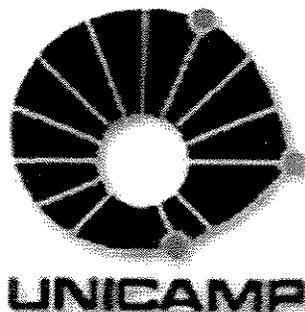


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



CONCRETO DE PÓS REATIVOS

Carlos Eduardo Biz

Campinas

2001

UNICAMP

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

CONCRETO DE PÓS REATIVOS

Carlos Eduardo Biz

Orientador: Newton de Oliveira Pinto Junior

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Campinas, SP
2001

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.

13/6/02

Prof. Dr. 

Matricula: 048232

200245656

UNIDADE Bp
Nº CHAMADA T/UNICAMP
B551c
V _____ EX _____
TOMBO BCI 50962
PROC 16-837/02
C _____ DX _____
PREÇO R\$ 11,00
DATA 26/09/02
Nº CPD _____

CM00173422-7

BIB ID 259078

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B551c Biz, Carlos Eduardo
Concreto de pós reativos / Carlos Eduardo Biz.--
Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Newton de Oliveira Pinto Junior.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Concreto. I. Pinto Junior, Newton de Oliveira. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

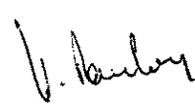
CONCRETO DE PÓS REATIVOS

Newton de Oliveira Pinto Junior

Dissertação de Mestrado : Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Junior
Presidente e Orientador – FEC / UNICAMP**



**Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon
FEC / UNICAMP**

**Profª. Drª. Silvia Regina Soares Silva Vieira
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND**

Campinas, 19 de Dezembro de 2001.

AGRADECIMENTOS

Deixo sinceros agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram direta e indiretamente para a realização desta conquista, em especial minha família e amigos pelo apoio emocional; aos professores, laboratoristas e funcionários da UNICAMP, às empresas que apoiaram com serviços, informações e materiais (ABCP, FOSROC, HOLDERCIM, LAME, MBT, MICROSSÍLICA), e à FAPESP pelo incentivo financeiro empregado ao longo de toda pesquisa através da bolsa de estudo e reserva técnica.

Dedico esta à memória do Sr. NELSON BIZ (meu pai).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE GRÁFICOS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4 METODOLOGIA, ENSAIOS E RESULTADOS	35
4.1 EFICIÊNCIA DE ADITIVOS E UTILIZAÇÃO DO CONE DE MINI SLUMP E CONE DE MARSH COMO FORMA DE AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA.....	35
4.1.1 Materiais Utilizados.....	35
4.1.2 Cone de Mini Slump.....	38
4.1.3 Aditivo Hiperplastificante A.....	42
4.1.4 Cone de Marsh.....	44
4.1.5 Conclusão I.....	47
4.1.6 Resistência à Compressão e Eficiência do Tratamento Térmico na Produção de Concretos de Pós Reativos.....	48
4.1.7 Análise dos Resultados.....	52
4.1.8 Conclusão II.....	53

4.2 SEGUNDA ETAPA.....	55
4.2.1 Estudo de Dosagem I.....	57
4.2.2 Aditivo Hiperplastificante B.....	62
4.2.3 Estudo de dosagem II.....	64
4.2.4 Discussão das Dificuldades Encontradas.....	68
4.2.5 Conclusão.....	70
4.3 TERCEIRA ETAPA.....	71
4.3.1 Teor Ideal de Sílica Ativa.....	71
4.3.2 Cimento CP V-ARI PLUS.....	75
5 CONSIDERAÇÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXOS.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Morfologia da etringita - trissulfatoaluminato de cálcio.....	8
Figura 2 Princípio da transferência de tensões em matrizes fissuradas.....	9
Figura 3 Comparação de resistência à flexão do CPR com argamassa comum.....	13
Figura 4 Limiar de porosidade do CPR versus temperatura de tratamento térmico.....	13
Figura 5 Imagem em MEV – grãos de sílica ativa ao redor de um grão de cimento não hidratado.....	20
Figura 6 a) relação entre teor de carbono e trabalhabilidade; b) relação entre resistência à compressão e porcentagem de álcalis.....	21
Figura 7 Comportamento da transferência da tensão elástica para tensão de atrito.....	24
Figura 8 Detalhe da zona de transição pasta-fibra.....	25
Figura 9 Misturadores empregados na produção do CPR.....	27
Figura 10 Exemplo de confinamento de corpo de prova.....	30
Figura 11 Estrutura tridimensional da passarela de Sherbrook.....	31
Figura 12 Estruturas de mesma capacidade portante. Na seqüência: CPR; aço; concreto armado e concreto protendido.....	33
Figura 13 Exemplos de aplicações em CPR.....	34
Figura 14 Efeito filler da sílica ativa, de acordo com H.BACHE.....	37
Figura 15 Medidas do minicone usado para teste de mini slump.....	38

Figura 16 a) misturador comum de argamassa, b) Becker com o material após a mistura, c) cone de mini slump, d) preenchimento do cone, e) espalhamento em base acrílica; f) medida do espalhamento.....	40
Figura 17 a) misturador industrial, b) preenchimento do cone com mistura (vol. = 2 ls), c) escoamento, d) medida do tempo de escoamento, e) bacia com material em espera entre uma leitura e outra.....	45
Figura 18 Aparelho inicial de tratamento térmico.....	50
Figura 19 Ciclo de tratamento térmico.....	51
Figura 20 Misturador industrial de 3 velocidades e capacidade de 20 litros.....	58
Figura 21 Fotos de ruptura de corpos de prova.....	60
Figura 22 a) ruptura do tipo cônico e b) ruptura por fendimento	61
Figura 23 Presença de bolhas no interior e na superfície dos corpos de prova.....	61
Figura 24 Câmaras de tratamento térmico à vapor.....	64
Figura 25 Moldes, câmara de tratamento com calor e corpos de prova submetidos ao tratamento térmico a 90°C.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Comparativo entre adição e substituição de cimento por sílica.....	43
Gráfico 2	Definição do teor ideal de aditivo para $a/c+s = 0,18$	46
Gráfico 3	Definição do teor ideal de aditivo para $a/c+s = 0,16$	46
Gráfico 4	Resistências à compressão axial.....	52
Gráfico 5	Teste de plasticidade – aditivo hiperplastificante A com diversos cimentos.....	56
Gráfico 6	Ensaio com cone de Marsh - aditivo hiperplastificante A.....	57
Gráfico 7	Resistência à compressão - hiperplastificante A.....	59
Gráfico 8	Ensaio com cone de Marsh - aditivo hiperplastificante B.....	63
Gráfico 9	Ciclo térmico da cura à vapor.....	65
Gráfico 10	Resistência à compressão - hiperplastificante B.....	66
Gráfico 11	Relação resistência x teor de álcalis LARRARD.....	68
Gráfico 12	Teste de resistência à compressão – diferentes teores de sílica ativa.....	73
Gráfico 13	Teste de resistência à compressão – dosagem com elevado consumo de cimento...	75
Gráfico 14	Determinação teor ideal de aditivo para o cimento CP V-ARI PLUS.....	76
Gráfico 15	Teste de resistência à compressão–dosagens com variação de tratamento térmico.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição típica do CPR original.....	11
Tabela 2	Propriedades mecânicas do CPR comparadas com concreto comum e de alto desempenho.....	11
Tabela 3	Composição do CPR utilizado na passarela de Sherbrook.....	32
Tabela 4	Análise física do cimento CP II-fibro 40.....	36
Tabela 5	Propriedades da sílica ativa.....	37
Tabela 6	Resultados dos ensaios com cone de mini slump (aditivo melamina pura).....	41
Tabela 7	Resultados dos ensaios com cone de mini slump (aditivo plastificante e superplastificante.).....	42
Tabela 8	Resultados dos ensaios com cone de mini slump (aditivo hiperplastificante A)....	43
Tabela 9	Tratamento térmico.....	48
Tabela 10	Descrição do traço e das dosagens utilizadas.....	49
Tabela 11	Estudo de dosagem para adição de sílica ativa.....	72
Tabela 12	Descrição da dosagem com consumo elevado de cimento.....	74
Tabela 13	Descrição do traço, consumo de materiais e resultados de resistência.....	77
Tabela 14	Descrição do traço – cimento CP V-ARI PLUS.....	80

RESUMO

Biz, Carlos Eduardo. Concretos de Pós Reativos. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2001, 112 págs. Dissertação.

A pesquisa surgiu da necessidade em conhecer e dominar a nova tecnologia do concreto denominado 'Concreto de Pós Reativos - CPR'. O objetivo inicial era avaliar o desempenho do concreto de pós reativos através dos ensaios de resistência à flexão (com inclusão de microfibras de aço), aderência concreto-concreto, com dois tipos de concretos usuais em pisos industriais (25 e 35 MPa) e resistência à compressão axial. Em função das inúmeras dificuldades encontradas ao longo do estudo, os objetivos dessa dissertação foram ajustados e apresenta-se informações referentes às particularidades e dificuldades para a produção de CPR com a utilização de materiais nacionais, bem como, uma revisão bibliográfica atualizada sobre o assunto. Para tanto, foram realizados estudos de compatibilidade cimento-aditivo através dos métodos do cone de mini slump e cone de Marsh e estudos de dosagem, sob diferentes tipos de cura, buscando atingir resistência à compressão superior a 180 MPa através da aplicação de cura térmica. Os ensaios de compatibilidade mostraram-se muito eficientes, capazes de definir o aditivo mais compatível com o cimento empregado. Quanto as resistências inicialmente previstas, estas não foram atingidas, ficando definido como o fator limitante, os materiais constituintes. Fez-se necessário estudo preliminar, visto que, não há conhecimento do desenvolvimento e da produção de concreto de pós reativos no Brasil, tendo sido estudado e aplicado apenas no exterior.

Palavras Chave: pós reativos, compatibilidade, alta resistência.

ABSTRACT

Biz, Carlos Eduardo. Concretos de Pós Reativos. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2001, 112 págs, Dissertação.

The research was inspired by the demand of knowing and dominating the technology of the named Reactive Powder Concrete - RPC. A first aim was evaluating RPC's performance by means of measuring it's flexural strength (when combined with steel fibers), concrete-concrete bond and axial compressive strength. By reason of numerous complications that have emerged during the works, the research aim was adjusted and what is presented is matter of direct observation of peculiarities and difficulties of RPC production with Brazilian components as well as updated bibliographical review. Tests employing mini slump and Marshal cones were taken to evaluate cement-superplasticizer compatibility and series of mixes, submitted to different curing procedures, were made in an attempt to reach compressive strength higher than 180 MPa after steam thermal curing. Compatibility tests have shown to be very effective, able to reveal the more adequate superplasticizer to the cement employed. On the other hand, expected compressive strengths have not been reached, having the component materials been appointed as the major restriction. Previous research seems to be essential, since there is not enough knowledge on the reactive powder concrete production in Brazil, being studied and applied only in foreign countries.

Keywords: reactive powder, compatibility, high strength.

1 INTRODUÇÃO

A idéia principal na produção de qualquer concreto é a criação de um material com características próximas as rochas, mas com uma propriedade em especial: a vantagem de ser moldável. Com esta visão, foram desenvolvidos os concretos de alto desempenho, buscando, principalmente, atingir elevada durabilidade.

Recentemente, têm-se obtido resistências cada vez maiores para esses concretos, juntamente com maior durabilidade do material, fomentando o seu emprego nas obras atuais. Mas o grande aumento na resistência mecânica não atribuiu uma melhora sensível com relação a fragilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Estudos foram efetuados e concluíram que as fibras de aço conferem maior ductilidade e durabilidade a certas estruturas de concreto, justamente por propiciar ao concreto característica mais dúctil e maior controle de fissuração das peças. O controle da abertura das fissuras dificulta a ação de agentes agressivos no interior da estrutura, bem como contribui para garantir por maior tempo a passivação das armaduras quando existentes. As fibras atuam como ponte de transferência de tensões, aumentando a durabilidade do concreto. A utilização das fibras de aço, em concretos de alto desempenho, vem sendo aplicado com o objetivo de substituir armaduras secundárias e, em certos casos, como pisos industriais, eliminar as armaduras principais também.

Com base nesses conhecimentos e com os estudos da microestrutura do concreto, surgiu o conceito para a elaboração dos concretos de pós reativos - CPR. A tecnologia do CPR foi baseada nas descobertas tecnológicas dos últimos 25 anos, onde foram desenvolvidos materiais à base de cimento Portland com baixíssima porosidade e alta resistência, como o MDF (*Macro Defect Free*), desenvolvido por BERCHALL *et al.*, podendo alcançar resistência à flexão de até

200 Mega Pascal (MPa); bem como outro material desenvolvido por H.H. BACHE, da Companhia de Cimento Allborg-Dinamarca, denominado DSP (*Densified System containing ultrafine Particles*) podendo atingir resistência à compressão de até 200 MPa (AITCIN, 2000).

O concreto de pós reativos desenvolvido por RICHARD *et al*, 1995, é o último material ultra-resistente baseado em cimento Portland desenvolvido. Pode atingir resistência à compressão de até 800 MPa com aplicação de cura térmica e cura com pressão. É composto, basicamente, por areia de quartzo, cimento, pó de quartzo, sílica ativa, fibras de aço de pequenas dimensões e superplastificantes de alta eficiência e uma relação água/aglomerante muito reduzida, entre 0,15 e 0,20. Essa mistura visa obter uma massa mais homogênea, aumento da compacidade otimizada pela granulometria dos materiais finos, melhoria nas propriedades mecânicas da interface pasta-agregado e avanço na propriedade de ductilidade em função da adição das fibras de aço (DUGAT *et al*, 1996). Toda essa preocupação está baseada em uma questão relacionada a microestrutura do concreto: melhoria na zona de transição (diminuição da espessura e menor porosidade na interface).

A microestrutura é a chave do desempenho do CPR, conferindo-lhe diminuta porosidade e permeabilidade (CHEYREZY *et al*, 1995). Uma consequência direta da quase ausência de poros capilares é sua dificuldade de transporte de líquidos e gases na matriz, além de maior resistência ao ciclo gelo e degelo. Isso implica em aumento de resistência a agentes agressivos, tais como ácidos, álcalis, íons cloretos entre outros. Comparado ao concreto convencional, observa-se uma completa mudança estrutural dos materiais proveniente da hidratação do cimento, que se traduz por uma estrutura contínua da fase aglomerante na escala microscópica.

As características do concreto de pós reativos coloca este material comparativamente ao aço, dando aos projetistas uma nova opção de material para ser utilizado nas futuras obras (BINA, 1999). O uso do CPR permitirá uma variação jamais vista na geometria e espessura das peças, em se tratando de concreto. O maior exemplo da aplicação desse novo material é a passarela de Sherbrook, no Canadá, com 60 m de vão, constituída de 6 peças pré fabricadas de 10 m de comprimento (*téchne*, jan/fev 1999). Para elementos submetidos à flexão (vigas e lajes) ou tração (treliça), as tensões de tração e compressão podem ser compensadas por técnicas de

protensão, de tal modo que a configuração dessas estruturas fiquem até três vezes menores do que as fabricadas com concreto convencional.

O concreto de pó reativo vem para ser mais uma alternativa de projeto para obras especiais da construção civil. Mas para isso, faz-se necessário o domínio da técnica de produção e aplicação desse novo material, explorando todo seu potencial de maneira clara e segura.

Com base nessa afirmativa desenvolveu-se esta dissertação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Inicial

Este projeto teve por objetivo inicial a verificação da viabilidade de produção e aplicação do Concretos de Pós Reativos para a produção de peças pré-fabricadas e recuperação de juntas de pisos industriais com a utilização dos materiais nacionais. Para tanto seriam executados ensaios para caracterização das propriedades físicas do Concreto de Pós Reativos como resistência à compressão, aderência concreto-concreto, resistência à flexão e resistência à abrasão.

2.2 Objetivo Final

Em virtude das mudanças ocorridas ao longo da pesquisa em função das inúmeras dificuldades encontradas, propõe-se a divulgação de um parecer completo sobre as dificuldades de se produzir concretos de pó reativo, sob as condições e realidades nacionais (laboratórios, diferença de materiais, etc), colaborando com conclusões e recomendações realistas sobre o assunto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir do patenteamento do cimento Portland, em 1824, por Joseph Aspdin, na Inglaterra, e sua difusão como aglomerante hidráulico, o concreto tem sido o líder no *ranking* dos materiais mais utilizados na construção civil mundial (KATTAR, 1999). O emprego de cimentos já é bem antigo. Os antigos egípcios usavam gesso impuro calcinado. Os gregos e romanos usavam calcário calcinado, e aprenderam, posteriormente, a misturar cal, pozolanas, água, areia e pedra britada, tijolos e telhas. Foi o primeiro concreto da história. A palavra **concreto** vem da palavra latina *concretus*, que significa - crescido junto.

Pode-se afirmar que a grande aceitação do concreto e seu enorme consumo, deve-se a inúmeros fatores, dentre os quais destacam-se: a facilidade de encontrar os materiais que o compõem (água, agregado) com preços relativamente baixos; facilidade de execução em diferentes ambientes, adaptando-se a quase todo tipo de fôrma e principalmente, as características de versatilidade, economia, durabilidade e segurança.

Desde seu aparecimento, no início do século XIX, o concreto vem se desenvolvendo continuamente, sendo alvo de diversos estudos e pesquisas, buscando melhorar suas interações com o meio, de modo a suprir as necessidades de diferentes regiões. Com o surgimento de novas tecnologias, técnicas de produção/execução e novos materiais (aditivos químicos, adições, fibras, etc.), o concreto tem recebido novas funções, tais como buscar um fim ecologicamente correto a inúmeros materiais dotados do rótulo de ‘rejeitos industriais’.

Alguns produtos taxados de ‘rejeitos industriais’ já são adicionados na fabricação de determinados tipos de cimento Portland, a fim de melhorar algumas de suas propriedades, tais como:

- escória de alto forno - produto obtido durante a fabricação do ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas. Reage com a água e hidróxido de cálcio (CaOH_2), desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante ao clínquer, contribuindo para o aumento da resistência final e durabilidade do concreto;
- sílica ativa - produto obtido nos filtros do processo de fabricação do silício metálico. Atua como pozolana, diminuindo a permeabilidade do concreto e aumentando a resistência ao ataque de agentes agressivos. Também influencia positivamente na resistência mecânica dos compósitos.
- cinza volante – proveniente da queima de carvão pulverizado em usinas termoelétricas, quando finamente dividida e com composição química adequada, atuam como excelentes pozolanas.

Através do uso de concreto armado e, posteriormente, o concreto protendido, têm-se construído as maiores obras de infra-estrutura do País, bem como, residências, estruturas comerciais e industriais. O uso do concreto possibilitou mudanças na forma de se projetar e construir, viabilizando a construção de estruturas esbeltas, altas e de formas antes não imagináveis. O consumo desse material tem crescido a cada ano, tornando-o, atualmente, o material mais empregado na construção civil. O ser humano não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser a água.

Com a evolução dos estudos nos concretos de resistência normal, como reologia das misturas, processos executivos e, principalmente, o entendimento da microestrutura do concreto, surgiu o conceito dos concretos de alta resistência - CAR. Há referência do uso do CAR no ano de 1929, apresentando valores da ordem de 28 MPa, bem como na década de 50, nos Estados Unidos, com resistência à compressão de 34 MPa. Nota-se, que o conceito de concreto de alta resistência variou de valor ao longo dos anos, visto que as resistências usuais dos concretos eram diferentes para cada época. Na década de 60, por exemplo, já era comercializado concreto com resistência variando de 41 a 60 MPa. O ACI – American Concrete Institute, em 1993, adotou como definição para concreto de alta resistência, como sendo aquele com resistência à

compressão igual ou superior a 41 MPa. No entanto, reconhece que esta definição varia de acordo com a região, visto que há locais onde se comercializa concreto com resistência em torno de 60 MPa. Logo, o concreto de alta resistência passa a ser classificado como aquele que possui resistência à compressão entre 83 e 103 MPa e há locais, como no Brasil, onde o concreto, usualmente comercializado, está abaixo dos 35 MPa, os concretos com resistência acima são classificados como alta resistência.

A partir da última década, houve uma tendência em não mais denominar concreto de alta resistência (CAR), mas concreto de alto desempenho (CAD). O CAD é definido por MEHTA e AITCIN como sendo um material que possui não somente alta resistência, mas, sobretudo, maior rigidez e estabilidade dimensional e, principalmente, baixa permeabilidade. Isso propiciou modificações no enfoque do concreto, ampliando o horizonte da 'qualidade'. Para os tempos atuais, tal modificação é muito relevante, visto que o concreto de alto desempenho engloba o concreto de alta resistência, mas a recíproca pode não ser verdadeira.

Essa nova visão levou o meio técnico-científico à novas pesquisas como preocupação com a zona de transição entre agregado-pasta de cimento, vazios, poros, adições minerais, etc. As adições, geralmente empregadas no concreto, têm por finalidade melhorar a trabalhabilidade, acelerar ou aumentar o tempo de pega, aumentar a durabilidade do concreto em ambientes agressivos, controlar o desenvolvimento da resistência, melhorar resistência à ação do gelo, permeabilidade, fissuração térmica, redução da porosidade, expansão álcali-agregado e soluções ácidas e sulfatadas.

Esses estudos apresentaram grande avanço com a utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV) no estudo da microscopia do concreto (figura 1). O microscópio eletrônico de varredura é um aparelho que permite a observação e a análise da superfície de amostras espessas através de imagens tridimensionais. A razão principal de sua utilização está associada à alta resolução que pode ser atingida, da ordem de 300 vezes melhor que a do microscópio ótico (ANDRADE *et al.*, 1998). O uso dessa tecnologia favoreceu para o entendimento da formação dos produtos de hidratação do cimento, bem como os produtos gerados por ataques químicos de

agentes agressivos como os íons sulfatos, cloretos, íons de magnésio, produtos de reação álcali-agregado, análise da interface agregado-pasta, porosidade e outros.

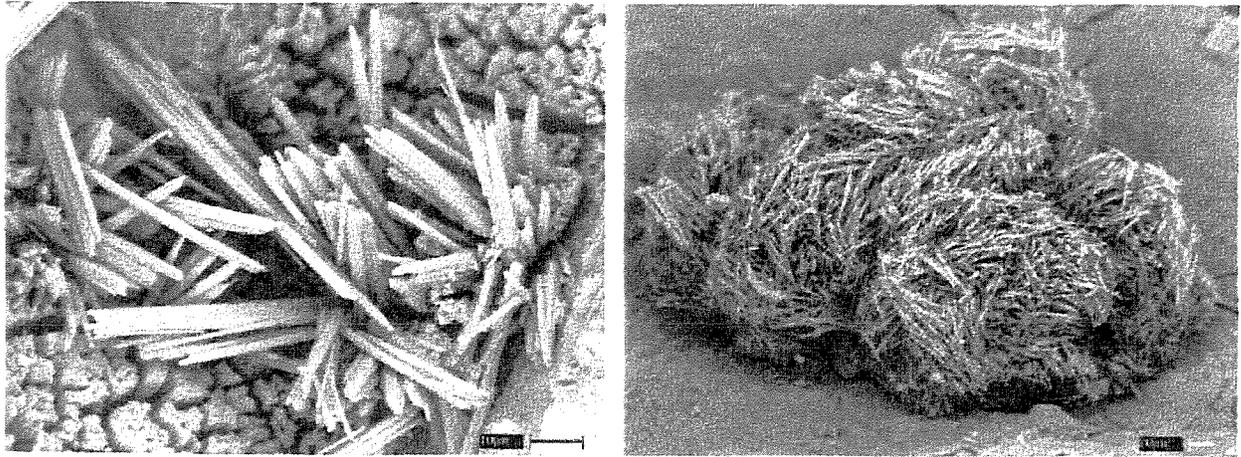


Figura 1 - Morfologia da etringita - trissulfatoaluminato de cálcio (ANDRADE *et al.*, 1998).

A necessidade em diminuir a quantidade de água na mistura para proporcionar aumento na resistência final do compósito, foi acelerada pelo aparecimento dos aditivos plastificantes e, posteriormente, com os superplastificantes. A compactidade do compósito passou a ser a peça chave para obtenção de grandes resistências e maior durabilidade das estruturas em concreto, o que vem garantindo sua enorme utilização e aceitação nas obras atuais. Mas, sabe-se também, que o grande aumento da resistência mecânica dos concretos deixou ainda mais claro uma de suas propriedades: a de material frágil. Propriedade esta que passou a ser amplamente estudada, fomentando a criação e o emprego de novos produtos na produção de alguns tipos de concreto, especialmente os submetidos a tensões de flexão.

Atualmente, a durabilidade das estruturas em concreto está recebendo muito mais enfoque, comparando-se com épocas anteriores. Isso pode ser explicado em virtude das inúmeras patologias que as estruturas de concreto vem apresentando ao longo do tempo. A evolução dos conhecimentos tecnológicos tem imposto ao concreto um desempenho cada vez maior. O avanço e o uso maciço da tecnologia (*software e hardware*), aliado aos notáveis progressos das técnicas de cálculo estrutural, tem proporcionado a criação de estruturas cada vez mais arrojadas, onde o concreto exerce papel principal, sendo submetido a tensões cada vez maiores.

Estudos efetuados por pesquisadores do meio concluíram o grande avanço que as fibras de aço trazem ao controle das aberturas de fissuras, oferecendo maior ductilidade às estruturas (BENTUR *et al.*, 1990). As fibras atuam como controladores das fissuras no compósito (figura 2), servindo como ponte de transferência de tensões após o aparecimento da primeira fissura na matriz do concreto. Isto permite melhorar outras propriedades tais como: resistência à flexão, rigidez, absorção de energia, resistência ao impacto, fadiga e resistência ao ciclo térmico. A parte negativa do emprego de fibras de aço em concreto é a perda de trabalhabilidade, que deve ser compensada com a utilização de aditivos superplastificantes.

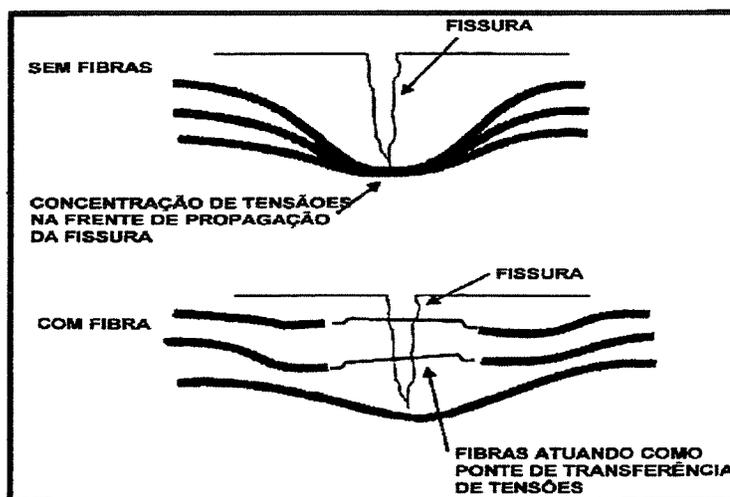


Figura 2 - Princípio da transferência de tensões em matrizes fissuradas. (BENTUR *et al.*, 1990)

Recentemente, duas linhas de pesquisa tem sido seguida, onde a primeira concerne em concreto com matriz de granulometria compacta (DSP – *Densified System containing ultrafine Particles*), desenvolvido por H.H. BACHE, contendo elevada porcentagem de sílica ativa e superplastificante, incorporando agregados com alta resistência e pequeno diâmetro (granito, diabásio e bauxita calcinada). Caracterizado por atingir resistência à compressão entre 150 e 200 MPa, sendo empregado, principalmente, como revestimento industrial resistente ao desgaste, pisos industriais, etc.

Outra linha de pesquisa, são as composições MDF (*Macro Defect Free*), desenvolvidas por BIRSCHALL, *et al* no início dos anos 80, obtidos pela adição de polímeros especiais e

cimento aluminoso, apresentando alta resistência à flexão (200 MPa). A mistura é feita com um misturador Banbury (normalmente empregado nas indústrias de plástico e borracha) na presença de um polímero de álcool polivinílico, que atua primeiro como um poderoso dispersante e depois como um aglomerante reativo (AITCIN, 2000).

Com base nesses conhecimentos e com a evolução nos estudos da microestrutura do concreto, surgiu o conceito para a elaboração dos Concretos de Pós Reativos.

3.1 PRINCÍPIOS E PROPRIEDADES DO CONCRETO DE PÓ REATIVO (CPR)

As pesquisas iniciaram-se na FRANÇA e no CANADÁ - centros de referência do Concreto de Pós Reativos - pelos pesquisadores RICHARD e CHEYREZY, 1995. Foi desenvolvido, inicialmente, para suprimir algumas exigências específicas de estruturas de concreto pré-fabricado submetidos a ambientes agressivo. Posteriormente, em virtude de seu desempenho, o CPR foi estudado e projetado para atender exigências militares, também.

O Concreto de Pós Reativos, segundo seus idealizadores, é baseado no princípio da formação de produto com mínimo defeito, como microfissuras e poros capilares, obtidos pelo aumento da compacidade e resistência dos materiais constituintes da matriz do concreto. Os programas de pesquisa foram conduzidos seguindo alguns princípios (CHEYREZY, 1999):

- a) aumento da homogeneidade pela eliminação do agregado graúdo;
- b) aumento da compacidade pela otimização granulométrica da mistura e aplicação de pressão antes e depois da pega;
- c) progresso da microestrutura pelo tratamento térmico após o endurecimento;
- d) melhoramento da ductilidade pela incorporação de fibras de aço e,
- e) manter os procedimentos de mistura e moldagem tão próximos quanto possível dos padrões existentes.

O concreto de pós reativos é caracterizado por possuir grande quantidade de cimento, material em pó e sílica ativa, sendo que esta última, pode atingir valores de dosagem entre 25 e 35% do peso de cimento. Outra característica marcante é a diminuta quantidade de água na

mistura, onde a relação água/(cimento + sílica), chega a atingir o incrível valor de 0,14. Os concretos de pós reativos originalmente foram divididos em duas famílias: RPC 200 e RPC 800. A tabela 1 apresenta a composição dessas duas famílias de pó reativo e a tabela 2 algumas de suas propriedades.

Tabela 1 - Composição típica do CPR original (DUGAT *et al.*, 1996).

Material (kg/m ³)	CPR 200	CPR 800
Cimento Portland Comum Tipo I (ASTM)	950	980
Sílica ativa	237	225
Pó de quartzo	-	382
Areia	997	490
Fibras de aço 13 mm	146	-
Fibras de aço 3 mm	-	617
Superplastificante (sólidos)	17	18
Água	180	186
Relação a/(c+s)	0,15	0,14

Tabela 2 - Propriedades mecânicas comparadas ao concreto comum e de alto desempenho (DUGAT *et al.*, 1996).

Propriedades	CC	CAD	CPR
Resistência à Compressão Simples (MPa)	20 – 50	60 – 80	200 - 800
Resistência à Flexão (MPa)	4 – 8	6 – 10	15 – 140
Energia de Fratura (J/m ²)	130	140	1000 – 40000
Deformação Última de Tensão (10 ⁻⁶)	100 – 150	100 – 150	2000 - 8000

Como já mencionado, o CPR original não contém agregado graúdo, tendo diâmetro máximo variando entre 300 e 600 µm. Após a publicação e divulgação dos estudos originais dos Concretos de Pós Reativos, alguns pesquisadores passaram a estudar a possibilidade da adição de agregados maiores. Já foram produzidos concretos de pós reativos modificados, contendo areia com diâmetro máximo de 2mm e, posteriormente, substituíram parte desta areia por agregado graúdo de dimensão máxima = 8mm (COLLEPARDI *et al.*, 1997). Os resultados indicaram ser possível a substituição da areia original por igual volume de agregado graúdo bem graduado, sem que haja perda de resistência para uma mesma relação água/aglomerante. Quanto à resistência à

flexão, houve queda de resistência quando substituiu-se toda areia fina (0,15 – 0,40 μ m) pelo agregado graúdo. A presença da areia fina proporciona maior homogeneidade à mistura, refletindo no aumento da resistência de aderência entre matriz de cimento e agregado miúdo.

O concreto de pós reativos é composto basicamente por:

- areia de quartzo;
- sílica ativa;
- pó de quartzo;
- fibras de aço de pequenas dimensões;
- cimento com baixo teor de C_3A e baixa finura Blaine;
- superplastificante de alta eficiência.

Essa mistura visa obter uma massa mais homogênea, juntamente com aumento da compacidade otimizada pela granulometria dos materiais finos, melhoria nas propriedades mecânicas entre pasta e agregado e na propriedade de ductilidade do concreto em função da adição das fibras de aço (figura 3). Toda essa preocupação está baseada em uma questão: microestrutura do concreto no que diz respeito à diminuição da espessura da zona de transição e menor porosidade na interface agregado-pasta, beneficiada justamente pela aplicação do tratamento térmico e por pressão (PAULON, 1991).

O comprimento médio do silicato de cálcio hidratado - CSH e as atividades pozolânicas sofrem importantes incrementos. Vale lembrar que o CSH está diretamente ligado com a resistência da pasta de cimento. Para temperaturas entre 200 e 250°C há uma nova mudança na microestrutura do compósito com o aparecimento de um novo cristal hidratado, identificado como 'xonotlita' (ZANNI *et al.*, 1996). Mais precisamente, os cristais de CSH são transformados em torbemorita, que posteriormente são transformados em xonotlita. Durante tal fenômeno, há uma mudança na porosidade da amostra em virtude da eliminação de parte da água contida inicialmente nos hidratos do CSH (C/H=1), enquanto que os cristais de xonotlita contém menos moléculas de água (C/H=6). Nota-se, também, uma diferença da densidade desses cristais quando são submetidos a tratamento térmico (figura 4).

