



Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DA PERMEABILIDADE À ÁGUA NA
CAMADA DE COBRIMENTO DE PROTÓTIPOS DE
CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE CINZA
VOLANTE**

Simone Bassan Petry

PPGEC

Santa Maria, RS, Brasil

2004

**ESTUDO DA PERMEABILIDADE À ÁGUA NA
CAMADA DE COBRIMENTO DE PROTÓTIPOS DE
CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE CINZA
VOLANTE**

por
Simone Bassan Petry

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

PPGEC

Santa Maria, RS, Brasil

2004

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Curso de Pós-Graduação – Mestrado em Engenharia Civil

A comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DA PERMEABILIDADE À ÁGUA NA
CAMADA DE COBRIMENTO DE PROTÓTIPOS
CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE CINZA
VOLANTE**

elaborada por

Simone Bassan Petry

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eng. Geraldo Cechella Isaia - UFSM
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Arq. Antônio Luiz Guerra Gastaldini - UFSM

Prof. Dr. Eng. Claudio de Souza Kazmierczak - UNISINOS

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004

*Aos que acreditam em seus sonhos e
na própria responsabilidade na
busca por um mundo mais solidário.*

“O que escrevo nasce de meu próprio amadurecimento, um trajeto de altos e baixos, pontos luminosos e zona de sombra. Nesse curso entendi que a vida não tece apenas uma teia de perdas mas nos proporciona um sucessão de ganhos. O equilíbrio da balança depende muito do que soubermos e quisermos enxergar.”

(Lya Luft)

AGRADECIMENTOS

Ninguém caminha sozinho, ao realizar este sonho, muito mais que a obrigação, tenho prazer em agradecer a quem esteve ao meu lado.

Ao Prof. Geraldo, não só pela orientação e questionamentos, mas pela disponibilidade ímpar e visão diferenciada da pesquisa científica;

Ao Prof. Gastaldini, além da segurança propiciada através de suas sugestões e apoio, pelo exemplo de competência na docência;

Aos colegas nesta empreitada: Bianca, Elinor, Fabiano e Júlio, pela presença, conhecimento, incertezas e alegrias compartilhadas;

Aos funcionários do LMCC pelo seu trabalho e apoio técnico, em especial ao Émerson e ao Eng. Régis Moraes que em diversos momentos de angústia estiveram presentes;

Aos alunos de graduação, pela parceria na realização da parte laboratorial e detalhamento gráfico desta dissertação, em especial ao Rodrigo Brizola: que tua dedicação e empenho enquanto aluno e bolsista sejam as bases para tua excelência pessoal e profissional;

Aos órgãos financiadores deste projeto de pesquisa pelos recursos concedidos;

À Universidade Federal de Santa Maria, instituição muito importante em minha trajetória profissional, pelo acolhimento e incentivo a mim conferidos através de seu excelente e diferenciado material humano;

Ao Rodrigo, meu grande amor, colega e companheiro desde a graduação, pela presença constante e paciência nunca antes encontradas e pela parceria profissional, tuas dicas e questionamentos são preciosos. *“E no meio de tanta gente eu encontrei você...”* (Marisa Monte & Arnaldo Antunes);

À minha família: *“Essa família é muito unida, e também muito ouriçada, brigam por qualquer razão, mas acabam sempre pedindo perdão.”* (Dudu Nobre).

Ao José Guilherme, meu sobrinho, pela beleza de teu sorriso. Aos meus irmãos, Viviane, Aline e Daniel, pelos bons momentos e pelo apoio nos momentos mais difíceis. À minha mãe, Luiza, pelo exemplo de fé e por despertar em mim o amor pela docência, que me trouxe até aqui. Ao meu pai, *in memoriam*, tua saudade é amenizada porque sinto que continuas a me acompanhar como fazias ao ter tempo de comemorar cada vitória...

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE ANEXOS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. O CONCRETO E AS ADIÇÕES MINERAIS: SUSTENTABILIDADE E DURABILIDADE	5
3. DURABILIDADE E PERMEABILIDADE À ÁGUA NO CONCRETO	20
3.1. Durabilidade e porosidade	21
3.2. Corrosão do aço	26
3.3. Mecanismos de transporte	30
3.3.1. Absorção Capilar	32
3.3.2. Difusividade da água	35
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
4.1. Objetivos	38
4.2. Variáveis envolvidas	39
4.3. Procedimentos e técnicas utilizados	40
4.4. Caracterização dos materiais	49

4.4.1. Aglomerantes.....	49
4.4.2. Cal Hidratada.....	51
4.4.3. Agregados	52
4.4.4. Aditivo superplastificante	53
4.4.5. Pré-condicionamento dos corpos de prova.....	55
4.4.6. Ensaio de absorção capilar de água	57
4.4.7. Ensaio de difusão de água	58
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
5.1. Resistência à compressão	62
5.2. Estrutura dos poros da camada de revestimento	64
5.3. Absorção Capilar de água.....	65
5.3.1 Absorção Capilar X Dimensão dos poros.....	70
5.3.2 Comparação dos resultados com trabalhos semelhantes	73
5.4. Difusividade da Água	74
5.4.1 Coeficiente de Difusividade X Dimensão dos poros.....	79
5.4.2 Comparação dos resultados com trabalhos semelhantes	81
5.5. Correlações entre absorção e difusividade	82
6. CONCLUSÕES.....	84
6.1. Considerações sobre a absorção capilar	84
6.2. Considerações sobre a difusividade de água	86
6.3. Considerações sobre as correlações entre os ensaios.....	87
6.4. Considerações Finais	87
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	Resistência à compressão aos 91 dias.....	62
TABELA 2 –	Distribuição das dimensões dos poros por intrusão de mercúrio aos 91 dias.....	64
TABELA 3 –	Absorção capilar de água Q (24h) aos 91 dias e variação com a profundidade.....	66
TABELA 4 –	Influência da adição de cinza volante e cal hidratada.....	69
TABELA 5 –	Coefficiente de difusividade da água D aos 91 dias (96h).....	75

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 –	Porosidade segundo Mindess & Young, 1981.	23
QUADRO 2 –	Detalhamento das misturas aglomerantes investigadas.....	42
QUADRO 3 –	Quantidade de materiais por m ³ de concreto.....	44
QUADRO 4 –	Caracterização física e mecânica do cimento.....	50
QUADRO 5 –	Caracterização física e mecânica da cinza volante.....	51
QUADRO 6 –	Caracterização física e mecânica da cal hidratada.....	52
QUADRO 7 –	Composição química dos aglomerantes e da cal hidratada....	52
QUADRO 8 –	Características físicas dos agregados.....	54

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Ciclo dos Materiais (Sommerville, 1999).....	6
FIGURA 2 – Qualidade da camada de cobertura (Torrent <i>apud</i> Feitosa, 2000).....	16
FIGURA 3 – Rede de poros da pasta de cimento (Mopt <i>apud</i> Figueiredo, 1994).....	24
FIGURA 4 – Fenômenos de transporte de massa no concreto (Isaia, 1995).	31
FIGURA 5 – Coeficiente de absorção capilar aos 91 dias – Cinza Volante (50%) com e sem adição de cal (Hoppe, 2002).....	34
FIGURA 6 – Formas utilizadas.....	43
FIGURA 7 – Cura úmida (7 dias) dos protótipos em laboratório.....	45
FIGURA 8 – Dimensões e furos dos protótipos.....	47
FIGURA 9 – Extração dos testemunhos.....	48
FIGURA 10 – Marcação para o corte dos testemunhos.....	48
FIGURA 11 – Corte dos testemunhos.....	49
FIGURA 12 – Esquema do ensaio de absorção capilar de água.....	57
FIGURA 13 – Esquema do ensaio de difusividade de água.....	59
FIGURA 14 – Mistura CV75 – camada 2. Gráfico e equação do ensaio de difusividade.....	60
FIGURA 15 – Quantidade de água absorvida Q (g/m^2) nas camadas do cobertura.....	67
FIGURA 16 – Absorção capilar nas camadas 1 (a); 2 (b) e 3 (c).....	68
FIGURA 17 – Diâmetro Crítico x Absorção Capilar aos 91 dias.....	71
FIGURA 18 – Meso+macroporos x Absorção Capilar aos 91 dias.....	72
FIGURA 19 – Poros do gel x Absorção Capilar aos 91 dias.....	72

FIGURA 20 – Coeficiente de difusividade da água D ($\times 10^{-9} \text{ m/s}^2$) nas camadas do cobrimento aos 91 dias (96h).....	76
FIGURA 21 – Absorção capilar nas camadas 1 (a); 2 (b) e 3 (c) aos 91 dias..	78
FIGURA 22 – Diâmetro Crítico x Coeficiente de Difusividade aos 91 dias...	80
FIGURA 23 – Meso+macroporos x Coeficiente de Difusividade aos 91 dias	80
FIGURA 24 – Poros do gel x Coeficiente de Difusividade aos 91 dias.....	81
FIGURA 25 – Absorção capilar x Difusividade para cada mistura aos 91 dias.....	83

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Planilha de Difusibilidade à água (modelo).....	95
---	----

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ESTUDO DA PERMEABILIDADE À ÁGUA NA CAMADA DE COBRIMENTO DE PROTÓTIPOS DE CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE

Autora: Simone Bassan Petry
Orientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia
Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004.

A indústria da construção civil cada vez mais se insere em um contexto de eficiência eco-social e o concreto, principal material construtivo, tem seu uso associado a preocupações sobre a durabilidade e o desempenho das construções, buscando a otimização dos recursos naturais empregados.

A durabilidade estimada para um concreto é função da impermeabilidade do mesmo, uma vez que com a entrada de água e agentes deletérios iniciam-se os mecanismos de deterioração da estrutura, entre eles a corrosão da armadura. Neste contexto a camada de cobrimento desempenha importante papel de proteção ao aço, atuando como uma primeira barreira à entrada destes agentes e, portanto, a qualidade do concreto como um todo estará relacionada a impermeabilidade do constituinte desta camada. A fim de promover a observação da capacidade de transportar fluidos para o interior de peça (em direção da armadura) pelos poros superficiais foram realizados os ensaios de absorção capilar e difusividade de água no concreto; analisando-se as diferenças relativas à absorção de água no concreto da camada de cobrimento, da superfície em direção à armadura, através do uso de peças protótipos.

Esta metodologia objetiva aproximar o ensaio de laboratório das estruturas de concreto *in situ*, e para isto os ensaios são realizados em testemunhos extraídos dos protótipos curados em condições ambientais que simulam as condições reais da obra. Utilizou-se altos teores de cinza volante (50%), em substituição à massa de cimento, com e sem adição de cal hidratada no concreto objetivando-se um melhor desempenho em relação a carbonatação e outras variáveis. Foram ensaiados testemunhos extraídos dos protótipos a 0, 2,5 e 5,0 cm de profundidade com o intuito de traçar o perfil das propriedades estudadas ao longo da camada de cobrimento.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ESTUDO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NA CAMADA DE COBRIMENTO DE CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE

Author: Simone Bassan Petry
Coordinator: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia
Santa Maria, february 27, 2004.

The civil construction industry is, as times goes by, more related with echo-social efficiency and society and the concrete, most used building material, has its use associated with concerns on the durability and the performance of the constructions, looking for the optimization of the natural resources. The durability esteem of a concrete is the function of impermeability of it, since the entrance of water and deleterious agents initiates the mechanism of deterioration of structure, with the reinforcement corrosion. The covercrete has an important function in the steel protection, acting as a first barrier to the entrance of these agents and, therefore, the concrete quality is related to the impermeability of this layer constituent. In order to analyze the capacity of carrying fluids to the interior of the part (in the reinforcement direction) through the superficial pores through water absorption and diffusivity of it analyzing the differences in the covercrete. This study intend to approach the laboratory assay with the structures of concrete in situ that's why it is realized in extracted speciements of the prisms cured in environmental conditions of the construction. High fly ash (50%) , are used in substitution of the cimenticious materials, with and without addition of lime in the concrete for a better performance in relation of the carbonatation and other variables. The study focus 0; 2,5 and 5,0cm deep to know the behavior of the studied proprieties in the covercrete.

1. INTRODUÇÃO

Da procura pela sobrevivência com o uso de métodos e instrumentos rudimentares até a data atual, época de investigação da estrutura dos materiais ao nível nanométrico, o homem evolui de modo surpreendente e a engenharia pontua esta evolução sob as suas mais diversas formas.

A engenharia civil está presente na vida humana através da construção civil, responsável pela geração de emprego e renda em larga escala. No Brasil, em 2002, esta indústria foi responsável por 21% do PIB do setor industrial¹ e a tendência é que a mesma continue a desempenhar importante papel na economia de nosso país, tanto pela ocupação e desenvolvimento de regiões ainda pouco exploradas e com franco potencial de crescimento como pela conservação, manutenção e adequação de outras já plenamente desenvolvidas e povoadas.

O desenvolvimento das ciências e as mudanças por ele ocasionadas, juntamente com a busca por recursos que propiciem maior urbanização exigem a atenção dos pesquisadores e investidores no sentido de preservar os recursos naturais existentes através da otimização do uso destes, visando o melhor resultado com o menor custo ecológico uma vez que o crescimento industrial já extrapolou o limite de seu desenvolvimento sustentável.

Mehta (1994) alertou para a responsabilidade social dos engenheiros, que pode ser exercida com a consideração do custo ecológico do material durante o processo de escolha dos mesmos: uso de materiais que exijam menor desflorestamento e com menor consumo de energia e água. Em comparação com o vidro, metais e polímeros o concreto torna-se a melhor escolha ecológica e, sendo o material construtivo mais utilizado no mundo, a inserção da engenharia civil neste contexto passa pela excelência no uso do mesmo.

1 O setor industrial, em 2002, representou 38,3 % do PIB nacional. Fonte: IBGE

O aprimoramento do uso do concreto teve início com a utilização do conjunto concreto-aço e recebeu maior ênfase com o uso de adições minerais ao concreto, técnica hoje amplamente aceita e difundida, com inúmeros benefícios comprovados cientificamente. Além do uso de materiais alternativos, busca-se o melhor desempenho do concreto, de modo que a relação custo-benefício seja favorável a permanência do homem sobre a Terra.

O desempenho eficiente do concreto está relacionado, sobretudo, com a sua durabilidade que é considerada uma propriedade dinâmica na medida que a estrutura e as características do concreto são variáveis ao longo do tempo tornando o concreto uma espécie de 'sistema vivo' (Basheer *et al*, 1994). Esta relação entre o desempenho do concreto e a permeabilidade é especialmente importante para o caso do concreto armado, ou seja, uso conjunto de concreto e aço caso em que inúmeras pesquisas comprovam que a durabilidade deste concreto relaciona-se com a permeabilidade do mesmo havendo uma estreita relação entre o transporte de fluidos para o interior do concreto e a sua durabilidade, devido à entrada de agentes deletérios que deflagram o processo de corrosão do aço, entre outros processos de deterioração.

A relação citada é válida tanto para concretos produzidos com elevado controle tecnológico quanto para obras correntes que, em apenas 22% dos casos utilizam concreto dosado em central (Gouveia & Papa, 2004). Assim, a camada de cobertura desempenha importante papel de proteção ao aço, atuando como uma primeira barreira à entrada destes agentes e a qualidade do concreto como um todo estará relacionada à impermeabilidade desta camada.

O estudo do revestimento do concreto armado vem ganhando espaço entre os pesquisadores, no entanto a grande maioria das pesquisas já realizadas refere-se ao concreto de alto desempenho (CAD) que não costuma ser utilizado em obras correntes. Com o intuito de aproximar a situação pesquisada da realidade vivida nos canteiros de obra, esta

dissertação estuda a capacidade dos poros superficiais transportarem fluidos, da superfície em direção à armadura, por três camadas distintas de um centímetro de espessura cada, em protótipos moldados e curados em condições ambientais, com dois tipos diferentes de concretos: de alto desempenho e convencional, normalmente utilizados obras correntes; ou seja, com relações água/materiais cimentícios (a/mc) mais baixas. Assim a pesquisa originará resultados, passíveis de comparação, sobre concretos utilizados em duas realidades distintas, mas com a mesma preocupação em relação a sua durabilidade.

A percolação de água foi analisada através dos ensaios de absorção e de difusividade de água em concretos binários com cinza volante e em concretos sem adições minerais. Com a intenção de restabelecer a reserva alcalina do concreto que sofre decréscimo com a adição de pozolanas em altos teores e conter o avanço da frente de carbonatação na estrutura, foi adicionada cal hidratada em um dos traços binários.

Essa dissertação encontra-se, após a introdução, dividida em quatro capítulos: o segundo enfoca as questões de sustentabilidade, produção de concretos e seus constituintes e o terceiro trata da durabilidade das estruturas de concreto especialmente com relação ao movimento de fluidos e a camada de cobrimento, compondo assim a revisão da literatura. O quarto capítulo trata da investigação experimental com a apresentação da caracterização dos materiais e detalhamento dos procedimentos de ensaios realizados. Os dados obtidos e as análises dos resultados, inclusive comparando-os com outros provenientes de pesquisas diversas estão no capítulo cinco e as conclusões e sugestões para pesquisas futuras compõem o capítulo seis sendo o fecho deste trabalho.

Em complementação a este trabalho o Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto (GEPECON) da UFSM está desenvolvendo outros estudos² de modo a estudar adequadamente a camada de cobrimento, devido o entendimento de que esta possui microestrutura diferente daquela do interior da peça estrutural e, através de um adequado conhecimento da mesma pode-se retardar ou eliminar a deterioração precoce do concreto por ataque de agentes deletérios.

2: Complementam este estudo a dissertação “Estudo da microestrutura da camada de cobrimento de concretos com altos teores de cinza volante ”do Eng. Rodrigo Goettems da Silveira, finalizada em março de 2004 e outras pesquisas em andamento que originarão duas dissertações de mestrado, de autoria da Eng^a. Bianca Moreira e do Eng, Elinor Fernando Dalla Lana enfocando, respectivamente, a penetração de cloretos e a carbonatação do concreto. Todas estas pesquisas fazem parte de um projeto de pesquisa global, coordenado pelo Prof. Dr. Geraldo Cechela Isaia.

2. O CONCRETO E AS ADIÇÕES MINERAIS: SUSTENTABILIDADE E DURABILIDADE

O uso de concretos como material de construção vem de longa data, havendo registros da época dos egípcios, gregos e romanos que descrevem o uso de concretos produzidos com materiais locais. O surgimento de estruturas de concreto armado, no entanto, são relativamente recentes, tendo surgido em torno do final de século XIX.

A partir desta época o concreto tornou-se o material de construção mais utilizado no mundo, devido ao seu processo de fabricação relativamente fácil, a abundância de matéria prima, grande versatilidade e adaptabilidade com adequada capacidade de suporte estrutural (Mehta, 1994; Andrade *apud* Alves, 2000). Como todo material em uso, o concreto tem uma trajetória evolutiva voltada para as necessidades de cada época, tendo passado por períodos em que a busca por elevada resistência era considerada o ápice em pesquisas no mundo todo; atualmente as grandes questões que envolvem o concreto são o seu desempenho durante a vida útil e seu custo eco-social.

2.1. Sustentabilidade

O uso dos recursos naturais pelo homem tem um histórico de irresponsabilidade e incoerência, uma vez que o mesmo depende destes para sua subsistência e até um passado recente não cultivava nenhuma preocupação em manter os mesmos em níveis sustentáveis de preservação, até mesmo porque eles pareciam abundantes e infinitos. Essa mentalidade começou a mudar com o advento do efeito estufa, do acúmulo de subprodutos industriais poluidores sobre a face da terra, da possibilidade de escassez de alguns recursos vitais e suas conseqüências

que hoje são uma realidade a ser transformada.

Somerville (1999) expressa o conceito de sustentabilidade como a preocupação com que o desenvolvimento satisfaça as necessidades atuais sem comprometer a possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades.

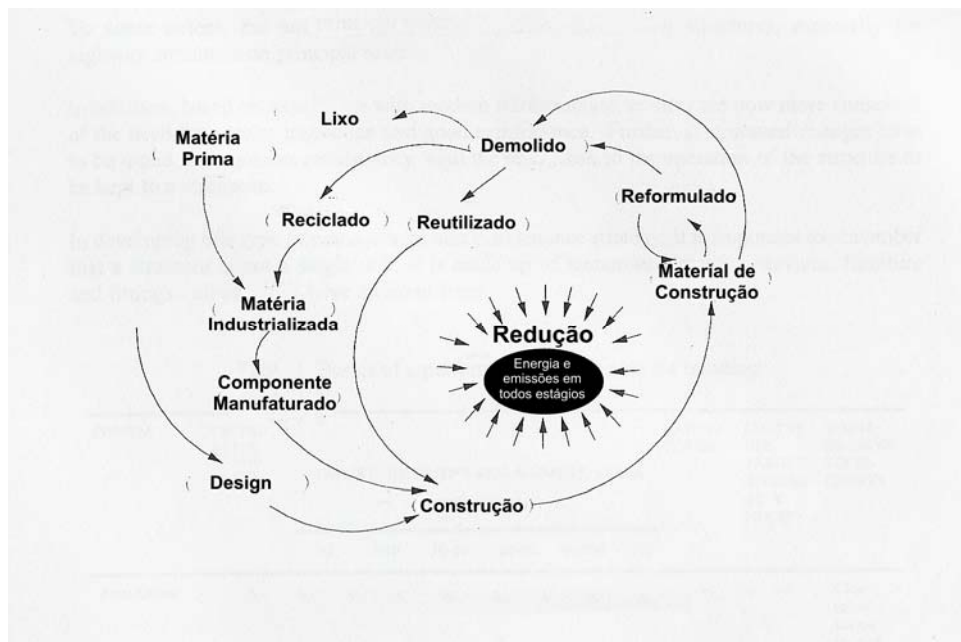


FIGURA 1 – Ciclo dos materiais (Somerville, 1999, p. 3)

O mesmo autor, em detalhamento da figura acima, coloca a sustentabilidade na construção como uma questão de redução do consumo energético e das emissões poluentes, tais como CO_2 , N_2O e CH_4 , em concordância com os esforços mundiais que tem sido levado à construção civil, e mais precisamente, à produção do concreto com o uso de subprodutos industriais e/ou agrícolas incorporados ao mesmo visando, inicialmente, diminuir a quantidade de cimento utilizado e dar um destino apropriado aos poluentes citados. A necessidade de controlar a quantidade de cimento utilizada no concreto se dá pelos danos ecológicos

intrínsecos da produção deste como, por exemplo, o consumo de energia aproximado de 5,5MJ/t e a alta taxa de emissão de CO₂ na atmosfera, na proporção de 1t/t de cimento produzido. (Bouzoubaâ *et al*, 2001a). Esse novo direcionamento na mentalidade humana trouxe ao concreto horizontes mais amplos: a busca por maiores resistências e economia financeira na execução deste cedeu lugar a preocupações com a durabilidade da estrutura e com os custos de reparo e manutenção; assim a qualidade do concreto, especialmente em termos de projeto, ganhou espaço com o advento de concretos de alto desempenho (CAD) e com a presença do especialista em concretos na obra, profissional que segundo Hervé Neto (2000), pode não apenas identificar e recuperar o concreto com patologias, mas principalmente evitá-las através do uso de um concreto adequado a realidade que se apresenta. Serra *apud* Alves (2000, p. 8) coloca:

A necessidade de promover avanços na qualidade do concreto foi percebida em função de dois aspectos principais: quanto a resistência mecânica, era necessário superar as limitações do concreto quando comparado com o aço, principalmente na estrutura de edifícios muito altos; quanto à durabilidade, era necessário superar o rápido envelhecimento das estruturas de concreto armado, decorrente da infiltração de água nos capilares, carbonatação do concreto, despassivação e conseqüentes corrosão das armaduras.

