

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

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**

**CONTRIBUIÇÃO DA ADIÇÃO DE SÍLICAS
NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Carolina Alexandra Marchant Dinten

Campinas

2000



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO DA ADIÇÃO DE SÍLICAS NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Carolina Alexandra Marchant Dinten

Orientador: Vladimir Antonio Paulon

Atesto que esta é a versão definitiva
da dissertação/tese. 03/08/00
Prof. Dr. *Vladimir Antonio Paulon*
Matrícula:

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

2000



200016198

| | |
|-------------|-------------------------------------|
| UNIDADE | BC |
| N.º CHAMADA | T/UNICAMP |
| | D619c |
| V. Ex. | |
| TOMBO BC | 42854 |
| PROC. | 16-2F8100 |
| C | <input type="checkbox"/> |
| D | <input checked="" type="checkbox"/> |
| PREC.º | R\$11,00 |
| DATA | 21/10/00 |
| N.º CPD | |

CM00173792-7

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

Dinten, Carolina Alexandra Marchant

M331c
D619c

Marchant Dinten, Carolina Alexandra

Contribuição da adição de sílicas nas propriedades do concreto / Carolina Alexandra Marchant Dinten.-- Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Vladimir Antonio Paulon.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

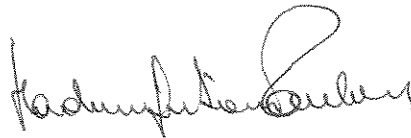
1. Materiais de construção - Durabilidade.
2. Concreto. 3. Permeabilidade. I. Paulon, Vladimir Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

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

**CONTRIBUIÇÃO DA ADIÇÃO DE SÍLICAS NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

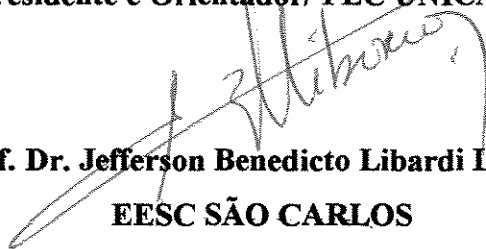
Carolina Alexandra Marchant Dinten

Dissertação de mestrado aprovada pela banca Examinadora, constituída por:



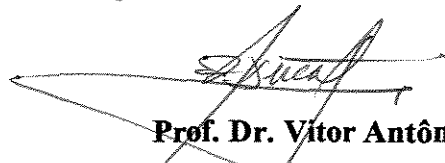
Prof. Dr. Vladimir Antônio Paulon

Presidente e Orientador/ FEC UNICAMP



Prof. Dr. Jefferson Benedicto Libardi Libório

EESC SÃO CARLOS



Prof. Dr. Vitor Antônio Ducatti

FEC UNICAMP

Campinas, 17 de Fevereiro de 2000

DEDICATÓRIA

Com todo amor e gratidão à meus pais Lidia e Homero, meu irmão Christian e à Marcelo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a meu orientador, Vladimir Paulon, que me incentivou e apoiou com tanta paciência e compreensão.

Em segundo lugar à CAPES, cuja ajuda é fundamental a todos os alunos, que procuram melhorar de algum modo o conhecimento e a vida das pessoas.

Às empresas HOLDERCIM, MICROSILICA, RHODIA e SIKA que gentilmente cederam os materiais para realização dos ensaios.

Ao laboratório Falcão Bauer, e a toda sua equipe, que possibilitou a realização dos ensaios de durabilidade e permeabilidade.

Ao Laboratório da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP (LEMC), que possibilitou a realização dos ensaios

En fim, meu agradecimento a todas as pessoas que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

| | pág. |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS..... | 10 |
| LISTA DE TABELAS..... | 13 |
| RESUMO | 14 |
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 OBJETIVOS | 17 |
| 2.1 Objetivos Gerais | 17 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 17 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 3.1 Concreto como Material Estrutural | 19 |
| 3.2 Componentes do Concreto..... | 21 |
| 3.2.1 Agregados | 21 |
| 3.2.2 Cimento | 22 |
| 3.2.2.1 Cimentos Portland Comuns, Especiais e Compostos | 24 |
| 3.2.3 Água | 27 |
| 3.2.4 Aditivos | 28 |
| 3.2.5 Adições | 33 |
| 3.3 O Concreto nas Primeiras Idades..... | 35 |
| 3.3.1 Lançamento, Adensamento e Acabamento | 35 |
| 3.3.2 Cura | 36 |
| 3.3.3 Trabalhabilidade | 37 |
| 3.3.3.1 Fatores que Afetam a Trabalhabilidade | 38 |
| 3.4 Hidratação do Cimento..... | 39 |
| 3.4.1 Estrutura do Cimento Hidratado..... | 40 |

| | pág. |
|---|------|
| 3.5 Concreto Endurecido..... | 41 |
| 3.5.1 Estrutura da Pasta Endurecida..... | 41 |
| 3.5.2 Sólidos na Pasta de Cimento..... | 42 |
| 3.5.3 Zona de Transição no Concreto..... | 44 |
| 3.5.3.1 Resistência da Zona de Transição..... | 45 |
| 3.5.3.2 Influência da Zona de Transição nas Propriedades do Concreto..... | 47 |
| 3.5.3.3 Ação dos Aditivos e Adições..... | 48 |
| 3.5.4 Propriedades do Concreto Endurecido..... | 49 |
| 3.5.4.1 Resistência do Concreto..... | 49 |
| 3.5.4.1.1 Resistência à Compressão..... | 50 |
| 3.5.4.1.2 Resistência à Tração..... | 50 |
| 3.5.4.2 Módulo de Deformação..... | 52 |
| 3.5.4.3 Permeabilidade..... | 54 |
| 3.5.4.3.1 Permeabilidade da Pasta..... | 56 |
| 3.5.4.3.2 Influência dos Agregados na Permeabilidade do Concreto..... | 58 |
| 3.5.4.4 Durabilidade..... | 58 |
| 3.6 Histórico das Adições..... | 62 |
| 3.6.1 Sílica Ativa..... | 63 |
| 3.6.1.1 Concreto no Estado Fresco..... | 67 |
| 3.6.1.2 Concreto no Estado Endurecido..... | 68 |
| 3.6.2 Nanosílica..... | 71 |
| 3.6.2.1 Efeitos no Concreto Fresco..... | 73 |
| 3.6.2.2 Efeitos no Concreto Endurecido..... | 74 |
| 4 METODOLOGIA..... | 76 |
| 4.1 Planejamento Experimental..... | 76 |
| 4.1.1 Materiais..... | 76 |
| 4.1.1.1 Cimento..... | 76 |
| 4.1.1.2 Agregados..... | 78 |
| 4.1.1.2.1 Agregado Graúdo..... | 78 |
| 4.1.1.2.2 Agregado Miúdo..... | 79 |

| | pág. |
|---|------|
| 4.1.1.3 Sílica Ativa..... | 80 |
| 4.1.1.4 Nanosílica | 81 |
| 4.1.1.5 Superplastificante..... | 81 |
| 4.1.1.6 Dosagem..... | 82 |
| 4.2 Ensaios..... | 83 |
| 4.2.1 Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto..... | 83 |
| 4.2.1.1 Procedimento..... | 84 |
| 4.2.1.2 Condições de Cura..... | 85 |
| 4.2.1.3 Tensão de Ruptura à Compressão..... | 85 |
| 4.2.2 Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos | 85 |
| 4.2.2.1 Procedimento..... | 85 |
| 4.2.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral..... | 86 |
| 4.2.3 Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão – Deformação | 87 |
| 4.2.3.1 Procedimento..... | 87 |
| 4.2.4 Permeabilidade – Determinação da Penetração de Água sob Pressão..... | 88 |
| 4.2.4.1 Procedimento..... | 88 |
| 4.2.5 Durabilidade..... | 92 |
| 4.2.5.1 Procedimento..... | 94 |
| 4.2.5.1.1 Preparo das Soluções Ácidas..... | 95 |
| 4.2.6 Determinação da Atividade Pozolânica com Cimento Portland – Índice de Atividade Pozolânica com Cimento..... | 97 |
| 4.2.6.1 Procedimento..... | 98 |
| 5 RESULTADOS | 99 |
| 5.1 Resistência à Compressão..... | 99 |
| 5.2 Resistência à Tração..... | 101 |
| 5.3 Módulo de Deformação..... | 103 |
| 5.4 Permeabilidade..... | 105 |

| | pág. |
|--|------|
| 5.5 Durabilidade..... | 109 |
| 5.6 Determinação da Atividade Pozolânica com Cimento Portland..... | 112 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 113 |
| 7 SUGESTÕES..... | 115 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 116 |
| ABSTRACT..... | 129 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| 3.1 Quadro relativo aos principais compostos de cimento..... | 25 |
| 3.2 Involução da resistência à compressão do concreto, expressa em MPa, com o aumento da relação água-cimento..... | 27 |
| 3.3 Traço usual para concreto com alto teor de cinza volante..... | 32 |
| 3.4. Efeito da idade na resistência de aderência (zona de transição) e na resistência da matriz da pasta de cimento..... | 46 |
| 3.5 Diagrama apresentando os tamanhos do íons, moléculas gasosas e poros do concreto. | 57 |
| 3.6 Coeficiente de permeabilidade de Rochas e Pastas. | 57 |
| 3.7 Principais causas da Deterioração em estruturas de concreto armado (ECA).... | 60 |
| 3.8 Classes de Exposição Referidas às Condições Ambientais. | 61 |
| 3.9 Esquema de produção da sílica ativa.. | 64 |
| 3.10 Efeito físico da adição de sílica ativa na reação de hidratação do concreto..... | 65 |
| 3.11 Comparação da distribuição granulométrica de partículas de cimento Portland, cinza volante e sílica ativa. | 66 |
| 3.12 Influência da adição de microssílica no consumo de água de misturas de concreto | 67 |
| 3.13 Processo químico de precipitação..... | 72 |
| 3.14 Esquema de Fabricação de Sílicas Precipitadas RHODIA..... | 72 |
| 3.15. Relação entre a Resistência à Segregação e Conteúdo Total de Água..... | 74 |
| 3.16 Impacto na Porosidade | 75 |
| 4.1. Características do Cimento | 77 |
| 4.2 Resistência à Compressão do Cimento CPIIE 40..... | 77 |

| | pág. |
|--|------|
| 4.3 Análise do Agregado Graúdo..... | 79 |
| 4.4 Análise do Agregado Miúdo..... | 80 |
| 4.5 Dados Físicos da Sílica Ativa Utilizada..... | 80 |
| 4.6 Composição da Sílica Ativa Utilizada..... | 80 |
| 4.7 Dados Físicos da Nanosílica Utilizada..... | 81 |
| 4.8 Especificações da Nanosílica Utilizada..... | 81 |
| 4.10 Traço de concreto por m ³ | 83 |
| 4.11 Ensaio de corpo de prova cilíndrico de 10 x 20 cm à Compressão, NBR 5739/80..... | 84 |
| 4.12 Ensaio de corpo de prova cilíndrico de 10 x 20 cm à Tração por Compressão Diametral, NBR 7222/83..... | 86 |
| 4.13 Esquema de Equipamento para Aplicação de Pressão..... | 89 |
| 4.14 Corpos de Prova dos traços 3 e 4 Submetidos ao Ensaio de Penetração de Água sob Pressão (NBR 10787/94). | 90 |
| 4.15 Determinação da Altura da Percolação de Água em Corpo de Prova Submetido à Ensaio de Penetração de Água sob Pressão (NBR 10787/94).... | 91 |
| 4.16 Mapeamento da Altura da Percolação de Água em Corpo de Prova Submetido à Ensaio de Penetração de Água sob Pressão (NBR 10787/94).... | 92 |
| 4.17 Vista geral dos Corpos de Prova Submetidos ao Ensaio de Durabilidade..... | 95 |
| 4.18 Corpos de prova imersos em soluções de mud acid e ácido acético..... | 96 |
| 4.19 Amostras submetidas a ataque de ácidos | 97 |
| 5.1 Resistência (MPa) x Idade | 100 |
| 5.2 Resistência (MPa) x Idade (dias), referente à Tração por compressão..... | 102 |
| 5.3 Módulo de Deformação NBR 8522/84, resultados obtidos aos 28 dias | 104 |
| 5.4- Valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 1 | 105 |
| 5.5- Valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 2 | 106 |
| 5.6- Valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 3 | 107 |
| 5.7- Valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 4 | 108 |

| | pág. |
|--|------|
| 5.8 Perda de Resistência verificada através do ensaio à Compressão | 110 |
| Simplex NBR5739/80..... | |
| 5.9 Profundidade em mm de Infiltração do Ácido | 111 |

LISTA DE TABELAS

| | pág. |
|--|------|
| 4.1 Análise Granulométrica de Agregados..... | 78 |
| 4.2 Análise Granulométrica de Agregados..... | 79 |
| 5.1 Resultados obtidos aos 3, 7 e 28 dias, no ensaio de compressão simples NBR 5739/80..... | 99 |
| 5.2 Resultados obtidos aos 3 e 7 dias, no ensaio de tração por compressão diametral NBR 7222/83..... | 102 |
| 5.3 Resultados obtidos aos 28 dias, no ensaio de módulo de deformação NBR 8522/84..... | 103 |
| 5.4- Resultados obtidos aos 7 dias, no ensaio de compressão simples NBR 5739/80 | 109 |
| 5.5- Resultados de profundidade de infiltração de ácido, obtidos em corpos de prova aos 7 dias..... | 110 |
| 5.6 Valores médios das Resistências à Compressão e Atividade Pozolânica com Cimento . | 112 |

RESUMO

Ainda há quem acredite que o concreto é um elemento estrutural eterno, mas o tempo vem mostrando que ele tem suas propriedades físicas e químicas alteradas em função das características dos materiais que o compõem e das respostas destes à ação do meio. A relação feita entre qualidade do concreto e resistência mecânica deixa de lado um dos aspectos mais importantes que é a durabilidade. Este trabalho analisa a contribuição do efeito da adição de sílicas, cuja utilização engloba aspectos econômicos ao diminuir o consumo de energia para fabricar materiais cimentícios, ecológicos com a eliminação de dejetos industriais, às propriedades do concreto endurecido como: resistência, módulo de deformação, permeabilidade e durabilidade por ataque de ácidos (mud acid e ácido acético). Foi utilizado o concreto comum, visando torná-lo mais durável, pois as adições causam um refinamento dos poros, resultando em menor permeabilidade e conseqüentemente maior durabilidade. Foram estudados quatro traços nas idades de 3, 7 e 28 dias, um de referência, um com adição de 7,5 % de sílica ativa, outro com 5% de nanosílica e uma mistura binária utilizando as duas sílicas nas mesmas porcentagens, com relação água/cimento fixada em 0.55, a fim de possibilitar a verificação de mudanças na trabalhabilidade. Os resultados para estas porcentagens de adição comprovaram os efeitos benéficos da sílica ativa, mas não foram satisfatórios em relação à adição de nanosílica, a qual ficou caracterizada apenas como filler, embora tenha sido possível comprovar o seu efeito pozolânico. Sendo assim, os resultados aqui alcançados poderão melhor direcionar os estudos cujo objetivo será o de encontrar um teor ótimo de adição que aliado às propriedades destes materiais melhore o desempenho do concreto com economia e durabilidade a curto e longo prazo.

Palavras Chave: Concreto, sílica ativa, nanosílica, permeabilidade, durabilidade,

1 INTRODUÇÃO

A utilização do concreto trouxe uma série de benefícios à indústria da construção. A possibilidade de se dispor de um material composto por matérias primas de custo relativamente baixo e de fácil obtenção, capaz de ser moldado *in loco* nas mais variadas formas e dimensões fez com que o concreto se tornasse o elemento mais utilizado na execução de estruturas em todo o mundo, ao qual vão sendo adicionados materiais com o intuito de melhorar suas propriedades tornando-o assim mais durável, econômico e resistente.

A globalização da economia colocou a competitividade e a qualidade na ordem do dia. A idéia de qualidade atingiu todos os setores da vida humana e o setor da construção não foi excluído. Aliada a um conceito maior de qualidade que abrange o projeto, suprimento de materiais, execução, uso e manutenção, recursos humanos e organização dos construtores vem a durabilidade, que tem sido assunto para muitas pesquisas em todo o mundo, uma vez que tornou-se uma exigência devido à crescente preocupação com a vida útil, assim como com os gastos envolvidos em recuperação e manutenção das estruturas.

Para minimizar estes gastos e melhorar a durabilidade surgiram as adições, as quais são empregadas desde a época antes de Cristo pelos etruscos, gregos e romanos, permitindo a realização de grandes obras que ajudaram a levantar suas civilizações. Tempos depois, caíram em desuso e foram recentemente redescobertas propriedades pozolânicas em subprodutos industriais poluentes, dentre os quais destacam-se as sílicas.

O emprego destes materiais na elaboração do concreto tem sofrido um importante incremento ao longo dos últimos anos a fim de atender às diferentes requisições impostas pelo mundo moderno, tais como: diminuição do consumo de energia na fabricação de materiais cimentícios; eliminação de dejetos industriais que contaminam o meio ambiente, e a construção de estruturas a custos reduzidos, com melhores características mecânicas e de durabilidade. Aliados a idéias de preservação e conservação do meio, os produtores de cimento buscam alternativas que minimizem o impacto que a fabricação destes materiais causa ao meio ambiente. Entre as providências tomadas estão o uso de filtros na queima de combustíveis e a utilização de adições em substituição parcial do cimento, obtendo-se assim, concretos com melhor desempenho em termos de resistência e durabilidade.

Por se tratar do ingresso e deslocamento de agentes agressivos no concreto, a durabilidade deve ser sempre analisada em relação ao meio. Em alguns países há problemas com o frio. Já no Brasil e nos países tropicais, as dificuldades se ampliam pois além do ataque dos agentes agressivos que se infiltram com a água, devido à alta umidade, é preciso lidar com a questão do gelo-degelo nas câmaras frigoríficas.

Neste sentido, para atender a esta, entre outras necessidades, estudam-se as adições, visando a melhoria das propriedades do concreto, como é o caso das sílicas, objeto de análise e estudo deste trabalho de pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo determinar a contribuição da adição de sílicas nas propriedades do concreto comum no estado endurecido.

2.2 Objetivos Específicos

Busca-se neste estudo, determinar o efeito que a adição de sílicas causa em algumas propriedades do concreto endurecido, tais como: resistência à tração, resistência à compressão, permeabilidade e durabilidade frente ao ataque de ácidos, através de uma análise comparativa de quatro traços denominados de T₁ (com adição de nanosílica), T₂ (com adições de nanosílica e sílica ativa), T₃ (com a dição de sílica ativa) e T₄. (de referência); buscando como resultado um concreto mais durável.

Além disso, procurar-se-á também verificar a influência da adição de sílicas, graças à diminuição do volume dos poros capilares, na permeabilidade do concreto através do ensaio de determinação da penetração de água sob pressão (NBR10787/94), visando torná-lo um concreto mais durável.

Constitui-se também como matéria de interesse deste estudo a determinação de como a adição de sílicas, ao concreto comum, afeta a durabilidade do mesmo frente ao ataque de ácidos como mud acid, solução composta por 12% de HCl + 3% de HF p/massa, através do ensaio de profundidade de infiltração do ácido e perda de resistência.

E por fim, propõe-se a verificação do índice de atividade pozolânica dos materiais com o cimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Concreto como Material Estrutural

O concreto constitui um dos materiais mais utilizados no campo da construção. Além disso, apresenta grandes expectativas de crescimento em sua utilização durante as próximas décadas, conforme atestam em seus estudos GALLIGO & RODRÍGUEZ (1995).

Embora a sua resistência e tenacidade sejam inferiores ao aço, as justificativas capazes de esclarecer a tão difundida utilização do concreto podem ser resumidas a três. A primeira delas é que ele apresenta excelente resistência à água. Ao contrário de muitos outros materiais, a capacidade do concreto de resistir à ação da mesma, sem deterioração séria, faz dele um material ideal para estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar água. A segunda razão para o uso tão difundido do concreto é a facilidade de execução de estruturas nas mais variadas formas e tamanhos, devido ao fato de o concreto fresco ter uma consistência plástica que favorece o material de fluir nos moldes. E o terceiro motivo para sua popularidade entre os engenheiros é que ele normalmente se constitui como o material mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obras, pois é formado por matérias primas abundantes como areia, cimento, pedra, água e aço (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Além destas razões, destacam-se os estudos sobre a eficiência energética e ecológica de alguns materiais que o compõem, como por exemplo o calcário e a argila, amplamente disponíveis e cuja extração geralmente se dá causando baixo impacto ambiental em relação a

disponíveis e cuja extração geralmente se dá causando baixo impacto ambiental em relação a outros materiais de construção, uma vez que os locais de onde são extraídos podem ser recuperados ou destinados para outros fins. Os agregados apresentam o mesmo quadro, com exceção da areia, cujo impacto causado com a exploração é menor e a recuperação da jazida é mais rápida e barata. Em geral, estas explorações de mineração ou de pedreiras em busca de matéria prima para o concreto e aço resultam numa intensiva, mas não extensiva agressão ao solo, ou seja, há necessidade de remoção do mesmo, porém, a quantidade é relativamente pequena. Quando comparado a outros materiais como metais, polímeros, vidro e alvenaria, o concreto apresenta melhor relação custo/ benefício, já que consome menos energia e água na sua produção e requer menor desflorestamento e remoção de solo na extração da sua matéria prima, além de apresentar, uma resistência e durabilidade maior que a encontrada em outros materiais de construção (ISAIA, 1999).

Buscando otimizar estas características, principalmente no que se refere à durabilidade, é que cresce a cada dia a importância dada àqueles estudos sobre a capacidade adequada, nas estruturas de concreto, de resistir aos processos de degradação durante sua vida útil. Deste modo, em todos os países desenvolvidos, os esforços têm-se multiplicado, tanto no que diz respeito aos recursos humanos quanto aos econômicos, a fim de se obter um melhor conhecimento dos mecanismos que regem a entrada de substâncias agressivas para o interior do concreto, assim como dos processos que originam a perda das propriedades intrínsecas do material.

Paralelamente, e à medida que os conhecimentos técnicos assim o permitam, tem se incorporado progressivamente à normativa, critérios e especificações que buscam conseguir uma durabilidade adequada das estruturas de concreto. A tendência é crescente e se observa um incremento sistemático dos artigos dedicados a este assunto nos diferentes códigos e normas (GALLIGO & RODRÍGUEZ, 1995).

3.2 Componentes do Concreto

Segundo MEHTA E MONTEIRO (1994), o concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água

3.2.1 Agregados

Os agregados geralmente ocupam cerca de 70 a 80 % do volume de concreto e podem portanto ter grande influência em suas propriedades.

A sua obtenção pode ser feita a partir de vários tipos diferentes de materiais, ainda que os mais utilizados sejam os extraídos da natureza, como rochas comuns, areias e pedras, embora os materiais como escórias e argilas expandidas sejam utilizadas em concretos leves (MINDESS & FRANCIS, 1981).

Há tempos atrás, acreditava-se que os agregados eram essencialmente inertes, sendo, portanto, distribuídos pelo meio da pasta de cimento, por razões de economia. No entanto, é possível mudar tal paradigma ao se considerar o agregado como um material de construção interligado num todo monolítico por meio da pasta de cimento, de forma semelhante a uma construção em alvenaria. Na realidade, conforme aponta NEVILLE (1982), o agregado não é verdadeiramente inerte e as suas propriedades físicas, térmicas e químicas têm muita influência no desempenho do concreto, ocasionando a reação álcali-agregados, que resulta da interação entre certos componentes de alguns tipos de agregados (sílica reativa) e os hidróxidos alcalinos (sódio e potássio) liberados durante a hidratação do cimento, ou ainda, vindos ao concreto pela penetração de íons cloreto, por agressão ambiental, cujos fatores determinantes são a presença e

o percentual de agregados reativos, o tipo e a concentração de álcalis no cimento e as condições ambientais de temperatura, principalmente, de umidade.

Para prevenir estas reações e seus danosos efeitos expansivos no concreto, é necessário fazer uma avaliação da probabilidade de sua ocorrência, em função da existência ou não dos fatores determinantes descritos, particularmente pela análise química dos agregados e do cimento. Deste modo, os agregados devem ser, obrigatoriamente, provenientes de rochas inertes, com exceção dos artificiais, que também devem ser inertes, não apresentando, assim, atividade quando misturados ao cimento e caracterizando-se ainda, como inalteráveis ao ar, à água e a variações de temperatura. Não podem ser utilizados na confecção de concretos os calcários fracos, os feldspatos e os xistos. Além disso, estes agregados não devem, de maneira geral, ser muito porosos, não podendo absorver mais do que 10% do seu volume em água .

Na fabricação do concreto poderão ser empregados agregados miúdos oriundos de jazidas naturais (areias e cascalhos), assim como escórias siderúrgicas e outros produtos cujo emprego tenha sido aprovado pela prática ou, preferencialmente, que a sua adequação tenha sido demonstrada em laboratório. Quanto aos agregados graúdos, estes devem ser isentos de limos e de outras matérias orgânicas que diminuem a aderência à pasta de cimento ou que prejudicam o endurecimento do concreto. Assim como para estes últimos, para os miúdos também devem ser tomadas precauções, principalmente para prevenir a ocorrências de reações expansivas que possam vir a afetar o concreto, cuidados que vão desde a escolha do cimento até a análise química dos agregados. Dando atenção especial às areias que contenham sílica reativa (SOUZA & RIPPER, 1998).

3.2.2 Cimento

O cimento é um dos materiais mais conhecidos e tem ocupado um lugar indispensável na construção. Finamente pulverizado, desenvolve propriedades ligantes, como resultado da

hidratação, conforme atestam Mehta & Monteiro (1994).

Segundo NEVILLE (1992), o nome cimento Portland foi registrado em 1824 por Joseph Aspdin, um construtor de Leeds. Originou-se como nome registrado e assim não dava indicação de composição ou propriedades. Agora, este nome se aplica a uma família de cimentos que tem uma total similaridade de propriedades (MINDESS & YOUNG, 1981). Originalmente, este nome se deve à semelhança de cor e qualidade do cimento hidratado com a pedra de Portland - um calcário extraído em Dorset – e é usado até hoje para designar um cimento obtido pela mistura apropriada de materiais calcários e argilosos, ou outros materiais contendo sílica, alumina ou óxidos de ferro, aquecidos a uma temperatura necessária para clínquerização e moendo-se, por fim, o clínquer resultante. Este cimento era fabricado aquecendo-se num forno uma mistura de argila finamente dividida e calcário duro até eliminar o CO₂. Já o protótipo do cimento moderno foi criado em 1845 por Isaac Johnson, que queimou uma mistura de argila e greda até a formação do clínquer, possibilitando a ocorrência das reações necessárias à formação de compostos de alta resistência no cimento.

Nos Estados Unidos a história do cimento Portland remonta a 1900, quando um grupo de engenheiros investigou a fabricação e propriedades do cimento pozolânico e concluíram que este se adaptava bem a ambientes marinhos e às argamassas de alvenaria ou concreto.

