

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

---

**PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM PROTÓTIPOS DE  
CONCRETO COM ELEVADOS TEORES DE ESCÓRIA  
E CINZA VOLANTE COM ADIÇÃO DE CAL**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Gustavo Martins Cantarelli**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2007**

---

**PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM PROTÓTIPOS DE CONCRETO  
COM ELEVADOS TEORES DE ESCÓRIA E CINZA VOLANTE  
COM ADIÇÃO DE CAL**

---

por

**Gustavo Martins Cantarelli**

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

**Orientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2007**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

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

---

**PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM  
ELEVADOS TEORES DE ESCÓRIA E CINZA VOLANTE COM  
ADIÇÃO DE CAL**

---

elaborada por  
**Gustavo Martins Cantarelli**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

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

---

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

---

**Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães - FuRG**

Santa Maria, 26 de abril de 2007.

*A Deus.*

*Aos meus pais, exemplos de dedicação, trabalho e competência,  
a minha irmã pela paciência, algumas vezes necessária,  
e ao meu irmão.*

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. *Geraldo Cechella Isaia*, pelo seu vasto conhecimento teórico e prático, pela amizade, orientação, dedicação, incentivo e paciência na realização deste trabalho;

Ao prof *Antônio Luiz Guerra Gastaldini.*, pelas importantes colaborações, pelos seus conhecimentos teóricos, material e amizade;

Aos colegas de Pós-Graduação, *Cássio Rubin dos Santos, Dalton Wegner da Rosa, Giovani Rubin, Jonas Schneider, Minéia Johann Scherer, Rodrigo Brizola, Tiago Fernandes Hoppe e Willian Vidmar Cadore*, pela amizade, adquirida em tão pouco tempo, e auxílio disponibilizados;

Aos alunos bolsistas de iniciação científica e amigos, *Carlise, Felipe, Roberta*, pela contribuição em todas as tarefas desta pesquisa;

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC–UFSM), pelo empréstimo de seus equipamentos e pela contribuição de seus funcionários;

À UFSM e ao PPGEC pelo alto nível de seus professores e funcionários, que viabilizaram a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil;

Às empresas, pelos materiais cedidos.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil, da CAPES, da FAPERGS e do FIPE.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE ESCORIA E CINZA VOLANTE COM ADIÇÃO DE CAL**

AUTOR: GUSTAVO MARTINS CANTARELLI

ORIENTADOR: Geraldo Cechella Isaia

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 26 de abril de 2007.

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto passa, necessariamente, pelo estudo do concreto de cobrimento e pelo entendimento dos fatores que afetam as características dessa camada superficial. O uso de altos teores de adições minerais no concreto influencia significativamente a resistência da camada de cobrimento ao ataque químico e a estrutura dos poros. Esta dissertação tem por objetivo analisar, através dos resultados obtidos nos ensaios de absorção capilar de água, conforme a norma RILEM TC-116 PCD, e de difusão de água, realizado seguindo as diretrizes de Dan *et al* (1988), apresentadas por Isaia (1995), baseadas em publicações de CSTB, a percolação de água na camada de cobrimento do concreto, além de correlacionar com a resistência a 50 MPa, o volume total de mercúrio intrudido e o diâmetro crítico dos poros. Para realização dessas análises, foram moldadas peças protótipos de 75 cm x 20 cm x 15 cm, que permaneceram em exposição ambiental até a data de realização dos ensaios. Os protótipos foram moldados com altos teores de escória, 70% e cinza volante 20%, em substituição à massa de cimento, com e sem adição de 20% de cal hidratada, em massa, e uma relação a/mc 0,3, 0,4, 0,5, além do traço de referência, somente com cimento e relação a/c 0,4; 0,6 e 0,8. Os ensaios de absorção capilar e de difusão de água foram realizados aos 91 e 300 dias. Para executar o estudo comparativo entre essas duas idades, foram extraídos testemunhos 10 cm x 20 cm dos protótipos sendo cerrados a 0, 2,5 e 5,0 cm de profundidade a partir da superfície. Após a realização das análises, observou-se que a substituição de cimento por adições minerais acarreta uma diminuição na resistência à compressão, sendo mais acentuada nas idades iniciais e amenizada com o passar do tempo. Em relação aos coeficientes de absorção e de difusão de água dos concretos com adições minerais, comparados com os concretos de referência, em igualdade de a/mc e idades analisadas, o uso de adições resultou em significativas reduções nesses coeficientes, que chegam a 79% na absorção e de 69% na difusão, aos 300 dias. Quando analisados em função da profundidade (em igualdade de a/mc), as reduções da camada 3 em relação à camada 1 chegam a 55% na absorção e 31% na difusão, aos 300 dias e nos traços com adição de cal hidratada. Esse comportamento é justificável pelo fato de a cal hidratada armazenar água auxiliando nos processos de hidratação, produzindo uma matriz mais compacta. Em igualdade de resistência, as reduções são de 86% para a absorção e de 70% para a difusão. Observa-se, tanto para a absorção como para a difusão, uma forte correlação com o volume total intrudido e o diâmetro dos poros aos 300 dias

Palavras-chave: concreto, adições minerais, difusão de água, absorção de água.

## **ABSTRACT**

Master's Thesis  
Program of Postgraduation in Civil Engineering  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

### **WATER PERCOLATION IN PRISMS OF CONCRETE WITH HIGH GRADES OF SLAG AND FLY ASH WITH ADDITION LIME**

AUTHOR: GUSTAVO MARTINS CANTARELLI  
THESIS ADVISOR: Geraldo Cechella Isaia  
City and Date: Santa Maria, 26<sup>th</sup> april of 2007.

The study of concrete structures durability necessarily passes by the study of covercrete and by the understanding of the factors that affect the features of this superficial layer. The use of high contents of mineral additions on the concrete influences meaningfully the resistance of the covering layer to the chemical attack and on the pores structure. This dissertation aimed to analyze, through the obtained results in the tests of capillary water absorption, according to the RILEM TC – 116 PCD Recommendation, and to the diffusion of water held following the directives DAN et al (1988) presented by Isaia (1995), based on publications of CSTB, the percolation of water on concrete covering layer, besides co-relating with the resistance to 50 MPa, the total volume of intruding mercury and the critical diameter of the pores. To these analysis perform, prototypes specimens of 75 cm x 20cm x 15cm have been molded with high contents of mineral additions, 70 % of slag and 20% of fly ash, in replacement to the cement mass, with or without addition of 20% of hydrated lime, in mass, and w/cm relationships 0,3 ; 0,4 ; 0,5 besides the reference mix proportion, only with cement and w/cm relationships 0,4; 0,6 e 0,8. The tests of capillary absorption and water diffusion were held, on the 91 and 300 days to execute the comparative study between these two ages, extracted specimens of 10 cm x 20 cm, from the prototypes had been accomplished, being closed to 0, 2,5 e 5,0cm of depth from the surface. After performing the analysis, it has been noticed that the replacement of cement by mineral additions causes a strength reduction to the compression, being it more accentuated in the initial ages and eased as the time passes by. In relation to the coefficients of water absorption and diffusion of the concretes with mineral additions compared to the reference concretes in equality of w/cm and ages, being analyzed the use of additions, meaningful reductions that get to 79% in the absorption and 69% in the diffusion, on the 300 day. When analyzed considering the depth (in equality of w/cm) the layer reduction 3 (5cm) in relation to 1(0,5cm) gets to 55% in the absorption and 31% in the diffusion, on the 300 day, and in the mix proportion with addition of hydrated lime, justifiable by the fact of the hydrated lime stored water helping in the hydrating process producing a more compact matrix. In equality of 50 Mpa compressive strength, the reductions are 86% to the absorption and 70% to the diffusion. It's been noticed, as to the absorption as to the diffusion, a strong co-relation with the intruding total volume and the pores diameter on the 300 day.

Keywords: concrete, blast furnace slag, fly ash, capillary water absorption, diffusion of water

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - Representação esquemática das forças que atuam num líquido dentro de um capilar .....	26
<b>FIGURA 2</b> - Coeficiente de difusividade $D$ ( $\times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ ) nas camadas do cobrimento aos 91 dias.....	40
<b>FIGURA 3</b> - Quantidade de água absorvida $Q$ ( $\text{g/m}^2$ ) nas camadas do cobrimento .....	40
<b>FIGURA 4</b> - Curva granulométrica do agregado miúdo .....	45
<b>FIGURA 5</b> - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	46
<b>FIGURA 6</b> - Extração dos testemunhos (Petry, 2004) .....	50
<b>FIGURA 7</b> - Dimensões e furos dos protótipos (Petry, 2004) .....	50
<b>FIGURA 8</b> - Corte dos testemunhos (Petry, 2004) .....	51
<b>FIGURA 9</b> - Esquema do ensaio de absorção capilar .....	53
<b>FIGURA 10</b> - Gráfico para obtenção do coeficiente angular da reta $y$ .....	55
<b>FIGURA 11</b> - Resistência à compressão dos protótipos.....	58
<b>FIGURA 12</b> - Absorção capilar aos 91 dias .....	61
<b>FIGURA 13</b> - Absorção capilar na camada 1 .....	62
<b>FIGURA 14</b> - Absorção capilar na camada 2.....	62
<b>FIGURA 15</b> - Absorção capilar na camada 3.....	62
<b>FIGURA 16</b> - Absorção capilar aos 300 dias .....	67
<b>FIGURA 17</b> - Absorção capilar na camada 1 .....	68
<b>FIGURA 18</b> - Absorção capilar na camada 2.....	68
<b>FIGURA 19</b> - Absorção capilar na camada 3.....	68
<b>FIGURA 20</b> - Absorção capilar em igualdade de resistência aos 91 e 300 dias .....	72
<b>FIGURA 21</b> - Difusão de água aos 91 dias.....	74
<b>FIGURA 22</b> - Difusividade na camada 1 .....	76



<b>FIGURA 23</b> - Difusividade na camada 2 .....	76
<b>FIGURA 24</b> - Difusividade na camada 3 .....	76
<b>FIGURA 25</b> - Difusão de água aos 300 dias.....	79
<b>FIGURA 26</b> - Difusividade na camada 1 .....	81
<b>FIGURA 27</b> - Difusividade na camada 2 .....	81
<b>FIGURA 28</b> - Difusividade na camada 3 .....	81
<b>FIGURA 29</b> - Difusão de água em igualdade de resistência aos 91 e 300 dias	84
<b>FIGURA 30</b> - Correlação entre difusão e absorção capilar de água para os traços com fator $a/mc$ 0,4 e 0,5.....	86
<b>FIGURA 31</b> - Correlação entre difusão e absorção capilar de água em igualdade de resistência de 50Mpa .....	87
<b>FIGURA 32</b> - Volume total intrudido x absorção capilar aos 91 dias (a) e 300 dias (b).....	88
<b>FIGURA 33</b> - Diâmetro crítico x absorção capilar aos 91 dias (a) e 300 dias (b) .....	89
<b>FIGURA 34</b> - Volume total intrudido x absorção capilar, em igualdade de resistência, aos 91 dias (a) e 300 dias(b) .....	90
<b>FIGURA 35</b> - Volume total intrudido x difusão de água aos 91 dias (a) e 300 dias (b).....	91
<b>FIGURA 36</b> - Diâmetro crítico x difusão de água aos 91 dias (a) e 300 dias(b) .....	92
<b>FIGURA 37</b> - Volume total intrudido x difusão de água, em igualdade de resistência, aos 91 dias (a) e 300 dias(b) .....	92