2.2. O concreto de Alto Desempenho

O conceito sobre o Concreto de Alto Desempenho (CAD) abrange não apenas um concreto que tem elevada resistência à compressão, mas que, principalmente, possui baixa permeabilidade aos fluidos, alta resistência a carbonatação e ao ataque de sulfatos, entre outros, tendo como consequência uma maior durabilidade da estrutura.

De modo geral o aumento do nível de resistência à compressão do concreto é proporcional à durabilidade do mesmo, entretanto enquanto

esta é uma propriedade objetiva que pode ser medida e especificada, os fatores da durabilidade são qualitativos requerendo conhecimentos técnicos e discernimento. (Shilstone & Shilstone, 1994).

A classificação de um concreto como CAD depende, então, do desempenho de várias propriedades, que são influenciadas de modo particular pela dosagem, adensamento, cura e componentes do concreto, tais como pozolanas e tipo de aditivo usado.

Aïtcin (2000), citando estudos de Uchikawa (1986) e Uchikawa *et al* (1992), entre outros, coloca que o CAD pode ser produzido com o uso do cimento Portland como único material cimentício, mas que uma substituição parcial deste por um material cimentício, ou por uma combinação adequada destes, pode ser vantajosa não apenas do ponto de vista econômico, mas também sob o aspecto técnico. Atualmente entende-se que a incorporação de pozolanas na fabricação deste concreto é, praticamente, imprescindível uma vez que sem este tipo de adição é muito raro conseguir-se um concreto com a microestrutura adequada para o desempenho exigido.

2.3. O uso da cinza volante

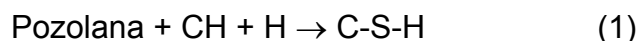
Na indústria do CAD a incorporação de pozolanas já é um tópico amplamente dominado sendo seus efeitos conhecidos uma vez que os estudos iniciais para a cinza volante, por exemplo, datam da primeira metade do século passado. Entretanto, existem poucos registros do uso de altos teores de adições minerais em concretos de resistência diretamente em obras correntes e embora isto seja tecnicamente possível, não é aconselhável devido ao baixo nível do controle tecnológico existente em tais circunstâncias; para estes casos as adições no concreto ocorrem pelo uso de cimento pozolânico, que tem as adições incorporadas em teores que, no caso de adição de cinza volante, chegam

a 50%.

Embora o uso de rejeitos industriais, como a cinza volante, colabore para a redução da emissão de CO₂ na atmosfera já que parte do cimento é substituída pelo subproduto e a produção de cimento Portland é uma grande fonte emissora deste gás no mundo responsável pelo lançamento de 5 à 8% do total do mesmo, Isaia (2002a) afirma que o uso de adições minerais está relacionado, em primeiro lugar, com os aspectos técnicos relativos ao aumento da durabilidade e da vida útil das estruturas de concreto armado.

A cinza volante apesar de ser um subproduto industrial resultante da queima do carvão mineral em fornalhas, não é considerada como um produto industrial pois não é padronizada. As variações principais são o teor do vidro, o teor do carvão, o tamanho das partículas, a presença de óxidos de magnésio e outros minerais e até a sua cor.

Os materiais cimentícios suplementares, em sua grande parte, têm uma característica em comum, que é conter alguma forma de sílica vítrea reativa, que em presença de água pode combinar-se com a cal e, à temperatura ambiente, formar silicato de cálcio hidratado semelhante ao formado pela reação de hidratação do cimento Portland (Aitcin, 2000). Essa reação, chamada de reação pozolânica, ocorre conforme o esquema abaixo:



Embora as equações químicas referentes a este processo sejam tratadas com mais profundidade neste projeto global de pesquisa em trabalho de Silveira (2004) sobre a microestrutura do concreto, cabe citar que a reação pozolânica se desenvolve lentamente tendo como consequência um desenvolvimento de resistência e liberação de calor lentos; além disso esta reação consome óxido de cálcio ao invés de produzi-lo e ainda preenche os espaços capilares grandes. O fato da

reação pozolânica do concreto com cinza volante ser lenta traz o benefício da redução do desprendimento do calor de hidratação mas, por outro lado exige maior cuidado durante o período de cura havendo a necessidade de molhagem cuidadosa para que as reações desenvolvam-se adequadamente. Assim, as condições de cura e exposição do concreto com cinza volante serão determinantes na qualidade do mesmo.

Além do exposto acima Mehta & Monteiro (1994, p.221) discorrem sobre os benefícios das adições minerais no concreto, que ocorrem de duas maneiras distintas:

(...) 1º. refinamento do tamanho do poro, e 2º. refinamento do tamanho do grão. A formação de produtos de hidratação secundários (principalmente silicatos de cálcio hidratados) ao redor das partículas de pozolana tende a preencher os vazios capilares grandes com um material microporoso e, conseqüentemente, de baixa densidade. O processo de transformação de um sistema contendo vazios capilares grandes em um produto microporoso contendo muitos vazios pequenos é referido como “refinamento de tamanho de poro”. Do mesmo modo, a nucleação do hidróxido de cálcio ao redor de partículas finas e bem distribuídas de pozolana terá o efeito de substituir os cristais grandes orientados de hidróxido de cálcio por numerosos cristais, pequenos e menos orientados além de produtos de reação pouco cristalinos. O processo de transformação de um sistema contendo grãos grandes de um componente em um produto contendo grãos menores é referido como “refinamento do tamanho do grão”. Ambos os processos de refinamento do tamanho de grão como de refinamento de tamanho de poro aumentam a resistência da pasta de cimento.

A incorporação de cinza volante no concreto tem como maior benefício ao concreto fresco maior trabalhabilidade facilitando a operação de lançamento e o acabamento. Além disso, causa melhor coesão e menor tendência à exsudação do que um concreto só com cimento (Frizzo, 2001).

Para que a reação pozolânica ocorra e estes benefícios sejam alcançados é fundamental que a pozolana esteja finamente subdividida e que a sílica contida seja vítrea (estado amorfo), pois no estado cristalino a mesma possui reatividade muito baixa. Estudos de Bouzoubaâ *et al apud*

Alves (2000), relatam que a moagem da CV, material utilizado neste trabalho, pode trazer benefícios às características intrínsecas deste material, mas que se a mesma for realizada em escala exagerada pode vir a diminuir a esfericidade das partículas o que acarretará em uma maior demanda de água, prejudicando o desempenho do concreto. Frizzo (2001) estudando concretos com cinza volante em teores e finuras variáveis, concluiu sobre a significância do uso desta adição em altos teores (50%) e observou que, em relação à absorção capilar e a permeabilidade ao oxigênio, o benefício derivado do uso de cinzas com finuras mais elevadas não compensa o custo da moagem das mesmas.

Isaia (2002b), entende que as pozolanas, em especial, atuam na microestrutura da pasta e na interface pasta/agregado por dois tipos de efeitos diferentes, a saber: efeito químico, no refinamento dos poros e tamanho dos grãos devido à formação de compostos hidratados secundários; e por efeito físico com a defloculação e densificação das partículas finas, tornando, assim, a microestrutura mais fina e homogênea, aumentando a densidade, resistência e compacidade da pasta cimentícia.

Swamy & Darwish *apud* Hoppe Filho (2002), afirmam que a incorporação de pozolanas e subprodutos cimentícios ou adições minerais no concreto de cimento Portland pode aumentar as propriedades do concreto em ambos os estados, fresco ou endurecido. De modo especial sobre as propriedades de durabilidade, no tangente à visão da cinza volante, Neville (1997) compartilha a opinião anterior citando que os materiais suplementares conferem muitas propriedades desejáveis ao concreto, às vezes no estado fresco, mas muitas vezes no estado endurecido, satisfazendo assim as necessidades do usuário.

As propriedades a que os autores se referem, são consequência da microestrutura diferenciada que se forma e, entre outras, consistem em maior resistência mecânica, diminuição da percolação de líquidos e gases pelos poros, principalmente íons agressivos como cloretos, menor

permeabilidade ao oxigênio, menor carbonatação, maior resistência aos sulfatos e diminuição das reações deletérias álcali-sílica. Existem alguns aspectos do concreto que podem ser afetados negativamente pelo uso de cinza volante ou outras adições minerais; um deles é a possibilidade de ocorrer maior retração no caso do emprego de adições com baixa reatividade com conseqüente evolução mais lenta da resistência e o outro é o avanço da frente de carbonatação com maior velocidade uma vez que se perde parte da reserva de hidróxido de cálcio (C-H) do concreto com a substituição do mesmo pelo material cimentício suplementar, tanto pelo teor de cimento que deixa de ser utilizado quanto pela quantia de C-H que foi consumida na reação pozolânica.

A fim de combater estes inconvenientes que podem vir a acelerar a deterioração da estrutura pelo aparecimento de fissuras com conseqüente penetração de agentes deletérios no concreto e despassivação do aço em período de vida útil da mesma, recomenda-se executar a cura do concreto com maior controle, a fim de evitar a secagem muito rápida.

Em relação ao exposto, a comunidade científica continua a estudar o concreto com adições minerais buscando incrementar a durabilidade do mesmo sendo um dos grandes desafios conter o avanço da frente de carbonatação, o que pode ser conseguido através da adição de cal hidratada cálcica.

Sobre esta adição Hoppe Filho (2002) e Stumpp (2003) observaram a criação uma reserva alcalina suplementar, dependendo do teor de cal adicionado, a diminuição da permeabilidade e da conectividade dos poros. Hoppe Filho (2002, p.189) conclui que:

A adição da cal hidratada no concreto, além de restabelecer total ou parcialmente o teor de hidróxido de cálcio remanescente, atribui vantagens significativas frente aos parâmetros de durabilidade investigados (...). Como conseqüência viabiliza-se o emprego de altos teores de adições minerais conjugado com a cal, aos concretos, minimizando-se custos, reutilizando-se resíduos e principalmente, majorando-se a vida útil das estruturas.

No momento que o uso de adições minerais no concreto traz alterações à microestrutura deste que resultam no aumento da compacidade, resistência e durabilidade da pasta e ainda contribui com a questão eco-social, retirando inúmeras toneladas de impurezas que normalmente não tem um destino socialmente responsável, a comunidade científica indaga sobre qual o teor limite de substituição que pode ser utilizado. Muitas pesquisas da última década enfocam a substituição do cimento portland por cinza volante em altos teores, muitas vezes iguais ou superiores a 50% (Sivasundaram *et al*, 1995; Isaia, 1995; Bouzoubaâ *et al*, 2001b; Alves, 2000; Hoppe Filho, 2002; entre outros). Estes trabalhos mostram, para altos teores de substituição em concretos cuidadosamente dosados, as vantagens da substituição do cimento por cinza volante que ocorrem quando se trabalha com teores normais de substituição. Paralelamente às pesquisas citadas, o uso destes teores de adições é reforçado por Mehta *apud* Isaia (2002a, p.7):

(...) Devido as suas altas pozolanidades e propriedades cimentícias cinza volante e escória podem ser empregadas em grandes quantidades como materiais substitutos do cimento no concreto. De fato, concreto com superplastificante contendo de 60 a 70% de cinza volante ou escória na massa do material cimentício total tem mostrado alta resistência e durabilidade a idades relativamente precoces. Esta demonstração tem removido uma das maiores objeções para o emprego de altos teores e cinza volante e escória. É óbvio que a reposição de cimento em larga escala com estes subprodutos industriais será altamente vantajosa sob o ponto de vista do custo econômico, eficiência energética, durabilidade e perfil ecológico global do concreto. No mundo industrial será difícil encontrar exemplos similares de excelente complementaridade ou casamento entre dois componentes de um sistema, um dos quais parece ser um resíduo industrial. Entretanto, no futuro, o uso de subprodutos suplementares como material cimentício deve ser tornar mandatário.

Esta visão concorre com a observação de Aïtcin (2002), para quem os concretos de alto desempenho do futuro conterão teores cada vez mais altos de cinza volante, visto que outras adições minerais usadas,

como a escória de alto forno, não possuem fontes tão numerosas. Com este embasamento pode-se afirmar que os problemas decorrentes da substituição do cimento por adições minerais, mesmo em altos teores, adquirem importância não relevante quando comparados com as vantagens que os acompanham, destacando-se de modo global a durabilidade do concreto, desde que este seja dosado adequadamente.

2.4. Qualidade e durabilidade do concreto

Aïtcin (1994) alerta para a dependência existente entre a durabilidade do concreto e a qualidade de seus componentes, seu modo de fabricação e cura e condições de exposição ambiental. Basheer *et al* (1994), Mehta (1994), Cánovas (2003), entre outros, enfocam a importância de considerar as condições de exposição do concreto quando são definidos os parâmetros do mesmo. Deste modo, através de um projeto com vistas à durabilidade da estrutura, define-se uma relação água/materiais cimentícios (a/mc) adequada às situações envolvidas, a importância deste estudo é destacada por Aïtcin (1994) ao afirmar que a relação a/mc controla a permeabilidade e a durabilidade do concreto e por Metha & Monteiro (1994), para quem a água está envolvida em toda a forma de deterioração e, a permeabilidade à água em sólidos porosos determina a taxa de deterioração das estruturas.

A água é um importante componente do concreto e tem um papel fundamental tanto positivamente, quando é responsável pelo início das reações de hidratação do cimento Portland e pela adequada cura do concreto, quanto de modo negativo quando, em muitos casos, promove a degradação precoce da estrutura. (Hewlett, 1999).

O envolvimento da água na perda da durabilidade de uma estrutura está relacionado à ocorrência de poros vazios e a porosidade aberta ou interconectividade destes, sendo estes poros formados devido ao

adensamento insuficiente e a retração hidráulica. De modo geral, se o teor total de água do concreto é baixo, os agregados são bem graduados e o concreto é bem adensado, a permeabilidade tende a ser pequena e, conseqüentemente, é alcançada uma maior durabilidade. Conforme Mehta & Monteiro (1994), a análise do papel da água no concreto deve ser criteriosa, pois a presença da mesma não é de todo nociva, uma vez que além de ser ingrediente fundamental para a ocorrência das reações de hidratação ela propicia plasticidade ao concreto.

Como o uso de pozolanas propicia o refinamento dos poros e este acarreta a diminuição da permeabilidade a água e outros fluidos, que podem transportar agentes deletérios ao concreto, cria-se um ciclo de processos que propiciam o aumento da durabilidade do mesmo.

Ao se tratar da durabilidade de uma estrutura de concreto, torna-se fundamental focar o concreto da camada de cobrimento que conforme Cascudo *et al* (2002, p.2) é o elemento de fundamental importância na conservação das peças de concreto, pois é responsável por, em primeira instância, deter os mecanismos de transporte que levam líquidos, íons e gases para o interior do material e ainda:

Sabe-se que o cobrimento assume características peculiares que o diferem do concreto confinado nas partes mais internas dos elementos estruturais. Estas diferenças se dão em função de vários aspectos, dentre os quais pode-se citar absorção promovida pelas fôrmas, a evaporação de água para o ambiente (mais ou menos acentuada em função dos procedimentos de cura aplicados), o efeito parede etc.

A visão de que o concreto da cobertura e do núcleo da peça estrutural não tem a mesma microestrutura é recente e, segundo Feitosa (2000), o concreto da superfície tem qualidade inferior devido a problemas de compactação junto às formas e às barras de aço, uma maior exposição à secagem, e a fenômenos tais como segregação e exudação, conforme esquema da Figura 2:

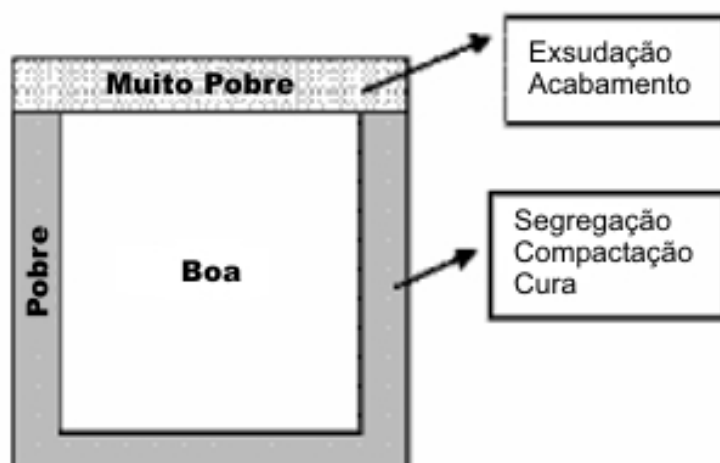


FIGURA 2 - Qualidade da camada de cobertura (Torrent *apud* Feitosa, 2000, p.25)

Enfocando a camada de cobertura, a importância da baixa relação a/mc ganha espaço, não com a finalidade de aumentar o ganho em resistência, que torna-se uma consequência da finalidade para a qual estas relações a/mc são empregadas. Em paralelo, Aïtcin (2000, p.110), reafirma posição sobre a relação água/materiais cimentícios (a/mc) afirmando:

Do ponto de vista dos materiais, o concreto de alto desempenho não é mais do que um concreto com porosidade muito baixa. Essa porosidade muito baixa é conseguida principalmente pelo uso de muito menos água de mistura do que no concreto usual, de tal forma que as partículas de cimento e de material cimentício suplementar estejam muito mais próximas umas das outras do que nos traços de concreto usual.

2.5. A camada de cobertura do concreto

Com o uso de relação a/mc baixas, a fluidez do concreto é alcançada através do uso de superplastificantes que acabam por criar uma situação diferenciada no concreto ao longo da forma ou na face

superior do mesmo, que segundo Aïtcin (2000) é conhecida como pele do concreto, pele externa ou *covercrete*, entre outros e que se caracteriza por ser uma zona muito rica em pasta.

A zona de transição formada entre a pasta e o agregado, caracteriza-se por um acúmulo de água na interface pasta/agregado, acarretando nesta zona um aumento da relação (a/mc), visão compartilhada por Isaia (2002a, p.5):

Assim como na interface pasta/agregado, a interface forma/concreto também apresenta o efeito parede tornando esta zona mais porosa, em escala distinta, pois na primeira a espessura não excede de alguns micrometros e na segunda de alguns centímetros. Assim, o concreto da superfície de uma dada peça de concreto apresenta características distintas de seu interior, ou seja, é mais porosa e mais suscetível à percolação e troca de fluidos em ambos os sentidos.

A espessura da camada de cobrimento não pode ser determinada aleatoriamente e nem pode ter um valor fixo, devendo ser dimensionada em função das condições ambientais de exposição do concreto, devendo, segundo Hoppe Filho (2002) ser estabelecida estritamente para garantir proteção do aço em todos os casos, uma vez que, conforme Sato (1998), ela é a primeira barreira física responsável por evitar a penetração de agentes agressivos que iniciam o processo de corrosão.

Considerando as distinções existentes entre o concreto do cobrimento e o da matriz da peça, Isaia (2002b) alerta para as diferenças que ocorrem entre a durabilidade de uma estrutura real de concreto e a de um concreto moldado em corpos de prova em laboratório, por conta das variações da microestrutura da camada de cobrimento da armadura e das oscilações de micro clima que ocorrem durante a vida útil da estrutura em questão.

Para Feitosa (2000), os corpos de prova moldados na obra para fins de ensaio laboratorial, refletem, na melhor hipótese, a qualidade do interior do concreto da estrutura, mas jamais a camada de cobrimento,

devido às diferenças de preparação e cura.

Parrot (2000) relaciona o desempenho da camada de cobrimento com o meio ambiente de inserção do concreto, uma vez que o mesmo depende das reações do cimento e do desenvolvimento da microestrutura no período pós-cura, quando o concreto é exposto às condições ambientais. As reações de hidratação do cimento que ocorrem principalmente quando a camada de cobertura do concreto ainda está um pouco úmida, nas semanas iniciais de exposição sendo, portanto dependentes do ambiente ao qual o concreto está exposto.

Entre as muitas diferenças existentes entre o concreto moldado na obra e o da pesquisa laboratorial, a principal refere-se ao procedimento de cura da peça. Enquanto no laboratório é realizada a cura úmida, por período de tempo pré-estabelecido em temperatura ideal, nas construções reais, ela é realizada a temperatura ambiental, sem preocupação com o controle de umidade e tempo muitas vezes variável de acordo com o cronograma da mesma. Conforme Almusallam (2001), as condições ambientais a que o concreto está exposto durante o período de cura afetam significativamente as propriedades do mesmo, tanto no estado fresco quanto no endurecido uma vez que variáveis como retração hidráulica, resistência à compressão e porosidade são influenciadas pelas condições ambientais (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento) a que o concreto está submetido durante o período de cura.

Se a cura do concreto afeta a porosidade e esta se relaciona diretamente com a permeabilidade e movimento de fluidos, influenciando assim na durabilidade, torna-se claro que as estruturas moldadas nestas situações tão distintas terão comportamentos diferentes frente às agressões do meio ambiente.

Reforçando a visão de que a durabilidade da estrutura real (obra) e da virtual (laboratório) são diferentes e a importância da execução de pesquisas que abordem essa questão de forma apropriada, Metha & Monteiro (1994, p.121) colocam que “a maior parte do conhecimento

sobre os processos físicos-químicos responsáveis pela deterioração do concreto vem de estudos de casos de estruturas no campo, porque é difícil simular em laboratório a combinação das condições de longa duração normalmente presentes na vida real”.

A cura a qual o concreto está submetido não é o único fator que difere entre estas duas situações distintas de fabricação e de uso do concreto como material de construção. Outros fatores tais como a dosagem, controle da relação a/mc, adensamento do concreto e tempo de desforma influem na qualidade da microestrutura do concreto, especialmente na camada de cobrimento, afetando deste modo a durabilidade da estrutura como um todo. Além disso, na obra, muitas vezes a camada de cobrimento especificada no projeto acaba sendo alterada na hora da concretagem, ainda que involuntariamente.

Conclui-se, portanto, que muitos problemas ligados à falta de durabilidade das estruturas de concreto são originados da falta de integração entre realidade do laboratório e a da obra, em especial com respeito aos modelos para predição da vida útil de uma estrutura (ISAIA, 2002b). Assim sendo, um estudo detalhado da microestrutura e durabilidade de peças executadas e curadas em condições mais próximas das usuais na construção civil, como focado neste projeto global de pesquisa, tem importância ímpar no que se refere a consolidação destas diferenças e discussões sobre a validação dos resultados de ensaios produzidos sob condições normalizadas ou ideais.