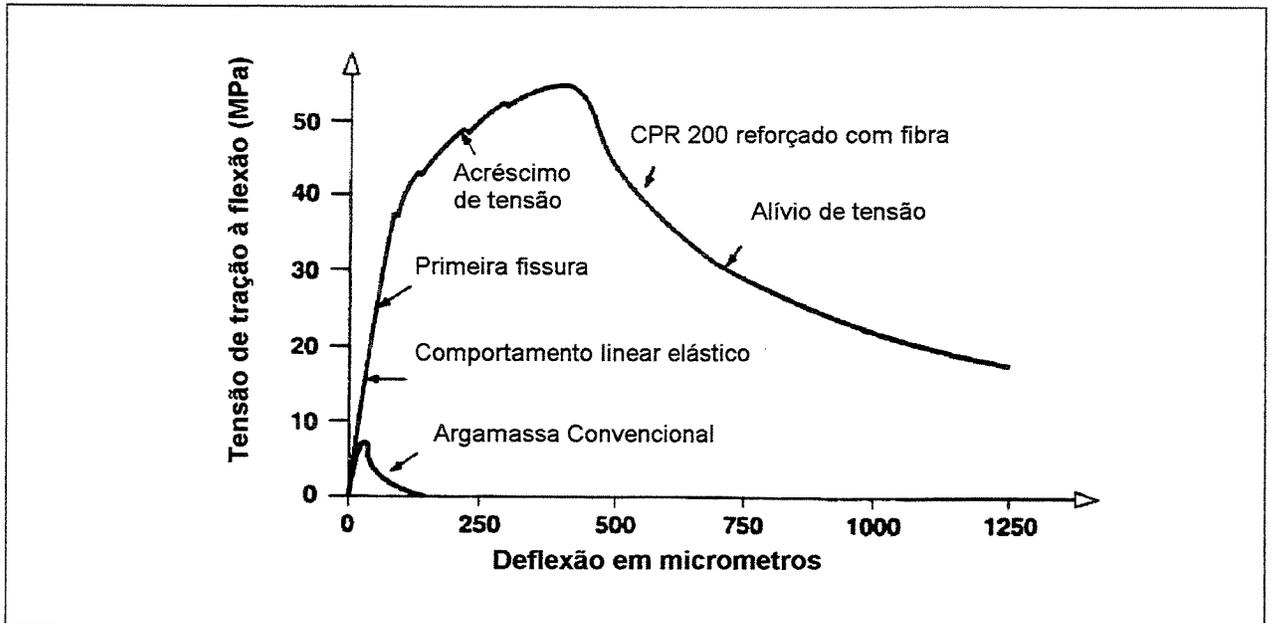


Figura 3 - Comparação de resistência à flexão do CPR com argamassa comum (ANON, 1994).

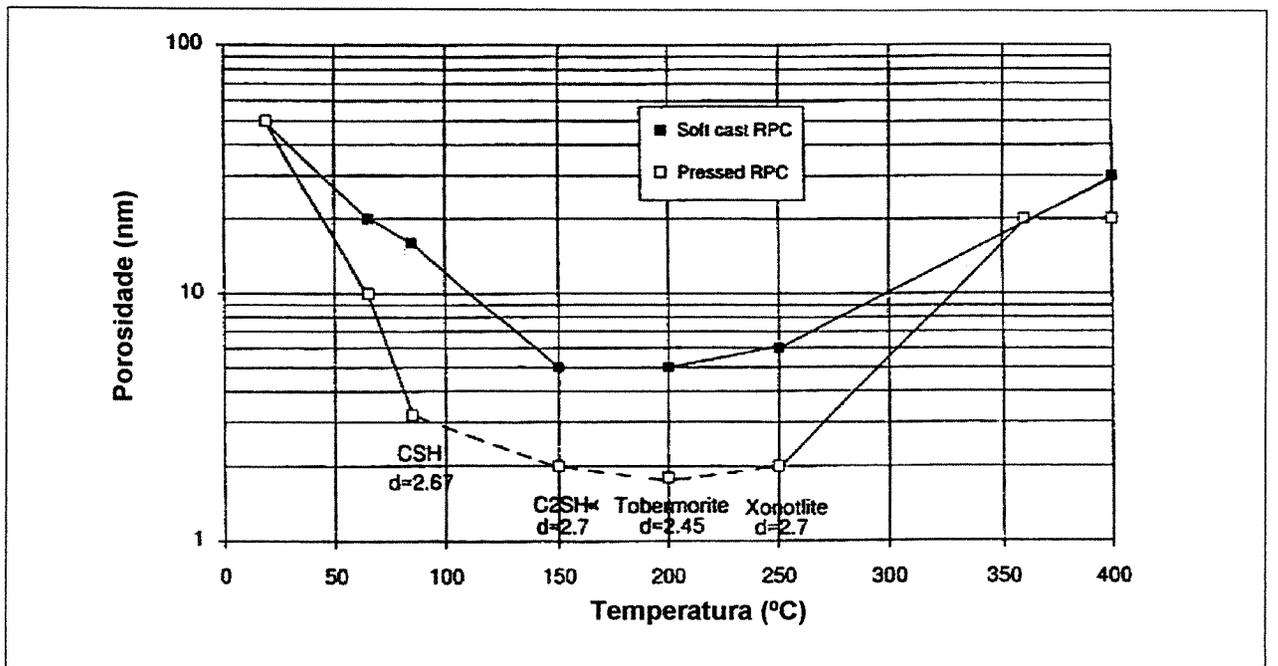


Figura 4 - Limiar de porosidade do CPR versus temperatura de tratamento térmico (CHEYREZY *et al.*, 1995).

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados na fabricação dos concretos de pós reativos possuem características próprias. Devem ser analisados e estudados separadamente para melhor compreensão do seu papel na produção do CPR. Quando se seleciona materiais para a fabricação de concretos de ultra resistência, algumas escolhas são mais críticas que as outras, como é o caso do cimento. Este, deve apresentar desempenho mecânico considerável, uma vez que o desempenho do cimento, em termos de reologia e resistência, torna-se um item crítico à medida que a resistência almejada aumenta e, deve apresentar sensível compatibilidade com o aditivo superfluidificante ou superplastificante, de modo a garantir uma relação água/aglomerante tão baixa quanto necessária.

CIMENTO

De acordo com RICHARD e CHEYREZY, 1995, a escolha do tipo de cimento exige uma indispensável verificação de compatibilidade entre cimentos e aditivos superplastificantes redutores de água. Cimentos com baixo teor de aluminato tricálcio hidratado (C_3A) produzem melhores resultados de espalhamento, enquanto que cimentos com alta finura Blaine não são considerados satisfatórios, em virtude da demanda de água necessária para sua hidratação (COPPOLA *et al.*, 1997). O aumento no consumo de água pode ser explicado pela maior área específica do cimento a ser hidratada, havendo uma reação inicial muito rápida com o superplastificante, comprometendo sua eficiência. O acréscimo de água à mistura causará aumento na relação água/aglomerante, prejudicando algumas propriedades como resistência, permeabilidade e durabilidade do concreto. O desempenho final do cimento na produção de concretos de ultra resistência dependerá da maneira pela qual o comportamento reológico e o desenvolvimento da resistência podem ser, simultaneamente, otimizados.

Cimento com alto módulo de sílica seria o mais indicado para a produção dos Concretos de Pós Reativos ainda, segundo RICHARD, em virtude das características reológicas e desempenho mecânico. Entretanto, esse tipo de cimento apresenta taxa lenta de pega, comprometendo seu uso em algumas aplicações. Cimento convencional de pega rápida e alto desempenho oferece comportamento mecânico muito similar, apesar de uma demanda maior de

água. O produto mais indicado por BONNEAU *et al.*, 1996 e DUGAT *et al.*, 1996, na produção dos concretos de pós reativos é o cimento Portland comum sem adição, ASTM Tipo I (Portland cement). Demais autores utilizaram cimento tipo V da ASTM (*Portland with high sulphate resistance*) nas suas pesquisas com CPR.

O teor de C_3A no cimento influencia o efeito do aditivo superplastificante, sendo que quanto maior esse teor, menor será a eficiência do aditivo sobre o aspecto de plasticidade do concreto (COPPOLA *et al.*, 1997 e COLLEPARDI *et al.*, 1998). Segundo AITCIN, 1998, o cimento recomendado para a produção de concretos de alto desempenho deve apresentar algumas características como menor teor de C_3A possível, a fim de controlar a reologia do cimento; deve conter uma certa quantidade de sulfatos solúveis, não apenas a quantidade correta de SO_3 , com o objetivo de controlar rápida e eficientemente a formação de etringita; e, finalmente, com relação a resistência, esse cimento deve ser finamente moído e conter uma boa quantidade de C_3S , mas não em demasia, em vista da reologia. Como a obtenção de um cimento com essas características é difícil de ser obtido, em muitos estudos o cimento usado é também chamado de cimento Portland especial.

Outro fator muito importante da porcentagem de C_3A no cimento é com relação ao tratamento térmico. Estudo de COPPOLA *et al.*, 1996, compara a influência de diferentes tipos de cimento e sílicas nas propriedades do Concreto de Pós Reativos. Foram estudados 3 (três) diferentes cimentos, contendo aproximadamente 0%, 4% e 11% de C_3A e 3 (três) tipos de sílica - branca, cinza e preta, sendo a diferença principal entre estas o teor de carbono. Os resultados indicaram que o cimento com menor teor de C_3A (zero), apresentou melhores resultados de resistência quando submetido aos tratamentos térmico de 90° e 160° C. Ao substituir o cimento livre de C_3A , que obteve 200 MPa de resistência à compressão aos três dias com tratamento térmico a 160°C, por outros contendo 4% e 11% de C_3A , a relação água/cimento aumentou e a resistência mecânica não ultrapassou 160 MPa.

COPPOLA *et al.*, 1996, não comentou a respeito de análise microscópica das amostras a fim de identificar formação de etringita secundária provocada pelo tratamento térmico aplicado às amostras. Sabe-se que a formação retardada da etringita é expansiva, provocando tensões

internas na matriz de cimento, levando ao aparecimento de fissuras no compósito. Trata-se de um assunto complexo, dominado por poucos e, por isso, deixa espaço para dúvidas. De acordo com YANG *et al.*, 2000, o potencial para a formação atrasada da etringita (FAE), é substancialmente aumentado com a elevação da temperatura de cura. Temperatura de cura inferior a 70°C, a etringita é estável e o potencial para a FAE é baixa. À temperaturas de cura entre 70° e 90°C, a etringita é parcialmente ou totalmente destruída, mas o monossulfato é estável e o potencial para a FAE pode ultrapassar o nível crítico para a expansão. E, finalmente, o potencial para a formação atrasada da etringita é extremamente estimulado quando o material é submetido a temperaturas de cura entre 90° e 100°C. A finura do cimento, a reatividade e as condições a qual o concreto estará submetido, também influenciam na formação atrasada da etringita.

É importante ressaltar, que não há relatos por parte de nenhum dos autores citados nesta revisão bibliográfica sobre a possibilidade ou não da formação da etringita secundária pela aplicação de tratamento térmico nos concretos de pós reativos.

AREIA

Para a produção do CPR original, foi utilizado areia de quartzo com diâmetro máximo de 300µm para se atingir resistências superiores a 200 MPa através de cura térmica e cura sob pressão (ZANNI *et al.*, 1996). A utilização de areia como agregado máximo é justificada pela obtenção de menor permeabilidade do concreto, juntamente com uma melhor homogeneização dos materiais, de modo a garantir a ausência de poros capilares e vazios no compósito. Mas já existem estudos em que o diâmetro máximo foi aumentado para 600µm, 2mm e até 8mm, obtendo resistências à compressão próximo a 200 MPa.

A granulometria exerce papel fundamental para a obtenção de bons resultados. Deve-se atender para uma distribuição granulométrica bem definida, limitando os vazios na mistura. No caso do Concreto de Pós Reativos, a eliminação do agregado graúdo também é justificada pela redução no tamanho de algumas microfissuras provenientes das seguintes origens (RICHARD *et al.*, 1995):

- Mecânica (carregamento externo);
- Química (retração autógena);
- Termo-mecânica (diferente expansão entre pasta e agregado quando sob efeito de tratamento térmico).

Em concreto convencional, os agregados graúdo e miúdo, são os maiores componentes em volume, formando um esqueleto rígido de elementos de granulometria contínua. Isso significa que maior parte da retração da pasta é bloqueada por esse esqueleto granular, a qual resulta em aumento da porosidade. No caso do CPR, o volume de pasta é pelo menos 20% maior do que os vazios da areia não compactada da mistura. Deste modo, os agregados usados na fabricação do CPR não formam um esqueleto rígido, mas um conjunto de partículas aprisionadas dentro de uma matriz contínua. Com isso, há um bloqueio localizado na retração da pasta, enquanto que a retração global não é bloqueada pelo esqueleto rígido.

RICHARD *et al.*, 1995, explica que o diâmetro da areia de quartzo deve ser definido pelo valores de máximo e mínimo. As partículas máximas devem ser de 600 μm e o mínimo em torno de 150 μm , de modo a não interferir com os grãos máximos do cimento. A areia fina é obtida pela separação da areia de quartzo triturada, onde os grãos são mais angulares; ou separando areia natural onde os grãos são mais esféricos. Ambos podem ser usados na fabricação do CPR, mas sabe-se que a demanda de água será menor com a areia natural.

PÓ DE QUARTZO

Para a produção do CPR é utilizado pó de quartzo com diâmetro máximo entre 5 a 25 μm . O material será adicionado à mistura para contribuir para o fechamento do pacote granulométrico, preenchendo os vazios deixados pelos grãos de areia e intensificar as reações pozolânicas quando submetido ao tratamento térmico. A reação pozolânica do pó e da areia de quartzo se dá a partir do aumento da temperatura de cura do concreto. O calor ativa novas reações pozolânicas, consumindo o hidróxido de cálcio (CaOH_2) gerado na hidratação do cimento, produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em maior quantidade e tamanho superior ao

original proveniente da hidratação do cimento. Essa mudança provoca melhora sensível da resistência da pasta e da zona de transição (pasta-agregado miúdo), diminuindo, inclusive, sua espessura.

Quanto ao possível problema de reação álcali-agregado ou álcali-sílica, visto que o pó de quartzo é basicamente sílica, pode-se esperar uma probabilidade extremamente reduzida, uma vez que a quantidade de água presente na mistura é muito reduzida, o que é necessário para que aconteça tal fenômeno e, sua baixa permeabilidade limita a mobilização de íons no interior da amostra.

ADITIVO

O uso de aditivo é imprescindível para a produção dos concretos de pós reativos, devendo ter eficiência indiscutível, para garantir a baixa relação água/aglomerante e boa plasticidade da mistura. Como nem todos os tipos e marcas de aditivos superplastificantes reagem da mesma forma com um determinado cimento, a escolha do aditivo estará restrita aos ensaios de compatibilidade cimento-aditivo pelos métodos do cone de Minislump e cone de Marsh (AITCIN, 1998). A experiência tem mostrado que nem todos os superplastificantes comerciais possuem a mesma eficiência na dispersão de partículas de cimento dentro da mistura, na redução da quantidade de água e no controle da reologia de um traço com relação água/aglomerante muito baixa. Ainda segundo AITCIN, os problemas de compatibilidade podem quase sempre ser ligados à cinética da formação da etringita, que depende do tipo, da quantidade e da reatividade da fase intersticial, do tipo e da solubilidade dos sulfatos presentes no cimento Portland moído e da reatividade inicial do C_3S , os aditivos podem alterar o comportamento do concreto tanto no estado fresco (trabalhabilidade) quanto no estado endurecido (propriedades físicas e mecânicas), devendo, portanto, ser objeto de estudo específico. Deve-se restringir o uso de aditivos contendo cloretos (ACI, 1993) quando adicionado fibras de aço ao concreto para evitar problemas de corrosão.

O propósito do uso de aditivo superplastificante na produção de concretos de pós reativos é justificado pela combinação de três fatores (CHEYREZY, 1999):

- aumento da trabalhabilidade sem mudança na composição da mistura;
- diminuição da quantidade de água empregado na mistura de modo a reduzir a relação água/aglomerante e posteriormente aumento de resistência e durabilidade;
- reduzir ambos, cimento e água, a fim de minimizar efeitos de retração por secagem, retração hidráulica e tensões térmicas provenientes da hidratação do cimento.

Todos os fatores acima são essenciais, também, para produção de estruturas em concreto de alto desempenho com baixa relação água/cimento e alta durabilidade.

Segundo COLLEPARDI *et al.*, 1998, os superplastificantes causam a dispersão das partículas aglomerantes do cimento na pasta do concreto. Essa dispersão causa um aumento da fluidificação na mistura de cimento. Os superplastificantes mais utilizados durante a última década foram os polímeros sintéticos solúveis em água, como a Melamina Formaldeído Sulfonada, Naftaleno Formaldeído Sulfonado, e Lignossulfeto sem açúcar modificado.

Superplastificantes, tais como os sulfonados de melamina e naftaleno, são baseados em polímeros que são absorvidos pelas partículas de cimento. Acumulam-se na superfície das partículas de cimento no início do processo de mistura do concreto. Os grupos sulfônicos das cadeias de polímeros aumentam a carga negativa da superfície das partículas de cimento e dispersam essas partículas por repulsão elétrica (MBT, 2000).

Avanços na tecnologia de produção dos superplastificantes contendo produtos sintéticos alternativos solúveis em água, tem sido proposto na presente década para reduzir a perda parcial ou completa de abatimento de misturas contendo esse tipo de aditivo. Isso provocou o surgimento de uma nova linha de superplastificantes, baseados na família dos Polímeros Acrílicos (PA), tendo demonstrado até o momento melhores resultados comparados com os tradicionais polímeros sulfonados em termo de maior redução de água e melhores índices de abatimento. São encontrados, geralmente, contendo de 30% a 35% de sólidos em solução aquosa, por isso, necessitando contabilizar a parte líquida do aditivo no cálculo da dosagem. Isto se deve, sobretudo, pela alto teor de aditivo empregado na mistura (0,8% a 1,8% da massa de material aglomerante – cimento + sílica).

SÍLICA ATIVA

O uso de adições minerais tem sido bastante difundido com o concreto de alto desempenho. No Brasil, a adição mais utilizada na produção de concretos é a sílica ativa. Este material é um subproduto da indústria na produção de silício em fornos elétricos (VIEIRA *et al.*, 1997). Consiste de partículas extremamente pequenas de sílica amorfa, com diâmetro médio de 0,10µm e superfície específica elevada, da ordem de 20 m²/g. Um grão de sílica chega a ser 100 vezes menor que o do cimento, exercendo influência nas propriedades do concreto fresco e endurecido (MEHTA & MONTEIRO, 1994 e NEVILLE, 1997). Em virtude da necessidade maior de água para manter a trabalhabilidade de concretos e argamassas, o emprego da sílica ativa está sempre condicionado ao uso de aditivos plastificantes e ou superplastificantes.

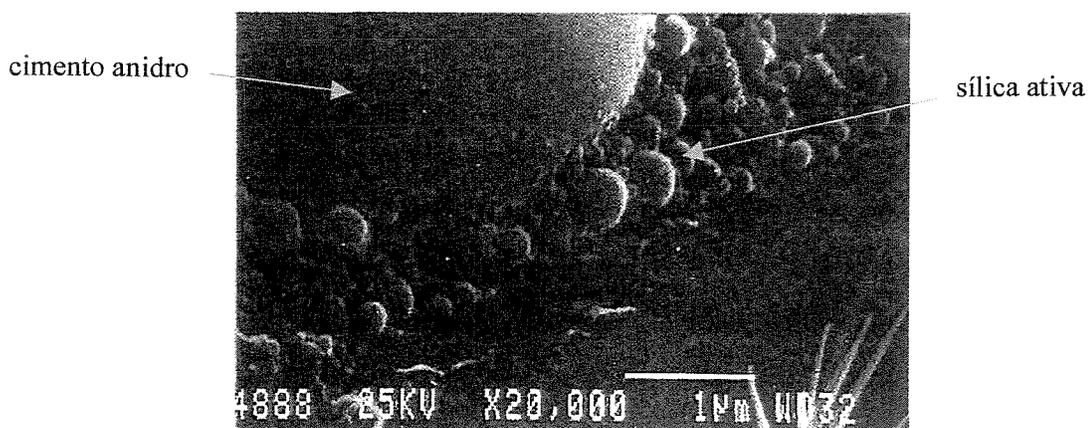


Figura 5 - Imagem em MEV – grãos de sílica ativa ao redor de um grão de cimento não hidratado (CHEYREZY *et al.*, 1995).

A adição da sílica ativa ao concreto tem três principais funções segundo RICHARD *et al.*, 1996 e LARRARD, 1989.

- completar os vazios deixados pelas partículas de cimento, efeito filler;
- melhorar as características reológicas do concreto através do efeito de lubrificação resultado da forma esférica das partículas da sílica;
- produção de hidratos secundários através da atividade pozolânica com Ca(OH)_2 , intensificada no caso dos Concretos de Pós Reativos, pela aplicação de cura térmica.

Devido ao tamanho extremamente reduzido de suas partículas, a adição da sílica ativa reduz drasticamente tanto a exsudação interna quanto superficial da mistura. Essa exsudação é muito importante sob o ponto de vista microestrutural, porque transforma radicalmente as características microestruturais da zona de transição entre pasta e agregado e entre pasta e aço da armadura (GOLDMAN e BENTUR, 1989).

Três parâmetros devem ser usados para caracterizar a sílica ativa: grau de partículas agregadas; natureza e quantidade de impurezas e o tamanho das partículas. A maior qualidade da sílica é a ausência de agregações. São considerados impurezas, segundo LARRARD, 1989, o teor de carbono e os álcalis. O carbono proporciona cor escura à sílica e tem influência na demanda de água, de modo que, quanto maior sua porcentagem, maior será a quantidade de água para uma mesma plasticidade (figura 6-a). O parâmetro químico significativo com respeito à performance pozolânica é a proporção de álcalis na sílica (K_2O , Na_2O). Para a produção de concretos de alta resistência, quanto menor esse teor, melhor será a resistência mecânica (figura 6-b). Já o tamanho das partículas é um fator secundário segundo LARRARD.

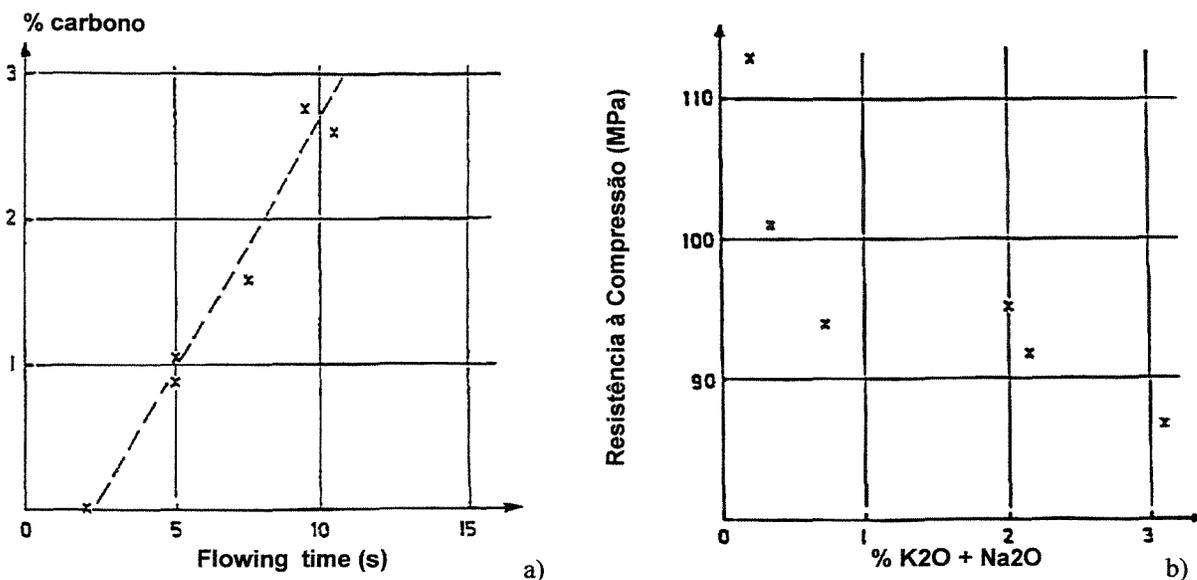


Figura 6 - a) relação entre teor de carbono e trabalhabilidade; b) relação entre resistência à compressão e porcentagem de álcalis LARRARD, 1989.

RICHARD *et al.*, 1995 e LARRARD, 1989, afirmam que a sílica proveniente da indústria de zirconia, livre de impurezas e totalmente desagregada, é a mais indicada. A finura Blaine estaria em torno de (14m²/g), menor do que as sílicas convencionais e o teor de carbono igual a zero. De acordo como estudo de RICHARD, o emprego de sílica ativa livre de impurezas mas com alto valor de finura Blaine (22000 m²/kg), apresentou resultados muito baixos, justificado pela agregação das partículas finas.

O emprego da sílica ativa em concretos de pós reativos é justificado pela capacidade de diminuição da permeabilidade da pasta, aumento da resistência de aderência com o agregado miúdo (menor zona de transição), e pelo acréscimo das reações pozolânicas intensificado pelo tratamento térmico durante etapa de cura.

FIBRAS DE AÇO

Segundo SILVA, 1997, o concreto é um material que apresenta excelente resistência à compressão (f_c) e baixa resistência à tração ($f_t \cong f_c/10$). Se o concreto ao sofrer retrações plásticas ou retração por secagem e a tensão de tração devido a essas ações for superior ao f_t , ele fissurará. Para aumentar a resistência de tração do concreto adiciona-se barras de aço, telas ou fibras.

Existe grande variedade de fibra para uso em matriz de cimento como, por exemplo, fibras de silicatos cristalinos como o amianto; fibras de vidro; fibras de metal como o aço-carbono e aço inox, fibra de carbono; fibra vegetal natural como o sisal, cânhamo, juta, côco, etc.; fibra de polímero como o polipropileno e polietileno. A escolha da fibra é função das características que se deseja o compósito. As fibras mais utilizadas e estudadas até o momento são as fibras de aço. Como o comportamento da matriz do Concreto de Pós Reativos é puramente linear e elástica, correspondendo uma energia de fratura que não excede 30 J/m², fibras de aço devem ser incorporadas ao concreto para aumentar a ductilidade do compósito (RICHARD *et al.*, 1995).

As primeiras utilizações de fibras de aço em concreto ocorreram no início dos anos 60, com fibras retas e teores que variavam de 90 a 100kg/m³ de concreto (FIGUEREDO, 1997). Com o aprimoramento das fibras junto com o aparecimento dos aditivos redutores de água, os concretos reforçados com fibras de aço foram mais amplamente estudados e aplicados.

As fibras de aço comprovaram sua eficiência através da melhora nas propriedades de ductilidade do concreto, fadiga e aumentando da tenacidade ou capacidade do concreto em absorver energia. Isso provocou o aumento da aplicabilidade das fibras de aço, tomando dimensões surpreendentes como na utilização em pavimentos rodoviários, pisos industriais, concreto projetado para revestimentos de túneis NATM e contenção de taludes, bem como em estruturas militares, como projétil e casamatas (FIGUEREDO, 1997).

De acordo com BENTUR e MINDESS, 1990, o mecanismo de funcionamento das fibras ainda é muito estudado e discutido. O comportamento das fibras perante matriz frágil é diferente de matrizes de alta resistência. No caso de matriz frágil, a eficiência da fibra é controlada pelo processo no qual o carregamento é transferido da matriz para as fibras e pelo efeito ponte das fibras sobre as fissuras.

A análise da transferência de tensões é separada em antes e depois do aparecimento da primeira fissura. Antes de qualquer fissura o que comanda é o mecanismo elástico de tensões e o deslocamento longitudinal da fibra. A tensão que aparece na interface da matriz com a fibra é do tipo cisalhante. A tensão elástica cisalhante ao longo da fibra não é igual e nem linear, apresentando um pico na extremidade. A força de atrito é uma tensão cisalhante ainda uniformemente distribuída ao longo da interface da matriz que se torna um efeito muito importante logo após o aparecimento da primeira fissura. A transição da fase elástica para a resistência por atrito ocorre quando a tensão aplicada ultrapassa a resistência ao cisalhamento da interface. Inicia-se então, a perda de aderência e a resistência por atrito entra em ação.

Ainda segundo BENTUR e MINDESS, 1990, a transferência de tensão da fase elástica para a fase por atrito ocorre gradualmente, estando ambos atuando durante o período de transição.

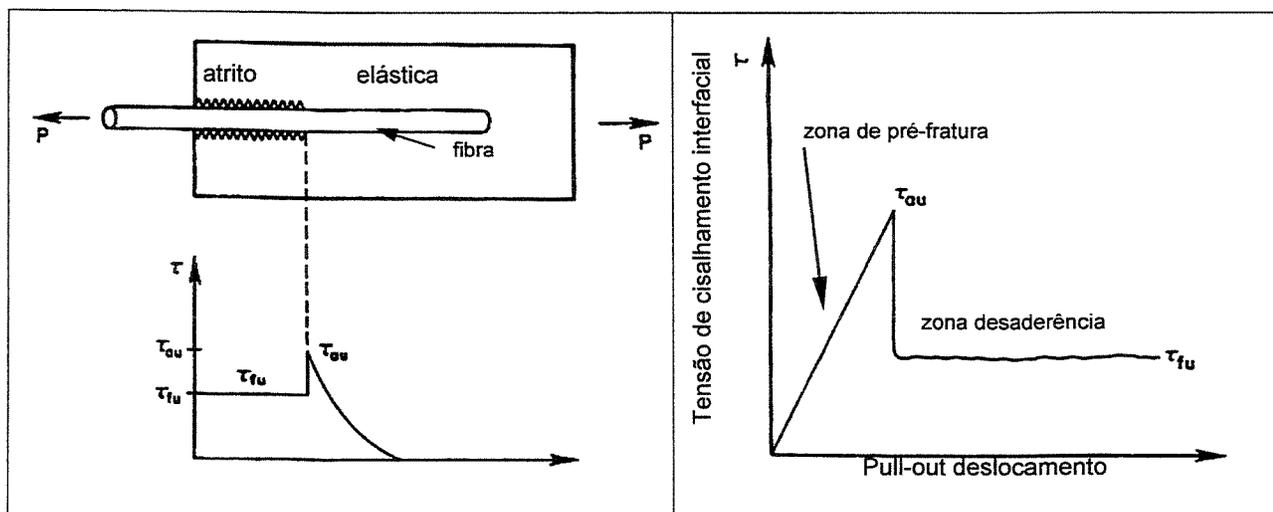


Figura 7 - Comportamento da transferência da tensão elástica para tensão de atrito (BENTUR *et al.*, 1990).

O mecanismo do comportamento dos concretos reforçado com fibras pode ser dividido em 3 etapas:

1. fase elástica, acima do ponto de primeira fissuras, onde a matriz e a fibra estão em seu regime linear;
2. fase de múltiplas fissuras, na qual a deformação do compósito excedeu a deformação última da matriz;
3. estágio de pós-múltiplo fissuramento, durante a qual as fibras são estiradas e arrancadas da matriz fissurada.

No caso de matrizes de alta resistência, estudos de BENTUR e MINDESS, 1990 e BANTHIA, 1994 e 1995, afirmam, que de modo geral, matrizes de alta resistência conduzem a falhas prematuras na forma de arrancamento da matriz ou fratura das fibras, podendo provocar repostas frágeis. As matrizes de concreto de alto desempenho, graças à baixa relação água/aglomerante e pelos efeitos pozolânicos das adições (sílica ativa, etc.), possuem zona de transição fibra-matriz menos porosa em virtude da presença reduzida de cristais de hidróxido de cálcio (figura 8). Conseqüentemente maior será a força necessária para arrancar a fibra após a fissuração da matriz e maiores serão as tensões transferidas às fibras, podendo ocorrer a ruptura da fibra antes mesmo do seu arrancamento. Como a energia gasta para a ruptura da fibra é menor

do que a necessária para o seu arrancamento, a tenacidade à flexão dos compósitos de matrizes de alta resistência tende a ser menor.

Diversos fatores influenciam a eficiência dos compósitos reforçados com fibras, dentre eles o formato, o tamanho e a espessura da fibra. Deve-se estudar alterações dessas características para obter a melhor eficiência do reforço pelas fibras de aço. O teor de fibras presente na matriz também possui grande influência na tenacidade dos concretos reforçados com fibras. O aumento da quantidade de fibra na mistura reflete no aumento da tenacidade à flexão, fato esse observado tanto em concreto convencional quanto em concreto projetado. Entretanto grandes volumes de fibras podem prejudicar o comportamento pós-fissuração em função dos vazios provenientes da má compactação.

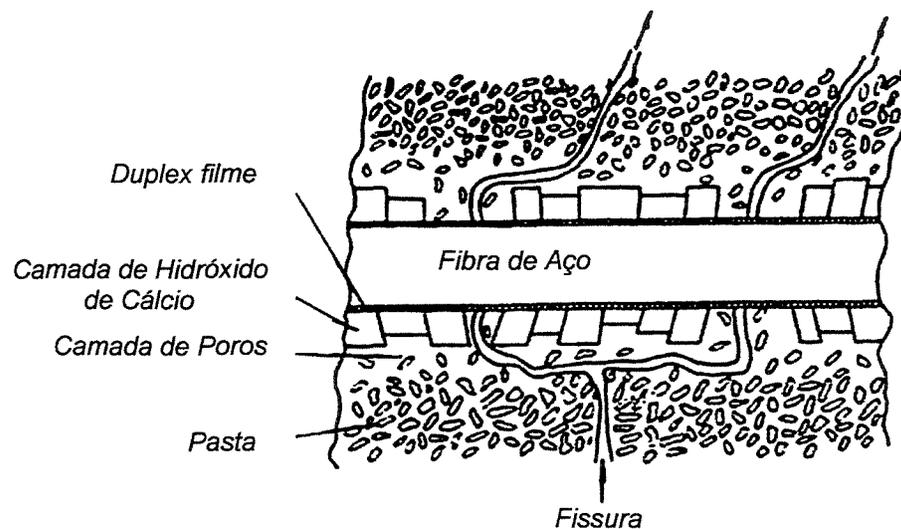


Figura 8 Detalhe da zona de transição pasta-fibra. (BENTUR *et al.*, 1990).