No entanto, foi somente no ano de 1950 que o cimento Portland foi comercializado em várias indústrias de concreto. Isto, porém, foi posteriormente interrompido devido ao mercado e estratégia corporativista.

A ASTM C595 especifica os cimentos hidráulicos, dividindo-os em Cimento Portland Pozolânico, Cimento com Escória, Cimento Portland com Pozolana Modificada, Cimento Portland com Escória Modificada (MALHOTRA & HEMMINGS, 1994)

De acordo com os estudos de SIERRA & VICENTE (1998), no Brasil são utilizados também cimentos com adições carbonáticas (CPIIF 32 e CPIIF 40), os quais apresentam reações de hidratação e pega mais lentas do que o cimento Portland comum, necessitando, assim, de mais tempo para desenvolver melhor as suas potencialidades, além de apresentarem melhor desempenho frente à carbonatação. Para evitar a hidratação mais lenta a indústria normalmente aumenta a finura do cimento.

No Brasil, assim como na maioria dos países com produção significativa, são fabricados diversos tipos de cimento, que correspondem a maior ou menor exaltação das propriedades dos seus principais componentes e resultam no desenvolvimento de variadas características mecânicas, físicas e químicas.

3.2.2.1 Cimentos Portland Comuns, Especiais e Compostos

Os cimentos tipo Portland são obtidos através da calcinação, a temperaturas próximas dos 1500°C, de uma mistura bem proporcionada de calcário (carbonato de cálcio) e argilas (silicatos de alumínio e ferro), assim como de uma certa quantidade de gipsita (gesso com grau de finura elevado), material controlador da pega, e eventualmente de substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro.

Estas matérias primas, sob altas temperaturas, reagem entre si e os produtos da reação, ao serem resfriados, aglomeram-se em pedaços de dimensões variáveis, geralmente entre 2mm e 20mm, aglomeração esta denominada de clínquer.

A composição potencial do cimento é obtida a partir de análise química, onde se determinam as quantidades relativas dos silicatos e dos aluminatos que se formaram durante a produção do clínquer, sendo as suas proporções o fator determinante de várias das propriedades

do cimento, como, por exemplo, a resistência à compressão, calor de hidratação, resistência química, permeabilidade, porosidade, entre outras.

Os principais compostos do cimento, cujas proporções são obtidas através da análise química, são mostrados na Figura 3.1:

| Compostos | Notações Químicas dos Cimentos | Notações Químicas Condensadas |
|------------------------------|---|--------------------------------------|
| Silicato Tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_3S |
| Silicato Bicálcico | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_2S |
| Aluminato Tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A |
| Ferro-Aluminato Tetracálcico | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF |
| Gipsita | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | C_5H_2 |

FIGURA 3.1 : Quadro relativo aos principais compostos de cimento

Fonte: SOUZA & RIPPER, 1998.

Além destes, que são os principais constituintes do cimento, estão também presentes os componentes menores, tais como os álcalis (Na_2O ; K_2O), que se apresentam na forma de sulfatos, o óxido de magnésio (MgO), a cal livre (CaO) e outros.

Algumas das propriedades dos compostos do cimento Portland são conhecidas e descritas a seguir:

- a) Silicato Tricálcico (C_3S): ambos os silicatos, C_3S e C_2S , são constituintes fundamentais do cimento Portland, por serem os responsáveis pela resistência mecânica da pasta. O silicato tricálcico, cuja hidratação se prolonga por alguns anos, apresenta, no entanto, um grau de hidratação bastante elevado já nas primeiras idades, sendo, por isso, o principal responsável pela resistência inicial do concreto.

- b) Silicato Bicálcico (C_2S): muito embora a contribuição do silicato bicálcico na formação da resistência mecânica do cimento seja significativa, o desenvolvimento desta resistência se dá de forma mais lenta em relação ao C_3S , não tendo então este componente o mesmo nível de importância que o silicato tricálcico nas primeiras idades do concreto.
- c) Aluminato Tricálcico (C_3A): este é o componente que mais rápido se hidrata, e é também o que libera o maior calor de hidratação (207cal/g), principalmente nas primeiras idades. Por outro lado, este constituinte dá uma contribuição muito pequena para a resistência mecânica da pasta. Para que se consiga reduzir a velocidade de hidratação do C_3A é preciso adicionar gipsita ao cimento, o que faz com que este processo acabe também por ser o elemento controlador da velocidade de pega do concreto, já que a gipsita reage com o aluminato tricálcico, formando sulfoaluminatos de cálcio.
- d) Ferro-Aluminato Tetracálcico (C_4AF): este é um componente que praticamente não contribui para a resistência mecânica do cimento. Ele tem calor de hidratação entre o do C_3S e o do C_2S (é de 100cal/g) e apresenta boa estabilidade química.
- e) Componentes Secundários (MgO , CaO e álcalis): o óxido de magnésio presente no cimento pode ser expansivo quando está sob a forma de periclase, que se hidrata muito lentamente, após o endurecimento do cimento, aumentando de volume e, como consequência, possibilitando, em função de sua proporção, o surgimento de fissuras no concreto. A existência de cal livre (CaO) no cimento é indesejável, pois sua hidratação é fortemente expansiva causando fissuras nos elementos estruturais. Além disso, assim como a cal liberada na hidratação do C_3S e do C_2S , a cal livre hidratada também pode ser solubilizada por águas pouco ácidas, reduzindo, assim, a resistência do concreto. Já os álcalis constituem problema quando se trabalha com agregados reativos, isto é, agregados que possuem sílica capaz de reagir com os álcalis do cimento dando origem a compostos expansivos, além de serem também constituintes lixiviantes da pasta endurecida de cimento.

3.2.3 Água

A água de mistura do concreto é possivelmente o seu componente menos dispendioso, embora se constitua, com toda certeza, como um dos mais importantes. É a quantidade de água utilizada (relação água/cimento) que determinará a resistência final do concreto, como podemos observar na Figura 3.2 mostrada abaixo, para teores desde muito ricos ($a/c = 0,36$) a muito pobres ($a/c = 0,80$). Do ponto de vista estrutural, a estrutura pode vir a desenvolver problemas patológicos caso tenham sido empregadas águas não potáveis ou com presença de cloretos, os quais contribuem para o desenvolvimento do processo de corrosão das armaduras (SOUZA & RIPPER, 1998).

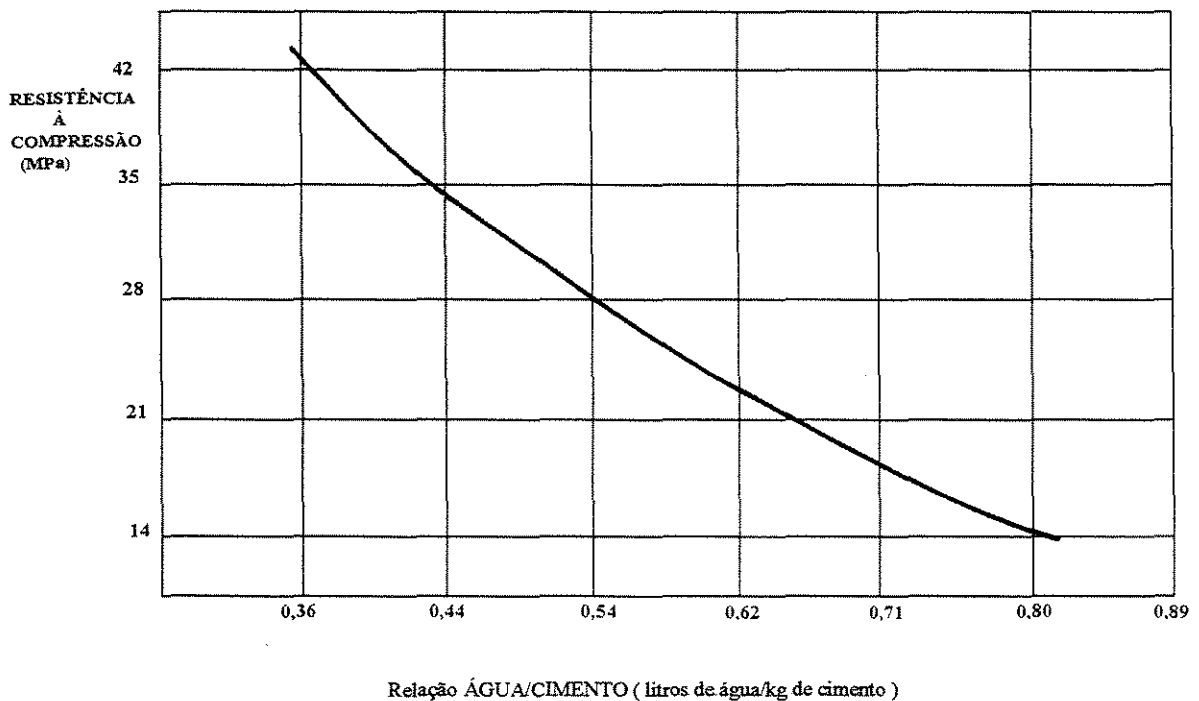


FIGURA 3.2 Involução da resistência à compressão do concreto, expressa em MPa, com o aumento da relação água-cimento. Fonte: (SOUZA, V.C. de, RIPPER THOMAZ, 1998).

Logo, a água utilizada também introduz impurezas responsáveis por problemas que podem ter efeito deteriorador no concreto (MINDESS & YOUNG, 1981). Desta forma, este componente não deve conter matérias em suspensão, impurezas químicas (cloretos e sulfatos) e

resíduos industriais, especialmente os hidratos de carbono (açúcares) que, mesmo em quantidades consideradas indesejáveis, podem retardar ou até impedir a pega do concreto.

A água do mar não é recomendada para utilização no concreto, mas pode ser empregada quando não houver outra disponível em casos de concretos de cimento Portland não armados, desde que tenha seus teores de álcalis limitados a um mínimo. Os mesmos critérios devem ser adotados com relação à água utilizada na cura do concreto, já que esta participa do processo de endurecimento, especialmente quando a temperatura ambiente for muito alta.

A influência da água na alteração das propriedades do concreto acontece através das substâncias nela dissolvidas ou em suspensão (argila, silte). Nestes casos, se a quantidade for elevada, poderá ocorrer o impedimento da cristalização dos produtos da reação do cimento com a água, com a conseqüente perda de coesão do produto.

3.2.4 Aditivos

O cimento Portland, quando misturado com água, apresenta forte tendência de floculação. Este fato se deve principalmente às interações das partícula de cimento através das forças de atração de Van der Waals (força de atração eletrostática) e interações entre estas partículas e as moléculas de água. A floculação do cimento por sua vez prejudica a dispersão das suas partículas.

Para otimizar o contato e obter uma distribuição homogênea na água, as partículas de cimento devem estar defloculadas, mantendo-se por tempo suficiente em estado de alta dispersão. Neste sentido torna-se necessária a utilização de aditivo superfluidificante.

Entende-se por aditivo o produto que adicionado em pequena quantidade a concretos de

cimento Portland modifica algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.

Segundo FERNÁNDEZ (1988), é possível defini-lo ainda como produto que, acrescentado aos aglomerantes no momento de sua elaboração e em condições adequadas, nas formas convenientes e nas doses precisas, tem por finalidade modificar ou implementar, em sentido positivo e em caráter permanente, certas propriedades do conglomerado, para seu melhor comportamento em todos ou em algum aspecto, tanto no estado fresco como endurecido.

Desde os anos 30 que a indústria do concreto vem introduzindo compostos orgânicos às misturas com o objetivo de aperfeiçoar as características do concreto fresco sem ter que aumentar a relação a/c. Estes materiais tornaram-se conhecidos como redutores de água.

Naquela época, substâncias normalmente constituídas por polímeros, como por exemplo os derivados sulfonados naftaleno-formaldeído, eram disponíveis comercialmente. Contudo, seu uso era restrito pois, uma vez que a resistência mecânica solicitada para o concreto era muito baixa, podia-se, assim, variar a relação a/c para atingir a trabalhabilidade desejada. Além disso, naquele período o custo do cimento era relativamente baixo e a possível redução de consumo devido ao uso de redutor de água não apresentava vantagem econômica. Estes fatores contribuíram para que não se tornasse difundido o uso destes aditivos.

Este quadro foi sendo modificado ao longo dos anos e assim surgiu o primeiro redutor de água utilizado pela indústria do concreto, um polímero dispersante à base de lignina (lignosulfonatos), um subproduto de baixo custo da indústria do papel. Por outro lado, a expressiva variação na sua composição, devido à variação da matéria prima e dos processos de fabricação do papel, sobretudo relativo ao teor de açúcar, geraram problemas como a retardação excessiva de pega.

Nos anos 60, o Japão promoveu um grande impulso na utilização de polímeros sintéticos desenvolvendo derivados sulfonados naftaleno-formaldeído (PNS). Na década seguinte, a crise do petróleo elevou significativamente o preço do cimento, tornando o uso de aditivo ainda mais atraente. Neste período a Alemanha desenvolveu e patenteou outra família de redutores de água sintéticos, os derivados sulfonados de melamina-formaldeído.

Os aditivos passaram, então, a ser produzidos especificamente para utilização em concretos. Os fabricantes desses produtos começaram a investir num maior controle da matéria prima, melhorando o teor de pureza e resultando em aditivos com propriedades maximizadas para a aplicação desejada. Atualmente, estes polímeros orgânicos sintéticos redutores de água de alto desempenho são conhecidos como superfluidificantes, os quais passaram a ser amplamente utilizados pela indústria da construção em concreto. De início, estes aditivos eram introduzidos nas misturas em baixos teores, logo antes do concreto nos moldes, apenas com o objetivo de torná-lo mais fluido. Com estas baixas dosagens foram detectados poucos problemas relativos ao seu desempenho. A necessidade de se obter maiores resistências gradualmente levou à redução da relação a/c, passando-se a empregar teores mais elevados de aditivos. Com a utilização de relações a/c mais baixas, maiores teores de aditivos e, em alguns casos, maior quantidade de cimento na mistura, além das adições cada vez mais freqüentes (sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, entre outras), começaram a ser observados alguns comportamentos em algumas combinações de cimentos-superfluidificantes. Este fenômeno foi denominado de “incompatibilidade cimento-aditivo superfluidificante”.

Como normas gerais para o emprego de aditivos na confecção de concretos tem-se:

- quando houver a necessidade de se usar aditivos, deverão ser realizados, previamente, os ensaios necessários, sendo efetuado rigoroso controle na sua dosagem, de forma a não existir nenhuma incompatibilidade entre os aditivos e o aglomerante utilizado. Entre estes ensaios, podemos apontar o teste do “*mini slump*” (BUSCHUER, 1980), muito similar ao ensaio do “*slum test*” para concreto, apesar das dimensões do cone serem reduzidas, mantendo-se,

porém, as mesmas proporções. O resultado deste ensaio é dado pela média da área do espalhamento da calda, sendo medido dois diâmetros perpendiculares. Uma vantagem deste tipo de procedimento é a mínima quantidade de material requerido. Outra maneira de se comparar o comportamento de várias misturas de cimento-aditivo superfluidificante é utilizando-se o cone Marsh, onde é medido o tempo em que um certo volume da calda de cimento escoar pelo cone que está diretamente relacionado com a viscosidade da calda. O ensaio é bastante simples e pode ser executado em praticamente qualquer lugar (laboratórios especializados ou não, canteiro de obras, entre outros) (CASSA, J.C. *et al*, 1999);

- os aditivos devem ser protegidos de maneira adequada. Assim, se estão em pó, devem ser conservados em lugares secos, evitando-se a possível formação de torrões por efeito da umidade, o que acarretaria alterações nas suas propriedades. Quando em estado líquido, devem ser protegidos do calor e agitados antes de seu emprego a fim de se evitar o aumento de concentração;
- devem ser tomadas precauções para que se tenha uma mistura uniforme do aditivo em toda a massa do concreto, já que a falta de homogeneidade poderá ocasionar efeitos indesejáveis como alterações significativas de pega;
- O emprego de vários aditivos em um único traço de concreto pode provocar o aparecimento de problemas patológicos, devido a uma possível incompatibilidade da mistura.

Nos últimos anos tem havido um crescente aumento no uso de aditivos superplastificantes, particularmente, na produção de concretos superfluidos, concretos cujo abatimento excedem os 250mm. Estes concretos têm de baixas a muito baixas relações água/ (cimento + cinza volante) variando entre 0,27 a 0,45, sendo necessárias altas dosagens de superplastificantes para obter o abatimento acima de 125 mm.

A Figura 3.3 mostra um traço apresentado por Malhotra para concreto com alto teor de cinza volante, onde podemos verificar também o consumo do superplastificante.

| Material | Consumo |
|--|------------------------|
| Cimento ASTM tipo I | 155 kg/m ³ |
| Cinza Volante ASTM classe F (baixo teor de cálcio) | 215 kg/m ³ |
| Água | 120 kg/m ³ |
| Agregado Graúdo | 1195 kg/m ³ |
| Agregado Miúdo | 645 kg/m ³ |
| Ar adicionado | 200 ml/m ³ |
| Superplastificante | 4.5 l/m ³ |

FIGURA 3.3 Traço usual para concreto com alto teor de cinza volante.

Fonte: técnica set/out 1998, n°36, pag.36 “Aplicações inovadoras de superplastificantes para produção de concreto de alto desempenho”. MALHOTRA, 1998

O superplastificante é um ingrediente essencial para concretos de alto desempenho e alta resistência. Esses tipos de concreto estão sendo usados progressivamente em estruturas projetadas para durar 100 anos. Neles são empregados fumo de sílica e altas doses de superplastificantes, buscando-se atingir altíssima resistência e durabilidade (MALHOTRA, 1998).

Em resumo, o controle de qualidade e os atestados de proveniência dos aditivos são elementos indispensáveis para que, ao invés de auxiliar, não se esteja complicando a obtenção de um bom concreto, já que a incompatibilidade entre o cimento e o aditivo tem provocado problemas como a rápida perda de trabalhabilidade e baixa fluidez do concreto fresco, o que compromete o bombeamento, adensamento e acabamento. Em alguns casos, foi utilizada como tentativa de superar estes problemas, uma dosagem excessiva de aditivo, mas isto tem ocasionado retardamento da pega e uma segregação do concreto excessiva.

3.2.5 Adições

Conforma aponta ABREU (1994), as adições são convencionalmente materiais inertes ou ativos que podem ser adicionados aos concretos ou aos cimentos, como por exemplo: escórias, pozolanas, filler de calcário, areia ultrafina, pó de sílica (sílica ativa), etc.

A adição de uma pozolana em quantidades limitadas, segundo MINDESS& YOUNG (1981) melhora a mistura, modificando as propriedades do produto final.

Consideram-se adições os materiais silicosos finamente moídos adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, geralmente na faixa de 20 a 40% da massa de cimento Portland. Quando as adições possuem propriedades pozolânicas ou cimentantes, estas podem ser consideradas um substituto parcial do cimento Portland no concreto, o que resulta numa economia significativa de energia e custo (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Isto porque elas modificam a microestrutura da pasta alterando a estrutura dos poros e tamanho dos grãos, tornando a estrutura mais fina e impermeável em graus diferentes, dependendo do tipo ou da quantidade da adição.

A utilização das adições minerais ao concreto de cimento Portland tem contribuído ao atendimento das exigências de desempenho das estruturas de concreto. Tal fato engloba aspectos econômicos, como a redução de energia na produção do aglomerante; ecológicos, quanto ao uso de subprodutos industriais, e técnicos no sentido de melhorar as propriedades do concreto, dentre elas a durabilidade (BAUER & HELENE, 1994).

A adição de pozolanas aos concretos modifica em maior ou menor grau algumas propriedades, entre as quais o coeficiente de carbonatação.

A inclusão de pozolanas no concreto altera a velocidade de carbonatação tendo em vista a possibilidade de interação entre o consumo do hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas e de carbonatação, caso as condições de cura do concreto não forem realizadas adequadamente, ou devido à interferência de outros fatores. Outros elementos que colaboram para tal fato é o modo de dosagem da pozolana, se por adição ou por substituição em massa ou volume, implicando em relações água/aglomerantes diferentes e, portanto, em graus de porosidades e desempenhos diversos (ISALIA, 1997).

O mecanismo pelo qual a reação pozolânica exerce um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto é o mesmo, quer o material pozolânico tenha sido adicionado como uma adição mineral ou como constituinte de cimentos Portland compostos.

Por razões ecológicas e econômicas, está aumentando gradualmente o uso de subprodutos pozolânicos e cimentícios como adições minerais no concreto. Quando usadas como uma substituição parcial do cimento Portland, normalmente reduzem a velocidade de desenvolvimento da resistência. A capacidade de reagir em temperaturas normais com hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento Portland hidratada e de formar mais silicato de cálcio hidratado pode levar a uma redução significativa da porosidade da matriz e da zona de transição. Conseqüentemente, uma melhora considerável na resistência final e na estanqueidade pode ser alcançada com a incorporação de adições no concreto. Deve-se notar que as adições minerais são particularmente eficazes para aumentar a resistência à tração do concreto (DAL MOLIN, 1995).

A incorporação de adições minerais traz muitas vantagens técnicas que não existem no concreto convencional, como por exemplo a presença de partículas finas que no concreto fresco melhoram as propriedades reológicas, tal como a coesividade e a estabilidade. Estas partículas de menor reatividade que o cimento, quando bem dispersas na pasta, formam numerosos sítios nucleados para a precipitação dos produtos de hidratação (MENEGETTI *et al*,1999).

3.3 O Concreto nas Primeiras Idades

De acordo com LEGRAND (1993) a heterogeneidade do concreto fresco é um obstáculo importante para a caracterização reológica global deste material e a interação mecânica entre fases. Na prática, a dificuldade pode ser minimizada usando-se testes de trabalhabilidade, que simulam, na medida do possível, as condições locais.

A seleção dos materiais apropriados e a dosagem são passos importantes para se produzir um concreto que atenda às especificações de resistência e durabilidade da estrutura. No entanto, esse objetivo pode não ser alcançado se não for dada atenção especial a operações às quais o concreto é submetido nas primeiras idades. O termo primeiras idades abrange apenas um insignificante intervalo de tempo no total de expectativa de vida útil do concreto, mas durante esse período numerosas operações são realizadas, tais como mistura, transporte até o local de aplicação, lançamento nas fôrmas, adensamento, acabamento, cura e desmoldagem. Estas operações são influenciadas pelas características do concreto fresco, por exemplo a trabalhabilidade, o tempo de pega e a maturidade ou taxa de crescimento da resistência. Evidentemente, o controle simultâneo destas operações nas primeiras idades e das propriedades do concreto fresco é essencial para assegurar que o elemento de concreto acabado seja estruturalmente adequado para a finalidade para a qual foi projetado.

3.3.1 Lançamento, Adensamento e Acabamento

Após chegar no canteiro de obras, o concreto pré misturado deve ser lançado o mais próximo possível de sua posição final. Ele não deve ser transportado ao longo de grandes distâncias enquanto está sendo lançado em fôrmas ou lajes a fim de minimizar a segregação. Geralmente, o concreto é depositado em camadas horizontais de espessura uniforme e cada camada é inteiramente adensada antes da próxima ser lançada. A velocidade de lançamento deve

ser rápida o suficiente para que a última camada adensada esteja ainda plástica quando a nova for lançada. Isto previne a formação de juntas frias, juntas de concretagem e planos de fratura, resultantes do lançamento do concreto fresco sobre o já endurecido.

Consolidação ou adensamento é o processo de moldagem do concreto nas fôrmas e em torno das peças embutidas com o objetivo de expulsar os bolsões de ar retidos. Esta operação pode ser realizada manualmente, por socamento com uma haste. Na atualidade é quase universalmente feita por métodos mecânicos como, por exemplo, a utilização de vibradores, o que torna possível lançar misturas de consistência seca com baixa relação água/cimento ou com alta porcentagem de agregado graúdo. Misturas fluidas devem ser adensadas com cuidado porque o concreto fica propenso a segregar quando vibrado. Vibradores de imersão devem ser usados somente para adensar o concreto e não para movê-lo horizontalmente, pois isso causa segregação.

Vibração, tanto interna quanto externa, é o método mais usado para adensar o concreto. O atrito entre as partículas de agregado graúdo é muito reduzido na vibração e conseqüentemente a mistura começa a fluir facilitando o adensamento.

O acabamento consiste no nivelamento que é o processo de retirada do excesso superficial de concreto de modo a deixar a superfície com um nível desejado e o desempenho é uma operação realizada com o objetivo de embeber os agregados, compactar a superfície e remover imperfeições remanescentes.

3.3.2 Cura

Os dois objetivos da cura são o de impedir a perda precoce de umidade e de controlar a temperatura do concreto durante um período suficiente para que este alcance um nível de

resistência desejado. Quando a temperatura ambiente encontra-se suficientemente acima do congelamento, a cura dos pavimentos e lajes pode ser efetuada por represamento ou imersão; outras estruturas podem ser curadas por borrifamento ou neblina de água, ou pelo uso de revestimentos saturados de água que retenham umidade, como sacos de aniagem. Estes métodos permitem algum resfriamento através da evaporação, o que é benéfico para a concretagem em climas quentes. Um outro grupo de procedimentos está baseado na perda da umidade do concreto pela vedação da superfície de concretagem através da aplicação de manta de papel impermeável, mantas de polietileno ou compostos formadores de membrana de cura. Quando a temperatura ambiente é baixa, o concreto deve ser protegido do congelamento pela aplicação de mantas termoisolantes. A taxa de crescimento de resistência pode ser acelerada curando-se o concreto com a ajuda de vapor de água, com aquecimento das formas através de resistências elétrica ou através de caldeiras à carvão (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Segundo CAMARINI (1999) a cura melhora a qualidade da superfície do concreto, impedindo a perda prematura de água. Conferindo-lhe um grau de hidratação mais elevado, menores quantidades de poros e de grandes dimensões, proporcionando-lhe uma melhor proteção às armaduras.

3.3.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade deve ser definida como uma propriedade física inerente ao concreto, sem referência às circunstâncias de um tipo particular de construção. O concreto deve ter uma trabalhabilidade que possibilite adensamento até um máximo de compacidade com uma quantidade razoável de energia ou a que se esteja preparando para aplicar em determinadas condições.

Alguns autores a descrevem como sendo a responsável pela facilidade com que o concreto pode ser misturado, posto em obra e acabado. Devido à complexidade da noção de

trabalhabilidade, os métodos que se propõem a avaliá-la medem a consistência, que é a mobilidade relativa ou aptidão do concreto fresco ao se “espalhar” (TARTUCE, 1989).

Outros autores a definem como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade. O termo manipular inclui as operações descritas nas primeiras idades, como lançamento, adensamento e acabamento. O esforço necessário para adensar o concreto é regido pelas suas características de fluxo e pela facilidade com que a eliminação dos vazios pode ser atingida sem abalar a estabilidade. Esta última é um índice simultâneo de capacidade de retenção de água e de capacidade de retenção do agregado graúdo na massa do concreto fresco. Geralmente, tudo isto é substituído pelo termo coesão. Neste sentido, é possível afirmar que a trabalhabilidade é composta por dois componentes principais: a fluidez e a coesão.