3. DURABILIDADE E PERMEABILIDADE À ÁGUA NO CONCRETO

A durabilidade de uma estrutura de concreto é um parâmetro variável dependente tanto das propriedades do concreto quanto do ambiente no qual o mesmo está inserido; para Massazza (1998), diversos fatores que afetam a durabilidade do concreto, a saber: composição química do cimento e agregados, microestrutura da pasta endurecida, variações de temperatura e composição química do ar, água e solo que circundam a estrutura.

O CEB (1997) define a durabilidade das estruturas de concreto como a capacidade das mesmas manterem o desempenho requerido durante o seu período de serviço a fatores degradantes. O ACI (1997) coloca este conceito de modo similar como a capacidade do concreto resistir ao desgaste provocado pela ação atmosférica, agentes químicos e outros processos de deterioração.

Deste modo a perda precoce das funções estruturais, bem como a necessidade excessiva de atividades de reparo na estrutura são consequências de um projeto inadequado para o meio ambiente que envolve a mesma.

Segundo Aitcin (2000), a durabilidade do concreto é, muitas vezes, um conceito vago e não bem compreendido pelo fato de existirem variações consideráveis na natureza, tipo e intensidade dos mecanismos de ataque à estrutura. Além disso, este autor considera que a avaliação da durabilidade de uma estrutura de concreto é subjetiva por não existir uma unidade com que se possa avaliá-la.

Em relação à durabilidade dos concretos usuais, Skalny *apud* Aitcin (2000), considera a mesma um assunto de grande preocupação na maioria dos países devido ao grande número de estruturas que

apresentam sérios indícios de deterioração. A fundamentação dessa preocupação torna-se ainda mais evidente se for considerada a predominância absoluta de obras realizadas com concreto convencional no mundo. O alto custo social e econômico embutido em uma estrutura de concreto com baixa durabilidade torna esta o critério projetivo preponderante e a resistência alcançada passa a ser uma consequência da mesma.

3.1. Durabilidade e porosidade

A permeabilidade³, propriedade do concreto relacionada com a porosidade e mais especificamente, com a conectividade e distribuição das dimensões dos poros, é uma das variáveis que mais influem na durabilidade da estrutura uma vez que a probabilidade de ocorrer o início da degradação do concreto através da penetração de fluidos agressivos é proporcional ao aumento da permeabilidade.

Os poros presentes no concreto têm origens diversas, enquanto alguns são originados pelos produtos de hidratação dos compostos cimentícios, outros são originadas pelo ar aprisionado durante a operação de lançamento do concreto, pela evaporação da água utilizada em excesso na fabricação do concreto ou ainda são devidas as microfissuras devido a exsudação, retração por secagem, expansão térmica e cura inadequada do concreto. Assim, quanto maior a quantidade de água adicionada à mistura e quanto menor o grau de hidratação da mesma maior será a porosidade.

O estudo da distribuição do tamanho dos poros das misturas desta pesquisa está relatado no trabalho de Silveira (2004) cabendo a observação que os poros responsáveis pela permeabilidade são os macroporos interconectados, que formam uma rede de poros conhecida

3. A rigor, permeabilidade se refere ao escoamento de um fluido em meio poroso. No caso do concreto, o deslocamento dos fluidos ocorre não só por escoamento mas também por difusão e adsorção. Neste trabalho, exceto nos comentários específicos sobre cada tipo de movimento (item 3.3), usa-se o termo permeabilidade para o movimento global entre os fluidos e o concreto, em ambos os sentidos, conforme orientação de Neville (1997).

como porosidade aberta do concreto. Como o transporte de água no concreto é determinado pelo tipo, tamanho e distribuição dos poros e das fissuras presentes, o controle desses fatores é fundamental para a durabilidade da estrutura (CEB, 1992).

De acordo com Mehta & Monteiro (1994), a permeabilidade do concreto (e da argamassa) é maior que a da pasta de cimento endurecida devido as microfissuras que se formam entre o agregado e a pasta na zona de transição sendo que quanto maior o tamanho do agregado adicionado à pasta de cimento, maior será o coeficiente de permeabilidade.

Em relação a este tópico, Neville (1997) coloca que a diferença entre a permeabilidade da pasta endurecida e do concreto com igual fator a/mc pode ser considerada como a permeabilidade do agregado influenciando o comportamento do concreto e como, em geral, a influência do teor de agregado na mistura é pequena, a permeabilidade da pasta tem o principal efeito sobre a permeabilidade do concreto.

A classificação dos poros da pasta endurecida pelo seu tamanho e a relação destes com o papel da água e as propriedades da pasta de cimento endurecida estão colocados no quadros 1

(Quadro 1)

Com respeito sobre a influência da tortuosidade dos poros da pasta de cimento na permeabilidade do concreto, Mehta & Monteiro (1994) consideram que em torno de 30% de porosidade capilar representa um valor para o qual as interconexões entre os poros já se tornaram tão tortuosas que um decréscimo adicional na porosidade da pasta não corresponde a uma decréscimo substancial na permeabilidade. Normalmente o uso de altas relações a/mc implica em baixo grau de hidratação e alta porosidade capilar com um número relativamente alto de poros grandes conectados, ocasionando assim alta permeabilidade.

QUADRO 1 - Porosidade segundo Mindess e Young (1981), p. 99

DESIGNAÇÃO	DIÂMETRO	DESCRIÇÃO	PAPEL DA ÁGUA	PROPRIEDADES DA PASTA AFETADAS
Poros capilares	10 μ m a 50 nm	Capilares grandes	Comporta-se como água de amassamento	Resistência, permeabilidade
	50 a 10 nm	Capilares médios	Forças moderadas de tensão superficial	Resistência, permeabilidade, retração com altos teores de umidade
Poros do gel	10 a 2,5 nm	Capilares pequenos (gel)	Fortes forças de tensão superficial	Retração com 50% de UR
	2,5 a 0,5 nm	Microporos	Água fortemente adsorvida, sem formação de meniscos	Retração, fluência
	< 0,5 nm	Microporos interlamelares	Água estrutural das ligações	Retração fluência

Com a progressão da hidratação os poros são reduzidos a um tamanho menor e perderão suas interconexões, diminuindo então a permeabilidade. O caminho que a água percorre ao penetrar no concreto é dado pelos poros interconectados, formadores da rede de poros ou porosidade aberta, representada na figura 3.



FIGURA 3 - Rede de poros da pasta de cimento (Mopt, *apud* Figueiredo, 1994).

Para Neville (1997) a relação entre a permeabilidade e porosidade é qualitativa, devido a dependência da conexão dos poros. Esta visão é compartilhada por Hoppe Filho (2002, p. 49):

Em virtude de ser a porosidade a proporção do volume total do concreto ocupada pelos poros, expressa em porcentagem, isto não quer dizer que a mesma possua uma relação direta com a permeabilidade do concreto, pois esta última não depende somente da porosidade total do concreto, mas leva em consideração o diâmetro dos poros, a interconectividade da rede capilar, a tortuosidade do caminho a ser percorrido pelos fluidos, além do estado de umidade e distribuição destes poros.

Portanto, podemos ter dois concretos distintos, com a mesma porosidade, entretanto, com valores típicos de coeficientes de permeabilidade bem diferentes.

Lynsdale & Khan *apud* Hoppe Filho (2002), colocam a permeabilidade do concreto como um dos parâmetros mais críticos na determinação da sua durabilidade em ambientes agressivos sendo que o desempenho deste, em relação à degradação físico-química, aumenta quando a permeabilidade diminui. Além disso, Mehta & Monteiro (1994) enfatizam que a permeabilidade à água em sólidos porosos determina a taxa de deterioração das estruturas uma vez que a mesma, além de controlar a carbonatação e o ingresso de íons cloreto, controla o oxigênio e a umidade do sistema, fatores estes que influem na progressão do processo de corrosão enquanto os primeiros são essenciais para a deflagração deste processo.

Como a existência de microfissuras no concreto contribui para o aumento da percolação de fluidos pela pasta, Sato (1998) coloca que modificar a porosidade do concreto pode ser uma solução econômica, eficiente e simples de aumentar a durabilidade do concreto armado, posição esta que ganha força ao recordarmos outros mecanismos de proteção como pinturas epóxi e proteção catódica que além de serem mais dispendiosos financeiramente não são prática comum em obras. Esta visão é compartilhada por Basheer *et al* (1994), para quem a redução da permeabilidade é a maneira mais efetiva de incrementar a durabilidade de determinado concreto.

Conforme enfoque exposto pelo CEB (1997) existem duas estratégias de proteção ao concreto que consistem em evitar as reações de degradação com o uso de proteção catódica e membranas e proteção, por exemplo ou selecionar os materiais ótimos para o projeto através de um concreto de excelente qualidade, uma cobertura adequada e uma proteção extra para o concreto ou a armadura. Paralelamente, Aïtcin (2000) coloca que ao invés da opção pelo uso de revestimentos epóxi

sobre as barras ou proteção catódica o uso de um concreto de alto desempenho e baixa permeabilidade pode ser uma alternativa inicial que contemple a durabilidade em ambientes agressivos.

Paulon & Dinten (2000, p.4) destacam a importância da permeabilidade:

(...) 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 deste último e com isso a ruptura do concreto. Essa penetração da umidade depende da permeabilidade da camada superficial (concreto de pele).

Dan *et al* (1988), descrevem a observação dos poros de uma placa de cimento composto de polímero e vidro ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), em dois pontos distintos ao longo da seção transversal da placa; estando um ponto próximo ao fundo da placa (zona1) e o outro próximo à superfície exterior (zona 2). Estes autores mencionam que a distribuição dos poros na seção transversal analisada não é uniforme havendo maior quantidade de poros grandes na zona 2. A observação superficial estes macroporos mostrou a existência de microfissuras nos mesmos de modo que a ligação entre estes macroporos ocorre por meio das suas microfissuras ou dos microporos da pasta de cimento.

Assim, a qualidade da camada de cobertura do concreto é mais uma vez evidenciada na medida em que a mesma deve atuar como mecanismo físico de proteção do aço e segundo Marchand & Gerard (1995), *apud* Isaia (2001) ainda pode impedir, ou ao menos frear, os processos de transporte de massa.

3.2. Corrosão do aço

Com relação à durabilidade, Neville (1997) coloca que os principais fluidos que podem ingressar no concreto são a água, pura ou com íons

agressivos, o dióxido de carbono e o oxigênio. Estes deslocam-se através do concreto de diferentes formas que dependem basicamente da estrutura da pasta de cimento hidratada, ou seja, dos poros e da interconectividade e tortuosidade dos mesmos.

Diversos especialistas consideram o processo de corrosão do aço um dos principais e mais graves dos problemas que afetam a durabilidade das estruturas de concreto e, segundo Mehta & Monteiro (1994), as suas consequências para o concreto armado manifestam-se através da expansão, fissuração e lascamento do cobrimento, podendo ainda haver dano estrutural devido a perda de aderência entre o aço e o concreto e diminuição da secção transversal da armadura. Estes autores colocam que a expansão ocasionada pela transformação do aço metálico em ferrugem pode, em função do estado de oxidação, chegar a 600% do metal original.

O processo de corrosão do aço pode ocorrer de forma pontual com o ataque por cloretos, ou de forma generalizada pela carbonatação da camada de cobrimento, que também são analisados neste projeto global de pesquisa, em trabalhos complementares a este.

Em qualquer uma das situações, a corrosão da armadura é uma manifestação específica da corrosão eletroquímica em meio aquoso, havendo o desenvolvimento do mecanismo de corrosão apenas em presença de água ou ambiente com umidade relativa elevada (U.R.> 60%), conforme Alvim (2003).

De acordo com Helene *apud* Hoppe Filho (2002), a ocorrência do processo de está vinculada à existência de três condições básicas que são existência de um eletrólito; de uma diferença de potencial de eletrodo e presença de oxigênio. Assim, a ausência de um destes três elementos impede o início do processo ou, caso o mesmo já esteja em andamento, cessa-o. Alvim (2003), afirma:

Não há corrosão em concretos secos (ausência de eletrólito) e tampouco em concreto totalmente saturado, devido não haver suficiente acesso de oxigênio. Em tais condições, só haverá dissolução do aço da armadura, se houver intensidade de corrente suficiente para realizar a eletrólise da água gerando, assim, oxigênio extra, pois sempre existe água no concreto e, geralmente, em quantitativo suficiente para atuar como eletrólito, mormente quando este está em presença de climas úmidos.

Ao considerarmos a carbonatação da estrutura, a camada de cobertura com espessura e compacidade adequadas, fornece, além da proteção mecânica, proteção química ao aço devido a uma camada de óxidos que se forma sobre este chamada de película passivadora, estando a ocorrência da corrosão da armadura subordinada à despassivação do aço. A ocorrência dessa é devida a perda de alcalinidade do meio em que o aço está inserido, ou seja, pela diminuição do pH da pasta de seu valor habitual, em torno de 12,6 para valores inferiores à 11,5. O principal agente agressivo neste caso é o CO₂ do meio atmosférico, que ao reagir com o C-H inicia este processo de despassivação do aço. A ocorrência desta devido à carbonatação da camada de cobertura propicia, devido à redução do pH, condições para que as reações químicas de oxidação ocorram, desde que, como exposto acima haja diferença de potencial, presença de umidade e de oxigênio.

Os íons cloreto, quando em presença de umidade e oxigênio, perturbam a passivação do aço pela dissolução local e pontual da película de óxidos protetora, iniciando o processo de corrosão da armadura.

Em relação à corrosão do aço pelo ataque destes íons, cabe ressaltar que a presença dos mesmos pode ter origem em contaminações presentes nos materiais empregados na execução, como o ácido muriático usado na lavagem de fachadas e pisos e outros ácidos encontrados nos aditivos controladores de pega e podem ainda ser provenientes do meio externo através do contato com a água do mar e atmosfera salina ou industrial. (Helene *apud* Sato, 1998).

Normalmente os íons cloreto penetram no concreto dissolvidos na

água através dos mecanismos de capilaridade e permeabilidade, mas também podem atingir a estrutura por difusão e migração. Como a permeabilidade caracteriza um mecanismo de transporte de água em materiais saturados e submetidos a uma diferença de pressão, a absorção por capilaridade, que ocorre em meios porosos não saturados, é a situação mais comumente encontrada nos elementos de construção; o fenômeno da difusão ocorre quando existe um gradiente de concentração de cloretos ao longo do material e o transporte por migração iônica ocorre quando existe um campo elétrico.

McCarter et al (2000), colocam que a maioria das estruturas de concreto tem seu cobrimento variando entre os estados de saturado à semi-saturação resultando em movimento de água e íons através de uma combinação de absorção capilar e difusão. O teor de umidade da camada de cobertura determina o processo predominante de transporte de massas que é dependente das condições climáticas do ambiente onde a estrutura está inserida.

Independentemente do modo pelo qual houver a penetração no concreto, a percolação de água está vinculada à qualidade do concreto, especialmente à qualidade da camada de cobrimento conforme já exposto. Conforme Sato (1998), o conhecimento do comportamento dos materiais porosos como o concreto quando em presença de água, é muito importante no estudo da suscetibilidade dos concretos à penetração de agentes agressivos.

Aïtcin (2000) coloca que, para uma proteção eficaz das armaduras em relação a corrosão o concreto deve, além de impermeável, ser bem lançado e bem curado pois quando estes processos são realizados de modo adequado não existe a necessidade do uso de aditivos anticorrosivos, barras livres de corrosão ou proteção catódica. Assim, segundo este autor, uma baixa relação a/mc , aliada a um bom lançamento e uma boa cura, é o 'preço' a ser pago para a proteção das armaduras, sendo que este preço não pode ser considerado alto quando

se pensa na vida útil e no custo social de uma estrutura.

Ainda em relação à corrosão, um dos principais efeitos nocivos da percolação de águas no concreto, a importância de uma camada de cobertura adequada volta a pauta, através das palavras de Mehta & Monteiro (1994, p.168) que servem para reflexão de um problema até hoje não solucionado:

Espera-se que, quando a armadura estivesse protegida do ar por uma camada adequadamente espessa de concreto de baixa permeabilidade, a corrosão do aço e outros problemas associados a ela não surgiriam. Que esta expectativa não é plenamente satisfeita na prática é evidente pela frequência incomumente alta com a qual, mesmo as estruturas de concreto armado e protendido, adequadamente construídas, continuam a sofrer danos devidos à corrosão do aço.

3.3. Mecanismos de transporte

Benazzouk *et al* (2004) expõem que, juntamente com outros fatores, a degradação do concreto está relacionada ao transporte de fluidos e Isaia (2001), afirma que todos os processos que causam deterioração do concreto em si ou a corrosão da armadura envolvem fenômenos de transporte de fluidos e/ou espécies químicas pelos poros da pasta que pode ocorrer devido a capilaridade (absorção), gradientes de pressão (permeabilidade), gradiente de concentração (difusão) ou devido a aplicação de um campo elétrico (migração).

Os mecanismos de transporte objeto de estudo desta pesquisa enfocam o transporte de água e são a capilaridade, que pode gerar absorção ou desorção, e a difusividade de água que estão ilustrados na figura 4, juntamente com os demais processos (CEB *apud* Isaia, 1995).

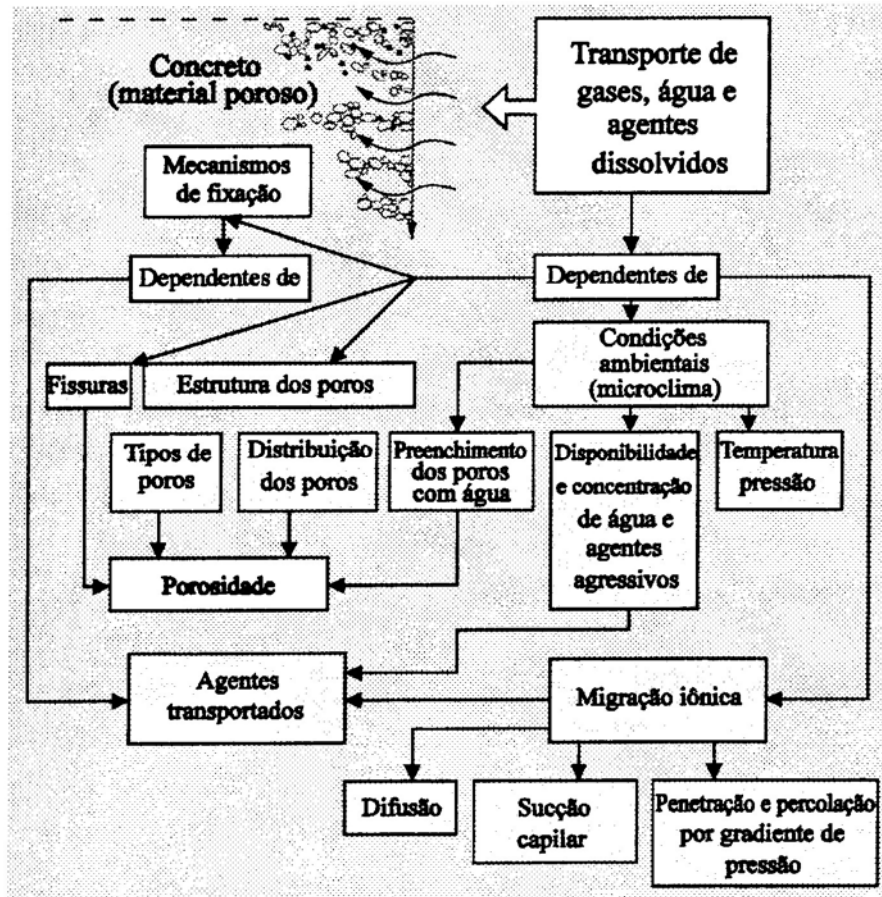


FIGURA 4 – Fenômenos de transporte de massa no concreto (Isaia, 1995)

Na figura 4 percebe-se que os mecanismos de transporte são facilmente influenciados não apenas pelas condições ambientais como também pelas condições de produção de concreto, mais especificadamente pelo seu lançamento e cura que são decisivos para a porosidade do concreto. Deste modo, a comparação de valores de ensaios torna-se um tópico para o qual não se tem uma situação de efetivo controle.

Neville (1997) questiona a comparação dos resultados obtidos em diferentes publicações devido à falta de padronização existente nos ensaios de permeabilidade do concreto. A análise de resultados em

testemunhos moldados de forma a simular as condições reais da obra e a descrever o perfil da camada de cobrimento contribuem para o questionamento sobre o modo como são as comparações para estes resultados, tornando ainda mais peculiar e desafiadora essa situação.

Diversos métodos experimentais medem a deterioração do concreto frente a agentes agressivos e, conforme Bretanha & Dal Molin (1999), *apud* Alves (2000), estes ensaios propõem parâmetros de durabilidade sem, contudo, fornecer valores absolutos para os coeficientes, uma vez que os valores fornecidos dependem dos princípios envolvidos e das características utilizadas e, portanto, são valores característicos. Considerando que não há um método geral que caracteriza e relaciona a estrutura dos poros com a durabilidade do concreto pode-se adotar a permeabilidade do concreto à água como uma das medidas de durabilidade potencial do mesmo.

Neste trabalho, seguiu-se a Recomendação da RILEM TC 116-PC (RILEM, 1999) para o ensaio de absorção de água e um procedimento proposto por Isaia (1995) a partir das diretrizes de Dan et al (1988), publicadas pelo CSTB, para o ensaio de difusividade.

3.3.1. Absorção Capilar

Para a absorção capilar, foi escolhido como método de ensaio a Recomendação da RILEM TC 116-PC (RILEM, 1999) pela mesma não considerar a existência de uma alta pressão da água, o que não costuma ocorrer em estruturas correntes de concreto. Ensaio têm demonstrado que a absorção capilar é o problema mais relevante no transporte de massa no concreto e que o grau de saturação exerce influência significativa nos resultados (Reinhardt *et al apud* Frizzo, 2001).

No processo de absorção, a água tem acesso aos poros do concreto

pela ação de pressão ou pelo fenômeno de capilaridade, que é uma característica dos materiais higroscópicos e nesse caso desenvolve-se um processo de sucção capilar independente da pressão externa, sendo necessário apenas um foco de contato com a umidade. (Campiteli, 1987) Conforme Camarini (1999) apud Frizzo (2001), a permeabilidade do concreto à água é verificada com a aplicação de água sob pressão; e neste ensaio de permeabilidade à água, a velocidade de penetração de água no concreto é da ordem de 10^{-12} m/s e no ensaio de absorção capilar a velocidade de penetração de água é da ordem de 10^{-6} m/s, ou seja, um milhão de vezes mais rápido do que naquele ensaio. Assim, a absorção capilar de água é muito mais relevante do que a permeabilidade à água como fator determinante para a penetração de agentes deletérios no concreto.