MORENO e OLIVEIRA, 2000, que realizaram estudos com vigas de concreto de alto desempenho reforçadas com fibras de aço, concluíram que pode-se diminuir a taxa de reforço calculado de acordo com as normas de construção, quando se adiciona fibras de aço ao concreto. Essa redução vem da capacidade que as fibras têm de controlar as aberturas das fissuras, e

consequentemente aumentar a contribuição de mecanismos alternativos (contribuição do concreto) na resistência ao cisalhamento nas vigas.

De acordo com BENTUR *et al.*, 1990, há um conceito de volume crítico para fibras introduzido por AVESTON, COOPER e KELLY, 1971. Sendo o volume crítico aquele para qual o compósito mantém uma resistência residual pós-fissuração igual ao da matriz. O volume crítico de fibras é diretamente influenciado pela resistência da matriz. Dependendo do nível de tensões suportado pela matriz após sua ruptura, haverá um maior ou menor nível de carregamento das fibras, em função da transferência de tensões da matriz para as fibras. Desta forma, concretos mais resistentes demandarão maior volume de fibras para a manutenção da tenacidade. Normalmente o volume crítico para as fibras de aço está na ordem de 1% (cerca de 80 kg/m³) em volume do total de concreto, isso para os concretos de resistência normal e de alto desempenho. Até esse valor, os concretos reforçados não apresentam aumento na sua capacidade portante.

Para os Concretos de Pós Reativos, as fibras utilizadas nos diversos estudos são de aço, de pequenas dimensões como 13 mm de comprimento por 0,15 mm de diâmetro (BONNEAU *et al.*, 1997; RICHARD *et al.*, 1995), 12mm por 20mm (LACHEMI *et al.*, 1998) e 13mm por 17,5mm (DUGAT *et al.*, 1996). Também o volume de fibra de aço utilizado no CPR é muito superior aos concretos normais e de alto desempenho. O volume total de fibra varia de 1,5 a 3,0% do volume total da mistura, sendo 2% o valor correspondente mais econômico, aproximadamente 155 kg/m³.

3.3 PRODUÇÃO

Quanto a fabricação dos Concretos de Pós Reativos, se diferencia dos concretos normais e de alto desempenho no tempo de mistura dos materiais. O agregado graúdo, que no concreto convencional ajuda na dispersão dos materiais finos e do cimento, é substituído pelo uso de misturador forçado, no caso, betoneira de contracorrente (figura 9).

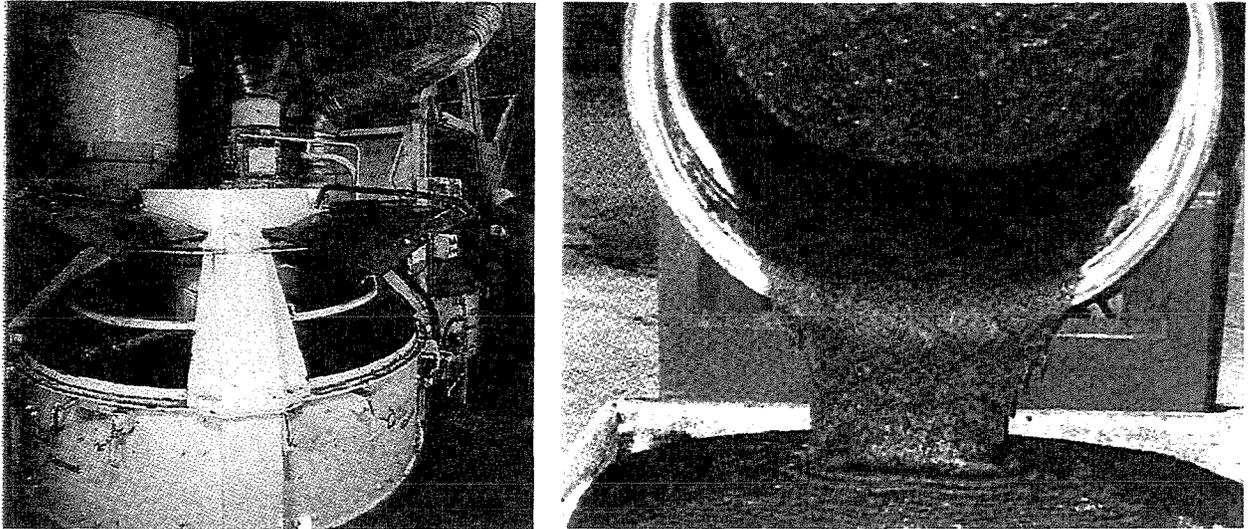


Figura 9 - Misturadores empregados na produção do CPR. (CHEYREZY *et al.*, 1995).

Para medir a plasticidade da mistura adota-se o flow-table ou mesa de espalhamento, em virtude da ausência de agregado graúdo e elevada plasticidade. Os materiais utilizados na fabricação do CPR têm características próprias e por isso devem ser analisados e estudados separadamente para melhor desempenho no momento da mistura. Outro fator característico do CPR é o emprego de tratamento térmico e tratamento por pressão no momento da cura. Pode-se fabricar estruturas sem a aplicação destes tratamentos, mas dificilmente obter-se-á resistências superiores a 200 MPa.

3.3.1 Cura Térmica

Sabe-se que corpos de provas de concreto de resistência normal e até de alto desempenho apresentam piores resultados de resistência à compressão e permeabilidade quando submetidos a algum tipo de tratamento térmico (60°, 80° ou 95°C). O benefício imediato da cura térmica é acelerar a resistência mecânica inicial do concreto. Observa-se, no entanto uma redução na resistência final, comparativamente à cura normal. Esta redução é atribuída ao desenvolvimento de uma microestrutura modificada, com aumento da porosidade.

Segundo MELLO *et al.*, 2000, na hidratação acelerada, inicialmente mais rápida, os produtos formados dificultam a difusão posterior de íons e a microestrutura resultante é caracterizada por elevada concentração de compostos hidratados ao redor dos grãos de cimento. Há uma distribuição não uniforme dos produtos de hidratação e, conseqüente, formação de grandes poros na região 'outer' (espaços iniciais existentes entre os grãos de cimento). As áreas menos resistentes acabam reduzindo a resistência da pasta e do concreto como um todo. Essas alterações na microestrutura são consagradas na literatura como a principal justificativa para o fenômeno da perda de resistência devido à cura térmica.

No caso dos concretos de pós reativo, quando submetidos à cura térmica produzem melhores resultados de resistência mecânica. O tratamento térmico inicial no CPR tem efeito vantajoso no ganho de resistência, pois acelera e estimula novas reações pozolânicas. Se o tratamento térmico for acompanhado de pressão confinante, soma-se o efeito da redução da porosidade, proporcionando maior resistência à compressão. Isso comprova ainda mais as particularidades e diferenças entre o CPR e o demais concretos.

A temperatura 90°C é sugerida em vários trabalhos para a obtenção de maiores resistências, já que nessas condições o quartzo é estimulado e apresenta propriedades pozolânicas. Contudo, temperaturas de 250 e 400°C podem ser usadas quando se deseja atingir níveis de resistência ainda mais elevados.

Estudos realizados por ZANNI *et al.*, 1996, indicam aumento na quantidade e no comprimento do CSH, atribuídos ao progresso da hidratação do cimento provocado pelo aumento da temperatura juntamente com a ação pozolânica da sílica ativa e do pó de quartzo. A atividade pozolânica da sílica ativa é maior, podendo variar de 10% a 75% quando submetidas a temperaturas de 90°C a 250°C.

Análises microscópicas indicaram mudanças na estrutura da zona de transição com o aparecimento de CSH em maior quantidade. A interface apresenta menor porosidade e espessura. ZANNI realizou vários tratamentos térmicos sob diferentes temperaturas de cura. Amostras foram submetidas as temperaturas de 90°C (por 8h, 24h e 48h); 200°C (por 8h) e 250°C (por 8h).

Para temperaturas de 20°C as atividades pozolânicas são baixas, melhoradas um pouco com a presença de sílica ativa e o tamanho dos cristais de C-S-H são pequenos. A atividade pozolânica do pó de quartzo e da sílica ativa, bem como o progresso na hidratação do cimento é sensivelmente estimulado com tratamento térmico a 90°C. Ficou constatado com o estudo realizado por CHEYREZY *et al.*, 1995, grandes mudanças na microscopia do composto quando curados com temperaturas variando de 250°C a 400°C, onde foi encontrada a presença de cristais hidratados de xonotlita.

3.3.2 Cura com Pressão

Para melhorar ainda mais a microestrutura dos concretos, pode-se aplicar pressão nos corpos de prova justamente na fase de endurecimento, particularmente quando o material está confinado em tubos de aço. A pressão aplicada quando o concreto ainda está no estado fresco, faz reduzir os vazios provocados pela água livre na pasta, proporcionando maior entrelaçamento dos hidratos produzidos nas reações, diminuindo conseqüentemente a espessura da zona de transição pasta-agregado e pasta-fibra.

A aplicação de pressão confinante (figura 10) no concreto fresco apresenta três efeitos favoráveis. Quando aplicada por alguns segundos, elimina as bolhas de ar aprisionadas durante a mistura. Se o confinamento for prolongado por alguns minutos, o excesso de água será removido aumentando ainda mais a compacidade. Finalmente, se for mantida a pressão por um período de 6 a 12 horas, a porosidade química criada durante a hidratação do cimento será eliminada. Sabe-se que os produtos de hidratação dos cimentos Portland são volumetricamente menores comparado ao material original. Essa retração química foi identificada por *Le Chatelier*.

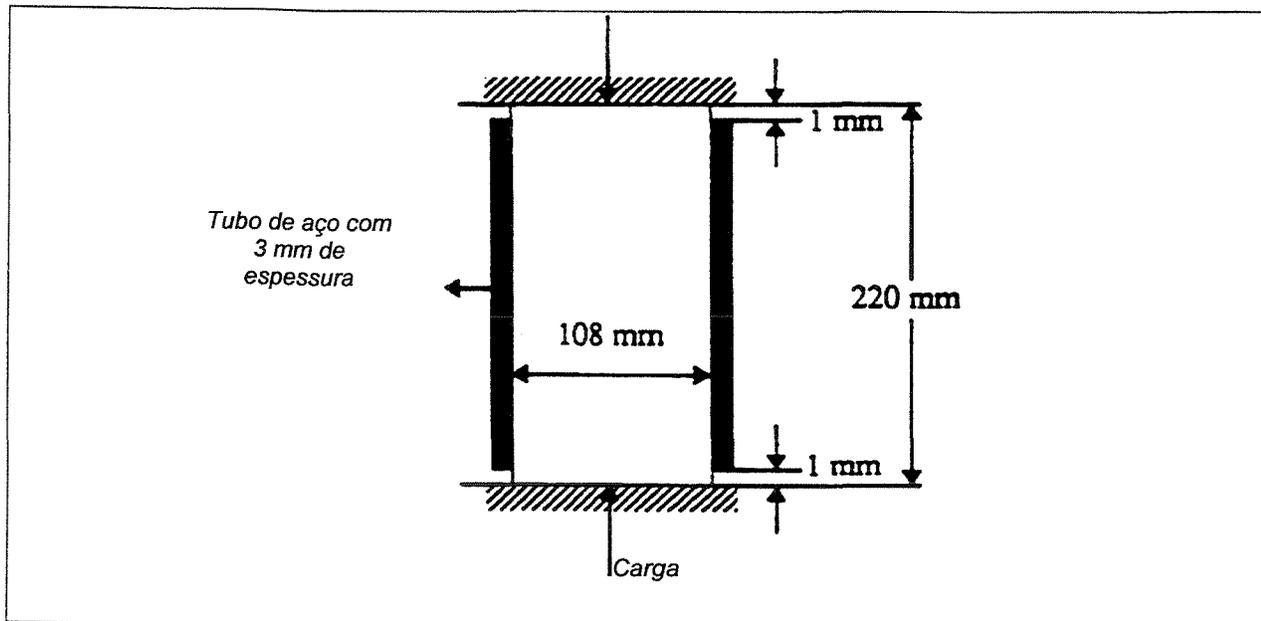


Figura 10 - Exemplo de confinamento de corpo de prova. (BONNEAU *et al.*, 1996).

3.4 APLICAÇÕES

A tecnologia do CPR foi apresentada definitivamente ao público a partir da construção da passarela de Sherbrook (Canadá). O projeto foi elaborado de modo a unir as técnicas de protensão com a elevada resistência à compressão dos concretos de pós reativos. Projetou-se uma estrutura leve, utilizando modelo de treliça tridimensional (figura 11). A estrutura triangular foi feita de elementos pré-fabricados, 6 módulos de 10 m de comprimento e 3,5 m de largura. A espessura do tabuleiro superior não ultrapassou 3cm. Esses elementos foram transportados até o local da passarela, colocados sob pilares provisórios e tensionados após instalação da estrutura. Todas as peças foram submetidas a tratamento térmico à vapor sob temperatura de 90°C.

A dosagem utilizada foi aperfeiçoada, diminuindo a quantidade de cimento empregado na mistura, tornando o custo da obra menor. Mas, sabe-se, que o preço para a fabricação de estruturas em concreto de pó reativo ainda é muito elevado.

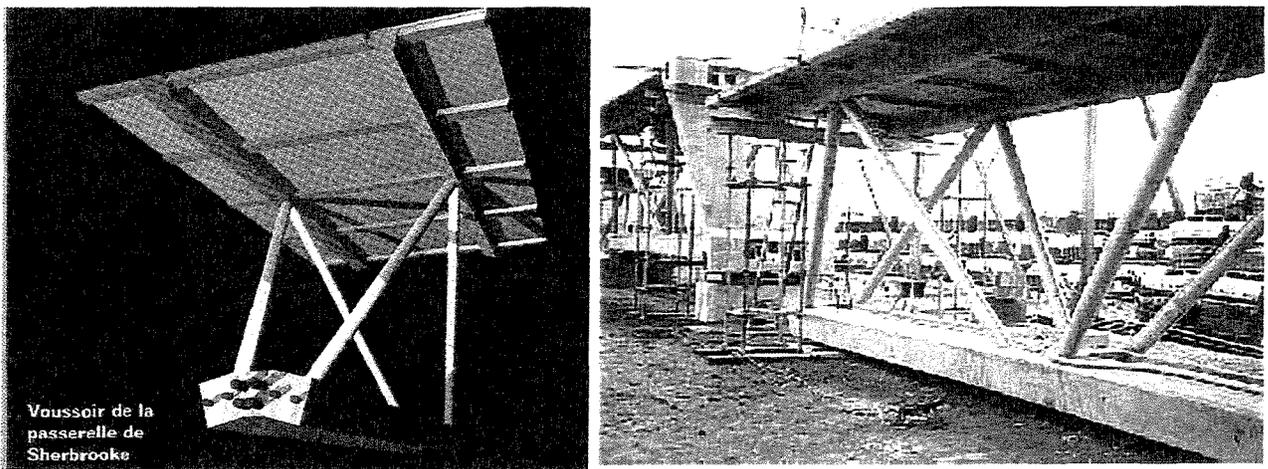
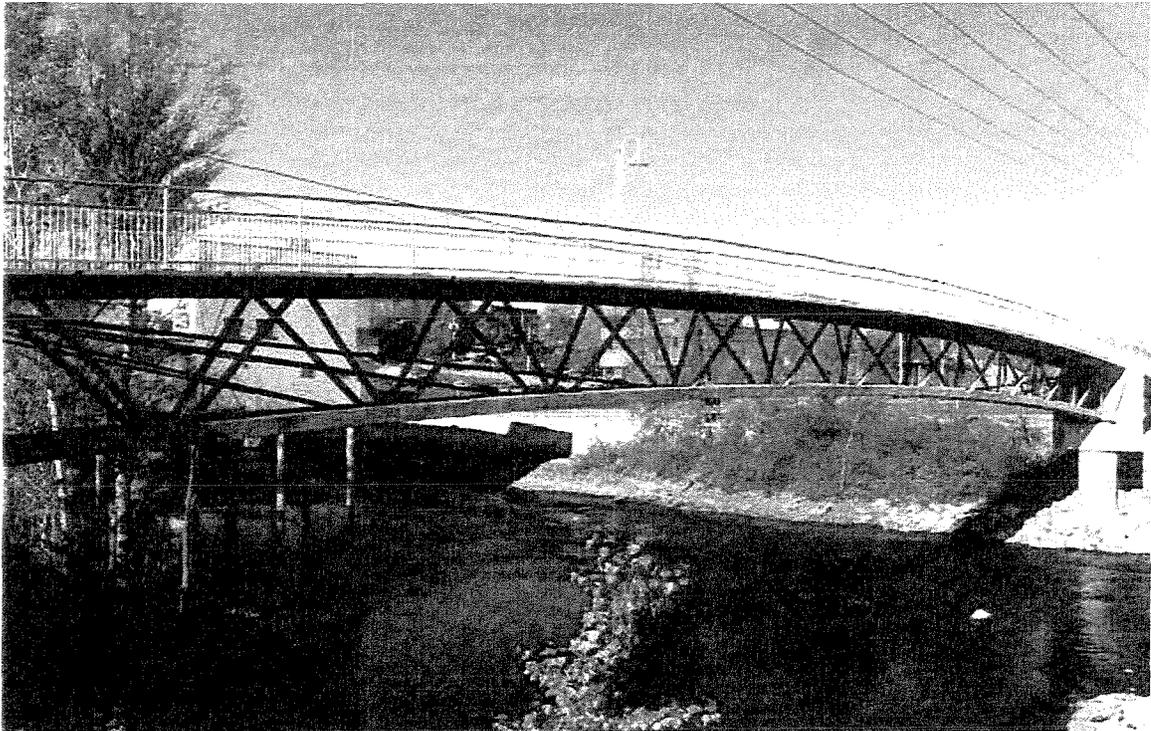


Figura 11 - Estrutura tridimensional e passarela de Sherbrook. (CHEYREZY *et al.*, 1995).

O projeto da passarela permitiu a fabricação de estruturas em CPR sem nenhuma armadura passiva. Nas vigas superiores e inferiores foram empregadas fibras de aço de 12 mm de comprimento e 0,2 mm de espessura, atingindo resistência à compressão de 200 MPa. As diagonais também foram feitas com concreto de pós reativos contendo fibras de aço, sendo confinadas em tubos de aço inoxidável, com espessura de parede da ordem de 3 mm. Foram submetidos à tratamento por pressão no momento da moldagem, o que acarretou em 350 MPa de

resistência à compressão. Posteriormente todo o módulo foi submetido à tratamento térmico a 90°C.

Tabela 3 - Composição do CPR utilizado na passarela de Sherbrook (LACHEMI *et al.*, 1998).

Material	(kg/m ³)
Cimento	705
Silica Ativa	230
Pó de Quartzo	210
Areia	1010
Superplastificante (material sólido)	17
Fibras de aço (12mm)	190
Água	195
Densidade	2557

A fabricação de peças pré-fabricadas é a sua grande aplicação. Por exemplo, em estruturas espaciais leves, tabuleiros de pontes, vigas, colunas, passarelas, placas de revestimentos de túneis, cilindros para laminação, projéteis, engrenagens, etc. Também no Canadá, foi revitalizada uma ponte rodoviária, em que o tabuleiro e a pavimentação original foram substituídos por laje de apenas 5 cm de espessura, reduzindo a carga permanente em até 5 kN/m² (BINA, 1999).

Para a família de concreto idealizado por CHEYREZY e RICHARD, 1995, *RPC 200*, as condições para sua fabricação e aplicação (mistura e moldagem), não diferencia muito da fabricação dos concretos de alto desempenho, mas requerem mais controle. No caso de projeto, deve-se buscar aproveitar as principais características do material como a altíssima resistência à compressão. No caso de elementos submetidos a tensões principais de flexão (vigas e lajes) e tensões principais de tração (tesouras, etc.), deve-se projetar de modo que a estrutura trabalhe sob tensões principais de compressão. Essa transferência de esforços se dá pela protensão das estruturas de concreto. Esse modelo de projeto propicia a obtenção de estruturas até 3 vezes mais leves, comparadas com concreto convencional armado.

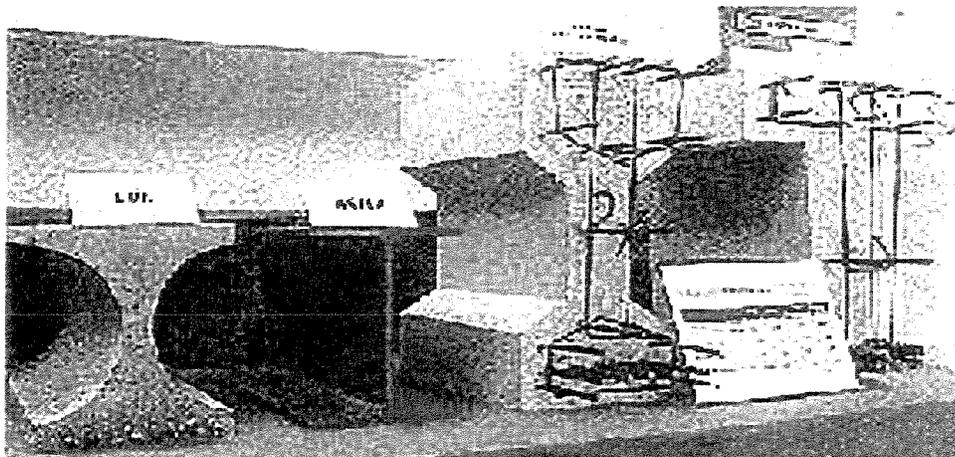


Figura 12 - Estruturas de mesma capacidade portante. Na sequência: CPR; aço; concreto armado e concreto protendido (CHEYREZY *et al.*, 1995).

O CPR pode ser facilmente utilizado em estruturas protendidas sem qualquer armadura passiva. ADELIN, 1996 e RICHARD *et al.*, 1995, testaram a performance de estruturas protendidas em “T” de 10 m de comprimento e estruturas em forma de “X” também protendidas. Concluíram que as tensões primárias de tração são resistidas pela protensão, enquanto que as tensões secundárias, tensões de cisalhamento e todas as tensões de compressão são suportadas diretamente pelo concreto.

GILLILAND, 1996, analisou a viabilidade da utilização de CPR em tabuleiros de pontes protendidas de longos vãos. Outra possível aplicação do CPR é na fabricação de tubos de concreto. Pesquisadores como O'NEIL e DOWD, 1996, produziram em escala industrial, tubos pré-fabricados de concreto de pós reativos, sob diferentes métodos de fabricação: concreto plástico; concreto seco; moldagem sob rotação e pelo método empacotador. Concluíram ser vantajoso o emprego desses tubos em túneis e pequenos shafts, dutos, containers para estoque de resíduos de média reatividade nuclear e tanques de tratamento de água por apresentarem vantagens como produção de peças mais leves, reduzindo o custo do transporte; melhor impermeabilidade a agentes agressivos; melhor precisão e detalhamento das juntas; redução de danos durante manutenção e transporte; agilidade durante a produção entre outros.

Fica claro, a partir de agora, que aplicação desse novo material dependerá do domínio e da divulgação dessa nova tecnologia, bem como, da capacidade de criação de arquitetos e engenheiros, juntamente com estudos de viabilidade econômica.

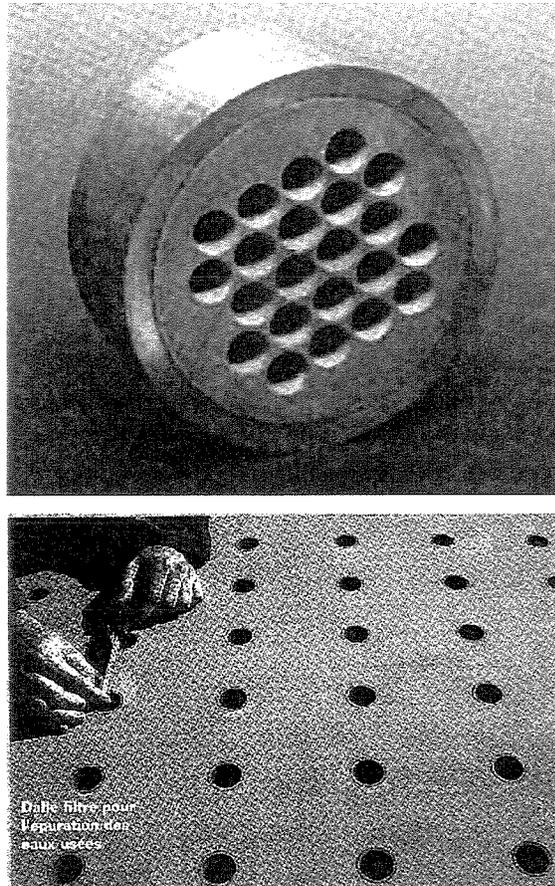


Figura 13 - Exemplos de aplicações com CPR. (CHEYREZY *et al.*, 1995).

4. METODOLOGIA, ENSAIOS E RESULTADOS

Nesta etapa estão contidas todas as informações dos testes realizados, comentando-se, inclusive, as dificuldades e conclusões obtidas ao longo dos períodos. Para melhor esclarecimento, a apresentação das metodologias e seus respectivos resultados foram divididos em 3 etapas.

PRIMEIRA ETAPA

4.1 EFICIÊNCIA DE ADITIVOS E UTILIZAÇÃO DO CONE DE MINI SLUMP E CONE DE MARSH COMO FORMA DE AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA.

Até o momento, ainda é impossível saber, observando apenas as especificações de um determinado cimento e de aditivo superplastificante, que tipo de comportamento reológico se poderia esperar quando misturados com uma relação a/c qualquer. Foram, então, desenvolvidos alguns métodos de análise de eficiência e compatibilidade que, quando bem empregados, permitem fazer uma primeira escolha de qual aditivo apresenta combinações eficientes ou ineficientes com um determinado cimento. Para esse estudo, definem-se os métodos do cone de mini slump e cone de Marsh, baseados em AITCIN, 2000, como forma de análise e determinação do aditivo ideal para a produção dos concretos de pós reativos.

4.1.1 Materiais Empregados

CIMENTO

Quanto ao cimento, o produto mais indicado pela literatura internacional (BONNEAU *et al.*, 1996 e 1997, DUGAT *et al.*, 1996) na produção dos concretos de pós reativos é o cimento comum sem adição, contendo baixos teores de C_3A (próximo a zero) e baixos valores de finura Blaine, este último em virtude da demanda de água necessária para sua hidratação.

A limitação do teor de C_3A está ligada à eficiência de fluidificação do aditivo na pasta (COLLEPARDI *et al.*, 1997). Como não se têm esse tipo de cimento no Brasil, foi adotado, inicialmente, para esse estudo o cimento Portland CP II-fibro 40, cuja análise física está apresentada na tabela 4. Este cimento não está disponível no mercado, foi adquirido diretamente com a fábrica para os primeiros testes.

Tabela 4 - Análise física do cimento CP II-fibro 40.

Finura Blaine	2980 cm^2/g	Início de Pega	3:05 h
Massa Específica	3,11 g/cm^3	Fim de Pega	4:25 h
Rst. 1 dia	9,0 MPa	Rst. 7 dias	36,0 MPa
Rst. 3 dias	24,8 MPa	Rst. 28 dias	44,0 MPa

SÍLICA ATIVA

A adição da sílica ativa ao concreto tem três principais funções:

1. completar os vazios deixados pelas partículas de cimento, contribuindo para o fechamento do pacote granulométrico (efeito filler – figura 14);
2. melhorar as características reológicas do concreto através do efeito de lubrificação, resultado da forma esférica das partículas da sílica;
3. produção de hidratos secundários através da atividade pozolânica com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, intensificada, no caso dos concretos de pós reativos, pela aplicação de cura térmica. Este tratamento intensifica a produção de CSH, em maior quantidade e de maiores dimensões, aumentando a resistência da matriz e diminuindo a porosidade.

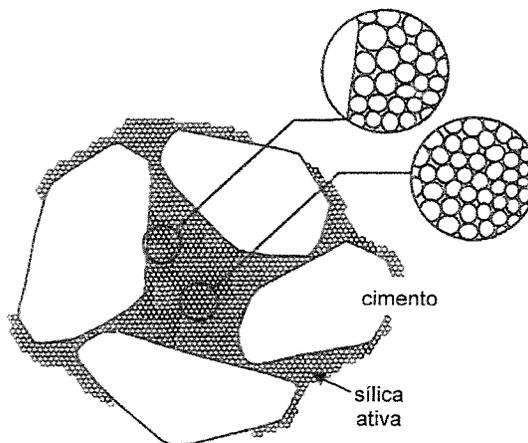


Figura 14 - Efeito filler da sílica ativa, de acordo com H.BACHE.

A sílica ativa utilizada nesta pesquisa possui coloração cinza, disponível no mercado nacional na forma de pó, contendo as propriedades físico-química descritas na tabela 5 de acordo com o fabricante. Atualmente, no mercado nacional, estão disponíveis apenas duas marcas de sílica ativa.

Tabela 5 - Propriedades da sílica ativa.

Principais Componentes	Valores médios		
SiO ₂	94,580%		
Al ₂ O ₃	0,050%		
Fe ₂ O ₃	0,505%		
P ₂ O ₅	0,227%		
CaO	0,176%		
MgO	0,458%	Perda ao Fogo (975°C)	0,508%
MnO	0,087%	Teor de carbono	0,81%
Na ₂ O	0,219%	Densidade aparente	172,8 kg/m ³
K ₂ O	1,224%	Massa específica	2,21 g/cm ³
H ₂ O	0,414%	Área específica	18000 m ² /kg

ADITIVO

O aditivo redutor de água a ser utilizado na produção dos concretos de pós reativos deve ser de alta eficiência, para garantir a baixa relação água/aglomerante, indispensável para a sua produção (relação < 0,20). Em virtude do desconhecimento do aditivo utilizado nos estudos

internacionais sobre o CPR (nome comercial), procurou-se encontrar, dentre os nacionais, algum aditivo capaz de conferir as propriedades desejadas. Os estudos de compatibilidade iniciaram por testes com cone de mini slump, relatado no item 1.2. O aditivo em pó, denominado **melamina pura** foi o primeiro a ser testado, obtido diretamente com o fabricante, visto que o mesmo não está disponível no mercado e não se dispunha, no início da pesquisa, de um aditivo com as características descritas nas bibliografias internacionais.

4.1.2 Cone de Mini Slump

O método de análise adotado foi baseado no ensaio de cone de “mini slump” de AITCIN, 2000. Este método, nada mais é do que a verificação do abatimento com uma pequena quantidade de pasta, o que o torna um método rápido de verificação de eficiência e compatibilidade cimento-aditivo. O detalhamento do cone de mini slump utilizado nessa pesquisa está apresentado na figura.15 e, a seqüência do ensaio na figura.3. O cone é preenchido com o material até a altura de 57,2 mm, sendo golpeado 10 vezes com auxílio de uma espátula, antes de ser erguido sobre placa de acrílico. Normalmente, o abatimento é medido aos 10, 30, 40, 60, 90 e 120 min, para dar uma idéia da perda de abatimento ao longo do tempo.

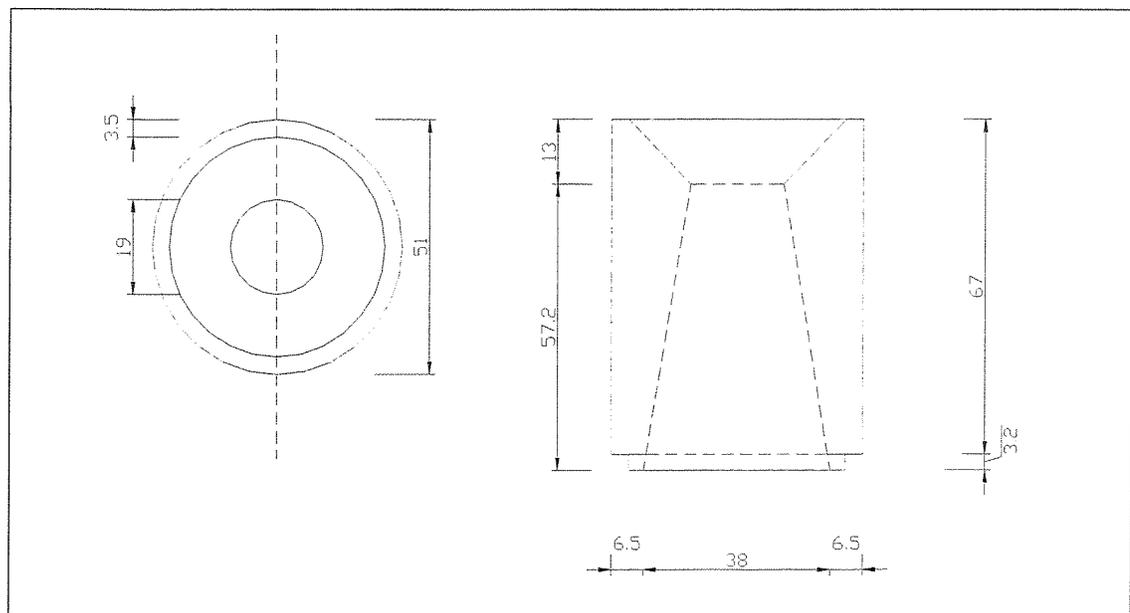


Figura 15 - Medidas do minicone usado para teste de mini slump (medidas em mm).