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> - Classificação da agressividade de ambientes NBR 6118 .....	19
<b>TABELA 2</b> - Relação entre as classes de agressividade ambiental e cobrimento nominal NBR 6118 .....	20
<b>TABELA 3</b> - Absorção capilar média para o concreto de referência e para escória .....	35
<b>TABELA 4</b> - Absorção capilar em igualdade de resistência .....	36
<b>TABELA 5</b> - Caracterização física do cimento .....	42
<b>TABELA 6</b> - Caracterização das adições minerais e cal .....	43
<b>TABELA 7</b> - Composição química do cimento, adições minerais e cal .....	43
<b>TABELA 8</b> - Caracterização dos agregados .....	45
<b>TABELA 9</b> - Nomenclatura utilizada e porcentagens utilizadas .....	48
<b>TABELA 10</b> - Quantidade de materiais por m <sup>3</sup> de concreto .....	49
<b>TABELA 11</b> - Resistência a compressão dos Protótipos .....	57
<b>TABELA 12</b> - Volume total intrudido e diâmetro crítico aos 91 e 300 dias .....	59
<b>TABELA 13</b> - Resultados da absorção capilar aos 91 dias em g/m <sup>2</sup> .....	60
<b>TABELA 14</b> - Diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, a/mc 0,4 .....	63
<b>TABELA 15</b> - Diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, a/mc 0,5.....	63
<b>TABELA 16</b> - Comparativo dos traços com e sem adição de cal hidratada .....	64
<b>TABELA 17</b> - Comparativo da absorção capilar entre Cantarelli e Petry .....	65
<b>TABELA 18</b> - Comparativo da absorção capilar entre Cantarelli e Hoppe .....	65
<b>TABELA 19</b> - Resultados da absorção capilar aos 300 dias em g/m <sup>2</sup> .....	66
<b>TABELA 20</b> - Diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, a/mc 0,4 .....	69

<b>TABELA 21</b> - Diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, a/mc 0,5 .....	69
<b>TABELA 22</b> - Comparativo dos traços com e sem adição de cal hidratada .....	70
<b>TABELA 23</b> - Comparativo da absorção capilar 91 x 300 dias .....	71
<b>TABELA 24</b> - Absorção capilar de água em igualdade de resistência à compressão aos 91 e 300 dias .....	73
<b>TABELA 25</b> - Diferença na quantidade de água absorvida em relação a referencia, em porcentagem .....	73
<b>TABELA 26</b> - Resultados da difusão de água aos 91 dias em $m/s^2$ .....	74
<b>TABELA 27</b> - Diferença na difusão de água, em porcentagem, a/mc 0,4 .....	75
<b>TABELA 28</b> - Diferença na difusão de água, em porcentagem, a/mc 0,5 .....	75
<b>TABELA 29</b> - Comparativo dos traços com e sem adição de cal hidratada .....	77
<b>TABELA 30</b> - Comparativo da difusão de água entre Cantarelli e Petry .....	78
<b>TABELA 31</b> - Resultados da difusão de água aos 300 dias em $m/s^2$ .....	79
<b>TABELA 32</b> - Diferença na difusão de água, em porcentagem, a/mc 0,4 .....	80
<b>TABELA 33</b> - Diferença na difusão de água, em porcentagem, a/mc 0,5 .....	80
<b>TABELA 34</b> - Comparativo dos traços com e sem adição de cal hidratada .....	82
<b>TABELA 35</b> - Comparativo da difusão de água 91 x 300 dias .....	83
<b>TABELA 36</b> - Difusão de água em igualdade de resistência à compressão aos 91 e 300 dias .....	85
<b>TABELA 37</b> - Diferença na difusão de água em relação à referência, em porcentagem .....	86

## SUMÁRIO

**RESUMO**

**ABSTRACT**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABELAS**

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Importância do tema .....	14
1.2 Objetivos .....	16
1.3 Estrutura da dissertação .....	16
<b>2 PERCOLAÇÃO DA ÁGUA NA CAMADA DE COBRIMENTO DE CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS</b> .....	18
2.1 O efeito parede e a camada de cobrimento .....	18
2.2 Mecanismos de percolação de água no concreto .....	23
2.2.1 Absorção capilar de água .....	24
2.2.2 Difusão de água .....	27
2.3 Influência das adições minerais na camada de cobrimento do concreto .....	29
2.3.1 Introdução .....	29
2.3.2 Escória de Alto Forno .....	32
2.3.2.1 A escória de alto-forno e a percolação de água no concreto .....	33
2.3.3 Cinza Volante .....	36
2.3.3.1 Cinza volante e a percolação de água no concreto no concreto .....	37

<b>3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	41
<b>3.1 Materiais utilizados</b> .....	41
3.1.1 Materiais Cimentícios.....	41
3.1.1.1 Cimento .....	41
3.1.1.2 Adições minerais .....	42
3.1.1.3 Cal hidratada .....	43
3.1.2 Agregados.....	44
3.1.2.1 Agregado Miúdo .....	44
3.1.2.2 Agregado Graúdo .....	44
3.1.3 Aditivo Superplastificante.....	46
<b>3.2 Moldagem e dosagem dos corpos de prova e protótipos</b> .....	47
<b>3.3 Ensaio realizados</b> .....	51
3.3.1 Pré-condicionamento .....	51
3.3.2 Ensaio de Absorção Capilar.....	53
3.3.3 Ensaio de difusão de água.....	54
3.3.4 Ensaio de resistência à compressão axial .....	55
3.3.5 Ensaio de porosimetria de mercúrio .....	55
<b>4 ANALISE DOS RESULTADOS</b> .....	56
<b>4.1 Introdução</b> .....	56
<b>4.2 Resistência à compressão</b> .....	56
<b>4.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio</b> .....	58
<b>4.4 Absorção capilar de água</b> .....	60
4.4.1 Absorção capilar de água em igualdade de relação a/mc aos 91 dias.....	60
4.4.2 Comparação dos resultados com trabalhos semelhantes .....	64
4.4.3 Absorção capilar de água em igualdade de relação a/mc aos 300 dias.....	66
4.4.4 Absorção capilar 91 x 300 dias .....	70
4.4.5 Absorção capilar de água em igualdade de resistência à compressão aos 91 dias e 300 dias .....	71
<b>4.5 Difusão de água</b> .....	73
4.5.1 Difusão de água em igualdade de relação a/mc aos 91 dias.....	74

4.5.2 Comparação dos resultados com trabalhos semelhantes .....	77
4.5.3 Difusão de água em igualdade de relação a/mc aos 300 dias.....	78
4.5.4 Difusão de água 91 x 300 dias.....	82
4.5.5 Difusão de água em igualdade de resistência à compressão aos 91 dias e 300 dias.....	84
<b>4.6 Correlações entre absorção capilar e difusão de água .....</b>	<b>86</b>
<b>4.7 Absorção capilar de água x dimensão dos poros.....</b>	<b>87</b>
<b>4.8 Difusão de água x dimensão dos poros.....</b>	<b>90</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
<b>5.1 Influência das adições minerais sobre a absorção capilar .....</b>	<b>94</b>
5.1.1 Em igualdade de relação água/materiais cimentícios .....	94
5.1.2 Em igualdade de resistência a compressão.....	94
<b>5.2 Influência das adições minerais sobre a difusão de água .....</b>	<b>95</b>
5.2.1 Em igualdade de relação água/materiais cimentícios .....	95
5.2.2 Em igualdade de resistência a compressão.....	95
<b>5.3 Considerações sobre as correlações entre difusão de água e absorção capilar.....</b>	<b>96</b>
<b>5.4 Correlação entre absorção capilar, volume total intrudido e diâmetro critico.....</b>	<b>96</b>
<b>5.5 Correlação entre difusão de água, volume total intrudido e diâmetro critico.....</b>	<b>97</b>
<b>5.6 Considerações finais .....</b>	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Importância do tema

Avanços significativos no campo da durabilidade do concreto foram obtidos no final do século XX, quando os custos calculados pelo *National Cooperative Highway Research Program* dos Estados Unidos para o reparo das estruturas rodoviárias em concreto naquele país atingiram a casa de bilhões de dólares (Mehta, 1994). Foi nesse cenário que a substituição do cimento por parte de escória granulada de alto-forno, um rejeito da produção do aço, e por cinza volante, um rejeito de usinas termoelétricas, apareceram como possíveis alternativas, aliando resultados satisfatórios de resistência mecânica, custos, qualidade, além de sustentabilidade.

A utilização de resíduos industriais e agrícolas, tais como a cinza volante, cinza de casca de arroz e a escória granulada de alto forno, em substituição ao cimento portland, procura equilibrar ecologia com economia, com o propósito de se produzir concreto com menos energia, matéria-prima, desperdício e poluição, visando à eco-eficiência, sustentabilidade e durabilidade das estruturas.

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto passa, necessariamente, pelo estudo do concreto de cobrimento, basicamente pelo entendimento dos fatores que afetam as características dessa camada superficial, podendo-se destacar o importante efeito dos procedimentos de cura.

Nesse sentido, o cobrimento constitui-se em um elemento de fundamental relevância para a durabilidade das peças de concreto, uma vez que é através dele que os mecanismos de transporte propiciam a entrada de agentes agressivos para o interior do concreto.

Ao se substituir parte do cimento por adições minerais, a estrutura da pasta transforma-se substancialmente; há uma alteração significativa na distribuição e no tamanho dos poros formados, estando o seu comportamento, conforme constatado por vários pesquisadores, relacionado às características químicas, mineralógicas, à finura, à quantidade e à história térmica da adição (Sarkar, 1995).

O uso de altos teores de adições minerais no concreto influencia significativamente a resistência da camada de cobrimento ao ataque químico, em consequência, não apenas da alteração de natureza química na pasta de cimento

hidratada, mas também de modificações em sua microestrutura. No caso da carbonatação, essas alterações químicas da pasta acelerariam o processo de neutralização, podendo afetar a durabilidade das estruturas pela prematura despassivação da armadura. Entretanto, essas transformações, quando analisadas conjuntamente com as alterações microestruturais, tornam difícil prever o comportamento do concreto, pois as adições minerais lhe conferem uma permeabilidade substancialmente reduzida. Dessa forma, influenciam os mecanismos de transporte, entre eles a absorção e difusão de água, agentes diretamente ligados à despassivação e corrosão das armaduras.

O estudo da absorção capilar e da difusividade de água pela camada de cobertura do concreto é relevante porque a penetração de água irá dotar, no interior do concreto, um ambiente favorável ao transporte de íons, que podem levar à despassivação do aço das estruturas, e ao comprometimento de sua vida útil.

Para a realização da presente investigação, os ensaios de absorção capilar e de difusividade de água foram realizados com testemunhos extraídos de protótipos de concretos, tendo sido escolhido este tipo de peça por ser semelhante às vigas utilizadas em obras de engenharia. Os protótipos foram curados ao tempo com intenção de reproduzir as condições ambientais encontradas nas obras. Foram utilizados elevados teores de adições minerais, 70% de escória granulada de alto-forno e 20% de cinza volante, com e sem adição de cal-hidratada. A adição de cal-hidratada foi realizada buscando restabelecer a reserva alcalina do concreto, que sofre decréscimo com o uso de elevados teores de adições e, conseqüentemente, baixo consumo de cimento, com o intuito de conter o avanço da frente de carbonatação. Além dos concretos com adições, também foram moldados traços somente com cimento denominado de referência.

A análise desses concretos quanto à sua difusividade à água foi feita seguindo as diretrizes de Dan et al (1988) apresentado por Isaia (1995); a determinação experimental da retenção de água do concreto endurecido por absorção capilar foi realizada conforme recomendação da RILEM TC 116 – PCD. Os corpos de prova foram previamente preparados no pré-condicionamento, para minimizar a variação do grau umidade no concreto, já que a absorção capilar de água é afetada pela variação dessa medida no concreto.



## 1.2 Objetivos

Esta dissertação é integrante de um projeto composto de outras três dissertações, sob o título “Estudo da microestrutura e da durabilidade da camada de cobrimento de concretos com altos teores de escória e cal hidratada” desenvolvido pelo GEPECON – Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto da Universidade Federal de Santa Maria. O projeto em referência estuda a carbonatação acelerada; penetração de cloretos, cloretos totais, composição iônica, resistência à compressão, teor de água combinada, DRX e porosimetria, além da presente pesquisa, que estuda a absorção capilar e a difusão de água.

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência nas características e propriedades ligadas à durabilidade da camada de cobrimento de concretos com elevados teores de escória e cinza volante com e sem adição de cal hidratada. Esses concretos foram moldados e curados sob condições semelhantes às aquelas encontradas em obras de engenharia expostas ao tempo. A análise refere-se somente a esta camada por apresentar propriedades distintas do interior do concreto devido a fatores como o efeito parede, condições de cura, etc.