Considerando que as adições minerais no concreto reduzem a porosidade do mesmo elas também reduzem do mesmo modo a absorção capilar. Isaia (1995) considera que a redução na absorção de água ocasionada pelo uso de adições minerais é mais significativa que o acréscimo de resistência proporcionado. Frizzo (2001), em pesquisa com substituição de 50% de cimento por CV em três relações a/mc diferentes alcançou variações na absorção capilar de 3690g/m^2 para 392g/m^2 , ou seja, uma redução na absorção de água devido a presença da CV de até 89% em relação ao concreto sem adições com a/mc=0,50, concluindo ainda que, se forem consideradas finuras diferentes, a moagem da CV é levemente vantajosa em termos da absorção capilar.

Hoppe (2002), em pesquisa com uso de altos teores de adições minerais e cal hidratada em concretos com a/mc=0,35; 0,45 e 0,55, conclui que a absorção capilar referente ao concreto com cinza volante em teor de 50% é superior a absorção do concreto de referência para todas as relações a/mc investigadas. O mesmo autor evidenciou os benefícios da reposição do hidróxido de cálcio através de decréscimos na absorção capilar dos concretos binários com cinza volante, especialmente

para relações a/mc mais altas. Analisando a incorporação de cal hidratada com o aumento de a/mc o autor obteve uma redução média na absorção capilar de 51%. A figura 5 retrata estas conclusões.

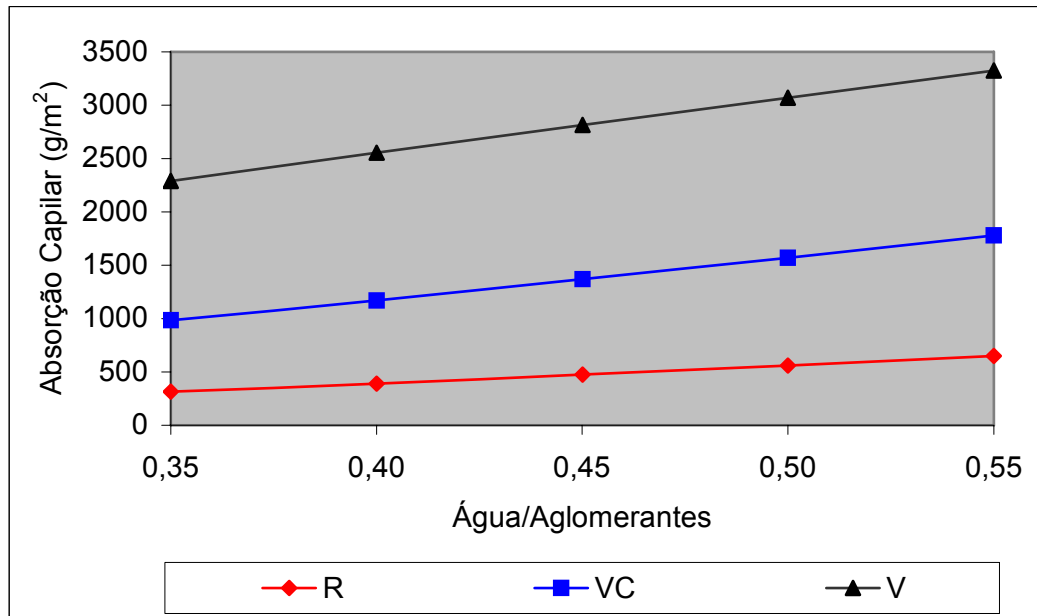


FIGURA 5 - Coeficiente de absorção capilar aos 91 dias – Cinza Volante (50%) com e sem adição de cal (Hoppe, 2002 p.156).

A quantidade de água absorvida, ou a medida da absorção capilar está relacionada com o grau de dificuldade de penetração de gases no concreto, conforme Cascudo *apud* Frizzo (2001, p.22):

A absorção pelo concreto de soluções líquidas, ricas em íons agressivos, é um fenômeno motivado por tensões capilares, que ocorre imediatamente após o contato superficial do líquido com o substrato. A absorção capilar, portanto, é dependente da porosidade aberta, isto é, dos poros capilares interconectados entre si, permitindo o transporte das substâncias líquidas contaminadas para o interior do concreto; mas depende sobretudo do diâmetro dos poros e apresenta forças de sucção capilar tão ou mais intensas quanto menores forem os diâmetros dos capilares. Depende ainda das características

intrínsecas do líquido, tais como viscosidade e tensão superficial.

3.3.2. Difusividade da água

Segundo Benazzouk *et al* (2004) a difusividade hidráulica mede a capacidade de um concreto transferir umidade em forma de líquido ou vapor, sendo utilizado para estimar a difusão de agentes agressivos.

O ensaio de difusividade de água, realizado a partir das diretrizes de Dan *et al* (1988), publicadas pelo CSTB, elucida o modo como a água penetra no concreto, com a determinação do coeficiente de difusividade à água segundo a lei de Fick, aferido pelo ganho de massa de água em um determinado período de tempo (Isaia, 1995).

Os produtos a base de cimento tem a capacidade de absorver água logo após serem expostos a um ambiente úmido havendo então a transferência de água e de calor. Conforme Dan *et al* (1988) na maioria das vezes estes dois processos ocorrem de modo simultâneo, mas com as considerações seguintes é possível se estabelecer dois sistemas de equações bem definidos para estes processos e assim analisar separadamente a difusividade:

- ◆ a transferência de calor através da matéria ocorre por condução e é analisada pela Lei de Fourier;
- ◆ a difusão de água obedece a Lei de Fick com o coeficiente de difusão supostamente constante;
- ◆ a transferência de calor ocorre mais rapidamente que a transferência de água pois a temperatura de equilíbrio é atingida mais rapidamente que o equilíbrio da concentração de umidade. A equação de Fourier e a da Fick são, então, consideradas separadamente;

- ◆ a condutividade térmica e a difusividade hídrica dependem unicamente da temperatura, sendo independentes da concentração de umidade do material.

O coeficiente de difusividade retrata a aceleração de penetração da água, o que embora não influa diretamente na durabilidade do concreto fornece uma diretriz sobre a porosidade do mesmo. Assim como o coeficiente de carbonatação exprime a velocidade com que este processo avança (frente de carbonatação), o ensaio de difusividade de água também apresenta um coeficiente que mede a velocidade com que a água penetra na camada de cobrimento, que à semelhança anterior, poderia ser denominada de frente de difusão à água.

Isaia (1995) pesquisando concretos com CV nos teores de 25% e 50%, atingiu bons resultados para o coeficiente de difusividade com o aumento do teor de pozolana, passando o mesmo de $8 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ para $8 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$. Também Alves (2000), em pesquisa com substituição de cimento por CV nos teores de 12,5%, 25% e 50%, constatou que o coeficiente de difusividade decresce com o aumento do teor de CV na mistura.

Cabe ressaltar que no caso de uma pesquisa que utiliza diferentes misturas, independente da comparação com resultados de outros pesquisadores, a obtenção dos menores coeficientes para determinado traço está vinculada a melhor qualidade deste concreto.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O senso comum estabelece que todo trabalho de pesquisa deve trazer contribuições práticas para a sociedade e por isso mesmo deve ser possível de repetição no dia a dia. Assim, a pesquisa científica deve ser norteada por regras claras e sensatas, a fim de que o resultado do trabalho seja confiável e passível de reprodução. A necessidade de que o objeto em estudo seja aplicável na vida cotidiana não existe de modo formal e sabe-se serem necessários os estudos que extrapolam a realidade de hoje; de certo modo, a pesquisa sempre busca a extrapolação da realidade, pois visa aumentar o saber e investigar novas indagações e saberes; mas quando ela é realizada em uma instituição pública ou com aporte financeiro de órgãos públicos ganha uma dimensão diferente na medida em que pode ser aplicada no dia a dia. E, mesmo nesses casos, a opção de seguir esta linha de raciocínio é particular de cada pesquisador.

Aliando esta linha de pensamento com a da sustentabilidade, já comentada anteriormente, este trabalho foi desenvolvido para que os resultados obtidos em laboratório possam ser considerados simulações de acontecimentos de uma construção real. Assim, foram moldadas peças protótipos (vigas) com dimensões semelhantes às de uma estrutura, moldadas em formas de madeira, curadas em condições ambientais, de onde foram extraídos os testemunhos a serem ensaiados, cujos resultados vem agregar maior conhecimento nas áreas técnica, econômica e social, conforme a metodologia descrita abaixo. Todos os ensaios e procedimentos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

4.1. Objetivos

O principal questionamento desta investigação refere-se ao “efeito parede” formado entre a superfície da forma e a camada de cobrimento da armadura, uma vez que esta camada difere significativamente do concreto do interior de peças estruturais gerando propriedades distintas entre esses concretos. A questão motivadora da pesquisa global é: “Como variam os principais parâmetros que governam a microestrutura e a durabilidade da camada de cobrimento do concreto com altos teores de cinza volante, entre a superfície da peça estrutural e a armadura?”

A fim de se observar a capacidade de transportar fluidos e com estes possíveis agentes deletérios, estudou-se a penetração de água no concreto através da *absorção capilar* e da *difusividade de água*, através das seguintes questões específicas:

- ◆ Como variam a absorção e difusão capilar, a partir da superfície do concreto em direção da armadura, ao comparar-se o concreto de referência com aqueles que contém cinza volante, com ou sem cal hidratada, em igualdade de relação água/materiais cimentícios? E em igualdade de resistência?
- ◆ Quais as relações que existem entre absorção e difusão capilar nas profundidades analisadas, em igualdade de resistência? Qual a influência da cinza volante e cal hidratada, em relação ao concreto de referência nestas relações?
- ◆ Quais (is) a(s) influência (s) da distribuição e dimensões dos poros nos mecanismos de transporte da água estudados? Há variação significativa quando se adiciona cinza volante ou cal hidratada, em relação ao concreto de referência, em igualdade de resistência?

4.2. Variáveis envolvidas

Inicialmente foram definidos algumas variáveis e parâmetros, a saber: misturas, relações a/mc e traços a serem investigados, bem como, idades (91 dias) e condições de ensaio, abatimento para o concreto fresco (*slump* variável entre 80 e 120 mm) e tipos de cura (cura controlada para os corpos de prova moldados e ao ar livre para os protótipos) e após fixou-se uma metodologia de extração dos testemunhos e preparação para os ensaios. As variáveis envolvidas nesta pesquisa seguem a seguinte classificação:

- ◆ *Variáveis independentes*: são aquelas inerentes à natureza do concreto, exercendo influência na compacidade da pasta (relação sólido/espço). São elas:
 - relações a/mc (em massa): 0,45; 0,60 e 0,80 para os traços de referência e 0,40; 0,55 e 0,75 para os traços com adição de cinza volante (CV) com e sem cal.

- ◆ *Variáveis intervenientes*: são aquelas que, de alguma maneira, modificam as propriedades do material cimentante, ou seja, as misturas estudadas com diferentes materiais cimentícios, a saber:
 - misturas aglomerantes: referência, 50% de cinza volante + 50% de cimento, 50% de cinza volante + 50% de cimento + 20% de cal.

- ◆ *Variáveis dependentes*: são assim denominadas as variáveis diretamente influenciadas por alguma variável independente. São as propriedades do concreto:
 - resistência à compressão;

- absorção capilar de água;
- difusão de água;
- distribuição dos poros.

As variáveis acima citadas foram estudadas, em igualdade de relação água/materiais cimentícios e de resistência, para cada uma das três profundidades da camada de cobertura dos corpos de prova extraídos dos protótipos, sendo que a resistência à compressão foi analisada em trabalho complementar a este já citado anteriormente.

Os ensaios foram realizados aos 91 dias de idade porque nos concretos com adição de cinza volante as reações de hidratação são lentas e, portanto os mesmos beneficiam-se das reações pozolânicas a longo prazo de modo que os resultados em idades menores, como por exemplo aos 28 dias, os valores encontrados não são representativos.

4.3. Procedimentos e técnicas utilizados

Além do traço de referência, foram analisadas misturas binárias de cimento e cinza volante, com e sem adição de cal, sendo o cimento substituído em massa pelas adições minerais, ou seja, cinza volante e cal hidratada, conforme o traço.

Os teores de substituição adotados baseiam-se em trabalhos anteriores, produzidas pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON), que comprovaram a viabilidade da substituição do cimento por teores de até 50% de cinza volante. A adição de cal hidratada foi realizada para repor o hidróxido de cálcio (C-H) que deixou de se formar pela substituição do cimento e, também, aquele que foi consumido pela reação pozolânica. A importância desta reposição deve-se ao fato da diminuição do C-H ocasionar um aumento na velocidade da frente de carbonatação, que é estudada em dissertação complementar a esta.

Foram testadas três misturas:

- ◆ traço de referência com relação a/mc de 0,45; 0,60 e 0,80;
- ◆ traço com 50% de cinza volante em substituição ao cimento, com relação a/mc de 0,40; 0,55 e 0,75;
- ◆ traço com 50% de cinza volante em substituição ao cimento e adição de 20% de cal, com relação a/mc de 0,40; 0,55 e 0,75.

Em relação aos traços adotados, conforme colocado anteriormente, para os ensaios realizados foram consideradas apenas duas relações a/mc; 0,40 e 0,75 ou 0,45 e 0,80 conforme o tipo de concreto.

Adotou-se, para o concreto de referência com relação a/mc=0,45 um teor de argamassa (α) padrão de 52% e para os demais foi feito o ajuste necessário através da redução da quantidade de areia dos traços com CV, afim que o volume de argamassa permanecesse constante. Para que as resistências à compressão, nas idades estudadas, dos traços de referência e dos traços com adições sejam próximas, a relação a/mc destes últimos foi tomada com um valor de 0,05 menor que seus correspondentes sem adições, respectivamente 0,8; 0,6 e 0,45 para os traços de referência e 0,75; 0,55 e 0,4 para os traços com CV, totalizando nove traços diferentes, conforme o quadro 2.

(Quadro 2)

Para cada relação a/mc, moldaram-se protótipos dos três traços: referência; 50% de CV e 50% de CV com 20% de cal; sendo que nesta pesquisa não foi analisada a percolação de água nos concretos de relação a/mc=0,55 e a/mc=0,60.

QUADRO 2 – Detalhamento das misturas aglomerantes investigadas

NOME	DESCRIÇÃO	a/mc
R45	referência	0,45
R60	referência	0,60
R80	referência	0,80
CV40	50% CP + 50% CV	0,40
CV55	50% CP + 50% CV	0,55
CV75	50% CP + 50% CV	0,75
CV40c	50% CP + 50% CV + 20% cal	0,40
CV55c	50% CP + 50% CV + 20% cal	0,55
CV75c	50% CP + 50% CV + 20% cal	0,75

Como a intenção da pesquisa é a análise do comportamento dos concretos em condições de uso, estabeleceu-se que concretos a serem estudados seriam moldados em protótipos prismáticos com dimensões de 75 x 20 x 15 cm, de modo a aproximar esta peça a uma viga estrutural de uma obra.

A concretagem dos prismas foi realizada em formas de madeira sustentadas por uma armação metálica, presa e regulada por parafusos conferindo assim rigidez às faces da forma que era composta por chapas de compensado naval de 15 mm de espessura, encaixadas dentro da armação metálica. Para facilitar a desforma, foi aplicada uma fina camada de óleo queimado nas faces internas das formas.



FIGURA 6: Formas utilizadas

Antes da moldagem dos protótipos, foram realizados ensaios de trabalhabilidade para cada traço, onde foram verificados o abatimento e o tempo de remoldagem das misturas com o aparelho de VEBE, determinando-se também a dosagem inicial de aditivo superplastificante a ser utilizada, quando o mesmo era necessário para que o abatimento requerido fosse alcançado.

Para cada traço, foram moldados protótipos suficientes para os ensaios a que os mesmos foram submetidos e um suplementar para ensaios de carbonatação a serem realizados aos cinco anos de idade. Todos os protótipos foram moldados juntos, com o mesmo concreto e foram submetidos às mesmas condições de cura e exposição ambiental.

As quantidades de material dos traços definitivos utilizados estão listadas no quadro 3.

QUADRO 3 – Quantidade de materiais por m³ de concreto

Traço	a/mc	Materiais Cimentícios	Cimento	Cinza volante	Cal	Agregado graúdo	Agregado miúdo	Água	Aditivo
		(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(l/m ³)	(kg/m ³)
REF	0,45	427	427	-	-	1025	683	192	-
	0,60	319	319	-	-	1004	801	191	-
	0,80	238	238	-	-	977	899	190	-
CV	0,40	482	241	241	-	1075	491	192	1,45
	0,55	348	174	174	-	1054	656	191	0,29
	0,75	254	127	127	-	1004	807	190	0,42
CVc	0,40	560	280	280	112	1057	221	222	1,93
	0,55	404	202	202	81	1031	451	221	0,93
	0,75	294	147	147	59	977	649	221	-

Nesta pesquisa foi utilizado um protótipo e a escolha deste entre todos os moldados foi feita aleatoriamente. Os protótipos foram moldados em três camadas, sendo que cada camada foi adensada com um vibrador de imersão com agulha de 2,5 mm de diâmetro. Após a moldagem, a face superior foi mantida úmida por pelo menos quatro horas sendo efetuada a desmoldagem após 24 horas com os protótipos imediatamente colocados dentro de sacos de aniagem e então mantidos úmidos e armazenados ao abrigo do sol e vento por sete dias, no interior do laboratório. (Figura 7)



FIGURA 7 - Cura úmida (7 dias) dos protótipos em laboratório

Este período de cura úmida foi determinado em função do alto teor de cinza volante contido nas misturas, uma vez que esta adição é um componente do concreto que sofre influência significativa das variações da temperatura ambiental de exposição já que este concreto possui desenvolvimento de resistência mais lento. Julgou-se este período adequado, pois apesar de ser inferior ao recomendado pela ABNT para a cura do concreto em obra ele é efetivamente superior ao intervalo de dias destinado à cura nas obras correntes. Embora um período maior de cura ambiental origine maiores informações a respeito do comportamento das peças protótipos, o intervalo de tempo devido ao prazo disponível para término da pesquisa foi um fator preponderante na escolha dos intervalos de cura e exposição ambiental e, também, para comparar os resultados dos corpos de prova moldados com os extraídos, no ensaio de resistência à compressão. Além disso, as analogias e comparações entre as variáveis, em qualquer idade ou condições de cura, tem sido realizadas com ensaios de adições minerais aos 91 dias de idade havendo então a possibilidade de comparação, pois o que importa são os resultados

comparativos, sejam em que idades e condições em que forem realizados.

Após este período, os protótipos foram colocados ao ar livre, com seu eixo longitudinal orientado no sentido norte-sul, apoiados sobre roletes de concreto. Os protótipos ficaram armazenados e expostos às condições ambientais até a data das extrações dos testemunhos, que foi realizada aos 49 dias de idade para ensaios aos 91 dias, sendo que neste intervalo de tempo, foi realizado o pré-condicionamento dos corpos de prova, segundo a recomendação RILEM TC 116-PCD.

De cada prisma foram extraídos, com extratora de broca adiamantada do tipo copo e diâmetro 10cm, seis corpos de prova cilíndricos com 10cm de diâmetro e 20cm de altura. A extração foi realizada no sentido perpendicular ao da concretagem e os corpos de prova foram fracionados em discos de 5cm de altura a partir da profundidade a ser estudada, a saber:

- ◆ *Camada 1:* de 0,0 cm à 1,0 cm;
- ◆ *Camada 2:* de 2,5 cm à 3,5 cm;
- ◆ *Camada 3:* de 5,0 cm à 6,0 cm

As fotos 8 à 11 detalham o processo de extração e corte dos testemunhos.

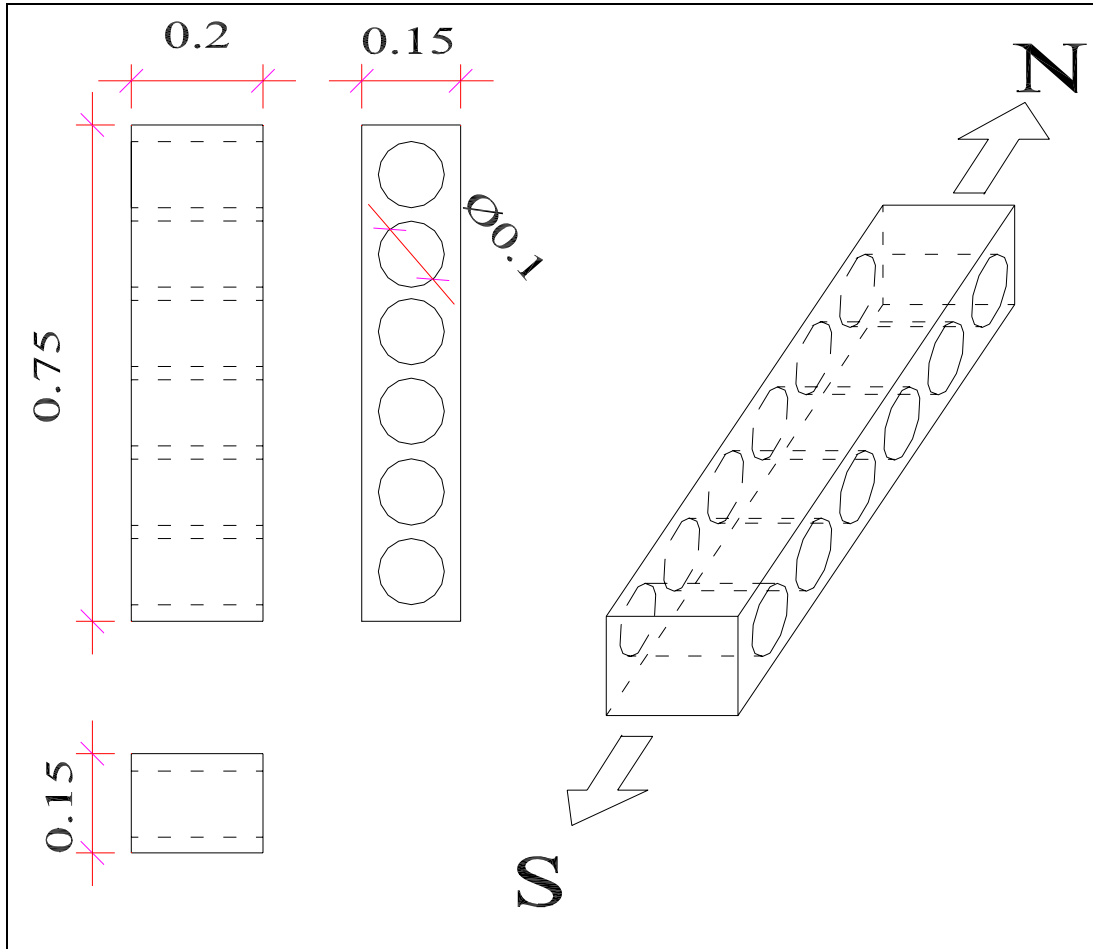


FIGURA 8 – Dimensões e furos dos protótipos



FIGURA 9 - Extração dos testemunhos

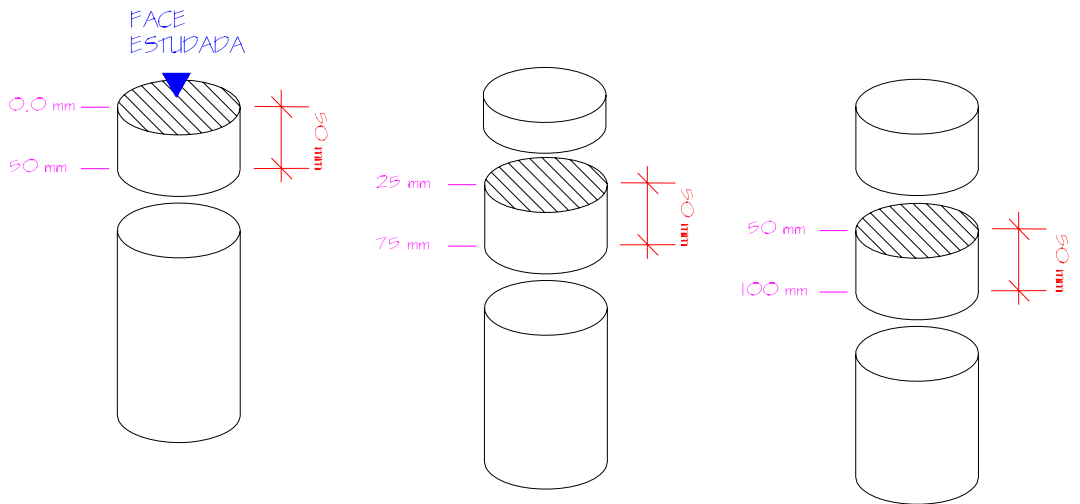


FIGURA 10 - Marcação para o corte dos testemunhos



FIGURA 11 - Corte dos testemunhos

4.4. Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais utilizados na pesquisa é importante, pois registra as características que têm influência sobre o comportamento do concreto tanto no estado fresco quanto no endurecido e são, portanto, essenciais para a reprodutibilidade dos ensaios realizados.