Como esse método recomenda a realização do ensaio com uma relação $a/c=0,35$ e os concretos de pós reativos possuem relação inferior a 0,20, define-se para este estudo, que o aditivo é considerado compatível quando o mesmo é capaz de homogeneizar a mistura e proporcionar uma fluidez mínima capaz de moldar o cone de mini slump. O processo de mistura dos materiais no misturador comum para argamassas seguiu a seguinte seqüência:

- a) misturar aditivo em pó com o cimento;
- b) misturar aditivo líquido com a água;
- c) misturar o material no misturador por 1,5 minutos em velocidade baixa;
- d) fazer a raspagem do material aderido às bordas em 30 segundos;
- e) misturar por mais 8 minutos em velocidade alta;
- f) colocar o material em um becker cobrindo-o com plástico para evitar evaporação;
- g) antes de cada ensaio, o material é misturado com uma espátula, por 30 seg.;
- h) o mini cone é colocado no centro da placa e preenchido até a marca definida, sendo erguido após aplicação de 10 golpes na parte superior, para acomodação da mistura;
- i) por fim, a leitura do espalhamento, medindo-se duas ortogonais e adotando a média como resultado final.

A temperatura da sala durante os ensaios variou entre 23 e 26°C. A medida do espalhamento se dá pela média aritmética de duas medidas ortogonais entre si. Deve-se garantir, durante todo ensaio, uma superfície limpa e plana, sendo que para isso, utilizou-se uma placa de acrílico como superfície. Após a medição do espalhamento, o material é recolhido ao becker, com auxílio de uma espátula, e tampado, novamente, com plástico para evitar evaporação.

Foram feitas diversas dosagens partindo-se de uma relação água/cimento considerada alta, igual a 0,35, chegando-se até uma relação de 0,20, conforme tabela 6. Diante dos resultados, concluiu-se que o aditivo denominado melamina pura foi considerado ineficiente e incompatível para a produção de CPR, em virtude da incapacidade de fluidificar misturas com relação água/cimento inferior a 0,25. Vale lembrar que os concretos de pó reativo trabalham com relações água/aglomerante inferiores a 0,20.

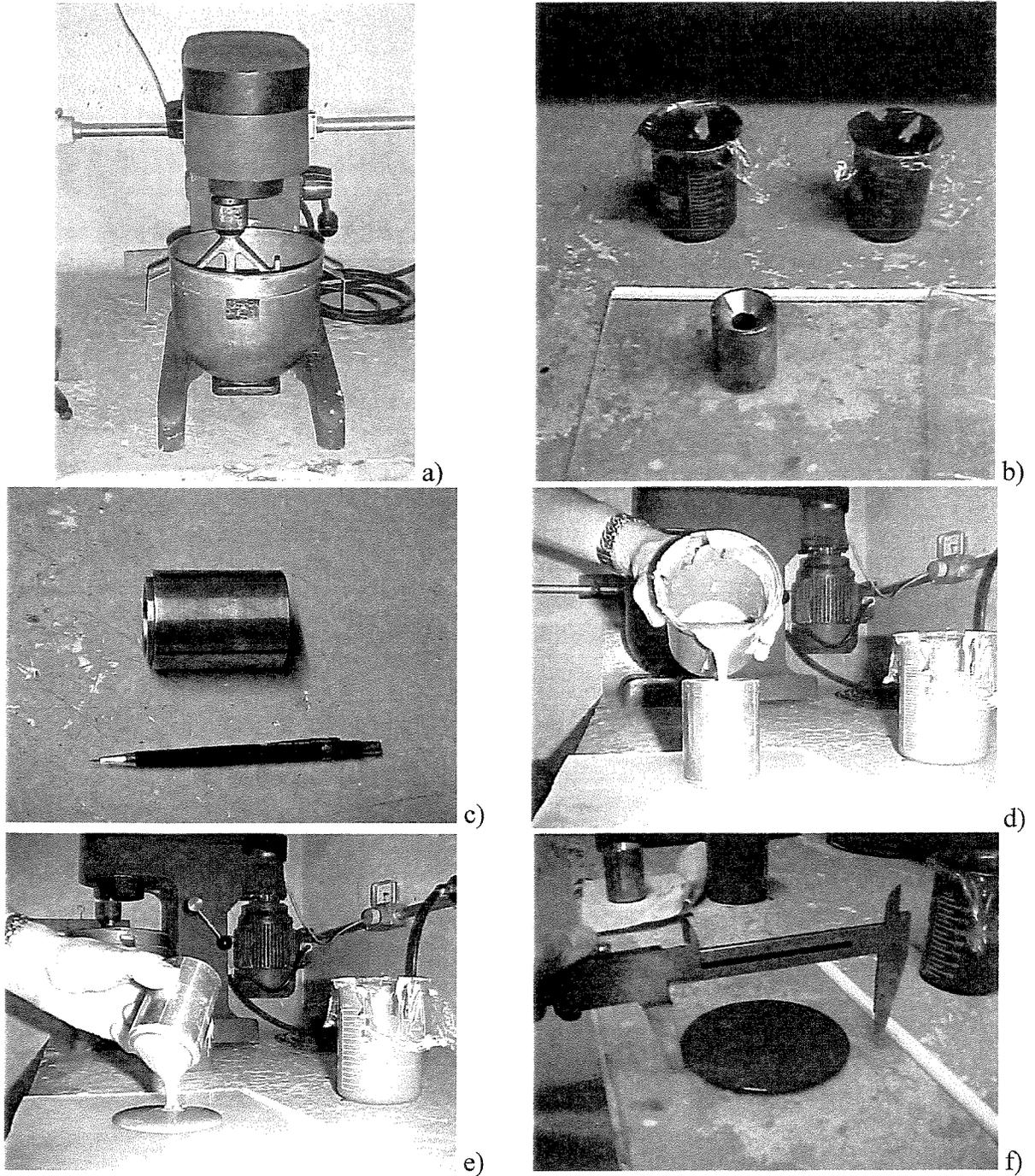


Figura 16 - a) misturador comum de argamassa, b) Becker com o material após a mistura, c) cone de mini slump, d) preenchimento do cone, e) espalhamento em base acrílica; f) medida do espalhamento (fonte: este pesquisador).

Tabela 6 - Resultados dos ensaios com cone de mini slump (aditivo melamina pura).

ADITIVO MELAMINA PURA				
	Relação A/C	% de Aditivo	% de Sílica	Compatibilidade
1)	0,20	1,0	0	negativo
2)	0,20	2,0	0	negativo
3)	0,20	2,4	0	negativo
4)	0,23	2,5	0	negativo
5)	0,23	3,0	0	negativo
6)	0,25	1,0	0	negativo
7)	0,25	1,8	0	positivo
8)	0,25	2,0	0	positivo
9)	0,25	3,0	0	positivo
10)	0,35	1,0	0	positivo
11)	0,35	1,0	25	negativo
12)	0,25	1,8	25	negativo
13)	0,25	3,0	20	negativo

Após os ensaios com o aditivo melamina pura, partiu-se para estudar novos aditivos, dentre os quais um plastificante à base de melamina (líquido) e um superplastificante melamina sulfonada (líquido), todos disponíveis, comercialmente, no mercado nacional. Além de ensaiá-los, individualmente, foi testado inclusive, a incorporação de dois aditivos ao mesmo tempo, para fins de compatibilidade. Os resultados desses ensaios estão descritos na tabela 7.

Novamente, os resultados obtidos foram insatisfatórios, sendo necessário encontrar e testar novos aditivos, refazendo-se os testes de compatibilidade com o cone de mini slump. Após diversas experiências, foi encomendado e testado um aditivo recém chegado ao mercado, denominado, para fins desta pesquisa, de **hiperplastificante A**.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios com cone de mini slump.

ADITIVO MELAMINA PURA (pó) + PLASTIFICANTE (líquido)					
	Relação A/C	% de Melamina	% de Plastific.	% de Sílica	Compatibilidade
14)	0,25	3,0	0,4	20	negativo
15)	0,25	2,0	0,4	20	negativo
16)	0,25	1,0	0,6	20	negativo
17)	0,30	2,0	0,6	20	negativo

ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE (líquido)				
	Relação A/C	% de Aditivo	% de Sílica	Compatibilidade
18)	0,25	1,8	0	negativo
19)	0,25	1,0	0	negativo
20)	0,25	2,0	0	positivo
21)	0,35	1,0	0	positivo

4.1.3 Aditivo Hiperplastificante A

É um aditivo líquido, de cor marrom, contendo 28,7% de sólidos na mistura e massa específica = 1,099 g/cm³ (ensaios realizados pelo Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME, da Universidade Federal do Paraná) caracterizado, no mercado, como superplastificante de terceira geração.

Foram testados diversos teores sob diferentes relações água/aglomerante, obtendo-se sucesso de compatibilidade e fluidez com o mesmo. Vale observar que além do cimento, foi adicionado à pasta, o teor de sílica, usualmente empregado nas dosagem com concreto de pós reativos: 30% do peso de cimento.

Através desses resultados apresentados na tabela 8, ficou constatado, além da compatibilidade cimento-aditivo, que, do ponto de vista de fluidez, deve-se calcular a incorporação da sílica ativa como uma adição, em vez de substituir uma mesma porcentagem de cimento para obter melhores resultados de fluidez da mistura. O gráfico 1 confirma essa afirmação.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios com cone de mini slump (aditivo hiperplastificante A).

ADITIVO HIPERPLASTIFICANTE A (líquido)					
	Relação A/C+S	% de Aditivo	Substituição de cimento por sílica (%)	Cimento	Compatibilidade
22)	0,19	1,0	30	CP II-fibro 40	negativo
23)	0,19	1,8	30	CP II-fibro 40	positivo
24)	0,20	1,8	30	CP II-fibro 40	positivo
25)	0,20	1,5	30	CP II-fibro 40	positivo
26)	0,22	1,2	30	CP II-fibro 40	positivo
27)	0,26	1,2	20	CP II-fibro 40	positivo
28)	0,26	1,2	30	CP II-fibro 40	positivo
	Relação A/C+S	% de Aditivo	Adição de sílica (%)	Cimento	Compatibilidade
29)	0,19	1,8	30	CP II-fibro 40	positivo
30)	0,19	1,2	30	CP II-fibro 40	positivo
31)	0,20	1,8	30	CP II-fibro 40	positivo
32)	0,20	1,2	30	CP II-fibro 40	positivo

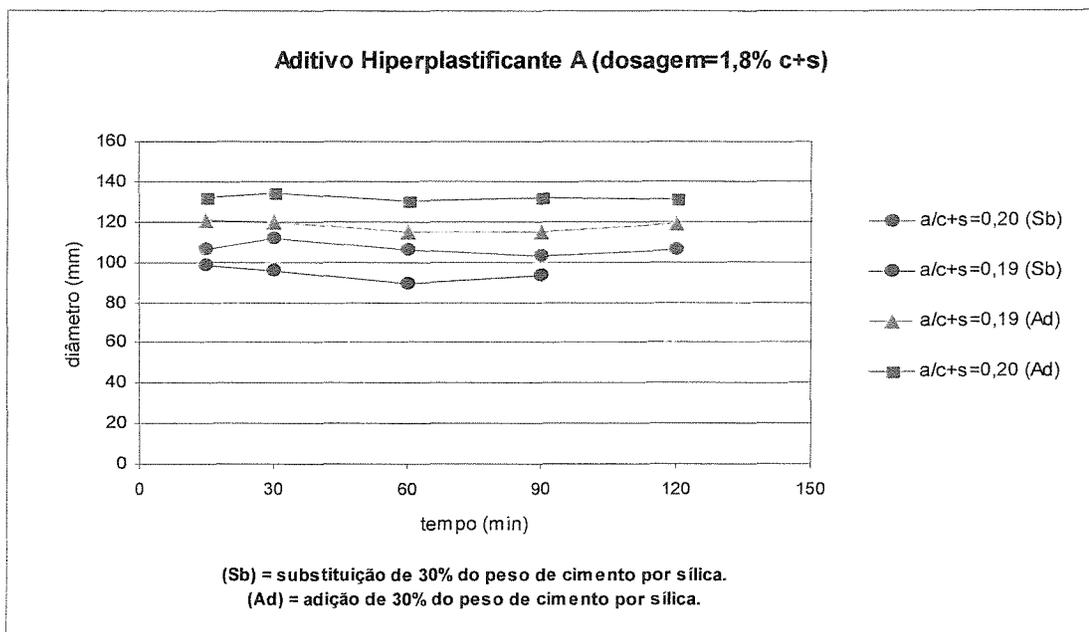


Gráfico 1 - Comparativo entre adição e substituição de cimento por sílica.

Outra conclusão retirada desta etapa, é a constatação da perda da consistência que a sílica ativa causa à pasta de cimento. A porcentagem de sílica adotada na mistura foi de 30%, em relação ao peso do cimento. Esse alto valor foi retirado das dosagens encontradas nas literaturas, na qual o programa está sendo baseado. A justificativa para tal fato, segundo os idealizadores, é a contribuição que a sílica ativa propicia, aumentando as reações pozolânicas após o concreto ser submetido a tratamento térmico.

Com a definição do aditivo hiperplastificante A, avançou-se para a etapa seguinte: determinação do teor ideal de aditivo pelo método do cone de Marsh, baseado em AITCIN, 1998.

4.1.4 Cone de Marsh

Os cones de Marsh foram usados, por muito tempo, em diferentes setores industriais para avaliar a fluidez de diferentes tipos de grautes e de lama, tais como as lamas de perfuração na indústria de petróleo, os grautes de injeção em rochas e solos, e os grautes de injeção para bainhas de protensão. O princípio do método, consiste em preparar uma pasta e medir quanto tempo demora para que uma certa quantidade da pasta escoe através de um funil com um dado diâmetro.

Através do ensaio de mini slump ficou confirmada a maior fluidificação da mistura com o emprego do aditivo hiperplastificante A. Para determinar a porcentagem ideal desse aditivo, foram realizados ensaios com o cone de Marsh para duas relações água/aglomerante ($a/c+s$) = 0,18 e 0,16. A forma de mistura e leitura dos resultados estão apresentados na figura 17, sendo que o misturador, utilizado para homogeneizar o material, foi um liqüidificador industrial de 8 litros em virtude da maior capacidade de mistura diante dos misturadores comuns de argamassa. O processo de mistura consiste em:

- a) misturar em recipiente, à parte, a sílica com o cimento;
- b) diluir o aditivo hiperplastificante na água;

- c) colocar a água + aditivo no misturador adicionando 50% do material em 60 segundos;
- d) misturar até o material estar fluido e adicionar, vagarosamente, o restante do cimento com a sílica em até 3 min;
- e) O tempo total de mistura foi de 9 min, sendo efetuada, em seguida, a primeira leitura.

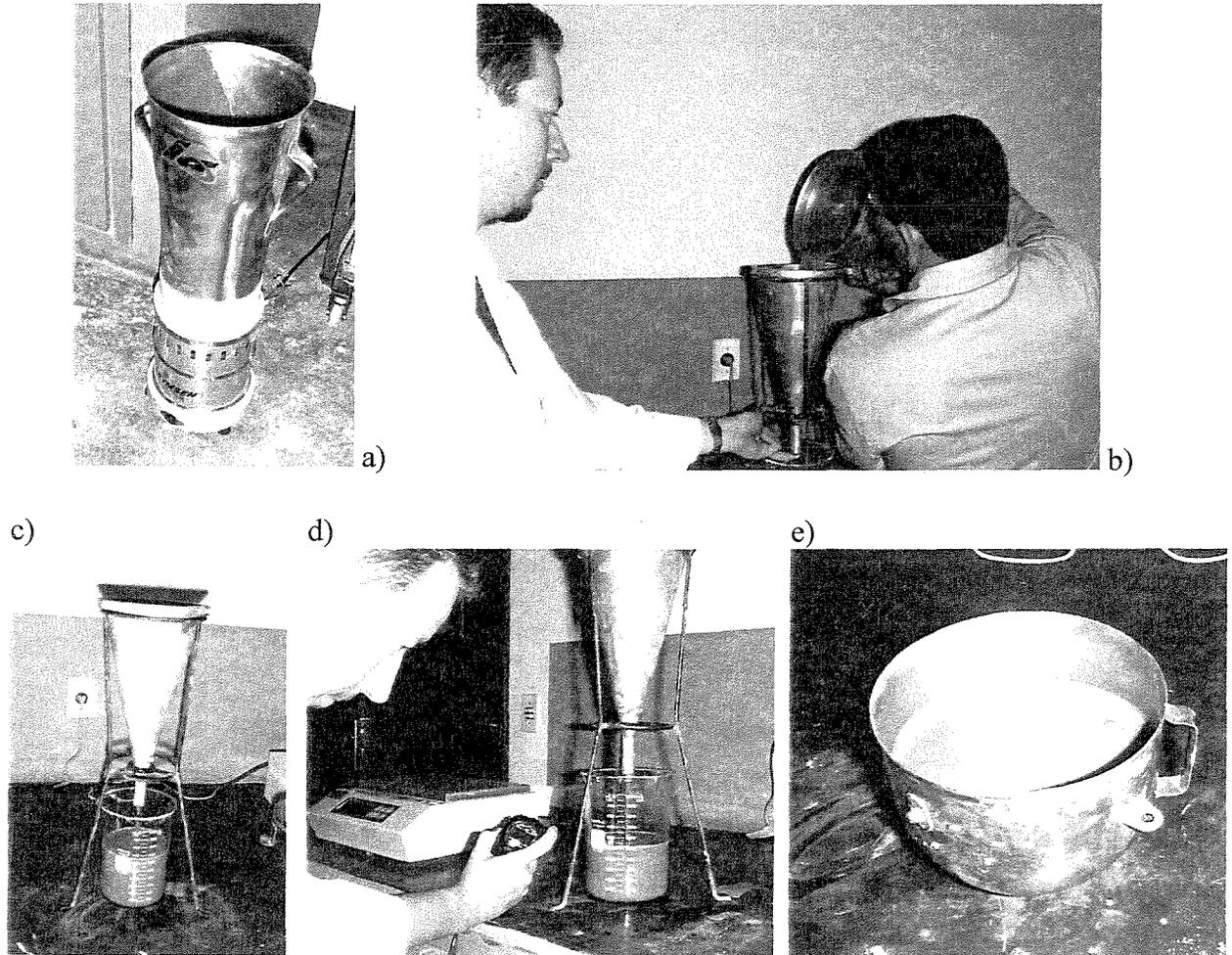


Figura 17 - a) misturador industrial, b) preenchimento do cone com mistura (vol. = 2 ls), c) escoamento, d) medida do tempo de escoamento, e) bacia com material em espera entre uma leitura e outra.

Os gráficos 2 e 3 ,apresentam os resultados obtidos nos ensaios. Para a relação $a/c+s = 0,18$, a porcentagem ideal de aditivo está próximo a 1,2%, baseando-se nos tempos de 10, 30 e 60 minutos. Para a relação $a/c+s = 0,16$, os ensaios indicaram que a quantidade ideal de aditivo também se situa ao redor de 1,2%, apesar da mistura apresentar maior coesão e menor capacidade de escoamento.

Os ensaios também indicaram que há um limite para a relação a/c+s a ser utilizada, em virtude da pequena quantidade de água adicionada à mistura. Nota-se que o valor limite para a relação a/c+s do material estudado está próximo a 0,17. Uma quantidade menor de água produz uma mistura muito coesa e com pouca plasticidade.

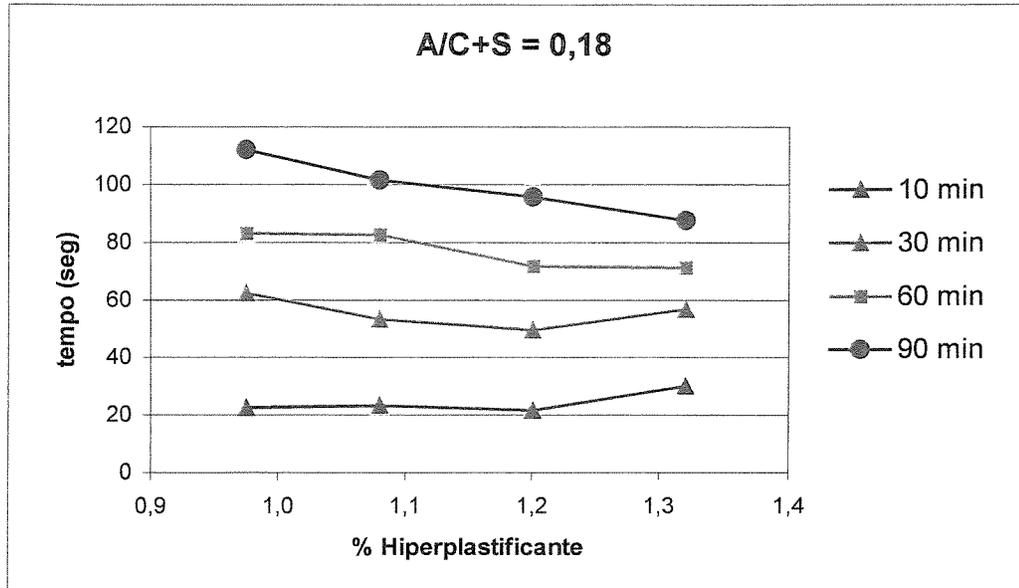


Gráfico 2 - Definição do teor ideal de aditivo para a/c+s = 0,18.

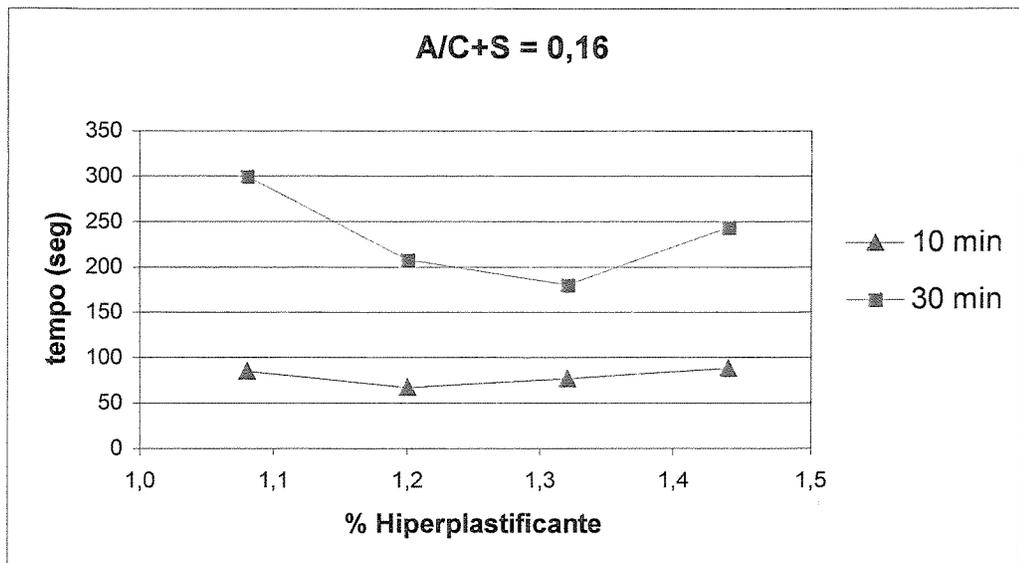


Gráfico 3 - Definição do teor ideal de aditivo para a/c+s = 0,16.

4.1.5 Conclusão I

O uso do mini cone, nos ensaios de mini slump, serviu para confirmar a eficiência desse método como forma de análise da compatibilidade entre cimentos e aditivos. Demonstrou ser um método rápido e prático e ao mesmo tempo serviu de base para a determinação do teor ideal de aditivo nos ensaios com cone de Marsh.

O ensaio com mini slump confirmou a superioridade do aditivo hiperplastificante A como fluidificador da mistura diante dos demais aditivos testados, principalmente, para baixíssimas relações água/aglomerante.

Os ensaios de fluidez com o cone de Marsh, também apresentaram resultados claros e satisfatórios. Esse ensaio é, usualmente, adotado em estudos com caldas para injeção, mas mostrou ser uma ótima ferramenta para determinação da porcentagem ideal do aditivo para determinada relação água/aglomerante. Esse valor poderá ser ajustado no decorrer da produção dos concretos, mas o valor, certamente, estará muito próximo ao encontrado nos ensaios com o cone.

Em virtude da alta porcentagem de C_3A , encontrada na análise química do cimento CP II-fibro 40, superior a 8%, faz-se necessária a realização de novos estudos de compatibilidade entre o outros cimentos e o aditivo hiperplastificante A. Sabe-se que cimentos com menores valores de C_3A tendem a apresentar melhores resultados de fluidez, quando utilizado aditivo superplastificante na pasta. Isso está, claramente, provado no estudo feito por COLLEPARDI *et al.*, 1998. Além do fato de não se possuir cimentos com as características citadas na literatura internacional, enfrenta-se outro problema, não de menor importância, que é a utilização de aditivos hiperplastificantes com porcentagens de materiais sólidos inferiores a 40%. Isso explica as dificuldades em se conseguir relações água/aglomerante próximo a 0,15, com elevada fluidez como descritos em muitos artigos internacionais.

4.1.6 Resistência À Compressão e Eficiência do Tratamento Térmico na Produção de Concretos de Pós Reativos.

Esta etapa concerne em testes para a produção do concreto de pó reativo empregando o aditivo hiperplastificante A na mistura. Inicialmente foram feitos ensaios de caracterização da areia e do pó de quartzo, com a participação da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP. As granulometrias desses materiais encontram-se nos anexos 6 e 7.

Inicialmente, foram moldados corpos-de-prova de argamassa (5x10 cm) para verificar os valores de resistência à compressão axial, aplicando diferentes tratamentos térmicos durante a cura, a fim de encontrar o tratamento mais eficiente, proporcionando maior resistência ao concreto. As idades de ruptura e os períodos de tratamento térmico estão apresentados na tabela 9. O traço inicial, a ser utilizado nesta etapa, foi baseado nos dados contidos nas literaturas sobre o assunto. Foram adotadas duas dosagens, sendo essas descritas na tabela 10. Vale lembrar que o cimento utilizado para esses ensaios foi o CP II-fibro 40, uma vez que não havia sido testado outro cimento até o presente momento.

Tabela 9 - Tratamento térmico.

Número de Corpos de Prova	Cura em Água à Temperatura Ambiente	Tratamento Térmico a 90°C	Idade de Ruptura
03	24h	-	24h
03	28 dias	-	28 dias
03	7 dias	1 dia	28 dias
03	7 dias	2 dias	28 dias
03	7 dias	4 dias	28 dias

Tabela 10 - Descrição do traço e dosagens utilizadas.

Material	Traço (em peso)	Dosagem A (kg/m ³)	Dosagem B (kg/m ³)
Cimento	1,0	697	711
Sílica Ativa	0,32	227	231
Areia de Quartzo	1,43	997	1016
Pó de Quartzo	0,30	209	213
Aditivo	0,01	10,4	10,6
Água		219	204
Relação água/aglomerante =		0,24	0,22

A mistura dos materiais ocorreu em um misturador elétrico próprio para argamassas. Os corpos de prova foram moldados por compactação com soquete. A seqüência do processo está detalhado a seguir:

- a) pesar os materiais separadamente;
- b) misturar o cimento, a sílica e o pó de quartzo dentro de um vasilhame por 60 seg até o material ficar homogêneo;
- c) misturar o aditivo na água e em seguida despejar na bacia do misturador;
- d) adicionar o cimento com a sílica e o pó de quartzo na bacia;
- e) misturar tudo por 2,5 minutos em velocidade baixa, desligando-se em seguida;
- f) raspar com auxílio de uma espátula todo o material aderido na borda da bacia e na pá do misturador por 30 seg;
- g) ligar o misturador por mais 30 seg na velocidade baixa;
- h) em seguida, adicionar a areia, vagorosamente, em 30 seg com o misturador ligado em velocidade baixa;
- i) ajustar a velocidade para alta e misturar por mais 7 min;
- j) tempo total da mistura é de 11 min;
- k) após a mistura, moldar os corpos-de-prova com duas camadas aplicando 30 golpes por camada;

- l) colocar um vidro sobre os corpos-de-prova para manter nivelada a superfície e impedir perda de água;
- m) desmoldar com 24 horas e iniciar tratamento de cura;

A figura 18 mostra o equipamento utilizado no tratamento térmico a 90°C. É um banho-maria que atingiu, durante os testes, temperatura máxima de 92°C quando tampado. Esse equipamento não tem a capacidade de controlar a quantidade de calor liberado na água durante a elevação da temperatura. Não há uma taxa constante de subida e, posteriormente, de descida da temperatura da água. Sabe-se que o concreto deve ser aquecido ou resfriado sob uma taxa constante de temperatura, taxa esta que se situa em torno de 15 a 20°C/h, para evitar o acúmulo de tensões que possam acarretar no aparecimento de fissuras no interior do material. O ciclo térmico de tratamento adotado está apresentado na figura 19.

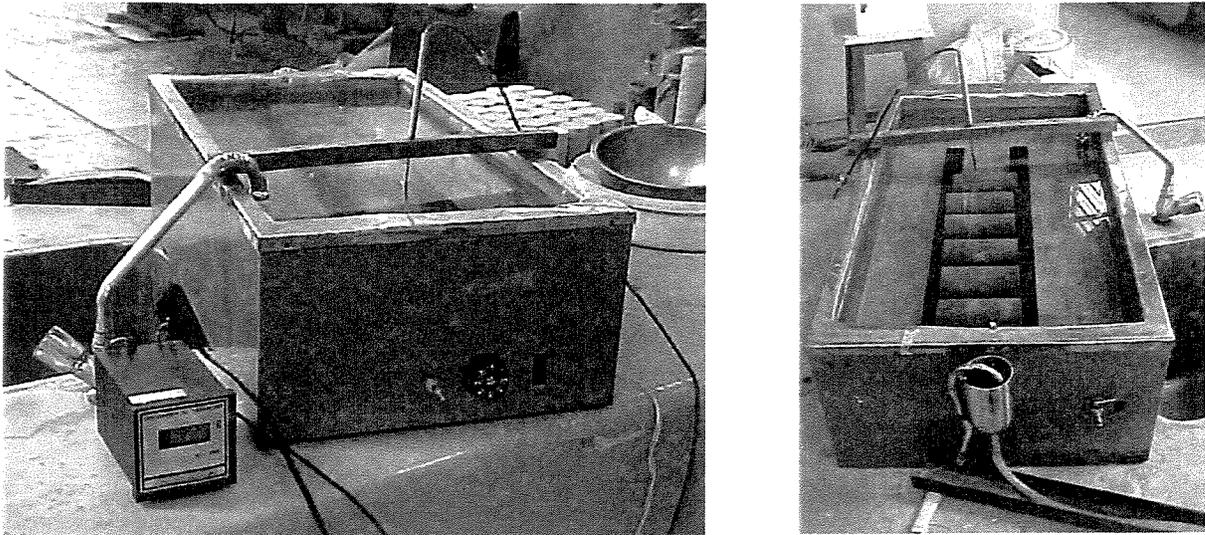


Figura 18 - Aparelho inicial de tratamento térmico.

Os corpos-de-prova, após curados por sete (7) dias em água, à temperatura ambiente, foram submetidos ao tratamento por calor. Em virtude da alta taxa de evaporação, foi necessário adaptar o aparelho, colocando-o sob uma entrada de água (torneira), a fim de minimizar a diminuição do nível da água pela evaporação. Porém, durante à noite, geralmente, a pressão da água diminuía, havendo uma entrada menor de água no recipiente, causando a queda no nível de água. Em função disso, era necessário restabelecer o nível da água na manhã seguinte. Essa

oscilação causava uma diminuição da temperatura em até 15°C, prejudicando a eficiência do tratamento. Os corpos-de-prova foram submetidos a 1, 2 ou 4 dias sob esse tratamento, permanecendo, posteriormente, sendo curados em água, à temperatura ambiente, até a data de ruptura (28 dias). A regularização das superfícies dos corpos-de-prova, para os ensaios de resistência à compressão axial, foi feita com enxofre, em virtude da falta de aparelho necessário para a retificação das superfícies. Para cada tipo de cura foram rompidos três corpos de prova. Os resultados dos ensaios de resistência estão apresentados no gráfico 4 a e b.

