	143,135	6,5	6,7	7	6,8	152,289	6,65	6,65	7,3	7,25		

Ensaio 21	Cimento CPL-S ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	18,665	2,35	2,3	2,6	2,5	20,228	2,6	2,35	2,5	2,7
17,165	2,35		2,4	2,3	2,3	22,061	2,4	2,6	2,8	2,8		
19,439	2,5		2,7	2,5	2,25	29,705	2,6	2,9	3,6	3,2		
0,30	62,911	4,2	4,4	5	4,3	73,136	4,6	4,5	4,8	5,4		
	65,395	4,25	4,3	4,9	4,8	90,760	5	5,4	5,6	5,5		
	94,168	5,5	5,2	5,7	5,5	108,431	5,5	5,8	6,3	5,9		
0,33	127,673	6	6,1	6,4	7	148,485	6,2	6,6	7,5	7,2		
	107,051	5,65	5,7	6,1	5,9	125,181	5,9	6,3	6,8	6,25		
	144,197	6,8	6,8	6,8	6,7	169,712	6,9	7	8	7,5		

Ensaio 22	Cimento CPI-S ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	120,759	5,9	6,4	6,5	6	104,771	5	5,7	6,6	5,8
134,778	6,1		6,2	7,2	6,7	114,987	5,8	5,9	6,3	6,2		
101,174	5,4		5,6	5,9	5,8	85,765	4,5	5,2	6	5,2		
0,27	168,559	6,8	7,3	7,9	7,3	175,533	7,3	7,3	7,7	7,6		
	187,471	7,45	7,75	8	7,7	187,471	7,3	7,7	8,1	7,8		
	179,667	7,3	7,65	7,9	7,4	179,667	7,1	7,25	8,1	7,8		
0,30	280,544	8,2	9,5	10,1	10	255,877	8,3	9	9,7	9,1		
	282,030	8,7	10,2	9,6	9,4	258,008	8,9	8,8	9,3	9,25		
	274,638	8,4	10,1	9,6	9,3	247,442	8,4	9,1	9	9		

Ensaio 23	Cimento CPI-S ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	114,987	5,75	5,9	6,3	6,25	114,987	5,55	6,1	6,75	5,8
118,819	5,85		6,05	6,45	6,25	111,217	5,5	6	6,1	6,2		
123,206	6,1		6,3	6,4	6,25	112,623	5,5	6	6,6	5,85		
0,30	158,363	7	7,7	7,7	6	172,029	6,8	7,2	7,9	7,7		
	160,601	6,9	7	7,4	7,3	163,421	6,75	7	7,7	7,4		
	159,480	6,8	7,1	7,65	6,95	157,250	6,9	7	7,3	7,1		
0,33	188,078	7,4	7,9	8	7,65	194,822	7,5	7,8	8,2	8		
	194,822	7,8	7,8	8	7,9	199,801	7,2	8	8,6	8,1		
	195,441	7,6	7,9	8,1	7,95	207,388	7,65	8	8,7	8,15		

Ensaio 24	Cimento CPI-S ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	23,114	2,85	2,7	2,8	2,5	25,071	2,6	2,5	3,1	3,1
22,061	2,55		2,75	2,9	2,4	24,410	2,4	2,65	3,2	2,9		
22,270	2,4		2,9	3,1	2,25	25,293	2,5	2,8	3,3	2,75		
0,27	86,176	5	5,15	5,6	5,2	89,918	5,2	5,1	5,6	5,5		
	73,896	5	4,8	5	4,6	78,931	5	5,1	5,2	4,75		
	75,427	4,7	4,8	5,2	4,9	83,320	5,1	5,2	5,0	5,3		
0,30	139,448	6,45	6,65	6,9	6,65	150,653	6,8	6,8	7,1	7		
	145,263	6,6	6,6	7	7	151,197	6,75	6,8	7,4	6,8		
	162,290	6,75	7,1	7,3	7,6	161,726	6,9	7,4	7,4	7		

Ensaio 25	Cimento CPII-Z ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	34,211	2,8	3,2	3,5	3,7	33,695	3,1	3,7	3,5	2,8
48,397	3,8		3,6	4,5	3,8	65,037	4,3	4,7	4,7	4,5		
38,483	3,3		2,8	4,1	3,8	35,784	3,4	3,3	3,4	3,4		
0,30	84,131	5	5,1	5,4	5,2	106,593	5,4	5,6	6,4	5,9		
	84,131	5	5	5,5	5,2	115,939	5,8	5,9	6,4	6,2		
	87,414	5	5,6	5,6	4,9	114,038	5,7	6	6,5	5,9		
0,33	140,496	6,35	6,9	7	6,5	161,726	6,8	7,3	7,4	7,2		
	122,715	6,3	6	6,3	6,4	150,653	6,5	6,8	7,5	6,9		
	149,567	6,8	6,8	7,3	6,7	162,855	6,8	7	7,7	7,3		

Ensaio 26	Cimento CPII-Z ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	56,078	4,2	4,2	4,5	4	41,281	3,2	3,7	4,2	3,4
85,765	5,3		4,9	5,5	5,2	86,176	4,8	5	5,5	5,65		
74,660	4,9		4,8	4,8	5	58,086	4	4,3	4,4	4,5		
0,27	146,333	6,8	6,6	6,9	7	146,333	6,7	6,6	7,2	6,8		
	163,421	7,1	7,1	7,4	7,25	166,266	6,8	6,8	7,8	7,7		
	160,601	6,9	6,9	7,5	7,3	165,695	6,75	6,8	7,8	7,7		
0,30	251,642	8,5	8,8	9,1	9,4	260,148	8,8	9,1	9,3	9,2		
	257,297	9,1	9,2	9,3	8,6	276,108	8,9	9	9,6	10		
	239,149	8,6	8,4	9,1	8,8	232,345	8,1	8,2	9	9,1		

Ensaio 27	Cimento CPII-Z ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	112,154	5,7	5,9	6,2	6,1	99,841	5,35	5,5	6,2	5,5
114,038	5,9		5,9	6,3	6	110,284	5,4	5,9	6,5	5,9		
118,819	6,1		6	6,3	6,2	107,970	5,7	5,75	6	6		
0,27	150,109	6,6	6,9	7,15	7	157,250	6,7	6,8	7,5	7,3		
	151,197	6,65	6,9	7,3	6,9	157,250	6,8	7,1	7,4	7		
	159,480	6,8	7,2	7,5	7	168,559	7	6,9	7,7	7,7		
0,30	189,906	7,7	7,6	8,1	7,7	193,587	7,6	7,6	8,2	8		
	190,517	7,4	7,85	8,1	7,8	198,551	7,6	7,8	8,3	8,1		
	176,709	7,3	7,5	7,6	7,6	187,471	7,4	7,5	8,1	7,9		

Ensaio 28	Cimento CPII-Z ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,24	18,095	2,4	2,4	2,45	2,35	20,428	2,4	2,6	2,8	2,4
19,634	2,5		2,4	2,5	2,6	20,029	2,55	2,8	2,55	2,2		
19,831	2,45		2,6	2,7	2,3	19,831	2,4	2,5	2,65	2,5		
0,27	62,210	4,4	4,4	4,6	4,4	64,324	4,1	4,7	5	4,3		
	58,764	4	4,1	4,8	4,4	61,861	4,5	4,4	4,4	4,45		
	67,562	4,2	4,5	5,2	4,65	70,136	4,5	4,6	5,1	4,7		
0,30	123,206	6,1	5,9	6,6	6,45	125,181	5,8	6,4	6,8	6,25		
	156,140	6,7	7,1	7,4	7	163,988	7,1	7,2	7,5	7,1		
	144,729	6,65	6,4	7	7,1	153,934	6,7	7	7,3	7		

Ensaio 29	Cimento CPII-F ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,30	41,566	3,1	3,95	4,3	3,2	40,714	3,25	3,7	3,9	3,55
45,363	3,3		3,9	4,3	3,7	42,140	3,4	3,7	4	3,55		
37,392	2,9		3,4	4	3,5	26,193	4,1	2,4	2,7	2,35		
0,33	86,588	4,9	5,2	5,65	5,25	86,588	4,9	5,35	5,7	5,05		
	85,355	5	5,2	5,65	5	74,660	4,6	5,2	5	4,7		
	86,588	5,25	5,2	5,2	5,35	79,325	4,9	5,1	5,4	4,7		
0,36	135,809	6,45	6,25	6,8	6,8	123,699	6,3	6,1	6,3	6,4		
	135,293	6,4	6,45	6,8	6,6	127,673	6,2	6,5	6,7	6,1		
	128,676	6,3	6,4	6,7	6,2	126,673	6,4	6,3	6,2	6,5		

Ensaio 30	Cimento CPII-F ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,30	17,907	2,3	2,35	2,5	2,4	16,259	2,3	2,15	2,25	2,4
16,438	2,3		2,35	2,3	2,2	15,205	2,25	2	2	2,55		
16,081	2,2		2,25	2,4	2,2	15,904	2,1	2,1	2,4	2,4		
0,33	22,690	2,5	2,6	3	2,65	16,081	2,3	2,25	2,3	2,2		
	47,782	3,8	4,1	4,1	3,6	20,228	2,4	2,45	2,8	2,5		
	37,392	3,5	3,5	3,4	3,4	19,831	2,4	2,35	2,7	2,6		
0,36	95,463	5,1	5,55	6	5,4	32,169	2,8	3,1	3,9	3		
	81,710	5	5,1	5,3	5	48,089	3,8	3,9	4,15	3,8		
	89,079	5,2	5,3	5,6	5,2	43,590	3,5	3,6	3,9	3,9		

Ensaio 31	Cimento CPII-F ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	18,474	2,4	2,2	2,4	2,7	16,438	2,15	2,3	2,5	2,2
16,982	2,2		2,3	2,5	2,3	14,691	2,1	2	2,2	2,35		
17,349	2,3		2,3	2,45	2,35	15,552	2,3	2	2,3	2,3		
0,30	47,172	3,6	3,7	4,2	4	17,720	2,4	2,2	2,4	2,5		
	52,809	4,4	3,8	3,9	4,3	21,647	2,5	2,6	2,9	2,5		
	52,167	4,1	4	4,1	4,1	22,061	2,5	2,6	2,9	2,6		
0,33	67,199	4,4	4,4	4,8	4,9	52,487	3,9	3,9	4,25	4,3		
	102,067	5,55	5,8	5,9	5,55	88,245	5	5	5,8	5,4		
	78,538	5	5	5	5	78,538	5	5	5	5		