4.4.1. Aglomerantes

Nesta pesquisa utilizou-se cimento de alta resistência inicial (ARI) CP V e cinza volante (CV). O cimento tipo ARI foi escolhido por fornecer maior teor de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 (C-H) após a hidratação, devido à maior quantidade de silicato tricálcico, C_3S em sua composição, e por conter maior quantidade de clínquer e conseqüente menor teor de adições em sua composição. Os ensaios de caracterização física e

química do cimento estão relacionados abaixo e as características encontradas estão no quadro 4.

- ◆ Finura # 0,075 mm – NBR 11579
- ◆ Tempo de pega – NBR 11581
- ◆ Análise química – NBR 5743, 5744, 5745, 5747, 7227 e 9203
- ◆ Superfície específica Blaine – NBR 7224
- ◆ Massa específica – NBR 6474
- ◆ Resistência à compressão da argamassa normal – NBR 7215

QUADRO 4 – Caracterização física e mecânica do cimento

Cimento	(CPV-ARI)
Resistência (MPa) – 1 dia	27,98
Resistência (MPa) – 3 dias	33,53
Resistência (MPa) – 7 dias	41,33
Resistência (MPa) – 28 dias	50,40
Massa específica (g/cm ³)	3,156
Finura Blaine (m ² /Kg)	436
Finura # 0,075 (mm)	0,25
Tempo de início de pega (min.)	144
Tempo de fim de pega (min.)	225

A pozolana utilizada foi a cinza volante (CV) moída, proveniente de uma usina termoeletrica situada no município de Candiota/RS. Após o recebimento da cinza, a mesma passou por um processo de secagem, moagem e peneiramento. A moagem foi executada em moinho de bolas, por 30 minutos, com a finalidade de aumentar a finura da cinza, uma vez que esta exerce influência na performance do concreto que é proporcional

ao aumento da finura da cinza (ACI, 1997) e, conforme Jawed *et al apud* Isaia (1995), a finura da CV é prioritária sobre a sua composição química em relação a sua atividade e aumento da resistência em concretos e argamassas. Os ensaios de caracterização física e química da cinza volante realizados foram:

- ◆ Massa específica – NBR 6474
- ◆ Finura Blaine – NBR 7224
- ◆ Análise química – procedimento IPT

Os resultados obtidos para a caracterização física e química da cinza volante utilizada estão no quadro 5 e 7, respectivamente.

QUADRO 5 – Caracterização física e mecânica da cinza volante

Cinza Volante		(CV)
Massa específica (g/cm ³)	2,15	
Finura Blaine (m ² /Kg)	361	

4.4.2. Cal Hidratada

Nos traços com adição de cal, foi utilizada cal hidratada industrializada do tipo cálcica (maior teor de cálcio), fornecida pronta para o uso pela ICAL – Indústria de Calcinação Ltda, de Minas Gerais. A cal foi considerada como adição aos demais aglomerantes no processo de dosagem e foi caracterizada conforme os ensaios abaixo.

- ◆ Retirada e preparação da amostra – NBR 6471
- ◆ Análise química – NBR 6473

- ◆ Massa específica – NBR 6474
- ◆ Finura Blaine – NBR 7224

O quadro 6 apresenta as características físicas da cal e o quadro 7, a composição química dos aglomerantes e da cal hidratada.

QUADRO 6 – Caracterização física da cal hidratada

Cal Hidratada	
Massa específica (g/cm ³)	2,34
Finura Blaine (m ² /Kg)	900

QUADRO 7 - Composição química dos aglomerantes e da cal hidratada

Composição química	Teor em massa (%)		
	CPV-ARI	Cinza Volante	Cal Hidratada
Perda ao Fogo	2,99	1,16	26,12
SiO ₂	19,33	64,57	0,87
Al ₂ O ₃	4,74	27,27	0,37
Fe ₂ O ₃	3,01	2,21	0,16
CaO	63,39	1,51	73,07
MgO	1,79	0,76	0,37
SO ₃	3,07	0,06	0,17
Na ₂ O	0,07	0,15	0,09
K ₂ O	0,85	1,50	

4.4.3. Agregados

O agregado miúdo utilizado foi areia natural de origem quartzosa,

proveniente de Santa Maria/RS, peneirada na peneira 4,8mm, seca em estufa e armazenada em caixas de madeira com tampa. Esta areia pertencente à zona 3, de acordo com a distribuição dos grãos dentro dos limites da NBR 7211.

O agregado graúdo era proveniente de rocha diabásica britada de Itaara/RS e classificado como brita 1 e foi utilizada a fração passante na peneira 19,0 mm e retida na peneira 6,3 mm. Posteriormente foi lavado, seco em estufa e estocado em caixa de madeira fechada. A determinação das características físicas dos agregados baseou-se nos ensaios normalizados citados abaixo cujos resultados estão no quadro 8.

- ◆ Composição granulométrica – NBR 7217
- ◆ Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776
- ◆ Massa específica do agregado graúdo – NBR 9937
- ◆ Absorção de água do agregado graúdo – NBR 9937
- ◆ Massa unitária solta – NBR 7251
- ◆ Abrasão Los Angeles – NBR 6465
- ◆ Índice de forma pelo método do paquímetro – NBR 7809
- ◆ Massa unitária compactada – NBR 7810
- ◆ Inchamento do agregado miúdo – NBR 6467

(Quadro 8)

4.4.4. Aditivo superplastificante

Para obtenção do abatimento especificado (100 ± 20 mm), em alguns traços usou-se aditivo superplastificante. O aditivo selecionado para a pesquisa foi o GLENIUM 51 (MBT) e a dosagem inicial a ser utilizada foi determinada em ensaios de trabalhabilidade com o aparelho de VEBE. A

porcentagem de aditivo foi calculada em relação à massa de materiais cimentícios.

Este aditivo possui base em cadeia de éter carboxílico modificado, isento de cloretos, com PH de 5 à 7, teor de sólidos médio de 30% e massa específica de 1,10 g/cm³. A adição deste produto foi feita conforme especificações da empresa fabricante e a quantidade de material por metro cúbico de concreto foi apresentada na Tabela 1.

QUADRO 8 – Características físicas dos agregados

Peneiras (mm)	% retida dos agregados	
	Brita 1	Areia zona 3
19,0	1	---
12,5	36	---
9,5	76	---
6,3	98	---
4,8	100	---
2,4	100	1
1,2	100	3
0,6	100	21
0,3	100	74
0,15	100	90
< 0,15	100	100
Módulo de Finura	6,76	1,89
Diâmetro máximo (mm)	19,00	1,2
Massa específica (kg/dm ³)	2,49	2,63
Massa unitária solta (kg/dm ³)	1,28	1,65
Massa unitária compactada (kg/dm ³)	1,40	---
Absorção de água (%)	1,60	0,50
Índice de forma	2,93	---
Abrasão Los Angeles (%)	18,80	---
Coefficiente de inchamento médio	---	1,31
Umidade crítica (%)	---	2,1

4.4.5. Pré-condicionamento dos corpos de prova

O pré-condicionamento dos corpos de prova foi executado segundo a recomendação RILEM TC 116-PCD (RILEM, 1999) como pré-requisito para os ensaios a serem realizados e visa dotar os corpos de prova de uma concentração de umidade em equilíbrio e com distribuição uniforme de água evaporável. A sala climatizada possuía $(75 \pm 2)\%$ de umidade relativa e temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Após a realização da desmoldagem os protótipos recebiam cura úmida por sete dias, e depois eram expostos por 49 dias às condições ambientais, conforme descrito anteriormente. Partindo-se da idade escolhida para o ensaio (91 dias), adotou-se o tempo de cura ambiental de 49 dias, conforme esquema proposto por Frizzo (2001): subtrair-se, da idade de ensaio, de forma retroativa os prazos necessários para a realização do experimento. As fases do mesmo e seus prazos estimados são: redistribuição da umidade (14 dias), pré-secagem (10 dias), determinação dos parâmetros de pré-secagem (10 dias), selagem lateral (3 dias), corte (1 dia), havendo um excesso de 4 dias para possíveis imprevistos, que eram acrescentados ao período de redistribuição da umidade quando não utilizados. Para o ensaio de difusão foi realizada a selagem da face superior dos corpos de prova, após a redistribuição da umidade de modo a não alterar as condições de pré-condicionamento.

Do prisma moldado foram extraídos seis testemunhos que, foram serrados de modo a obter-se três testemunhos circulares com altura de 5cm e diâmetro de 10cm para cada camada pesquisada, ou seja, nove testemunhos por ensaio de cada traço, além dos testemunhos utilizados para gerar os parâmetros de pré-condicionamento, que foram retirados de outro prisma, tendo sido ambos moldados na mesma oportunidade, com o mesmo concreto e submetidos as mesmas condições de cura e armazenamento. Os testemunhos a serem ensaiados foram identificados,

pesados e pintados na face lateral com três demãos de verniz poliuretânico, tornando-se impermeáveis nesta superfície. As faces superior e inferior foram mantidas 'in natura' de modo a permitir o fluxo de água no sentido longitudinal. Após foram estocados na sala climatizada até o início da pré-secagem controlada.

Os parâmetros de pré-condicionamento foram obtidos com dois testemunhos, um colocado em estufa à 105⁰C, até atingir peso constante, com variação de 0,5g em 24h, o que acontecia num intervalo de tempo variável de 3 à 10 dias. O outro testemunho era triturado até se obter um peso próximo à 650g com partículas de tamanho variável entre 5mm e 2mm. A seleção deste material era feita com peneira e o mesmo era colocado em bandeja na sala climatizada até atingir peso estável com variação máxima de 0,1g, em sucessivas pesagens diárias, demandando um tempo aproximado de 3 à 5 dias. Após, a bandeja com material era levada a estufa a 105⁰C e, a cada 24h, era realizada a pesagem, até obter-se peso constante com variação máxima de 0,1g, o que ocorria em 3 ou 4 dias.

A seguir calculava-se as concentrações de água evaporável total e a concentração da umidade de equilíbrio a 75% de umidade relativa do ar, determinando-se a variação de peso dos corpos de prova para a pré-secagem. A variação de peso necessária era atingida através de molhagens ou da colocação do testemunho em estufa ventilada, a 50⁰C, com monitoramento diário, sendo permitida uma variação máxima de 5% em relação a diferença determinada; esta etapa demandava de 1 a 7 dias.

Na próxima etapa, realizava-se a selagem dos corpos de prova em camadas seqüenciais de filme de polietileno (PVC), saco de polipropileno selado à quente e saco de filme de polietileno e alumínio, utilizado em indústrias de café moído. Deste modo ficava impedida a perda de massa dos testemunhos, por evaporação, durante a fase de redistribuição da umidade que consistia em manter os mesmos por um período mínimo de 14 dias, à temperatura de 50⁰C, sem trocas externas. A temperatura de

50° C acelera a redistribuição do gradiente de umidade axial no sentido de obter-se uma distribuição homogênea da umidade por todo o corpo de prova.

Manteve-se os corpos de prova nesta situação até 24h antes do ensaio e então transferiu-se os mesmos para a sala climatizada, sendo mantidos selados até o momento de realização do ensaio.

4.4.6. Ensaio de absorção capilar de água

O ensaio de absorção capilar de água foi realizado segundo a recomendação RILEM TC 116-PCD (RILEM, 1999), tendo os corpos de prova preparados com pré-condicionamento conforme descrito acima. Após a retirada da selagem, os corpos de prova era pesados e medidos na altura e no diâmetro, em pontos defasados de 90°, sendo anotados os valores médios encontrados.

O ensaio ocorria conforme esquema da figura 12 com os corpos de prova imersos em água com temperatura mantida em $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ até a profundidade de 3mm para que ocorra a ascensão vertical do líquido no interior do material.

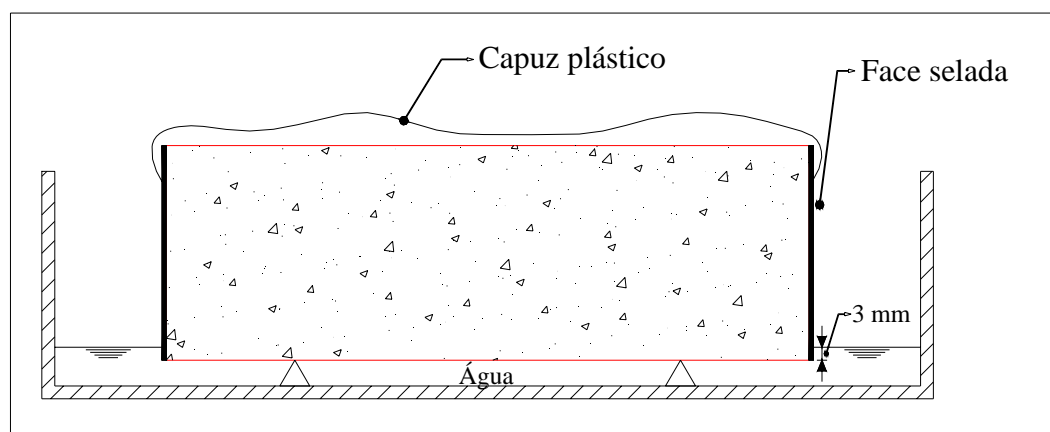


FIGURA 12 - Esquema do ensaio de absorção capilar de água.

A lateral dos corpos de prova encontrava-se selada com verniz e a face superior era protegida por touca plástica, conforme estabelece a Recomendação citada. O controle da ascensão de água era realizado através de sucessivas pesagens dos corpos de prova em intervalos de tempo de 10min, 1h, 4h e 24h, sendo que antes de cada pesagem a superfície em contato com a água era enxugada levemente com um pano.

O progresso da absorção de água de cada testemunho era registrado e, para cada intervalo de tempo, calculado pela expressão 2:

$$W(t) = m(t) - m_0 \quad (2)$$

onde: W = diferença de massa do testemunho no tempo considerado

m_t = massa do testemunho no tempo considerado

m_0 = massa inicial do testemunho

A absorção capilar de água foi expressa massa de água absorvida por unidade da área de entrada (g/cm^2), conforme a Recomendação. Nesta pesquisa foram considerados apenas os valores obtidos no período final, ou seja, 24h.

4.4.7. Ensaio de difusão de água

Este ensaio foi realizado com base em um método apresentado por Isaia (1995) em sua tese de doutorado que, por sua vez, seguiu as diretrizes propostas por Dan *et al* (1988), publicadas pelo CSTB. Neste trabalho optou-se por denominar este ensaio de difusão de água, por apresentar resultados expressos nas mesmas unidades de outros ensaios que determinam o coeficiente de difusão iônica, como o de cloretos. Os resultados deste ensaio indicam a aceleração (m/s^2) com que a água

penetra no testemunho através do aumento de sua massa quando imerso em água.

Os corpos de prova colocados em estufa a 110°C e pesados diariamente até que tenha sido estabelecida a constância de peso (peso seco); para isto determinou-se que a variação entre duas pesagens consecutivas não poderia exceder 1g. A diferença entre os pesos saturado e seco foi admitida como sendo a máxima porcentagem que o testemunho consegue absorver de água.

Os testemunhos foram ensaiados imersos em água dentro de uma cesta metálica acoplada a uma balança hidrostática de precisão, conforme o esquema da figura 12 e os tempos de pesagens foram pré-estabelecidos e fixados em 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420 e 480 minutos e ainda, 24, 48 e 72h; sendo que a diferença entre as duas pesagens finais não poderia ultrapassar 1g; se isso ocorresse o corpo de prova seguiria sendo ensaiado até atingir tal estabilidade. As leituras efetuadas foram tabelas conforme o modelo de planilha no anexo 1.

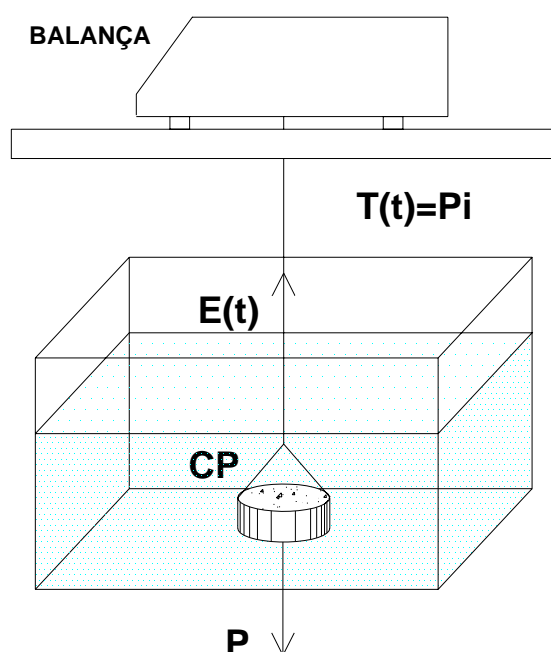


FIGURA 13 – Esquema do ensaio de difusividade de água

Com os resultados obtidos foi plotado gráfico conforme o modelo abaixo (figura 14) e foram selecionados os pontos que se alinharam em uma reta, significando uma constância na velocidade com a qual a água penetra no testemunho. A partir do gráfico, com a expressão 3 se calculou o coeficiente de difusividade, em m/s^2 para cada traço estudado. Todos os ensaios foram realizados com dois testemunhos por camada analisada e adotou-se o valor médio obtido como valor representativo da camada quando a dispersão foi inferior a 5% e, caso contrário, adotou-se o valor mais coerente eliminando-se o outro através de regressão estatística.

$$K = (\pi \cdot a^2 / 16) \times (h/Mm)^2 \quad (3)$$

onde: K = coeficiente de difusão procurado (m/s^2)

a = coeficiente angular da reta y

h = altura do corpo de prova, em metros

Mm = porcentagem máxima de água absorvida pela mistura

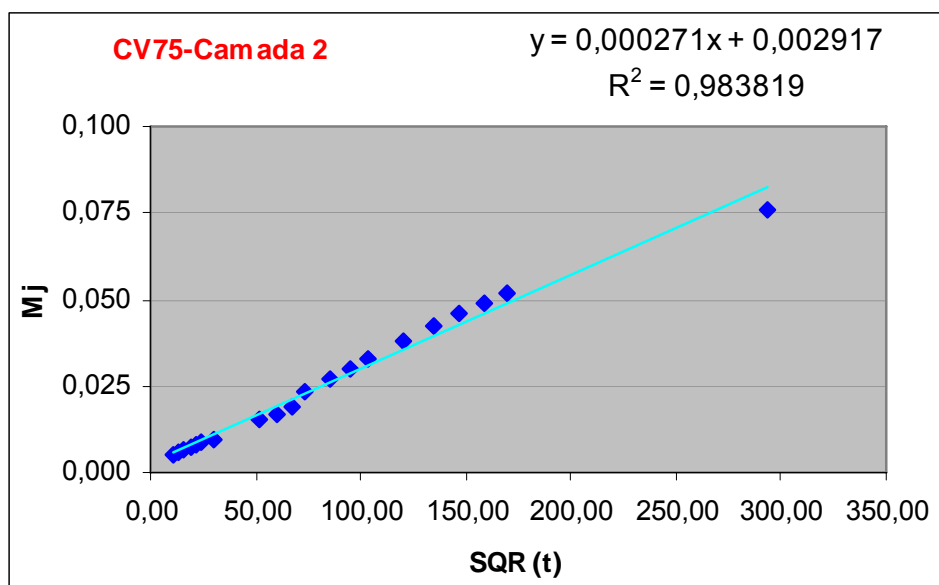


FIGURA 14 – Mistura CV75 – camada 2. Gráfico e equação do ensaio de difusividade

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios foram realizados de modo similar e independente para cada uma das seis misturas investigadas a fim de que a análise comparativa entre resultados obtidos, com os diferentes materiais cimentícios, pudesse ser realizada. A mistura sem adições minerais, denominada referência, forneceu os parâmetros para a comparação das propriedades deste concreto com os demais. A adição de cal hidratada e a conseqüente reposição de hidróxido de cálcio torna-se o diferencial entre as misturas, ou seja, tem-se além da mistura de referência duas outras com aglomerantes diferentes e, moldadas com e sem a incorporação de fonte externa de hidróxido de cálcio, o que propõe análises comparativas, de modo a se discutir resultados obtidos frente à durabilidade

Para cada mistura pesquisada foram realizados, aos 91 dias de idade, os ensaios de absorção capilar de água e difusividade de água. As análises de todos os resultados foram realizadas nas relações $a/mc = 0,40$ e $0,75$ sendo que para isto utilizou-se regressão estatística pela equação de Abrahms com os resultados dos traços de referência com $a/mc = 0,45$ e $0,80$.

Os valores analisados são a média dos resultados obtidos nos ensaios, quando o desvio médio relativo do ensaio foi inferior à 5%, caso contrário, quando a dispersão foi mais elevada, foram expurgados os valores discrepantes e tomados os mais coerentes.