A pesquisa procura responder à seguinte pergunta: “Qual a influência de elevados teores de adições minerais, como a cinza volante e a escória de alto forno, na estrutura da camada de cobrimento do concreto quanto à percolação da água?”

Foram realizados os ensaios de absorção capilar e de difusividade de água para responder a esse questionamento e às seguintes perguntas relacionadas aos objetivos específicos:

- Qual a influência da escória e da cinza volante com e sem a adição de cal hidratada na absorção capilar e difusão de água na camada de cobrimento do concreto em igualdade de relação água/aglomerante? E em igualdade de resistência à compressão axial aos 91 e 300 dias em cura ambiental?

## 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta de cinco capítulos, versando o primeiro sobre a introdução ao tema proposto, a sua importância e os objetivos da pesquisa.

No capítulo dois, sob o título “Percolação da água na camada de cobrimento de concreto com adições minerais”, são discutidos, dentre outros aspectos, a durabilidade desta camada, sua vida útil, bem como a nova norma brasileira (NBR 6118) que aborda, entre outros assuntos, os valores limites da camada de cobrimento dependendo do ambiente em que está inserida. Trata também do tema “Mecanismos de percolação de água” com revisão sobre os ensaios realizados na pesquisa, absorção capilar de água e difusividade de água. Finaliza-se este capítulo com a abordagem sobre “Influência das adições minerais no concreto”. São realizadas algumas considerações sobre as adições minerais e como ocorrem as suas reações. Após, apresenta-se uma revisão das adições minerais utilizadas na pesquisa, escória de alto forno e cinza volante, bem como se discute sua influência na durabilidade do concreto.

O capítulo três aborda a “Investigação experimental” com a apresentação do programa de ensaios, análise dos materiais utilizados, método de dosagem e moldagem dos corpos de provas e protótipos. Apresenta, também, a descrição dos ensaios.

No capítulo quatro são apresentados os resultados dos ensaios e realizadas as suas análises e discussão em igualdade de relação água/aglomerante, de resistência à compressão, em relação ao diâmetro crítico e ao volume total intrudido.

No capítulo cinco são apresentadas as principais conclusões encontradas e as propostas para futuros estudos.

## 2 PERCOLAÇÃO DA ÁGUA NA CAMADA DE COBRIMENTO DE CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS

### 2.1 O efeito parede e a camada de cobrimento

Sabe-se que as características do concreto de cobrimento são diferentes do confinado no interior das peças estruturais. Essas diferenças dão-se principalmente pela absorção das fôrmas, pela evaporação da água para o ambiente, pelo efeito parede, dentre outras causas (Carasesek & Cascudo, 2001).

O efeito parede é a movimentação de argamassa e, principalmente, de pasta para junto de superfícies, tais como fôrmas, armaduras e os próprios agregados. A energia de compactação, ou de auto-compactação levam a argamassa e a pasta, confinadas na massa interna do concreto, em direção às superfícies de contato com as fôrmas.

Esse efeito é decorrente da ação absorvente das fôrmas de madeira e da adsorção física da água ou da pasta fluida do cimento nas superfícies de contato. No primeiro caso, conforme discutido por Savastano (1999), mediante o mecanismo de absorção capilar, a fôrma succiona certa quantidade de pasta e, principalmente, de água em sua direção. O resultado é um acréscimo da quantidade de cimento, porém com aumento da relação água/cimento na camada superficial do concreto, o que normalmente vem acompanhado da porosidade e da fissuração superficial. No segundo caso, o efeito na camada de cobrimento é o mesmo relatado, todavia o acréscimo de água na superfície se dá por adsorção da pasta ou da água na superfície com a fôrma, motivada por aspectos tais como tensão superficial dessa fase líquida do concreto e atração eletrostática entre a pasta ou água de amassamento e a superfície da fôrma (Cascudo, 2003).

Conforme Neville (1997) a movimentação da argamassa em direção às fôrmas só pode ser conseguida à custa de empobrecimento da massa interna do concreto. Isso porque a quantidade de argamassa necessária para preencher o espaço entre as partículas de agregado graúdo e a parede é maior do que a necessária no interior da massa e, portanto, maior que a quantidade disponível em uma mistura bem proporcionada.

Além desses fatores que tendem a diminuir a durabilidade da camada de revestimento, ela está sujeita às mais variadas condições ambientais, como secagem pela ação do sol e do vento, molhagem pela chuva que contém compostos dissolvidos provenientes da poluição (chuva ácida), cloretos provenientes de ambientes marinhos, ação do dióxido de carbono do ar provocando a carbonatação, entre outras (Camarini, 1999).

Segundo DeSouza et al. (1998), a camada superficial do concreto pode ser dividida em três outras: uma camada mais externa de pele de cimento, com 0,1mm de espessura; uma segunda camada de pele de argamassa, com 5 mm de espessura e uma camada mais interna de pele de concreto, com 30 mm. Essas camadas são formadas pelo efeito parede, resultado da sedimentação, do método de compactação e da evaporação da água.

Com efeito, são a espessura e a qualidade desta porção de concreto que protegem a armadura contra os agentes agressivos do meio ambiente em que a estrutura se encontra. Para Basheer et al. (2001), o desempenho do concreto depende das interações com o ambiente no qual a penetração de substâncias deletérias é mais significativa e é controlada principalmente pelas características de penetrabilidade da camada superficial do concreto.

Desse modo, a NBR 6118 (2003) classifica a agressividade do meio às estruturas de concreto armado e protendidos segundo as condições de exposição das estruturas ou de suas partes conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da agressividade de ambientes NBR 6118 (2003)

Macro-clima	Micro-clima			
	Ambientes internos		Ambientes externos e obras em geral	
	Seco <sup>1</sup>	Úmidos ou ciclos <sup>2</sup>	Seco <sup>3</sup>	Úmidos ou ciclos <sup>4</sup>
	UR ≤ 65%	molhagem-sacagem	UR ≤ 65%	molhagem-sacagem
Rural	fraca	fraca	fraca	Média
Urbano	fraca	média	fraca	Média
Marinho	média	forte	---	Forte
Industrial	média	forte	média	Forte
Especial <sup>5</sup>	média	forte ou muito forte	forte	forte ou muito
Respingos e Maré	---	---	---	muito forte
Submersa ≥ 3m	---	---	---	fraca
Solo	---	---	não agressivo: fraca	úmido e agressivo: média forte ou m. forte

1 Salas, dormitórios, banheiros, cozinhas, áreas de serviço ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura.

2 Vestiários, banheiros, cozinhas, lavanderias industriais e garagens.

3 Obras em regiões secas, partes protegidas de chuvas, ambientes predominantemente secos.

4 Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento, em indústria de celulose, armazéns de fertilizantes.

5 Macro-clima especial significa ambiente com forte agressividade bem conhecida, que permitirá definir a classe de agressividade forte ou muito forte nos ambientes úmidos. Se o ambiente for seco, a classe de agressividade será média nos ambientes internos e forte nos externos.

Para cada condição de exposição, a norma estabelece os valores de cobertura nominal acrescidos de uma tolerância de execução de 5 mm estando os valores expostos na tabela 2.

Tabela 2 – Relação entre as classes de agressividade ambiental e cobertura nominal NBR 6118 (2003)

Cobertura nominal (mm)	Componentes ou elementos	Agressividade ambiental			
		Fraca	Média	Forte	Muito forte <sup>3</sup>
Concreto armado	laje <sup>2</sup>	20	25	35	45
	viga/pilar	25	30	40	55
Concreto protendido <sup>1</sup>	todos	30	35	45	55
Relação a/c em massa	concreto armado	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
Resistência à compressão (MPa)	concreto armado	≥20	≥25	≥30	≥40

1 Cobertura nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão

2 Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamentos tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelo item 10.4.6, respeitando um cobertura nominal de 15mm.

3 As faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de afluentes e outras em ambientes química e intensamente agressivos devem ter cobertura nominal maior que 45mm.

A referida norma técnica considera que a durabilidade das estruturas depende não só das características do concreto da espessura, mas também da qualidade da camada de cobertura. É para atender a esses requisitos que estabelece limites para a relação água/cimento, para resistência à compressão do concreto e para a espessura do cobertura, sendo esta a principal responsável pela proteção contra a entrada de fluidos para o interior do concreto.

Segundo Neville (1997), os principais fluidos que podem ingressar no concreto são: água (pura ou carregando de íons agressivos), o dióxido de carbono e o

oxigênio. A durabilidade vai depender, em muito, da facilidade com que os fluidos se deslocam no interior do concreto, propriedade geralmente referida como permeabilidade.

Um dos principais caminhos para a entrada desses fluidos para o interior do concreto é a rede de poros existentes na camada de cobrimento e um dos motivos para o surgimento dessa rede de poros é o efeito parede.

Para Isaia (1999), as causas maiores da porosidade de concreto são originadas não só pela água em excesso utilizada na sua fabricação que, após evaporar, gera poros capilares de grande tamanho, mas também pelo ar aprisionado durante a operação de lançamento do concreto, que gera os macroporos. Ambos são os principais responsáveis pelos mecanismos que regem a durabilidade das estruturas de concreto.

De acordo com Aitcin (2000), qualquer concreto com relação água/aglomerantes superior a 0,5 possui microestrutura muito aberta, que oferece largas avenidas para a penetração de agentes agressivos. O autor complementa dizendo que um concreto com relação água/aglomerantes na faixa de 0,30 a 0,35 é pouco permeável o bastante para oferecer adequada proteção contra a corrosão do aço usual, desde que a espessura do cobrimento e a cura sejam adequadas.

Isaia (2000) comenta que a porosidade e a conectividade entre os poros são os fatores mais importantes para explicar os mecanismos pelos quais as espécies agressivas podem percolar, definindo os percursos para ingresso de líquidos e gases através do concreto.

Tendo em vista que a durabilidade de uma estrutura de concreto pode ser expressa em termos de porosidade e de seu parâmetro correlato mais importante, a permeabilidade, o conhecimento da distribuição dos tamanhos dos poros no concreto e a sua variação ao longo do tempo e no espaço são importantes. Além disso, deve-se considerar a análise da dicotomia da durabilidade interna e da superfície da peça estrutural, dependente das características da camada de cobrimento (Isaia, 2001).

Nesse aspecto, interessante estudo foi desenvolvido por Yuasa et al (2000) sobre a variação da resistência à compressão e porosidade de pastas cimento a partir da superfície em direção ao interior de corpos de prova moldados em concreto. Os resultados mostraram as seguintes evidências:

- Houve correlação linear entre o logaritmo da resistência à compressão e o volume total de poros, para cada relação a/c estudada;
- Quanto mais próxima da superfície, maior foi o volume total de poros, sendo essa tendência maior para relações a/c mais altas, bem como para concretos com secagem mais rápida;
- As resistências junto à superfície foram menores, em concordância com o aumento da porosidade total. A diferença de resistências entre a superfície e o interior do concreto foram de aproximadamente 20 MPa;
- A influência do decréscimo da resistência se estendeu até 5 cm de profundidade para as relações a/c de 0,4 e 0,6 e até 10 cm para 0,8.

Esses resultados evidenciam a importância da porosidade e distribuição do tamanho dos poros, a partir da superfície, na camada de cobrimento do concreto sobre as variáveis ambientais e intrínsecas que governam a sua durabilidade.

Para Mehta (1986), é a água que percola e/ou difunde através dos poros carregando íons agressivos, que controla os processos físicos, químicos ou físico-químicos de degradação do concreto. Portanto, é a sua porosidade que controla os movimentos da água em seu interior, bem como o tipo e a taxa de concentração de íons, além da composição química do cimento e agregados.

O CEB - Comité Euro-International du Béton (1992) relata que a água é, isoladamente, o fator mais importante que controla vários tipos de deterioração do concreto, com exceção dos agentes mecânicos. O transporte da água no seu interior é determinado pelo tipo, dimensão e distribuição dos poros, de modo que o controle da sua natureza e proporção é a tarefa fundamental para obtenção de estruturas duráveis.