Ensaio 32	Cimento CPII-F ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	26,877	2,7	2,75	3,05	3,2	30,190	2,8	3,1	3,5	3
22,479	2,3		2,8	3,1	2,5	26,648	2,65	2,9	3,3	2,8		
23,974	2,5		2,8	3	2,75	29,224	2,9	3,1	3,2	3		
0,30	75,427	4,7	4,8	5	5,1	75,043	4,6	4,8	5,4	4,75		
	95,896	5,3	5,5	5,9	5,4	100,285	5,2	5,4	6	6		
	79,325	4,7	5,2	5,3	4,9	81,310	4,9	4,9	5,35	5,2		
0,33	212,524	7,9	8	8,5	8,5	219,033	8,2	8,5	8,5	8,2		
	194,204	7,4	7,65	8,4	8	206,114	7,5	8	8,3	8,6		
	230,996	8,3	8,2	8,8	9	239,149	9	8,7	8,5	8,7		

Ensaio 33	Cimento CPV ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,30	32,927	3	3,4	3,25	3,3	17,165	2,15	2,3	2,4	2,5
32,169	2,9		3,6	3,7	2,6	40,714	3,6	3,8	3,6	3,4		
32,169	2,9		3,6	3,7	2,6	40,714	3,6	3,8	3,6	3,4		
0,33	82,111	4,85	5,15	5,25	5,2	93,310	5,3	5,4	5,5	5,6		
	90,338	5,1	5,2	5,65	5,5	100,285	5,5	5,5	5,8	5,8		
	64,324	4,4	4,45	4,75	4,5	85,355	5	5,4	5,25	5,2		
0,36	136,844	6,6	6,7	6,5	6,6	155,587	7,25	7,2	6,8	6,9		
	158,363	6,9	7	7,3	7,2	171,448	7,3	7,2	7,45	7,6		
	134,778	6,3	5,9	7	7	158,921	7	6,8	7,3	7,35		

Ensaio 34	Cimento CPV ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	32,927	3	3,4	3,25	3,3	17,165	2,15	2,3	2,4	2,5
90,338	5		5,1	5,65	5,7	17,907	2,3	2,25	2,5	2,5		
67,927	4,3		4,7	5	4,6	19,831	2,2	2,4	2,75	2,7		
0,30	137,882	6,4	6,6	6,9	6,6	102,965	5,5	5,4	6,1	5,9		
	137,882	6,5	6,6	6,9	6,5	100,285	5,5	5,4	5,9	5,8		
	132,218	6,3	6,5	6,7	6,45	93,310	5,4	5,2	5,6	5,6		
0,33	197,304	6,9	7,6	9,1	8,1	176,121	6,7	7,25	8,3	7,7		
	188,686	7,4	7,6	8,1	7,9	161,726	7	7,1	7,3	7,3		
	183,848	7,4	7,4	7,9	7,9	145,798	6,35	6,8	7,2	6,9		

Ensaio 35	Cimento CPV ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	56,410	4	4,1	4,6	4,25	37,936	3,15	3,75	3,8	3,2
57,413	4		4,1	4,9	4,1	33,695	3	3,5	3,8	2,8		
62,560	4,1		4,2	4,75	4,8	43,007	3,2	3,9	4,2	3,5		
0,30	120,759	5,95	6	6,45	6,4	106,593	5,6	5,6	6,1	6		
	121,247	5,85	6	6,6	6,4	113,094	5,9	6	6,1	6		
	130,188	6,2	6,4	6,65	6,5	114,987	5,85	5,9	6,3	6,15		
0,33	160,040	6,95	7	7,25	7,35	152,289	6,7	6,8	7,35	7		
	167,411	7,4	7,3	7,3	7,2	157,806	6,8	6,95	7,4	7,2		
	174,361	7,3	7,3	7,6	7,6	172,029	7,1	7,3	7,6	7,6		

Ensaio 36	Cimento CPV ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	38,209	3,1	3,4	3,85	3,6	43,298	3,35	3,7	4	3,8
26,193	2,95		3,25	2,75	2,6	29,224	2,8	3,4	3,3	2,7		
30,679	2,9		3,4	3,4	2,8	28,747	2,9	2,9	3	3,3		
0,30	75,813	4,8	5	5	4,85	82,513	4,75	5,25	5,5	5		
	63,615	4,5	4,2	4,8	4,5	61,513	4,4	4,3	4,5	4,5		
	63,969	4,25	4,5	4,8	4,5	66,474	4,5	4,6	4,7	4,6		
0,33	102,515	6,25	5,5	5,7	5,4	102,965	5,6	5,7	5,9	5,7		
	109,356	5,8	5,7	6,05	6,05	112,623	5,75	5,9	6,3	6		
	112,154	5,5	5,75	6,3	6,35	114,038	5,9	6	6,2	6		

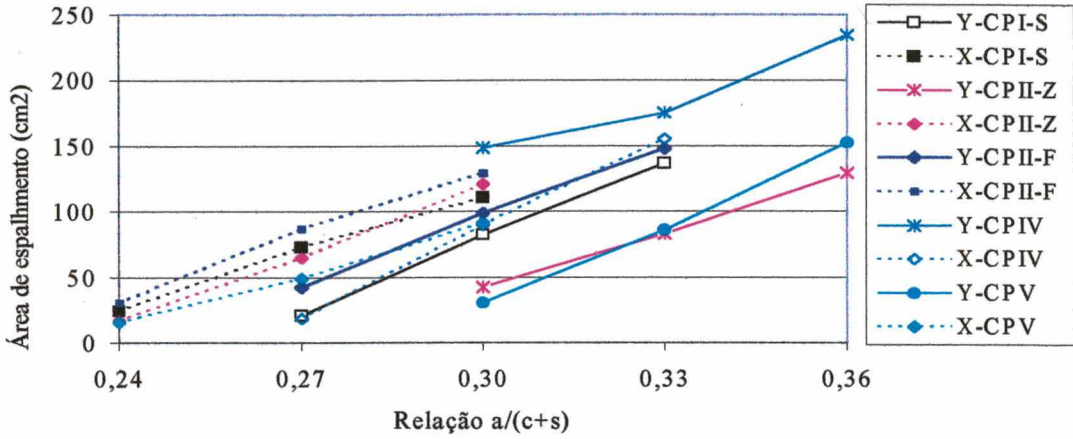
Ensaio 37	Cimento CPIX ADT1	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,30	136,326	6,25	6,6	6,8	6,7	147,407	6,5	6,8	7,3	6,8
150,109	6,8		6,65	7,2	7	162,290	6,9	6,95	7,4	7,5		
139,971	6,5		6,2	7	7	156,140	6,75	6,6	7,5	7,35		
0,33	165,125	7	7	7,55	7,45	173,193	7,25	7,05	7,7	7,7		
	170,289	7,8	6,95	7,4	7,3	180,261	8,1	7,1	7,6	7,5		
	176,709	7,95	7,2	7,5	7,35	186,865	8	7,15	7,9	7,8		
0,36	206,750	8	7,75	8,4	8,3	211,234	7,8	7,9	8,6	8,5		
	243,278	8,2	8,2	9,4	9,4	255,877	8,5	8,6	9,4	9,6		
	243,278	8,2	8,1	9,4	9,5	248,838	8,5	8	9,3	9,8		

Ensaio 38	Cimento CPIX ADT2	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	98,517	5,7	5,5	5,9	5,3	72,380	4	5	5,4	4,8
113,566	5,65		5,9	6,5	6	91,606	4,5	5,8	6,6	4,7		
157,250	6,4		7,1	7,7	7,1	136,844	5,7	6,2	7,5	7		
0,30	182,649	7,1	7	8,4	8	187,471	8,2	7	8,2	7,5		
	170,289	6,8	7,25	7,8	7,6	169,135	6,7	7	7,9	7,75		
	191,129	6,9	7,7	8,6	8	188,686	7,1	7,6	8,5	7,8		
0,33	220,347	8	8,1	8,8	8,6	219,033	7,8	8,2	9	8,4		
	212,524	7,6	7,9	8,7	8,7	220,347	8	8,2	8,7	8,6		
	229,652	8,9	8	8,6	8,7	232,345	8,9	8,2	8,8	8,5		

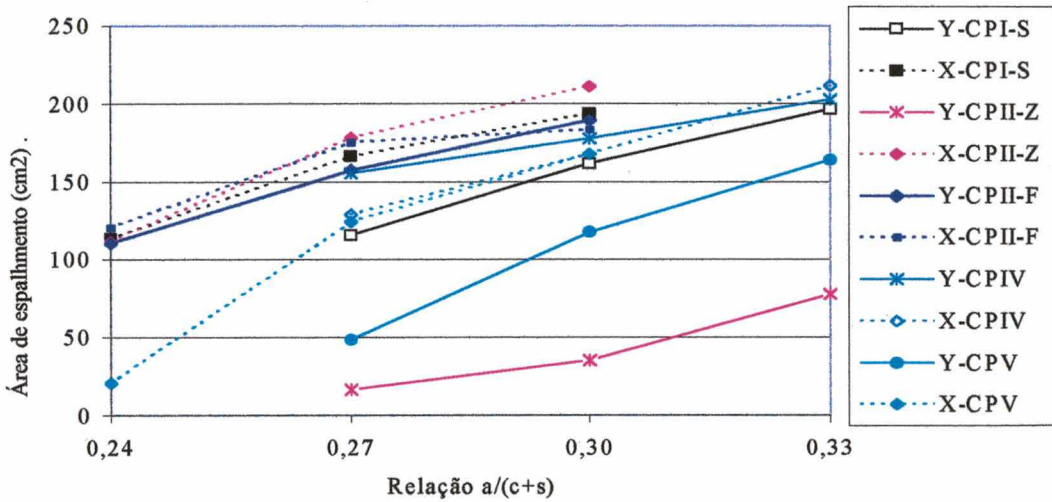
Ensaio 39	Cimento CPIX ADT3	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	163,421	7,1	7,2	7,35	7,2	159,480	6,6	7,1	7,6	7,2
151,197	6,65		6,7	7,3	7,1	148,485	6,3	6,7	7,45	7,05		
145,263	6,4		6,7	7,1	7	144,197	6,2	6,5	7,4	7		
0,30	168,559	7,1	7	7,6	7,6	161,726	6,9	6,5	7,6	7,7		
	169,135	7	7,25	7,7	7,4	166,838	6,9	7,25	7,5	7,5		
	198,551	7,2	7,8	8,3	8,5	202,315	7,6	7,5	8,5	8,5		
0,33	221,664	7,9	8,2	8,5	9	230,996	7,8	8,4	9	9,1		
	180,261	7,3	7,2	7,8	8	177,889	7	7,3	7,8	8		
	192,356	7,45	8	8	7,85	182,649	7,3	7,7	7,8	7,7		