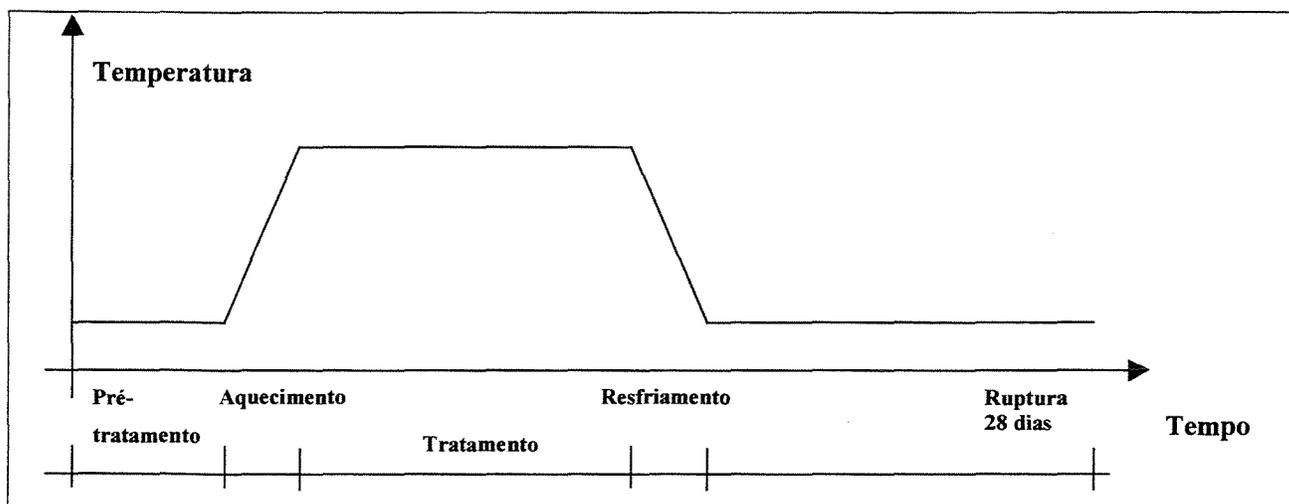
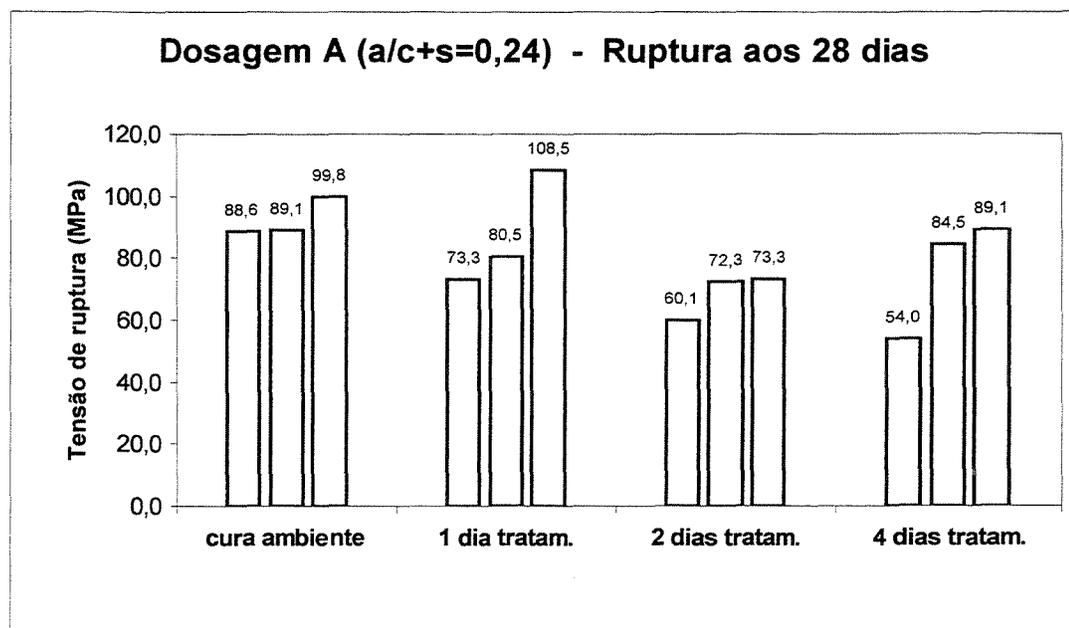


Figura 19 - Ciclo de tratamento térmico.



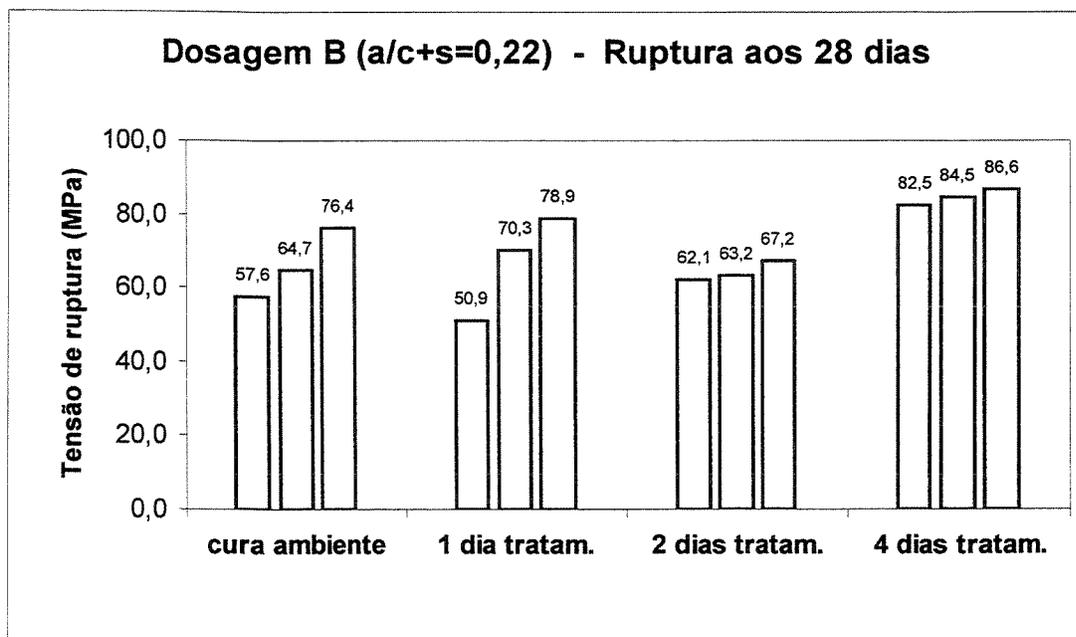


Gráfico 4 - Resistências à compressão axial.

4.1.7 Análise dos Resultados

Analisando os resultados obtidos foram, observadas algumas não-conformidades. Os corpos-de-prova submetidos a 4 dias de tratamento térmico a 90°C deveriam apresentar melhores resultados de resistência à compressão, quando comparados com os demais. Isto porque a função do calor é ativar e incrementar as reações pozolânicas no compósito, promovendo aumento da quantidade de CSH na matriz.

A dosagem A, mesmo possuindo relação água/aglomerante superior à dosagem B, ou seja, maior quantidade de água por m³, apresentou resultados superiores de resistência. O único valor que superou 100 MPa, foi obtido com a dosagem A, quando os corpos de prova foram submetidos a um dia de tratamento térmico a 90°C.

Outro fator discordante é a diferença de resistência entre corpos-de-prova de mesma idade e dosagem. A maioria apresentou valores com grande variabilidade. Admite-se uma discrepância maior para os concretos de alto desempenho quando comparados com os concretos

normais, conforme literaturas, mas as diferenças encontradas nesse estudo superam em muito essa tolerância.

4.1.8 Conclusão II

Os resultados de resistência à compressão foram considerados insuficientes e não-satisfatórios. O objetivo era obter valores de resistência à compressão próximos a 200MPa, aos 28 dias, para os corpos-de-prova submetidos ao tratamento térmico a 90°C.

O tratamento térmico tem por finalidade ativar novas reações pozolânicas na matriz, aumentando com isso, a quantidade de CSH presente na estrutura da interface. Esse aumento na quantidade de CSH tende a aumentar a resistência da matriz, em vista da diminuição da porosidade e o consumo de materiais mais fracos e inertes, como o hidróxido de cálcio (CaOH)₂, por exemplo.

Com base nestas premissas, acredita-se que os baixos valores de resistência, encontrados nesta etapa, foram influenciados por quatro possíveis problemas:

- 1) moldagem: os corpos-de-prova foram moldados com golpes, segundo o procedimento de moldagem de corpos-de-prova de argamassa para ensaio de resistência à compressão. O material tinha consistência mole e, por isso, não permitia golpes firmes, sendo levemente adensado. Acredita-se ter havido uma má compactação do material nos moldes, permitindo uma maior quantidade de vazios na mistura. Como correção, será adotado a moldagem dos corpos-de-prova, em mesa vibratória, para proporcionar melhor compactação e maior homogeneização do material, contribuindo, assim, para diminuir a disparidade entre os resultados encontrados;
- 2) cimento: como já mencionado, anteriormente, no estudo com aditivos, o cimento CP II-fibro 40, adotado, possui alto teor de C₃A, o que pode estar contribuindo para diminuir a eficiência do aditivo hiperplastificante A. Faz-se necessário a substituição por um cimento mais compatível;

3) equipamento térmico: deve-se garantir que o concreto submetido a aquecimento e resfriamento térmico, não provoque excesso de tensões internas, causando microfissuração do compósito. O equipamento utilizado, nesta etapa da pesquisa, não possuía controlador de acréscimo de temperatura, o que acredita-se, pode ter causado danos ao concreto. Como medida corretiva, foi adquirido, com auxílio da reserva técnica disponibilizada pela FAPESP, um equipamento eletrônico, que terá como função, controlar o aquecimento e resfriamento da água no tratamento térmico;

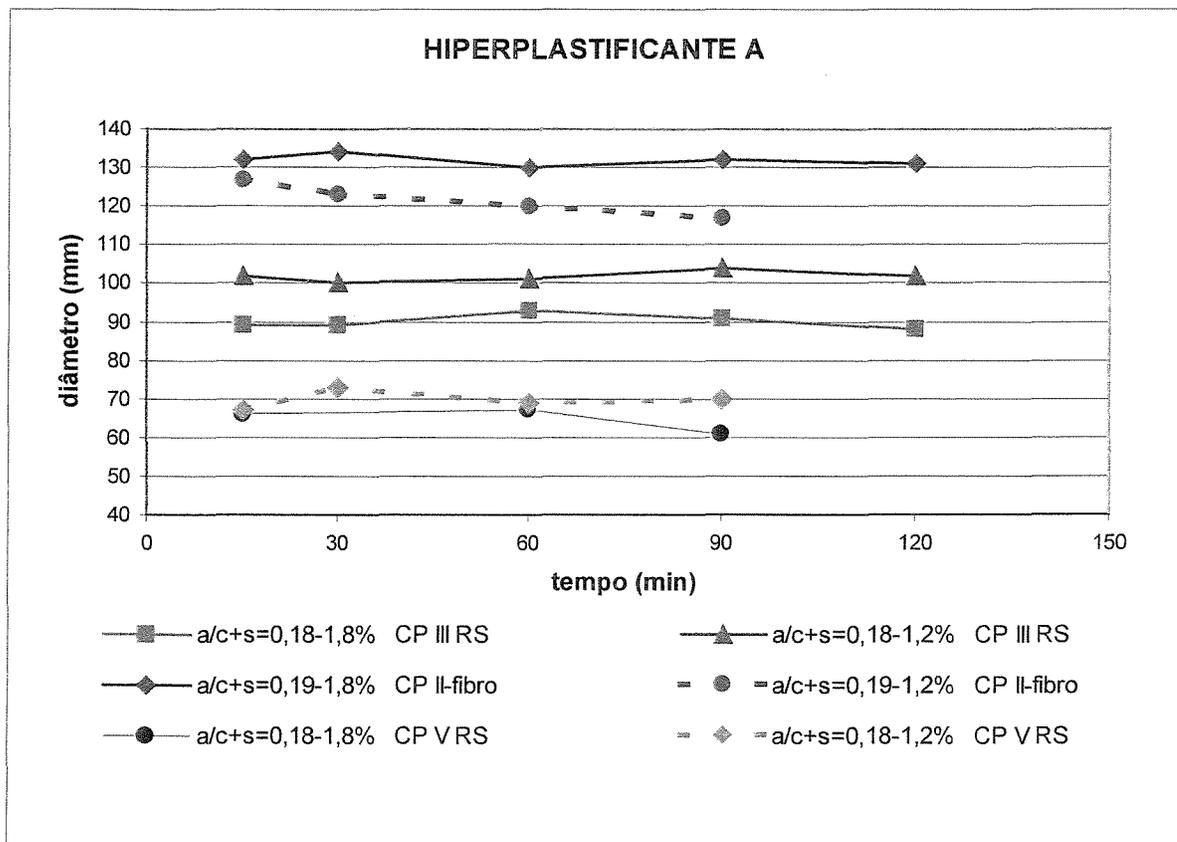
4) capeamento: foi utilizado enxofre para regularizar a superfície dos corpos-de-prova. Acredita-se que, por possuir menor resistência que o concreto, o enxofre esteja contribuindo para o agravamento das disparidades encontradas nos valores de resistência à compressão. A fissuração antecipada do enxofre pode ter levado ao acúmulo de tensões no concreto, antecipado a ruptura e conseqüentemente, falseado os resultados. Como medida corretiva, passar-se-á a utilizar corpos de prova cúbicos (5x5x5 cm), eliminando a necessidade de capeamento.

SEGUNDA ETAPA

A partir das conclusões obtidas na etapa 1, foram traçadas novas metas incluindo a substituição de alguns materiais.

4.2 ENSAIOS E RESULTADOS

As mudanças iniciaram com a realização de novos ensaios de compatibilidade cimento-aditivo pelo método de cone de mini slump e cone de Marsh. Primeiro foram testados novos cimentos: CP III 32 RS e cimento CP V ARI RS, com o aditivo hiperplastificante A, para posterior comparação com os resultados com cimento CP II E fibra 40 (gráfico 5).



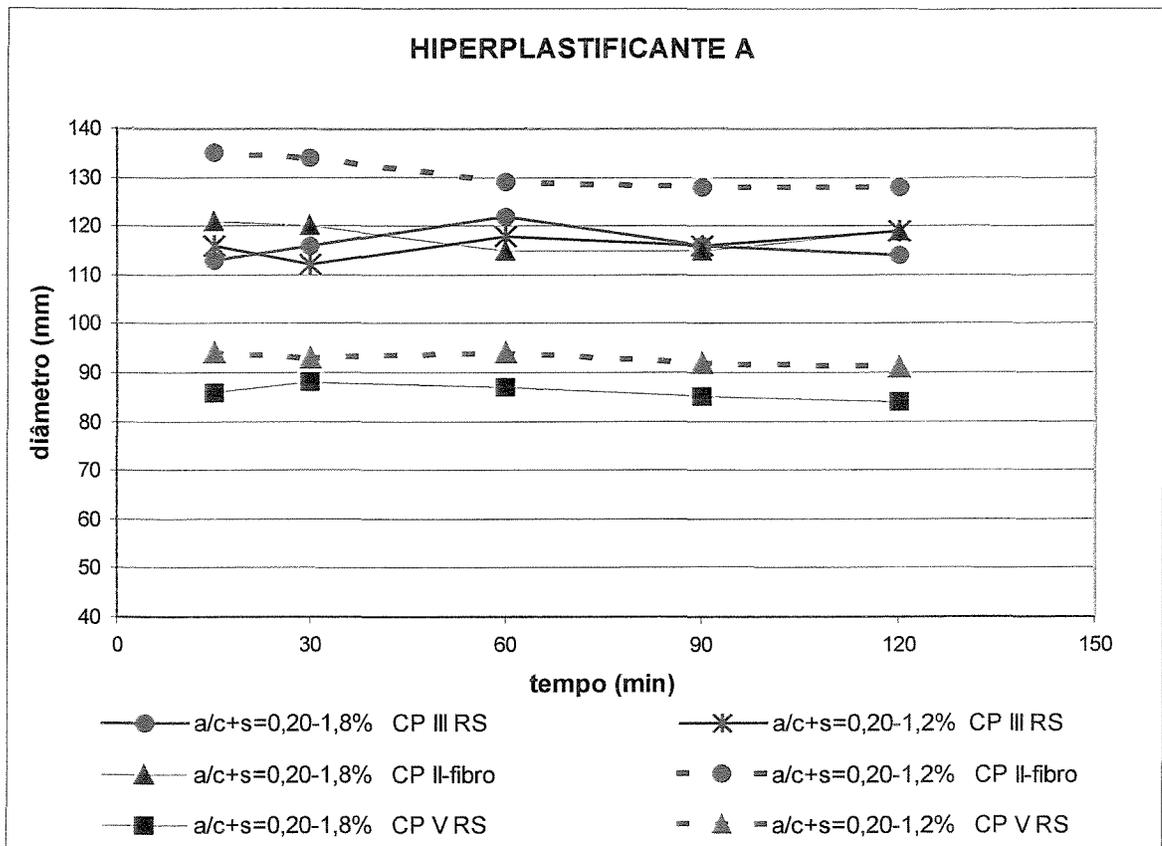


Gráfico 5 - Teste de plasticidade – aditivo hiperplastificante A com diversos cimentos.

O alto teor de aditivo utilizado nos ensaios com cone de mini slump é justificado pelos artigos técnicos nos quais o estudo do Concreto de Pós Reativos foi baseado. Observando os resultados obtidos, nota-se maior eficiência plástica das misturas contendo cimento CP II-E fibro. Mas em virtude de grande variação e baixos valores de resistência obtidos no estudo de dosagem apresentado anteriormente, optou-se pelo emprego do cimento CP III 32 RS para os próximos ensaios (cone de Marsh e estudo de dosagem). A caracterização deste cimento está no *anexo 2*. Este cimento é caracterizado por apresentar escória, material que confere reações iniciais de hidratação mais lentas quando comparado com os demais tipos de cimento.

A definição do teor ideal de aditivo foi novamente obtida pelo método de cone de Marsh para posteriormente ser empregado no estudo de dosagem. Foi ensaiada a menor relação água/aglomerante ou água/(cimento + sílica) possível, 0,17. Os resultados são apresentados na gráfico 6.

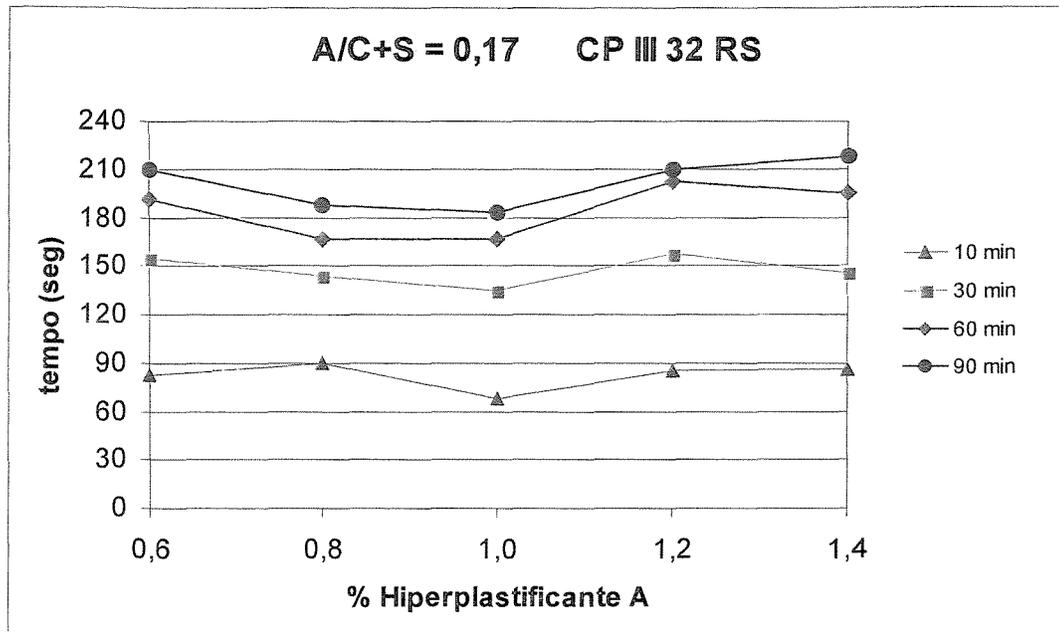


Gráfico 6 Ensaio com Cone de Marsh – aditivo hiperplastificante A.

4.2.1 Estudo de Dosagem I

Através dos resultados, o teor ideal de aditivo para a relação água/aglomerante 0,17 está próximo a 1,0% da massa de aglomerante. Com a definição do cimento CP III 32 RS, aditivo hiperplastificante A e seu teor ideal, passou-se para a etapa de dosagem.

Na etapa de dosagem, algumas mudanças foram adotadas, em virtude dos problemas encontrados e já descritos nas etapas anteriores.

Fez-se a substituição das formas cilíndricas 10x20cm por formas cúbicas de 5x5x5 cm. Tal substituição, é justificada por eliminar a necessidade de capeamento dos corpos de prova cilíndricos com enxofre, visto que o enxofre apresenta resistência mecânica inferior ao concreto estudado. Outra mudança, foi com relação ao método de moldagem, antes, por compactação com soquete, para compactação em mesa vibratória. Por fim, a substituição do misturador comum de argamassa para um misturador industrial de 20 litros, contendo 3 velocidades e maior capacidade de torque (figura 20).

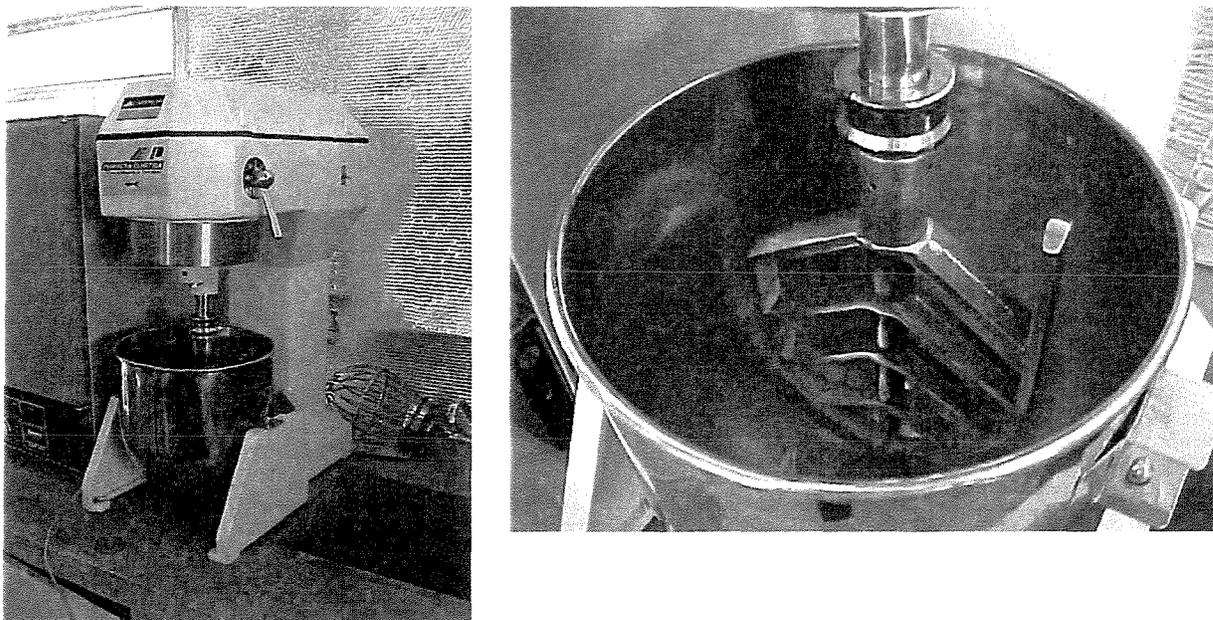


Figura 20 - Misturador industrial de 3 velocidades e capacidade de 20 litros.

Para esse estudo de dosagem, foram moldados 12 corpos de prova cúbicos, sendo que seis foram curados ao ar sob condições ambientes de temperatura e pressão, e seis curados imersos em água, também sob condições ambientes de temperatura e pressão. Com isso, obteve-se, para cada idade de ruptura (7 e 28 dias), três resultados de resistência à compressão.

No gráfico 7 são apresentados os resultados de resistência à compressão e no anexo 7 a planilha contendo todos os dados da dosagem. Vale salientar que não foi possível misturar, homogeneizar os materiais adotando a relação água/aglomerante = 0,17 com 1,0% de aditivo, obtidos do ensaio com cone de Marsh. A alteração da relação passou para 0,20 com 1,0% de aditivo hiperplastificante A.

Através da análise dos resultados obtidos, ficou constatado que:

- grandes diferenças nos valores de resistência à compressão das amostras curadas sob igual condição de cura e
- maior eficiência da cura por imersão em água, principalmente pelos resultados de resistência aos 28 dias.

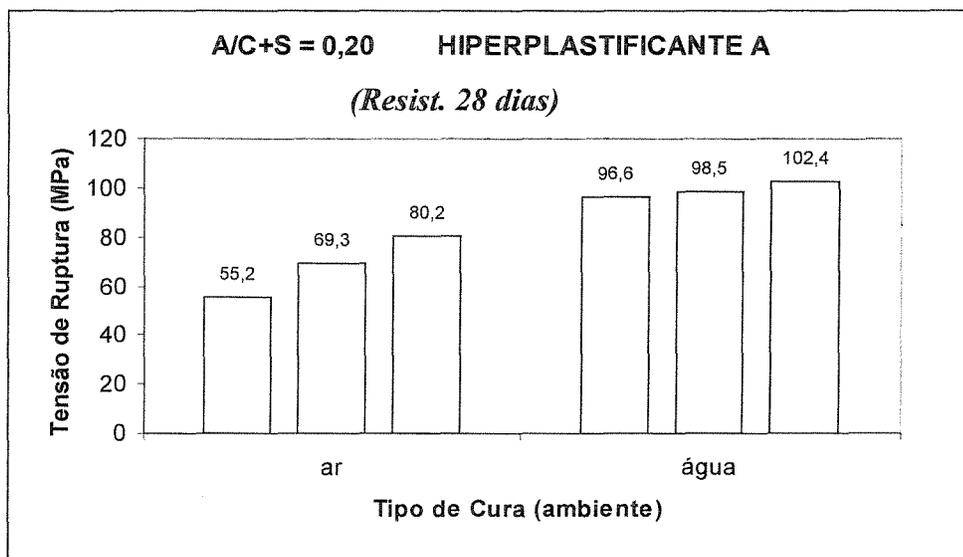
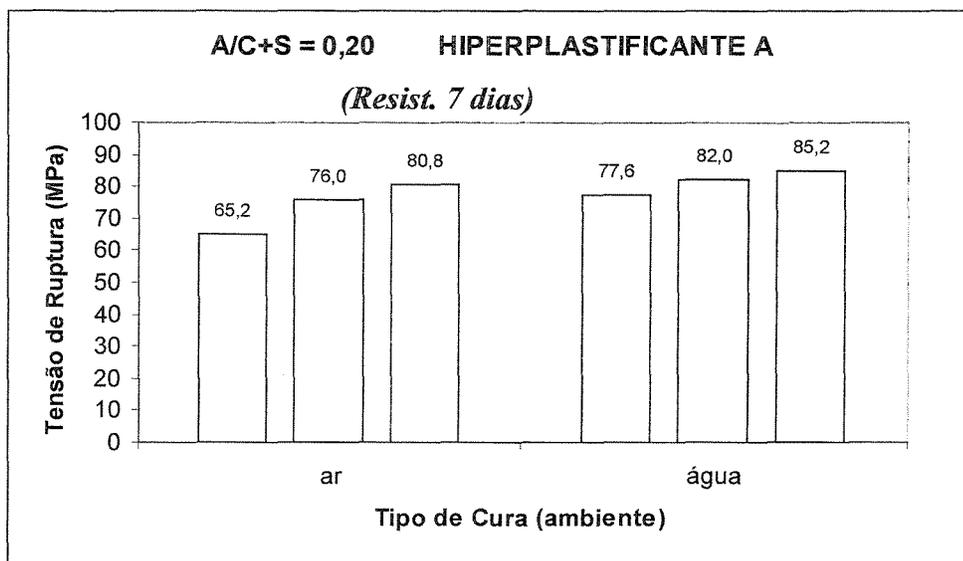


Gráfico 7 - Resistência à compressão - hiperplastificante A.

Outro ponto fundamental, se refere aos valores de resistência das amostras. O valor máximo obtido ficou próximo a 102 MPa, de corpos de prova curados por imersão em água à temperatura ambiente. O valor está muito abaixo do esperado, que seria 180 MPa.

Analisando o aspecto de ruptura dos corpos de prova, verificou-se um possível problema de paralelismo e excentricidade da prensa, visto que a maioria dos corpos de prova dessa dosagem romperam por desenvolvimento de fissuras verticais ou com a presença de cone único (figura 21).

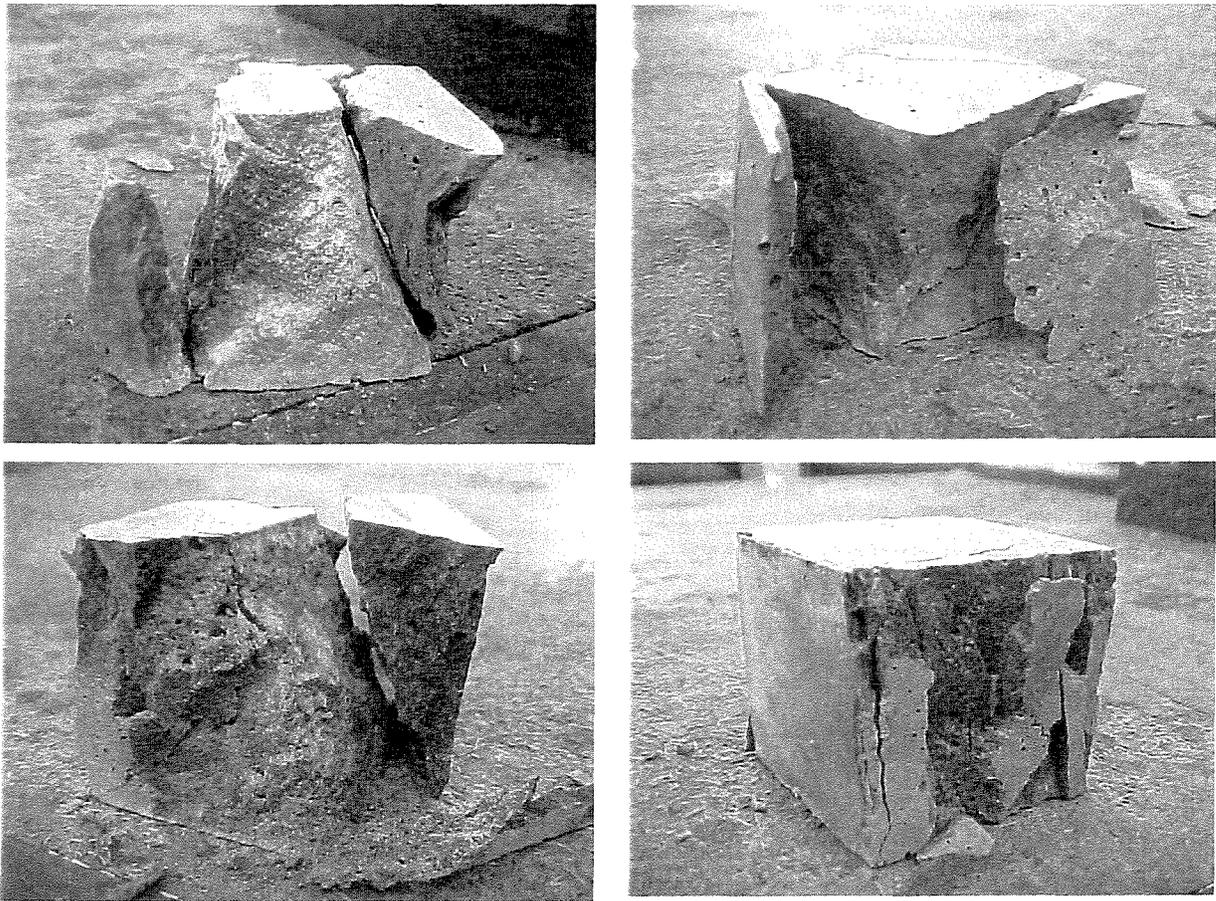


Figura 21 - Fotos de ruptura de corpos de prova.

THAULOW, citado por AITCIN, 2000, comenta que: ...de acordo com ASTM C39-86, quando é utilizada na prensa a cabeça esférica adequada, o modo de ruptura usual é a forma de dois cones sobrepostos [figura 22a], uma vez que as duas extremidades do corpo de prova estão confinadas nos pratos da prensa, quando a carga de compressão é aplicada. Quando o corpo de prova é ensaiado a uma carga de compressão uniaxial, seu diâmetro aumenta na direção perpendicular ao carregamento, mas ao mesmo tempo desenvolvem-se tensões decorrentes do atrito das extremidades do corpo de prova e os dois pratos da prensa de ensaio, impedindo qualquer deslocamento nessas áreas, em particular onde o concreto está confinado. Essas tensões decorrentes do atrito criam zonas horizontais de tensões de compressão nas duas extremidades, as quais são responsáveis pela forma cônica da ruptura.

Por outro lado, quando corpos de provas são ensaiados com cabeça esférica fora do padrão, o modo de ruptura se dá por desenvolvimento de fissuras verticais (figura 22b).

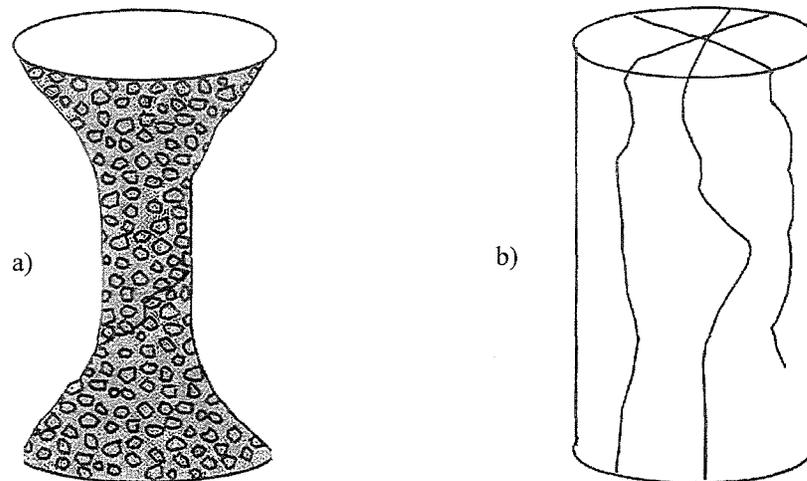


Figura 22 - a) ruptura do tipo cônico e b) ruptura por fendimento (AITCIN, ⁽²⁾).

Outro fator considerado relevante para os baixos valores de resistência obtidos, se deve à presença de bolhas em grande quantidade no interior das amostras. Mesmo antes de serem rompidas, foi possível verificar a presença desses vazios na superfície dos corpos de prova (figura 23). Acreditava-se que moldando os corpos de prova em mesa vibratória esse tipo de problema seria contornado.