Como o objeto de estudo deste trabalho são as três camadas do concreto de cobertura anteriormente especificadas, comparou-se os resultados dos ensaios das três profundidades de um mesmo traço e entre as diferentes misturas. Ainda foi efetuada a análise dos ensaios em igualdade de resistência em 30MPa e 55 MPa representando o concreto usual e o de alto desempenho, respectivamente. Os cálculos foram realizados diretamente por interpolação da equação de potência, entre as resistências de cada traço ($a/mc = 0,40$ e $0,75$ ou $0,45$ e $0,80$) com os valores obtidos, em cada camada, para os ensaios de difusividade ou absorção de água.

5.1. Resistência à compressão

Sendo esta investigação parte de um projeto global de pesquisa serão utilizados dados do ensaio de resistência à compressão de Silveira (2004) para complementar a discussão e argumentação dos resultados aqui obtidos.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 28 e aos 91 dias de idade, em corpos de prova moldados e curados em câmara úmida e também em corpos de prova extraídos de protótipos que sofreram cura ambiental, sendo que para este ensaio foram incluídas as misturas R60 e CV55, que respectivamente, indicam o concreto de referência com $a/mc=0,60$ e o concreto com cinza volante em teor de 50% sem e com adição de cal hidratada e $a/mc=0,55$. Os corpos de prova e os protótipos foram moldados em conjunto com os utilizados nesta pesquisa, de modo que sejam originários do mesmo concreto.

Em função dos resultados dos ensaios realizados, serem analisados em igualdade de relação água/materiais cimentícios e de resistência à compressão, são apresentados os valores resultantes dos ensaios de resistência à compressão, realizados aos 91 dias, para os testemunhos extraídos dos protótipos. Estes dados, compilados e analisados em pesquisa complementar a esta, embora não façam parte do objeto primordial desta investigação, são fundamentais para a interpretação contextualizada dos valores resultantes nos ensaios de percolação de água através dos poros da camada de cobrimento.

Na tabela 1 estão indicados tanto os dados originais do traço de referência ($a/mc=0,45$, $0,60$ e $0,80$) como os calculados através de regressão, por intermédio da equação de Abrahms, para efeito de comparação com os demais traços com cinza volante, ($a/mc=0,40$, $0,55$ e $0,75$).

TABELA 1 – Resistência à compressão aos 91 dias

Traço	Resistência - 91d
R40*	88,9
R45	75,5
R55*	53,3
R60	44,1
R75*	32,4
R80	30,0
CV40	50,6
CV55	34,7
CV75	15,0
CV40c	57,1
CV55c	37,4
CV75c	19,5

* valores obtidos por regressão estatística

O comportamento dos concretos em relação à resistência seguiu, de modo geral, dois princípios bem conhecidos da tecnologia do concreto: a resistência à compressão do concreto aumenta com a diminuição do fator a/mc e a adição de cinza volante promove um retardamento do desenvolvimento da resistência do concreto.

Ainda observa-se que a adição de cal ao concreto com cinza volante promoveu índices de resistência ligeiramente maiores que os traços com cinza volante sem cal sendo este comportamento justificado pelo fato da adição de cal proporciona uma retenção de água que fica disponível para a hidratação e cura do concreto, resultando assim em resistências entre 8% e 27% superiores do que as obtidas nos traços sem cal.

5.2. Estrutura dos poros da camada de cobrimento

A percolação de água está diretamente relacionada com o diâmetro crítico e distribuição dos poros (item 3.3) de modo que o conhecimento destes é peça fundamental para a interpretação dos resultados. Os resultados apresentados na tabela 2 são justificados na dissertação de Silveira (2004) e são derivados de ensaio realizado com testemunhos extraídos de protótipos moldados e curados juntamente com os protótipos utilizados nesta pesquisa, ou seja, são originários do mesmo concreto.

(Tabela 2)

Observa-se que para todos os traços que a porcentagem de poros com diâmetros maiores que 50 nm diminui à medida que a profundidade aumenta, fato que indica uma maior porosidade na superfície do concreto, revelando assim a existência do 'efeito parede', causado pelo acúmulo de água na interface forma/concreto (item 2).

Em relação a adição de cinza volante comprovou-se a diminuição do tamanho dos poros que a pozolana acarreta tanto por seu efeito químico como pela sua atuação como filler inerte pois, todos os traços esta adição apresentam menor porcentagem de poros grandes ($\Phi > 50\text{nm}$) nas três profundidades estudadas, em comparação com o traço de referência (item 2).

Em relação ao traço com cinza volante e cal, também houve um significativo refinamento da dimensão dos poros, muito acima do observado no traço de referência, porém não tão acentuado quanto no traço sem cal, com exceção na camada 1, em que apresentou o menor teor de poros menores que 50 nm. A diminuição dos poros no traço com reposição de hidróxido de cálcio é de magnitude suficiente para garantir um bom desempenho ao concreto, lembrando que a adição da cal, por fornecer um teor elevado de hidróxido de cálcio mais elevado, pode melhorar o desempenho à carbonatação.

TABELA 2 – Distribuição das dimensões dos poros por intrusão de mercúrio aos 91 dias

Mistura	a/mc	Camada	Ø Crítico (nm)	Poros do gel Ø < 10 nm (%)	Mesoporos 10 < Ø < 50 nm (%)	Macroporos Ø > 50 nm (%)	Mesoporos + Macroporos (%)
Referência	0,40	1	97	14,0	13,4	72,6	86,0
		2	100	15,2	12,7	72,1	84,8
		3	73	16,7	28,8	54,5	83,3
	0,75	1	148	4,9	20,3	74,8	95,1
		2	136	7,2	18,7	74,1	92,8
		3	84	10,0	24,7	65,3	90,0
Cinza Volante	0,40	1	80	20,0	52,0	28,0	80,0
		2	55	23,3	55,4	21,3	76,7
		3	40	30,0	58,7	11,3	70,0
	0,75	1	175	5,1	38,0	56,9	94,9
		2	170	10,2	39,7	50,1	89,8
		3	155	19,1	35,0	45,9	80,9
Cinza Volante + Cal	0,40	1	90	19,8	43,5	36,7	80,2
		2	80	22,8	43,5	33,7	77,2
		3	70	28,0	44,2	27,8	72,0
	0,75	1	110	8,2	42,3	49,5	91,8
		2	90	13,0	40,1	46,9	87,0
		3	80	19,7	37,4	42,9	80,3

5.3. Absorção Capilar de água

Os testemunhos foram ensaiados em grupo de três para cada traço e a massa de água absorvida por área (g/m^2) foi o resultado obtido para cada corpo de prova em 24 horas de ensaio, conforme a tabela 3.

A figura 15 representa a absorção capilar em cada camada para as misturas estudadas e a variação da absorção com o aumento da profundidade estudada.

TABELA 3 - Absorção capilar de água Q (24h) aos 91 dias e variação com a profundidade

Mistura	a/mc	Camada	Absorção Capilar Q (g/m ²)	ΔQ (g/m ²)	% ΔQ
Referência	0,40 *	1	1890	- 124	- 7
		2	1821		
		3	1766		
	0,45	1	2151	- 101	- 5
		2	2176		
		3	2050		
	0,75 *	1	5221	- 1310	- 25
		2	4706		
		3	3911		
	0,80	1	5792	- 1549	-27
		2	5188		
		3	4243		
Cinza Volante	0,40	1	2470	- 532	- 22
		2	2066		
		3	1938		
	0,75	1	7572	- 1295	- 17
		2	6669		
		3	6277		
Cinza Volante + Cal	0,40	1	1773	- 334	- 19
		2	1668		
		3	1439		
	0,75	1	5898	- 1342	- 23
		2	4951		
		3	4556		

* valores calculados por regressão

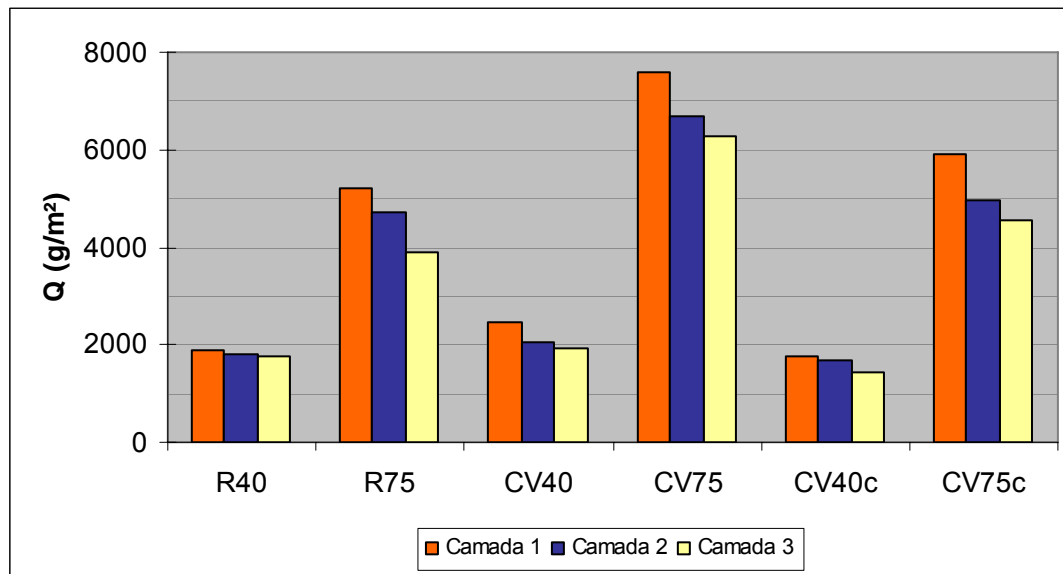


FIGURA 15 - Quantidade de água absorvida Q (g/m^2) nas camadas do cobrimento

Analisando a relação exposta através da figura 15 pode-se observar que, aos 91 dias, os resultados apontam para uma maior quantidade de água absorvida nas camadas superficiais da cobertura do concreto independentemente do tipo de mistura ou da relação a/mc utilizados. Analisando a variação entre as duas primeiras camadas de cada traço, a absorção varia 16% para os concretos CV40 e CV75c, sendo menos significativa para os demais traços. No geral, as variações são mais significativas entre as duas camadas mais externas, mas a comparação entre as camadas 1 e 3 revelam as variações que chegam a ordem de 25% (R75) e 27% (R80).

A influência do uso das adições minerais e da relação a/mc pode ser averiguada pela figura 16 que retrata a absorção para todas as misturas em cada camada isoladamente.

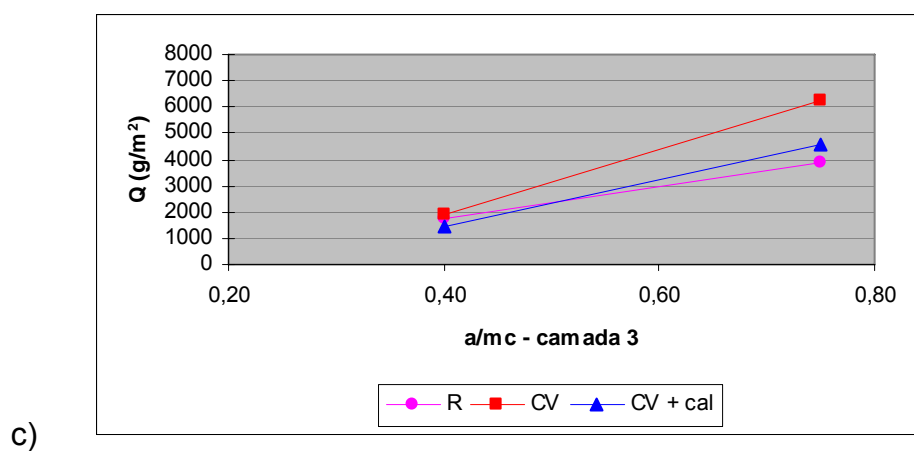
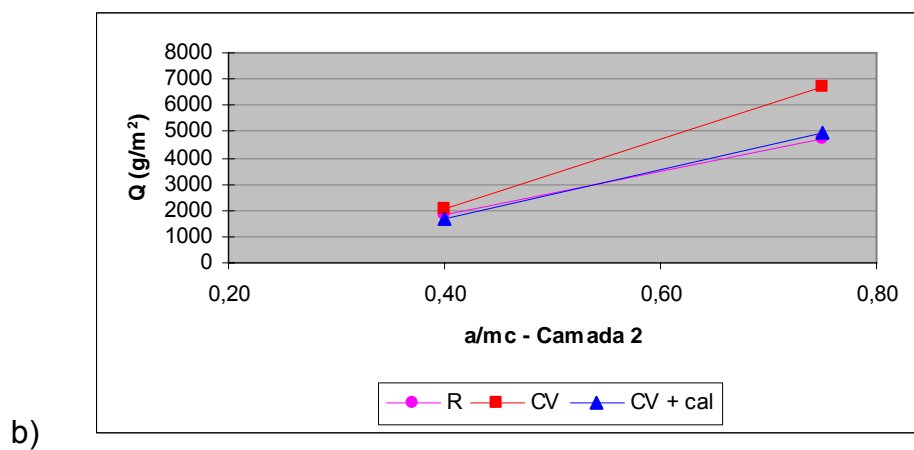
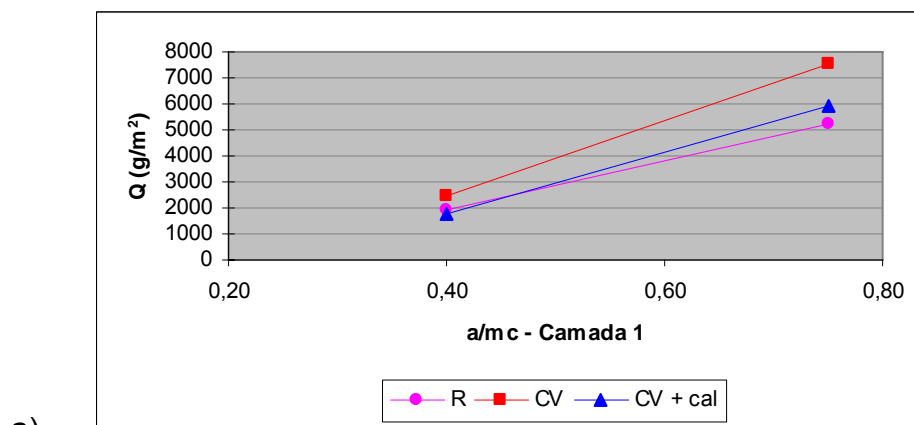


FIGURA 16 – Absorção capilar nas camadas 1 (a); 2 (b) e 3 (c)

A análise dos gráficos acima permite afirmar que, a adição isolada de cinza volante no teor estudado não se revelou benéfica para o concreto sob a perspectiva da absorção capilar, pois em todos os casos a pozolana ocasionou crescimento desta variável, em relação ao concreto de referência; sendo este efeito mais evidente nos concretos com maior relação a/mc. Para os concretos de a/mc=0,40 na camada 1 a presença da cinza volante (CV40) ocasionou uma absorção de água 30% maior, sendo o aumento nas demais camadas pouco significativo. Para os concretos com a/mc=0,75 os aumentos na absorção de água variaram entre 41% e 60%, sendo o pior resultado obtido para a camada 3.

Em contrapartida, o uso concomitante de CV e cal hidratada pode ser considerado benéfico, pois em todos os casos as quantidades de água absorvida diminuíram consideravelmente quando em comparação com o uso isolado da CV e, em alguns casos, mesmo em comparação com o concreto de referência houve queda na absorção de água. A adição de cal nos concretos binários ocasionou redução da absorção de 19% à 28% quando comparados aos concretos binários sem cal hidratada, sendo a influência desta adição igualmente significativa para todos os traços, conforme a tabela abaixo.

TABELA 4 – Influência da adição de cinza volante e cal hidratada

Traço	a/mc.	Camada	Absorção Capilar Q		ΔQ (g/m ²)	ΔQ (%)
			SEM Cal (g/m ²)	COM Cal (g/m ²)		
CV	0,40	1	2470	1773	- 697	- 28
		2	2066	1668	- 398	- 19
		3	1938	1439	- 499	- 26
CV	0,75	1	7572	5898	- 1674	- 22
		2	6669	4951	- 1718	- 26
		3	6277	4556	- 1721	- 27

5.3.1 Absorção Capilar X Dimensão dos poros

A análise da absorção capilar em relação das camadas de cada mistura (tabela 3) em conjunto com os dados da distribuição dos poros confirma a existência do 'efeito parede' entre a forma e a pasta, gerando uma região de concreto mais porosa, com poros de maior diâmetro e interconectados, conseqüentemente, com maior capacidade de absorver água na camada mais externa do revestimento.

Os referidos valores apontam a predominância de macro e mesoporos nesta camada, ou seja, na camada 1, num total nunca inferior a 80% dos poros (CV40); ou seja, na primeira camada investigada existe a maior concentração de poros responsáveis pela permeabilidade (item 3.1), independentemente da relação a/mc e da mistura testada. A maior absorção de água que ocorre na primeira camada do revestimento é explicada pelo maior diâmetro crítico dos poros na mesma, que é o valor a partir dos quais os poros se tornam conectados e formam canais por onde se torna possível a passagem da água.

Na análise da influência da presença de cal hidratada nos concretos (tabela 4), todos os traços apresentaram porcentagens semelhantes na redução da absorção apesar do efeito da mesma ser mais significativo para os concretos de maior relação a/mc que sofrem maior refinamento dos poros (maior teor de C-S-H) devido a presença da cal. Essa maior influência para os concretos de a/mc=0,75 é averiguada através da considerável redução do diâmetro crítico e da porcentagem de poros capilares ($\Phi > 10\text{nm}$) em todas as camadas destes concretos.

Com relação à absorção capilar e a distribuição dos poros, a classificação dos concretos sob a forma de um ranking comparativo não é indicada pois, a mesma não pode ser interpretada de modo estanque, rígido já que a absorção depende prioritariamente dos poros do concreto que estão em contato com o meio ambiente e interconectados; ou seja, pode-se inferir que a porosidade aberta dos concretos com maior índice de absorção capilar crítica tende a ser maior que os demais, independentemente da soma de meso e

macroporos acompanhar esta tendência. Em termos classificatórios é possível admitir que os concretos com menor relação a/mc apresentam menor influência da ação da água e agente deletérios por ela introduzidos no concreto, uma vez que sempre absorveram menor quantidade de água que os de maior relação a/mc .

Sendo o diâmetro crítico o valor a partir do qual os poros são interconectados, permitindo assim a percolação de água, é esperado que haja uma forte dependência entre ambas as variáveis (relação causa-efeito) e que esta seja mais acentuada que a dependência entre o valor total de poros capilares presentes e a absorção, já que o movimento de água depende essencialmente da conexão dos poros e não apenas do tamanho dos mesmos. A existência destas relações é comprovada através das figuras 17 e 18 que contém dados de todos os traços analisados com as respectivas equações de regressão linear, confirmando a veracidade das suposições acima. Além disso, o coeficiente angular das retas, indica que a dependência entre as variáveis é maior para o caso do diâmetro crítico do que para a soma de meso e macroporos, ou seja, poros capilares com $\Phi > 10\text{nm}$.

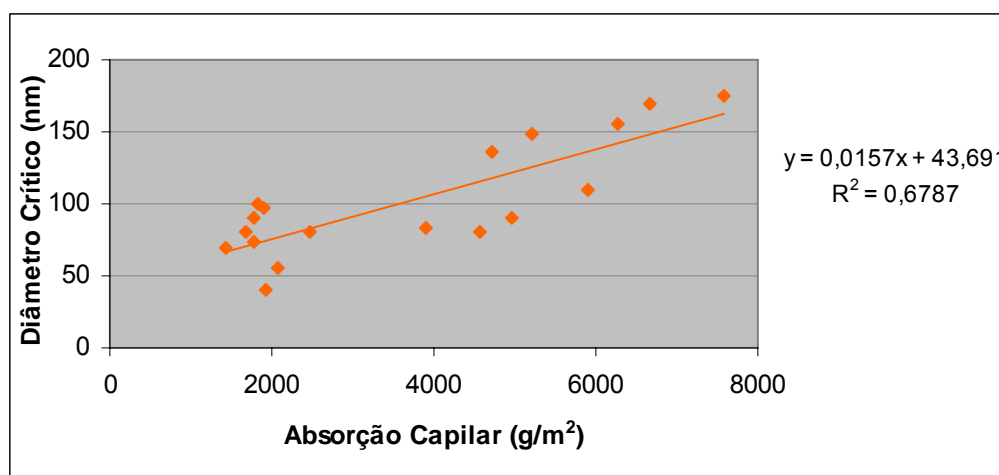


FIGURA 17 – Diâmetro Crítico x Absorção Capilar aos 91 dias

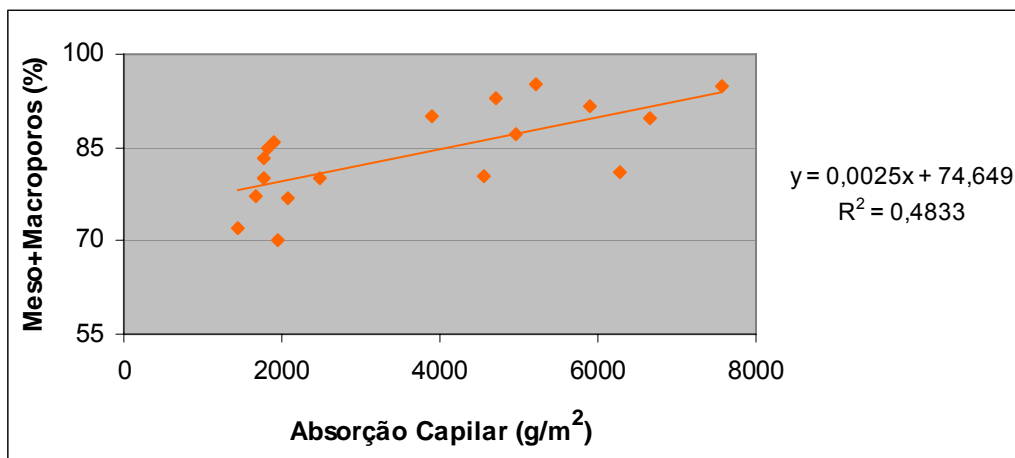


FIGURA 18 – Meso+macroporos x Absorção Capilar aos 91 dias

A figura 19 relaciona a porcentagem de poros do gel e absorção capilar, ilustrando portanto a situação complementar a da figura 18.