Ensaio 40	Cimento CIPV ADT4	Relação a/(c+s)	Leitura 1					Leitura 2				
			Área	R1	R2	R3	R4	Área	R1	R2	R3	R4
		0,27	32,169	3	3,4	3,2	3,2	35,519	3,3	3,5	3,35	3,3
			30,434	2,75	3,6	3,4	2,7	30,925	2,8	2,9	3,4	3,45
			28,274	2,8	3	3,2	3	30,679	2,65	3,2	3,7	2,95
		0,30	99,841	5,1	5,5	6,4	5,55	106,593	5,5	5,7	6,4	5,7
			97,640	5,3	5,3	5,9	5,8	97,640	5,1	5,3	6	5,9
			101,174	5	5	6,7	6	106,593	5,1	5,7	6,5	6
		0,33	172,029	6,8	7,2	8	7,6	177,889	7,2	7	8	7,9
			180,261	7,1	8	7,8	7,4	167,411	6,6	7,1	8	7,5
			201,056	7	7,8	9	8,2	206,114	7,4	7,5	8,7	8,8

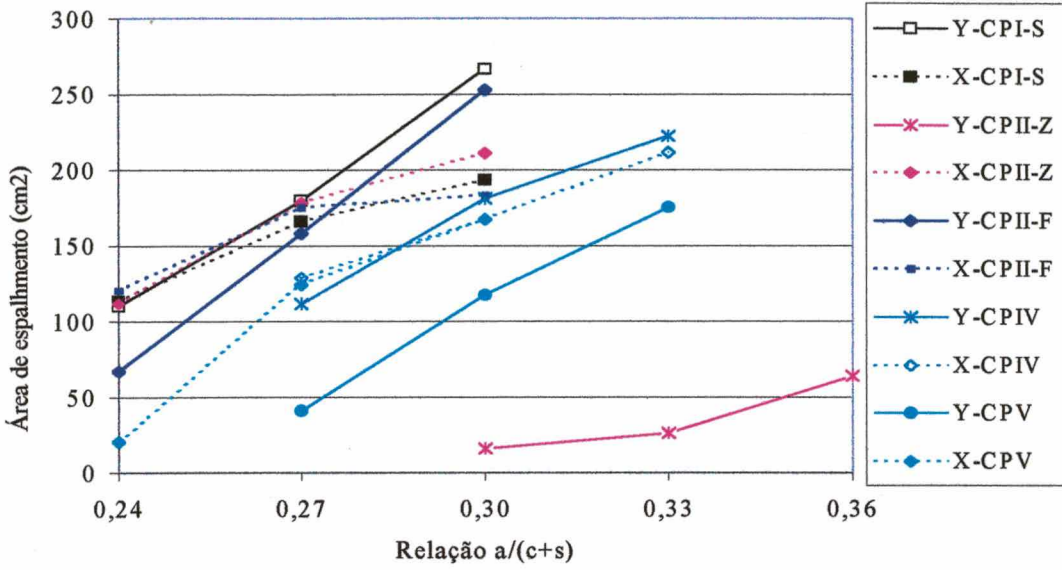
Anexo 10 - Gráficos que correlacionam área de espalhamento com a relação água/materiais cimentantes em função do tipo de aditivo



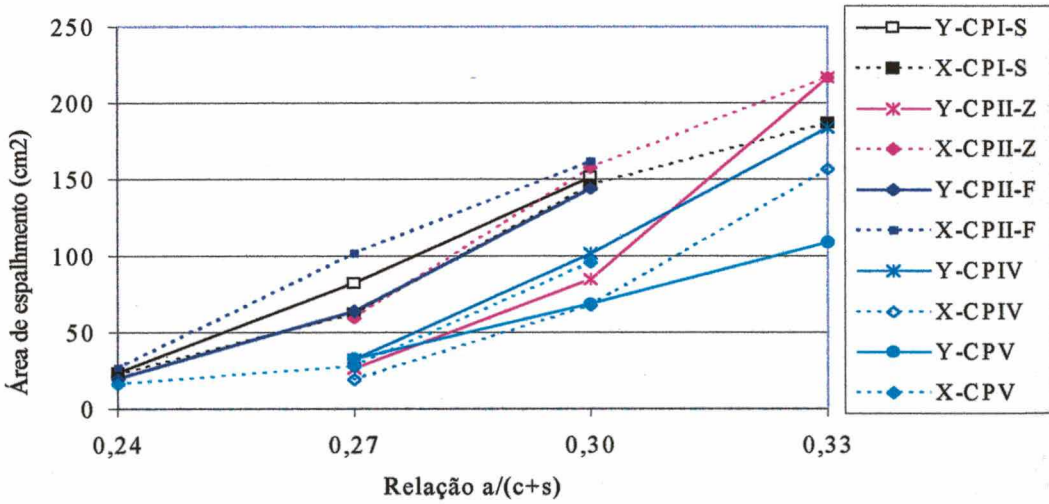
Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com o aditivo ADT1



Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com o aditivo ADT3



Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com o aditivo ADT2



Área de espalhamento das pastas aditivadas obtidas com o aditivo ADT4

Anexo 11 - Ensaio em argamassa

Leitura dos diâmetros do Flow-Table (cm) das argamassas feitas com cimento CPI-S (Y) e calculado o diâmetro médio e área de espalhamento (cm²).

Aditivo	CPI-S (Y)				
	Relação a/(c+s)	Área de esp. (cm ²)	diâmetro médio	diâmetro 1	diâmetro 2
ADT2	0,300	730,595	30,500	30,40	30,50
				30,60	30,50
	0,270	541,172	26,250	25,60	26,00
				26,10	27,30
	0,240	324,443	20,325	20,00	21,50
				19,40	20,40
ADT1	0,300	785,485	31,625	31,20	32,00
				31,50	31,80
	0,270	486,940	24,900	24,70	25,20
				24,80	24,90
	0,240	357,154	21,325	21,50	21,70
				20,70	21,40

Leitura dos diâmetros do Flow-Table (cm) das argamassas feitas com cimento CPV (Y) e calculado o diâmetro médio e área de espalhamento (cm²).

Aditivo	CPV (Y)				
	Relação a/c	Área de esp. (cm ²)	diâmetro médio	diâmetro 1	diâmetro 2
ADT2	0,300	715,108	30,175	30,40	30,60
				30,00	29,70
	0,270	449,553	23,925	24,70	23,90
				23,90	23,20
	0,240	294,062	19,350	19,50	19,50
				19,70	18,70
ADT1	0,300	633,452	28,400	27,70	28,70
				28,60	28,60
	0,270	462,802	24,275	25,20	24,50
				24,20	23,20
	0,240	276,845	18,775	19,00	18,60
				18,70	18,80

Leitura dos diâmetros do Flow-Table (cm) das argamassas feitas com cimento CPIV (Y) e calculado o diâmetro médio e área de espalhamento (cm²).

Aditivo	CPIV (Y)				
	Relação a/c	Área de esp. (cm ²)	diâmetro médio	diâmetro 1	diâmetro 2
ADT2	0,300	715,108	30,175	31,60	32,40
				28,60	28,10
	0,270	448,614	23,900	24,70	25,40
				22,10	23,40
	0,240	220,347	16,750	15,80	16,20
				16,20	18,80
ADT1	0,300	745,038	30,800	33,60	33,40
				28,00	28,20
	0,270	508,689	25,450	26,80	27,60
				24,20	23,20
	0,240	246,050	17,700	17,00	17,60
				18,10	18,10
ADT3	0,300	853,978	32,975	32,80	32,80
				33,00	33,30
	0,270	533,981	26,075	26,50	25,50
				25,70	26,60
	0,240	283,520	19,000	18,90	19,20
				18,90	19,00
ADT4	0,300	746,248	30,825	30,60	31,50
				30,60	30,60
	0,270	669,642	29,200	28,90	29,30
				29,00	29,60
	0,240	420,900	23,150	23,90	23,80
				22,60	22,30

Leitura dos diâmetros do Flow-Table (cm) das argamassas feitas com cimento CII-Z (Y) e calculado o diâmetro médio e área de espalhamento (cm²).

Aditivo	CP II-Z (Y)				
	Relação a/c	Área de esp. (cm ²)	diâmetro médio	diâmetro 1	diâmetro 2
ADT2	0,300	811,781	32,150	31,00	30,40
				33,50	33,70
	0,270	500,726	25,250	24,40	24,60
				26,00	26,00
	0,240	247,442	17,750	17,70	18,00
				17,40	17,90
ADT4	0,300	861,765	33,125	32,90	32,40
				33,30	33,90
	0,270	657,088	28,925	28,20	28,30
				29,30	29,90
	0,240	439,278	23,650	24,30	24,70
				22,60	23,00

Anexo 12 - Ensaio em concreto

Traço final dos concretos feito com o cimento CPI-S (Y)

Aditivo	traço final			
	cimentícios	água	miúdo	graúdo
ADT1	1,000	0,300	1,183	1,549
ADT2	1,000	0,300	1,309	1,638
ADT3	1,000	0,300	1,290	1,625
ADT4	1,000	0,300	1,309	1,638

Abatimento inicial e ao longo do tempo dos concretos feito com o cimento CPI-S (Y)

Aditivo	Tempo em minutos				
	0	5	25	45	50
ADT1	9,5	9,5	4,5	3,5	16,0
ADT2	22,0	10,0	3,5	2,0	17,0
ADT3	18,5	10,0	6,5	4,5	18,5
ADT4	19,0	11,0	2,0	0,5	13,5

Evolução da resistência à compressão (MPa) dos concretos feito com o cimento CPI-S (Y)

Cimento CPI-S (X)	Aditivo	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias
		ADT1	dosagem	50,93	61,12	78,31	redosagem	54,11	64,30
45,84				64,30	77,67	49,02		53,48	65,57
49,66				48,38	77,67			60,48	67,17
ADT2		dosagem	49,66	63,03	82,13	redosagem	57,30	61,12	83,72
			52,84	61,12	80,85		47,75	-	84,67
				63,66	75,12			63,03	83,40
ADT3		dosagem	62,39	71,94	91,04	redosagem	61,88	70,03	94,22
			63,03	77,67	92,31		64,30	75,44	95,50
			62,39	76,40	96,13			72,58	95,50
ADT4		dosagem	6,37	46,47	84,04	redosagem	3,18	4,46	75,76
			5,73	49,66	80,22		3,18	4,46	75,12
			6,05	46,47	59,84			4,46	72,90

Traço final dos concretos feito com o cimento CII-F (Y)

Aditivo	traço final			
	cimentícios	água	miúdo	graúdo
ADT1	1,000	0,300	1,316	1,643
ADT2	1,000	0,300	1,396	1,700
ADT3	1,000	0,300	1,316	1,643
ADT4	1,000	0,300	1,470	1,752

Abatimento inicial e ao longo do tempo dos concretos feito com o cimento CII-F (Y)

Aditivo	Tempo em minutos				
	0	5	25	45	50
ADT1	11,5	11,5	9,0	6,0	21,5
ADT2	22,5	8,5	3,5	2,0	16,5
ADT3	8,5	8,5	4,5	3,5	22,5
ADT4	20,5	11,5	3,0	1,3	16,5