Sua importância é óbvia afinal ela é uma das propriedades básicas que deve ser atendida, independente do método utilizado na dosagem e de outros fatores como custo, pois misturas que não possam ser lançadas com facilidade ou adensadas em sua totalidade provavelmente não fornecerão as características de durabilidade esperadas.

3.3.3.1 Fatores que Influenciam a Trabalhabilidade

Os fatores que influenciam a trabalhabilidade são a segregação e exsudação e a pega.

A segregação é definida como sendo a separação dos componentes do concreto fresco de tal forma que a sua distribuição não seja mais uniforme.

A exsudação trata-se de uma forma de assentamento, ou seja, de sedimentação e é caracterizada pela subida de água à superfície do concreto logo após este ter sido lançado. Tal

fenômeno ocorre devido ao fato de os materiais constituintes serem incapazes de reter a água, que acaba por subir pela menor massa específica.

A presença de uma fina lâmina de água sobre a superfície de concreto caracteriza a exsudação a que o material está sujeito, porém esta só é observada quando a taxa de evaporação da água é inferior à taxa de exsudação.

A tendência de exsudação do concreto ocorre em função de suas características, das atividades de lançamento e adensamento e do meio ambiente. Em primeiro lugar, concretos com maior volume de água por metro cúbico apresentam maior propensão a exsudarem, se mantidos os demais parâmetros. A quantidade de finos, por outro lado, é inversamente proporcional a esta tendência: concretos com maior quantidade de finos possuem maior área superficial para a molhagem e, portanto, maior capacidade de retenção de água (TANESI, 1998).

Pega é o termo usado para enrijecimento da pasta de cimento. De maneira geral, se refere à mudança do estado fluido para um estado rígido. Embora durante a pega a pasta adquira uma certa resistência, para efeitos práticos, é importante distinguir pega de endurecimento, que se refere ao aumento da resistência de uma pasta de cimento depois da pega.

3.4 Hidratação do Cimento

As reações que fazem com que o cimento se torne um agente ligante ocorrem na pasta de água e cimento. Na presença de água, os silicatos e os aluminatos formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente, a pasta de cimento endurecida.

Há duas maneiras pelas quais os compostos do tipo dos existentes no cimento reagem com a água. Na primeira, ocorre uma incorporação direta de algumas moléculas de água, a verdadeira hidratação. O segundo tipo é a hidrólise. No entanto, é conveniente e usual aplicar o termo hidratação a todas as reações, isto é, tanto à hidratação como à hidrólise.

Os produtos de hidratação do cimento são muito pouco solúveis na água como se evidencia pela estabilidade da pasta de cimento hidratada em contato com a água. O cimento hidratado adere firmemente ao cimento que não reagiu, mas não é conhecido o mecanismo exato de como isso ocorre. É possível que o produto de hidratação recém-produzido, ao formar um envoltório que cresce pela ação da água tenha atravessado a película já formada. Ou ainda, os silicatos podem atravessar esse envoltório e se precipitar com uma camada externa. Uma terceira possibilidade é de que a suspensão coloidal se precipite por toda a massa após a saturação, prosseguindo a hidratação no interior dessa estrutura.

Os principais produtos da hidratação podem ser classificados, de um modo geral, em silicatos de cálcio hidratados e aluminato tricálcico. Acredita-se que o C_4AF se hidrate resultando aluminato tetracálcico e uma fase amorfa, provavelmente o $CaO.Fe_2O_3.a$; também é possível que um pouco de Fe_2O_3 esteja presente em solução sólida no aluminato tricálcico hidratado.

3.4.1 Estrutura do Cimento Hidratado

Muitas das propriedades mecânicas do cimento hidratado e do concreto não dependem aparentemente tanto da composição química do cimento hidratado como da estrutura física dos produtos de hidratação.

Assim, em qualquer estágio da hidratação, a pasta endurecida consiste de produtos

hidratados dos diversos compostos, denominados genericamente de cristais de gel de Ca(OH)_2 , alguns compostos menores, cimento não hidratado e espaços residuais cheios de água na pasta fresca (vazios).

Estes vazios são denominados poros capilares que podem ser descritos, devido ao adensamento, como poros de ar incorporado, poros capilares e poros de gel, podendo ser classificados ainda como macroporos, poros capilares e microporos.

Os poros grandes e capilares devem-se a defeitos de execução do concreto e dosagem (relação a/c maior que a necessária para hidratação completa do cimento). Já os mesoporos e os microporos estão relacionados com o C-S-H, enquanto que os poros menores que 500 Å não são interconectados.

3.5 Concreto Endurecido

3.5.1 Estrutura da Pasta Endurecida

É preciso, primeiramente, ressaltar que o termo pasta endurecida, refere-se geralmente à pasta de cimento Portland.

Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados à alta temperatura tendem a entrar em solução e a fase líquida torna-se rapidamente saturada em várias espécies iônicas. Como resultado das combinações entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila, após alguns minutos de hidratação do cimento Portland, aparecem os primeiros cristais aciculares de um sulfoaluminato de cálcio hidratados chamado etringita. Algumas horas mais tarde, grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio e pequenos

cristais fibrilares de silicatos de cálcio hidratado começam a preencher o espaço vazio ocupado inicialmente pela água e pelas partículas de cimento em dispersão. Após alguns dias, dependendo da proporção alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode tornar-se instável e decompor-se para formar o monossulfato hidratado, que tem a forma de placas hexagonais. A morfologia em placa hexagonal é também característica dos aluminatos de cálcio hidratados, os quais se formam em pastas hidratadas de cimento Portland, tanto com baixo teor de sulfato como de elevado teor de C_3A .

3.5.2 Sólidos na Pasta de Cimento

É possível determinar, com ajuda do microscópio eletrônico, os tipos, quantidades e características do silicato de cálcio hidratado, do hidróxido de cálcio, dos sulfoaluminatos de cálcio e dos grãos de clínquer hidratado, que compõem as quatro fases sólidas principais presentes, geralmente, na pasta de cimento.

O silicato de cálcio hidratado, abreviado para C-S-H, constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratada e é, completamente, a mais importante na determinação das propriedades da pasta. A morfologia do C-S-H varia de fibra pouco cristalina a um reticulado cristalino. Devido a suas dimensões coloidais e à tendência a aglomerar, é que os cristais de C-S-H puderam ser observados somente com o advento do microscópio eletrônico.

Embora a estrutura exata do C-S-H não seja conhecida, alguns modelos foram propostos para se explicar as propriedades dos materiais. De acordo com o modelo de Powers-Brunauer (POWERS-BRUNAUER, 1962 *apud* MEHTA & MONTEIRO, 1994), o material tem uma estrutura em camadas com uma área específica elevada. Dependendo da técnica de medida, têm sido propostas para o C-S-H, áreas específicas de 100 a 700 m^2/g . A resistência do material é principalmente atribuída a forças de Van der Waals, sendo o tamanho dos poros do gel ou a

distância sólido – sólido ao redor de 18 Å. O modelo Feldman-Sereda (FELDMAN-SEREDA , 1970 *apud* MEHTA & MONTEIRO, 1994), representa a estrutura do C-S-H como sendo composta de um arranjo irregular e dobrado de camadas ao acaso, de modo a formar espaços interlamelares de forma e tamanhos diferentes (5 a 25 Å).

O Hidróxido de Cálcio (também chamado Portlandita) constitui 20 a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Em contraste com o C-S-H , o hidróxido de cálcio é um composto com uma estequiometria definida, Ca(OH)_2 . Ele tende a formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos. A morfologia dos cristais varia bastante, apresentando desde formas não definidas até pilhas de placas geometricamente bem definidas. A morfologia é afetada pelo espaço disponível, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema. Comparado ao C-S-H, o potencial de contribuição do hidróxido de cálcio para a resistência devido às forças de Van der Waals é limitado, conseqüência de uma área específica consideravelmente menor. Além disso, a presença de uma grande quantidade considerável de hidróxido de cálcio no cimento Portland hidratado tem um efeito desfavorável sobre a resistência química a soluções ácidas, por ser a solubilidade do hidróxido de cálcio maior que a do C-S-H.

O sulfoaluminato de cálcio ocupa de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida e, conseqüentemente, desempenha um papel menor nas relações estrutura-propriedade. Já foi estabelecido que, durante os primeiros estágios da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina da solução geralmente favorece a formação de trissulfato hidratado, $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$, também chamado etringita, o qual forma cristais prismáticos aciculares. Em pastas de cimento Portland comum, a etringita transforma-se eventualmente em monossulfato hidratado, $\text{C}_4\text{ASH}_{18}$, que cristaliza em placas hexagonais. A presença de monossulfato hidratado em concreto de cimento Portland torna o concreto vulnerável ao ataque por sulfato. Deve-se notar que tanto a etringita como o monossulfato contêm pequenas quantidades de óxido de ferro, o qual pode substituir o óxido de alumínio na estrutura dos cristais.

E por fim, grãos de clínquer não hidratado, os quais, dependendo da distribuição do

tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratado, mesmo após longo período de hidratação. Como citado anteriormente, as partículas de clínquer em cimentos Portland atuais situam-se geralmente no intervalo de tamanho de 1 a 50 μm . Com a evolução da hidratação, primeiro são dissolvidas as partículas menores, que desaparecem do sistema e em seguida as partículas maiores tornam-se menores. Por causa do espaço disponível limitado entre as partículas, os produtos de hidratação tendem a cristalizar-se muito próximo das partículas do clínquer em hidratação, o que dá a aparência de formação de um revestimento ao redor delas. Em idades posteriores, devido à falta de espaço disponível, a hidratação *in loco* de partículas do clínquer resulta na formação de um produto de hidratação muito denso, cuja morfologia às vezes assemelha-se à de uma partícula do clínquer original (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

3.5.3 Zona de Transição no Concreto

As propriedades do concreto não dependem mais unicamente da pasta e da pedra, passando-se a considerar pasta, pedra e uma zona de transição entre ambas. Ou seja, o concreto passou a ser visto não como um produto de duas fases e sim de três, em que a zona de transição entre a pasta e o agregado tem uma influência muito grande nas suas propriedades, principalmente sobre a resistência e a durabilidade.

O concreto e a argamassa hoje são estudados como materiais constituídos de partículas de agregado englobados por uma matriz de pasta de cimento, com uma zona de transição entre as duas fases, possuidora de características próprias. A conexão dessas três fases tem importância significativa nas características mecânicas elásticas, físicas e químicas.

Sem negligenciar a forma e o tipo de superfície dos grãos de agregados e sua devida importância nas propriedades do concreto, os estudos de interface procuram levar em conta a natureza mineralógica tanto dos materiais englobados quanto dos produtos de hidratação do

cimento, que se formam no contato entre ambas. No estudo da interface torna-se essencial distinguir a aderência de natureza química relativa às ligações cristalinas entre a pasta e o agregado, e a aderência mecânica, devido à rugosidade superficial dos agregados.

A resistência e a durabilidade do concreto são de suma importância em sua utilização. Na região do contato entre a pasta de cimento e o agregado, a resistência pode ser menor que a resistência isolada do agregado ou da pasta e fará com que se manifeste uma zona de fraqueza no desenvolvimento da resistência do concreto. Vários estudos têm sido realizados para o conhecimento do grau de influência da zona de transição na resistência do concreto e do papel desempenhado pela aderência na ruptura do concreto sob tensão.

3.5.3.1 Resistência da Zona de Transição

Como no caso da pasta, a causa da adesão entre os produtos de hidratação e a partícula do agregado são as forças de atração de Van der Waals. Portanto, a resistência da zona de transição em qualquer ponto depende do volume e do tamanho de vazios presente. Mesmo para o concreto de baixa relação água/cimento, nas primeiras idades, o volume e o tamanho de vazios na zona de transição serão maiores do que na matriz de argamassa; conseqüentemente, a zona de transição é mais fraca em resistência, conforme Figura 3.4. Contudo, com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou mesmo maior do que a resistência da matriz de argamassa. Isto poderia acontecer como resultado da cristalização de novos produtos nos vazios da zona de transição através de reações químicas lentas entre constituintes da pasta de cimento e o agregado, formando silicatos de cálcio hidratado, no caso de agregados silicosos, ou carboaluminatos hidratados, em caso de calcário. Tais interações contribuem para a resistência porque tendem também a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição. Os cristais grandes de hidróxido de cálcio possuem menor capacidade de adesão, não somente pela área específica menor e forças de atração de Van der Waals correspondentemente mais fracas, mas também porque servem como pontos de clivagem preferencial, devido a sua estrutura

orientada.

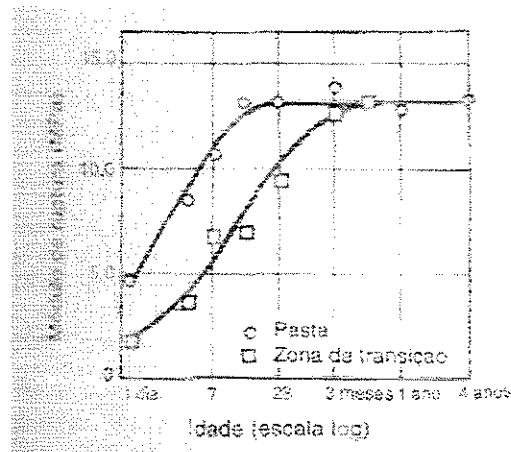


FIGURA 3.4. Efeito da idade na resistência de aderência (zona de transição) e na resistência da matriz da pasta de cimento.

Fonte : K.M. ALEXANDER et al., 1968 *apud* MEHTA & MONTEIRO, 1994

Além do grande volume de vazios capilares e de cristais orientados de hidróxido de cálcio, um importante fator responsável pela baixa resistência na zona de transição no concreto é a presença de microfissuras. A quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, incluindo a distribuição granulométrica e tamanho do agregado, teor de cimento, relação a/c, grau de adensamento do concreto fresco, condições de cura, umidade do ambiente e história térmica do concreto. Por exemplo, uma mistura de concreto contendo agregado com má distribuição granulométrica é mais suscetível à segregação durante o adensamento, levando à formação de filmes espessos de água ao redor do agregado graúdo, especialmente embaixo da partícula. Nas mesmas condições, quanto maior o tamanho do agregado, mais espesso será o filme de água. Nestas condições, a zona de transição formada será suscetível à fissuração quando sujeita à influência de tensões de tração induzidas por movimentos diferenciais entre o agregado e a pasta. Tais movimentos diferenciais surgem comumente tanto na secagem como no esfriamento do concreto.

Em outras palavras, o concreto tem microfissuras na zona de transição, mesmo antes da estrutura ser carregada. Obviamente, cargas de impacto de curta duração, retração por secagem e cargas mantidas a níveis elevados de tensão terão como efeito o aumento do tamanho e número de fissuras.

3.5.3.2 Influência da Zona de Transição nas Propriedades do Concreto

A resistência de qualquer material às ações mecânicas, físicas ou físico-químicas é diretamente proporcional à sua porosidade. Por consequência, a zona de transição, sendo mais porosa, torna-se mais fraca que a matriz do cimento hidratado.

O início da fissuração e a sua propagação ocorrem mais facilmente em cristais de tamanho grande do que em sistemas de cristais de pequena dimensão e emaranhados apertados, uma vez que a zona de transição contém cristais maiores e em maior quantidade que aqueles encontrados na massa de cimento hidratado. Além disso, os cristais na zona de transição mostram uma orientação preferencial, o que é um aspecto favorável à propagação de fissuras. Por estes motivos, a zona de transição é a parte mais fraca do material granular coesivo que constitui o concreto endurecido.

Nos concretos tradicionais, os agregados são menos deformáveis que a matriz de cimento Portland. Sob a ação de forças externas, processa-se sempre uma concentração de tensões nos agregados e, como consequência, na zona de transição, a qual se torna a parte mais tensionada, constituindo-se como a área mais fraca do concreto. Dessa forma, é na zona de transição que as primeiras ações irreversíveis irão ocorrer, resultando em microrrupturas e fechamento de poros quando houver compressão, além da fissuração quando sujeita à tração ou ao cisalhamento. Uma vez iniciada a fissuração, esta se propaga de uma zona de transição para outra, o que tem sido confirmado na observação de fraturas em concretos. Na maioria dos casos, a fratura segue o contorno dos agregados.

Numerosos autores consideram que a fissuração é causada pela retração na pasta de cimento, o que tem sido confirmado por alguns estudos. Entretanto, é preciso levar em conta que esse tipo de estudo tem sido efetuado em testes em que o concreto é submetido a tratamentos que ampliam o fenômeno de retração. Ao que tudo indica, as fissuras resultantes da retração iniciam-se no agregado e têm como consequência a ruptura da zona de transição.

No caso de ataque pela ação corrosiva de agentes químicos, este dependerá não só da natureza dos elementos em contato mas também da superfície exposta. Se as zonas de transição estiverem efetivamente ligadas por uma rede de capilares ou microfissuras resultantes de retração ou de forças externas, irão constituir caminho preferencial para o ataque dos agentes agressivos, principalmente pelo fato de que a elevada concentração de Portlandita faz com que ela se torne fator extra de alteração.

3.5.3.2 Ação dos Aditivos e Adições sobre a Zona de Transição

A interface agregado-matriz é particularmente suscetível à ação de agentes agressivos por causa das seguintes características:

- maior porosidade, causada pelo acréscimo da relação a/c devido ao fenômeno de exsudação em torno do agregado (mormente na superfície inferior do agregado);
- maior concentração de Ca(OH)_2 orientados perpendicularmente ao agregado, causando maior facilidade de fissuração.

Para o aumento de durabilidade do concreto e da argamassa, torna-se necessária a diminuição da espessura da zona de transição, a qual se torna região fácil e ponto de partida para a fissuração do material. Os materiais pozolânicos têm um efeito positivo sobre a melhoria da zona de transição e diminuição de sua espessura (PAULON, 1996).

3.5.4 Propriedades do Concreto Endurecido

Conforme os estudos de GAMBHIR (1992), as principais propriedades do concreto são as que dizem respeito à sua resistência, características de tensão e deformação, cisalhamento, deformações de fluência, variação de temperatura e durabilidade.

As propriedades mecânicas do concreto podem ser classificadas como de curta e de longa duração. Dentre as de curta duração tem-se: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação. Já as propriedades de longa duração englobam: retração, fluência, comportamento sob fadiga e características de durabilidade, tais como porosidade, permeabilidade e resistência à abrasão (BACCIN, 1997).

Embora algumas propriedades do concreto sejam alteradas com o aumento da resistência somente algumas propriedades serão estudadas neste trabalho, discutidos a seguir.

3.5.4.1 Resistência do Concreto

A evolução do concreto vêm permitindo o surgimento de estruturas cada vez mais arrojadas. Com o aumento da resistência do concreto, elementos com dimensões menores podem ser projetadas suportando as mesmas ações que elementos maiores, feitos com concretos de resistência mais baixa. Reduzindo-se o tamanho dos elementos há um aumento no espaço útil, o que é benéfico por exemplo quando há restrições arquitetônicas para as dimensões dos pilares. Entretanto, muitos projetistas ainda não se sentem seguros para dimensionamento de elementos estruturais usando concretos de alto desempenho, uma vez que é necessário haver um melhor conhecimento de suas propriedades mecânicas.

A resistência de um material é definida como a capacidade deste de resistir à tensão sem ruptura. A ruptura é algumas vezes identificada com o aparecimento de fissuras. De qualquer modo, deve ser lembrado que, ao contrário da maioria dos materiais estruturais, o concreto contém microfissuras antes mesmo de ser submetido a tensões externas. No concreto, portanto, a resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e é sinônimo do grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo. No ensaio à tração, a fratura do corpo de prova normalmente significa ruptura, já que na compressão o corpo de prova é considerado rompido mesmo quando não há sinal de fratura externa visível, porém a fissuração interna é muito avançada, tal que o corpo de prova é incapaz de suportar uma carga maior sem fraturar-se.

3.5.4.1.1 Resistência à Compressão

Diretamente relacionada à estrutura interna do material, os pesquisadores costumavam considerá-la como a propriedade mais importante do concreto, a qual fornece uma estimativa do desempenho do concreto em termos mecânicos .

É preciso destacar que esta não depende somente do tipo de solicitação mas também de como a combinação de vários fatores afeta a porosidade dos diferentes componentes estruturais do concreto. Entre estes fatores encontram-se as propriedades e proporções dos materiais que compõem o traço do concreto, grau de adensamento e condições de cura.

3.5.4.1.2 Resistência à Tração

O valor da resistência à tração do concreto pode ser obtido através de três ensaios distintos: resistência à tração por compressão diametral, que consiste na compressão da aresta do

cilindro de concreto, segundo a NBR 7222 (1982); resistência à tração na flexão, também conhecido como módulo de ruptura e que consiste em aplicar uma carga concentrada em uma viga padronizada de concreto. A carga pode ser aplicada no centro do vão ou nos terços médios, conforme NBR 12142 (1994), caracterizando o ensaio de resistência à tração direta, que consiste na aplicação direta de uma força de tração no corpo de prova. Entretanto, este último procedimento não é muito utilizado devido à dificuldade de execução.

A resistência à tração, apesar de ser desprezada no dimensionamento de peças de concreto armado, é muito significativa, pois governa o comportamento na fissuração, afeta o módulo de rigidez e a durabilidade do concreto. Ela é muito importante também com respeito ao comportamento do concreto sob cisalhamento, sendo ainda fundamental na análise do comportamento em serviço (BACCIN & PINHEIRO,1997).

Segundo GAMBHIR (1992) para determinar a resistência à tração é essencial estimar o carregamento para o qual as peças de concreto poderão se romper.

É usual desprezar o baixo valor da resistência à tração do concreto e usar o aço para absorver as cargas de tração. Mas em grandes estruturas de concreto maciço, tais como barragens, o uso de barras de aço é impraticável. Portanto, uma estimativa confiável da resistência à tração do concreto é necessária, especialmente para avaliar a segurança da barragem sob ações sísmicas.

A resistência real, prática, da pasta de cimento e outros materiais frágeis similares é muito menor do que a resistência teórica estimada com base na coesão das moléculas e calculada a partir da energia superficial de um sólido admitido como perfeitamente homogêneo e sem falhas.

Sabe-se que a pasta de cimento contém muitas descontinuidades (poros, fissuras e vazios), mas

não se conhece exatamente o mecanismo da sua influência sobre a resistência. Os vazios não atuam necessariamente como falhas, mas as estas podem se constituir como fissuras nos cristais individuais, associados aos vazios. Embora não se conheça o exato mecanismo da ruptura do concreto, este, provavelmente, deve estar relacionado às forças de coesão no interior da pasta e às de aderência, entre a pasta e os agregados.

Enquanto a ruptura localizada se inicia num ponto e é determinada pelas condições nesse local, o conhecimento da tensão no ponto mais solicitado do elemento ainda não é suficiente para prever a ruptura. É necessário conhecer a distribuição de tensões em torno desse ponto, pois as deformações que ocorrem no interior do material, principalmente próximo à ruptura, dependem do comportamento e do estado do material que circunda o ponto crítico. Além disso, a possibilidade de propagação da ruptura também depende muito da análise desse estado.

3.5.4.2 Módulo de Deformação

O módulo de deformação está estritamente relacionado às propriedades da pasta de cimento, ao módulo de rigidez dos agregados e ao método de sua determinação. Em geral, quanto maior o módulo de elasticidade do agregado grão maior será o módulo de deformação do concreto.

As deformações no concreto, que geralmente levam à fissuração, ocorrem como um resultado da resposta do material à carga externa e ao meio ambiente. Quando o concreto recém endurecido (seja carregado ou não) é exposto à temperatura e à umidade do ambiente, ele geralmente sofre contração térmica (deformação de contração associada ao resfriamento) e retração por secagem (deformação de retração associada com a perda de umidade) . A deformação de retração dominante sob uma dada condição dependerá do tamanho da peça, das características dos materiais constituintes do concreto e da dosagem da mistura. Geralmente, em

peças espessas (maior que uns poucos metros), a retração por secagem é um fator menos importante do que a contração térmica .

Deve-se observar que os elementos estruturais do concreto endurecido estão sempre restringidos, normalmente, por atrito na base, elementos nos extremos, armadura ou mesmo por deformações diferenciais entre o interior e o exterior do concreto. Quando a deformação por retração em um material elástico é totalmente restringida, ela resulta em tensão elástica de tração. Neste sentido, a magnitude da tensão induzida s é determinada pelo produto da deformação ε e o módulo de deformação do material ($s = E \varepsilon$). O módulo de deformação do concreto também depende das características dos materiais constituintes do mesmo e da dosagem da mistura, não necessariamente no mesmo grau ou da mesma maneira que as deformações por retração. Espera--se a fissuração de um material quando uma combinação do módulo de deformação e da deformação por retração induz um nível de tensão que atinge sua resistência à tração. Dada a baixa resistência à tração do concreto, isto acontece na prática, porém, afortunadamente, não exatamente conforme previsto pelos valores calculados teoricamente para as tensões elásticas de tração induzidas.

Para compreender a razão pela qual um elemento de concreto pode não fissurar ou pode fissurar apenas após um certo tempo de exposição ao ambiente, deve-se considerar a resposta do concreto a tensões ou deformações constantes. O fenômeno do aumento gradual na deformação ao longo do tempo, sob um certo nível de tensão constante é chamado fluência, já o fenômeno de diminuição gradual da tensão ao longo do tempo, sob um certo nível de deformação constante, chama-se de relaxação. Ambas as manifestações são típicas de materiais viscoelásticos, sendo o conhecimento do módulo de deformações fundamental na análise das deformações elásticas ou viscoelásticas das estruturas de concreto.

Conforme a lei de Hooke, quando se aplica uma carga de compressão num determinado corpo de prova de concreto, produz-se uma deformação proporcional à tensão aplicada, dentro

do limite elástico. A relação entre o incremento de tensão e o incremento de deformação é chamado de módulo de deformação E.

Os concretos muito resistentes tem maior inclinação na origem da curva tensão deformação. Por outro lado, os concretos menos resistentes rompem com deformações maiores apresentando assim maior capacidade de acomodação plástica.

O módulo de deformação é uma medida da resistência à deformação elástica do material, cujo gráfico tensão-deformação do concreto, para fins práticos é considerado linear dentro das tensões normalmente adotadas (ANDRADE, 1997). Entretanto, a partir de curvas típicas tensão-deformação para agregado, pasta endurecida e concreto carregados em compressão uniaxial, torna-se imediatamente aparente que em relação ao agregado e à pasta de cimento o concreto não é realmente um material elástico. A deformação sob carga instantânea de um corpo de prova de concreto não é, na verdade, diretamente proporcional à tensão aplicada, nem é totalmente recuperada após o descarregamento.