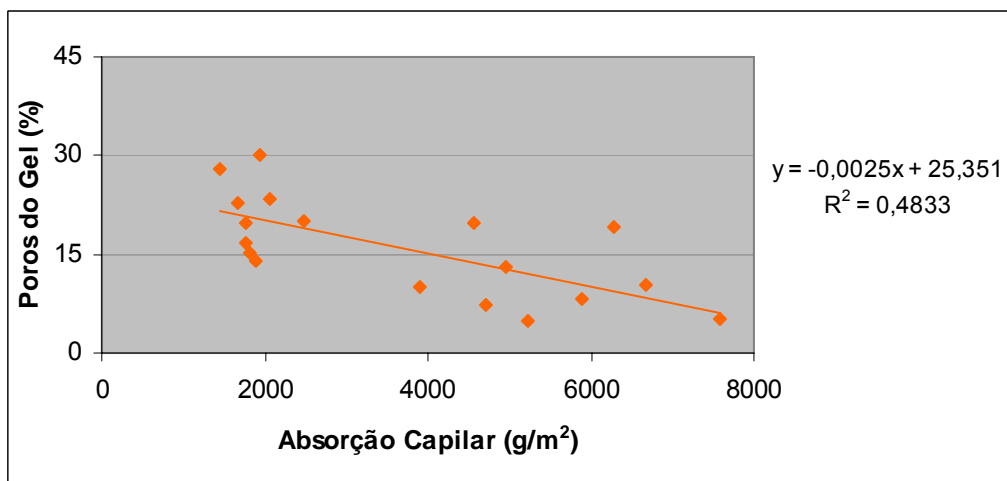


FIGURA 19 – Poros do gel x Absorção Capilar aos 91 dias

A comparação das duas situações acima ilustradas confirma, através da análise das tendências, que são os poros acima de 10nm que influem na permeabilidade da água conforme colocado anteriormente (item 3.1), pois o valor da absorção aumenta pra maiores concentrações de meso e macroporos,

sendo que a reta representativa da situação que envolve os poros do gel tem coeficiente angular negativo, ou seja, para menores quantidades de poros do gel tem-se os maiores valores de absorção capilar.

5.3.2 Comparação dos resultados com trabalhos semelhantes

As análises anteriores sobre a influência da cinza volante no concreto são discordantes das observações realizadas por Frizzo (2001), que entre outras adições pesquisou a substituição de cimento por 25% e 50% de cinza volante, com diferentes finuras e cura dos corpos de prova na câmara úmida, utilizando relações $a/mc = 0,35; 0,50$ e $0,65$ e concluindo que a presença de adições minerais sempre acarretou menor absorção de água.

Os resultados desta pesquisa que acusam o aumento da absorção capilar nos concretos binários com altos teores de CV quando comparados aos de referência, também são relatados por Hoppe Filho (2002) que pesquisou concretos binários com cinza volante em teor de até 50% e relações a/mc variáveis de $0,35$ a $0,55$. Em relação ao papel da cal hidratada as conclusões são concordantes com as de este autor: “(...) o decréscimo nas relações água/aglomerantes possibilita o emprego de altos teores de adições minerais juntamente com a cal hidratada, dotando os concretos de características intrínsecas particulares que resultam em desempenho desejável frente à durabilidade” (p.130).

Nos corpos de prova ensaiados foi realizado processo de pré-condicionamento a partir dos 49 dias com cura úmida através de sacos de aniagem molhados por 7 dias e cura ao ar livre pelo restante período de tempo. A comparação dos valores de absorção de água obtidos nesta pesquisa com os de outras permite inferir questionamentos sobre o processo de cura.

Frizzo (2001), ao realizar moldagens com CP-V ARI, obteve para o concreto de referência, curados por 49 dias em câmara úmida, com relação $a/mc=0,35$, absorção capilar de $Q=1996 \text{ g/m}^2$ e $Q=3690 \text{ g/m}^2$ para $a/mc=0,50$.

Hoppe (2002) obteve valores ainda inferiores para concretos de referência curados por 7 dias em câmara úmida: $Q=316,5 \text{ g/m}^2$ para $a/mc=0,35$ e $Q=654,7 \text{ g/m}^2$ para a relação $a/mc=0,55$. Em contrapartida nesta pesquisa os valores para o concreto de referência com a/mc mais próxima daquelas (R40) foi $Q=1890 \text{ g/m}^2$.

Com relação aos concretos com adição de 50% de cinza volante esses autores também encontraram valores inferiores que os deste trabalho. Hoppe Filho, observou na relação $a/mc=0,35$ um coeficiente de absorção de $Q=2280,6 \text{ g/m}^2$ contra $Q=542,0 \text{ g/m}^2$ obtido por Frizzo; ao passo que nesta pesquisa o valor encontrado foi de $Q=2469,89 \text{ g/m}^2$, embora tenha-se usado $a/mc=0,40$. Hoppe Filho para os concretos com 50% de CV e adição de cal chegou a valores de absorção capilar $Q=961,8 \text{ g/m}^2$ contrastando com o $Q=1772,82 \text{ g/m}^2$, obtido nesta pesquisa.

O confronto destes dados numéricos, de concretos com relação a/mc semelhantes e mesmo teor e tipo de adição mineral, confirma a visão de que a cura laboratorial em câmara úmida e a exposição ambiental tem conseqüências diferentes para o concreto que a cura ao ar livre. Assim a posição de Isaia (2002) sobre as diferenças de durabilidade entre o concreto real e o virtual ocasionadas pelas diferentes conectividades dos poros devido a formação do C-S-H secundário na hidratação do cimento é corroborada pelos resultados apresentados.

5.4. Difusividade da Água

Os ensaios foram realizados em duplicata e o coeficiente de difusividade foi o resultado obtido para cada corpo de prova em 96h, tempo necessário para que a diferença entre duas pesagens consecutivas não ultrapasse 1g, conforme preconizam as diretrizes de Dan *et al* (1988). Os resultados obtidos e as variações com o aumento da profundidade das camadas estão na tabela 5.

TABELA 5 – Coeficiente de difusividade da água D aos 91 dias (96h)

Mistura	a/mc	Camada	D (x 10 ⁻⁹ m/s ²)	ΔQ (x 10 ⁻⁹) m/s ²	ΔQ (%)
Referência	0,40*	1	5,09	- 1,94	- 38
		2	3,91		
		3	3,15		
	0,45	1	5,46	- 1,87	- 34
		2	4,33		
		3	3,59		
	0,75*	1	7,42	- 1,05	- 14
		2	6,74		
		3	6,37		
	0,80	1	7,72	- 0,87	- 11
		2	7,13		
		3	6,85		
Cinza Volante	0,40	1	3,91	- 0,42	- 11
		2	3,67		
		3	3,49		
	0,75	1	5,98	- 0,59	- 10
		2	5,82		
		3	5,39		
Cinza Volante + Cal	0,40	1	3,41	- 1,39	- 41
		2	2,46		
		3	2,02		
	0,75	1	4,47	- 1,44	- 32
		2	3,96		
		3	3,03		

A figura 20 representa os dados obtidos no ensaio.

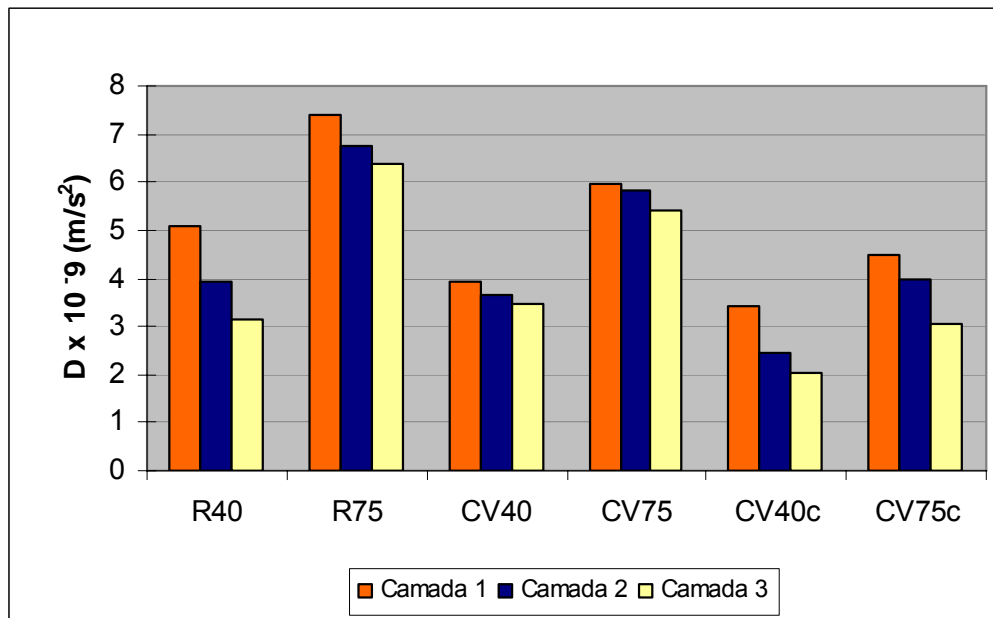


FIGURA 20 – Coeficiente de difusividade da água D ($\times 10^{-9} \text{ m/s}^2$) nas camadas do cobrimento aos 91 dias (96h)

Considerando a análise por misturas há uma diminuição da aceleração com o aumento da profundidade das camadas, para todas as camadas analisadas, sendo a maior diferença de 28% entre as duas camadas mais externas do traço CV40c e a menor variação de 3% entre as mesmas camadas do concreto CV75. Neste último caso a pequena diferença encontrada entre as camadas não significa uma maior proteção efetiva a armadura já que os valores do coeficiente de difusividade são altos em todas as camadas devido a estrutura dos poros deste concreto. Como a penetração de água nos concretos está ligada diretamente com a durabilidade destes, verifica-se a tendência da camada mais externa do cobrimento degradar-se antes das demais, perdendo assim a sua verdadeira função no concreto que é a proteção do aço (item 2).

O aumento da relação a/mc de 0,40 para 0,75 causou um significativo

aumento no coeficiente de difusividade em todas as camadas, atingindo variação de até 102% no caso da camada 3 do concreto de referência.

A figura 21 retrata o comportamento dos concretos em cada camada, permitindo a análise da influência das adições no concreto.

(Figura 21)

A interpretação destes dados permite inferir análises acerca da influência das misturas e do fator a/mc . A substituição do cimento por cinza volante, acarretou em um coeficiente de difusividade menor em todos os casos com exceção do concreto da camada mais interna na relação $a/mc=0,40$; este comportamento indica um maior tamponamento dos poros e melhor hidratação das misturas binárias.

Devido a reposição de hidróxido de cálcio, a frente de água sofreu maiores dificuldades na penetração, obtendo-se então um coeficiente de difusividade menor que nos outros casos, comprovando-se o efeito benéfico do uso de cal hidratada, tanto em concretos de alto desempenho como nos convencionais. A maior tortuosidade dos capilares, que dificulta a penetração de água nesta situação deve-se ao fato do concreto com cal hidratada sofrer menor influência das variações de temperatura do meio ambiente, conforme os dados da tabela 5 e, reter maior teor de água propiciando uma hidratação adequada, gerando maior teor de C-S-H e, conseqüentemente, apresentar maior refinamento dos poros.

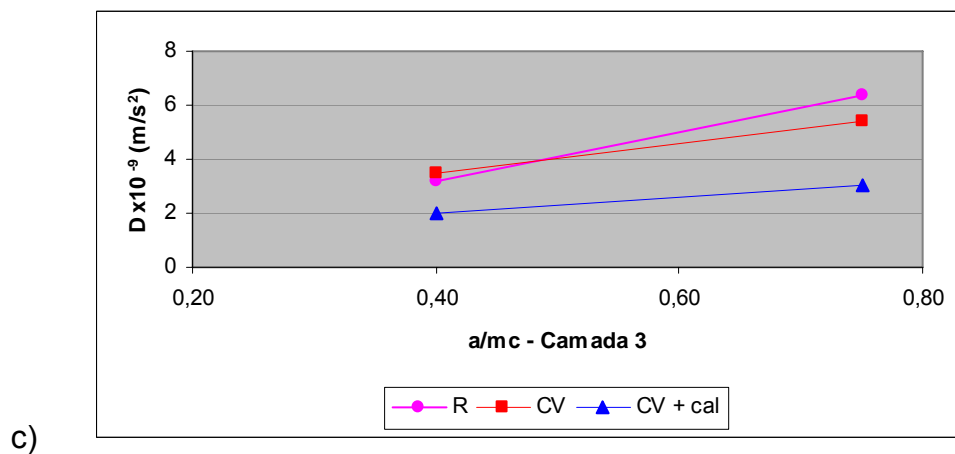
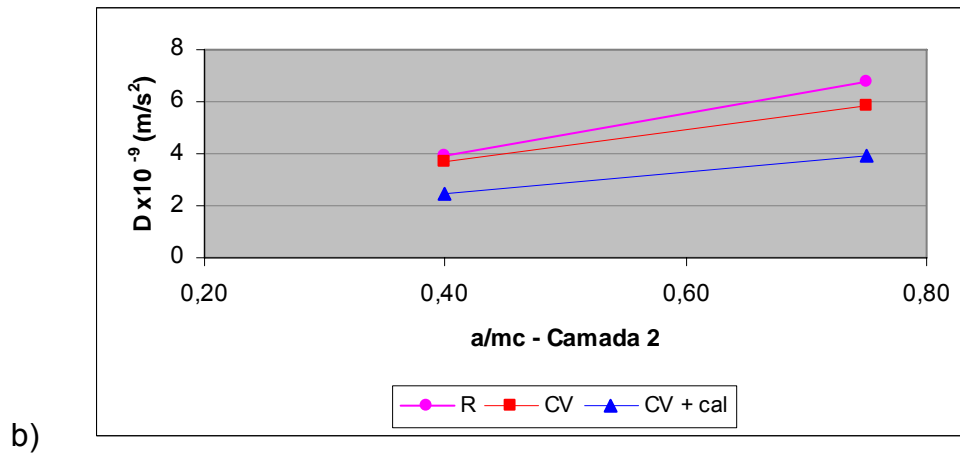
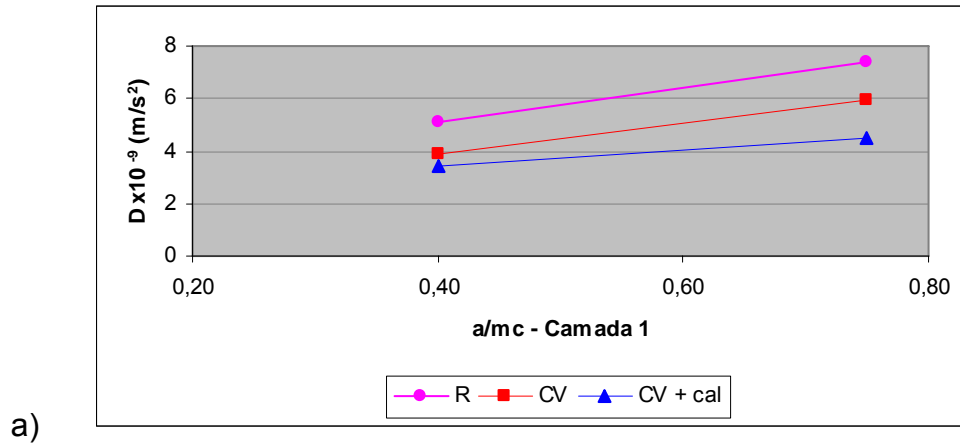


FIGURA 21 – Absorção capilar nas camadas 1 (a); 2 (b) e 3 (c) aos 91 dias

5.4.1 Coeficiente de Difusividade X Dimensão dos poros

Relacionando os dados obtidos com a distribuição dos poros tem-se os maiores coeficientes de difusividade nas camadas mais externas fato que, tal como nos ensaios de absorção capilar, indicam maior percolação de água em regiões de maior porosidade. Os concretos que alcançaram os maiores valores para o coeficiente de difusividade em todas as camadas foram, respectivamente, o R75 e o CV75 correspondendo as maiores quantidades de meso e macroporos, na mesma sequência. Como no caso da absorção capilar, aqui a análise também não pode ser realizada de modo linear, uma vez que deve ser considerada a porosidade aberta e não apenas a total. Analisando sob esta perspectiva torna-se claro o comportamento dos concretos CV40 e CV40c que tem praticamente o mesmo valor de porosidade crítica e difusividades diferenciadas.

Também fica evidente que o maior efeito da adição de cal hidratada ocorreu nas situações de maior quantidade de poros capilares médios e grandes e maiores diâmetros críticos, ocasionados pelo aumento da relação a/mc , sendo portanto o efeito da adição de cal dependente da relação a/mc .

Assim como na absorção capilar, em termos classificatórios é possível admitir que os concretos com menor relação a/mc apresentam menor influência da ação da água e agente deletérios por ela introduzidos no concreto, já que o crescimento da velocidade de percolação de água é menor, sendo as adições benéficas, independentemente de serem utilizadas em conjunto.

A aceleração com que a água penetra relaciona-se com a quantidade dos poros capilares presentes na camada mais intensamente do que com o diâmetro crítico e a conectividade destes, conforme as figuras 22, 23 e 24 que apresentam os resultados de todos os traços analisados, corroborando deste modo à situação de maior aceleração na percolação de água para os concretos com maior quantidade total de meso e macroporos, que apresentaram menor coeficiente de dispersão.

Os coeficientes angulares das retas de tendência indicam que há maior

dependência entre a difusividade e o diâmetro crítico que, por indicar o tamanho de poro a partir do qual existe conectividade, relaciona-se com os poros $\Phi > 10\text{nm}$.

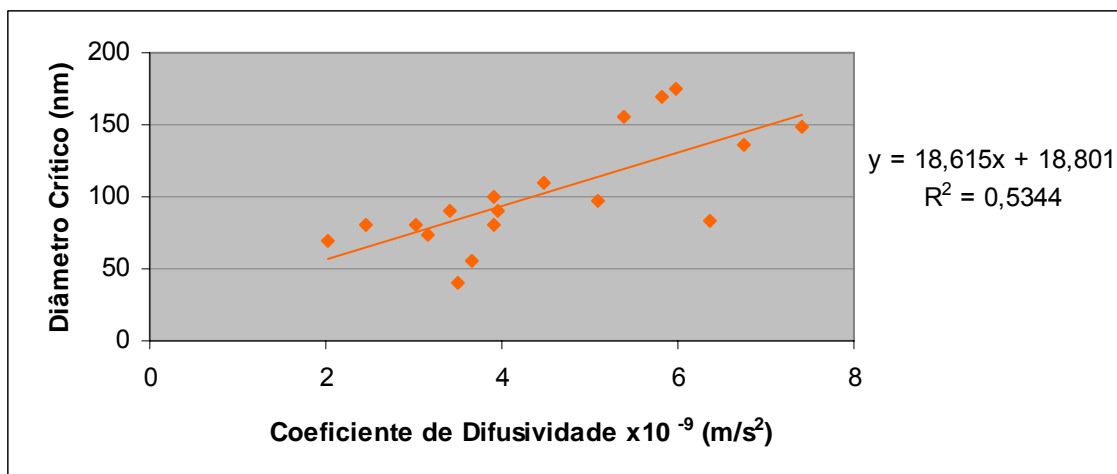


FIGURA 22 - Diâmetro Crítico x Coeficiente de Difusividade aos 91 dias

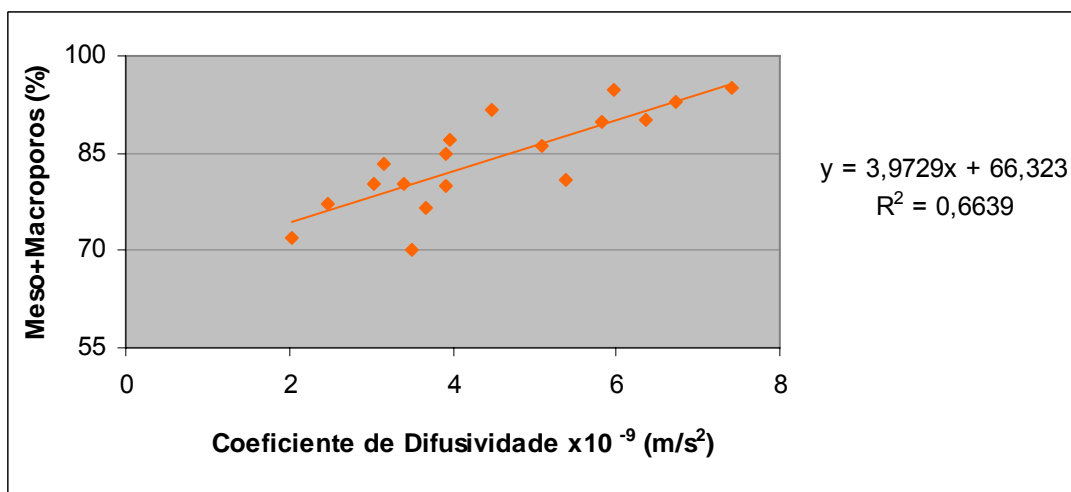


FIGURA 23 - Meso+macroporos x Coeficiente de Difusividade aos 91 dias

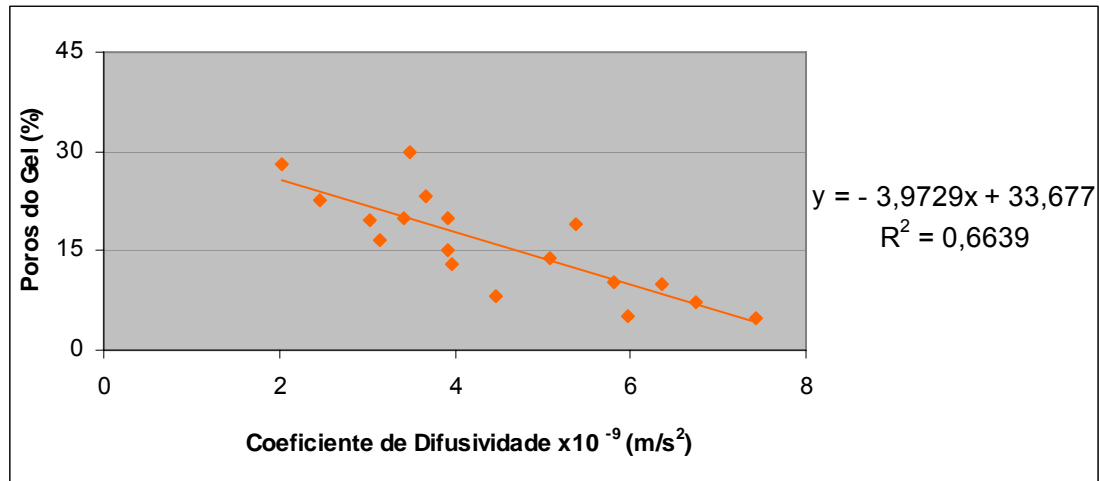


FIGURA 24 – Poros do gel x Coeficiente de Difusividade aos 91 dias

5.4.2 Comparação dos resultados com trabalhos semelhantes

Nesta pesquisa encontrou-se um aumento no coeficiente de difusividade com o aumento da relação a/mc , para toda as camadas estudadas, sendo o pior desempenho o do concreto de referência na camada 3 com variação de 102%. Isaia (1995), realizou o mesmo ensaio para concretos com substituição do cimento em teores de 25% e 50% e $a/mc=0,3; 0,4$ e $0,5$ obtendo o mesmo comportamento tanto aos 28 quanto aos 91 dias sendo o pior desempenho, aos 91 dias, o do concreto com 50% de CV que alcançou uma variação de 85% no coeficiente de difusividade entre as relações a/mc extremas. Alves (2000) que pesquisou concretos binários com cinza volante nos teores de 25% e 50% e relações a/mc variáveis de $0,35$ a $0,65$, verificou que aos 91 dias, o aumento da relação a/mc de $0,35$ para $0,65$ causou variação de mais de 400% entre os valores dos coeficientes encontrados.