Evolução da resistência à compressão (MPa) dos concretos feito com o cimento CII-F (Y)

Cimento CII-F (X)	Aditivo	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias
		ADT1	dosagem	41	49,5	54	redosagem	35,25	43,75
42				49	60,5	36,25		44,25	58,25
40,25				44,5	58			43	62,5
ADT2		dosagem	40,75	50,75	56	redosagem	42,75	52	66
			41,5	50,25	55,5		42,5	47,5	68
			41,5	47,5	55,75			51	67,5
ADT3		dosagem	48,75	58,5	70	redosagem	32,5	53,5	55
			46,75	56	68		42,5	51	46
			50,5	53	67,5			52,5	55
ADT4		dosagem	9,1	42	50,5	redosagem	3	5	55
			9	38	42,5		3,1	4,5	49
			9,75	38	49,75			4,75	55

Traço final dos concretos feitos com o cimento CPIV (Y)

Aditivo	traço final			
	cimentícios	água	miúdo	graúdo
ADT1	1,000	0,300	1,047	1,452
ADT2	1,000	0,300	1,137	1,516
ADT3	1,000	0,300	1,115	1,500
ADT4	1,000	0,300	0,912	1,356

Abatimento inicial e ao longo do tempo dos concretos feitos com o cimento CPIV (Y)

Aditivo	Tempo em minutos				
	0	5	25	45	50
ADT1	22,0	11,5	9,5	5,0	22,0
ADT2	22,0	11,0	2,5	0,5	23,0
ADT3	22,0	11,5	3,5	2,5	23,5
ADT4	9,5	9,5	4,5	3,0	22,5

Evolução da resistência à compressão (MPa) dos concretos feitos com o cimento CPIV (Y)

Cimento CPIV (Y)	Aditivo	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias
		ADT1	dosagem	31,20	72,58	74,49	redosagem	0,00	40,74
38,52				60,48	67,48	0,00		0,00	-
35,65				73,53	81,49			44,56	-
ADT2		dosagem	25,47	53,48	68,76	redosagem	-	-	-
			28,01	52,84	67,48		-	-	-
			26,10	49,02	61,75		-	-	-
ADT3		dosagem	56,79	72,58	70,03	redosagem	53,16	61,12	70,03
			55,39	59,84	89,77		51,25	68,76	94,86
			52,84	73,53	87,22			68,12	71,30
ADT4		dosagem	5,09	49,02	78,94	redosagem	1,91	5,73	33,11*
			5,73	47,11	47,75		0,95	5,73	35,02*
			4,46	47,75	73,21			5,73	29,29*

* Apresentaram descascamento e fissuras longitudinais.

Traço final dos concretos feitos com o cimento CPV (Y)

Aditivo	traço final			
	cimentícios	água	miúdo	graúdo
ADT1	1,000	0,300	0,855	1,315
ADT2	1,000	0,300	1,032	1,441
ADT3	1,000	0,300	0,921	1,363
ADT4	1,000	0,300	1,010	1,426

Abatimento inicial e ao longo do tempo dos concretos feitos com o cimento CPV (Y)

Aditivo	Tempo em minutos				
	0	5	25	45	50
ADT1	11,5	11,5	0,0	0,0	21,5
ADT2	20,0	11,5	3,8	3,0	19,5
ADT3	17,0	11,0	5,5	4,0	21,5
ADT4	19,0	11,5	2,5	2,0	17,5

Evolução da resistência à compressão (MPa) dos concretos feitos com o cimento CPV (Y)

Cimento CPV (Y)	Aditivo	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias
		ADT1	dosagem	54,11	64,30	66,21	redosagem	56,98	70,35
50,93				63,03	62,39	49,34		64,94	80,22
52,84				31,20	75,12			51,25	85,31
ADT2		dosagem	57,93	73,53	80,22	redosagem	61,44	47,43	95,50
			61,12	75,44	84,67		63,03	76,40	98,04
			57,30	69,08	81,49			77,99	95,50
ADT3		dosagem	54,75	83,72	87,22	redosagem	68,76	60,48	68,76
			73,21	75,12	86,58		71,30	82,76	70,03
			67,17	79,58	64,30			82,13	89,13
ADT4		dosagem	30,88	67,17	90,40	redosagem	2,86	29,92	86,58
			38,52	66,21	87,22		3,18	28,65	89,13
			35,33	65,26	91,04			36,29	85,95

Traço final dos concretos feitos com o cimento CPI-S (X)

Aditivo	traço final			
	cimentícios	água	miúdo	gráudo
ADT1	1,000	0,300	1,237	1,587
ADT2	1,000	0,300	1,451	1,739
ADT3	1,000	0,300	1,398	1,701
ADT4	1,000	0,300	1,505	1,777

Abatimento inicial e ao longo do tempo dos concretos feitos com o cimento CPI-S (X)

Aditivo	Tempo em minutos				
	0	5	25	45	50
ADT1	11,0	11,0	3,5	2,0	10,0
ADT2	23,0	9,0	3,5	2,0	17,5
ADT3	23,0	8,5	4,0	2,5	18,0
ADT4	22,0	10,5	3,5	1,5	12,5

Evolução da resistência à compressão (MPa) dos concretos feitos com o cimento CPI-S (X)

Cimento CPI-S (X)	Aditivo	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias	Ident.	3 dias	7 dias	28 dias
		ADT1	dosagem	58,19	64,94	77,67	redosagem	50,93	57,30
58,57				61,12	80,22	43,93		53,48	78,94
59,84				44,56	76,40	48,38		57,30	0,00
ADT2		dosagem	67,48	62,39	77,03	redosagem	55,39	66,85	67,48
			52,20	62,07	57,30		57,30	64,94	77,03
			53,48	62,39	75,76		56,02	63,66	73,85
ADT3		dosagem	59,21	59,21	84,04	redosagem	54,75	55,39	71,94
			57,30	61,12	86,58		56,66	61,75	76,40
			56,66	62,39	81,49		55,39	63,98	61,12
ADT4		dosagem	43,93	54,11	61,12	redosagem	2,55	0,00	0,00
			42,02	46,47	59,21		2,55	0,00	0,00
			42,97	46,47	61,12		1,91	0,00	0,00

Anexo 13 - Ensaio em concreto

Na tentativa de explicar o comportamento diferenciado destes concretos de alto desempenho que apresentaram incompatibilidade da dupla cimento-aditivo, foi feito um estudo de microestrutura com auxílio do microscópio eletrônico de varredura e pela sonda EDAX.

Na Figura 1 observa-se a presença de bolhas de ar aprisionado nos concretos estudados, que é maior nos concretos com baixas relações água/materiais cimentantes e com adição de sílica ativa, que aumenta consideravelmente a coesão da mistura, dificultando a expulsão das bolhas de ar. Poderia-se obter maiores resistências à compressão com a expulsão das bolhas de ar, principalmente das de maior tamanho se o concreto fosse melhor adensado. Isto justifica novos estudos de procedimentos de produção do concreto de alto desempenho, tanto em laboratório como em obra.

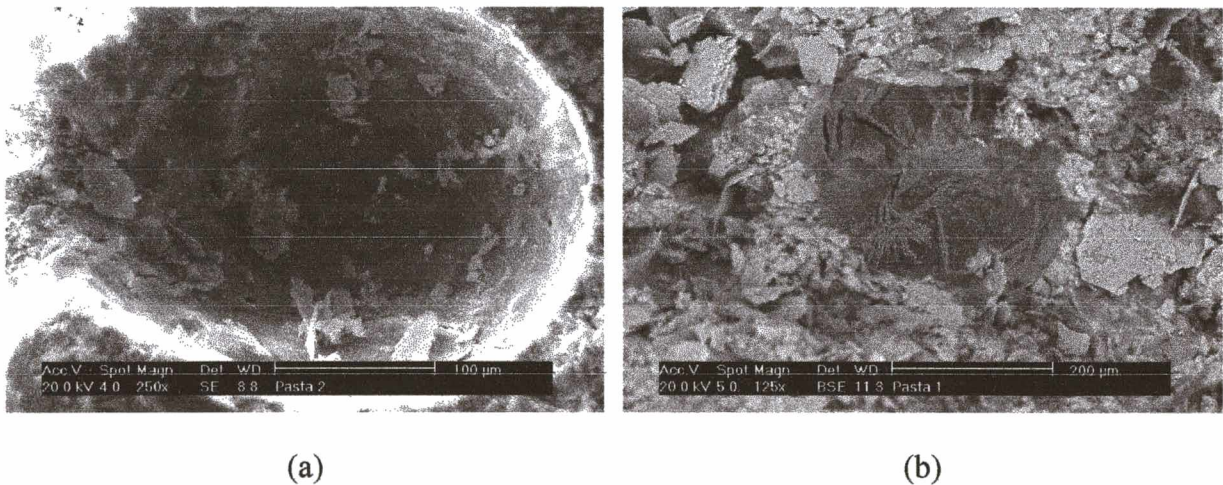


Figura 1 Imagens de bolhas de ar incorporado em amostras de concreto de alto desempenho que apresentaram problemas de incompatibilidade cimento-aditivo.

A Figura 2 mostra uma partícula de sílica ativa presente na mistura que aparece de forma esférica e de cor clara. Nesta figura pode-se observar a interface pasta-agregado, apresentando uma estrutura densa e com pequena quantidade de hidróxido de cálcio e a sua orientação preferencial. Pela imagem não é possível verificar visualmente um gradiente de porosidade. Não se percebe nenhum gradiente de porosidade visualmente.

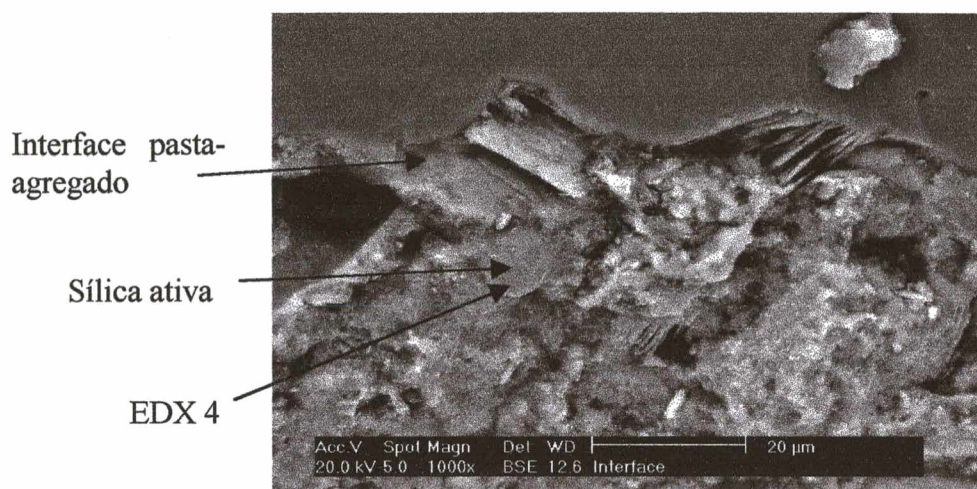


Figura 2 Micrografia mostrando uma partícula de sílica ativa e mostrando a interface pasta-cimento

O problema da incompatibilidade cimento-aditivo pode ocorrer no concreto convencional, mas é mais acentuado no concreto de alto desempenho, em virtude da baixa relação água/materiais cimentantes tem-se uma menor quantidade de água para receber os íons sulfatos

A expansão do concreto é causada pelo esforço da pressão devido o crescimento dos cristais de etringita que são altamente sulfatados ($C_3A.3CS.H_{32}$) e secundariamente à formação de gipsita ($CaSO_4.2H_2O$).