3.5.4.3 Permeabilidade

A permeabilidade descreve um escoamento que se produz na estrutura porosa de um material sobre um gradiente de pressão e permite a apreciação do mecanismo de transporte no interior do material. Este tipo de escoamento de um fluido na porosidade interligada do material é regido pela lei de Darcy, estando esta última limitada por duas hipóteses básicas:

- o escoamento do fluido é do tipo laminar;
- a saturação do material pelo fluido é completa e o fluido é inerte em relação ao material poroso (QUEBAUD *et al* 1999).

As superfícies de concreto estão sujeitas às mais variadas condições ambientais como por exemplo, ação do sol e do vento, poluição através da chuva que contém compostos poluentes, no caso de ambientes marinhos, a ação dos cloretos, e a ação do dióxido de carbono do ar provocando carbonatação. Para minimizar estes efeitos, estuda-se, então, a permeabilidade, a qual é de grande importância, pois :

- a durabilidade do concreto pode ser afetada adversamente pelos materiais que penetram na solução;
- no caso de concreto armado, o ingresso da umidade e ar resultarão, devido à penetração de íons agressivos que reduzem sua alcalinidade natural, na corrosão do aço, a qual causa um aumento do volume do aço e com isso a ruptura do concreto. Essa penetração da umidade depende da permeabilidade da camada superficial (concreto de pele);
- a permeabilidade da pasta de cimento também varia de acordo com a idade do concreto. Com a idade, a permeabilidade diminui pois o gel preenche os espaços ocupados anteriormente pela água.

A penetração dos agentes agressivos no concreto ocorre basicamente por transporte através de seus poros e das microfissuras. Os mecanismos de transporte destas substâncias no concreto dependem dos seguintes aspectos: das características físicas e químicas dos agentes agressivos, de suas concentrações na superfície do concreto e das condições ambientais; da microestrutura (tipo, tamanho e distribuição dos poros); do grau de umidade do concreto e da temperatura.

Diversas investigações experimentais têm indicado a permeabilidade do concreto ao ar e a água como sendo uma excelente medida de resistência do concreto contra o ingresso de agentes agressivos, no estado líquido ou gasoso, constituindo-se, portanto, como uma medida de durabilidade potencial para um dado concreto.

3.5.4.3.1 Permeabilidade da Pasta

Os tipos de poros que podem existir no concreto são:

- poros de gel;
- poros capilares;
- poros de ar.

Quanto ao tamanho, os poros podem ser subdivididos em :

- poros grandes ou macroporos: dimensão maior que $5 \times 10^4 \text{ \AA}$;
- poros capilares: dimensão maior que 500 \AA ;
- mesoporos: dimensão compreendida entre 26 e 500 \AA ;
- microporos: dimensão menor que 26 \AA .

Os poros grandes e capilares surgem com os defeitos de execução do concreto e dosagem, ou seja, relação água/cimento (a/c) maior que a necessária para hidratar completamente o cimento. Os mesoporos e os microporos estão relacionados com o C-S-H, já os poros menores que 500 \AA não são interconectados.

O tamanho da maioria dos íons e moléculas de gás, danosos ao concreto, são menores que os poros de gel, conforme mostra-se na Figura 3.5:

Na pasta de cimento hidratado quem controla o coeficiente de permeabilidade é o tamanho dos poros e sua continuidade em qualquer instante durante a hidratação.

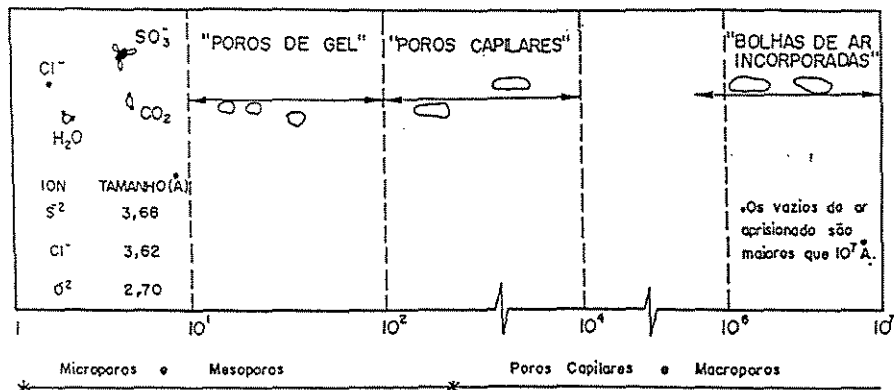


FIGURA 3.5 Diagrama apresentando os tamanhos dos íons, moléculas gasosas e poros do concreto.

Fonte: (SILVA, 1993).

De acordo com SILVA (1993), o coeficiente de permeabilidade depende, além da relação a/c, da dimensão máxima, característica do agregado como mostra a Figura 3.6:

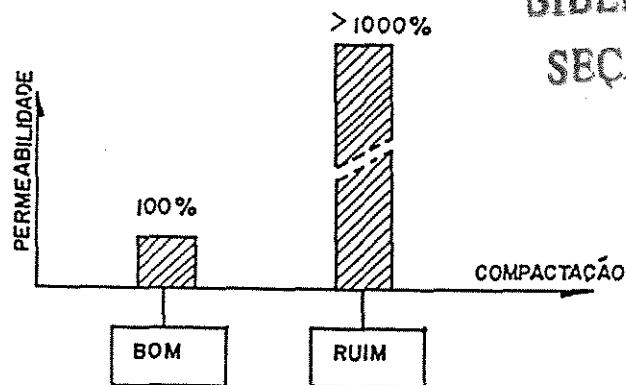


FIGURA 3.6 Coeficiente de permeabilidade de Rochas e Pastas.

Fonte: (SILVA, PAULO F.AA., 1993).

3.5.4.3.2 Influência dos Agregados na Permeabilidade do Concreto

A inserção dos agregados pode modificar a permeabilidade do concreto em razão da sua dimensão, textura superficial e natureza mineralógica das seguintes formas: aumento da permeabilidade do concreto em relação à permeabilidade de uma pasta de cimento hidratado de mesmas características, devido à existência de uma zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado; microfissuração, que gerará caminhos que facilitarão a penetração dos fluidos, devido à rigidez dos agregados.

3.5.4.4 Durabilidade

O comitê 201 do ACI (1991) define durabilidade do concreto de cimento Portland como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, ou seja, o concreto durável deve conservar sua forma original, qualidade e capacidade de uso quando exposto ao seu meio ambiente.

Em qualquer atividade construtiva há necessidade de um efetivo controle tecnológico para se garantir a qualidade esperada. No caso de construções de concreto, os objetivos deste controle são os de garantir a execução, conforme as especificações do projeto, de forma econômica e assegurando qualidade e uniformidade suficientes para garantir desempenho satisfatório durante toda a vida útil, sendo esta definida como o tempo em que uma estrutura mantém um limite mínimo de segurança e funcionalidade aceitável para as quais foi projetada, sem que tenha sofrido nenhuma intervenção significativa por processos de manutenção ou reparo (LEÃO *et al*, 1999).

Uma diretriz geral, encontrada na literatura técnica, diz que a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores relacionados com as características deste material, e

identificados com os 4C: Composição, Compactação, Cura e Cobrimento (BRANDÃO & PINHEIRO, 1997). Mas, historicamente, sabe-se que a durabilidade das estruturas está ligada a valores físicos: relação água/cimento, espessura do cobrimento das armaduras, maior consumo de cimento e impermeabilidade do concreto.

AKASAKI et al afirmam que são vários os fatores que influenciam na qualidade de uma estrutura de concreto, quando do estudo de durabilidade do concreto, implicando na obtenção de estruturas duráveis, desde a seleção dos materiais até a execução, como por exemplo, a dosagem e mistura dos materiais, quantidade e qualidade dos equipamentos, cura, e lançamento. Para tanto deve ser analisado também o meio ambiente, no qual a estrutura estará inserida, a sua permeabilidade e a qualidade da camada de superfície (SILVA, 1993).

Observa-se um contraste muito grande entre o que acontece no laboratório e as estruturas da vida real, as quais estão sujeitas a cargas estáticas e dinâmicas. Além disso, de acordo com COLLEPARDI (1999), a deterioração adicional que se observa na estrutura de concreto armado da vida real, comparada com aquela que ocorre nos corpos-de-prova de laboratório, ocorre devido aos seguintes “pontos fracos ” do concreto:

- baixa resistência à tração;
- alto módulo de elasticidade, que é responsável pela transformação de variações de comprimento por efeito higrotérmico em tensões de tração relativamente altas;
- fissuras formadas em consequência dos fatos anteriores, as quais representam os caminhos preferenciais para a penetração de agentes agressivos – tais como ar, água, sulfato, cloro, íons alcalinos – pelos mecanismos de difusão e absorção capilar através das fissuras.

Somam-se a estes fatores a negligência humana e as condições ambientais. A primeira pode ocorrer quando não se realiza a seleção de materiais adequados, uma dosagem em termos

de relação água/cimento e de teor de ar incorporado, conforme a resistência e durabilidade exigíveis para as condições de exposição ao meio ambiente, uma execução adequada, conforme o projeto de todos os elementos estruturais, e a aplicação de técnicas de execução cuidadosas em termos de trabalhabilidade e perda de abatimento relacionadas com o transporte do concreto fresco, lançamento, adensamento e cura. Quanto às condições ambientais, estas correspondem às ações físicas às quais a estrutura de concreto é exposta e que resultam em efeitos não incluídos entre os efeitos de cargas ou ações previstas no projeto estrutural.

Negligência humana*

Primeiro tipo

- Materiais inadequados:
 - cimentos
 - agregados
 - aditivos químicos e minerais
- Impropriedade da especificação da mistura:
 - relação a/c
 - ar incorporado
- Projeto inadequado:
 - cobrimento da armadura
 - posicionamento e densidade das barras
 - forma e tamanho dos elementos
- Descuido nas técnicas de execução:
 - slump e perda de slump
 - lançamento
 - adensamento
 - cura

Segundo tipo

- Monitoramento da reação álcali-agregado na prática de campo:
 - agregados álcali-reativos
 - cimento altamente alcalino

Vulnerabilidade Inerente a Estruturas de Concreto Armado

Concreto

- baixa resistência à tração
- alto módulo de elasticidade
- sujeito à fissuração produzida na secagem pela contração térmica e retração de secagem
- microfissuras como entrada para os agentes ambientais agressivos (ar úmido, íons Cl^- e SO_4^{2-})

Armadura de aço

- corrosão quando exposta à umidade do ar ou penetração de íons Cl^-
- natureza expansivo-desagregadora do processo de corrosão causando fissuras no cobrimento de concreto

* deve ser evitado para a durabilidade normal de ECA em ambiente agressivo

** deve ser evitado para a durabilidade de longo prazo ou durabilidade em meio ambiente muito severo

FIGURA 3.7 Principais causas da Deterioração em estruturas de concreto armado

Fonte: (COLLEPARDI, 1999).

| Classes de exposição | | Condições ambientais |
|---|---------------------|--|
| 1. Ambiente seco | | <ul style="list-style-type: none"> interior de edifícios para habitação ou escritórios (1) |
| 2. Ambiente úmido | a. sem congelamento | <ul style="list-style-type: none"> interior de edifícios onde a umidade é alta (2) elementos externos elementos em solo ou água não-agressivos |
| | b. com congelamento | <ul style="list-style-type: none"> elementos internos onde a umidade é alta, expostos a congelamento elementos externos expostos a congelamento elementos em solo ou água não-agressivos, expostos a congelamento |
| 3. Ambiente marinho | a. sem congelamento | <ul style="list-style-type: none"> elementos parcialmente imersos em água do mar ou na zona de arrebentação elementos em ar saturado de sal, como na zona costeira |
| | b. com congelamento | <ul style="list-style-type: none"> elementos parcialmente imersos em água do mar ou na zona de arrebentação e expostos a congelamento elementos em ar saturado de sal e expostos a congelamento |
| As classes seguintes podem ocorrer isoladas ou em combinação com as anteriores: | | |
| 4. Ambiente quimicamente agressivo | a. | <ul style="list-style-type: none"> elementos em contato com solo, líquido ou gás, com baixa agressividade química atmosfera industrial agressiva |
| | b. | <ul style="list-style-type: none"> elementos em contato com solo, líquido ou gás, com moderada agressividade química |
| | c. | <ul style="list-style-type: none"> elementos em contato com solo, líquido ou gás, com alta agressividade química |

(1) Esta classe é válida desde que durante a construção a estrutura ou seus componentes não sejam expostos a condições mais severas, durante um período de muitos meses.

(2) Por exemplo, em lavanderias comerciais.

FIGURA 3.8 Classes de Exposição Referidas às Condições Ambientais.

Fonte: (BRANDÃO & PINHEIRO, 1997).

A classificação das condições ambientais, conforme foi mostrado, refere-se ao microambiente e não ao macroambiente. Em outras palavras, essas condições são referidas ao ambiente nas proximidades do ponto considerado na superfície externa da estrutura ou do elemento estrutural.

O ataque por ácidos ocorre em ambientes quimicamente agressivos, oferecendo riscos de deterioração das estruturas. Na prática, a pasta de cimento endurecida se encontra em equilíbrio com um fluido que apresente pH entre 12,5 e 13,5 e o ataque ocorre em valores de pH inferiores a aproximadamente 6,0.

Há vários registros de ataque ácido a concretos e argamassas na construção civil devido principalmente às chuvas ácidas. Na indústria de petróleo esse problema é observado em diversas cimentações de poços de petróleo onde foi necessário realizar operações de injeção de ácido para aumentar a produção dos poços. No entanto, estas operações de acidificação promovem o contato entre o ácido e a pasta de cimento endurecida, possibilitando a ocorrência de reação entre os mesmos. Devido aos indícios de deterioração do cimento, tornou-se necessário realizar um estudo sobre os mecanismos do processo de ataque ácido ao cimento.

3.6 Histórico das Adições

Em 1818, a engenharia foi definida, pela instituição dos engenheiros da Inglaterra, como arte de promover e orientar a utilização dos recursos naturais em proveito do homem. As necessidades de adaptar a natureza para satisfazer as condições de abrigo, lazer e trabalho levaram à criação da indústria da construção, a qual se desenvolveu muito no último século, obtendo um maior crescimento nas décadas de 50 e 60, por causa da demanda por moradia em vista do crescimento populacional e para atender ao novo padrão de necessidades da sociedade moderna, que requer bens e serviços em maior número e com melhor qualidade. Com isto, aumentou a exploração dos recursos naturais e energéticos, especialmente os não renováveis, acarretando sérias conseqüências no ecossistema devido à degradação do meio ambiente nos locais de extração, assim como pela deposição de rejeitos e subprodutos industriais poluentes, tanto no solo como no ar. Para contrabalançar esta agressão, governos e sociedade se uniram na preservação dos recursos naturais e contra a poluição do meio ambiente e tentam manter controlada a exploração conservando-a compatível com as suas necessidades. Busca-se

equilibrar a ecologia com economia com o propósito de produzir reduzindo-se o consumo de matéria prima, o desperdício, a poluição a partir da reutilização e reciclagem. Para isso, a melhor maneira de incrementar não só o desempenho técnico do concreto, mas também de aumentar os ganhos econômicos e ecológicos na sua composição é introduzindo na sua composição uma ou mais adições minerais, como é o caso da cinza volante, resultante da queima do carvão mineral, ou a escória de alto forno, subproduto da fabricação do ferro gusa. Resíduos agrícolas como a casca de arroz ou a cinza após a queima também causam conseqüências danosas ao meio ambiente, ao serem depositadas a céu aberto ocasionando a poluição dos mananciais aquíferos, conhecida como poluição aérea. Um dos maiores desafios que a tecnologia atual encontra é qual destino dar a esses resíduos face à quantidade produzida frente às presumíveis possibilidades de seu uso em escala industrial.

3.6.1 Sílica Ativa

Como adição, a sílica ativa tem grande potencial, uma vez que sua incorporação ao concreto possibilita melhoria de suas propriedades mecânicas além de conferir ao concreto menor permeabilidade.

A sílica ativa é conhecida pela tecnologia do concreto há mais de 40 anos, sendo desde então considerada uma pozolana de alta reatividade com os produtos da hidratação do cimento.

Ela é, na realidade, um sub-produto da indústria do ferro-silício e silício metálico. Por ser um material altamente poluente, não se sabia inicialmente o que fazer com ela, já que suas características de extrema finura e grande leveza dificultavam sobremaneira o transporte e a estocagem.

A Figura 3.9 mostra o processo de produção de silício e a captação de sílica ativa que se dá pela coleta do pó, normalmente feita em filtros de tecido na forma de sacos, conhecidos como filtros de manga. Como a maioria dos filtros não suporta temperaturas acima de 250°C, os gases devem passar por um processo de resfriamento. Após o preenchimento dos filtros com partículas de sílica ativa, é realizada uma reversão do fluxo de ar (com ventiladores contrafluxo), fazendo com que o material se desprenda dos filtros, para em seguida ser conduzido para silos de estocagem ou caminhões transportadores.

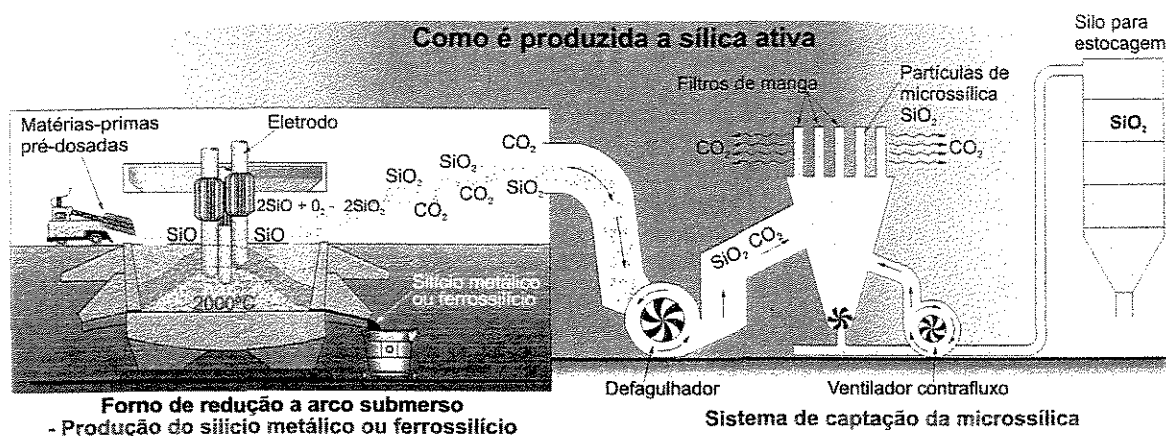


FIGURA 3.9 Esquema de produção da sílica ativa

A sílica ativa possui duas formas básicas de atuação no concreto: uma física, o denominado efeito filler (ou de preenchimento de vazios), que colabora para aumentar a coesão e a compacidade tanto na fase pasta quanto na de ligação agregado-pasta, e outra química, a clássica reação pozolânica de transformação do frágil hidróxido de cálcio no resistente silicato de cálcio hidratado.

A Figura 3.10 mostra como estas ações são responsáveis pela diminuição do volume de vazios, na fase pasta, pelo fortalecimento da microestrutura e pela redução da porosidade e da porometria (refinamento dos poros). Com esta redução da porosidade, aumenta-se a distância dos poros à face dos agregados, acarretando numa maior coesão e compacidade da fase pasta e também da zona de transição.

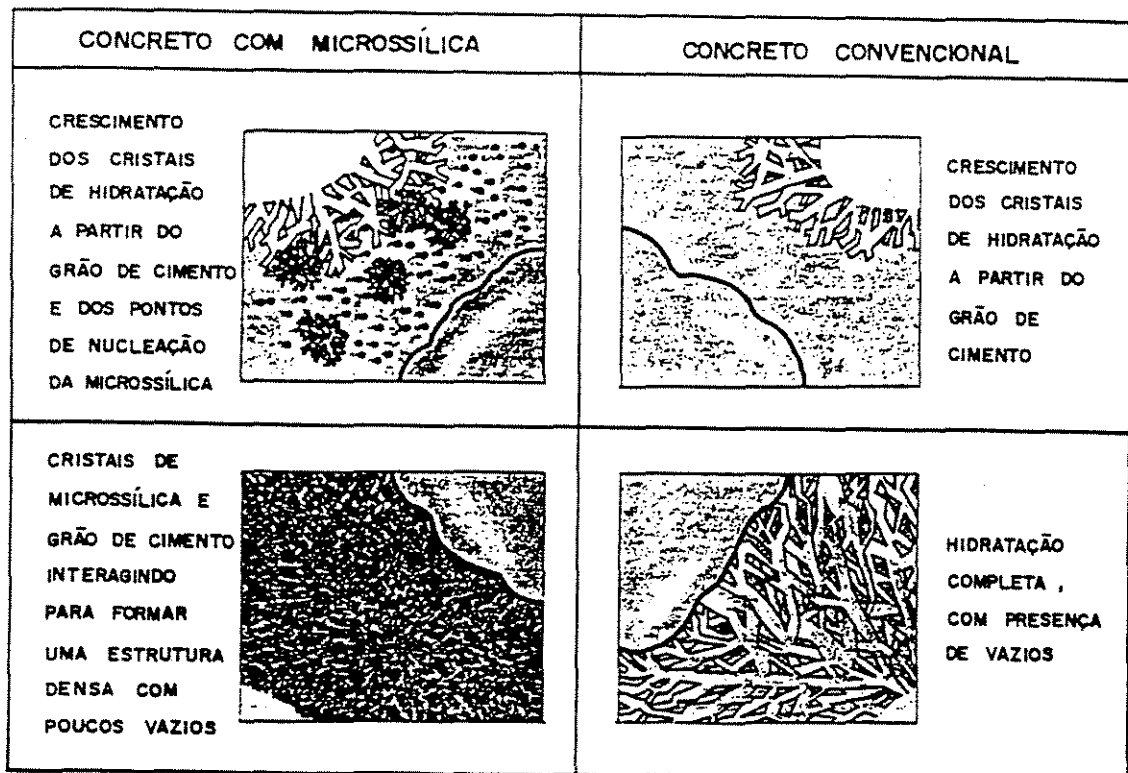


FIGURA 3.10 Efeito físico da adição de sílica ativa na reação de hidratação do concreto.

Fonte: MALE, 1988 *apud* DAL MOLIN, 1995.

Na ligação agregado-pasta foi identificada principalmente uma substancial redução de espessura da chamada zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, que coloca os agregados em contato direto com uma fase pasta mais resistente, aprimorando substancialmente a aderência.

Tudo isso colabora para a elevação das resistências mecânicas e para o aumento da durabilidade do material como um todo.

Porém, o uso da sílica ativa tem inconvenientes e o principal é a sua finura. Ela é cerca de 100 vezes mais fina que o cimento, e este fato provoca um aumento de demanda de água para a manutenção de uma dada trabalhabilidade, isto é, produz-se um concreto com relação a/c mais elevada. Como a relação a/c é inversamente proporcional à resistência e durabilidade dos

concretos, as vantagens adquiridas com a introdução da sílica ativa são perdidas com a relação a/c mais elevada do concreto.

Vários pesquisadores descrevem inúmeras modificações observadas na sua reologia e microestrutura, com reflexos positivos na coesão, resistência mecânica, permeabilidade, resistência química e durabilidade do concreto.

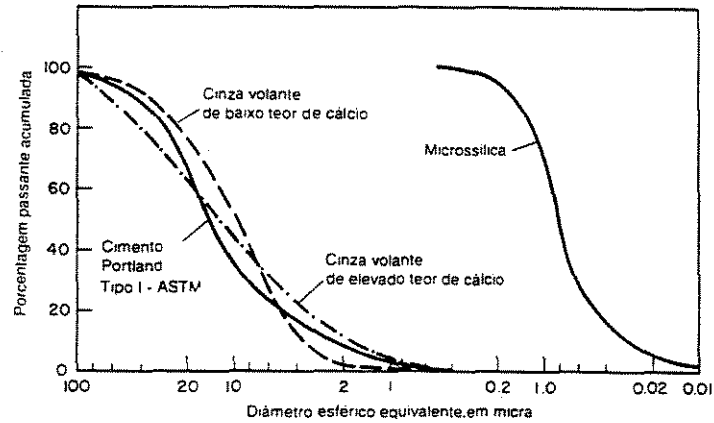


FIGURA 3.11 Comparação da distribuição granulométrica de partículas de cimento Portland, cinza volante e sílica ativa.

Fonte: DAL MOLIN, 1995

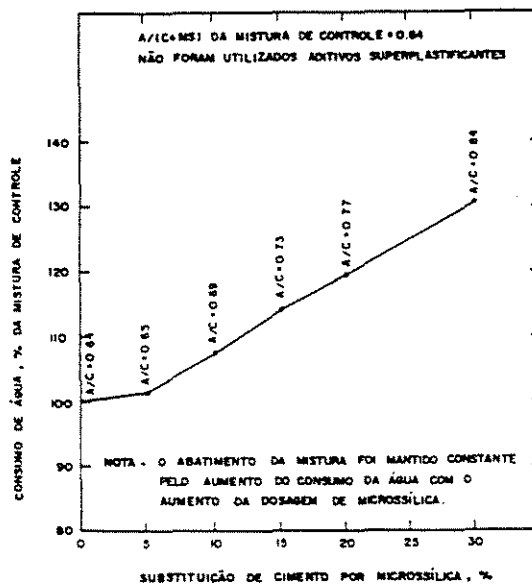


FIGURA 3.12 Influência da adição de microsilica no consumo de água de misturas de concreto

Fonte: MALHOTRA & CARETTE *apud* RAMACHANDRAN & MALHOTRA , 1984

3.6.1.1 Concreto no Estado Fresco

Do ponto de vista reológico, o concreto se caracteriza por grandezas como coesão e viscosidade. A coesão do concreto é responsável por sua capacidade de se manter na posição original sob pequenas tensões e a viscosidade caracteriza-se pela estabilidade do concreto, que envolve sedimentação e segregação, agindo como restrição ao movimento relativo dos grãos. Estas duas grandezas são drasticamente afetadas pela adição de sílica ativa. O grande número de microesferas agem como bloqueadores de poros, aumentando o contato sólido-sólido. Desta forma, os concretos com sílica ativa tendem a ser mais coesos, com redução considerável na tendência à segregação e exsudação, quando comparados a um concreto sem sílica ativa.

Devido à extrema finura da sílica ativa, a água necessária em concretos e argamassas com adições deste componente normalmente eleva-se conforme o aumento da porcentagem

adicionada. Este fato pode não ocorrer, segundo MALHOTRA (1992), em concretos com consumos de cimento inferiores a 300 kg/m^3 .

No entanto, o problema do aumento do consumo de água com adição de sílica ativa pode ser perfeitamente resolvido com a utilização de superplastificantes.

As características físicas e químicas da sílica ativa influenciam a cinética de hidratação do cimento. Em geral, a adição deste componente acelera a hidratação inicial do cimento Portland, após decorrido um certo período de tempo, devido, principalmente, à elevada superfície específica de suas partículas.