Todas as medidas tomadas em relação à camada de cobrimento servem para atender o conceito de vida das estruturas definida na NBR 6118 (2003) que diz:

Por vida útil de projeto entende-se o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo; é após esse período que começa a efetiva deterioração da estrutura, com o aparecimento de sinais visíveis como: produtos de corrosão da armadura, deterioração do concreto, fissuras, etc.

Já o CEB (1992) define vida útil como sendo o período de tempo em que uma estrutura conserva os requisitos de projeto (segurança, funcionalidade, estabilidade

e estética) sem exigir medidas extras de manutenção e reparo, incluindo nesses requisitos aspectos de durabilidade como as ações do meio ambiente entre as possíveis solicitações a que a estrutura estará sendo submetida.

Segundo Pereira (2001), as medidas necessárias para estimar a vida útil das estruturas são escolhidas levando-se em consideração as características dos materiais, as condições de exposição e os modelos de deterioração. Porém, a determinação da vida útil das estruturas é extremamente difícil de ser realizada devido ao sinergismo existente entre os diversos fatores que regem as várias formas de degradação.

Helene (1993) conclui que os engenheiros podem ainda não ser hábeis para prever a durabilidade, mas têm a possibilidade efetiva de prolongar a vida útil das estruturas de concreto através do uso adequado das informações existentes, muitas vezes esquecidas ou negligenciadas.

Uma das medidas mais eficientes para assegurar a vida útil às estruturas de concreto é dotar a camada protetora da armadura de qualidade e desempenho adequados ao microclima em que se encontra a estrutura.

Para melhor compreensão dos fenômenos que regem o transporte de fluidos pelo concreto, especialmente a água, são descritos a seguir os principais mecanismos que atuam no seu transporte, especialmente através de seu revestimento.

## **2.2 Mecanismos de percolação de água no concreto**

O movimento de gases, líquidos e íons através do concreto é de suma importância para sua durabilidade, devido à interação destes com os constituintes do concreto ou com a água dos poros, podendo levar direta ou indiretamente à deterioração da estrutura. Esses movimentos, geralmente chamados de penetração, ocorrem devido a várias combinações de pressões diferenciais de ar ou água, umidades diferenciais ou diferenças de temperatura ou concentração de soluções. Dependendo da força motriz do processo e da natureza da matéria transportada, distinguem-se diferentes processos de transporte para substâncias deletérias através do concreto, tais como: difusão, absorção e permeabilidade (Basheer et al., 2001).



Esses processos de transporte de substâncias deletérias ocorrem a nível macroscópico e dependem da interação entre fluido e sólido (Reinhardt, 1992).

Paulon (2000) entende que os mecanismos de transporte de massa no concreto dependem não só das características físicas e químicas dos agentes agressivos, mas também de suas concentrações na superfície do concreto e das condições ambientais, além da estrutura dos poros (tipo, tamanho e distribuição dos poros) e do grau de umidade do concreto e da temperatura.

Segundo Isaia (1995), a porosidade é influenciada basicamente pela relação a/c, cura, e compactação do concreto. A relação a/c juntamente com o grau de hidratação são fatores decisivos porque definem a porosidade capilar, logo, a maior ou a menor facilidade de transporte de líquidos ou gases pelo concreto. A porosidade também é bastante sensível ao modo de cura, podendo quintuplicar ou até decuplicar se a superfície do concreto secar prematuramente, criando gradiente de dessecação interna, enquanto as reações de hidratação que governam o grau de maturidade do material cimentante ainda não estiverem suficientemente adiantadas. Essa sensibilidade aumenta com a relação a/c e decresce com o teor de cimento.

### 2.2.1 Absorção capilar de água

Ensaio têm demonstrado que a absorção capilar é o fator mais relevante no transporte de massa no concreto e que o grau de saturação tem enorme influência nos resultados (Reinhardt et al., 1994).

Conhece-se como absorção capilar o transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Esse fenômeno é dependente de características do líquido (viscosidade, densidade e tensão superficial), e de características do sólido poroso (raio, tortuosidade e continuidade dos poros, energia superficial, conteúdo de umidade).

Cascudo (1997) define o fenômeno:

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 (Cascardo, 1997, p. 43).

Silva Filho (1994) destaca que não há como se falar de problemas em estruturas de concreto sem fazer menção à água, que é o elemento fundamental na sua formação, mas que pode exercer um papel determinante na sua deterioração. Quando o concreto se encontra no estado denominado concreto fresco, a água funciona como meio para ocorrência das reações de hidratação que formam a estrutura resistente do material, atuando também como participante dessas reações. No concreto endurecido, a água pode atuar como meio de transporte para as substâncias deletérias oriundas do meio, possibilitando sua degradação.

Ho e Lewis (1997) comentam que uma absorção lenta indica a existência de capilares de pequenos diâmetros, com maior profundidade alcançada, ao contrário de uma absorção rápida que indica a existência de capilares maiores com menor profundidade atingida e maior quantidade de água adsorvida. Isso demonstra que, nas estruturas expostas ao ar, a taxa de absorção de água por sucção capilar serve como um indicativo do transporte de água no concreto.

No entanto, conforme Helene (1993), o mais importante é a intercomunicabilidade dos capilares, sendo menos relevante o seu diâmetro. O autor explica o fato com base em seus estudos, que demonstram que concretos de baixa relação água/cimento têm capilares de menor diâmetro e, ao mesmo tempo, muito menos intercomunicáveis, resultando em menor absorção de água e, também, menor profundidade de penetração dessa água.

Helene (1993) afirma que, para efeito de absorção capilar, deve-se considerar o maior ou o menor grau de saturação do concreto, pois não pode haver absorção capilar em concretos saturados. Segundo Pereira (2001), a absorção capilar ocorre principalmente em concretos aparentes e naqueles em contato com solos úmidos ou sujeitos a ciclos de molhagem. Por se tratar de transporte de água em vazios não saturados, a sucção capilar pode ter grande contribuição no transporte de água no interior das estruturas (Camarini, 1999).

Ao ser molhada, uma estrutura de concreto armado exposta absorve água por capilaridade; ao secar, libera novamente a água que foi absorvida. A esses fenômenos dá-se o nome de sorção. A maior ou menor quantidade de água

absorvida facilita ou dificulta a difusão de gases no concreto, afetando sua durabilidade. A absorção capilar é uma propriedade dos materiais não-saturados. De fato, o concreto das estruturas quase sempre está numa situação não saturada; portanto, a absorção capilar ocorre normalmente no concreto, isto é, o processo de penetração de água tem maior frequência em áreas expostas (Camarini, 1999).

Dentro de um poro capilar a pressão de vapor sobre o líquido é menor que a pressão de saturação, causando então a evaporação da água no interior do poro e, devido à diferença de pressão, surge o menisco, como se vê na Figura 1 (Ferreira 2003).

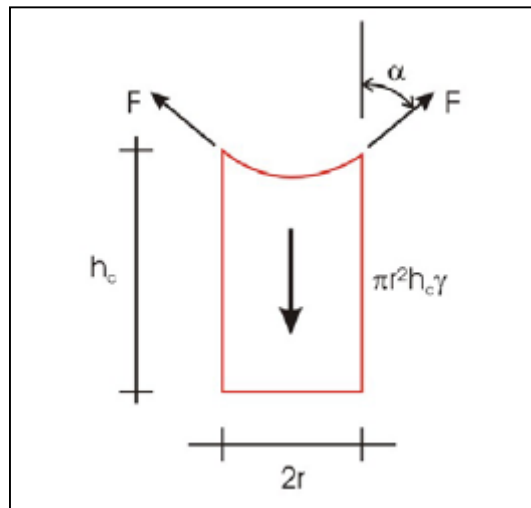


Figura 1 - Representação esquemática das forças que atuam num líquido dentro de um capilar (Ferreira, 2003).

Na Figura 1 é mostrado um líquido que ascende à altura  $h_c$  num capilar de raio  $r$  aberto para a pressão atmosférica no topo. A força que mantém a ascensão do líquido é a componente vertical da força  $F$ , ou seja  $F \cdot \cos \alpha$ . Sendo o comprimento do anel de contato igual a  $2 \cdot \pi \cdot r$ ,  $F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot T_s$  e a componente vertical de  $F$  é  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot T_s \cdot \cos \alpha$ , onde  $T_s$  é a tensão superficial do líquido. O volume do líquido no capilar é  $\pi \cdot r^2 \cdot h_c$ . Fazendo-se o equilíbrio de forças verticais, tem-se:

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot T_s \cdot \cos \alpha = \pi \cdot r^2 \cdot h_c \cdot \gamma \quad (\text{eq.1})$$

Considerando-se  $\alpha = 0$  (menisco semi-esférico), tem-se:

$$h_c = \frac{2.T_s}{\gamma.r} \quad (\text{eq.2})$$

Onde :  $h_c$  = altura de sucção ou penetração de água no capilar (m);

$T_s$  = tensão superficial do líquido (N/m);

$r$  = raio do capilar (m);

$\gamma$  = densidade do líquido (Kg/m<sup>3</sup>).

Considerando que a tensão superficial da água é aproximadamente 0,073 N/m e que sua densidade é 10 kN/m<sup>3</sup>, tem-se que:

$$h_c = \frac{15}{r} \quad (\text{eq.3})$$

Sendo  $h_c$  e  $r$  em milímetros.

A absorção capilar, portanto, é dependente da porosidade aberta, isto é, dos poros capilares interconectados, 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 mais intensas quanto menores forem os diâmetros dos capilares (Casculo, 1997).

Essa estrutura de poros caracteriza o concreto como um material hidrófilo, ou seja, um material ávido de água. Sendo assim, pode-se afirmar que as características hidrófilas do concreto e sua condição de umidade (que em menor teor favorece uma maior absorção) são aspectos de decisiva influência na capacidade absorvente do concreto.

### 2.2.2 Difusão de água

Segundo Isaia (2000), a difusão é um fenômeno que ocorre devido à tendência de equalização de fluidos entre o meio ambiente e os poros do concreto, através da interface entre a água e o ar presentes nos poros semi-umedecidos; na difusão, o transporte de matéria ocorre por diferença de concentração, com o movimento de moléculas ou íons, diferentemente da permeabilidade, em que o processo ocorre por diferença de pressão.

Um fator que influencia diretamente a difusão é o conteúdo de umidade do concreto, que depende da umidade relativa do ambiente no qual se insere o material. Segundo o CEB (1992), quando a umidade do ar é elevada, os poros vão estar cheios de água, dificultando a passagem de fluidos diminuindo, conseqüentemente, a difusão.

Neville (1997) relata que a difusão através da água é quatro ordens de grandeza maior do que através do ar e que o coeficiente varia com a idade do concreto porque o sistema de poros do concreto varia com o tempo, especialmente com a evolução da hidratação do cimento.

Além da difusão de gases, íons de caráter agressivo, particularmente cloretos e sulfatos, se deslocam por difusão na água dos poros. É nessa água que ocorrem as reações com a pasta de cimento hidratado de modo que a difusão iônica é importante com relação ao ataque por sulfatos ao concreto e ao ataque de cloretos à armadura. A difusão iônica é mais efetiva quando os poros da pasta de cimento hidratado estão saturados, mas também podem ocorrer em concretos parcialmente saturados (Neville, 1997).

A função da difusão que se aplica ao vapor de água e ao ar pode ser expressa pela primeira lei de Fick:

$$J = -D \frac{dc}{dL} \quad (\text{eq. 4})$$

onde:  $dc/dL$  = gradiente de concentração,  $\text{Kg/m}^4$  ou  $\text{moles/m}^4$

$D$  = coeficiente de difusão,  $\text{m}^2/\text{s}$

$J$  = velocidade de transporte de massa,  $\text{Kg/m}^2.\text{s}$  ou  $\text{moles/m}^2.\text{s}$

$L$  = espessura do elemento,  $\text{m}$ .

Mesmo a difusão se fazendo apenas através dos poros, os valores de  $D$  e  $L$  se referem à seção transversal do elemento de concreto; assim,  $D$  é, na realidade, o *coeficiente de difusão efetivo* (Neville, 1997).