O tipo de cátion do sal é que determina a existência de certas reações, principalmente com o hidróxido de cálcio, formando hidróxidos com solubilidade variável. Os sulfatos de Sódio (Na_2SO_4), de Magnésio ($MgSO_4$) e de Cálcio ($CaSO_4$) são os mais importantes pela sua agressividade e abundância. As reações identificadas entre os íons sulfatos e os vários compostos hidratados são abordadas a seguir:

- A reações dos íons sulfatos com o aluminato tricálcico (C_3A) ou com o monosulfoaluminato hidratado de cálcio gerando etringita, reação de elevada agressividade, pois a etringita formada ocupa um volume 2,5 vezes maior que o aluminato tricálcico;
- Os íons sulfatos podem reagir com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) cristalino, formando o gesso, que acarreta num aumento de volume de aproximadamente 100 %. Com gesso formado pode-se combinar com o C_3A formado o trissulfoaluminato (etringita), reação que também apresenta caráter expansivo e agrava o processo de degradação; e

que origina o formação de silicatos hidratados de magnésio de baixa resistência. O cálcio liberado é consumido na geração de gesso. Portanto, este tipo de sulfato é altamente agressivo pois atinge a resistência da estrutura do concreto e suas reações se processam com grande rapidez.

Na Figura 3 apresenta-se 04 micrografias obtidas com auxílio do Microscópio eletrônico de Varredura e a investigação com a sonda EDAX efetuada está apresentada a seguir.

Observa-se pela Figura 3 e através da análises das sondagens EDAX a presença de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) apresentando-se com a superfície bastante alterado como é mostrado em (d), que pode também ser agravado pelo processo de secagem da amostra e da exposição ao vácuo da amostra durante a análise. Em (a) e (b) pode-se observar a provável ocorrência de trisulfoaluminato (etringita) na forma de agulhas finas e longas e o hidróxido de cálcio na forma de prismas hexagonais contendo variações de morfologia para formas não definidas. Visualmente existe a formação de etringita pela morfologia dos cristais formados, contudo pela análise da microestrutura efetuada não se percebeu a sua existência quimicamente, como é observado na Figura 3 (b) e pela sua análise EDX.

Diante do problema evidenciado durante a pesquisa experimental, que não foi objeto de estudo inicial, sugere-se a necessidade de estudos aprofundados no sentido de verificar o aparecimento de efeitos secundários quando são adicionados novos teores de aditivos para recuperar a fluidez perdida com o tempo. Como apresentado no capítulo 3, a redosagem é uma prática bastante comum junto aos consumidores de aditivos. Porém, somente existe uma recomendação de tomada de cautela contra a segregação quando são feitas duas ou três redosagem para manter a fluidez.

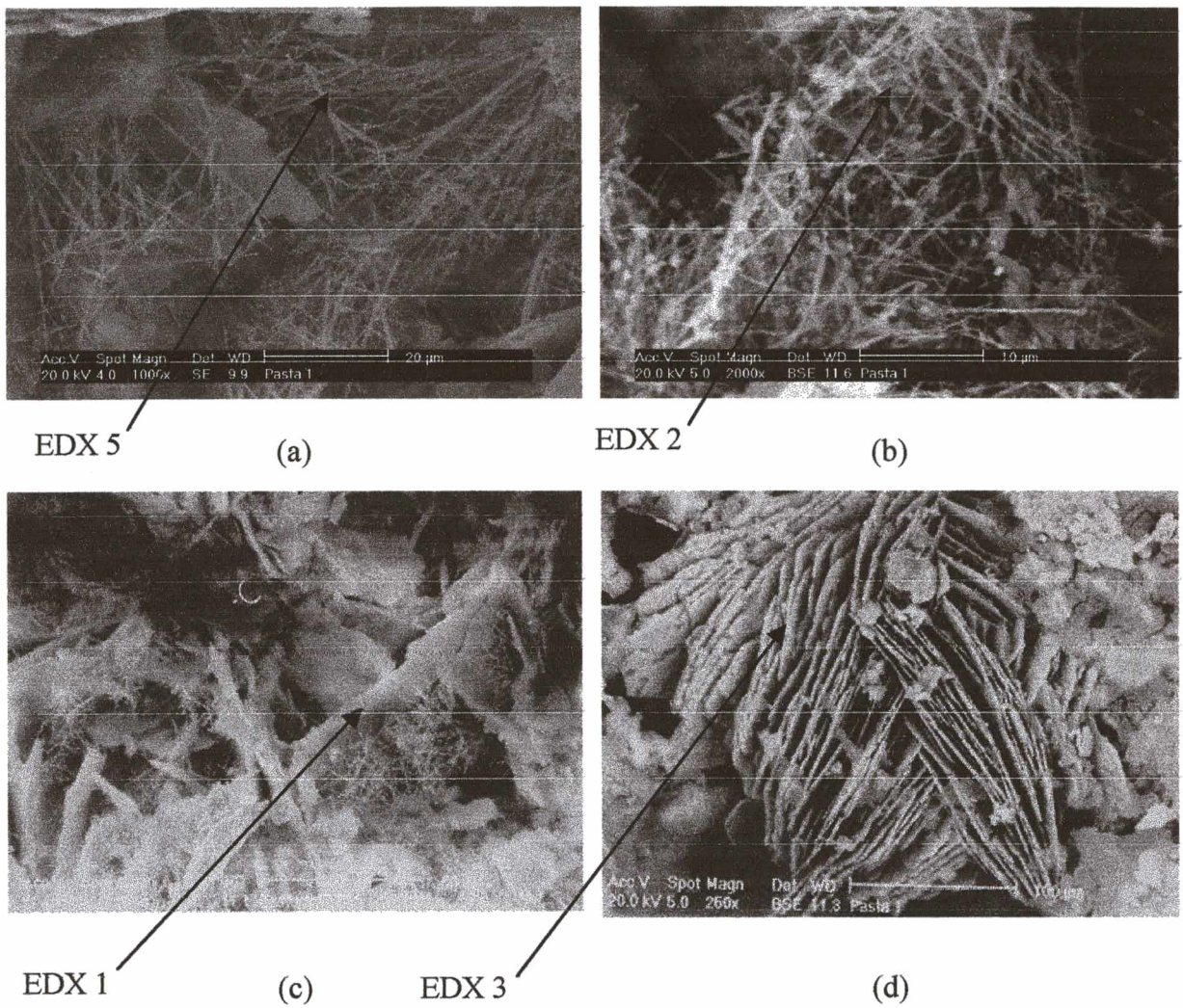
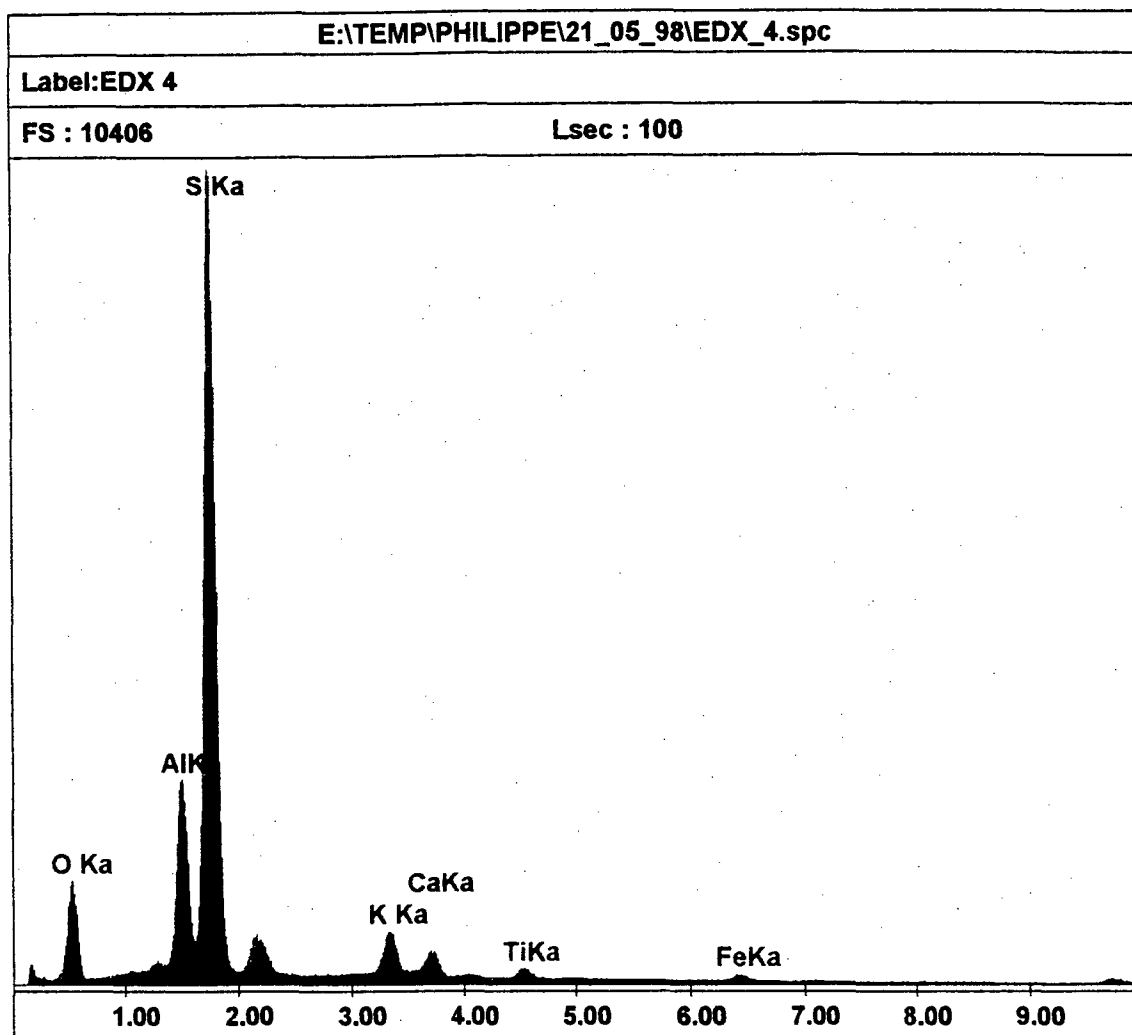
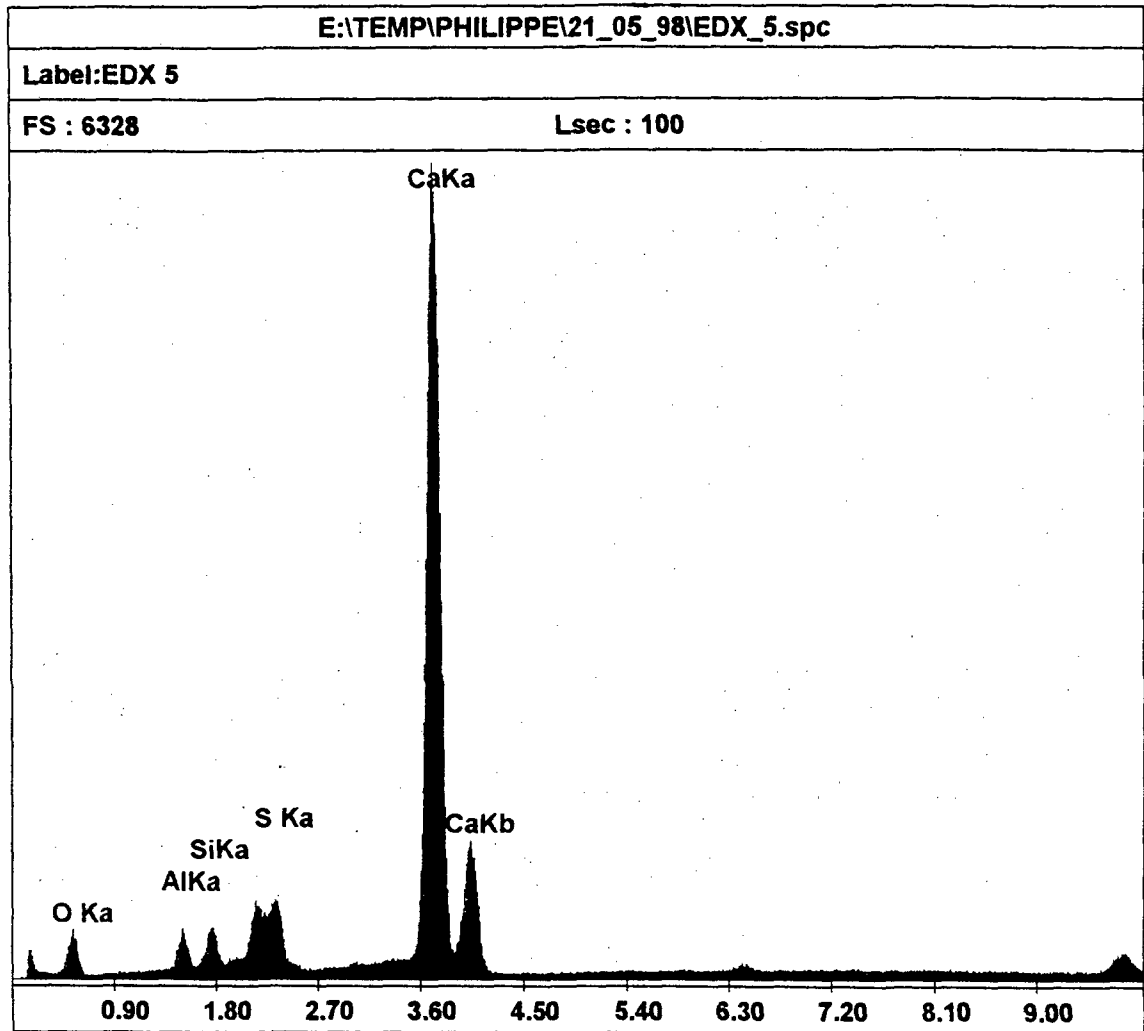