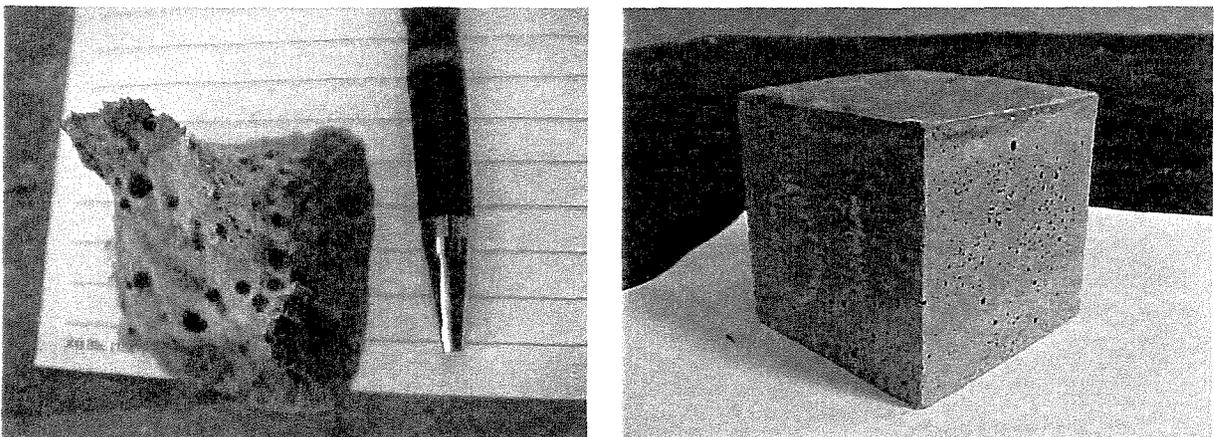


Figura 23 - Presença de bolhas no interior e na superfície dos corpos de prova.

A origem das bolhas no interior das amostras pode ter sido provocada por um possível problema com a velocidade de mistura dos materiais no misturador, visto que, para se atingir a homogeneização e fluidificação da “massa” foi necessário empregar a velocidade 3 do misturador, bem como pode ter ocorrido um efeito colateral da alta dosagem do aditivo hiperplastificante A.

Sabe-se que a super dosagem de aditivos superplastificante pode causar incorporação de ar à mistura. A porcentagem de aditivo empregado para produção do CPR, segundo os idealizadores, está sempre acima de 1,0% da massa de material aglomerante, fato verificado em todos os trabalhos citados na revisão bibliográfica. Pode-se considerar elevado esse teor quando compara-se com as quantidades usualmente empregadas em concretos de alto desempenho, geralmente inferior a 0,6% da massa de cimento.

4.2.2 Aditivo Hiperplastificante B

Na tentativa de se corrigir o fraco desempenho de resistência dos corpos de prova, foi testado outro aditivo hiperplastificante, identificado, nesta pesquisa, por **hiperplastificante B**. É um aditivo superplastificante de terceira geração, contendo 35% de sólidos, com base em cadeia de polímeros de éter carboxílico modificado. Foi desenvolvido para indústria de pré-moldados e concretos protendidos, agora disponível no mercado nacional.

Novamente a análise da eficiência do aditivo teve início pelos ensaios com cone de Marsh para duas relações água/aglomerante: 0,17 e 0,20, conforme gráfico 8. A dosagem utilizada foi a mesma empregada para o aditivo hiperplastificante A, com intuito de comparação dos resultados encontrados.

Ao comparar os resultados entre os dois aditivos hiperplastificante, notou-se claramente maior eficiência e compatibilidade do aditivo B com os materiais cimentícios utilizados nesta pesquisa. O tempo de escoamento foi menor, o que confere maior capacidade de fluidez à mistura.

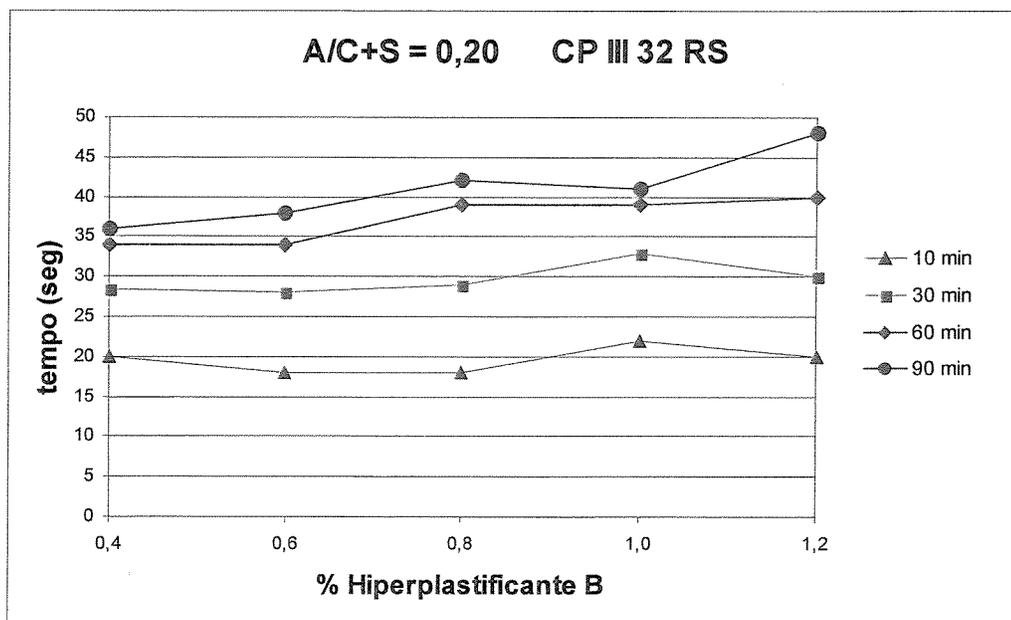
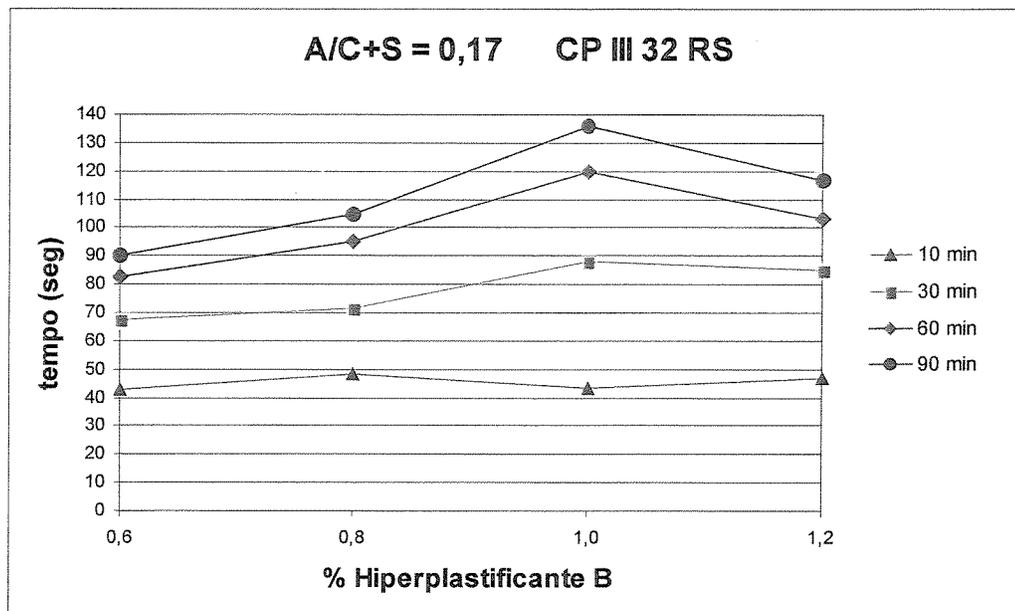


Gráfico 8 - Ensaio com cone de Marsh - aditivo hiperplastificante B.

Com esses resultados de fluidez, passou-se, novamente, para etapa de resistência à compressão, utilizando a mesma dosagem de aditivo empregado no estudo de dosagem com aditivo A, para fins de comparação dos resultados obtidos. É importante salientar que, durante a mistura dos materiais, não houve necessidade do emprego da maior velocidade do misturador (velocidade 3) para garantir a homogeneização e plasticidade suficiente para moldagem dos

corpos de prova. Esse fato comprova a maior capacidade de fluidez do aditivo hiperplastificante B frente ao aditivo A.

4.2.3 Estudo De Dosagem II

Para esta nova etapa, foi utilizado outro equipamento para cura. Ao invés de cura térmica por imersão em água, passou-se a empregar cura á vapor (figura 24). Este novo equipamento tem a capacidade de controlar a taxa de elevação da temperatura ($< 20^{\circ}\text{C}/\text{h}$), de modo a eliminar um dos problemas encontrados com o aparelho, anteriormente empregado no tratamento térmico dos corpos de prova.

Também, para esse estudo com o aditivo hiperplastificante B, ampliou-se os tipos de cura para quatro:

1. cura ao ar sob temperatura ambiente;
2. cura em imersão em água sob temperatura ambiente;
3. cura a vapor a 60°C aplicado durante a pega do cimento;
4. cura a vapor a 90°C aplicado durante a pega do cimento.

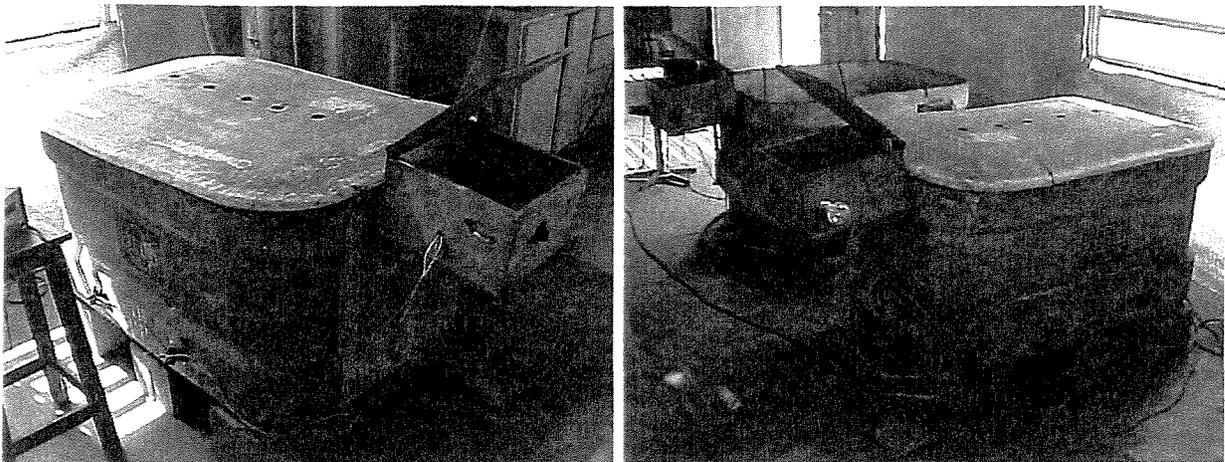


Figura 24 - Câmaras de tratamento térmico à vapor.

A adoção da temperatura de 60°C é justificada pelos estudos existentes de concretos de cimento Portland de alto forno (CP III), submetidos à cura térmica, onde a temperatura, que confere maior durabilidade às estruturas, é 60°C. Para a temperatura de 90°C, seu emprego está diretamente relacionado com os estudos existentes de Concretos de Pós Reativos, que mostrou ser a mais econômica e de fácil aplicação dentre as demais estudadas, como 160°C, 240°C e até 400°C.

O gráfico 9 representa o ciclo térmico adotado para os corpos de prova submetidos à cura a vapor. A taxa de elevação da temperatura respeitou o limite de 20°C/h. Todos os corpos de prova foram moldados em mesa vibratória. Após tratamento térmico, os corpos de prova continuaram o processo de cura imersos em água à temperatura ambiente.

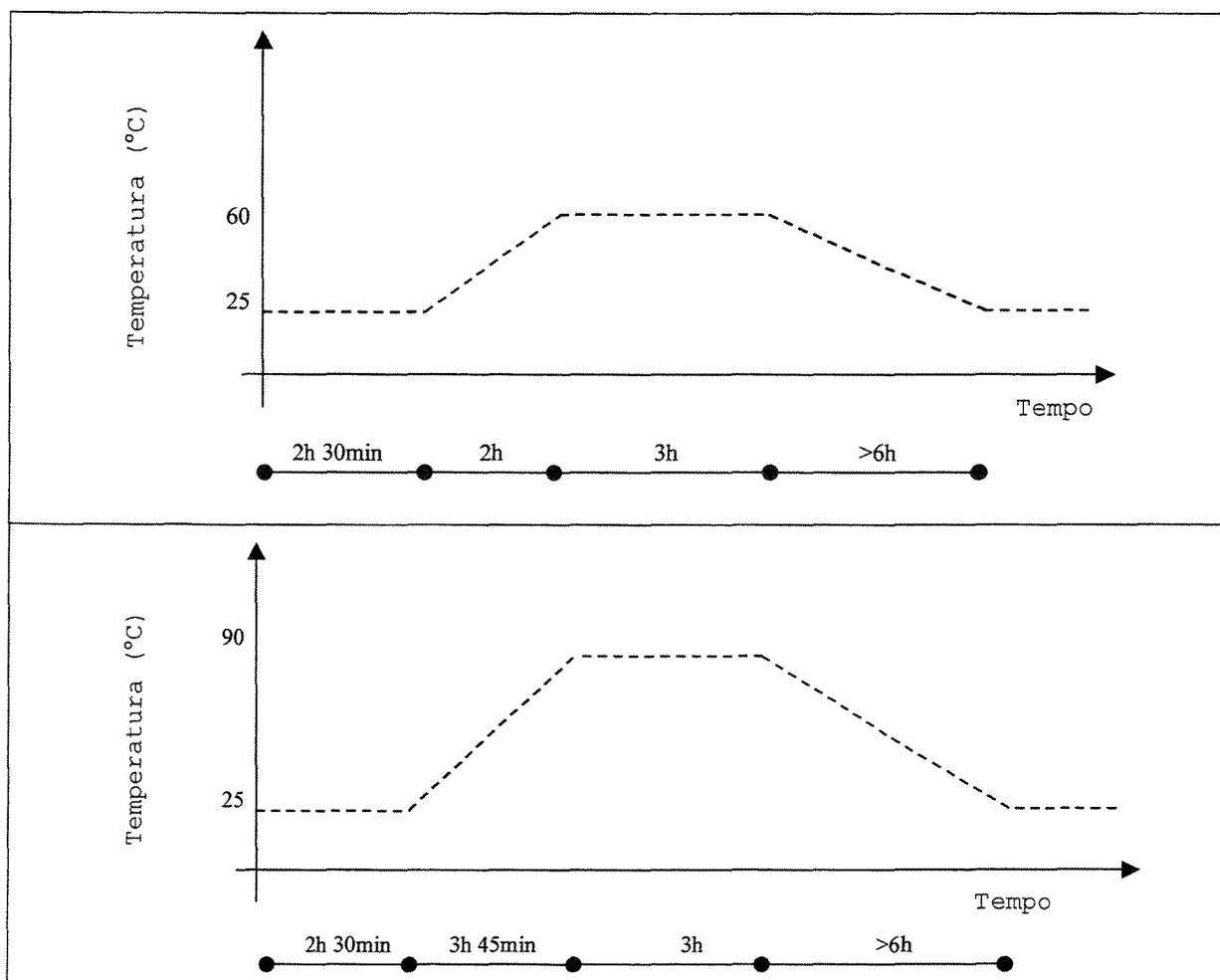


Gráfico 9 - Ciclo térmico da cura à vapor.

Os valores de resistência à compressão de 7 e 28 dias estão apresentados na gráfico 10, exceto os valores de resistência das amostras curadas à temperatura de 90°C, em virtude da incapacidade de ruptura dos corpos de prova por apresentarem expansão durante tratamento térmico à vapor. A causa da expansão dos corpos de prova ainda não foi totalmente esclarecida. Para cada idade de ruptura foram rompidos três corpos de prova prismáticos.

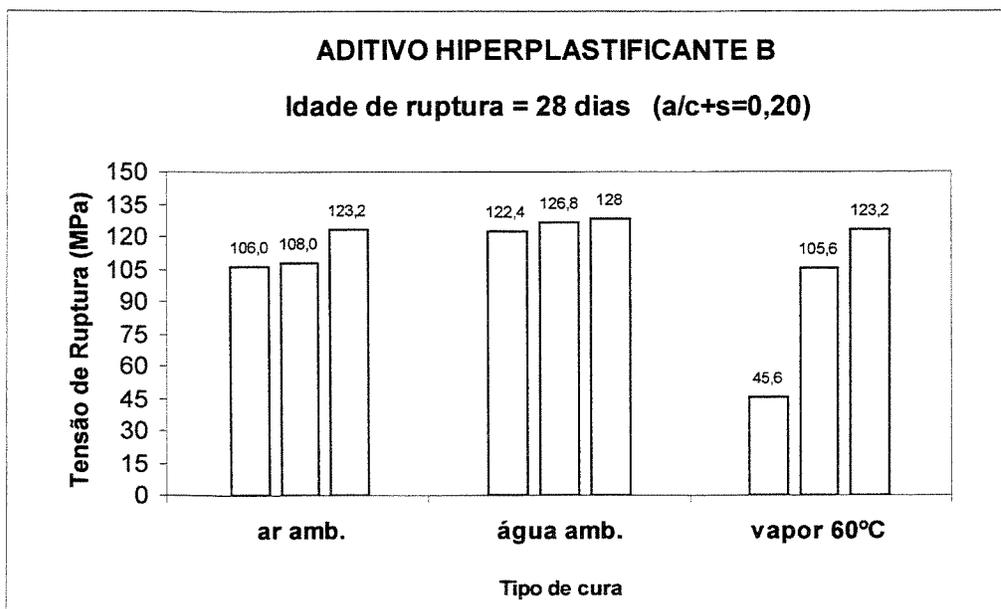
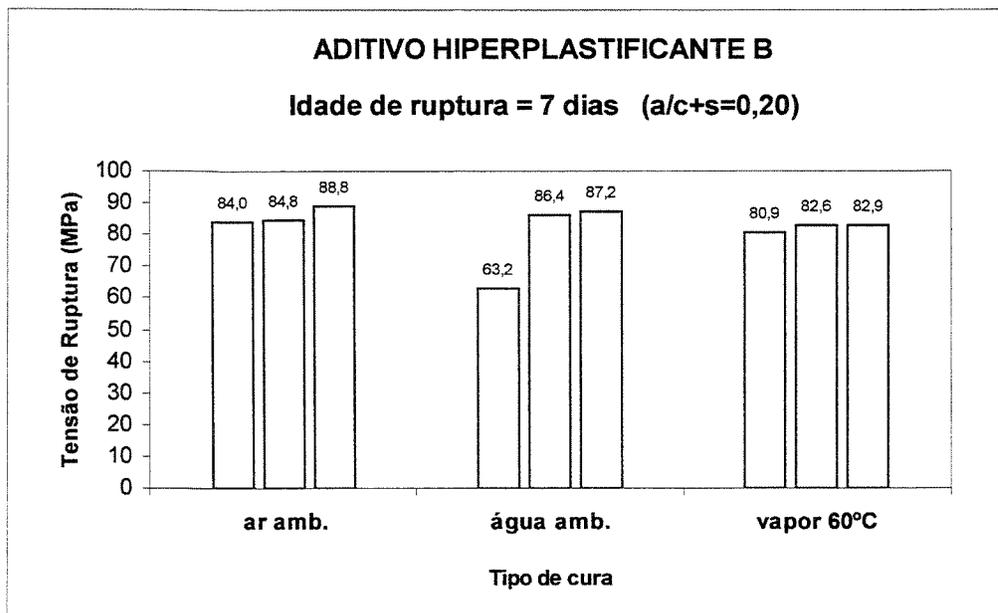


Gráfico 10 - Resistência à compressão – hiperplastificante B.

A figura 25 apresenta os equipamentos, os moldes e os corpos de prova submetidos ao tratamento a vapor a 90°C, aos quais apresentaram expansão durante a cura térmica.

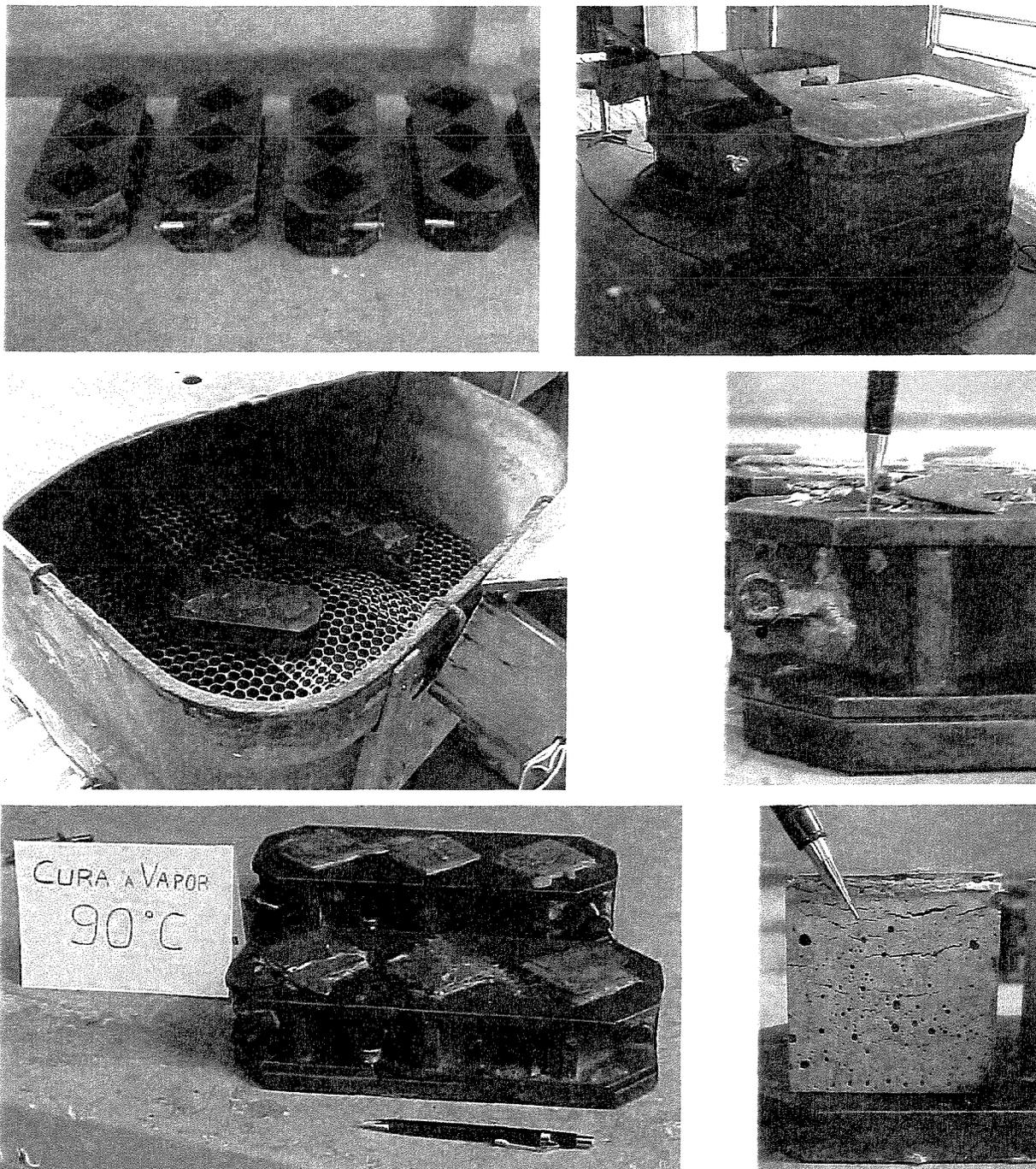


Figura 25 - Moldes, câmara de tratamento com calor e corpos de prova submetidos ao trat. térmico a 90°C.

4.2.4 Discussão das Dificuldades Encontradas

Com a definição do aditivo hiperplastificante B e o cimento CP III 32 RS a ser empregados na produção do CPR, houve necessidade de um estudo de dosagem, que garantisse a produção de concretos de grandes resistências, aproximadamente 200 MPa.

A escolha do traço e do diâmetro máximo dos agregados utilizados nessa etapa da pesquisa estão diretamente relacionados com o processo utilizado para a produção da Passarela de Sherbrook, no Canadá. Sabe-se, que o consumo de sílica ativa é realmente muito alto (25 a 35% da massa de cimento), mas são os valores empregados em todos os estudos de CPR, já analisados, e também estudados na revisão bibliográfica.

Tentando justificar o ocorrido, foram analisadas algumas possibilidades, onde segundo LARRARD, 1989, existe uma relação entre a proporção de álcalis da sílica com a resistência dos concretos (gráfico 11).

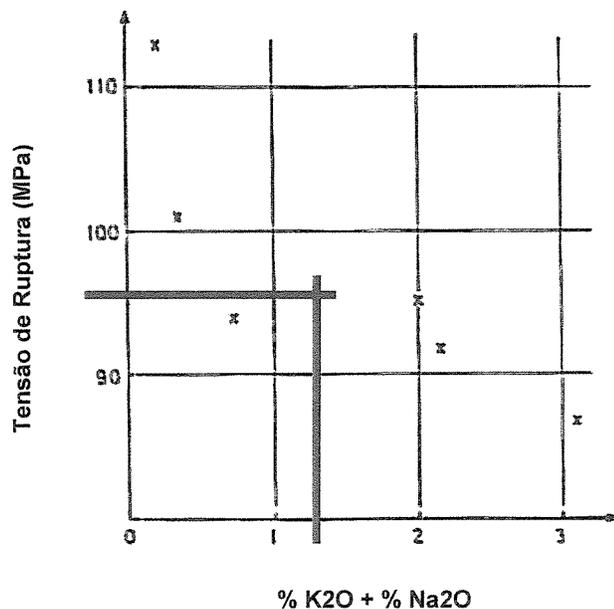


Gráfico 11 - Relação resistência x teor de álcalis LARRARD, 1989.

Verificando a análise química da sílica ativa fornecida pelo fabricante (anexo 4), constatou-se teor de álcalis ($\%K_2O + \%Na_2O$) igual a 1,44%. Comparando com o gráfico apresentado por LARRARD, a sílica utilizada pode estar contribuindo para o baixo desempenho de resistência dos corpos de prova. A sílica ativa recomendada para a produção dos Concretos de Pós Reativos é proveniente das fábricas de zircônio, de coloração branca, contendo teor de carbono igual a zero. Essa sílica é caracterizada por seu elevado custo, mas propicia maior plasticidade à mistura, frente as demais sílicas ativa, exigindo menor quantidade de água para garantir uma determinada fluidez, proporcionando assim, melhores resultados de resistência mecânica.

Quanto à expansão dos corpos de prova curados a vapor, sob temperatura de 90°C, foram enviadas amostras à ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, em São Paulo, para análise microscópica desses corpos de prova, a fim de determinar a razão da expansão dos concretos. Sabe-se que existe a possibilidade de ocorrência da formação de etringita retardada em virtude da cura térmica e do teor de C_3A do cimento utilizado. Mas o relatório enviado pela ABCP não indicou a presença excessiva de nenhum cristal ou componente em grande quantidade capaz de provocar tal anomalia conforme considerações finais do relatório: “Em síntese, as amostras de concreto mostram composições usuais, tendo sido identificados quartzo, associados ao agregado miúdo; etringita e portlandita, minerais da pasta hidratada. Além destes compostos, também foram detectadas as presenças de gipsita e calcita, relacionadas ao cimento. Não foram identificados produtos de hidratação principais como hidratos devido a sua baixa cristalinidade, não sendo detectados pela técnica de raios X”.

É importante frisar que os cimentos utilizados nos estudos com CPR, citados na revisão bibliográfica, foram quase que totalmente produzidos com cimentos contendo teor de C_3A igual a zero, o que elimina a possibilidade de ocorrência do fenômeno mencionado.

4.2.5 Conclusão

O uso do cone, nos ensaios de Marsh, serviu para confirmar a eficiência desse método como forma de análise da compatibilidade entre cimentos e aditivos e, na determinação do teor ideal do aditivo.

O ensaio confirmou a superioridade do aditivo hiperplastificante B frente ao aditivo A, quanto à capacidade de fluidificar misturas e facilitar a homogeneização dos materiais sob baixíssima relação água/aglomerante.

Em virtude da porcentagem de C_3A encontrado na análise química dos cimentos até agora utilizado, depara-se, talvez, com a impossibilidade de produção de concretos submetidos a altas temperaturas ($\geq 90^\circ C$). Já é de conhecimento dos pesquisadores que cimentos com menores valores de C_3A , tendem a apresentar melhores resultados de fluidez, em função de uma menor velocidade de reação do mesmo com os hidratos do cimento.

A expansão dos corpos de prova submetidos ao tratamento térmico á $90^\circ C$, pode estar relacionado com o momento inicial, no qual essas amostras foram submetidas ao tratamento térmico (início de pega do cimento).

Outrossim, a diferença dos materiais utilizados pelos pesquisadores internacionais parece ser um fator relevante para a produção dos concretos de pós reativos.

TERCEIRA ETAPA

Como os resultados de resistência continuaram insatisfatórios, mesmo com todas as mudanças empregadas nas etapas I e II, procurou-se estudar a influência do teor de sílica na composição do Concreto de Pós Reativo e, posteriormente a análise de um novo cimento.

4.3 TEOR IDEAL DE SÍLICA ATIVA

Esta etapa, teve por objetivo verificar a influencia do teor de sílica na resistência dos corpos de prova de CPR, utilizando, para isso, o traço da dosagem até então empregado nos estudos de dosagem anteriores, baseado na dosagem empregada na construção da passarela de Sherbrook. A escolha desse traço é justificada por ter apresentado o menor consumo de aglomerante por m³, dentre todos traços citados nas literaturas internacionais sobre Concreto de Pós Reativos.

Como metodologia para esta etapa do estudo, ficou, previamente, definido três valores de adição de sílica ativa: 10, 20 e 30% de adição sobre a massa de cimento. O cimento utilizado foi o CP III 32 RS e, todas as amostras foram submetidas à cura térmica. Após testes preliminares, obteve-se resultados satisfatórios de amostras submetidas a tratamento térmico sob temperatura média de 82°C após 6 dias de cura em água à temperatura ambiente, resolvendo, assim, o problema da expansão de corpos de prova, citados anteriormente na etapa II. O quadro da tabela 11, indica o traço da dosagem empregada, bem como o consumo de materiais por m³ para cada porcentagem de adição de sílica.

Salienta-se que o consumo de cimento variou, mas a relação água/aglomerante foi mantida constante = 0,30. Durante essa etapa ocorreu um fato relevante. Inexplicavelmente, não foi possível misturar os materiais com a quantidade de água para uma relação água/aglomerante inicialmente, prevista de 0,20, apesar de diversas tentativas para se atingir esta relação. Fez-se, inclusive, a substituição dos materiais empregados, cimento e aditivo, por lotes mais novos desses mesmos materiais. Mesmo assim, todas as tentativas não obtiveram sucesso. Esse fato tornou-se mais uma das incógnitas encontradas ao longo do estudo do concreto de pós reativos.

Tabela 11 - Estudo de dosagem para adição de sílica ativa.

Massa Específica (kg/dm ³)	Traço (em peso)	10% sílica (kg/m ³)	20% sílica (kg/m ³)	30% sílica (kg/m ³)	
Cimento	3,11	1,00	746	705	669
Sílica	2,21	-	75	141	201
Areia	2,70	1,40	1044	988	937
Pó de quartzo	2,70	0,30	224	212	201
Aditivo	1,10	0,01	8,2	8,5	8,7
Água	1,0	0,30	246	254	261
Relação água/aglomerante =		0,30	0,30	0,30	0,30

Para que não houvesse um atraso ainda maior com o estudo do CPR, optou-se por continuar o estudo de dosagem do teor ideal de sílica sob estas condições (relação a/glom = 0,30). Os resultados de ruptura à compressão estão apresentados no gráfico 12.

Analisando os resultados de resistência, pode-se concluir que mesmo havendo uma diminuição do consumo de cimento por m³ da dosagem contendo 10% de adição de sílica para a de 20%, obteve-se melhores valores de resistência com a última.

A dosagem com teor de 30% de adição de sílica, apresentou valores de resistência à compressão levemente inferior à dosagem com 20%. Os resultados obtidos confirmam a necessidade de adaptação de traços retirados de literaturas, quando os materiais empregados forem diferentes, uma vez que o teor ideal citado, nas literaturas para a adição de sílica, é de 30%.

Como conclusão desses testes, fica definido o teor ideal de sílica em 20% da massa de cimento. Como os valores de resistência encontrados ainda são considerados insatisfatórios, buscou-se elevar a quantidade de cimento por m³, conforme tabela 12, com o objetivo de atingir melhores valores de resistência à compressão.