O coeficiente de difusão depende de vários fatores, tais como o tipo de cimento, a incorporação de adições no concreto e o grau de saturação dos poros. Pode-se citar também a porosidade, a natureza do líquido que difunde, a temperatura, a relação água/cimento e o tipo de cátion presente na solução do poro (Helene, 1997).

Para efeito de ilustração, o coeficiente de difusão do oxigênio em um concreto bem curado, condicionado a uma umidade relativa de 55%, é menor do que  $5 \times 10^{-8}$  m/s<sup>2</sup> para concretos de alta qualidade, e maior do que  $50 \times 10^{-8}$  m/s<sup>2</sup> para concretos de baixa qualidade (Neville, 1997).

Um fator a ser considerado quando se lida com o processo de difusão são as reações químicas que ocorrem entre a substância penetrante e o concreto. Por exemplo, a difusão de íons cloreto no concreto é acompanhada por reações de fixação física e química com os produtos de hidratação. As reações reduzem a concentração de íons cloreto livres e, conseqüentemente, a tendência da difusão é de redução contínua até que se alcance o equilíbrio de concentrações e o processo cesse (Basheer et al., 2001).

## **2.3 Influência das adições minerais na camada de cobrimento do concreto**

### **2.3.1 Introdução**

Sabe-se que a durabilidade das estruturas está diretamente relacionada à porosidade, de modo que para se obterem estruturas de concreto duráveis, a utilização de adições minerais torna-se cada vez mais necessária. Constatou-se esse fato através de várias pesquisas que mostram os benefícios que o procedimento traz ao concreto em relação à diminuição da porosidade e da percolação de fluidos através dos poros.

As adições minerais são utilizadas como uma forma de aumentar as características de durabilidade das estruturas. Além disso, essas adições proporcionam diminuição de custos e melhorias ambientais.

A incorporação de pozolanas e subprodutos cimentícios ou adições minerais no concreto de cimento portland, segundo Swamy & Darwish (1997), pode melhorar as propriedades do concreto em ambos os estados fresco ou endurecido, e, particularmente, suas propriedades de durabilidade.

De acordo com Isaia et al. (2000), o uso de adições minerais, em especial pozolanas, como cinza volante ou cinza de casca de arroz, promovem as transformações na microestrutura no sentido de diminuição da porosidade e, portanto, maior dificuldade na percolação de líquidos ou gases através de sua

massa. Gastaldini (1996) comenta que as adições minerais através das reações pozolânicas reduzem a permeabilidade da pasta de acordo com a sua reatividade com o hidróxido de cálcio.

O desenvolvimento das reações pozolânicas proporciona a formação de compostos hidratados mais homogêneos e induz a diminuição dos teores de hidróxido de cálcio na solução dos poros do concreto, originando pasta mais densa pela substituição de poros grandes por menores. Isso dificulta o ingresso de agentes agressivos bem como o seu deslocamento no interior do sistema devido ao refinamento dos poros.

Além de possibilitar a redução da porosidade, as adições minerais propiciam um refinamento dos grãos de CH, tamponam os poros capilares e distribuem mais homogeneamente os produtos de hidratação do cimento portland em relação a um concreto tradicional (METHA, 1994).

Segundo Isaia (1995), esse tamponamento ocorre devido às reações pozolânicas que consomem o hidróxido de cálcio e produzem compostos semelhantes aos da hidratação do cimento, preenchendo os poros e tornando a microestrutura mais compacta. Há, ainda, o efeito físico causado pelas finas partículas das pozolanas, que funcionam como agentes defloculantes, dispersando os grãos de cimento e também a atuação como bloqueadores dos poros, por efeito filler.

Para Calleja (1969), os benefícios advindos do emprego de cimentos pozolânicos em relação ao cimento portland puro são: maior resistência à compressão e à tração, a longo prazo; maior resistência à reação álcali-agregado; menor retração; maior resistência ao ataque de águas salinas e ácidas; menor porosidade; menor calor de hidratação; melhor aderência da pasta ao agregado e da argamassa ao aço; menor custo do concreto. O autor não recomenda o emprego de pozolanas misturadas ao cimento diretamente na betoneira da obra devido ao risco de falta de controle adequado na dosagem. Porém, em centrais de produção de concreto, onde o controle dos materiais é rigoroso, torna-se viável a adição de pozolanas ao concreto, sem qualquer risco, usufruindo-se, assim, dos seus benefícios. O mesmo autor sugere a adição de pozolanas ao concreto principalmente em obras de grandes massas, em pavimentação e em obras marítimas, em obras sanitárias e na indústria de pré-fabricados, especialmente quando é usada a cura térmica.

Aïtcin (2000), citando estudos de Uchikawa (1986) e Uchikawa et al (1992), entre outros, explica 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 desses materiais, 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 esse tipo de adição é muito raro conseguir-se um concreto com a microestrutura adequada para o desempenho exigido.

A estratégia utilizada para melhorar a durabilidade do concreto com menor conteúdo de cimento e maior quantidade de adições minerais tem sido estudada por vários pesquisadores com o objetivo de ampliar o leque de opções para obtenção de concreto de alto desempenho com materiais locais e pelo menor custo possível.

Por outro lado, estudos realizados nos últimos anos sobre concreto com fins estruturais apontam a substituição crescente de cimento portland por escória de alto forno em teores de até 90% (Sato et al., 1998; Nakamoto et al., 1998), cinza volante em níveis iguais ou superiores a 50% (Malhotra, 1992; Isaia, 1995, Swamy, 1997). Esses trabalhos mostram o grande potencial que as adições minerais apresentam quando substituem igual massa de cimento, sem efeitos colaterais nocivos para a durabilidade do concreto, desde que as misturas sejam devidamente dosadas.

Pesquisas complementares realizadas pelo GEPECON (GASTALDINI e ISAIA, 2002, 2003, 2004 e 2005) evidenciam que aumentar o teor de substituição de cimento por adições minerais traz vantagens inegáveis sobre a grande maioria das variáveis relacionadas com a durabilidade. Entretanto, a carbonatação apresenta desempenho desfavorável devido à menor quantidade de hidróxido de cálcio disponível no interstício dos poros para reagir com o  $\text{CO}_2$ , o que provoca maior velocidade de avanço da frente de carbonatação. Para suprir esse inconveniente, nesta pesquisa é adicionada cal hidratada para repor o teor de CH não formado, devido à reposição de cimento portland pelas adições minerais.

Também deve ser levado em conta que o emprego de adições minerais acarreta vantagem econômica por serem materiais mais baratos que o cimento, além dos ganhos de energia embutida e menor emissão de gases nocivos à atmosfera pela sua produção. Segundo Isaia (2000), essa ação enquadra-se no conceito de sustentabilidade em que todos ganham: o produtor, por entregar produto



de menor custo (quase sempre); o consumidor, por adquirir material de melhor durabilidade e a sociedade, por manter o meio ambiente com níveis menores de poluição e maior conservação de recursos naturais.

### 2.3.2 Escória de Alto Forno

Escória granulada de alto forno é o subproduto da fabricação do ferro-gusa nas siderúrgicas. O material é obtido sob forma granular, sendo constituído de um vidro composto principalmente por cal, sílica, magnésio e alumina. Resulta da combinação dos minerais da ganga do minério de ferro, das cinzas do coque e da cal utilizada como fundente.

A escória corresponde ao líquido sobrenadante na base do alto forno (cadinho) que se separa do gusa, também líquido, por densidade. Na saída do alto forno, a escória pode experimentar um resfriamento rápido ao cair em tanques com água, conhecidos por tanques de granulação, originando um produto similar à areia de rio. Trata-se da escória granulada e vítrea, utilizada tradicionalmente pela indústria cimenteira como adição ao cimento portland (Pecchio & Battagin, 1999).

Mehta e Monteiro (1994) consideram que, em termos de durabilidade, é mais importante considerar a distribuição do diâmetro dos poros, para uma mesma relação água/cimento, comparativamente ao cimento portland, o cimento com escória de alto-forno tem um volume total de poros maior. No entanto, se considerada a distribuição do diâmetro dos poros, com a evolução da hidratação, a diminuição do volume de poros maiores e, conseqüentemente, o aumento do volume de poros menores é mais acentuada para o cimento com escória.

Pecchio & Battagin (1999) relatam que por possuir propriedades hidráulicas latentes, as escórias vêm sendo bastante utilizadas em substituição ao cimento, apresentando capacidade de gerar, por combinação com a cal liberada pela hidratação do clínquer, compostos com propriedades aglomerantes, similares aos gerados pelo cimento portland.

De acordo com Neville (1997), a adição de escória de alto-forno ao concreto reduz bastante a permeabilidade do concreto à água, bem como a difusividade, principalmente a íons cloreto. Esses efeitos são atribuídos à microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, devido ao preenchimento dos poros por C-S-

H. No entanto, a hidratação inicial da escória de alto forno é lenta porque depende da decomposição da fase vítrea pelos íons de hidroxila liberados durante a hidratação do cimento portland.

Para Hoppe Filho (2002), a liberação progressiva dos álcalis pela escória de alto forno, juntamente com a formação do hidróxido de cálcio pelo cimento portland, resulta uma reação contínua da escória de alto forno por longo tempo. Assim, observa-se um aumento de resistência a longo prazo. No entanto, é maior a velocidade de hidratação do cimento portland com escória de alto forno a idades maiores. Assim, no geral, é reduzido o pico de temperatura do concreto devido à hidratação do cimento com a inclusão da escória de alto forno na mistura.

Türkmen et al. (2003) constataram que a resistência à compressão dos concretos com escória de alto-forno aos 28 dias é inferior à do concreto de referência, somente com cimento, porém, apresentando valores superiores para idades mais avançadas.

Além dos benefícios originados pela escória de alto-forno em relação à distribuição e tamanho dos poros, essa adição mineral melhora a trabalhabilidade e torna a mistura mais plástica, mais coesa. Tal benefício é consequência de uma melhor dispersão das partículas cimentícias e das características de superfície das partículas da escória granulada, que são lisas e absorvem pouca água durante a mistura. No entanto, a trabalhabilidade do concreto com escória de alto forno é mais sensível a variações de água do que os concretos com cimento portland sem adições. Quando tem finura elevada, a escória granulada reduz a exsudação do concreto (Neville, 1997).

Outra vantagem da utilização de escória é comprovada por Glukhovsky et al (1980) apud John (1995) que apontam que o silicato de cálcio hidratado formado a partir da escória é menos básico do que o dos cimentos portland (menor relação C/S) e, por essa razão, apresenta menor solubilidade em água. Entretanto, Glukhovsky et al. (1983) apud John (1995) afirmam que o pH permanece elevado (entre 11,5 e 12) e a velocidade de corrosão das armaduras é de 2 a 2,5 vezes menor do que nos concretos convencionais.

#### 2.3.2.1 A escória de alto-forno e a percolação de água no concreto

Kelham (1988) apud Bai et al. (2002) demonstrou que, para concretos com substituição em massa de 25% de cinza volante e 65% de escória de alto-forno e cura úmida, há uma substancial redução na sortividade, definido por Neville (1997) como gradiente da curva que relaciona a absorção capilar e a raiz quadrada do tempo. Dessa forma, numa mesma data, a sortividade e a absorção capilar são diretamente proporcionais, quando comparadas ao concreto de referência, somente com cimento.

De acordo com Neville (1997), pode haver melhoria na microestrutura do concreto com teores de escória de alto-forno até valores entre 60% e 70% em substituição ao clínquer; sendo que a mistura de escória de alto-forno com cimento Portland resulta em uma mistura com maior quantidade de sílica, originando, então uma microestrutura com maior quantidade C-S-H.