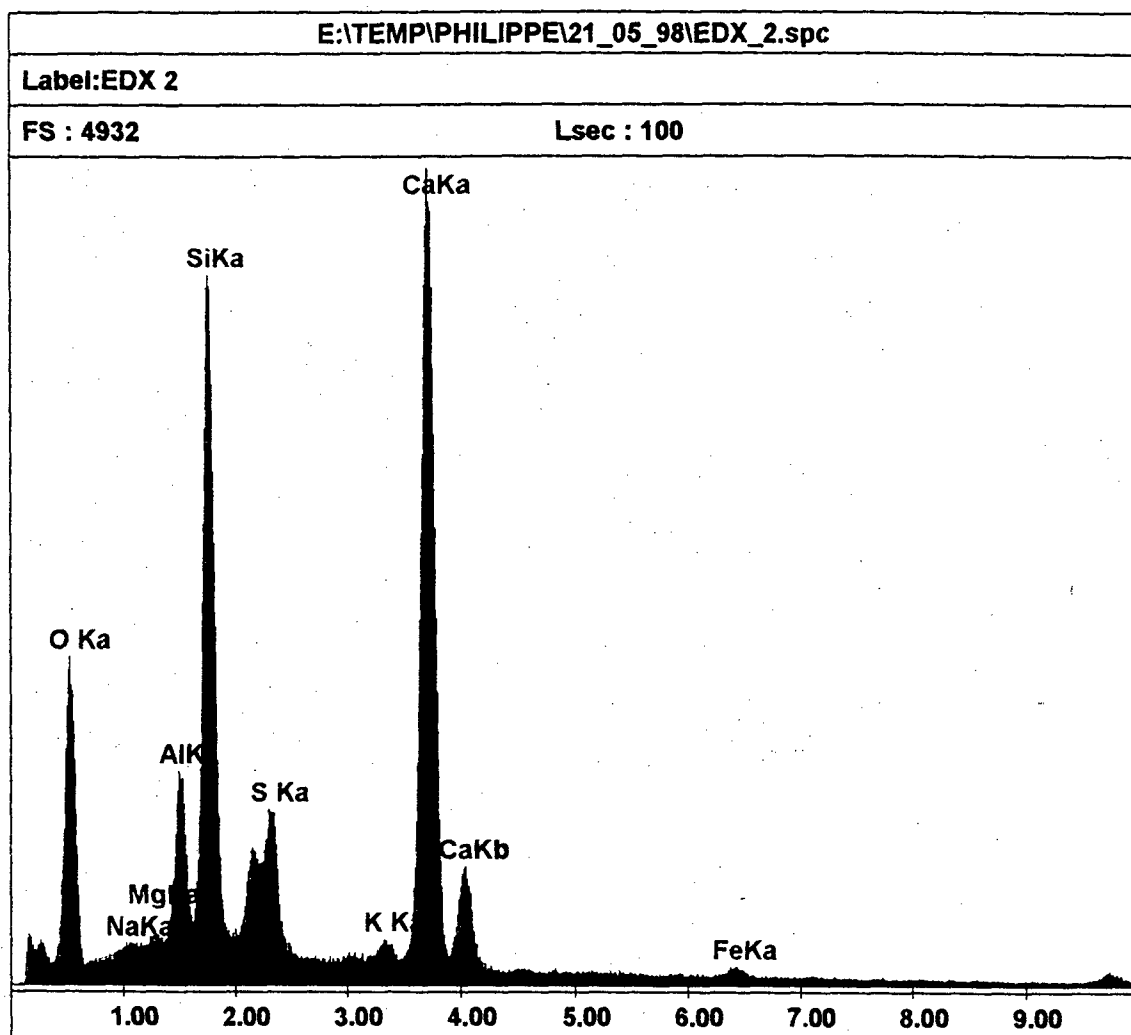
Figura 3 Micrografias dos concretos que apresentaram problemas de incompatibilidade cimento-aditivo



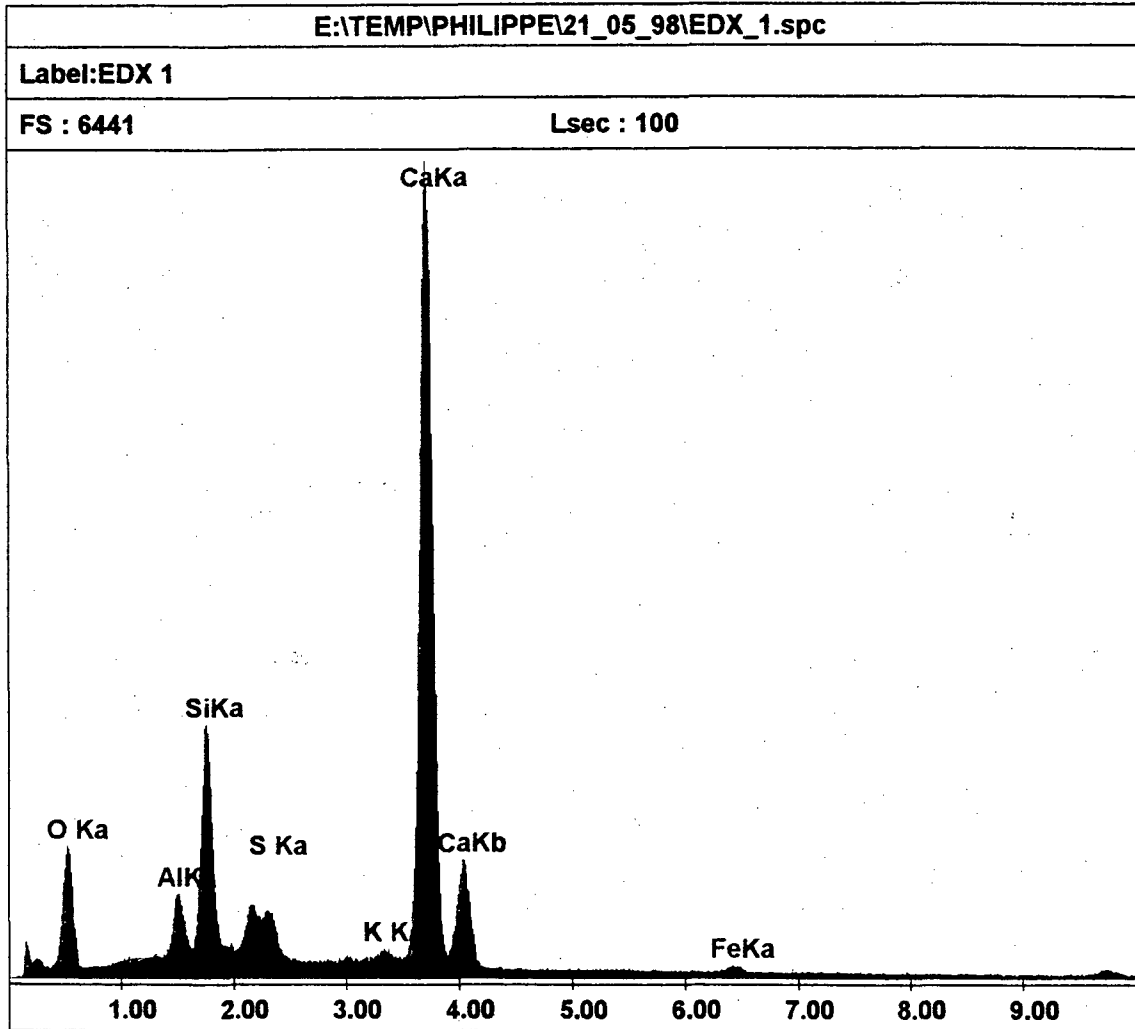
Element	Wt%	At%	K-Ratio	Z	A	F
O K	29.95	44.01	0.0712	1.0392	0.2287	1.0006
AlK	11.33	9.87	0.0840	0.9675	0.7511	1.0201
SiK	48.01	40.18	0.3487	0.9957	0.7288	1.0010
K K	4.86	2.92	0.0388	0.9453	0.8413	1.0044
CaK	2.73	1.60	0.0230	0.9676	0.8676	1.0021
TiK	1.45	0.71	0.0119	0.8836	0.9267	1.0016
FeK	1.67	0.70	0.0145	0.8794	0.9846	1.0000
Total	100.00	100.00				