Sempre que não for realizada uma cura adequada do concreto e a velocidade de evaporação da água da superfície do mesmo for maior que a taxa de reposição da água pelo fenômeno de exsudação, podem ocorrer fissuras por dessecação superficial ou retração plástica.

Uma vez que a sílica ativa causa uma redução significativa na exsudação do concreto, dificultando a subida da água até a superfície, existe um risco potencial de fissuração, causada pela dissecação interna pela baixa relação a/c, principalmente quando a taxa de evaporação é elevada, devido à alta temperatura do ambiente ou à baixa umidade relativa do ar. Para evitar este problema, deve-se proteger a superfície do concreto fresco da perda de água mediante a utilização de um método eficiente de cura.

3.6.1.2 Concreto no Estado Endurecido

A adição de sílica ativa ao concreto melhora sua resistência à compressão. O processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento tem um papel fundamental

no aumento das resistências mecânicas, na medida que aumenta a resistência da matriz na zona de transição.

A resistência final do concreto com sílica ativa e sua evolução com o tempo dependem, entre outros fatores, da quantidade e características da sílica ativa adicionada, do proporcionamento do concreto (tipo e consumo de cimento, relação a/c, presença de superplastificante) e das condições de cura.

A quantidade de sílica ativa adicionada é um parâmetro importante que influencia a resistência à compressão dos concretos. Para construções convencionais o teor ótimo varia de 7 a 10%, chegando em situações especiais a 15%. Os ganhos efetivos de resistência à compressão ou à tração são relatados como ocorrentes para teores de 8 a 12%.

O tipo e período de cura realizada são aspectos determinantes da resistência à compressão de concretos com adições de sílica ativa, melhorando a qualidade da superfície do concreto, o que impede uma perda prematura de água e com isso, levando a um grau de hidratação mais elevado.

Para concretos com elevado desempenho, é necessária uma cura feita com muito cuidado devido à ausência de exsudação e à baixa relação a/c. Sendo assim, a cura deste concreto deve ser adotada desde o final do adensamento, a fim de evitar fissurações e retração exagerada das peças. Para isso, servem as tradicionais soluções, tais como molhar com mangueiras, cobrir com sacos de amiagem úmidos e até as mais inovadoras, como a cura com o emprego de bombas utilizadas na irrigação de lavouras.

A temperatura de cura também afeta a resistência à compressão de concretos com sílica ativa, só que de maneira mais significativa que a de concretos convencionais. A reação pozolânica da sílica ativa é muito sensível ao calor que acelera a velocidade das reações.

Entretanto, baixas temperaturas, sob os 5°C a sílica ativa como todo material cimentício tem efeito químico muito retardado.

Podemos notar que existe uma grande variabilidade de fatores que interferem na resistência à compressão. Somada à variabilidade inerente aos ensaios, faz com se tornem desnecessárias as tentativas de estabelecer fatores de eficiência. Entende-se por fator de eficiência K a quantidade de cimento que pode ser substituída por sílica ativa para obter a mesma resposta do experimento medido, no caso a resistência à compressão.

Quanto à resistência à tração, não há ainda um consenso em relação ao comportamento de concretos com adições de sílica ativa quando submetidos à estes esforços. Alguns pesquisadores afirmam que a resistência à tração dos concretos com sílica ativa é normalmente mais alta que a dos concretos de referência. Outros afirmam que a relação entre resistência à compressão e resistência à tração é praticamente a mesma para concretos com ou sem adições.

No entanto, só irá ocorrer um aumento significativo da resistência à tração quando as reações pozolânicas da sílica ativa tiverem efeito reduzindo o tamanho e concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição.

Em concretos de alta resistência, a incorporação de sílica ativa causa melhora considerável na microestrutura e resistência da zona de transição, com reflexos diretos na resistência à compressão do concreto. Conseqüentemente, os elevados níveis de resistência à compressão obtidos em concretos com adições de sílica ativa não se reproduzem com a mesma intensidade nos valores de módulo de deformação, que aumenta de forma mais amena.

A economia com uso da sílica ativa depende particularmente dos efeitos desejados. Estes podem ser: alta resistência, melhor mistura, propriedades especiais e racionalização da produção.

Em função da resistência à compressão com adição de sílica ativa, estes valores podem mudar de lugar para lugar dependendo também das mudanças de tecnologia.

3.6.2 Nanosílica

Pouco se sabe, ainda, no Brasil sobre este material que vem sendo utilizado na Europa, principalmente na França como adição ao concreto. Sabe-se que é um material muito fino, cerca de 10^{-4} da finura dos grãos de cimento, o que “fecharia o pacote da porosidade”. Seu efeito nas propriedades do concreto endurecido e sua melhor utilização é o que este trabalho pretende identificar.

Tem como matéria prima a areia e o quartzo, os quais, ainda em forma de estrutura cristalina, passam por um processo químico de precipitação resultando em uma estrutura amorfa. Este processo químico é constituído de três fases: reação com ácido sulfúrico e silicato de sódio, lavagem e filtração derivando em partículas de sílica precipitada, as quais passam por um processo de trituração úmida tornando-se uma suspensão estável que chega ao produto final através de uma incorporação de ar quente.

As Figuras 3.13 e 3.14 explicam, respectivamente, o processo químico de precipitação e a fabricação da sílica utilizada neste estudo.

Ela vem sendo utilizada em outros países, principalmente em concreto auto-adensável na construção de viadutos, plataformas de extração de petróleo e túneis. Em prédios residenciais e estruturas convencionais, sua utilização ainda é restrita.

Não há um consenso quanto ao teor de adição em massa de cimento utilizado, pois os valores variam entre 0,5 a 5%, sendo que os mais utilizados foram os de 2 e 5%, obtendo com

estes teores valores de resistências à compressão aos 28 dias entre 30 e 90 MPa.

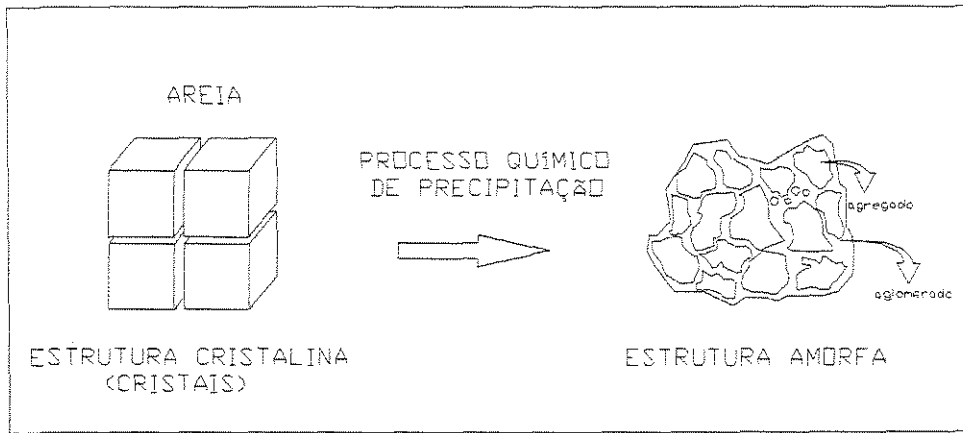


FIGURA 3.13 . Processo químico de precipitação

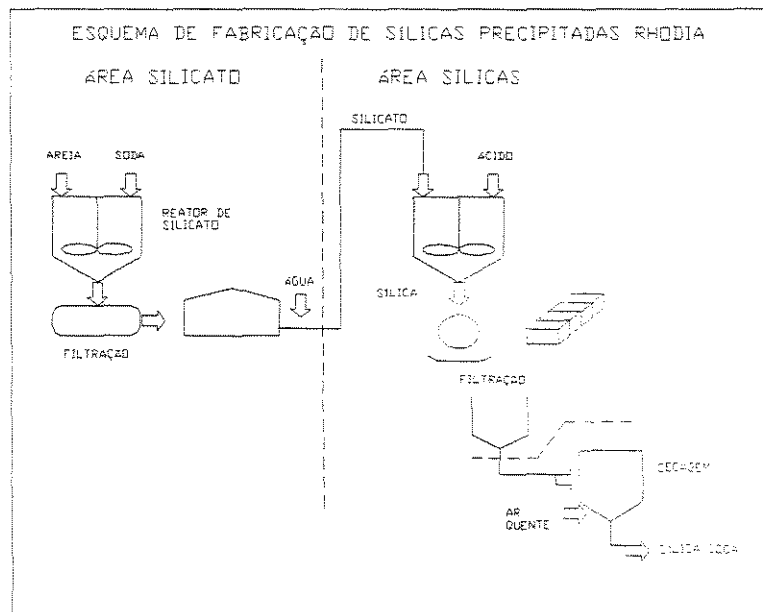


FIGURA 3.14. Esquema de Fabricação de Sílicas Precipitadas RHODIA

A sílica precipitada interage com o cimento criando uma rede inorgânica reativa de partículas.

Durante a hidratação do cimento, finas partículas de sílica SiO_2 , de compacidade regular, sofrem nucleação e acelerado enrijecimento do esqueleto inorgânico formando uma microestrutura homogênea.

A principal diferença entre este material e a sílica ativa está baseada no tamanho, cerca de 1000 vezes mais fina que esta última, torna-se ativa, é ativa em pequenas doses em adição em massa de cimento, variando entre 0,5 e 3%, apresentando ainda uma grande capacidade de suspensão (anti-segregação) e formando C-S-H ao reagir muito cedo com o C3S.

3.6.2.1 Efeitos no Concreto Fresco

Estudos mostram que mesmo nos casos que contam com granulometrias pobres ou altos teores de água, os concretos apresentam alta resistência à segregação e à exsudação, pois há um aumento da compacidade granular, conferindo maior compacidade ao concreto.

A trabalhabilidade melhora, já que o aumento da compacidade granular e a morfologia da nanosílica modificam a retenção de água, conferindo uma maior plasticidade.

A cinética de hidratação sofre uma pequena aceleração a pequenas idades sem ocorrer, no entanto, decréscimo no desempenho em grandes ciclos, devido à acelerada rigidez (enrijecimento) do esqueleto inorgânico, através da nucleação precoce do C-S-H nas nanopartículas de sílica.

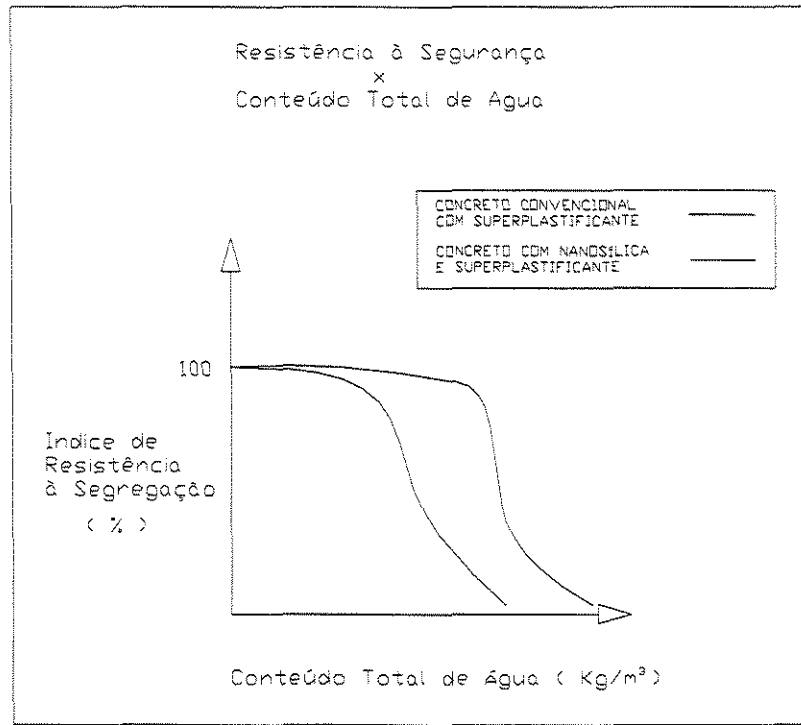


FIGURA 3.15. Relação entre a Resistência à Segregação e Conteúdo Total de Água

3.6.2.2 Efeitos no Concreto Endurecido

O principal efeito da nanosilica no concreto endurecido é a redução da permeabilidade, o que leva a um aumento da durabilidade do material. A microporosidade do concreto neste estado é melhor distribuída, sendo que todos os poros apresentam praticamente o mesmo diâmetro $\phi < 1\mu$.

A Figura 3.16 mostra o impacto na porosidade do concreto, devido à grande homogeneidade da microestrutura alcançada com a adição deste material.

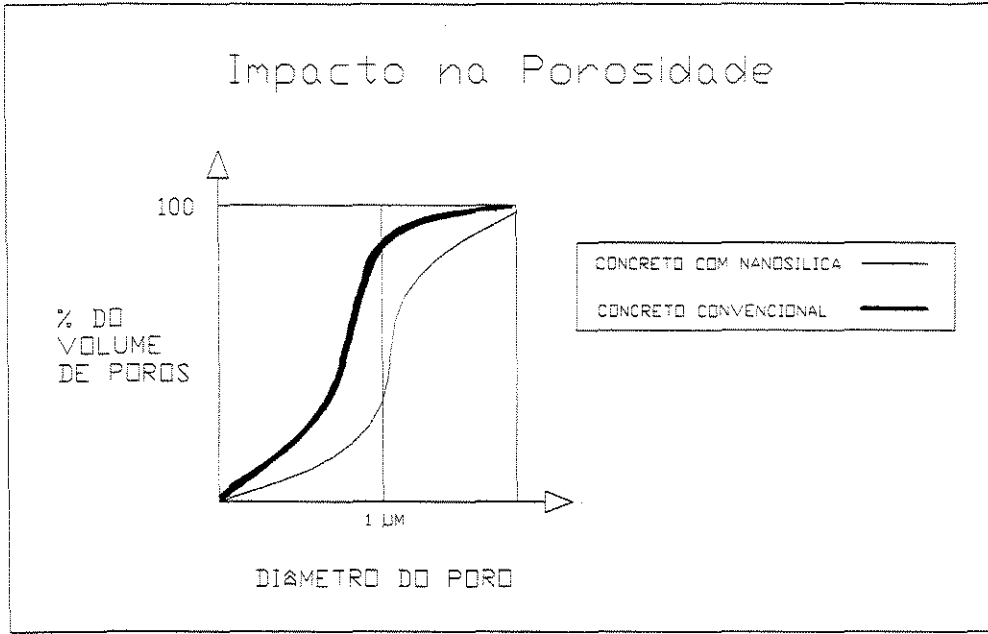


FIGURA 3.16 Impacto na Porosidade

Fonte: RHODIA/97

4 METODOLOGIA

4.1 Planejamento Experimental

Os ensaios foram planejados visando a atender o maior número de variáveis possíveis, dentro das possibilidades do laboratório, do tempo disponível e dos materiais. A escolha destes últimos, a dosagem e os métodos de ensaio são descritos de maneira a possibilitar o entendimento e reprodução dos mesmos.

4.1.1 Materiais

4.1.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland Composto CPIIE 40 de fabricação nacional pela "HOLDERCIM".

Suas características físicas e mecânicas, assim como sua resistência à compressão, foram determinadas pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e são apresentadas a seguir:

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Ensaio Físicos e Mecânicos

| Ensaio | NBR n° | Resultados | Limites da NBR 11578/91 |
|---|----------|------------|--------------------------|
| Finura –Resíduo na peneira de 75 µm (%) | 11579/91 | 0.1 | ≤ 10.0 % |
| Massa Específica (g/cm ³) ** | NM 23/98 | 3.11 | ----- |
| Área Específica (g/cm ²) ** | NM 76/98 | 4650 * | ≥ 280 m ² /kg |
| Água da Pasta de consistência Normal (%) | 11580/91 | 30.8 | ----- |
| Início de Pega (h:min) | 11581/91 | 3:50 | ≥ 1 h |
| Fim de Pega (h:m) | 11581/91 | 5:20 | ≤ 10 h |
| Expansibilidade de Lechatelier – a frio (mm) | 11582/91 | - | ≤ 5 mm |
| Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm) | 11582/91 | 0.0 | ≤ 5 mm |

Observações: Relativas aos ensaios e seus resultados: * 465 m²/kg,

** Realizado à temperatura de (23 ± 2)°C.

FIGURA 4.1. Características do Cimento determinadas através dos ensaios físicos e mecânicos pela ABCP em 13 de janeiro de 1999 da amostra n° 46139 coletada em 9 de 1998,

Fonte: Holdercim

Resistência à Compressão (MPa)- NBR 7215/96

| Idade (dias) | Corpo de prova n° | | | | Média | Desvio Relativo Máximo (%) | Limites da NBR 11578/91 |
|----------------|-------------------|------|------|------|-------|----------------------------|-------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| 1 | - | - | - | - | - | - | --- |
| 3 | 31.2 | 31.5 | 31.5 | 31.5 | 31.4 | 0.6 | ≥ 15 MPa |
| 7 | 39.7 | 39.8 | 39.1 | 38.2 | 39.2 | 2.6 | ≥ 25 MPa |
| 28 | 46.9 | 49.1 | 48.9 | 48.8 | 48.4 | 3.1 | ≥ 40 MPa |

FIGURA 4.2 Resistência à Compressão do Cimento CPIIE 40, determinada através de ensaio pela ABCP em 13 de janeiro de 1999 da amostra n° 46139 coletada em 9 de 1998.

Fonte: Holdercim

4.1.1.2 Agregados

4.1.1.2.1 Agregado Graúdo

Foi utilizado o agregado de basalto e quartzo, disponível no laboratório cuja análise granulométrica foi determinada conforme a NBR 9937/87, NBR7217/87, NBR7251/82, e pode ser verificada na tabela 4.1. Suas características estão descritas na Figura 4.3.

TABELA 4.1 Análise Granulométrica de Agregados

| Análise Granulométrica de Agregados | | | |
|--|------------------------|--------------------|-------------------------|
| Peneira | Material Retido | Individuais | Retido Acumulado |
| Milímetros | Gramas | Porcentagem | Porcentagem |
| 38 | | | |
| *32 | | | |
| *25 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 |
| *12.5 | 4400 | 49 | 49 * |
| 9.5 | 1600 | 18 | 67 |
| *6.3 | 2200 | 24 | 91 * |
| 4.8 | 462.6 | 5 | 96 |
| 2.4 | 0 | 0 | 96 |
| 1.2 | 0 | 0 | 96 |
| 0.6 | 0 | 0 | 96 |
| 0.3 | 0 | 0 | 96 |
| 0.15 | 0 | 0 | 96 |
| Fundo | 375.7 | 4 | 100 * |
| Totais | 9038.3 | 100 | 643 |

| | |
|---------------------------------|-------------------------|
| Dimensão Máxima Característica | 19 mm |
| Módulo de Finura | 6.43 |
| Massa Específica | 3.04 g/cm ³ |
| Massa Unitária (estado solto) | 1.57 kg/dm ³ |

FIGURA 4.3 Análise do Agregado Graúdo

4.1.1.2.2 Agregado Miúdo

O agregado utilizado estava disponível no laboratório e sua análise granulométrica foi determinada conforme a NBR 9776/87, NBR7217/87, NBR7251/82, e pode ser verificada na tabela 4.2. Suas características estão descritas na Figura 4.4.

TABELA 4.2 Análise Granulométrica de Agregados

Análise Granulométrica de Agregados

| Peneira | Material Retido | Individuais | Retido Acumulado |
|---------------|-----------------|-------------|------------------|
| Milímetros | Gramas | Porcentagem | Porcentagem |
| 38 | | | |
| *32 | | | |
| *25 | | | |
| 19 | | | |
| *12.5 | | | |
| 9.5 | 0 | 0 | 0 |
| *6.3 | 41.9 | 4 | 4 |
| 4.8 | 37.7 | 3 | 7 |
| 2.4 | 153.9 | 13 | 20 |
| 1.2 | 244.8 | 20 | 40 |
| 0.6 | 333.2 | 28 | 68 |
| 0.3 | 212.2 | 18 | 86 |
| 0.15 | 114.2 | 9 | 95 |
| Fundo | 71.2 | 5 | 100 |
| Totais | 1208.8 | 100 | 316 |

| | |
|---------------------------------|-------------------------|
| Dimensão Máxima Característica | 6.3 mm |
| Módulo de Finura | 3.16 |
| Massa Específica | 2.645 g/cm ³ |
| Massa Unitária (estado solto.) | 1.50 kg/dm ³ |

FIGURA 4.4 Análise do Agregado Miúdo

4.1.1.3 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada é de fabricação nacional, “Microsílica”, e suas características são apresentadas a seguir:

| Dados Físicos | |
|------------------|--|
| Cor | Cinza claro |
| Ponto de Fusão | 1730 °C |
| Massa Específica | 2.2 g/cm ³ |
| Aparência | Pó impalpável de dimensões micrométricas |

FIGURA 4.5 Dados Físicos da Sílica Ativa Utilizada

| Composição | |
|--------------------------------------|---------------|
| Principais Componentes | Quantidades % |
| Sílica Amorfa SiO ₂ | 75 a 99 |
| Carbono | 1 a 10 |
| Óxidos de Ferro, Alumínio e Magnésio | Diferença |

FIGURA 4.6 Composição da Sílica Ativa Utilizada

4.1.1.4 Nanosílica

A amostra de “Rhoimat” CS 60 SL utilizada foi fabricada na França pela “RHODIA”, na usina de Collonges. Sua aplicação nas condições brasileiras e os resultados obtidos é o que este trabalho pretende determinar.

As características da amostra são descritas nas Figuras 4.7 e 4.8, a seguir:

| Descrição | |
|--------------------|---|
| Composição Química | SiO ₂ .H ₂ O |
| Cor | Branco Leitoso |
| Forma Física | Suspensão aquosa estável de sílica amorfa precipitada |
| Aspecto | Líquido |

FIGURA 4.7 Dados Físicos da Nanosílica Utilizada

| Especificações | |
|-------------------|---------------------|
| pH | 5 < pH < 6.5 |
| Massa Volumétrica | 1.12 kg/L |
| Extrato Seco | 19.5% (±1.5) |
| Viscosidade | < 100 mPa.s à 20 °C |

FIGURA 4.8 Especificações da Nanosílica Utilizada

4.1.1.5 Superplastificante

O superplastificante utilizado foi o Sikament 300, de fabricação nacional. Líquido de cor castanho de densidade 1,21, tem pega normal e alta desempenho. Foi escolhido por ter pega

normal, sem apresentar efeito retardador.

4.1.1.6 Dosagem

Primeiramente optou-se por fazer quatro tipos diferentes de traços, três deles contendo adições de sílica ativa e nanosílica e outro tratado como o de referência, livre de adições. Estes traços ficam portanto denominados de :

- T₁ àquele com adição de 5% nanosílica;
- T₂ àquele com adição de 5% de nanosílica e 7.5% sílica ativa;
- T₃ àquele com adição de 7.5% sílica ativa;
- T₄ ao traço de referência.

As adições foram feitas em massa de cimento e optou-se pelas quantidades mais utilizadas e aconselhadas pelos fabricantes. Ficou decidido, ainda, que não haveria variação da porcentagem de adição.

O consumo de cimento deveria ficar em torno dos 390 kg/m³ para que fosse possível trabalhar com um concreto cujas características seriam as ideais para o trabalho, tais como: a resistência média e a permeabilidade, facilitando assim a verificação dos efeitos da adição de sílicas nas suas propriedades.

A relação água cimento (a/c) foi mantida para todos os traços e fixada em 0.55, característica de concretos convencionais. Optou-se por essa relação para que fosse possível obter um concreto mais permeável e conseqüentemente menos durável, tornando-se assim mais fácil verificar os efeitos das adições no sentido da durabilidade e a análise dos efeitos na trabalhabilidade, de acordo com cada adição.

O traço de referência (1: 2.18: 2.82) tem o seguinte consumo de materiais :

| Material | Consumo |
|--------------------|------------------------|
| Cimento | 382 kg/m ³ |
| Areia | 833 kg/m ³ |
| Pedra | 1077 kg/m ³ |
| Água | 210 kg/m ³ |
| Superplastificante | 1.91 kg/m ³ |

FIGURA 4.9 Traço de referência T₄ : consumo de materiais

A Figura 4.10 mostra o consumo de materiais de todos os traços T₁, T₂, T₃ e T₄.

| Traço | Água (kg) | Cimento (kg) | Agregado (kg) | | Relação a/c | Nanosilica | Sílica Ativa | Abatimento (mm) |
|----------------|----------------|-----------------|---------------|--------|----------------|------------|-----------------|--------------------|
| | | | Graúdo | Miúdo | | | | |
| T ₁ | 17.530 | 31.905 | 89.972 | 64.546 | 0.55 | 1.595 | - | 80 |
| T ₂ | 17.530 | 31.905 | 89.972 | 64.546 | 0.55 | 1.595 | 2.393 | 40 |
| T ₃ | 17.530 | 31.905 | 89.972 | 64.546 | 0.55 | - | 2.393 | 80 |
| T ₄ | 17.530 | 31.905 | 89.972 | 64.546 | 0.55 | - | - | 140 |

FIGURA 4.10 Traço de concreto por m³

4.2 Ensaios

4.2.1 Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto

Foram ensaiados, para cada traço, dois corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20cm ,conforme a NBR 5739/80 aos 3, 7 e 28 dias.

4.2.1.1 Procedimento

Antes da realização do ensaio, as faces dos corpos de prova devem ser capeadas, de forma a tornarem-se planas e paralelas. O corpo de prova deve ser cuidadosamente centralizado no prato e a ele deve ser aplicada uma carga, contínua, à velocidade de 0,3 a 0,8 MPa por segundo, até que o recuo do ponteiro de carga seja em torno do valor de 10% do valor de carga máxima alcançada, a qual será a carga máxima de ruptura.