Em pesquisas realizadas por Hoppe Filho (2002) foram utilizadas misturas binárias de cimento e 70% de escória e ternária de 70% de escória e 20% de cinza volante com adição de cal hidratada em teores de 15% e 18%, moldados em três relações água/aglomerantes (0,35; 0,45 e 0,55). Em relação à resistência à compressão, a mistura binária acarretou um acréscimo de 10% e na mistura ternária, um acréscimo de 9%. Para absorção capilar, houve um decréscimo de 117% na mistura binária com escória e de 342% para a mistura ternária de escória e cinza volante. Nessa pesquisa analisando os resultados em igualdade de resistência para o patamar de 35 MPa, o concreto com 70% de escória e a mistura ternária de 70% de escória e 20% de cinza volante, ambos com adição de cal, obtiveram coeficientes de absorção capilar, respectivamente de  $668,9 \text{ g/m}^2$  e  $878,1 \text{ g/m}^2$ , contraposto por  $930,1 \text{ g/m}^2$  do concreto de referência, somente com cimento. Na resistência à compressão de 55 MPa, a mistura ternária com 20% de cinza volante e 70% de escória, com cal, a mistura com 70% de escória sem e com cal, apresentaram coeficientes de absorção capilar inferiores ao concreto de cimento portland, estando estes entre  $149,4 \text{ g/m}^2$  e  $210,3 \text{ g/m}^2$ , valores, no mínimo, 2 vezes menores que o referencial.

Türkmen et al. (2003) estudou concretos com a substituição de cimento por escória de alto-forno, nas proporções de 20 e 40%, e sílica ativa, na proporção de 10%. Os concretos receberam uma cura diferenciada até os 28 dias, sendo curados ao ar nas primeiras 24 horas, imersos em água com cal por 13 dias e curados por 14 dias em ambiente com umidade de 75-80% e temperatura de 30°. Após os 28 dias,

alguns corpos de prova foram curados em água com cal até 400 dias e outros em soluções de 5% NaCl, 5% MgSO<sub>4</sub> e 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. A durabilidade aos efeitos corrosivos dos concretos com escória de alto-forno (20% e 40%) mais sílica ativa (10%) e cimento comum foi maior do que concretos somente com sílica ativa (10%) e cimento comum. O autor completa que o uso de escória de alto-forno e sílica ativa aumenta a durabilidade e a resistência mecânica dos concretos.

Ferreira (2003), estudando concretos com presença de adições minerais em substituição parcial à massa de cimento (65% de escória de alto-forno, 25% de cinza volante, 10% de cinza de casca de arroz, 10% de metacaulinita e 10% de sílica ativa); relação água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70); e o procedimento de cura (cura ao ar e cura úmida), obteve redução no coeficiente de absorção capilar em todos os traços a partir dos 91 dias e relação ao concreto de referencia (Tabela 3).

Tabela 3: Absorção capilar média para o concreto de referência e para escória (Ferreira, 2003).

CONCRETO	TEOR DE ADIÇÃO (%)	a/ag	ABSORÇÃO CAPILAR MÉDIA (g/cm <sup>2</sup> )		
			28 DIAS	91 DIAS	182 DIAS
REFERÊNCIA	0	0,40	0,42	0,62	1,06
		0,55	0,49	0,94	0,85
		0,70	0,80	0,70	0,63
ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	65	0,40	0,45	0,59	0,68
		0,55	0,67	0,60	0,60
		0,70	0,27	0,54	0,60

Sperb (2003), pesquisando concretos binários com 70% de escória (E), 20% de cinza de casca de arroz (A), 20% de cinza volante (V) e a mistura ternária de 50% de escória e 20% de cinza de casca de arroz (E A), (com e sem presença de ativador químico), além do referência somente com cimento, executados com relação a/ag de 0,35; 0,50; 0,65, obteve os seguintes coeficientes de absorção capilar médios para os concretos sem a presença de ativadores: R = 2840,51 g/m<sup>2</sup>, 70% de E = 1188,57 g/m<sup>2</sup> (-58% em relação ao referência), 20% de A = 1308,14 g/m<sup>2</sup> (-53%), 20% de V = 1584,67 g/m<sup>2</sup> (-44%) e de 50% de E + 20% de A = 1119,43 g/m<sup>2</sup> (-60%). Para essa mesma pesquisa, os valores encontrados para os níveis de resistência de 40 MPa, 50 MPa e 60 MPa nas misturas sem a presença de ativador estão na tabela 4.

Observa-se quem em todos os traços com adições minerais a absorção é significativamente menor que o concreto de referencia.

Tabela 4 – Absorção capilar em igualdade de resistência (Sperb, 2003)

MISTURA	NÍVEL DE RESISTÊNCIA					
	40 MPa		50 MPa		60 MPa	
	a/ag	Q (g/m <sup>2</sup> )	a/ag	Q (g/m <sup>2</sup> )	a/ag	Q (g/m <sup>2</sup> )
<b>R</b>	0,58	3686,00	0,50	2601,40	0,44	1875,20
<b>70 E</b>	0,50	1035,80	0,37	480,00	ND	ND
<b>20 A</b>	0,59	1852,90	0,52	1280,80	0,46	907,60
<b>20 V</b>	0,58	2076,90	0,49	1307,50	0,43	843,30
<b>50E20A</b>	0,60	1757,40	0,48	661,80	0,39	244,90

Vagheti (2005), estudando concretos com compostos de misturas binárias de 25% e 50% de cinza volante (CV), 25% de cinza de casca de arroz (CCA), 70% de escória de alto-forno (E) e referência (R) somente cimento com relação a/ag (nominais) de 0,5; 0,6 e 0,70, obteve coeficientes de absorção capilar considerando a relação a/ag intermediária de 0,6 para a mistura binária com 25% de CCA = 2722 g/m<sup>2</sup>, 25% de CV = 2603 g/m<sup>2</sup>, 50% de CV = 1947 g/m<sup>2</sup>, R = 1345 g/m<sup>2</sup> e 70% de E = 1017 g/m<sup>2</sup>.

### 2.3.3 Cinza Volante

Devido à cinza volante ser um resíduo da queima do carvão mineral em fornalhas, apresenta algumas variações. As 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. É possível melhorar a distribuição de tamanhos de partículas por classificação e moagem (Neville, 1997).

As cinzas volantes têm sido incorporadas ao concreto fresco também com o intuito de aumentar a coesão e a trabalhabilidade, bem como diminuir a exsudação e a segregação. As reações de hidratação ficam um pouco retardadas nas idades iniciais e a temperatura do concreto fica reduzida pelo menor calor liberado. A longo prazo, geralmente, em idades superiores a 28 dias, a continuidade das reações pozolânicas aumenta a resistência do concreto pelo refinamento dos poros da pasta, resultando em um concreto mais compacto, com menor permeabilidade e conseqüente aumento da durabilidade (Isaia, 1991).

Hoppe (2002) salienta que os incrementos na resistência à compressão decorrentes do emprego da cinza volante ocorrem, a longo prazo, em idades superiores a 28 dias, até que haja disponibilidade de hidróxidos alcalinos ou de cálcio em concentração suficiente na solução aquosa dos poros para propiciar a quebra da fase vítrea das pozolanas. Com a hidratação do cimento, o hidróxido de cálcio reage com a sílica amorfa da cinza volante, gerando C-S-H adicional que ocupa os espaços dos poros, reduzindo seus tamanhos e até obstruindo-os; por conseqüência reduz-se a porosidade capilar. Essa reação é lenta, o que, se por um lado reduz o desprendimento do calor de hidratação do cimento; por outro, exige um cuidado maior na cura, isto é, há necessidade de molhagem prolongada do concreto para que ele atinja as suas potencialidades (Frizzo, 2001).

As condições de cura dos concretos com cinza volante são de grande influência. Em baixas temperaturas, a reação pozolânica processa-se lentamente, retardando o endurecimento do concreto; porém, fazendo-se a cura em temperaturas elevadas, 50 a 70° C, apropriadas para pré-fabricados, o incremento de resistência do concreto é grande, atingindo, aos 28 dias, resistência bem superior ao concreto sem adição de cinza volante (Malhotra, 1992).

Em relação ao retardo das reações em concretos com cinza volante, Hassan et al. (2000) relatam que em concretos com 30% de cinza volante de baixo teor de cálcio, a resistência é 11% menor do que a do concreto de referência, sendo similar aos 28 dias e 7% superior aos 365 dias.

#### 2.3.3.1 Cinza volante e a percolação de água no concreto no concreto

Dhir e Byars (1993) realizaram ensaio de permeabilidade sob pressão de água em um aparelho desenvolvido na Universidade de Dundee. Concluíram que a substituição de cimento por até 30% de cinza-volante reduziu a permeabilidade do concreto, em igualdade de resistência aos 28 dias, e que a cinza-volante contribuiu para maior redução do fluxo de água, particularmente para o concreto com deficiência de cura.

Programa semelhante ao anterior foi desenvolvido por Ballim (1993) estudando vários tipos de cura de concreto com 30% de CV. Foi medida a absorção de água nas profundidades de 1-15, 15-30 e 30-45 mm a partir da superfície. O autor

concluiu que: a) a cura úmida tem efeito marcante na redução da absorção capilar da camada de cobertura do concreto, em especial nas primeiras idades; b) para aumentar o potencial de durabilidade do concreto é mais rentável aumentar o período de cura úmida do que diminuir a relação a/ag; c) em igualdade de resistência a 28 dias, os concretos com CV apresentam menor absorção de água que os concretos de referência.

Em ensaios de penetração de água, Isaia (1995) mostrou que o aumento de 25% para 50% no teor de substituição de cimento por cinza diminuiu o coeficiente de penetração (difusão) de água à metade, de  $8.10^{-12}$  para  $4.10^{-12}$  (em igualdade a/ag), devido ao refinamento dos poros do concreto, ao tamponamento dos poros maiores pelas reações pozolânicas e ao efeito filler proporcionado pela cinza volante na mistura cimentante. Com relação à resistência à compressão, esta sofreu uma pequena redução, inferior a 20%, mostrando que a adição de cinza volante é mais relevante na questão da durabilidade do concreto do que em relação a outros aspectos.

Na pesquisa de Frizzo (2001), foram obtidos aos 91 dias, para o concreto de referência (CPV-ARI), com relação água/aglomerantes 0,35, absorção capilar de  $1.996,0 \text{ g/m}^2$  e  $3.690,0 \text{ g/m}^2$  para água/aglomerantes 0,50. Para os concretos com materiais pozolânicos, para a mistura com 50% de cinza volante na relação água/aglomerantes 0,35 um coeficiente de absorção  $542,0 \text{ g/m}^2$  (redução de 73% em relação ao referência) e na relação água/aglomerantes 0,50 obteve-se um coeficiente de  $700,0 \text{ g/m}^2$  (redução de 65%).

Hoppe (2002), estudando misturas binárias e ternárias de concretos com cinza volante com adição de cal hidratada, obteve decréscimo médio de 298%, para o concreto com cinza volante e adição de cal, no coeficiente de absorção capilar, 456% para a mistura ternária com cinza volante e cinza de casca de arroz e 342% para a mistura ternária com cinza volante e escória, tendo como parâmetro os valores médios do concreto de cimento portland. Em relação à permeabilidade ao oxigênio para o concreto com cinza volante, a adição da cal resultou em decréscimo médio de 209% no coeficiente de permeabilidade, 259% para a mistura ternária com cinza volante e cinza de casca de arroz e 2.241% para a ternária com cinza volante e escória, tendo como parâmetro os valores médios do concreto de cimento portland. A adição da cal, ao patamar de 35 MPa, propiciou decréscimos médios de 37% para o concreto com cinza volante, 55% para o concreto com cinza de casca de

arroz, 50% para o concreto com escória, 40% para a mistura ternária com cinza volante e cinza de casca de arroz e 63% para o concreto com cinza volante e escória. Para 55 MPa, o efeito da cal mostrou-se de forma mais aleatória, pois averiguou-se decréscimo de 45% para o concreto com cinza volante, 33% para o concreto com cinza de casca de arroz, 0% para o concreto com escória, 49% para a mistura ternária com cinza volante e cinza de casca de arroz e 88% para o concreto com cinza volante e escória, tendo como parâmetro os valores médios do concreto de cimento portland.

Duarte (2003), utilizando cinza leve (cinza volante), constatou uma redução significativa na absorção de água aos 150 dias para as dosagens contendo 14% de cinza leve. Essa redução na absorção foi em média de 29% em relação aos resultados extraídos do concreto de referência.