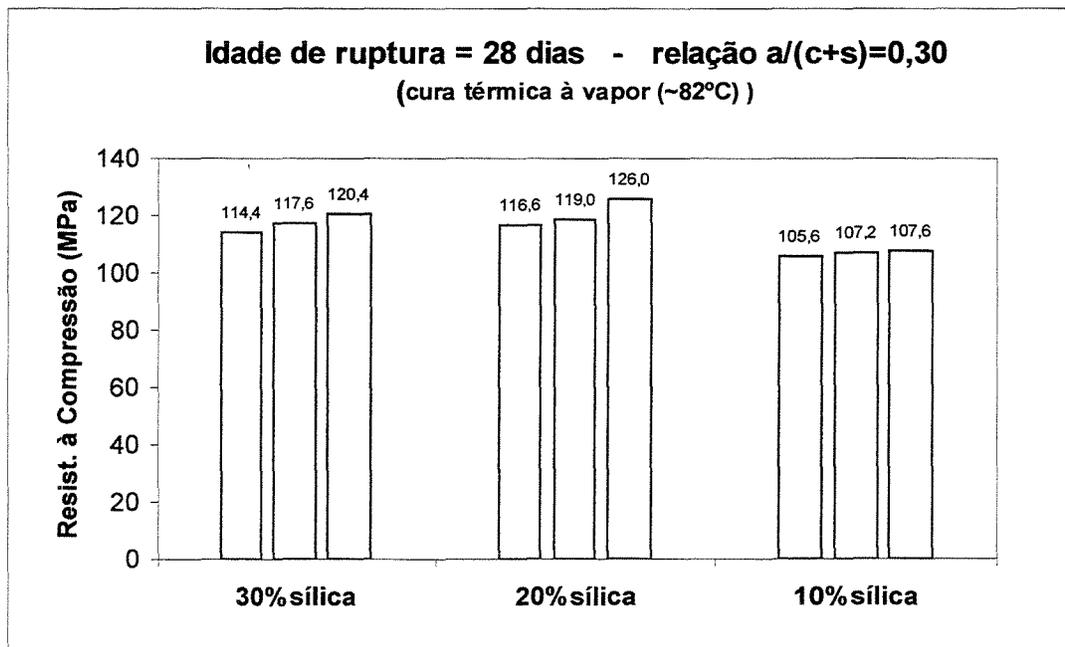
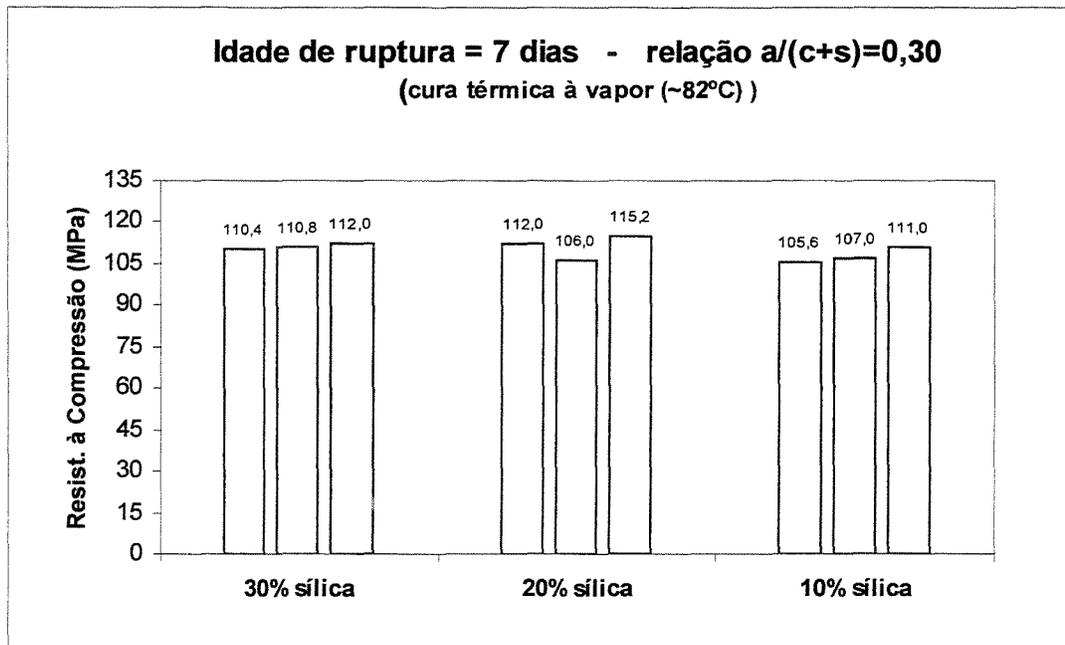


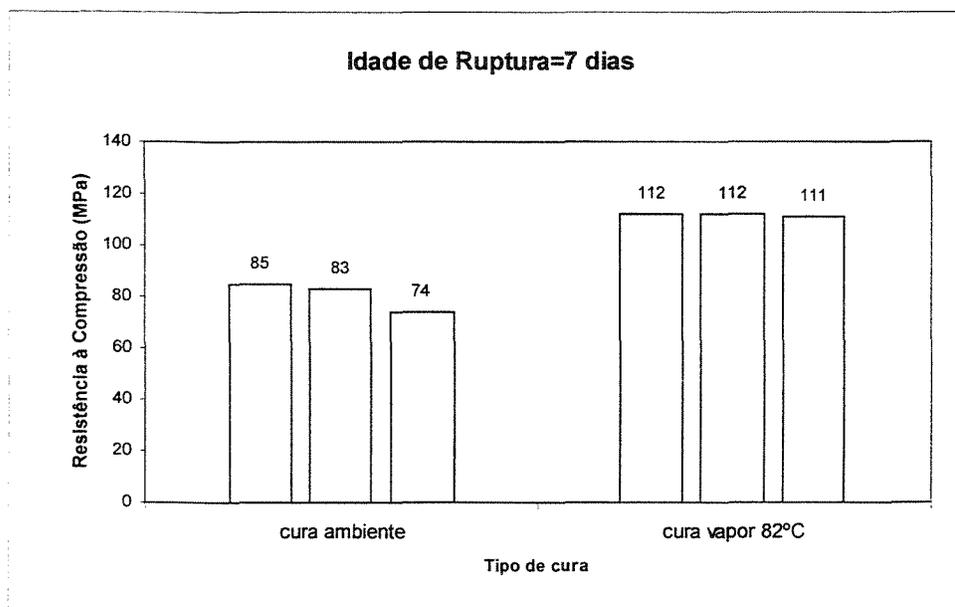
Gráfico 12 - Teste de resistência à compressão – diferentes teores de sílica ativa.

Tabela 12 - Descrição da dosagem com consumo elevado de cimento.

	Massa Específica (kg/dm ³)	Consumo (kg/m ³)
Cimento	3,11	893
Sílica	2,21	179
Areia	2,70	625
Pó de quartzo	2,70	179
Aditivo	1,10	10,7
Água	1,0	321
Relação água/aglomerante =		0,30

Os dados e resultados de ruptura dessa dosagem estão apresentados no gráfico 13. Nota-se que os resultados de resistência à compressão obtidos não apresentaram ganhos mensuráveis, quando compara-se com as dosagens contendo menor consumo de cimento apresentadas, anteriormente, no gráfico 12.

Este fato, juntamente com a incapacidade de redução da quantidade de água empregada nas misturas contendo cimento CP III 32RS, fomentou na tentativa de se produzir o CPR com um cimento de alta resistência inicial e final, e de elevada finura: cimento CP V ARI PLUS.



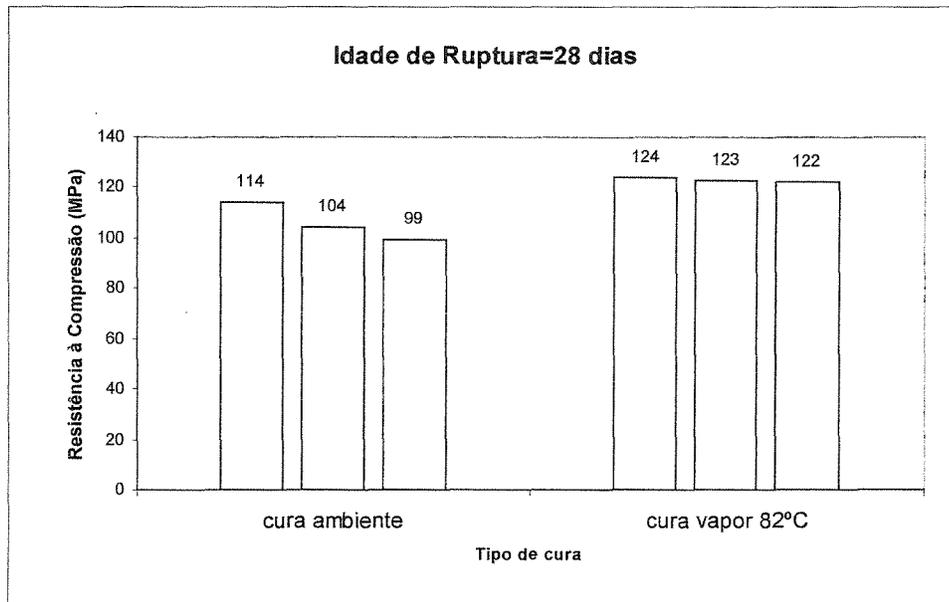


Gráfico 13 - Teste de resistência à compressão – dosagem com elevado consumo de cimento.

4.3.1 Cimento CP V-ARI PLUS

É um cimento especialmente desenvolvido para obtenção de alta resistência final e inicial, sendo indicado para a produção de estruturas em concreto aparente, alto desempenho e pré-moldados. Dentre suas características, este cimento contém teor de $C_3A = 8,0\%$ e finura Blaine = $460 \text{ m}^2/\text{kg}$. (A caracterização completa desse cimento encontra-se no anexo n. 4). Sabe-se que os aditivos superplastificantes, quando misturados com cimentos de alta finura, apresentam menor desempenho de fluidificação, mas, em virtude da relação água/aglomerante estar elevada, superior a 0,20, tal efeito deve ser minimizado.

Em função do desconhecimento do comportamento reológico desse cimento, inicialmente foi realizado um rápido estudo para determinar o teor ideal do aditivo hiperplastificante B pelo método do cone de mini slump. Quatro teores de aditivos foram testados para uma mistura contendo relação água/aglomerante = 0,27 (gráfico 14) e os resultados indicaram maior fluidez das misturas para teores de aditivo entre 1,0 e 1,5% de aditivo.

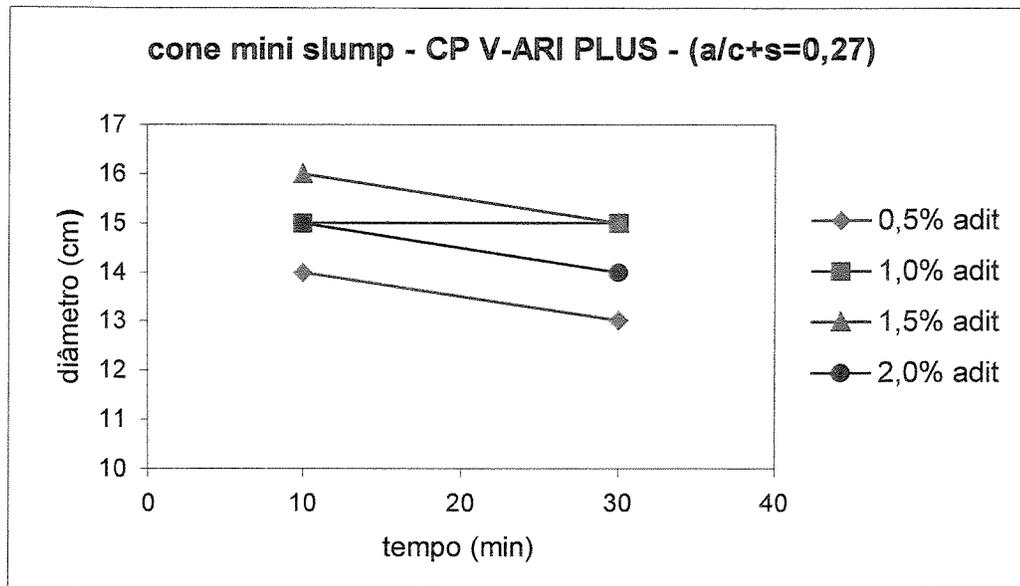


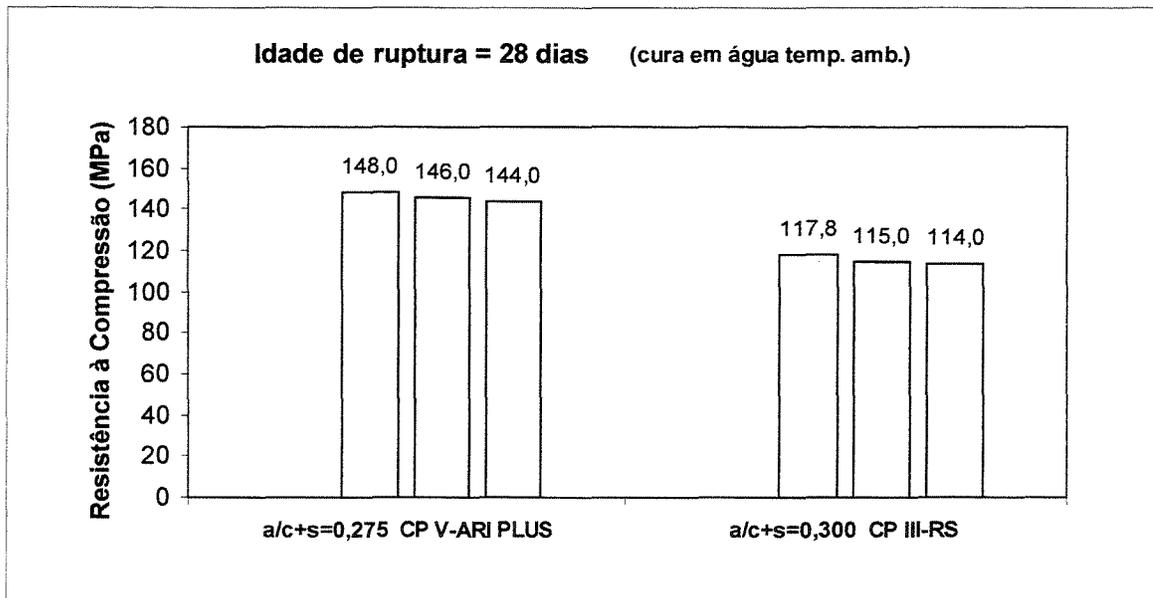
Gráfico 14 - Determinação teor ideal de aditivo para o cimento CP V-ARI PLUS.

Sabe-se que a utilização de água sob temperaturas inferiores à ambiente, tende a retardar a velocidade das reações de hidratação do cimento, de modo a colaborar para manter por mais tempo a trabalhabilidade de uma determinada mistura. O emprego de agregado de pequeno diâmetro condiciona menor volume de vazios quando a granulometria é contínua e controlada, contribuindo para melhorar a reologia do compósito, favorecendo, portanto as propriedades mecânicas do concreto.

Baseados nessas premissas, foram realizadas algumas dosagens com o objetivo de atingir relações água/aglomerante inferiores a 0,30, com a adição de água resfriada, juntamente com a eliminação da areia de quartzo na mistura. Partiu-se de duas dosagens iniciais, diferenciando-se entre si pelo tipo de cimento utilizado. A dosagem denominada teste1 foi empregado CP III 32 RS, enquanto que na dosagem denominada teste 2, foi empregado CP V-ARI PLUS. Os traços finais e os resultados da resistência à compressão dos respectivos concretos estão apresentados na tabela 13. A temperatura da água de amassamento foi resfriada, aproximadamente 17°C, contribuindo para a relação água/aglomerante atingir 0,275, com a mistura contendo cimento CP V ARI PLUS. O teor de aditivo utilizado em ambas dosagens foi de 1,0 % da massa de material aglomerante (cimento + sílica).

Tabela 13 - Descrição do traço, consumo de materiais e resultados de resistência.

Material	CP III 32-RS (kg/m ³)	CP V-ARI PLUS (kg/m ³)
Cimento	864	887
Sílica	173	177
Areia	0	0
Pó de quartzo	864	887
Aditivo	10.4	10.6
Água	311	293
Relação água/aglomerante =	0,300	0,275



Pode-se observar no gráfico da tabela 13, que a dosagem com cimento CP V-ARI PLUS apresentou melhores resultados de resistência. A justificativa para a utilização do cimento CP III-32 RS, nos estudos anteriores, se deu pelos valores de ensaios químicos, principalmente o teor mais reduzido de C3A, e pelos melhores resultados de fluidez no ensaio de cone de mini slump com relações água/aglomerante próximo a 0,20.



Constatou-se durante o processo de homogeneização que a mistura contendo cimento CP V-ARI PLUS, pode ser misturada com uma relação água/aglomerante menor que 0,30 e, apresentou perda de plasticidade muito elevada com este aditivo, dificultando, assim, a moldagem dos corpos de prova, pois exigia muita velocidade do operador. O mesmo efeito não se observou na mistura com CP III 32 RS.

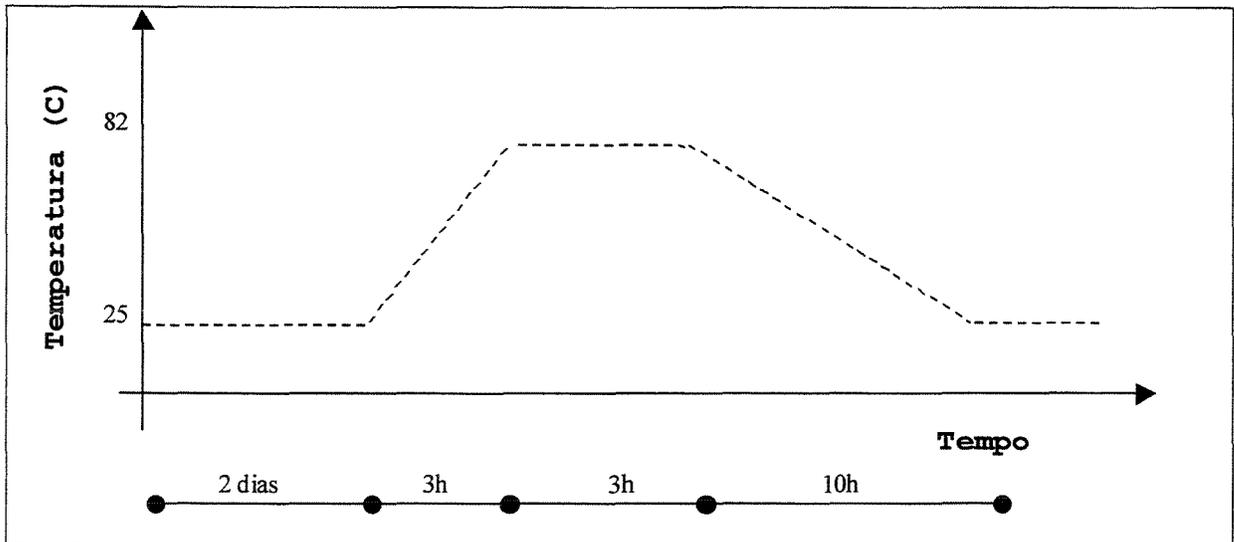
Essa diferença no desempenho reológico dos cimentos já é conhecida no meio acadêmico. Alguns tipos de cimento apresentam pouca perda de abatimento nas primeiras horas, mas o seu desempenho, em termos de resistência, é ruim, quando se trabalha com concretos de alta resistência. Entretanto, cimentos que apresentam elevada perda de abatimento, podem ser corrigidos com o uso de aditivos superplastificantes e acabam conferindo maior desempenho mecânico ao compósito, permitindo, com isso, a fabricação de concretos de elevada resistência.

Com a obtenção destes resultados, passou-se a estudar novos traços com o cimento CP V-ARI PLUS, com o objetivo de elevar a resistência mecânica do compósito, juntamente com a determinação do tempo de cura térmica mais eficiente para a produção dos Concretos de Pós Reativos.

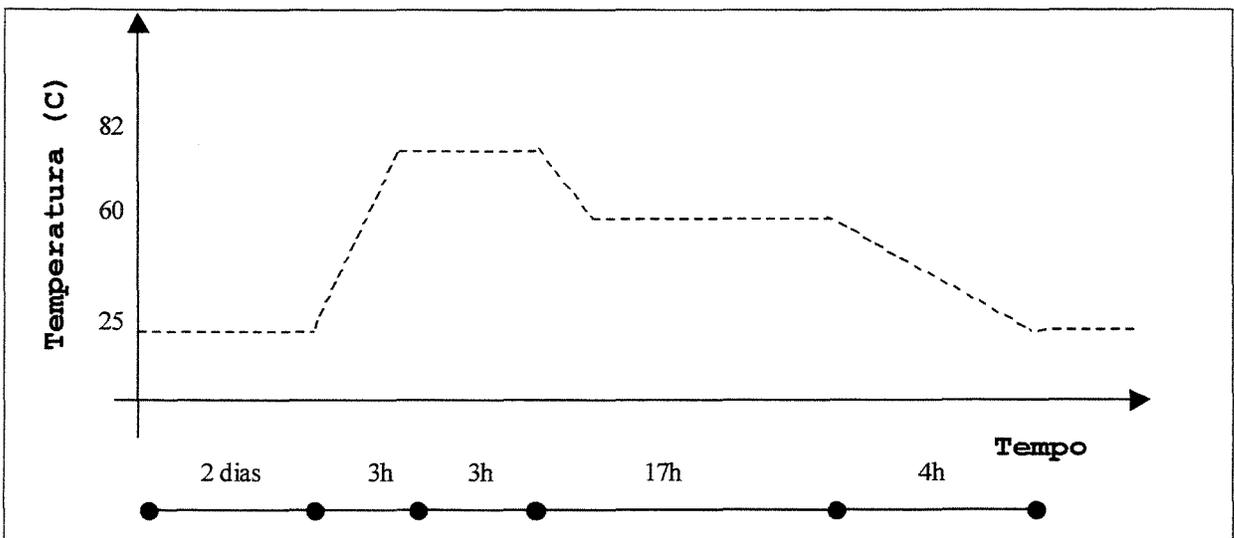
4.3.2 Variação da Cura Térmica com Cimento CP V-ARI PLUS

Nesta etapa foram realizadas novas dosagens aplicando-se o mesmo traço empregado no teste 2. O objetivo deste estudo foi verificar a influência da cura térmica a vapor na produção do concreto de pós reativos. Para isso, foram testados 3 diferentes ciclos de tratamento térmico, conforme descrição abaixo:

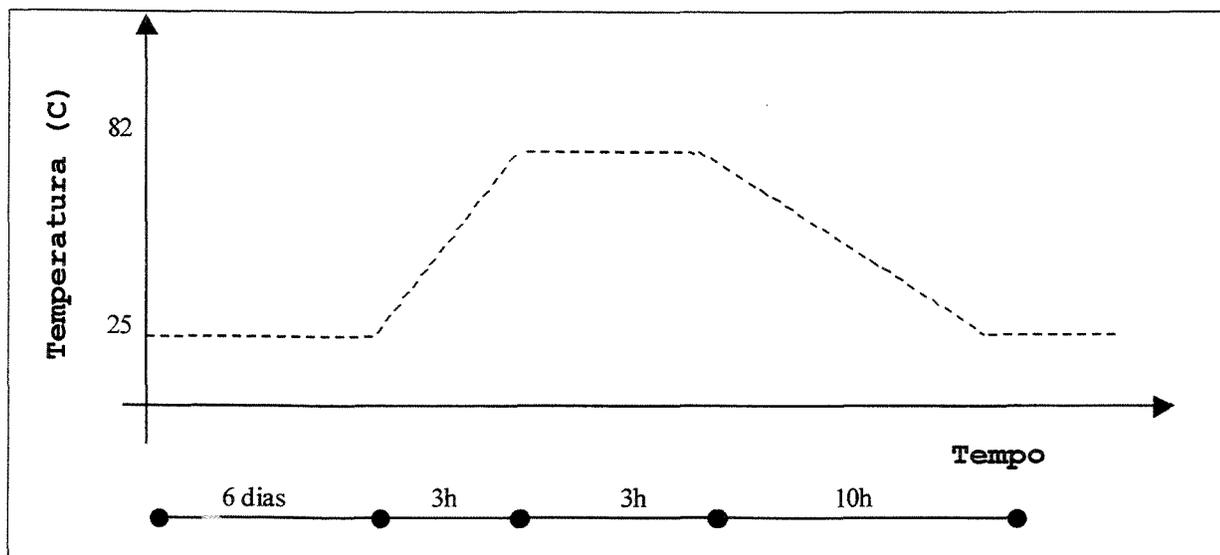
1) tratamento A: os corpos de prova após moldados, ficaram submersos em água à temperatura ambiente, até a idade de 2 dias. Em seguida foram submetidos a tratamento térmico a vapor por 6h / 82°C conforme ciclo térmico abaixo:



2) tratamento B: os corpos de prova após moldados, ficaram submersos em água, à temperatura ambiente, até a idade de 2 dias. Em seguida, foram submetidos a tratamento térmico a vapor por 6h / 82°C, passando, posteriormente, para temperatura de 60°C, por mais 17h, conforme ciclo térmico abaixo:



3) tratamento C: os corpos de prova após moldados, ficaram submersos em água, à temperatura ambiente, até a idade de 6 dias. Em seguida, foram submetidos a tratamento térmico a vapor por 6h / 82°C conforme ciclo térmico a seguir:



A temperatura da água de amassamento, novamente foi resfriada para 17°C, para permitir a redução da relação água/aglomerante de 0,30 para 0,275. O teor de adição de sílica ativa é 20%, e o traço empregado nessas dosagens, consta na tabela 14.

Tabela 14 - Descrição do traço – cimento CP V-ARI PLUS.

Massa Específica (kg/dm ³)	Consumo (kg/m ³)	
Cimento	3,12	888
Sílica	2,21	178
Areia	2,70	0
Pó de quartzo	2,70	888
Aditivo	1,10	10,7
Água	1,0	293
Relação água/aglomerante =		0,275

Foram rompidos, em média, 5 (cinco) corpos de prova para cada idade e tratamento, adotando apenas os 3 melhores resultados (gráfico 15). Importante destacar que os corpos de prova, após ruptura, ficaram completamente destruídos, não permitindo a visualização da presença, ou não, de cones sobrepostos. A explicação para a total destruição dos corpos de prova se dá pelo acúmulo de tensão na prensa no momento imediatamente seguinte à ruptura do corpo

de prova, o chamado pós pico. AITCIN, 2000 explica que quando a ruptura de um corpo de prova ocorre, toda a energia elástica acumulada nas colunas da prensa de ensaio é subitamente liberada. Quanto maior a resistência do concreto, mais grave será o problema. Isso explica a completa destruição dos corpos de prova.

Analisando os resultados de resistência, observa-se uma melhor eficiência do tratamento térmico C frente ao tratamento A. A diferença entre os dois fica apenas no momento inicial da aplicação da cura térmica, indicando, com isso, a obtenção de melhores resultados de resistência à compressão, quando aplica-se a cura térmica a vapor nos corpos de prova de concreto após 6 dias de cura, em água, à temperatura ambiente.

O maior valor de resistência à compressão foi proporcionado pelo tratamento térmico B, mas em apenas um resultado. Como, novamente, constatou-se uma variação muito grande entre os resultados dos corpos de prova de mesma dosagem e idade, fica difícil definir, com exatidão, que o tratamento térmico B é mais eficiente que o tratamento térmico C. Faz-se necessário mais estudos para se confirmar tais desempenhos. Ao mesmo tempo, a aplicação mais prolongada da cura térmica (tratamento B), comprovou a eficiência do calor na formação de cristais mais resistentes nos compósitos, quando compara-se com os resultados obtidos com o tratamento A.

Após os estudos e testes realizados, é premente a importância de se encontrar o período e tempo ideal de aplicação de tratamento com calor, para que se possa explorar, mais eficientemente, as propriedades mecânicas dos concretos de pós reativos.

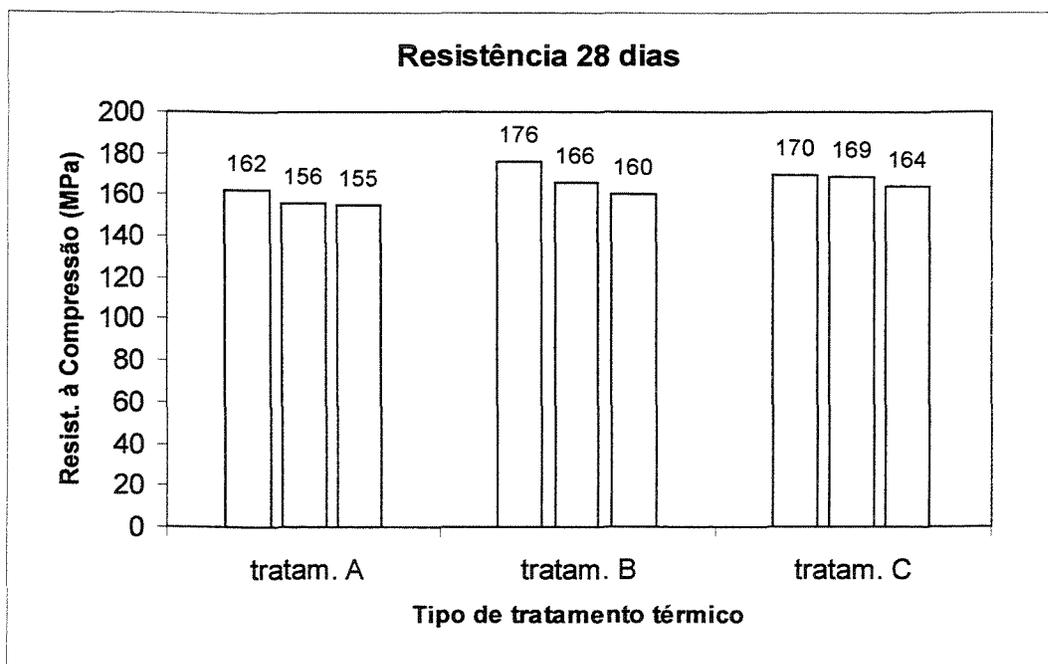
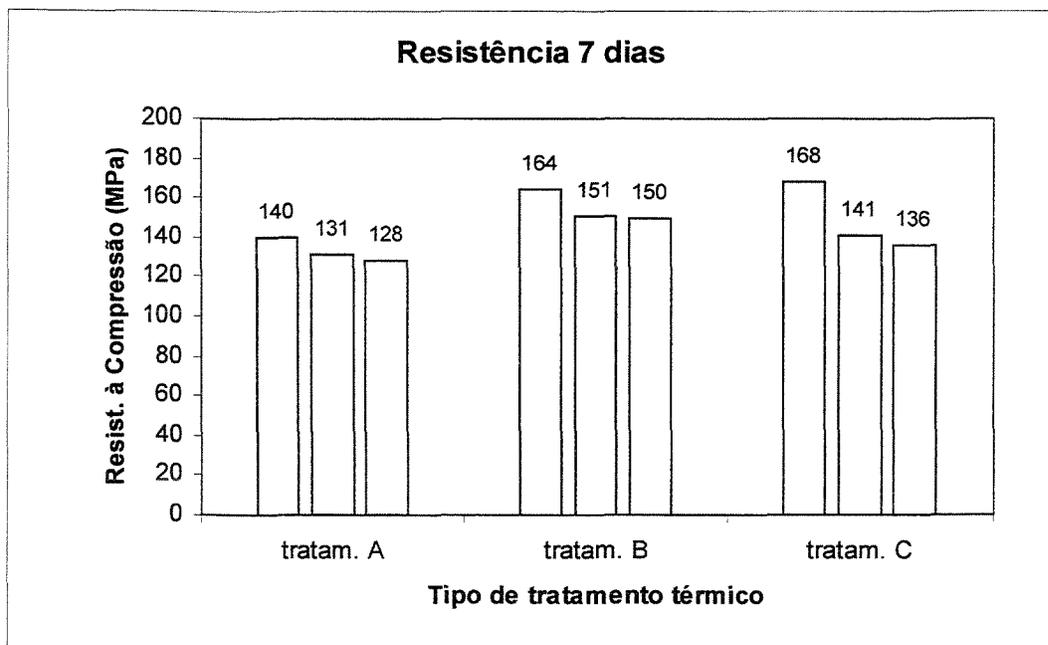


Gráfico 15 - Teste de resistência à compressão – dosagens com variação de tratamento térmico.

5 CONSIDERAÇÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

A tecnologia do concreto tem evoluído, constantemente, ao longo dos anos, em função das necessidades de mercado. O aumento da resistência mecânica foi o objetivo principal para muitos pesquisadores, por muitos anos, proporcionando o surgimento dos Concretos de Alta Resistência (CAR). O aprimoramento e desenvolvimento de novos equipamentos, bem como as tecnologias de análise das patologias encontradas em diversas estruturas, contribuíram para salientar a questão da durabilidade do concreto. Esta visão trouxe muito desenvolvimento e qualidade para as atuais obras da construção civil. Inúmeros estudos de durabilidade foram realizados e, outros tantos, ainda estão em andamento. Um dos inúmeros resultados, foi a descoberta de diferentes materiais capazes de contribuir, positivamente, para a produção dos denominados concreto de alto desempenho (CAD), como a sílica ativa, cinza de casca de arroz, argila calcinada, etc.

Com base nessas afirmativas, pode se ressaltar que a vida útil das estruturas de concreto é um dos assuntos de maior relevância entre os especialistas. O mais recente avanço tecnológico surgiu com o aparecimento do concreto de pó reativo, caracterizado por apresentar elevada resistência mecânica, tanto à compressão, quanto à flexão, uso de microfibras de aço, materiais granulares de pequenas dimensões, aplicação de tratamento térmico e a necessidade incondicional de adição de aditivo superplastificante de alta eficiência.

Sabe-se que quanto maior a resistência requerida para uma estrutura de concreto, maiores serão as exigências e os cuidados com a escolha dos materiais constituintes, bem como as instalações e equipamentos necessários para a produção deste concreto. Como o CPR é um

concreto de ultra alta resistência, a prévia determinação da compatibilidade dos materiais constituintes é inevitável.

Apresenta-se a seguir, um resumo todos os ensaios empregados ao longo dessa pesquisa, bem com,o as diversas dificuldades encontradas no decorrer desse projeto, que provocaram alterações de materiais, equipamentos e metodologias.

Cone de Mini Slump

Este método foi baseado no ensaio de cone de mini slump de AITCIN, 1998 . É adotado para a determinação da compatibilidade entre cimentos e aditivos superplastificantes, por ser um método simples de avaliação.

Analisando os resultados encontrado nesta pesquisa, conclui-se que o uso do cone de mini slump, mostrou ser um método muito eficaz na determinação da compatibilidade entre cimentos e aditivos. Através deste método, é possível encontrar o aditivo superplastificante mais eficiente para cada tipo de cimento estudado, bem como, serve de base para a determinação do teor ideal de aditivo pelo método do cone de Marsh para uma determinada relação água/aglomerante. Durante a pesquisa, foram testados 5 aditivos, encontrados no mercado nacional, denominados nesta pesquisa de: melamina pura, plastificante, superplastificante, hiperplastificante A e hiperplastificante B; este reconhecido como o mais eficiente, conforme resultados já apresentados.