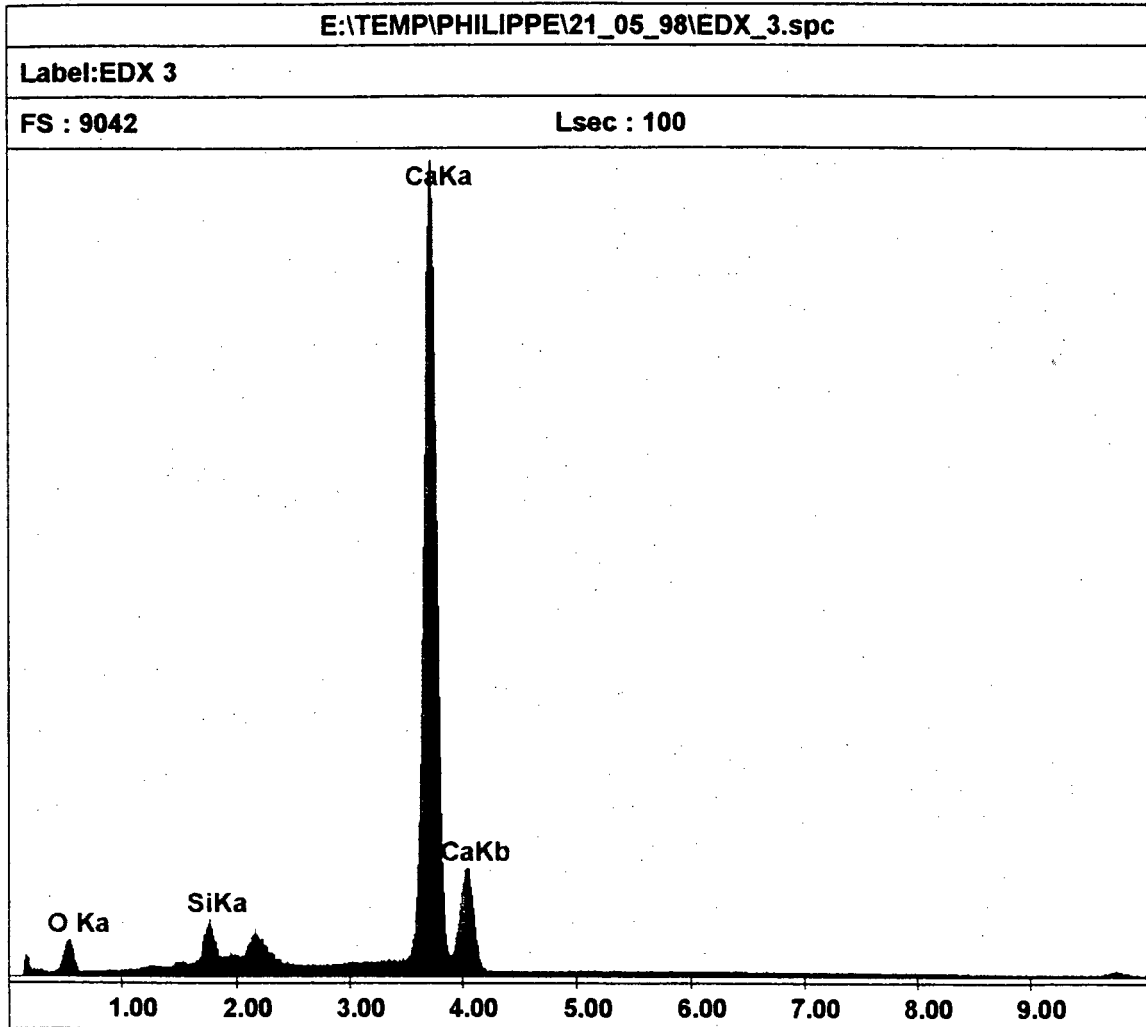
Element	Wt%	At%	K-Ratio	Z	A	F
O K	25.09	44.47	0.0270	1.0491	0.1025	1.0001
AlK	2.55	2.69	0.0147	0.9762	0.5849	1.0064
SiK	2.50	2.53	0.0176	1.0045	0.6925	1.0108
S K	5.04	4.45	0.0443	0.9964	0.8572	1.0298
CaK	64.82	45.86	0.6202	0.9785	0.9779	1.0000
Total	100.00	100.00				



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	45.35	63.81	0.0811	1.0325	0.1732	1.0002
NaK	0.08	0.08	0.0002	0.9662	0.3319	1.0026
MgK	0.36	0.33	0.0017	0.9904	0.4779	1.0052
AlK	4.48	3.74	0.0271	0.9613	0.6238	1.0082
SiK	14.98	12.01	0.1053	0.9892	0.7071	1.0053
S K	4.66	3.27	0.0358	0.9762	0.7779	1.0109
K K	0.94	0.54	0.0085	0.9394	0.9211	1.0479
CaK	28.17	15.82	0.2565	0.9614	0.9469	1.0004
FeK	0.99	0.40	0.0084	0.8739	0.9725	1.0000
Total	100.00	100.00				



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	38.88	59.41	0.0539	1.0389	0.1333	1.0002
AlK	2.88	2.61	0.0167	0.9670	0.5964	1.0067
SiK	8.54	7.43	0.0598	0.9951	0.6996	1.0071
S K	2.56	1.95	0.0210	0.9841	0.8183	1.0196
K K	0.88	0.55	0.0087	0.9460	0.9498	1.0902
CaK	45.27	27.61	0.4248	0.9680	0.9691	1.0004
FeK	1.00	0.44	0.0084	0.8805	0.9565	1.0000
Total	100.00	100.00				



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	24.34	44.25	0.0247	1.0503	0.0964	1.0001
SiK	2.74	2.84	0.0195	1.0056	0.7012	1.0108
CaK	72.92	52.91	0.7124	0.9798	0.9972	1.0000
Total	100.00	100.00				

8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDIS, B.J.; ALEXANDER, M.G. A method of proportioning trial mixes for high-strength concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1990. p287-307. (ACI Special Publication, 121).
- AITCIN, P.-C. The art and science of high-performance concrete In: MARIO COLLEPARDI SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE SCIENCE AND TECHNOLOGY. Editor: P. K. METHA, p107-126, 1997
- AITCIN, P.-C. The use of superplasticizers in high performance concrete. In: MALIER, Y. (editor). High performance concrete - from material to structure. London, E & FN Spon, p14-33, 1992.
- AITCIN, P.C.; MEHTA, P.K. Effect of coarse -aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. ACI Materials Journal, v.87, n.2, Mar/Abr. p103-107. 1990.
- AITCIN, P.-C.; SARKAR, S. L. Retardation effect of superplasticizer on different cement fractions. Cement and Concrete Research, v.17, n.5, p995-999. 1987.
- AL-MANASEER A. A., ALBERT A. J. Measuring the consistency and workability of superplasticized concrete. ACI Materials Journal. v.92, n.3, p286-290, May/Jun 1995.
- ALMEIDA, I.R. Programa de economia de cimento e qualificação técnico-econômica de aditivos para o concreto. Niterói. 128p. 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal Fluminense.
- ALMEIDA, I.R. Betões de alta resistência e durabilidade – composição e características. Lisboa. 740p. 1990. Tese (Doutorado). Universidade Técnica de Lisboa.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 212. Chemical admixtures for concrete. updated ACI Committee 212 report covers commonly used admixtures other than pozzolans. Concrete International, Out. p48-53, 1993.

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363 R. State-of-the-art report on high-strength concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, 57p, 1991.
- ANDERSON, P.J.; ROY, D.M.; GAIDIS, J.M. The effects of adsorption of superplasticizers on the surface of cement. *Cement and Concrete Research*, v.17, n.5, p805-813. 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Confecção e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – determinação da resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone: NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Controle tecnológico de materiais componentes do concreto: NBR 12654. Rio de Janeiro, 1992.
- BABU, H.G.; PARKASH, P.V.S. Efficiency of silica fume in concrete. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.6, p1273-1283, 1995.
- BAEKMARK, K.; HANSEN, H.; REICHERT, J. Stabilized air void system in superplasticized concrete. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE. Berkeley, California. Papers... Detroit: American Concrete Institute, 1994. P177-190. (ACI Special Publication, 144).
- BUCHER, H.R.E.. Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassas ou concretos. In: Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro, 1988. Anais. Rio de Janeiro, IBRACON, p609-625. 1988.
- CARRASQUILLO, R.L.; NILSON, A.H.; SLATE, F.O. High strength concrete: na annotated bibliography. *Cement, Concrete, and Aggregates*, v.2, p3-19, 1990.
- CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Superplasticizing admixtures in concrete. London, 1978. (Publication, 45030).