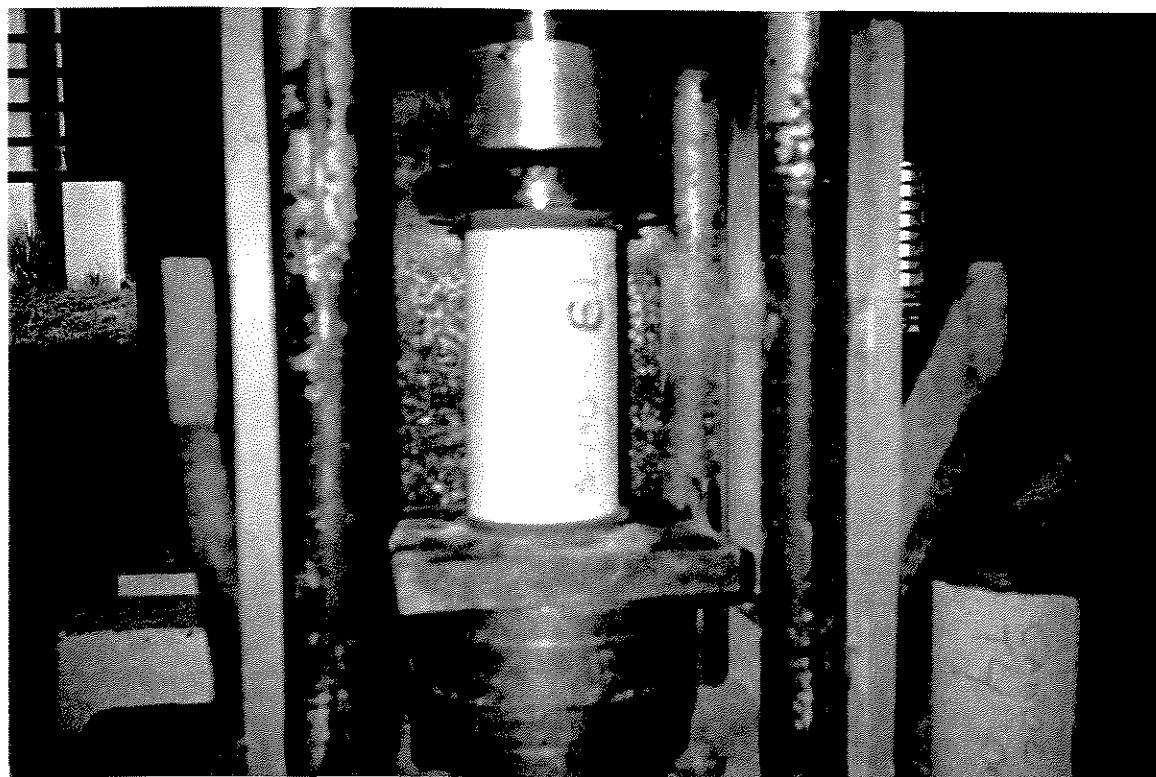


FIGURA 4.11 Ensaio de corpo de prova cilíndrico de 10 x 20 cm à Compressão, NBR 5739/80

4.2.1.2 Condições de Cura

Os corpos de prova foram desmoldados após 48 horas e mantidos em câmara úmida até a realização dos ensaios.

4.2.1.3 Tensão de Ruptura à Compressão

A tensão de ruptura à compressão é obtida dividindo a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova, conforme expressão 4.1 apresentada a seguir:

$$f_c = \frac{F_r}{A_c} \quad (4.1)$$

4.2.2 Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos

Foram ensaiados, para cada traço, dois corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20cm ,conforme a NBR 7222/83 aos 3, 7 e 28 dias.

4.2.2.1 Procedimento

O corpo de prova deve ser colocado entre os pratos e duas tiras de madeira do tipo flexível, de comprimento 42 cm, e área da seção transversal de 1cm², para melhor distribuição

das tensões. Depois de ajustados os corpos de prova foi aplicada a carga contínua até a ruptura do mesmo.

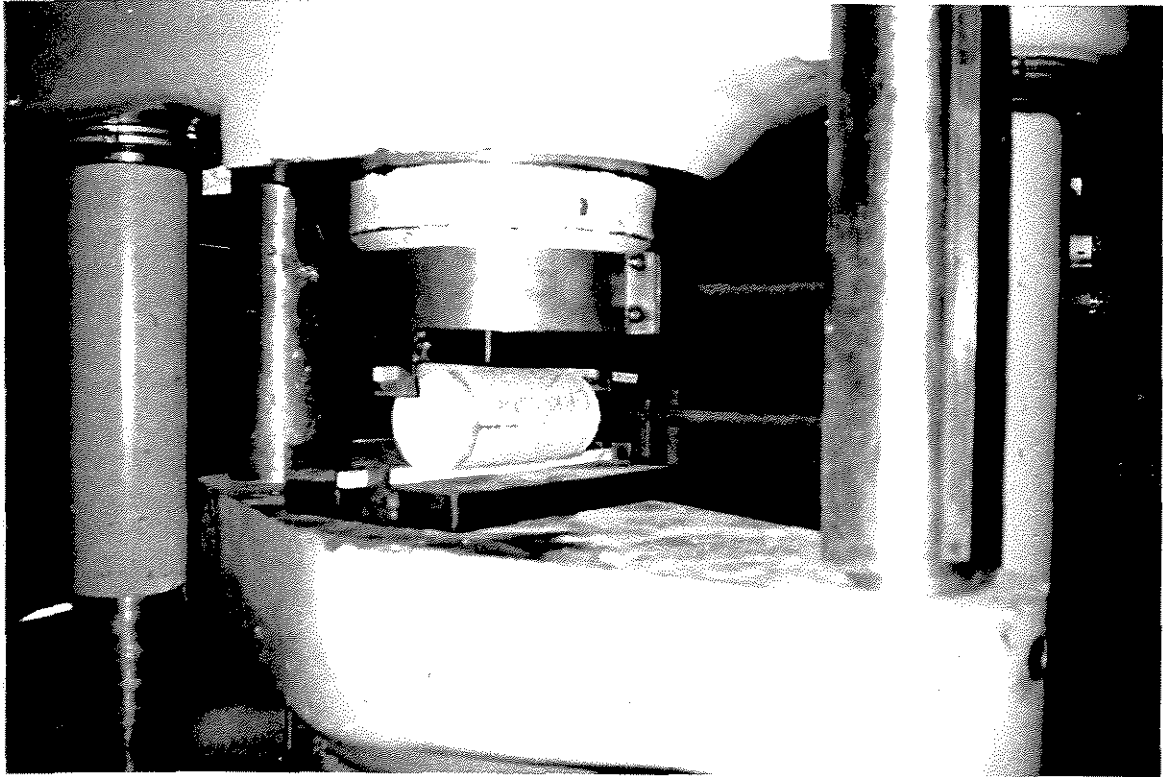


FIGURA 4.12 Ensaio de corpo de prova cilíndrico de 10 x 20 cm à Tração por Compressão Diametral, NBR 7222/83

4.2.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração por compressão diametral será calculada pela expressão (4.2):

$$f_{t,d} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (4.2)$$

onde:

$f_{t,d}$ = resistência à tração por compressão diametral, expresso em MPa

F = carga máxima obtida no ensaio

d = diâmetro do corpo de prova

l = altura do corpo de prova

4.2.3 Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão - Deformação

Foram ensaiados, para cada traço, dois corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20cm ,conforme a NBR 8522/84 aos 3, 7 e 28 dias.

4.2.3.1 Procedimento

Após serem devidamente capeados, foram coladas aos corpos de prova as bases de medida, no caso foram escolhidas pastilhas para a medição das deformações utilizando relógio comparador (TENSOTAST).

A maioria dos pesquisadores no Brasil utiliza este método, pois é de fácil aplicação e os materiais requeridos encontram-se à disposição na maioria dos laboratórios.

(DAL MOLIN & MONTEIRO, 1997), utilizou este método em concretos de alta resistência com adição de sílica ativa e verificou de que forma as adições de sílica ativa ou as curas deficientes podem afetar esta propriedade mecânica. Em seus estudos ela comprova a elevação dos valores do módulo de deformação em aproximadamente 3,6%, ao se aumentar a idade e teor de adição de sílica ativa, diminuir a relação $a/(c + sa)$ e realizar uma cura úmida adequada.

4.2.4 Permeabilidade – Determinação da Penetração de Água sob Pressão

Os ensaios de permeabilidade foram realizados conforme a NBR 10787/94, em corpos de prova prismáticos de concreto endurecido de dimensões 25 x 25 x 12,5 cm, em três corpos de prova por traço na idade de 28 dias.

4.2.4.1 Procedimento

Os corpos de prova foram moldados em fôrmas de madeira rígida e após serem desmoldados foram protegidos da perda de umidade, com panos úmidos permanecendo assim até o dia do ensaio, onde tiveram as faces escarificadas com escova de aço para torná-la rugosa. Após estes procedimentos, os mesmos foram posicionados no equipamento sobre um anel de borracha.

O aparelho empregado conta com manômetro, válvula reguladora de pressão, reservatório para água, capaz de suportar a pressão de ensaio com uma margem de segurança grande, registros, conexões e tubulações adequadas capazes de suportar a pressão necessária para o ensaio e anéis de borracha para vedação. O equipamento é melhor exemplificado através da Figura 4.13

Depois de serem devidamente posicionados, foram submetidos a três estágios e pressão, os quais duraram ao todo 96 horas.

1. No 1º estágio foi aplicada uma tensão de $(0,1 \pm 0,01)$ MPa durante 48 h;
2. No 2º estágio essa pressão foi aumentada para $(0,3 \pm 0,03)$ MPa , por 24 horas ininterruptas;

3. No 3º estágio essa pressão aumentou para $(0,7 \pm 0,07)$ Mpa, também por 24 horas.

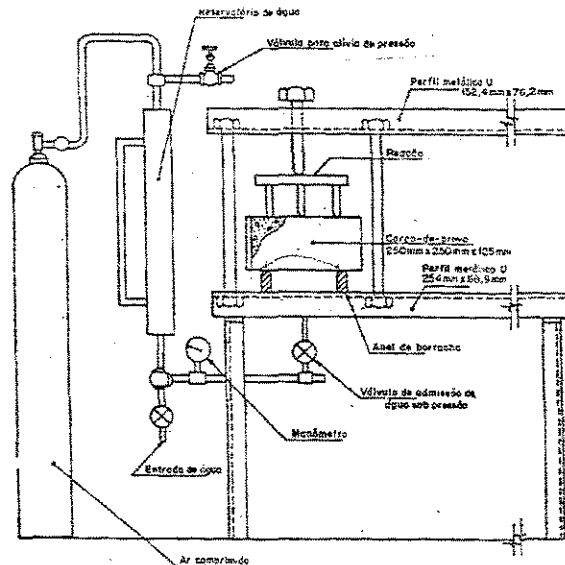


FIGURA 4.13 Esquema de Equipamento para Aplicação de Pressão

Depois destas etapas, toda a pressão é liberada e retira-se o corpo de prova do aparelho. O corpo de prova é submetido a ensaio de compressão simples, através do qual é possível verificar a altura de percolação de água em milímetros e a distribuição da água que penetrou.

Trata-se de um ensaio de fácil realização mas pouco difundido e de custos um pouco altos, sendo realizado apenas em alguns laboratórios. Às dificuldades com o manuseio e transporte dos corpos de prova, devido a suas dimensões, alia-se a falta de resultados para poder estabelecer um padrão comparativo dos resultados, já que a norma não os estipula. Há muitos outros métodos de verificação da permeabilidade dos concretos, um deles utilizado recentemente, conforme atesta CAMARINI, (1999), consiste na absorção de água, no qual é medida a velocidade de penetração da mesma para o concreto. A pesquisadora apresenta como vantagens deste método a obtenção dos resultados em um curto período de tempo, além de afirmar que a velocidade de penetração de água por capilaridade é mais elevada do que no ensaio de permeabilidade, tornando-se assim um importante indicativo da durabilidade.

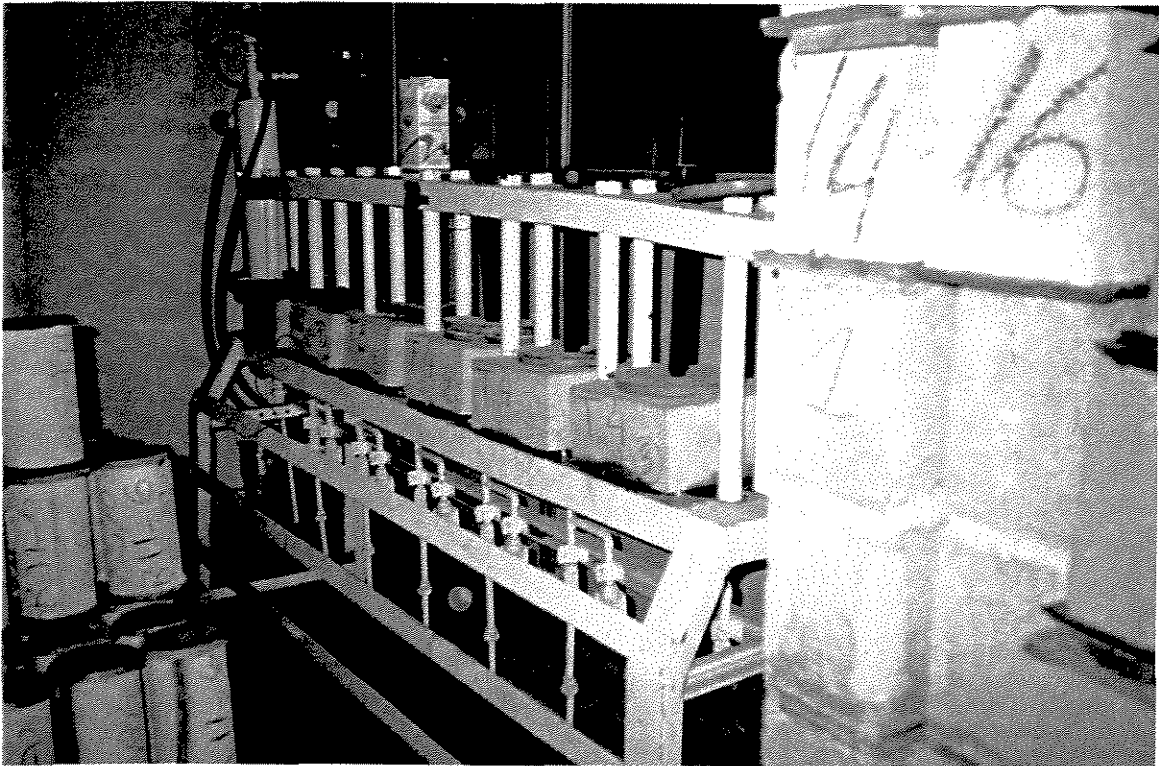


FIGURA 4.14 Corpos de Prova dos traços 3 e 4 Submetidos ao Ensaio de Penetração de Água sob Pressão (NBR 10787/94).

Também utilizado no Brasil, o método de FIGG caracteriza a permeabilidade de concretos com diferentes características. Ele consiste em fazer um furo de 10 mm de diâmetro por 40mm de profundidade na superfície do concreto. Posteriormente, são vedados com borracha e adesivo à base de resina epóxi os 20mm superficiais de forma a produzir uma câmara no interior do concreto. A comunicação com o meio externo ocorre através de uma agulha fixada na borracha de vedação. O princípio do método é a medida do tempo que o ar leva para penetrar através do cobrimento do concreto e diminuir o vácuo imposto na cavidade de 400 mmHg a 380 mmHg. Para que o tempo obtido corresponda ao da permeabilidade basta dividi-lo por dois. LEÃO (1999) submeteu vigas de concreto com relações a/c diferentes e com adição de emulsão polimérica, e constatou que quanto menor a relação a/c maior será o tempo de ensaio, ou seja, menor a permeabilidade. Este método mostrou-se adequado para avaliar a permeabilidade do

concreto ao ar, e apresentou resultados coerentes em relação à literatura encontrada. O principal desafio foi o de encontrar uma metodologia local para a aplicação do método, já que no método original o ar da cavidade é aspirado com uma bomba de sucção manual e o vácuo é medido com manômetro digital. Na adaptação do pesquisador foram empregados um aspirador mecânico e um vacuômetro analógico

Nas Figuras 4.15 e 4.16 pode ser observado o procedimento realizado para determinar a altura de percolação de água nos corpos de prova submetidos ao ensaio de permeabilidade.

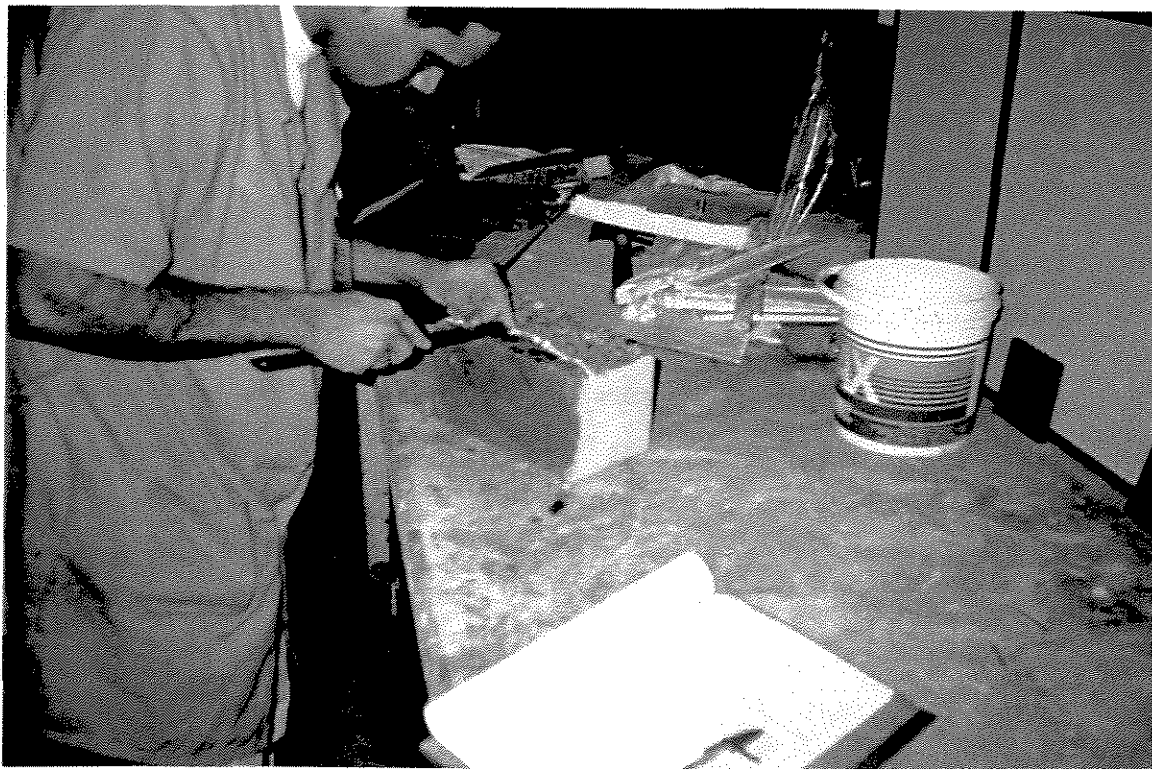


FIGURA 4.15 Determinação da Altura da Percolação de Água em Corpo de Prova Submetido à Ensaio de Penetração de Água sob Pressão (NBR 10787/94)



FIGURA 4.16 Mapeamento da Altura da Percolação de Água em Corpo de Prova Submetido à Ensaio de Penetração de Água sob Pressão (NBR 10787/94)

4.2.5 Durabilidade

Há na literatura alguns artigos que tratam sobre a dissolução do cimento pelo ácido. No entanto, a maior parte destes não apresenta um procedimento detalhado para tal determinação, inviabilizando a produção do método. A quantificação do ataque ácido ao cimento pode ser realizada de inúmeras formas e por este motivo é necessária não só uma uniformização como também uma análise mais cuidadosa dos parâmetros do método, para que estes não afetem a confiabilidade e a repetibilidade do mesmo.

O concreto pode ser atacado por diversos ácidos, dependendo do meio onde esteja inserido. O esgoto doméstico, por exemplo, contém ácido carbônico e ácidos voláteis, os quais dissolvidos em água, abaixam o pH do concreto para cerca de 4,5 causando prejuízos ao concreto. A partir deste fato MARELLI (1999) vem estudando a utilização de um reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), para tratamento das águas residuárias do esgoto

doméstico no Brasil. Tal estudo revelou que a utilização da adição de sílica ativa melhorou, consideravelmente, a pasta e a ligação pasta-agregado devido a seu efeito micro-filler e pozolânico, melhorando a coesão e evitando a exsudação. Estas alterações acarretaram numa melhoria na qualidade da pasta tais como: aumento da resistência à compressão, redução da porosidade capilar, resistência à abrasão maior e diminuição da permeabilidade.

Outra forma de ataque bastante estudada é a do ácido fórmico, presente nas indústrias de alimento. Um estudo apresentado por KULAKOWSKI (1996) determina a ação deste ácido em concretos com adição de sílica ativa com vistas a garantir a durabilidade e o bom desempenho de pisos industriais, utilizando o critério de perda de massa e o emprego de corpos de prova prismáticos, submetidos a ciclos de agressão de 7 dias e 7 dias de secagem, quando foi verificado que a presença de sílica ativa reduziu em média 30% da perda total de massa.

Neste trabalho, os ensaios de durabilidade foram sendo adaptados, já que não há muitos critérios normativos, e se resumiram ao ataque por duas soluções ácidas: a primeira denominada de mud acid e a segunda apenas de ácido acético. A escolha por estes ácidos se deu devido ao fato de serem prejudiciais ao concreto e, principalmente, por estarem presentes em muitas indústrias.

A solução denominada mud acid, fortemente agressiva ao cimento é constituída pela mistura de ácido clorídrico (HCl) 12% e ácido fluorídrico (HF) 3% por/massa, sendo utilizada na operação de acidificação em poços de petróleo pela Petrobrás. No caso do ácido fluorídrico ainda soma-se o fato dele ser também incompatível com a nanosílica. Já o ácido acético, utilizado na concentração de 10%, foi escolhido por causar danos à maioria das indústrias nacionais de vinagre e usinas de açúcar, corroendo rapidamente o cimento presente no concreto.

A solução denominada mud acid foi utilizada no país por MIRANDA (1996), que a estudou imergindo corpos de prova cúbicos de cimento, de 5,08cm de lado, durante 40 minutos, quantificando a perda de massa. O ensaio de perda de massa é discutido pois, depois de curado, o

corpo de prova pode estar saturado de água e após a imersão, mesmo com a secagem, pode haver presença de ácido, o que modificará o resultado do ensaio. Outros ensaios complementares ao seu estudo são de difícil reprodução na maioria dos laboratórios das universidades. Ensaio como o de difração e fluorescência de raios-X, os quais verificam a alteração na composição química causada pelo ataque ácido, ou ainda os utilizados para a verificação da extensão do ataque, isto é, até qual profundidade do corpo de prova foi atingida, as amostras eram previamente cortadas em camadas de até 3mm de espessura, por meio de serra de diamante. Além disso, existem os ensaios onde as amostras de ácido foram analisadas por espectroscopia de emissão de plasma, através do qual são identificados os compostos resultantes. Todos estes ensaios serviram para mostrar que o consumo de cimento varia em função do ácido utilizado e que o ataque ao corpo de prova é sempre superficial.

4.2.5.1 Procedimento

Foram moldados dois corpos de prova cilíndricos de 15 x 30 cm para cada traço, para serem imersos, na idade de 7 dias, nas soluções durante o período de uma semana. Outros dois corpos de prova serviriam de testemunho (são). No final do período de exposição os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão, verificação de profundidade de infiltração do ácido, utilizando-se o indicador fenolftaleína, e perda de massa através de pesagem, a qual foi feita previamente, antes da exposição dos corpos de prova às soluções ácidas e possível observação visual de compostos formados .

A escolha do indicador fenolftaleína se deve à facilidade do manuseio e à disponibilidade do material. Estes indicadores são substâncias químicas que, em contato com a solução alcalina do concreto que é rica em hidróxido de cálcio, adquirem colorações típicas a partir de um determinado pH da solução, atingindo, por exemplo, a coloração vermelho carmim (aroxeadada) com pH da ordem de 9,5. Já abaixo desse pH o concreto tende a não sofrer alteração de cor quando o indicador é aspergido, mantendo-se portanto incolor, isto é, quando o concreto

permanece sem cor há uma forte evidência da infiltração do ácido, o que pode resultar no avanço da frente de carbonatação, o que acarretaria, em caso de concreto armado, na despassivação das armaduras e conseqüente corrosão das mesmas.

4.2.5.1.1 Preparo das Soluções Ácidas

O preparo das soluções foi realizado por um técnico de laboratório, utilizando equipamentos de segurança como luvas de borracha, óculos de proteção e máscara, já que os ácidos fluorídrico e clorídrico (muriático) são de difícil e perigoso manuseio. O ácido clorídrico é altamente volátil e o fluorídrico é altamente reagente com matéria orgânica. Os corpos de prova foram imersos em recipientes plásticos com capacidade de 35 litros, contendo água deonizada à temperatura ambiente e a mistura dos ácidos.



FIGURA 4.17 Vista geral dos Corpos de Prova Submetidos ao Ensaio de Durabilidade



FIGURA 4.18 Corpos de prova imersos em soluções de mud acid e ácido acético, sendo a primeira referente a ácido acético (10%) e as outras duas referentes a mud acid (12%HCl + 3% HF).



FIGURA 4.19 Amostras submetidas a ataque de ácidos, sendo as duas inferiores testemunhos.

4.2.6 Determinação da Atividade Pozolânica com Cimento Portland – Índice de Atividade Pozolânica com Cimento

Este ensaio, de fácil reprodução devido a pouca quantidade de material requerido, rapidez de execução e disponibilidade dos equipamentos, foi realizado segundo a NBR5752/92 com o intuito de verificar o índice de atividade pozolânica das sílicas com o cimento utilizado.

Para o mesmo foram necessários uma balança de resolução de 0,1g , mesa para índice de consistência e misturador mecânico.

4.2.6.1 Procedimento

Foram moldados três corpos de prova para cada traço, um apenas contendo cimento, outro contendo sílica ativa em substituição parcial do cimento e outro contendo nanosílica também em substituição parcial do cimento. Depois de moldados de acordo com as informações requeridas, foram submetidos à cura em câmara úmida durante 27 dias e colocados ao ar para posterior ensaio à compressão.

Este ensaio é amplamente utilizado e foi descrito por ABREU (1997) em seu trabalho sobre a avaliação da propriedade pozolânica da cinza de casca de arroz proveniente de Pelotas (RS), no qual verificou-se que este material constitui-se numa boa adição mineral, embora os resultados do ensaio não tenham apontado uma reatividade muito alta.



5 RESULTADOS

5.1 Resistência à Compressão

São apresentados, a seguir, os resultados dos ensaios à compressão simples, segundo a NBR5739/80, realizados em 03 corpos de prova cilíndricos nas idades de 3, 7 e 28 dias.

TABELA 5.1 Resultados obtidos aos 3, 7 e 28 dias, no ensaio de compressão simples NBR 5739/80

| Traço | Resistência (MPa) | | |
|----------------|--------------------|--------|---------|
| | 3 dias | 7 dias | 28 dias |
| T ₁ | 23.45 | 27.10 | 33.2 |
| T ₂ | 25.85 | 32.20 | 37.4 |
| T ₃ | 24.50 | 31.30 | 42.3 |
| T ₄ | 20.20 | 24.70 | 31.8 |

Já na Figura 5.1 pode ser observado o gráfico que mostra o comportamento dos concretos quanto ao crescimento da resistência à compressão. Os resultados apresentam a média dos 03 corpos de prova ensaiados.