Cone de Marsh

Os cones de Marsh foram muito empregados em diferentes setores industriais, para avaliar a fluidez de diferentes tipos de grautes, empregados na estabilização de solos e rochas, e lamas utilizadas, principalmente pelas industrias petrolíferas. Este método consiste em preparar uma pasta e medir quanto tempo demora, para que uma certa quantidade da pasta, escoe através

de um funil, com um dado diâmetro, obtendo-se, como resultado, o teor ideal de aditivo para uma determinada relação água/cimento ou água/aglomerante.

O método apresentou resultados claros e satisfatórios, sendo, inclusive, capaz de identificar a menor quantidade de água possível para garantir a homogeneização dos materiais.

Ruptura dos Corpos de Prova

Os ensaios de resistência mecânica ficaram, basicamente, restritos a resistência à compressão axial. Iniciou-se com a moldagem de corpos de prova cilíndricos, tipo 5x10 cm, em função da dimensão reduzida dos agregados. Em virtude da disparidade dos resultados encontrados e da elevada resistência mecânica (>100 MPa), passou-se a trabalhar com corpos de prova cúbicos (5x5x5 cm) a fim de eliminar o capeamento com enxofre dos cp's cilindros e garantir uma compactação mais eficiente por meio de mesa vibratória. Os resultados mostraram-se mais homogêneos, mais ainda continuavam a apresentar valores discrepantes. Isso veio a confirmar a necessidade de se garantir a mais alta planicidade entre as superfícies dos corpos de prova e equipamento (prensa, rótula), bem adaptados para a ruptura desse tipo de material.

Cura e Tratamento Térmico dos Concretos

Este é um aspecto muito relevante quando se trata de concretos de pó reativo. O CPR mostrou ser muito susceptível à forma de cura. O estudo de dosagem I (gráfico 7), demonstrou, claramente, a perda de resistência do material quando curado ao ar, comparando-se com cura em água a temperatura ambiente. Em função da relação água/aglomerante ser extremamente baixa, nem todos os grãos de cimento sofrem hidratação, necessitando da presença de água ao longo da cura, para que possam reagir, contribuindo para elevação da resistência final do material.

Quanto aos tipos de tratamento térmico, pode-se afirmar que inúmeros fatores contribuem para uma melhor eficiência de cura, dentre eles destacam-se : a) temperatura máxima de cura; b) forma de cura : imersão em água ou vapor; c) tempo inicial da aplicação do tratamento; d) tempo total de exposição e e) taxa de elevação e redução da temperatura durante o tratamento.

Esta pesquisa, inicialmente, não tinha por objetivo, estudar qual o método térmico mais eficaz para a produção dos concretos de pós reativos. Mas, em função das inúmeras dificuldades encontradas, foram feitas algumas alterações, onde concluiu-se que para os materiais estudados, é recomendável a utilização de cura a vapor com temperatura $< 85^{\circ}\text{C}$, e o início da aplicação deste tratamento deve ser após o concreto estar endurecido a fim de evitar problemas com a expansão conforme ficou constatado com as amostras submetidas à cura térmica a vapor a 90°C , após o início de pega do cimento. Com o cimento CPV ARI PLUS, que apresentou os maiores valores de resistência, o início do tratamento térmico mais eficiente se deu após 6 dias de cura, em água, a temperatura ambiente.

Tipos de Cimento

Este projeto procurou, inicialmente, basear-se nas informações contidas nos diversos artigos internacionais sobre os concretos de pós reativos, para, posteriormente, definir o cimento nacional mais próximo das características mencionadas. Uma das informações mais comentadas entre os especialistas é de que o cimento deve ser de finura Blaine reduzida, ou seja, o cimento grosso; e, o teor de C_3A , o mais próximo possível de zero. Com base nessas informações, foi definido o primeiro cimento a ser testado, denominado CP II – fibro 40. Este cimento apresentou bons resultados de fluidez e compatibilidade sob relação água/aglomerante $< 0,25$, mas não atingiu a resistência requerida. Testou-se outro tipo de cimento, CP III 32 RS, onde, novamente, não se atingiu os altos valores de resistência mencionados nos artigos internacionais, apresentados no capítulo da revisão bibliográfica.

Os cimentos da classe V, fogem, completamente, da colocação inicial de finura e teor de C_3A . Ao se testar a produção de CPR, com relação água/aglomerante $> 0,27$, permitiu-se, com isso, testar os cimentos CP V ARI e CP V ARI PLUS. Este último mostrou ser capaz de elevar a resistência do concreto para até 170 MPa, com um consumo de cimento de 890 kg./m^3 e, relação água/aglomerante. = 0,275. Mas, para isso, houve a necessidade de se utilizar água resfriada para diminuir as velocidades iniciais de reação do cimento, a fim de manter a trabalhabilidade por um período mínimo para a moldagem dos corpos de prova.

Ficou claro neste estudo, diante dos inúmeros obstáculos encontrados, que há uma dificuldade relevante em se encontrar um cimento nacional, capaz de produzir tais resultados, com as características químico-físicas mencionadas pelos autores dos artigos internacionais sobre produção e fabricação de estruturas em concreto de pó reativo.

Recomendações

Acredita-se, que este projeto foi capaz de contribuir, positivamente, com informações e particularidades que estão por trás da produção de concretos de pós reativos. Esse tipo de concreto mostrou ser muito susceptível aos materiais de sua composição, bem como ao ambiente no qual esta sendo produzido. Sem dúvida, a sua produção é engenharia de alta tecnologia.

Em função dos inesperados obstáculos e alterações ocorridos no decorrer da pesquisa, faz-se algumas recomendações, que possam contribuir os próximos estudos sobre este mesmo tema:

a) Escolha dos materiais. Partindo-se, inicialmente, dos agregados (areia e pó de quartzo) deve-se definir o diâmetro máximo, a granulometria e, fazer um estudo prévio da proporção ideal dos agregados através do menor índice de vazios e resistência à compressão. Quanto ao aditivo, utilizar, imprescindivelmente, os aditivos superplastificantes de 3ª geração, para garantir uma relação água/aglomerante próximo a 0,20. Importante ressaltar, que a escolha do aditivo não pode ser feita separadamente do cimento, ambos devem ser, constantemente, submetidos aos ensaios de compatibilidade (cone de mini slump e cone de Marsh). Quanto ao cimento, procurar empregar aquele com as características já mencionadas de baixa finura Blaine e reduzido teor de C_3A . A resistência do cimento, também, deve ser observada, adotando, sempre que possível, o cimento que apresentar maior valor de resistência à compressão aos 28 dias.

b) Corpos de prova. O uso de corpos de prova de maior dimensão, parece ser mais eficaz. Havendo a possibilidade em se trabalhar com corpo de prova cilíndrico superior a 5x10 cm., isto é recomendável. Para minimizar problemas de desvio padrão elevado,

recomenda-se a retificação da superfície dos corpos de prova cilíndricos e a moldagem em mesa vibratória.

c) Tratamento térmico. Este é um assunto muito importante, devendo ser bem projetado. O tempo ideal de aplicação e a temperatura máxima, não podem ser definidos sem testes preliminares, em virtude dos desconhecimento do comportamento reológico dos diferentes materiais empregados na composição do CPR. Quanto ao equipamento do tratamento térmico, este deve ser dimensionado para obter o melhor resultado possível. Recomenda-se o uso de cura a vapor, onde a taxa de elevação e retorno da temperatura não ultrapasse 20° C/h para evitar o aparecimento de fissuras decorrentes de tensões térmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADELIN, R.; BEHLOUL, M. *High ductility beams without passive reinforcement. In: 4th International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 1996, Paris: France. Proceedings...* Paris: High Strength/High Performance Concrete, 1996.
2. AITCIN, P. C. *Concreto de alto desempenho*. São Paulo: Pini, 2000, 667p.
3. _____. *High performance concrete*. Canadá: Sherbrook, E & FN SPON, 1998.
4. AITCIN, P. C.; RICHARD, P. *The pedestrian/bikeway bridge of Sherbrook. In: 4th International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 1996, Paris: France. Proceedings...* Paris: High Strength/High Performance Concrete, 1996.
5. ANDRADE, N.P.H.; VEIGA, F.N. *Microscopia eletrônica de varredura*, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 1998.
6. ANON. *Concrete attains 29,000 psi. In: Engineering News-Record*, vol. 23, jul, 1994, p.13.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Boletim técnico: Estudo sobre concreto de alto desempenho com cimento CPIII-40 VOTORAN*. São Paulo, p.18-21 e 26-28.
8. BACHE, H. H. *Densified cement/ultra-fine particle-based materials. In: 2^o International Conference on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, 10-12 June, 1981, 12p.
9. BANTHIA, N.; TROTTIER, J. F. *Concrete reinforced with deformed steel fibers, Part I: Bond-Slip Mechanisms. ACI Materials Journal*, vol. 91, n^o 5, set-oct, 1994, p.435-446.
10. _____. *Concrete reinforced with deformed steel fibers, Part II: Toughness Characterization. In: ACI Materials Journal*, vol. 92, n^o 2, mar-apr, 1995, p.146-154.
11. BEHLOUL, M. *Définition d'une loi de comportement du BPR. In: Les Anales de l'ITBTP*, n^o 532, Série Beton 320, mar-apr, 1995, p.122-127.
12. BEHLOUL, M.; ADELIN, R.; BERNIER, G. *Non linear computation of fiber reinforced micro-concrete structures. In: Structures Congress, 1996. Proceedings...* 1996, refs 12.

13. BEHLOUL, M.; BERNIER, G.; CHEYREZY, M. Tensile behavior of reactive powder concrete. *In: BHP 96*, Paris, may, 1996.
14. BENTUR, A.; MINDESS, S. Fiber reinforced cementitious composites. United Kingdom, Braking, ed. Elsevier, p.35-135, 1990.
15. BINA, Paulo. Concreto de pós reativos: uma revolução no conceito do concreto. *Revista técnica*, São Paulo: Pini, n° 8, p.50-51, jan/fev, 1999.
16. BONNEAU, O.; DUGAT, J.; LACHEMI, M.; *et al.* Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 94, n° 4, jul-aug, 1997, p.286-290.
17. BONNEAU, O.; POULIN, C.; DUGAT, J.; *et al.* Reactive powder concretes: from theory to practice. *In: Concrete International*, vol. 18, n.° 4, april, 1996, p. 47-49.
18. CHEYREZY, M. Structural applications of Reactive Powder Concretes, *In: Concrete*, jan, 1999, p.20-23.
19. CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete). *In: Cement and Concrete Research*, vol. 25, n.° 7, oct, 1995, p.1491-1500.
20. CHEYREZY, M.; PICIOCHI, R. Les bétons de poudres réactives, *In: Tribute to Micheline Moranville Regourd*. Sherbrook: Canadá, 1995.
21. COLLEPARDI, S.; COPPOLA, L.; TROLI, R.; *et al.* M. Mechanisms of actions of different superplasticizers for high-performance concrete. *In: CANMET/ACI SP186, 1998, Gramado: Brazil. Proceedings...* Gramado: High Performance Concrete, 1998, SP-186-29, p.503-523.
22. _____. Mechanical properties of modified reactive powder concrete. *In: Fifth CANMET/ACI SP-173, 1997, Rome: Italy. Proceedings...* Rome: Chemical Admixtures, 1997, SP-173-1, p.1-23.
23. COPPOLA, L.; TROLI, R.; CERULLI, T.; *et al.* The influence of materials on the performance of reactive powder concrete. *In: International Congress on High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, 1996, June, Florianópolis: Brasil. Proceedings...* Florianópolis: High Performance Concrete, 1996, p.502-513.
24. COPPOLA, L.; TROLI, R.; BORSOI, A.; *et al.* Influence of superplasticizer type on the compressive strength of reactive powder mortars. *In: Fifth CANMET/ACI SP-173, 1997, Rome: Italy. Proceedings...* Rome: Chemical Admixtures, 1997, SP-173-27, p.537-557.
25. DALLAIRE, E.; BONNEAU, O.; LACHEMI, M. AITCIN, P.C. Mechanical behavior of confined reactive powder concretes. *In: The Materials Engineering Conference, 1996. Proceedings...* 1996, vol. 1.

26. DOWD, W. M.; DAURIAC, C. E.; Development of reactive powder concrete (RPC) – precast products for the united states market. *In: International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, 1998, Sherbrooke: Canada. Proceedings...* Sherbrooke: High-Performance and Reactive Powder Concretes, 1998, vol. 3, aug, p.36-57.
27. _____. Reactive powder concrete. *In: Construction Specifier*, vol. 49, n° 12, dec, 1996.
28. DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Mechanical properties of reactive powder concretes. *In: Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 29, may, 1996, p.233-240.
29. _____. Étude expérimentale de la deformation sous contrainte et du comportement à la rupture du béton de poudres réactives. *In: Les Annales de l'ITBTP*, n° 532, Série béton 320, mar-apr., 1995, p.112-121.
30. EUROPEAN FEDERATION OF PRODUCERS AND APPLICATORS OF SPECIALIST PRODUCTS FOR STRUCTURES (EFNARC). European Specification for Sprayed Concrete, 1996, ISBN 0 9522483 1 X.
31. FEYLESSOUFI, A.; CRESPIAN, M.; DION, P.; BERGAYA, F.; VAN DAMME, H.; RICHARD, P. Controlled Rate Thermal Treatment of Reactive Powder Concretes In *Advanced Cement Based Materials*, vol. 6, n° 1, jun, 1997.
32. FEYLESSOUFI, A.; VILLIERAS, F.; MICHOT, L.J. et al. Water environment and nanostructural network in reactive powder concrete. *In: Cement and Concrete Composites*, vol. 18, 1996, p.23-29.
33. FIGUEREDO, A.D. Parâmetros de dosagem e controle do concreto projetado com fibras de aço, São Paulo, 1997. Tese (*Doutorado em Engenharia Civil*) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
34. GILLILAND, S. Reactive powder concrete (RPC), a new material for prestressed concrete bridge girders. *In: Structures Congress, 1996. Proceedings...* vol. 1, 1996, p.125-132.
35. KALOUZEK, G.L.; MITSUDA, H.F.; TAYLOR. Xonotlite: Cell-parameters, termogravimetry and analytical electron microscopy. *In: Cement and Concrete Research*, vol. 7, 1977, p.305-312.
36. KATTAR, J. E.; ALMEIDA, N. J. Cimento Portland. *Holdercim Brasil S.A*, 4ª ed., jul., 1999. 43p.
37. LACHEMI, M.; DALLAIRE, E.; AITCIN, P.C. High-Performance Powder. *In: Civil Engineering. New York*, vol. 68, jan, 1998, p.48-51.
38. LARRARD, F. Ultrafine particles for the making of very high strength concretes. *In: Cement and Concrete Research*, vol. 19, 1989, p.161-172.

39. MANSOUTRE, S.; LEQUEUX, N. Quantitative phase analysis of Portland cements from reactive powder concretes by X-ray powder diffraction. *In: Advances in Cement Research*, vol. 8, n° 32, oct, 1996.
40. MATTE, V.; MORANVILLE, M. Durability of Reactive Powder Composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. *In: Cement and Concrete Composites*, vol. 21, 1999, p.1-9.
41. MATTE, V.; MORANVILLE, M. Leaching of the reactive powder concretes: Results on transfer properties. *In: Materials Research Society Symposium, 1998. Proceedings...* vol. 503, 1998.
42. MBT – MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES. *Manual Técnico*, vol.. 1, 2000, p.43-44.
43. MEHTA, K.; MONTEIRO, P. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994, 573p.
44. MELLO, A.; LIBORIO, J.; SILVA, I. Evidências da perda de resistência mecânica final devido à cura térmica observadas através de imagens de microscopia eletrônica de varredura. *In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2000, Fortaleza. Anais (CD)...* IBRACON, ago., 2000, trabalho I-B-063.
45. MORENO, A. L.; OLIVEIRA, N. Resistência ao Cisalhamento de Vigas de Concreto de Alta Resistência Reforçados com Fibras de Aço. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2000.
46. NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. 2ª ed., São Paulo: Pini, 1997.
47. O'NEIL, E.; DOWD, W. High-performance pipe products fabricated with reactive powder concrete. *In: The Materials Engineering Conference, 1996. Proceedings...* vol. 2, 1996, p.1321-1330.
48. PAULON, V. A.; MONTEIRO, P. Estudos da microestrutura da zona de transição entre pasta de cimento e o agregado. São Paulo, 1991. Tese (*Doutorado em Engenharia Civil*) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
49. RICHARD, P. Reactive Powder Concrete: A New Ultra-high-strength cementitious material. *In: 4th International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 1996, Paris: France. Proceedings...* Paris: High Strength/High Performance Concrete, 1996, p.1343-1349.
50. RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. *In: Cement and Concrete Research*, vol. 25, n.º 7, oct, 1995, p.1501-1511.
51. _____. Les bétons de poudres réactives... *Proceedings of the Conference in Tribute to Micheline Moranville Regourd*, Sherbrook, published by Concrete Canada, Faculty of Applied Sciences, University of Sherbrook, Quebec, Canada, 1994 a, 28p.

52. _____. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. *In: Concrete Technology. Past, Present and Future*, ACI SP 144, USA, 1994 b, p.507-518.
53. RICHARD, P.; CHEYREZY, M.; DUGAT, J. Pretensioned beam without conventional reinforcing. *FIP Notes*, 1995/1, p.2-3.
54. ROUX, N.; ANDRADE, C.; SANJUAN, M.A. Experimental study of durability of reactive powder concrete. *In: Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 8, n° 1, feb, 1996.
55. ROUX, N.; BARRANCO, M. Mise en oeuvre des bétons de poudres réactives (BPR) dans le BTP. *In: Les Annales de l'ITBTP*, n° 532, Série béton 320, mar-apr, 1995, p.128-132.
56. SILVA, Paulo Fernando Araújo. Concreto Projetado para Túneis. São Paulo: Pini, maio, 1997, 92p.
57. VIEIRA, S. R.; REGATTIERI, C. E. Boletim técnico ABCP: Estudo sobre concreto de alto desempenho com cimento CPIII-40 VOTORAN. São Paulo, 1997, p.18-21 e 26-28.
58. TESUKA, Yasuko. Concreto armado com fibras. São Paulo, *Associação Brasileira de Cimento Portland*, 2ª ed., 1999, 28p.
59. THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete: Part III-2. n° 3, Japan, 1984.
60. VERNET, C.; LUKASIK, J.; PRAT, E. Nanostructure, porosity, permeability, and diffusivity of Ultra High Performance Concretes (UHPC). *In: International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, 1998, Sherbrooke: Canada. Proceedings...* Sherbrooke: High-Performance and Reactive Powder Concretes, 1998, vol. 3, aug, p.17-35.
61. YANG, R.; LAWRENCE, C. D.; LYNSDALE, C. J.; SHARP, J. H. Replay to the discussion by P.E. Grattan-Bellew of the paper "Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortars". *In: Cement and Concrete Research*, n° 30, 2000, p.667-668.
62. YOUNG, J. F. High-performance cement-based materials, chapter 9, *Teaching the Materials Science, Engineering and Field Aspects of concrete. part I*. NSF-ACBM Center, p.253-277.
63. YOUNG, J. F. Engineering advanced cement-based materials for new applications. *In: Concrete Technology. New Trends, Industrial Applications*, E&FN Spon, London, ISBN 049 20150S, p.103-112.
64. ZANNI, H.; CHEYREZY, M.; MARET, V.; PHILIPPOT, S.; NIETO, P. Investigation of hidration and pozzolanic reaction in reactive powder (RPC) using ²⁹Si NMR. *In: Cement and Concrete Research*, vol. 26, n° 1, jan, 1996, p.93-100.

ANEXOS

ANEXO 1 – CARACTERIZAÇÃO CIMENTO CP II-fibro 40.

ENSAIOS FÍSICOS	
Finura Blaine	2980 cm ² /g
Massa específica	3,11 g/cm ³
Início de Pega	3:05 h
Fim de Pega	4:25 h
Resist. 1 dia	9,0 Mpa
Resist. 3 dias	24,8 Mpa
Resist. 7 dias	35,0 Mpa
Resist. 28 dias	44,0 MPa
ENSAIOS QUÍMICOS	
C ₃ S	46,4%
C ₂ S	27,9%
C ₃ A	11,3%
C ₄ AF	8,2%

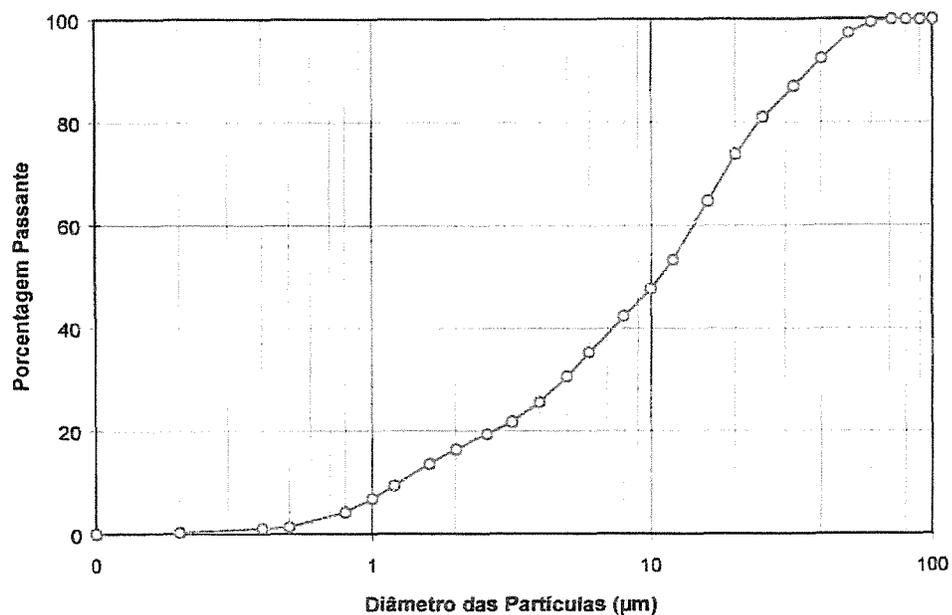
Fonte: LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas - relatório de ensaios.

ANEXO 2 – CARACTERIZAÇÃO CIMENTO CP III-32 RS

% adições	65%
P. fogo	3,01%
RI	0,75%
SiO ₂	25,93%
Al ₂ O ₃	8,38%
Fe ₂ O ₃	2,09%
CaO	51,53%
MgO	3,78%
SO ₃	3,68%
Na ₂ O	0,14%
K ₂ O	0,55%
MS	2,48%
MA	4,01%
FSC	34,5%
C ₃ S	21,0%
C ₂ S	5,0%
C ₃ A	3,2%
C ₄ AF	3,5%

Blaine	3990 cm ² /g
Massa específica	2,98 g/cm ³
Início de Pega	2:30 h
Fim de Pega	5:00 h h
Resist. 1 dia	-
Resist. 3 dias	17,0 MPa
Resist. 7 dias	26,0 MPa
Resist. 28 dias	39,0 MPa

Fonte: CIMINAS - a composição potencial foi calculada em função do teor de clínquer do cimento.



Fonte: ABCP - relatório 16928, fevereiro, 2001.

ANEXO 3 – CARACTERIZAÇÃO CIMENTO CP V-ARI RS 32

% adições	31%
P. fogo	2,68%
RI	0,48%
SiO ₂	22,61%
Al ₂ O ₃	6,66%
Fe ₂ O ₃	2,68%
CaO	58,82%
MgO	2,17%
SO ₃	2,63%
Na ₂ O	0,05%
K ₂ O	0,65%
MS	2,42%
MA	2,49%
FSC	68,0%
C ₃ S	43,5%
C ₂ S	9,0%
C ₃ A	6,2%
C ₄ AF	7,2%

Blaine	4800 cm ² /g
Massa específica	3,11 g/cm ³
Início de Pega	3:10 h
Fim de Pega	4:50 h
Resist. 1 dia	15,0 Mpa
Resist. 7 dias	43,0 Mpa
Resist. 28 dias	54,0 MPa

Fonte: CIMINAS - a composição potencial foi calculada em função do teor de clínquer do cimento.

ANEXO 4 – CARACTERIZAÇÃO CIMENTO CP V-ARI PLUS

% adições	10%
P. fogo	2,68%
RI	0,39%
SiO ₂	19,58%
Al ₂ O ₃	4,96%
Fe ₂ O ₃	3,14%
CaO	64,65%
MgO	0,54%
SO ₃	2,87%
Na ₂ O	0,06%
K ₂ O	0,75%
MS	2,42%
MA	1,58%
FSC	88,7%
C ₃ S	56,7%
C ₂ S	11,7%
C ₃ A	8,1%
C ₄ AF	9,5%

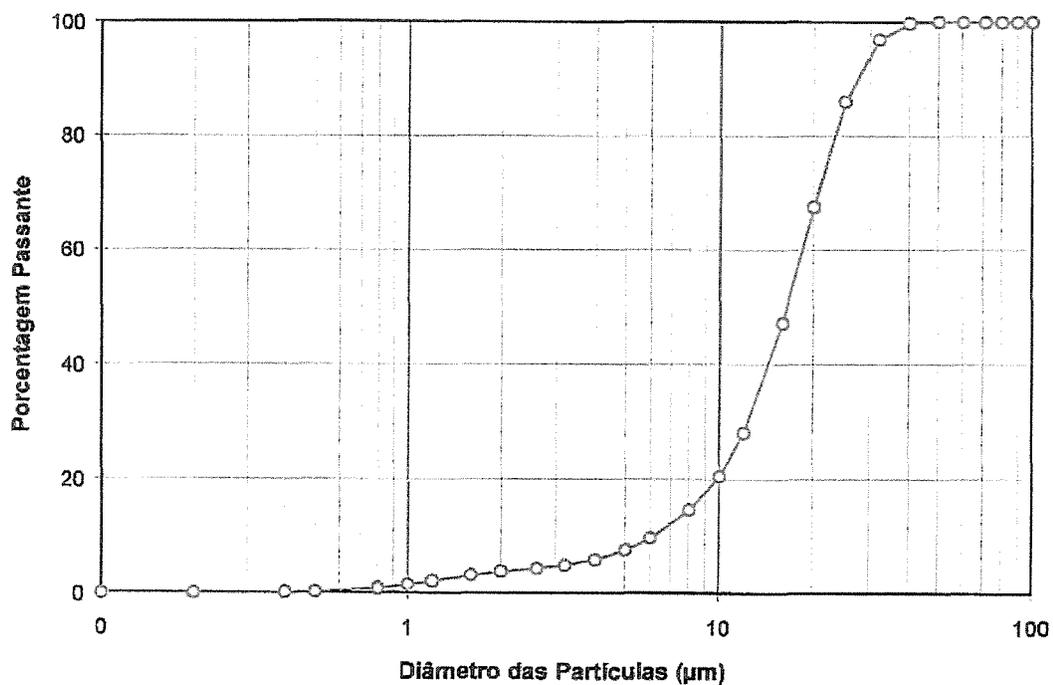
Blaine	4470 cm ² /g
Massa específica	3,12 g/cm ³
Início de Pega	2:00 h
Fim de Pega	3:00 h
Resist. 1 dia	28,0 Mpa
Resist. 7 dias	47,0 Mpa
Resist. 28 dias	55,0 MPa

Fonte: CIMINAS - a composição potencial foi calculada em função do teor de clínquer do cimento.

ANEXO 5 – CARACTERIZAÇÃO SÍLICA ATIVA.

Principais Componentes	Valores médios
SiO ₂	94,580%
Al ₂ O ₃	0,050%
Fe ₂ O ₃	0,505%
P ₂ O ₅	0,227%
CaO	0,176%
MgO	0,458%
MnO	0,087%
Na ₂ O	0,219%
K ₂ O	1,224%
H ₂ O	0,414%
Perda ao Fogo (975°C)	0,508%
Densidade aparente	172,8 kg/m ³
Teor de Carbono estimado	0,81%

Fonte: MICROSSÍLICA S.A. – relatório de ensaio.

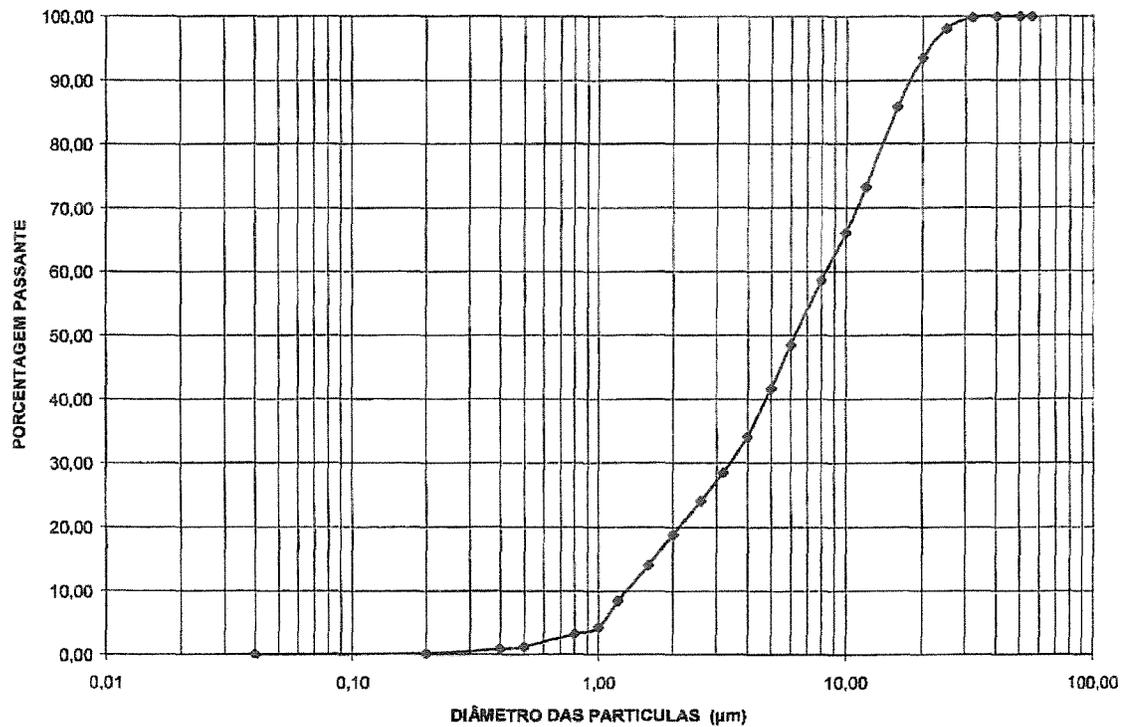


Fonte: ABCP - relatório 16928, fevereiro, 2001.

ANEXO 6 – CARACTERIZAÇÃO PÓ DE QUARTZO.

AREIA DE QUARTZO	
massa específica (g/cm^3)	2,70
diâmetro correspondente a 62,3% das partículas (μm)	8,70
diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (μm)	17,9
dimensão média (μm)	6,25

Fonte: ABCP - relatório 14636, maio, 2000.

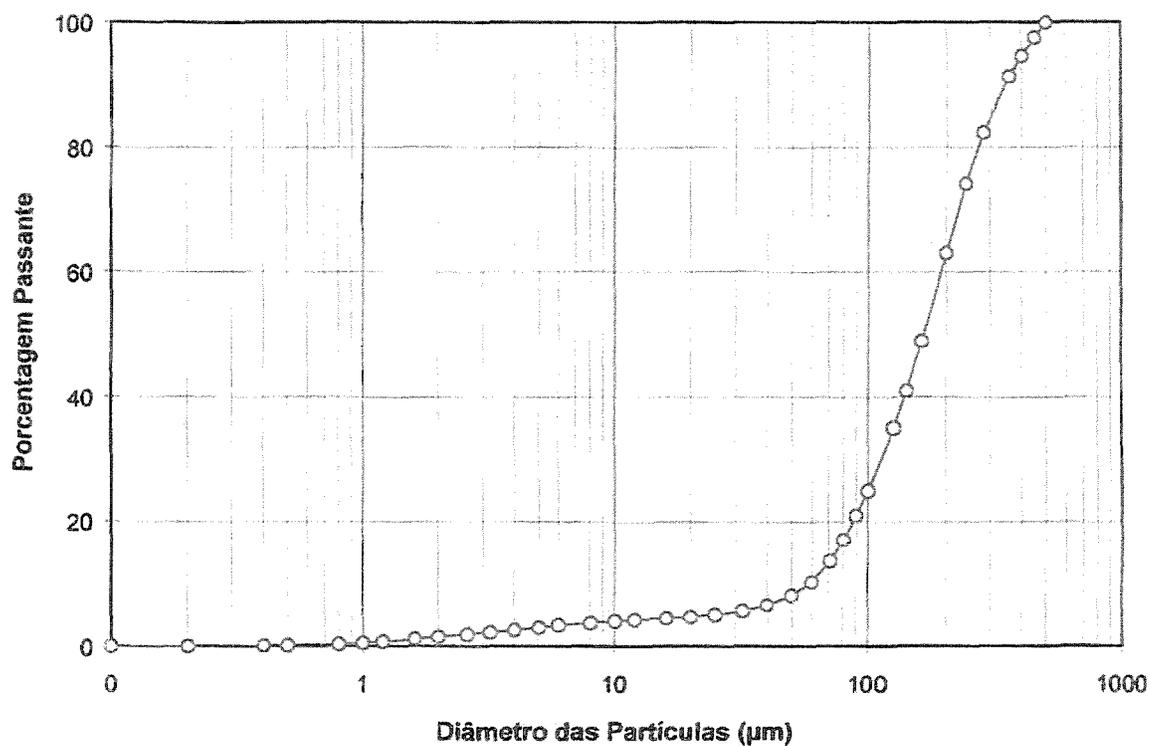


Fonte: ABCP - relatório 14636, maio, 2000.

ANEXO 7 – Caracterização areia de quartzo.

AREIA DE QUARTZO	
massa específica (g/cm^3)	2,70
diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (μm)	58,5
diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (μm)	340,7
dimensão média (μm)	162,7

Fonte: ABCP - relatório 16928, fevereiro, 2001.



Fonte: ABCP - relatório 16928, fevereiro, 2001.