Os resultados desta pesquisa que acusam um melhor desempenho dos concretos binários com altos teores de CV quando comparados aos de referência, também são relatados por Isaia que constatou, nesta situação, uma diminuição do coeficiente em 27% para a adição de 25% de pozolana e de até 78% na presença de 50% de CV, verificando ainda um desempenho favorável

da CV conforme o teor de substituição com diminuição do coeficiente em 50% quando a presença de CV passou de 25% para 50%. Alves registrou variações de até 16% nos resultados para o aumento da presença de CV com $a/mc=0,50$ sendo, entretanto insignificantes as variações para as demais relações a/mc .

Assim como para o ensaio de absorção capilar, nos corpos de prova ensaiados foi realizado processo de pré-condicionamento a partir dos 49 dias com cura úmida através de sacos de aniagem molhados por 7 dias e cura ao ar livre pelo restante período de tempo. Portanto, para este ensaio valem as mesmas considerações realizadas a respeito do ensaio de absorção capilar no que se refere a influência do processo de cura, ou seja, a cura laboratorial em câmara úmida tem conseqüências diferentes para o concreto que a cura ao ar livre, confirmando a posição de Parrot (2000) e Almusallam (2001) sobre a influência das condições ambientais no período de cura nas propriedades do concreto, afetando a hidratação do cimento, a retração hidráulica, resistência à compressão e a porosidade (item2).

5.5. Correlações entre absorção e difusividade

A análise da regressão linear entre todos os traços estudados, englobando todas as misturas e relações a/mc , indica que as variáveis estudadas (absorção capilar e difusividade de água) não se correlacionam de modo satisfatório e o coeficiente de correlação encontrado não confirma a existência de dependência entre estas.

A realização de semelhante análise para as misturas em separado alcança coeficientes de correlação elevados, significando correlações mais precisas e inferindo influências distintas de cada uma das adições nas misturas, relacionando de modo satisfatório as variáveis estudadas conforme a figura 25.

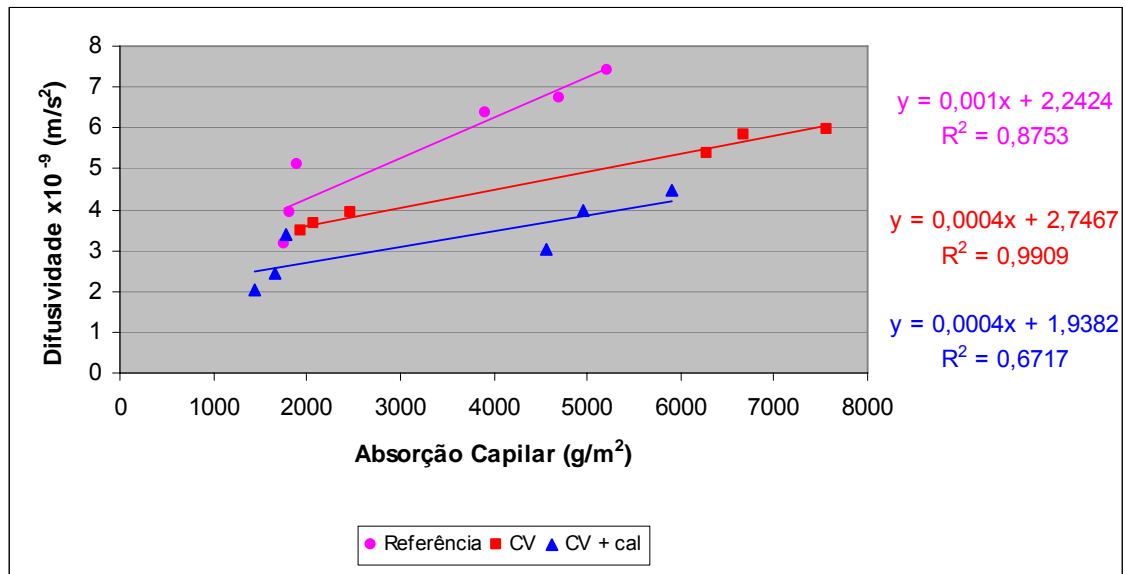


FIGURA 25 – Absorção capilar x Difusividade para cada mistura aos 91 dias

O coeficiente angular da reta do concreto de referência é maior que os dos concretos binários, indicando maior dependência entre a absorção capilar e a difusividade. Essa dependência pode ser explicado pelo maior número de poros em contato com o meio exterior (camada 1) que possuem diâmetro crítico mais elevado, indicando a existência de continuidade entre os mesmos. O concreto de referência possui maior quantidade de poros maiores que 50 nm que os concretos binários, especialmente na camada 1 onde estes poros atingem mais de 86% da quantidade total de poros.

Entre os concretos binários, com e sem reposição de hidróxido de cálcio, a dependência entre a absorção capilar e a difusividade é de mesma magnitude e é menor que em relação ao concreto de referência, pois estes têm poros com menor diâmetro crítico e menor continuidade, conforme colocado anteriormente na tabela 2.

6. CONCLUSÕES

A busca do homem por maior conforto, segurança e qualidade de vida passa pelas conquistas tecnológicas, econômicas e sociais. A engenharia civil é, possivelmente, o ramo da ciência que traz o maior impacto econômico para o país devido a geração de empregos e oportunidades que o mesmo propicia.

Aliando as considerações sobre a necessidade de se promover o desenvolvimento sustentável com as extensas áreas do Brasil que ainda estão em expansão, a tecnologia do concreto ganha importância econômica e social na medida em que consegue promover o adequado desenvolvimento destas áreas. O aumento da durabilidade das estruturas e a diminuição do impacto ambiental causado pelo setor construtivo são alcançados através de projetos adequados que contemplem, entre outros fatores o uso de adições minerais em altos teores.

Buscando aperfeiçoar o desempenho das estruturas de concreto em relação à percolação de água, este trabalho contempla a análise da camada de cobertura do concreto, que deve formar adequada barreira à penetração de agentes agressivos. Esta análise foi realizada através dos ensaios de absorção capilar e difusividade de água, relacionando os resultados com a estrutura dos poros e comparando concretos representativos do concreto convencional e do de alto desempenho. Através de ensaios com testemunhos extraídos de protótipos curados ao ar procurou-se aproximar a realidade testada em laboratório da realidade in loco das obras civis.

6.1. Considerações sobre a absorção capilar

A análise da absorção capilar, em igualdade de a/mc indicou que, aos 91 dias, houve maior quantidade de água absorvida nas camadas superficiais da cobertura do concreto, independentemente do tipo de mistura ou da relação

a/mc utilizados, caracterizando assim camadas com estruturas diferenciadas e confirmando a existência do efeito parede, em todos os traços considerados, uma vez que a absorção capilar decresceu no sentido da maior profundidade.

Esta análise permite apontar, que em relação ao concreto de referência, as misturas com adição de cinza volante obtiveram um decréscimo no seu desempenho uma vez que absorveram maior quantidade de água. Para os concretos de $a/mc=0,40$ na camada 1 a presença da cinza volante (CV40) ocasionou uma absorção de água 30% maior, sendo o aumento nas demais camadas pouco significativo. Para os concretos com $a/mc=0,75$ os aumentos na absorção de água entre as camadas variaram entre 41% e 60%, sendo o pior resultado obtido para a camada 3.

A adição de cal hidratada aos compostos binários ocasionou, para a relação $a/mc=0,40$, comportamento semelhante ao do concreto de referência, com pequenas variações na quantidade de água absorvida sendo a maior delas na camada 3 (18%). Para a relação $a/mc=0,75$, o comportamento também obteve valores que oscilaram entre 5% e 17%, com a maior variação na absorção de 17% na camada 3. A adição de cal hidratada ocasiona um melhor desempenho nas camadas mais profundas, por estas serem as que menos se ressentem da exposição climática, havendo nas mesmas melhores condições de hidratação do concreto e conseqüente refinamento dos poros. A comparação dos concretos binários com e sem cal hidratada, em igualdade de a/mc , ocasionou reduções significativas na absorção capilar devido a reposição do hidróxido de cálcio, com variações entre 19% e 28%, confirmando-se o efeito benéfico das adições.

Os valores encontrados para a absorção capilar quando comparados com outros trabalhos demonstram o efeito das condições de exposição do concreto sobre as suas propriedades, com a cura ambiental afetando de modo desfavorável às mesmas quando comparadas com corpos de prova moldados em laboratório.

6.2. Considerações sobre a difusividade de água

A análise em igualdade de relação a/mc confirmou que há uma diminuição da aceleração com o aumento da profundidade para todas as camadas analisadas. O concreto de referência sofreu entre as camadas 1 e 3 decréscimos no coeficiente de difusividade de 38% e 14%, para as relações $a/mc= 0,40$ e $0,75$, respectivamente. Os concretos binários não sofreram alterações significativas com o aumento da profundidade, sendo a máxima diferença de 10% mas, os concretos binários com cal hidratada apresentaram variações significativas de até 40% ao longo das profundidades analisadas (CV40c).

A substituição do cimento por cinza volante acarretou em um coeficiente de difusividade menor na maioria dos casos indicando um maior tamponamento dos poros e melhor hidratação das misturas binárias e, com a reposição do hidróxido de cálcio, a frente de água sofreu maiores dificuldades na penetração, obtendo-se então um coeficiente de difusividade menor que nos outros casos, comprovando-se assim o efeito benéfico do uso de cal hidratada. O efeito da adição de cinza volante novamente revelou-se benéfico e nas situações de uso conjunto de cinza volante e cal hidratada se atingiu reduções no coeficiente de difusividade de até 37% ($a/mc=0,40$) e 54% ($a/mc=0,75$), em comparação ao concreto de referência. A comparação dos concretos binários sem e com cal hidratada revelou que o efeito benéfico da cal foi mais intenso para as camadas mais profundas, variando entre 12% e 42% para $a/mc=0,40$ e entre 25% e 43% para $a/mc=0,75$.

Na comparação dos resultados desta pesquisa com outros disponíveis na literatura, assim como no ensaio de absorção capilar, observou-se a influência negativa da exposição ambiental dos corpos de prova.

6.3. Considerações sobre as correlações entre os ensaios

As correlações realizadas entre os ensaios mostraram que as variáveis se correlacionam de modo satisfatório e que existe dependência entre as mesmas com dispersão média. Esta dependência é explicada pelo fato de ambas se relacionarem com os mesmos mecanismos de percolação.

Observou-se a existência de maior dependência entre a absorção capilar e a difusividade para os concretos de referência devido à presença de um grande número de poros capilares com $\Phi > 10\text{nm}$, especialmente na camada mais externa destes concretos. Os concretos binários tiveram menor dependência entre os ensaios que o concreto de referência, independentemente da reposição de hidróxido de cálcio, isso devido ao maior número de têm poros com menor diâmetro crítico e menor continuidade.

6.4. Considerações Finais

Os resultados desta pesquisa confirmam a existência de comportamentos diferenciados ao longo da camada de cobrimento com relação à percolação de água. Assim, quanto maior a profundidade da camada estudada maior a tendência à durabilidade, configurando uma maior permeabilidade do concreto superficial.

Esta característica pode levar a deterioração precoce da estrutura devido à percolação de águas contaminadas com agentes deletérios, fazendo com que a camada de cobrimento perca a sua função primordial de proteção do aço. Deste modo, a produção de estruturas mais duráveis e com menor incidência de reparos precoces, dependem de melhorias nesta camada que podem ser alcançadas através do uso de adições como a cinza volante com reposição de hidróxido de cálcio ao concreto fresco, cujos benefícios em relação à percolação de água foram comprovados nesta pesquisa.

A construção civil sustentável, baseada na tecnologia do concreto com altos teores de adições minerais, exige um projeto de dosagem e execução dos concretos com vistas a durabilidade e desempenho ótimo dos mesmos e, com este objetivo o GEPECON da UFSM tem desenvolvido pesquisas que buscam o pleno entendimento do comportamento da camada de cobrimento do concreto.

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se a exploração detalhada de outras adições pozolânicas e cimentícias com adição de cal hidratada, especialmente misturas ternárias com cinza volante e escória de alto forno, uma vez que estas são encontradas em grandes quantidades em todo o mundo, sem que tenham um destino final adequado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P. C. **Durable Concrete – Current Practice and Future Trends**. In: P. K. Mehta (ed.). Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium – Concrete Technology: Past, Present, Future. Berkeley, 1994, Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, p. 85-104 (SP-144).

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000.

ALMUSALLAM, A. A. Effect os environmental conditions on the propertis of fresh and hardened concrete. Cement & Concrete Composites, v. 23, p. 353-361, Elsevier Science, 2001.

ALVES, A. S. **Efeitos físicos e químicos de misturas pozolânicas na carbonatação e penetrabilidade à água em concretos de alto desempenho**. Santa Maria, 2000. 117 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2000.

ALVIM, J. A. C., **Corrosão na armadura do concreto armado: influência dos agentes cloretos e da carbonatação** Internet: <http://www.arquitetura.com.br/coluna/alfredo/alfredo_artigo3.htm>, acessado em 02/02/04.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Use of fly ash in concrete. Farmington Hills, Detroit, ACI, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado solto – determinação da massa unitária**: NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**: NBR 7809. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregados miúdos**: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Agregados para concreto**: NBR 9211. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **Cimento Portland e outros materiais em pó, determinação da área específica:** NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Cimento Portland e outros materiais em pó, determinação da massa específica:** NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Cimento Portland de alta resistência inicial:** NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland: determinação dos tempos de pega:** NBR 11581. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland: determinação da resistência à compressão:** NBR 7215. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland pozolânico:** NBR 5736. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland: determinação da perda ao fogo:** NBR 5743. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland: determinação do resíduo insolúvel:** NBR 5744/89. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland: determinação do anidrido sulfúrico:** NBR 5745/89. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland: determinação do óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama.** NBR 5747/89. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland: determinação do óxido de cálcio livre.** NBR 7227/89. Rio de Janeiro

_____. **Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone:** NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982

_____. **Ensaio de compressão de corpos cilíndricos de concreto:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Moldagem e cura de corpos de prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Método de ensaio:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1984.

BASHEER, P. A. M.; LONG, A. E. & MONTGOMERY, F. R. **An interaction model for causes of deterioration and permeability of concrete.** In: P. K. Mehta (ed.). *Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium – Concrete Technology: Past, Present, Future.* Berkeley, 1994, *Proceedings.* Detroit: American Concrete Institute, p. 383-397 (SP-144).

BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O. & QUÉNEUDEK, M. **Transport of fluids in cement–rubber composites**. Cement & Concrete Composites, v. 26, p. 21-29, Elsevier Science, 2004.

BOUZOUBAÂ, N., ZHANG, M. H., MALHOTRA, V. M. **Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash**. Cement and Concrete Research, v. 31, Elsevier Science, 2001a.

BOUZOUBAÂ, N., ZHANG, M. H., MALHOTRA, V. M. & GOLDEN D. M. **Mechanical properties and durability of laboratory produced high-volume fly ash blended cements**. In: V. M. Malhotra (Ed.). 7th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Chennai, India, 2001, p. 55-82 (SP-199), 2001b.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do Concreto**. São Paulo, 1987. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil. BT-09/87.

CÁNOVAS, M. F., **Reflexiones sobre la Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado**. XIV Jornadas del Hormigón, 2003: <<http://www.seconstruye.com/jh2003/int/biblioteca.htm>>, acessado em 29/01/04.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. & LOPES, A. N. **A importância do cobrimento na durabilidade das estruturas de concreto – uma visão do projeto integrado**. In: II Seminário Internacional sobre Durabilidade das Estruturas de Concreto. Goiânia, GO, 2002, CD-ROOM.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). Durable concrete structures Design Guide. Bulletin d'Information n.182. Thomas Telford, Londres, 1992.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). New approach to durability design. Bulletin d'Information n.238. CEB, Lausanne, 1997.

DAN. W.; QUENARD, D.; SALÉE H.et COPÉ R. **Comortement hydrique d'un composite ciment-polymère-verre (CCPV) et influence de l'humidité sur ses propriétés mécaniques**, Cahier du CSTB, n. 2304 livraison 295, décembre, 1988.

DALLA LANA, E. F. **Evolução da carbonatação na camada de cobrimento do concreto com alto teor de cinza volante.** Santa Maria. Dissertação (Mestrado) em andamento – Universidade Federal de Santa Maria.

FEITOSA, C. A. G. **Avaliação da sensibilidade do ensaio de penetração de água sob pressão e de um índice de permeabilidade para o concreto.** São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.** Tese (Doutorado), 1º e 2º volumes. São Paulo, 1994.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto.** Santa Maria, 2001. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

GASTALDINI, A. L. G. **Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento Portland.** In: 4º Congresso Brasileiro de Cimento, 1996, São Paulo. Anais. Porto Alegre: ABCP, 1996, 3v, v. 1, p. 119-136.

GOUVEIA, J.; PAPA, G. **Desperdício versus qualidade na construção civil.** A Razão, Santa Maria, p. 04, 21 jan. 2004.

HERVÉ NETO, E. **A nova engenharia do concreto.** Artigo técnico, Internet:<<http://www.comunidadeconstrucao.com.br>>, acessado em: 28/01/04.

HEWLETT, P. C. **The role of water in determining concrete performance.** In: Dhir, R. & McCarthy M. (eds). Concrete Durability and Repair Technology. International Congress Creating with Concrete, Dundee, 1999. Proceedings. London, Thomas Telford, 1999. p. 63-80.

HOPPE FILHO, J. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais.** Santa Maria, 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** São Paulo, 1995. 280 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

_____. **Pesquisa sobre o cobrimento da armadura das estruturas de concreto: revisão sobre estrutura dos poros e mecanismos de transporte.** Santa Maria, 2001. Polígrafo.

_____. Avanços e perspectivas sobre a durabilidade do concreto com altos teores de adições minerais: A experiência da UFSM. In: **II Seminário Internacional sobre Durabilidade das Estruturas de Concreto. Goiânia, GO, 2002a, CD-ROOM.**

_____. Estudo da microestrutura e da durabilidade da camada de cobrimento de protótipos de concreto estrutural com altos teores de pozolanas. **Santa Maria, 2002b, polígrafo.**

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements.** In: HEWLWTT, P. C. (ed). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete.* London: Arnold, 1998, p. 471-631.

McCARTER, W. J., CHRISP, T. M., STARRS, G., BASHEER, P. A. M. **Developments in near-surface testing of covercrete.** In: V.M. Malhotra (Ed.), *Fifth International Conference of Durability of Concrete, Barcelona, 2000. Proceedings.* CANMET/ACI, 2000, 2v., v. 1, (SP 192).

MEHTA, P. K. **Concrete technology at the crossroads: problems and opportunities.** In: Mehta, P. K. (ed). *V. Moahan Malhotra Symposium - Concrete Technology Past, Presente and Future.* Berkeley, 1994. *Proceedings.* Detroit, American Concrete Institute, 1994, p. 1-30. (SP-144).

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, J. P. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MOREIRA, B. P. **Estudo da penetração de cloretos na camada de cobrimento de concreto com alto teor de cinza volante.** Santa Maria. Dissertação (Mestrado) em andamento – Universidade Federal de Santa Maria.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1997.

PARROT, L. J. Curing time for portland and portland/fly ash concretes. In: V. M. Malhotra (Ed.) *Fifth International Conference of Durability of Concrete, Barcelona, 2000. Proceedings.* CANMET/ACI, 2000, 2v., v. 2, pp. 35 – 48.

PAULON, V. A. & DINTEN, C. A. M. **Um estudo comparativo da influencia da adição de nanossílica e sílica ativa na permeabilidade dos concretos.** In: 42^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2000, Fortaleza, CE. Anais, Artigo III D – 041. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 2000.

RILEM. **Recommendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete.** Revista Materials and Structures. V. 32, n. 217, p. 163-179, abril 1999.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concreto.** São Paulo, 1998. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

SHILSTONE, J. M. ; SHILSTONE Jr, J. M. **Concrete technology at the crossroads: problems and opportunities.** In: Mehta, P. K. (ed). V. Moahan Malhotra Symposium - Concrete Technology Past, Presente and Future. Berkeley, 1994. Proceedings. Detroit, American Concrete Institute, 1994, p. 61-84. (SP-144).

SILVEIRA, R. G. **Estudo da microestrutura da camada de cobrimento de concretos com altos teores de cinza volante.** Santa Maria, 2004. Dissertação (Mestrado) em andamento – Universidade Federal de Santa Maria.

SIVASUNDARAM, V.; BILODEAU, A. & MALHOTRA, V. M. **Effect of curing conditions on high-volume fly ash concrete made with ASTM type I and III cements and silica fume.** In: Malhotra, V. M. (ed). 2nd CANMET/ACI International Symposium, Las Vegas, 1995. Proceedings. American Concrete Institute, 1995, p. 509-530. (SP-154).

SOMERVILLE, G. **Whole life design for durability and sustainability. Where are we going, and how do we get there?** In: Dhir, R. & McCarthy M. (eds). Concrete Durability and Repair Technolgy. International Congress Creating with Concrete, Dundee, 1999. Proceedings. London, Thomas Telford, 1999. p. 1-19.

STUMPP, M. J. **Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** Santa Maria, 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Estrutura e apresentação de monografias, dissertações e teses:** MDT. 5^a ed. Santa Maria, 2000.

ANEXO A – Planilha de Difusibilidade à água (modelo)

Tempo (seg)	Raiz do Tempo	CV75- 2S2	Mj
~	*	^	#
60	7,75	434,4	0,00466
120	10,95	434,9	0,00528
180	13,42	435,5	0,00601
240	15,49	435,7	0,00626
360	18,97	436,5	0,00724
480	21,91	437,2	0,00810
600	24,49	437,7	0,00871
900	30,00	438,6	0,00982
1200	34,64		
1800	42,43		
2700	51,96	443,1	0,01534
3600	60,00	444,1	0,01656
4500	67,08	445,9	0,01877
5400	73,48	449,6	0,02331
7200	84,85	452,6	0,02699
9000	94,87	455,2	0,03018
10800	103,92	457,6	0,03313
14400	120,00	461,5	0,03791
18000	134,16	465,0	0,04221
21600	146,97	468,0	0,04589
25200	158,75	470,7	0,04920
28800	169,71	472,6	0,05153
86400	293,94	492,3	0,07571
172800	415,69	492,3	0,07571
259200	509,12	492,3	0,07571

Equação CV75 - camada 2

$$0,000271 x + 0,002917$$

Valores desconsiderados
(discrepantes)