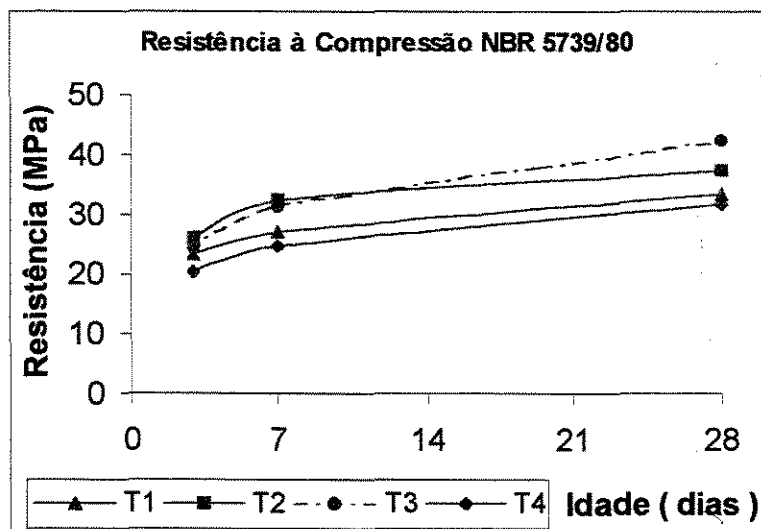


FIGURA 5.1 Resistência (MPa) x Idade (dias), referente aos valores obtidos através de ensaio à Compressão em corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm NBR 5739/80

Onde: T₁ é denominado o traço com 5% de nanosilica

T₂ é denominado o traço com (5% de nanosilica e 7,5% de sílica ativa)

T₃ é denominado o traço com 7,5% de nanosilica

T₄ é denominado o traço de referência

Como se trata de um concreto de características comuns, para utilização em obras usuais, as resistências à compressão esperadas não eram altas, devendo ficar em torno dos 30 MPa.

Segundo MENEGHETTI (1999), a resistência do concreto é uma propriedade que evolui consideravelmente nas primeiras idades. Esta afirmação foi confirmada pois os resultados mostram que todos os concretos contendo adição apresentaram elevação da sua resistência à compressão em relação ao concreto de referência nas primeiras idades, sendo a resistência da mistura binária superior a todas as dos outros concretos. Analisando-se, porém, estes resultados aos 28 dias, temos o concreto com adição de sílica ativa T₃ como sendo o que alcançou o valor de resistência à compressão mais elevado, apresentando um resultado 33% maior que o valor de referência. Este resultado já era esperado, pois incrementos de até 40% tem sido verificados em

concretos que utilizaram este material como adição. Isto ocorre devido ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta, provocado pela adição de sílica ativa, tornando a zona de transição muito mais coesa e compacta (RODOLFO & ISA, 1999).

Já a mistura binária não alcançou o resultado esperado, elevando a resistência à compressão em 18%. Esperava-se, neste caso, que com a adição destes dois materiais o aumento da resistência à compressão fosse muito maior, devido a melhora da coesão que a adição de nanosílica deveria proporcionar ao concreto.

No caso do novo material, a nanosílica, seu desempenho não foi muito considerável, tendo elevado o valor em apenas 4,5%.

O desempenho dos concretos contendo nanosílica foi inferior ao esperado possivelmente devido à quantidade de água que continham, já que não foi descontada a água da mesma. Conforme já foi verificado por pesquisadores que a resistência à compressão é inversamente proporcional a quantidade de água adicionada ao concreto (GEYER et al, 1999).

5.2 Resistência à Tração

São apresentados a seguir, os resultados dos ensaios à tração por compressão diametral, segundo a NBR7222/83, realizados em 03 corpos de prova cilíndricos, para cada traço, aos 3, 7 e 28 dias.

Conforme esclarece a Figura 5.2, pode ser observado o gráfico que mostra o comportamento dos concretos quanto a resistência à tração. Os resultados apresentam a média dos 02 corpos de prova ensaiados para cada traço de concreto.

TABELA 5.2 Resultados obtidos aos 3 e 7 dias, no ensaio de tração por compressão diametral NBR 7222/83

| Traço | Resistência (MPa) | | |
|----------------|--------------------|--------|---------|
| | 3 dias | 7 dias | 28 dias |
| T ₁ | 2.45 | 2.80 | 3.2 |
| T ₂ | 2.55 | 3.45 | 3.6 |
| T ₃ | 2.65 | 2.75 | 3.4 |
| T ₄ | 2.30 | 2.65 | 3.5 |

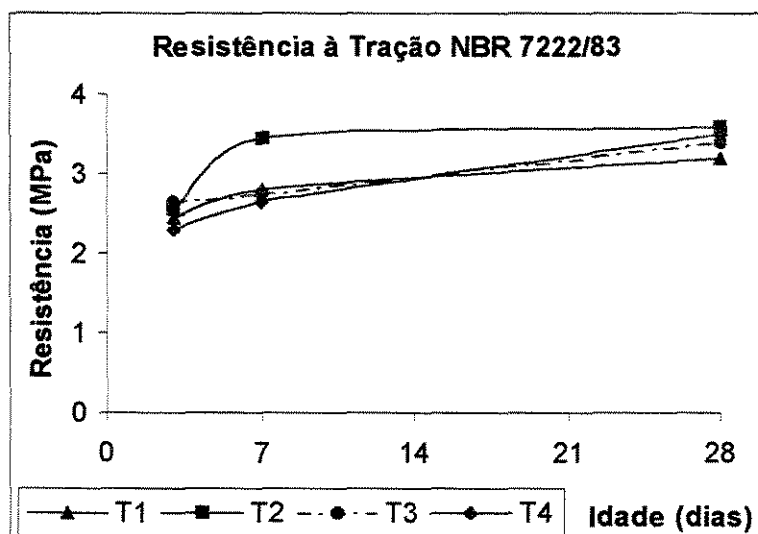


FIGURA 5.2 Resistência (MPa) x Idade (dias), referente aos valores obtidos através de ensaio à Tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm NBR 7222/83

Onde: T₁ é denominado o traço com 5% de nanosílica

T₂ é denominado o traço com (5% de nanosílica e 7,5% de sílica ativa)

T₃ é denominado o traço com 7,5% de nanosílica

T₄ é denominado o traço de referência

Como foi mencionado anteriormente, ainda não há um consenso quanto ao comportamento do concreto com adições na tração. Alguns pesquisadores afirmam que estes

valores não se alteram e outros afirmam que os valores de resistência à tração são majorados com a utilização das adições. No presente trabalho, não foram verificadas mudanças consideráveis, em relação ao concreto de referência, dos concretos contendo adições. Apenas a mistura binária alcançou um valor positivo, mas mesmo assim o aumento foi de 5%.

3 Módulo de Deformação

São apresentados, a seguir, os resultados dos ensaios de Módulo de Deformação, segundo a NBR 8522/84, em 02 corpos de prova cilíndricos para cada traço de concreto aos 28 dias.

TABELA 5.3 Resultados obtidos aos 28 dias, no ensaio de módulo de deformação NBR 8522/84

| Tensão (MPa) | Deformação (mm) | | | |
|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.55 | 0.14 | 0.08 | 0.06 | 0.06 |
| 5.09 | 0.26 | 0.14 | 0.14 | 0.16 |
| 7.64 | 0.3 | 0.32 | 0.2 | 0.24 |
| 10.19 | 0.36 | 0.46 | 0.28 | 0.34 |
| 12.73 | 0.48 | 0.54 | 0.34 | 0.50 |
| 15.28 | 0.62 | 0.66 | 0.48 | 0.66 |
| 17.83 | 0.76 | 0.72 | 0.56 | 0.8 |
| 20.37 | 0.86 | 0.9 | 0.64 | 0.96 |
| 22.92 | 1.06 | 1.14 | 0.74 | 1.12 |
| 25.46 | 1.28 | 1.24 | 0.8 | 0.9 |
| 28.01 | 1.56 | 1.4 | 0.9 | 1.64 |

Na Figura 5.3, as curvas tensão x deformação mostram o comportamento dos concretos durante o ensaio de módulo de deformação. Os resultados apresentam a média dos 02 corpos de prova ensaiados para cada traço de concreto.

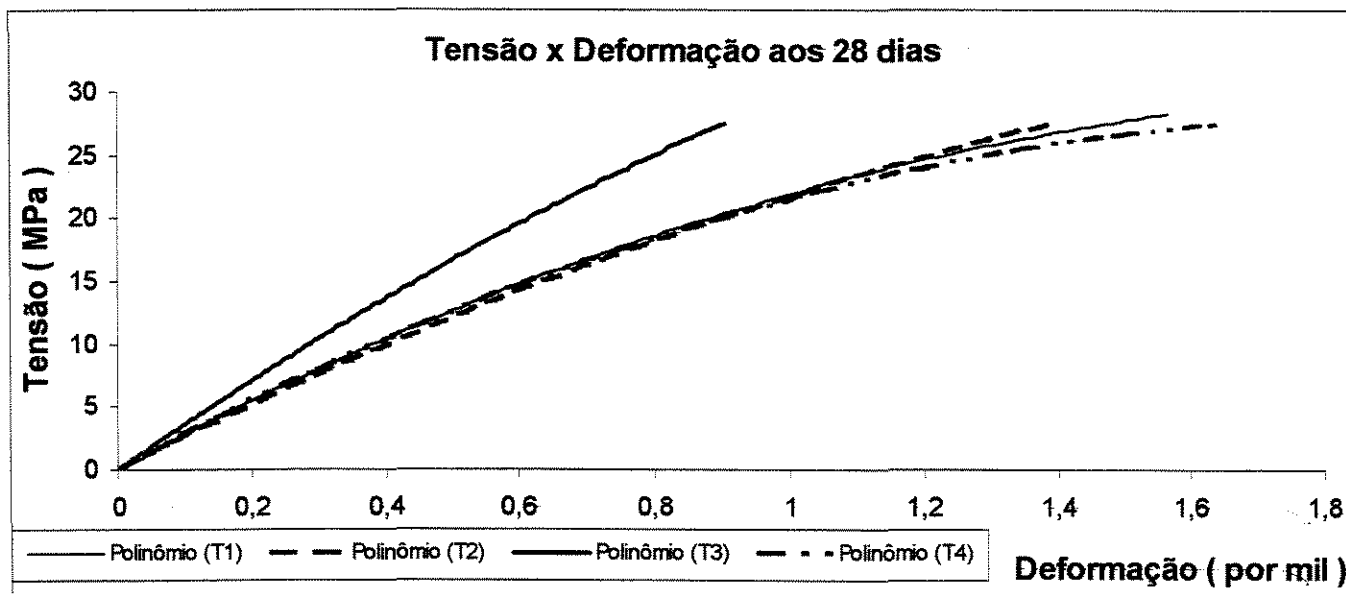


FIGURA 5.3 Módulo de Deformação NBR 8522/84, resultados obtidos aos 28 dias

Sendo: T₁ -traço com 5% de nanosílica

T₂ .traço com (5% de nanosílica e 7,5% de sílica ativa)

T₃ .traço com 7,5% de nanosílica

T₄ .traço de referência

Como já era esperado, a adição de sílica ativa proporcionou um incremento de rigidez ao concreto, devido à melhora considerável na microestrutura e resistência da zona de transição, com reflexos diretos na resistência à compressão, sendo este aumento cerca de 22,5%. O mesmo não ocorreu com as outras adições (nanosílica e mistura binária) que sofreram uma pequena variação em relação ao concreto de referência.

5.4 Permeabilidade

São apresentados, a seguir, a distribuição das penetrações para cada traço de concreto ao longo de uma das fases dos corpos de prova resultantes do ensaio de permeabilidade – determinação da penetração de água sob pressão, segundo a NBR 10787, aos 28 dias, em 03 corpos de prova prismáticos.

A Figura 5.4 apresenta a média dos valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 1 (5% de nanosílica).

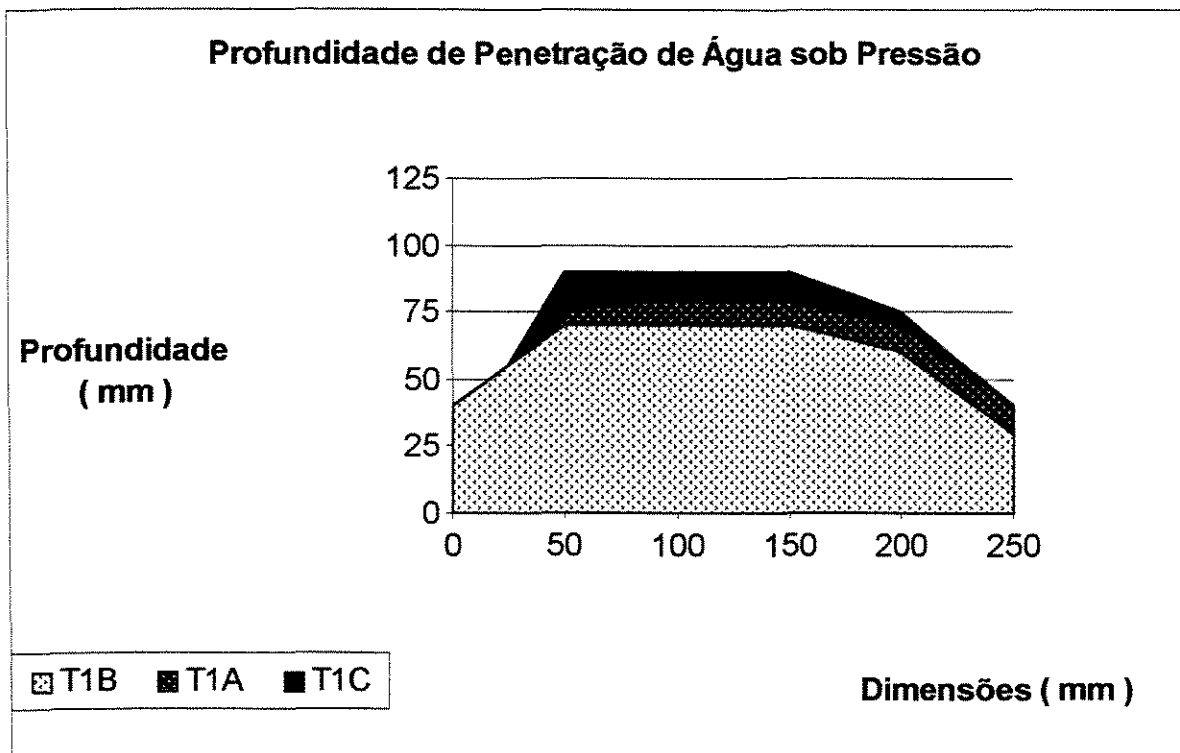


FIGURA 5.4- Valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 1

Tendo sido registrado o valor médio da altura de percolação de 71mm e o valor máximo de 80mm.

A Figura 5.5 apresenta a média dos valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 2 (5% de nanosilica e 7,5% de sílica ativa)

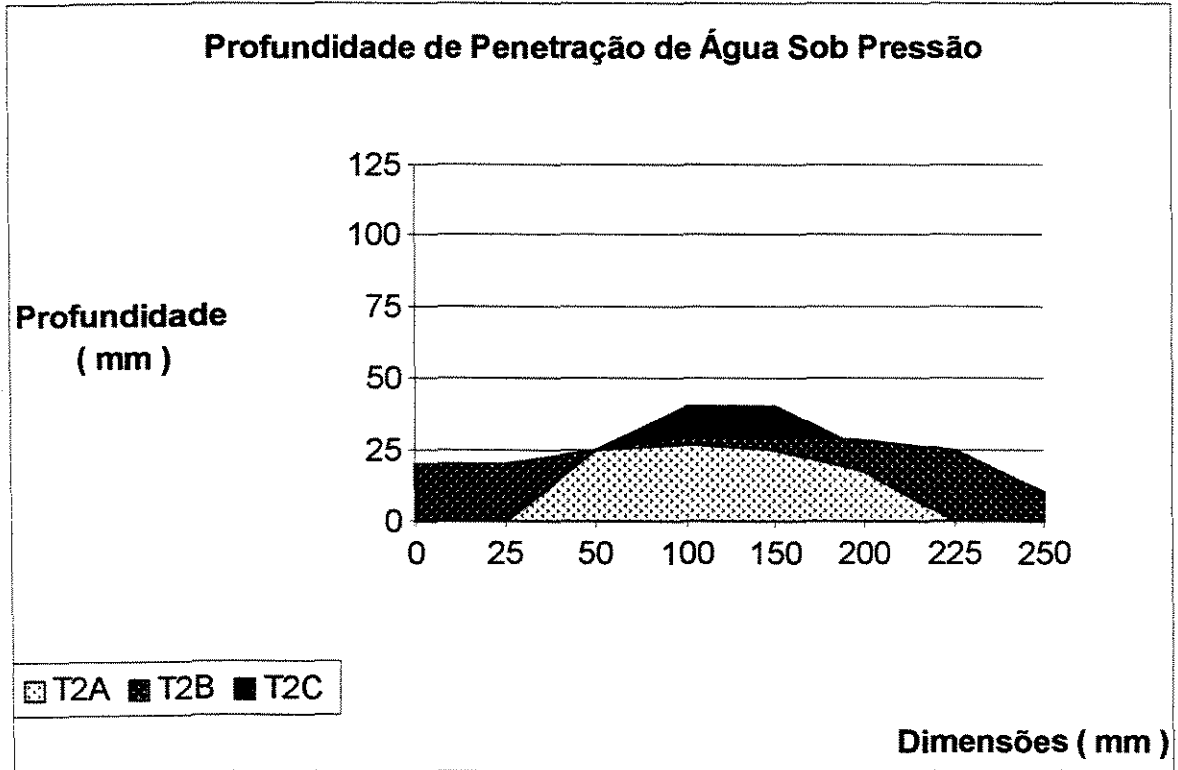


FIGURA 5.5- Valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 2

O valor médio da altura de percolação foi de 28mm e o valor máximo de 33mm.

A Figura 5.6 apresenta a média dos valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 3 (7,5% de sílica ativa).

Sendo o valor médio da altura de percolação de 33mm e o valor 38mm.

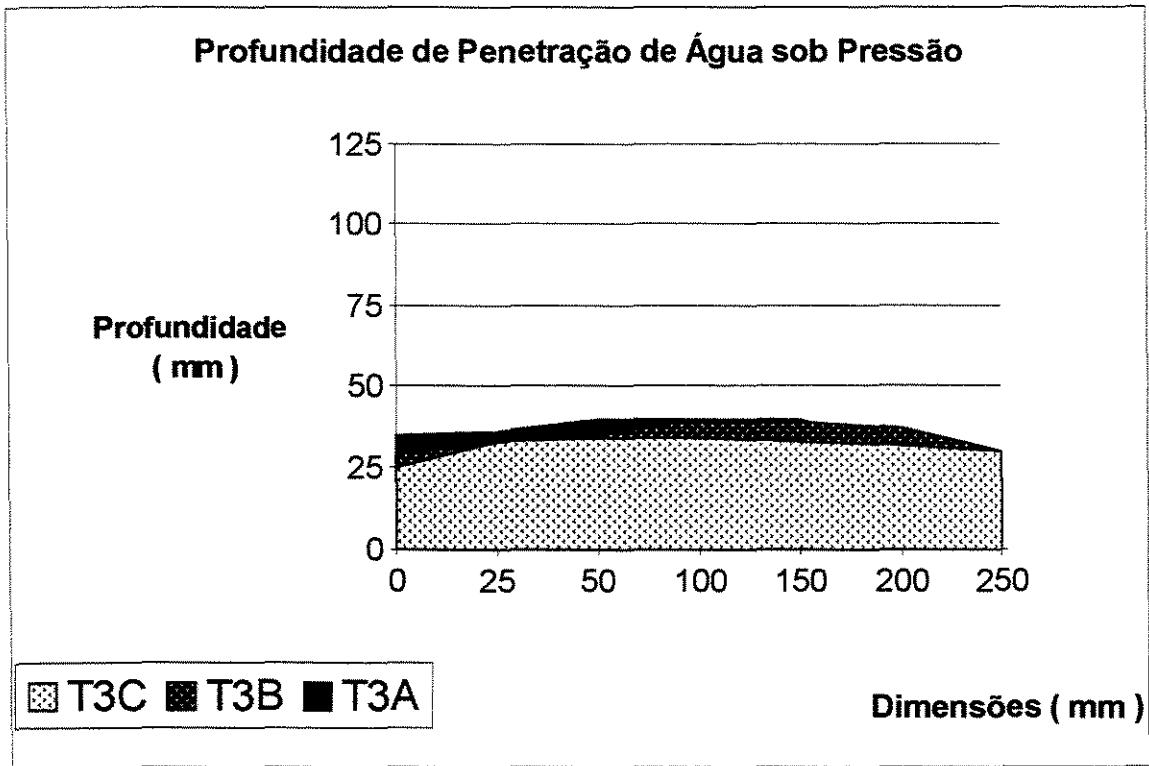


FIGURA 5.6- Valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 3

A Figura 5.7 apresenta a média dos valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 4 (referência).

Onde foi verificado o valor médio da altura de percolação de 53mm e o valor máximo de 62mm.

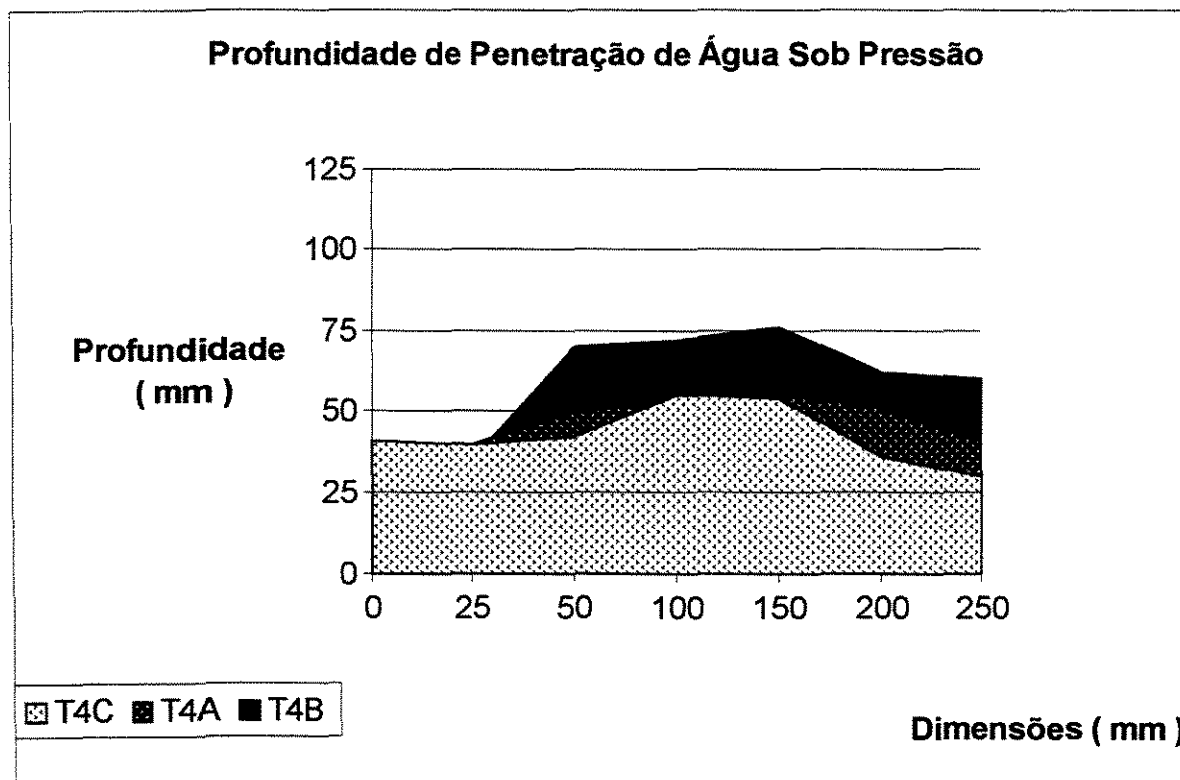


FIGURA 5.7- Valores de profundidade de penetração de água nos corpos de prova do traço 4

A análise dos resultados obtidos mostra que o traço 2, contendo a mistura binária, apresentou uma redução muito grande da permeabilidade, em torno de 86%, em relação ao concreto de referência, seguido do concreto com adição de sílica ativa, com cerca de 53%. Já para o traço 1, foi observada uma penetração maior que a obtida para o concreto de referência, cerca de 36%.

Sendo a altura do corpo de prova igual a 125 mm, é possível concluir que o desempenho dos concretos contendo as adições de sílica ativa T_3 e a mistura binária T_2 foram muito superiores quando comparados ao concreto de referência (T_4). Quanto ao concreto com adição de nanosílica, não podemos afirmar que seu desempenho não foi satisfatório, pois a norma não estabelece limites comparativos, apenas a experiência e o conhecimento técnico mostram que estes valores encontrados são satisfatórios para qualquer concreto. Este fato pode ter ocorrido

pois ao não se descontar a água do material, houve um pequeno aumento da relação a/c, a qual está associada ao aumento da rede capilar no concreto. Este fato vem a concordar com Leão em seu trabalho “ Permeabilidade do Concreto ao Ar pelo Método de Figg ” (LEÃO *et al.*, 1999), que afirma que variando-se a relação a/c e mantendo-se constante as demais características do concreto (materiais, tempo de cura, idade de hidratação), a permeabilidade do mesmo aumentará proporcionalmente com o aumento da relação a/c.

O resultado apresentado pelo concreto contendo a mistura binária (T₂) atendeu às expectativas, pois a adição dos dois materiais ao concreto deveria acarretar num maior tamponamento das propriedades do concreto levando a uma menor permeabilidade.

5.5 Durabilidade

São apresentados, a seguir, os resultados obtidos no ensaio de perda de resistência de corpos de prova submetidos a ataques químicos (mud acid e ácido acético), em que se empregou 04 corpos de prova, cilíndricos, para cada traço de concreto, aos 7 dias.

TABELA 5.4- Resultados obtidos aos 7 dias, no ensaio de compressão simples NBR 5739/80

| Traço | Resistência (MPa) | | |
|----------------|---------------------|----------|---------------|
| | Testemunho | Mud Acid | Acido acético |
| T ₁ | 29.87 | 22.41 | 25.52 |
| T ₂ | 35.48 | 25.07 | 28.21 |
| T ₃ | 34.30 | 27.70 | 29.10 |
| T ₄ | 29.20 | 23.10 | 23.90 |

Estes resultados foram obtidos a partir do ensaio de compressão simples NBR 5739/80 realizado através de comparação entre os corpos de prova que sofreram o ataque químico e os

testemunhos, mostrando, visivelmente, aqueles que foram submetidos à solução mud acid perderam, em termos gerais, mais resistência que aqueles submetidos à solução de ácido acético. Estes resultados são melhor apreciados na Figura 5.8

Os concretos contendo nanosilica não obtiveram um bom desempenho, apresentando, assim, os maiores valores de perda de resistência, possivelmente devido à incompatibilidade deste material com o ácido fluorídrico.