Sperb (2003), pesquisando concretos binários com 70% de escória (E), 20% de cinza de casca de arroz (A), 20% de cinza volante (V) e a mistura ternária de 50% de escória e 20% de cinza de casca de arroz (E A), (com e sem presença de ativador químico), além do referência somente com cimento, executados com relação  $a/ag$  de 0,35; 0,50; 0,65, obteve redução de 44% para o concreto com 20% de cinza volante em relação ao concreto de referencia somente com cimento.

Petry (2004), pesquisando concretos com 50% de cinza volante em substituição ao cimento com e sem adição de cal hidratada (20%) e relação  $a/ag$  de 0,40; 0,55 e 0,75, comparados com o concreto de referência somente com cimento e relação  $a/ag$  0,40; 0,55 e 0,75, constatou uma absorção capilar, para a mistura binária sem cal, maior em relação ao concreto de referência sendo a maior constada no traço com  $a/ag$  0,40. Já nos traços com cal hidratada, observou-se um comportamento semelhante ao concreto de referência com pequenas variações na quantidade de água absorvida. Para a difusividade à água, no entanto, os concretos binários obtiveram um resultado bem mais satisfatório com reduções no coeficiente de difusividade de até 37% ( $a/ag = 0,40$ ) e 54% ( $a/ag = 0,75$ ) em comparação ao concreto de referência. Nas figuras 2 e 3 estão os resultados obtidos, para absorção capilar e difusividade à água, sendo:

- Camada 1: Superfície 0,0 cm;
- Camada 2: a partir da superfície 2,5 cm;
- Camada 3: a partir da superfície 5,0 cm.



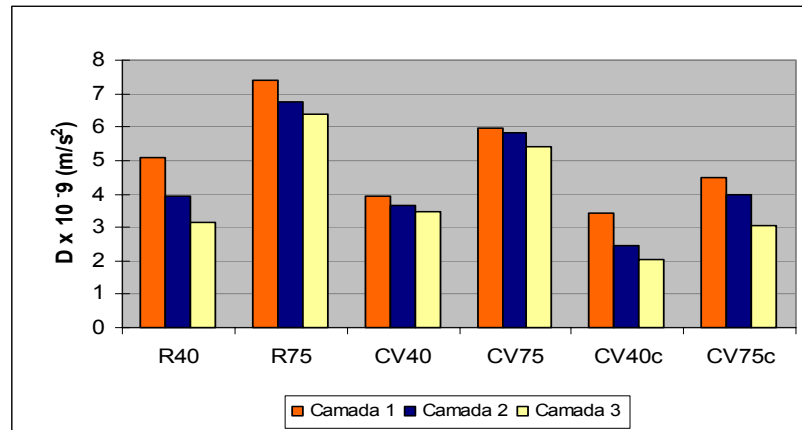


Figura 2 - Coeficiente de difusividade  $D$  ( $\times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ ) nas camadas do cobrimento aos 91 dias (Petry, 2004)

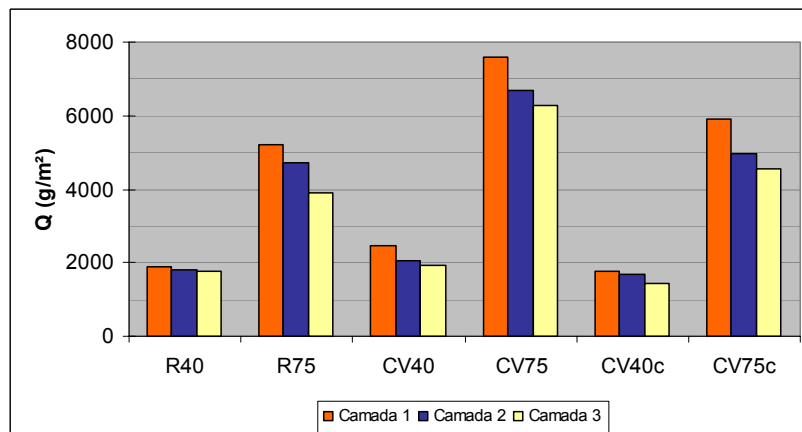


Figura 3 - Quantidade de água absorvida  $Q$  ( $\text{g/m}^2$ ) nas camadas do cobrimento aos 91 dias (Petry, 2004)

### **3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL**

Este trabalho, utilizando-se de parâmetros técnicos e científicos, foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento das estruturas de concreto no aspecto de sua durabilidade. Para isso, foram moldadas peças protótipos retangulares de concreto utilizando dois tipos de adições minerais: cinza volante e escória de alto forno, com e sem adição de cal hidratada. Para verificação do aspecto da durabilidade, foram realizados os ensaios de absorção capilar e difusividade a água.

#### **3.1 Materiais utilizados**

Para a realização desta pesquisa foram moldados nove traços. Três deles, considerados de referência, foram moldados somente com cimento; os seis restantes, com misturas ternárias compostas de cimento, escória e cinza volante, com e sem adição de cal hidratada. Para a moldagem das misturas ternárias, o cimento foi substituído em massa pela escória e cinza volante sendo a cal adicionada a três traços dessa mistura.

Todos os materiais desta pesquisa foram ensaiados para determinação de suas propriedades físicas e químicas seguindo as normas pertinentes, tornando possível a realização de outras pesquisas com materiais de características semelhantes, sendo possível a comparação dos resultados.

##### **3.1.1 Materiais Cimentícios**

A seguir estão descritos os ensaios e as características físicas e químicas dos materiais cimentícios utilizados nesta pesquisa.

###### **3.1.1.1 Cimento**

O cimento utilizado foi do tipo CPV – ARI, portland de alta resistência inicial, em conformidade com a EB – NBR 5733. A utilização deste cimento deve-se ao fato

de apresentar uma maior quantidade de clínquer, além de um alto teor de  $C_3S$  (silicato tricálcico) o que disponibiliza em um menor espaço de tempo, uma maior quantidade de hidróxido de cálcio para as reações pozolânicas.

Os ensaios de caracterização física e química do cimento foram realizados de acordo com as normas relacionadas abaixo. As características físicas estão na tabela 5, e as químicas são apresentados no quadro 1:

- 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

Tabela 5 – Caracterização física do cimento

<b>Cimento</b>	<b>(CPV - ARI)</b>
Resistência (MPa) – 3	35,69
Resistência (MPa) – 7	40,25
Resistência (MPa) - 28	45,35
Início de Pega - (min)	125
Resíduo # 0,075mm - (%)	1,4
Área Específica - (m <sup>2</sup> /Kg)	430
Massa Específica - (Kg/dm <sup>3</sup> )	3,15

### 3.1.1.2 Adições minerais

As adições minerais utilizadas foram a cinza volante, adquirida junto a uma empresa de concretagem local que foi utilizada como recebida da empresa, não passando por processo de queima ou moagem; a escória granulada de alto forno foi proveniente da CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão - que também foi utilizada como fora entregue. Para caracterização física e química das adições minerais, foram realizados os seguintes ensaios:

- Massa específica – NBR 6474
- Finura # 0,075 mm – NBR 11579
- Superfície específica Blaine – NBR 7224
- Análise química – procedimento IPT

A caracterização física das adições minerais é apresentada na tabela 6 e as características químicas na tabela 7.

### 3.1.1.3 Cal hidratada

A cal hidratada foi obtida junto à empresa ICAL – Indústria de Calcinação LTDA, de Minas Gerais. A cal utilizada foi do tipo cálcica por apresentar um maior teor de cálcio. Para caracterização física e química das adições minerais, foram realizados os seguintes ensaios:

- Retirada e preparação da amostra – NBR 6471
- Análise química – NBR 6473
- Massa específica – NBR 6474
- Finura Blaine – NBR 7224

A caracterização física das adições minerais e da cal hidratada é apresentada na tabela 6 e as características químicas, na tabela 7.

Tabela 6 - Caracterização das adições minerais e cal

<b>Caracterização</b>	<b>Escória</b>	<b>Cinza volante</b>	<b>Cal</b>
<b>Resíduo #0,075mm - (%)</b>	2,46	9,38	0,9
<b>Área Específica - (m<sup>2</sup>/Kg)</b>	510	420	773
<b>Massa Específica - (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,89	2,28	2,23

Tabela 7 - Composição química do cimento, adições minerais e cal

<b>Componentes</b>	<b>Teor em massa (%)</b>			
	<b>CP</b>	<b>E</b>	<b>CV</b>	<b>Cal</b>
<b>Perda ao fogo</b>	3,0	0,8	1,2	26,1
<b>SiO<sub>2</sub></b>	19,3	33,9	64,6	0,9
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,7	11,2	27,3	0,4
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,0	0,9	2,2	0,2
<b>CaO</b>	63,4	43,6	1,5	73,1
<b>MgO</b>	1,8	7,7	0,8	0,4
<b>SO<sub>3</sub></b>	3,1	-	0,1	0,2
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,8	0,4	1,5	
<b>Sulfeto</b>	-	1,2	-	-

### 3.1.2 Agregados

As características físicas dos agregados basearam-se nos ensaios normalizados citados abaixo.

- 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

#### 3.1.2.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria/RS. Lavada e seca em estufa e armazenada em sacos de adubo. A areia utilizada foi classificada de acordo com a distribuição dos grãos dentro dos limites da NBR 7211. As características são apresentadas na tabela 8 e a curva granulométrica, na figura 4.

#### 3.1.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo era proveniente de rocha diabásica britada, lavada e seca em estufa e estocada em sacos de adubo. Este agregado procede do município de Itaara, RS. As características físicas são apresentadas na tabela 8 e a curva granulométrica, na figura 5.

Tabela 8 - Caracterização dos agregados

Peneiras - (mm)	Brita (%Retida Acumulada)	Areia (% Retida Acumulada)
19,5	1	-
12,5	38	-
9,5	71	-
6,3	97	-
4,8	100	0
2,4	100	1
1,2	100	3
0,6	100	17
0,3	100	73
0,15	100	94
< 0,15	100	100
<b>Módulo de Finura</b>	5,36	1,88
<b>Dmáx. Característico - (mm)</b>	19,00	1,18
<b>Massa Específica - (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,49	2,61
<b>Massa Unitária Solta - (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	1,34	1,64
<b>Absorção de Água - (%)</b>	3,03	0,50
<b>Umidade Crítica</b>	-	3,20
<b>Coefficiente de Inchamento Médio</b>	-	1,23
<b>Abrasão Los Angeles - (%)</b>	16,36	-
<b>Índice de Forma</b>	2,70	-