- CHAN, S.Y.N.; PENG, G.; CHAN, J.K.W. Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature. *Materials and Structures*, v.29, p616-619. Dec 1996.
- CHAN, S.Y.N.; FENG, N.Q.; TSANG, M.K.C. Workability retention of high strength/superplasticized concrete. *Magazine of Concrete Research*. v.48, n.177, p.301-309. Dec 1996.
- COLLEPARDI, M. Superplasticizers and air entraining agents: state of the art and future needs. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE. Berkeley, California. Papers... Detroit: American Concrete Institute, 1994. P399-416. (ACI Special Publication, 144).
- COLLEPARDI, M. Water reducers/retarders. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). *Concrete admistures handbook: properties, science, and technology*. Park Ridge, Noyes. Cap. 3, p116-210. 1984.
- DALMOLIN, D.C.C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 286p, 1995.
- de LARRAD, F. A mix performance method for high performance concrete. In: MALIER, Y. (editor). *High performance concrete - from material to structure*. London, E & FN Spon, p48-62, 1992.
- de LARRAD, F.; BELLOC, A.; REMWEZ, S.; BOULAY, C. Is the cube test suitable for high performance concrete? *Materials and Structures*, v.27, p580-583. 1994.
- de LARRARD, F.; BOSC, F.; CATHERINE. C.; DEFLORENNE, F. A method for optimizing the Binder/Superplasticizer system in high-performance concrete mixture-proportioning. In: FIFTH CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, Supplementary Papers, Rome, p37-53, 1997.
- DIAMOND, S.; MATSUKAWA, K. Unexpected release and re-sorption of superplasticizer. In: MARIO COLLEPARDI SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE SCIENCE AND TECHNOLOGY. Editor: P. K. METHA, p315-329, 1997.
- DOMONE, P.; SOUTSOS, M. Na approach to the proportioning of high-strength concrete mixes. *Concrete International*. Out. p26-31. 1994.

- EDMEADES, R.M., HEWLWTT, P.C. Superplasticizer concrete – high workability retention. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ADMIXTURES, London. Papers... Lancaster: The Construction Press, p49-72, 1980.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE / COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. High strength concrete-state of the art report. London: Chameleon Press, 61p. 1990. (SR90/1 – Bulletin d'Information, 197).
- FERRAROS, C.F.; GAIDIS, J.M. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. *ACI Materials Journal*. v.88, n.4. p388-393. Jul/Aug 1992.
- FERREIRA e SILVA, L. Argamassas com Microssilica, estudo de consistência e resistência. In: Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro, 1988. Anais. Rio de Janeiro, IBRACON, 11p, 1988.
- FERREIRA, O. P.; SILVA, L. F. O uso de superplastificantes na obtenção de concreto fluido. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON 30, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBRACON, v.2, p636-650, 1988.
- GJORV, O. E., High strength concrete. In: MALHOTRA, V.M. (ed) *Advances in Concrete Technology*. Ottawa: Energy Mines Resources, p.21-78, 1992.
- GUERRINI, G.L.; BIOLZI, L.; COLOMBET, P. Superplasticizers and mechanical properties of a very high performance concrete. In: FIFTH CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, Supplementary Papers, Rome, p1-12, 1997.
- GUTIÉRREZ P.A.; CÁNOVAS M.F. High-Performance Concrete: Requirements for constituent materials and mix proportioning. *ACI Materials Journal*. V.93 n. 3, Mai/Jun, p233-241, 1996.
- GUTIÉRREZ P.A.; CÁNOVAS M.F. The modulus of elasticity of high performance concrete. *Materials and Structures*, v.28, p559-568, 1995.
- GYSEL, A.V.; TAERWE, L. Analytical formulation of the complete stress-strain curve for high strength concrete. *Materials and Structures*, v.29, p529-533, Nov 1996
- HANNA, E.; LUKE, K.; PERRATON, D.; AİTCIN, P.C Rheological behavior of portland cement in the presence of a superplasticizer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, 3., 1989, Ottawa, Canada. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1989. P171-188. (ACI Special Publication, 119).

- HU, C.; de LARRAD, F. The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v.26, n.2, p283-294, 1996.
- HU, C.; de LARRAD, F.; GJOV, O.E. Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete. *Materials and Structures*, v.28, p1-7, 1995.
- HUYNH, H.T. La compatibilité ciment-superplastifiant dans les bétons à hautes performances – synthèse bibliographique. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees*. 206. p63-73. Nov/Dec 1996.
- JAHREN, P.A. Performance of concrete incorporating condensed silica fume and superplasticizers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 2., Madrid, Spain. 1986. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1986. V.2 p865-892. (ACI Special Publication, 91).
- KANTRO, D.L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement past – a miniature slump test. *Cement, Concrete and Aggregates*, v.2, n.2, p.95-102 1980.
- KHATRI, R.P.; SIRIVIVATNANON, V.; GROSS, V. Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.1, p209-220, 1995.
- KREIJGER, P.C. *Plasticizers and dispersing admixtures*. Lancaster, The Construction Press. London, p1-16, 1980.
- KRISHNA, R.N. Dispersing action of a superplasticizer with different grades of cements and fly ash. *ACI Materials Journal*. v.93, n.4, p351-355, Jul/Aug 1996.
- LESSARD, M.; AITCIN, P.-C. Testing high performance concrete. In: MALIER, Y. (editor). *High performance concrete - from material to structure*. London, E & FN Spon, p196-213, 1992.
- LOBO, C.L.; MULLINGS, G.M.; GAYNOR, R.D. Effect of capping materials and procedures on the measured compressive strength of high-strength concrete. *Cement, Concrete, and Aggregates*, v.16, n.2, p173-180, dez. 1994.
- MALHOTRA, V.M. American standards and codes of practice for cement and concrete admixtures. In: *International Congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures*. Florianópolis, Brazil - Junho, 1996. (International Course on Durability of Concrete Structures). Florianópolis, Brazil - Junho, p599-605, 1996.

- MALHOTRA, V.M. Cement concrete admixtures for high-performance concrete: astm and aci specifications and standards. In: International Congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis, Brazil - Junho, p599-605, 1996.
- MALHOTRA, V.M. Superplasticizers: a global review with emphasis on durability and innovative concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, 3., 1989, Ottawa, Canada. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1989. P1-17. (ACI Special Publication, 119).
- MARTINS, M. L. C.; DAL MOLIN, D.; FERNANDEZ-GOMEZ, J. Avaliação de estruturas acabadas em concreto de alta resistência através da extração de testemunhos de diferentes diâmetros. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON 39, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, v.1, p229-240, 1997.
- MEHTA, P.K. High-Performance concrete technology for the future. In: International Congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis, Brazil - Junho, p1-14, 1996.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. PINI, 573p. 1994.
- METHA, P.K.; AİTCIN, P.C. Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1990^a p265-286. (ACI Special Publication, 121).
- MONTEIRO, P.J.M.; HELENE, P.R.L. Designing concrete mixtures for desired mechanical properties and durability. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE. Berkeley, California. Papers... Detroit: American Concrete Institute, 1994. P519-543. (ACI Special Publication, 144).
- NAWY, E.G. Fundamentals of high strength high performance concrete. England. Longman Group limited. 340p. 1996.
- NEVILLE, A. M. High performance concrete – a review. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON 39, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, v.1, pI-IX, 1997
- NEVILLE, A.M. Propriedades do Concreto. PINI, São Paulo, Brasil, 738p, 1997.

- NKINAMUBANZI, P.; BAALBAKI, M.; AÏCTIN, P. Comparison of the performance of four superplasticizers on high-performance concrete. In: FIFTH CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, Supplementary Papers, Rome, p199-214, 1997.
- OKAMURA, H.; OZAWA, H. Self-compacting high performance concrete. *Structural Engineering International*. n.4. p269-270. 1996.
- PAPWORTH, F.; RATCLIFFE, R. High-Performance Concrete - The Concrete Future. *Concrete International*. Out. p39-44. 1994.
- PAZ, M.A.da S. Caracterização dos agregados graúdos da grande Florianópolis e sua utilização em concretos de alta resistência. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 146p, 1998.
- PEREIRA NETO, PAULO M.; DJANILIAN J.G. Algumas características do concreto de alta resistência com microssilica. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, 19p. 1995 (Boletim Técnico, BT/PCC/143).
- RAABE, ANA LUIZA. Aditivos Superplastificantes em Concretos de Cimento Portland: Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, 144p, 1991.
- RAMACHANDRAN, V.S.; BEAUDOIN, J.J.; SHIHUA, Z. Control of slump loss in superplasticized concrete. *Materials and Structures - RILEM*. n.22, p107-111, 1989.
- RAMACHANDRAN, V.S.; MAILVAGANAN, N.P. New developments in chemical admistures. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, Athens, 1992. Proceedings... Montreal: CANMET, p859-898, 1992.
- RAMEZANIANPOUR, A.A.; SIVASUNDARAM, V.; MALHOTRA, V.M. Superplasticizers: their efect on the strength properties of concrete. *Concrete International*, v. , n. , p.30-35, Abril 1995.
- RAVINA, D. Slump retention of fly ash concrete with and without chemical admixtures. *Concrete Internacional*, v.. , n. , p25-29, Abr. 1995.
- RAVINA, D. Tensile strength of green concrete with fly ash and chemical admixtures... *Cement and Concrete Research*, v.25, n.6, p1320-1332, 1995.

- RIIS, K. The rheology of fresh fly ash concrete with high-range water-reducing admixture. In: FIFTH CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, Supplementary Papers, Rome, p252-269, 1997.
- RILEM NATIONAL GROUPS: A REPORT FROM AFREM, FRENCH NATIONAL GROUP. The AFREM method for the mix-design of high performance concrete. *Materials and Structures*, v.30, p439-446, August-September, 1997.
- RILEM TC 115-HSC: Draf Report, December. p, 1990.
- RILEM TC 158-AHC: THE ROLE OF ADMIXTURES IN HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. Draf state-of-the-art report on admixtures in high-performance – part 1. *Materials and Structures*, Suplement March. p47-53, 1997.
- RODRIGUES, M.P.M.C.; ALMEIDA, I.R. Adjuvantes superplastificantes para o betão – características e identificação por espectrofotometria de infravermelhos. Lisboa. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 27p. 1989.
- ROUGERON, P.; AITCIN, P.C. Optimization of the composition of a high-performance concrete. *Cement, Concrete, and Aggregates*. V.16, n.2, Dez. p115-124, 1994.
- SABIR, B.B. High-strength condensed silica fume concrete. *Magazine of Concrete Research*, v.47, n.172, p219-226, Set. 1995.
- SAMARAI, M.A.; RAMAKRISHNAM, V.; MALHOTRA, V.M. Effect of retempering with superplasticizer on properties of fresh and hardened concrete mixed at higher ambient temperatures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, 3., 1989, Ottawa, Canada. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1989. P273-295. (ACI Special Publication, 119).
- SÁNCHEZ, E. Aspectos gerais e reológicos do concreto de alta resistência. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON 39, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, v.1, p643-659, 1997.
- SHAH, S.P. Asummary. In: WORKSHOP ON HIGH STRENGTH CONCRETE. Chicago, 1979. Proceedings... Chicago: National Science Foundation, p1-7. 1979.
- SILVA, E.F.da Concreto de Alto Desempnho: Aplicação pioneira em Brasilia - Brazil. In: International Congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete strutures. Florianópolis, Brazil - Junho, p94-105, 1996.

WHITING, D. Effect of mixing temperature on slump loss and setting time of concrete containing high-range water reducers. *Cement, Concrete and Aggregates*, v.2, n.1, p31-38, 1980.

ZHOU, F.P.; LYDON, F.D. ; BARR, B.I.G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.1, p177-186, 1995.