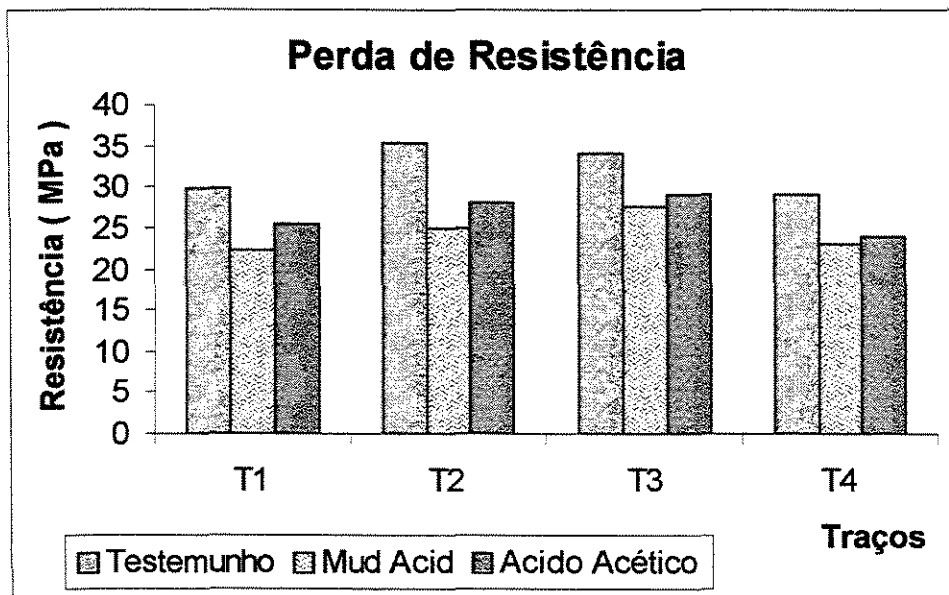


FIGURA 5.8 – Perda de Resistência verificada através do ensaio à Compressão Simples NBR5739/80

Foi analisada também a profundidade de infiltração dos ácidos, cujos resultados são apresentados a seguir.

TABELA 5.5- Resultados de profundidade de infiltração de ácido, obtidos em corpos de prova aos 7 dias.

| Traço | Profundidade de Infiltração (mm) | | |
|----------------|------------------------------------|----------|---------------|
| | Testemunho | Mud Acid | Ácido Acético |
| T ₁ | 0 | 5 | 4 |
| T ₂ | 0 | 2 | 2 |

| Traço | Profundidade de Infiltração (mm) | | |
|----------------|------------------------------------|----------|---------------|
| | Testemunho | Mud Acid | Ácido Acético |
| T ₃ | 0 | 4.25 | 2.25 |
| T ₄ | 0 | 2.8 | 2.9 |

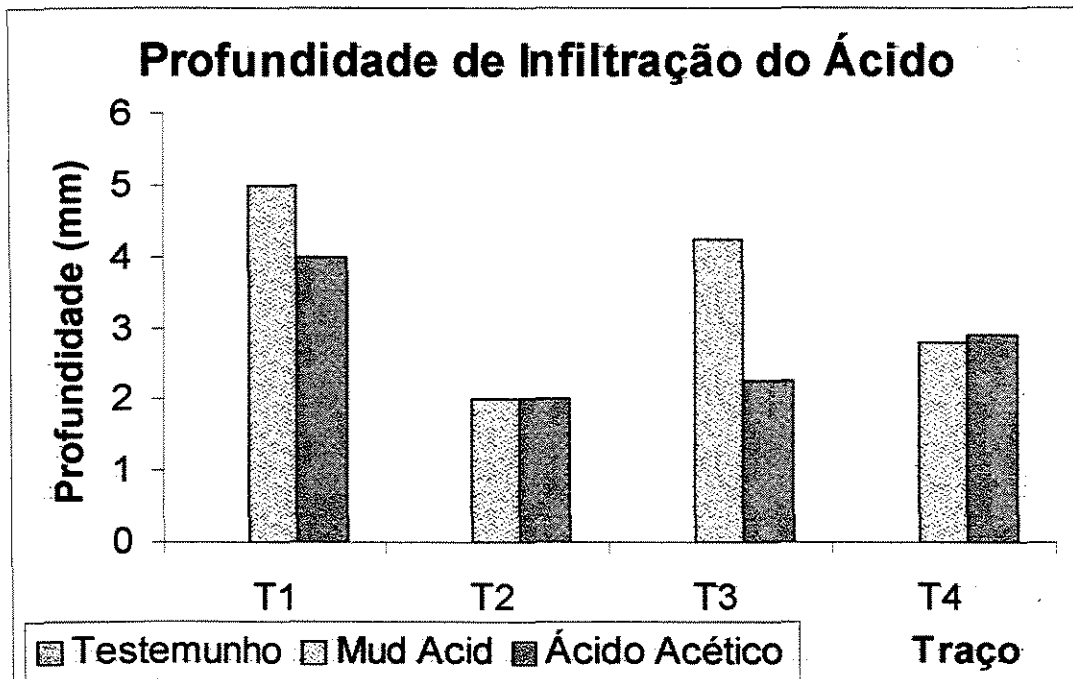


FIGURA 5.9 – Profundidade em mm de Infiltração do Ácido (Acético a 10% e Mud Acid (12 %HCl + 3% HF)

Estes resultados mostram que, como previsto, a profundidade de infiltração do ácido foi cerca de 40 % menor na mistura binária. Logo, podemos concluir que as sílicas reduziram a porosidade, não permitindo a entrada de agentes agressivos, porém, quando utilizados sozinhos estes materiais permitem uma maior profundidade de infiltração dos ácidos.

Foi verificado ainda que o ataque ocorreu apenas na superfície que entrou em contato com o ácido. Tal fato é justificado por MIRANDA (1996) , que afirma que os compostos formados na superfície do corpo de prova (produtos de reação entre o ácido e o cimento) impedem que a parte interna da amostra seja atacada.

5.6 Determinação da Atividade Pozolânica com Cimento Portland

Os resultados do índice de atividade pozolânica foram obtidos através do ensaio à compressão simples, sendo de 52,04% para a sílica ativa e 49,83% para a nanosílica.

Neste ensaio é possível verificar a quantidade de água necessária para obtenção de índices de consistência normal de (225 ± 5) mm para as argamassas, sendo maior para a sílica ativa com 138% do que para a nanosílica, a qual exigiu uma porcentagem de água de 96% (tendo sido neste caso, descontada a água). No que se refere à sílica ativa, mesmo tendo requerido uma quantidade de água maior, esta conseguiu superar os valores de resistência à compressão, quando comparada a nanosílica, que apesar de não ter atingido um valor mais alto, apresentou bom desempenho nos ensaios de pozolanicidade.

TABELA 5.6 - Valores médios das Resistências à Compressão e Atividade Pozolânica com Cimento

| | % água para consistência normal | Resistência à Compressão (MPa) | Índice de atividade com o cimento) |
|---------------------|--|---|--|
| Cimento | 100 | 25,42 | 100 |
| Sílica Ativa | 138 | 18,09 | 52,02 |
| Nanosílica | 96 | 17,32 | 49,83 |

6 CONCLUSÕES

A análise dos dados revelaram a ocorrência de modificações nas propriedades mecânicas do concreto endurecido. Contudo, o resultado obtido com a adição de sílicas, no caso da mistura binária, não foi tão satisfatório, pois esperava-se um incremento maior, já que a combinação destes dois materiais causa um refinamento dos poros, tornando a zona de transição muito mais coesa e compacta. Quanto aos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, estes mostram que a adição de sílica ativa alcançou um desempenho 33% maior que o concreto de referência, já que o traço contendo a mistura binária elevou a resistência em 18% e 45% no caso do concreto que continha apenas a adição de nanosílica. Em relação ao ensaio da resistência à tração foi justamente o concreto que continha a mistura binária que alcançou o melhor desempenho, ficando 5% superior ao concreto de referência. Finalmente, para o módulo de deformação, apenas o concreto contendo sílica ativa causou um aumento no mesmo, sendo de 22.5%, fato esperado pois os resultados da sílica ativa são amplamente estudados.

No que se refere ao ensaio de permeabilidade, foi verificado o efeito benéfico da adição de sílicas, principalmente no caso da mistura binária que apresentou uma redução em torno dos 86% em relação ao concreto de referência, tendo sido comprovado o efeito de filler dos dois materiais, essencialmente o da nanosílica cujo efeito foi apenas o de preenchimento dos poros.

Através do ensaio de durabilidade foi possível concluir que a nanosílica não apresenta um bom desempenho, constituindo os maiores valores de perda de resistência e profundidade de

infiltração do ácido, devido, provavelmente, à incompatibilidade deste material com o ácido fluorídrico.

Mesmo não se alcançando resultados relativamente bons, foram verificados efeitos pozolânicos das sílicas com o cimento Portland, tendo sido caracterizada a sílica ativa como uma adição melhor que a nanosílica.

Através de todos os ensaios, foi possível concluir que houve efetivamente melhoras nas propriedades do concreto, principalmente com adições de sílica ativa, cujos efeitos são conhecidos. Já para o caso da nanosílica, quando sozinha, concluiu-se que sua adição torna-se antieconômica, com a utilização do teor escolhido, pois, serve apenas para o fechamento dos vazios, permanecendo inerte. A sua maior contribuição ocorre quando esta encontra-se aliada à mistura binária, graças à adição de sílica ativa

Este fato pode ser decorrente de não ter sido descontada a água da nanosílica, o que não aumenta em muito a relação a/c, mas pode ser o suficiente para aumentar os poros capilares do concreto permitindo, com isso, o transporte de líquidos, no caso água e ácidos, tornando o concreto mais permeável, menos resistente ao ataque de agentes agressivos e, portanto, menos durável. Neste sentido, esta pesquisa aponta para a necessidade de em estudos futuros, aprofundar ainda mais as pesquisas em busca de um teor ótimo de adição destes materiais, a fim de melhorar o desempenho do concreto.

7 SUGESTÕES

São deixadas aqui, algumas sugestões para pesquisas futuras pois, durante a realização deste trabalho foram enfrentadas algumas dificuldades, principalmente no que diz respeito aos ensaios. Em alguns momentos, pela falta de trabalhos que pudessem ser estabelecidos como parâmetros comparativos; em outros casos, pela falta de normas.

São muitos os trabalhos encontrados na literatura no que diz respeito à durabilidade frente ao ataque ácido, porém, cada pesquisador submete os materiais ensaiados a tipos e concentrações diferentes, como não há critérios de limites aceitáveis fixados, crescendo muito a margem de interpretações.

Quanto à falta total de estudos ainda publicados, surge a necessidade de estudar a microestrutura para verificação da zona de transição no caso da adição de nanosílica e da mistura binária, o que poderia explicar melhor o porquê de um material que teve efeito pozolânico não ter tido um desempenho melhor.

Outro estudo importante seria o de fluência dos concretos com as adições aqui mencionadas.



8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. V. Durabilidade das Estruturas: novas pesquisas superam preconceitos. In: REIBRAC, 36, 1994, São Paulo. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Set. 1994. p.1085-1095.

ABREU, A.G., DOTTO, J.M.R., DAL MOLIN, D.C.C. Avaliação da propriedade pozolânica da cinza de casca de arroz proveniente de pelotas – RS. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS, 4, 1997, Porto Alegre. 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1997. v. 1.

AITCIN, P.C. The use of superplasticizers in high performance concrete. In: MALIER, YVES. **High performance concrete.** Cambridge, 1994. p. 14-33.

AKASAKI, J.L., BARBOSA, M.P., ALCÂNTARA, M.A. Estudo experimental das propriedades mecânicas do concreto ordinário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

ALVES, J.D. Evolução e contribuição dos aditivos na durabilidade das estruturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

ANDRADE, W. P., **Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades.** São Paulo: Pini, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 5739:**
Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1980
3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 7222:**
Argamassas e concretos – determinação da resistência à tração por compressão
Diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1983. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 8522:**
Concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama – tensão-
deformação . Rio de Janeiro, 1984. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 10787:**
Concreto endurecido – determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro,
1994. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 5752:**
Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica com cimento portland – índice
de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992. 3 p.

BACCIN, A.G.C.; PINHEIRO, L. M. propriedades mecánicas do concreto de alto desempenho
para aplicação em edifícios. In: REIBRAC, 39, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo :
IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1997. v. 2 , p. 687- 700.

BARONIO DISET, G.,MANTEGAZZA, G., CARMINATI, G. Mechanical properties and
durability of superplasticized silica fume mortars. In: PROCEEDINGS OF THE
INTERNATIONAL SYMPOSIUM HELD BY RILEM , 1990, Barcelona. **Proceedings...**
Barcelona: The International Union of Testing and Research Laboratories for materials and
Structures, 1990. p. 241- 250.

- BAUER, E.; HELENE P. R. L. Avaliação comparativa da durabilidade de cimentos adicionados com escória de alto forno frente à corrosão das armaduras por cloretos. In: REIBRAC, 36, 1994, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1994. v. 1 , p. 39-52.
- BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. Critérios de projeto para garantia de durabilidade das estruturas e concreto armado. In: REIBRAC, 39, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1997. v. 1 , p. 29-44.
- BRETANHA, AA., DAL MOLIN, D. Concreto com cinza de casca de arroz frente ao ataque por sulfatos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.
- CAMARINI, G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.
- CASSA, J.C. et al, Avaliação da compatibilidade físico-química entre cimento e aditivo superplastificante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.
- CASTRO, C.H., ARMELIN, J.L., TRABOULSI, M.A., BITTENCOURT, R.M. Determinação de módulo de elasticidade em um concreto de alto desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.
- CEUKELAIRE, L. de. The effects of hydrochloric acid on mortar. **Cement and Concrete Research**, USA, v.22, n.5, p.903-914, 1992.

COLLEPARDI, M. A durabilidade em questão. **téchné Revista de Tecnologia da Construção**, São Paulo, n° 38, p. 52-57, Jan/Fev 99. 1999.

DAL MOLIN, D. C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições da microssílica**. São Paulo: Escola Politécnica, USP, 1995 Tese (Doutorado).

DAL MOLIN, D.C.C., MONTEIRO, P.J.M. Estudo do módulo de deformação de concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa. In: REIBRAC, 39, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, 1996., p. 213-224.

DUREKOVIC, A., POPOVIC, K. Superplasticizer and air-entraining agent demand in OPC mortars containing silica fume. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM HELD BY RILEM, 1990, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: The International Union of Testing and Research Laboratories for materials and Structures, 1990.. 1-9.

EQUIPE DE FURNAS, LABORATÓRIO DE CONCRETO. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**. São Paulo: Pini, 1997. Cap. 6: Módulo de elasticidade e coeficiente de poisson. 63 p.

FERNÁNDEZ, C. M. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988. Cap.3: Patologia do concreto armado. p. 47-74.

FERRARI, A. A.; FLOR, J. M.; CALIXTO, J. M. Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho fabricado com diversos materiais. **Proceedings of the International Congress of High-Performance Concrete**, 1996, Florianópolis, v. 1, p.15-26, Jun. 1996.

GÁLLIGO, E. J. M, RODRÍGUEZ, G.F. Estudio comparativo sobre las limitaciones de permeabilidad del hormigón en las normativas española y europea. **Hormigón y Acero**, Madrid, n.195, p.37-47, 1995.

GAMBHIR, M. L. **Concrete technology**. Delhi: Tata McGraw-hill Publishing Company Limited, 1992. 318p.

GASTALDINI, A. L. G. Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4, São Paulo. **Anais...** ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland, Nov. 1996. v. 1, p. 119-136.

GASTALDINI, A.A.L.G., ISAIA, G.C., ZANELLA, R. Composição da solução aquosa de pastas com adições minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

GEYER, R.T., PAULA, R.R., RODRIGUES, S.S., VIANNA, W.D. Avaliação da durabilidade do concreto com adição de escória de aciaria através do estudo de vigas de concreto armado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

GRACIA, A. R.; DIEZ-CASCÓN, S. J.; POLANCO, M. J. A. A. Determinación de la porosidad y la permeabilidad del hormigón endurecido. **Hormigón y Acero**, Madrid, n.193, p.105-116, 1994.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: Pini, 1994. p. 46

IRAVANI SAID. Mechanical properties of high-performance concrete. **American Concrete Institute Material Journal**, v. 93 . n. 5. p. 416-426, Sep. 1996.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e terciárias de pozolanas em concretos de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão das armaduras**. São Paulo: POLI: USP, 1995. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C. Carbonatação de concreto de elevado desempenho com cinza volante, cinza de casca de arroz e microssilica. In: Congresso Iberoamericano de patologia das construções ,4, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1997. v. 1 , p. 209-216.

ISAIA, G.C. a durabilidade do concreto de alto desempenho e o meio ambiente: um estudo sócio-econômico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

KAKUTA, S., KOJIMA, T. Dynamic rheological properties of fresh concrete with chemical admixtures. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM HELD BY RILEM , 1990, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: The International Union of Testing and Research Laboratories for materials and Structures, 1990. p. 20-33.

KEDDELOURI, V.; DIMOPOULOS, G.; PARISSAKIS, G. effect of acetic and tartaric acid upon the thermal decomposition of CaCO_3 . **Cement and Concrete Research**, USA, v.25, n.3, p. 447- 484, Abr, 1995.

KREMPEL, A. F.; CREVILARO, C. C. Adição de pó ao concreto como fator econômico e de durabilidade. In: Reunião do Ibracon, 34, 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Jun. 1992. v. 1 , p. 193-206.

KHATRI, R.P. , SIRIVIVATNANON, V.. Effect of different supplementery cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, USA, v.25, n.1, p. 209-220, 1995.

KHAYAT, K. H., VACHON, M., LANCTÔT, M. C. Use of blended silica fume cement in commercial concrete mixtures. **American Concrete Institute Material Journal**, v. 94 . n. 3. p. 183-192, Jun. 1997.

KIKUKAWA, H. Rheological studies on fresh concrete using admixtures. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM HELD BY RILEM , 1990, Barcelona.

Proceedings... Barcelona: The International Union of Testing and Research Laboratories for materials and Structures, 1990. p. 34-51.

KULAKOWSKI, M. P.; VIERA, F. P.; DAL MOLIN, D. estudo da ação do ácido fórmico em concretos com a dição de sílica ativa com vistas ao emprego em ambiente industrial. In: REIBRAC, 39, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, 1996., p. 455-468.

LARRAND, F. Ultrafine particles for making very high performance concrete. In: MALIER, YVES. **High performance concrete**. Cambridge, 1994. p. 34- 47.

LEÃO, S., GONÇALVES, H.S., FERREIRA, R.C., FIGUEIREDO, E.P. permeabilidade do concreto ao ar pelo método de figg. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

LEGRAND, C. Workability and rheology. In: BARTOS, P. J. M. **Special Concretes , workability and mixing , Proceedings of the international Rilem workshop**. Paisley: Scotland, 1993. P. 51-54.

LILKOS, V. , STOITCHKOV, V.. Effect of the "Pozzolit" active mineral admixture on the properties of cement mortars and concretes part 2: Pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**, USA, v.26, n.7, p. 1073-1081, 1996.

LIMA, F.B., ACIOLI, L.A., SILVA, F.H.B. influência do agregado miúdo na obtenção e características do concreto de alto desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

LOPES, A.N.M., SILVA, E.F., NEPOMUCENO, A.A., Avaliação da durabilidade de concretos com e sem adição de sílica ativa para resistências entre 50 e 60 MPa. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

MALHOTRA, V.M. , HEMMINGS, R.T. Blended cements in North America – a review. **Cement & concrete composites**, Great Britain, v.17, p. 23-25, 1995.

MALHOTRA, V.M. (Ed.) Int. Conf. on the use of fly ash, sílica fume, slag and other mineral by Products, ASC-SP/91, Detroit, 2 v.

MALHOTRA, V.M. (Ed.), 3rd. Int. Conf. on fly ash, sílica fume, slag and natural pozzolans in concrete, SCI- SP/114, Detroit, 2 v.

MALHOTRA, V. M. Aplicações inovadoras de superplastificantes para produção de concreto de alto desempenho. **téchne Revista de tecnologia da Construção**, São Paulo, n.36, p. 36-43, Set/Out. 1998.

MARELLI, L.M., LIBÓRIO, J.B.L., MELO, A.B. A tecnologia dos concretos de alto desempenho aplicada na execução de reatores anaeróbios (UASB) utilizados para tratamento de esgoto doméstico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo Editora Pini, São Paulo, 1994, 573p.

MENEGHETTI, L.C., PADARATZ, I.J., PRUDÊNCIO, JR.L.R. evolução da resistência à compressão de concretos convencional e de alta resistência – efeito da presença de superplastificantes e sílica ativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 671p.

(a) MIRANDA, C. R. Método de laboratório para quantificação de ataque ácido ao cimento. In: REIBRAC, 39, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, 1996. v. A, p. 133-148.

(b) MIRANDA, C. R. estudo do ataque de soluções ácidas ao cimento. In: REIBRAC, 39, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, 1996., p.697-714.

MONTEIRO, E.C.B, NEPOMUCENO, A.A. estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais em relação à corrosão de armaduras, sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloreto : cloreto-carbonatação. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS, 4, 1997, Porto Alegre. 1997, **Anais...** Porto Alegre, 1997. v. 1.

MORANVILLE-REGOURD, M. Microstructure of high performance concrete. In: MALIER, YVES. **High performance concrete**. Cambridge, 1994. p.3-13.

NAPOMUCENO, A.A., MELO, G. S.S.A. MALDONADO, T.C., OLIVEIRA, F.F.P. Módulo de deformação de concretos com ou sem microssilica, utilizando materiais do distrito federal. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, 1995, Goiânia. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1995.v. 2, p. 677-688.

NEVILLE, ADAM MATHEW. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982.

OLIVEIRA, M.O.F., BRASILIANO, A.E., CEA de, A.G. Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho – influências do tipo de corpos de prova. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, 1995, Goiânia. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1995.v. 2, p. 373-386.

PAILLERE, A. M., SERRANO, J. J., GRIMALDI, M. Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimum des bétons à hautes performance avec et sans fumées de silice. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM HELD BY RILEM , 1990, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: The International Union of Testing and Research Laboratories for materials and Structures, 1990. p. 63- 79.

PAVLIK, V. Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids, part I: calculation of corrosion depth. **Cement and Concrete Research**, USA, v.24, n.3, p. 551-562, Jan. 1994.

PAULON, V. A. interface entre pasta de cimento e agregado : a influência na durabilidade dos concretos. **técne Revista de Tecnologia da Construção**, São Paulo, n.25, p. 29-31, Nov/Dez.1996.

PEÑALOZA, F. G. S.; SILVA, M. R. Concreto com adições: uma proposta para o estudo da reação pozolânica da microssilica. In: REIBRAC, 40, 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1998. CD-ROM.

PEREIRA, P.M., DJANIKIAN, J.G. Algumas características de módulo de elasticidade de concretos de alta resistência. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, 1995, Goiânia. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1995.v. 2, p. 387- 400.

QUEBAUD et al. Influência do teor em agregados provenientes da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.

RHODIA - Material cedido em forma de apostila.Nov/97

- RODOLPHO, P.M., ISA, M.M. Durabilidade das construções de argamassa armada: influência da sílica ativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.
- RODRIGUES, J. C. Como proteger o concreto de ataque químico. **Recuperar**, São Paulo, v.2, p. 23-26, Nov. 1994.
- SANTOS, S.; PRUDÊNCIO JR. L. R. Estudo comparativo do desempenho da sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz residual em concreto de cimento portland. . In: REIBRAC, 40, 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1998. CD-ROM.
- SARDINHA, V.L.A., PAULON, V.A., TUNG, W.S. Rompimento em adutoras de concreto: causas e conseqüências. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.
- SIERRA, A.; SOUZA, V.C.M. Um estudo sobre a carbonatação do concreto utilizado cimentos brasileiros com adições. In: Reibrac, 40, 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1998.
- SILVA, C.A.R., LEMOS, F.L., VASCONCELOS, W.L., LAMEIRAS, F.S. Uma contribuição ao desenvolvimento de concretos de longa durabilidade para repositórios de rejeitos sólidos perigosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** São Paulo : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, Ago. 1999. CD-ROM.
- SILVA, M. G.; HELENE, P. R. L. Concreto projetado com adição de microssílica. In: Reibrac, 36, 1994, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre : IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto, v.2, p. 539-552, 1998.

SILVA, P. F. Permeabilidade do concreto: uma medida de durabilidade. **Revista IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto)**, São Paulo, v.3, n.8, p. 18-21, Abr/Mai/Jun/1993.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia , recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255p.

SVENKERUD, P. J., FIDJESTOL, P.J ARTIGUES TEXSA, J. C. Microsilica based admixtures for concrete. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM HELD BY RILEM , 1990, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: The International Union of Testing and Research Laboratories for materials and Structures, 1990. p. 346- 359.

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE: Effet de la cure sur la durabilite des bhp. Simpósio sobre durabilidade do concreto, IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, Jan. 1998. p. 1-46.

TANESI, J. **Controle da fissuração por retração dos concretos reforçados com fibras de polipropileno**. São Paulo: POLI: USP, 1998. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo , 1998. p. 132.

TOUTANJI, H. A. The influence of air entrainment on the properties if silica fume concrete. **Advances in Cement Research**, Londres, v. 10, n.3, p. 135-139, Jul. 1998.

VEIGA, F.N., BITTENCOURT.R.M., PACELLI, W. Influência da adição de filler calcário na carbonatação do concreto. In: REIBRAC, 40, 1998, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON), 1998.

WESCHE, K. **Fly ash in concrete. Properties and performance**. London: Chapman Hall, 1991. 256p.

XIE, J., ELWI, A. E., MACGREGOR, J. G. Mechanical properties of three high strength concretes containing silica fume. **American Concrete Institute Material Journal**, v. 92 . n. 2. p. 135-146, Apr. 1995.

ABSTRACT

There still are people who believe that concrete is an everlasting structural element, but time has shown that its physical and chemical properties are altered due to the characteristics of the materials which it is made of and their response to the environment. The relation established between the quality of the concrete and mechanical strength leaves aside one of the most important aspects, which is durability. The present work analyses the contribution of the silica mineral admixture effect to the properties of hardened concrete such as: mechanical strength, modulus of elasticity, permeability and durability, whose usage comprises economical aspects when reducing energy consumption in order to produce cementitious as well as ecological materials, with the industrial by-product utilization. Conventional Concrete has been used, aiming at making it more durable, since the mineral admixtures cause pore refinement, leading to low permeability and, consequently, greater durability. Four mixes at the age of 3, 7 e 28 days have been studied, one of reference, one with the silica fume admixture of 7,5 %, another with 5% of nanometric silica slurry and a binary mixture, making use of both at the same percentage, the water/cement ratio was kept at 0.55, in order to make verifying a change in workability viable. The results for these admixture percentages have proved the beneficial effects of the silica fume, but weren't satisfactory as for the admixture of nanometric silica slurry, which has been characterized just as filler, though its pozzolanic activity has already been proved. Therefore, an optimal content of admixture still must be found, which, combined to the properties of these materials, improves the performance of concrete economically speaking, as well as its short and long term durability.