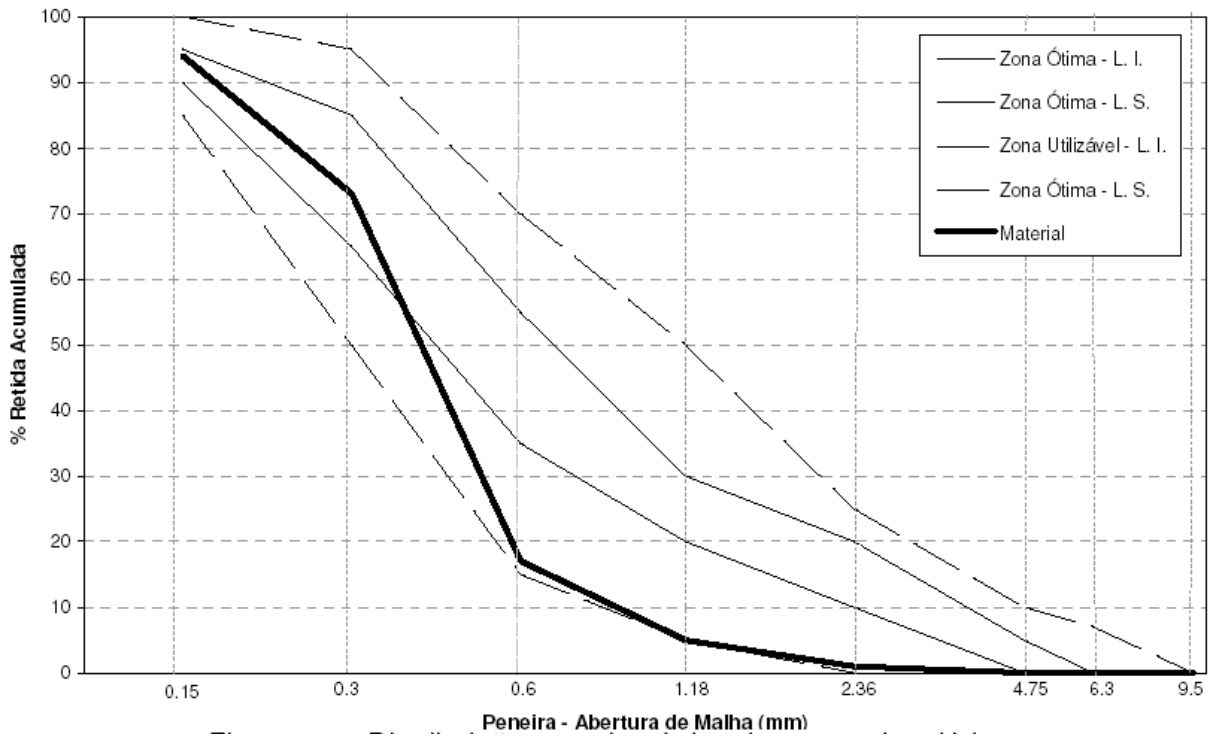


Figura 4 - Curva granulométrica do agregado miúdo

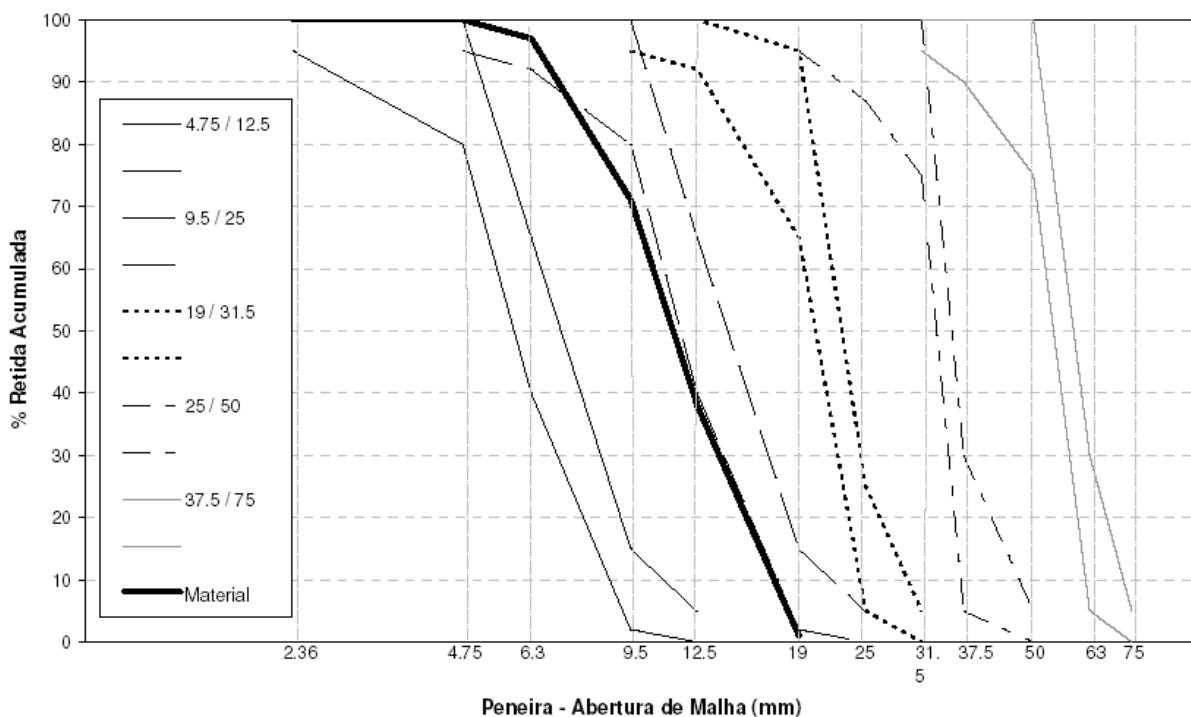


Figura 5 - Curva granulométrica do agregado graúdo

### 3.1.3 Aditivo Superplastificante

Para obtenção do *slump* desejado de 80 mm  $\pm$  20 mm, exceto em alguns traços que não foi possível manter-se nesta faixa devido ao excesso de finos, foi utilizado o aditivo superplastificante GLENIUM 51 da MBT. A determinação da dosagem inicial de aditivo superplastificante a ser utilizada nos concretos investigados deu-se através de ensaios de trabalhabilidade para cada mistura aglomerante e relação a/ag. Esses resultados serviram de parâmetro para as moldagens definitivas.

GLENIUM 51 é um aditivo com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, isento de cloretos, com PH de 5 a 7 e teor de sólidos médio de 30%, com uma massa específica de 1,10 g/cm<sup>3</sup>. A dosagem desse aditivo foi feita de acordo com os resultados obtidos no ensaio de trabalhabilidade com o aparelho VEBE.

### 3.2 Moldagem e dosagem dos corpos de prova e protótipos

Para a realização desta pesquisa foram moldados nove traços no total. Destes, seis eram misturas ternárias de cimento, escória e cinza volante; alguns desses traços continham cal hidratada, como será exposto posteriormente. As adições minerais foram utilizadas em substituição à massa de cimento, sendo a cal hidratada adicionada à mistura, a fim de se manter constante o volume de argamassa. O ajuste foi feito na quantidade de areia a ser utilizada.

Nesta pesquisa, foram utilizados elevados teores de adições minerais buscando complementar pesquisas anteriores realizadas pelo Grupo de Estudo e Pesquisa em Concreto (GEPECON) que comprovaram a eficácia da substituição de cimento por até 50% de cinza volante ou cinza de casca de arroz e de até 70% de escória. Devido ao elevado teor de adições minerais, observa-se a necessidade de reposição de hidróxido de cálcio da mistura, sendo que ocorre uma diminuição na quantidade deste componente em virtude do menor teor de cimento, além do que foi consumido nas reações pozolânicas para formação do C-S-H secundário, justificando assim a utilização da cal hidratada. Abaixo, apresentam-se as composições estudadas:

- Traço de referência somente com cimento relação a/c de 0,4, 0,6 e 0,8;
- Traço com 70% de escória e 20% de cinza volante em substituição à massa de cimento e relação a/ag de 0,3, 0,4 e 0,5;
- Traço com 70% de escória e 20% de cinza volante em substituição à massa de cimento e adição de 20% de cal, com relação a/ag de 0,3, 0,4 e 0,5;

Adotaram-se valores mais elevados para a relação a/c nos traços de referência com a intenção de manter as resistências à compressão semelhantes em relação aos traços com adições minerais, já que essas adições acarretam uma diminuição na resistência. É necessária, então, a utilização de uma menor quantidade de água.

O teor de argamassa seca ( $\alpha$ ) de 52% foi mantido aproximadamente constante em todas as misturas. A variação do volume de argamassa ocorreu de modo a proporcionar a trabalhabilidade adequada ao concreto fresco, através de ensaios de abatimento do tronco de cone, dada a variação admitida do abatimento ( $8.0 \pm 2.0$ cm), exceto os concretos E3, EV3 e EVC4 que, devido ao elevado teor de finos e aditivo, foram auto-densáveis (sem segregação), isto é, não pôde ser medido o abatimento.



Não foi corrigido o teor de argamassa da camada 1 em relação as outras camadas, o que pode acarretar em pequenas diferenças nos resultados de absorção capilar.

Houve dificuldade em determinar o teor de aditivo na betoneira grande (200 kg de materiais secos), comparada com a pequena (30 ou 40 kg de materiais secos) em que foram realizados os ensaios de trabalhabilidade, devido à influência do tamanho do tambor e da quantidade de materiais misturados e, ainda, ao elevado teor de materiais finos que dificultaram bastante a homogeneização do aditivo no tambor maior. Entretanto, os demais concretos atingiram o abatimento especificado. Na tabela 9 tem-se a nomenclatura utilizada com a respectiva porcentagem de material.

Para cada traço, foram moldados seis protótipos prismáticos com dimensões de 75 cm x 20 cm x 15 cm em fôrmas de compensado naval de 15 mm com armação metálica para conferir mais rigidez à estrutura. Nas fôrmas foi utilizado óleo queimado para facilitar a desmoldagem. A escolha dessas dimensões deve-se à intenção da pesquisa que busca aproximar o máximo esta peça à viga de uma construção.

Tabela 9 - Nomenclatura utilizada e porcentagens utilizadas

<b>NOMENCLATURA</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>a/ag</b>
<b>R4</b>	REFERÊNCIA	0,4
<b>R6</b>	REFERÊNCIA	0,6
<b>R8</b>	REFERÊNCIA	0,8
<b>EV3</b>	70% ES + 20% CV + 10% CP	0,3
<b>EV4</b>	70% ES + 20% CV + 10% CP	0,4
<b>EV5</b>	70% ES + 20% CV + 10% CP	0,5
<b>EVC3</b>	70% ES + 20% CV + 10% CP + 20% Cal	0,3
<b>EVC4</b>	70% ES + 20% CV + 10% CP + 20% Cal	0,4
<b>EVC5</b>	70% ES + 20% CV + 10% CP + 20% Cal	0,5

Antes de cada moldagem, foi verificada a trabalhabilidade de cada traço com o aparelho de VEBE. Esse procedimento foi realizado para determinar a quantidade de aditivo superplastificante a ser utilizado a fim de se chegar ao abatimento estipulado. As quantidades de material utilizadas para cada traço estão na tabela 10.

Os protótipos foram moldados em três camadas, cada camada foi adensada com vibrador de imersão, exceto nos concretos que ficaram auto-adensáveis. Após a

moldagem, os concretos foram mantidos com uma película de água e dentro do laboratório durante seis dias, quando foram desmoldados. No sétimo dia, foram colocados em exposição ambiental com seu eixo longitudinal no sentido norte-sul, apoiados em roletes de concreto ficando aproximadamente 15 cm do chão. Durante todo o período de cura dos protótipos, foram monitoradas as condições ambientais: umidade, temperatura e precipitação.

Tabela 10 - Quantidade de materiais por m<sup>3</sup> de concreto

<b>Traço</b>	<b>a/ag</b>	<b>CP-V kg/m<sup>3</sup></b>	<b>CV kg/m<sup>3</sup></b>	<b>E kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Cal Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Areia kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Pedra kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Água Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Aditivo Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>R4</b>	0,400	462,3	-	-	-	636,6	1014,3	184,9	-
<b>R6</b>	0,600	312,6	-	-	-	791,9	979,4	187,6	-
<b>R8</b>	0,827	226,8	-	-	-	913,3	933,3	187,6	-
<b>EV3</b>	0,302	66,1	132,2	462,5	-	370,7	1001,0	198,2	2,1
<b>EV4</b>	0,402	47,3	94,7	331,3	-	563,7	1009,6	189,3	1,2
<b>EV5</b>	0,491	37,8	75,6	264,6	-	690,2	986,9	185,2	0,8
<b>EVC3</b>	0,331	65,2	130,5	456,6	130,5	193,7	988,8	208,7	9,8
<b>EVC4</b>	0,402	47,2	94,4	330,4	94,4	455,5	1006,9	186,0	5,7
<b>EVC5</b>	0,491	37,7	75,5	264,2	75,5	581,9	1006,4	183,8	2,0

Os protótipos ficaram em exposição ambiental, sendo que aos 91 dias houve a primeira extração de testemunhos para a realização dos ensaios. A segunda extração foi aos 300 dias. A escolha dessas datas deveu-se ao elevado teor de adições minerais já que as reações pozolânicas são mais lentas em relação a concretos somente com cimento e também para analisar-se os efeitos do período da cura ambiental a longo prazo em concretos com elevados teores de adições minerais.

Passado o período de cura, foram extraídos seis protótipos, com extratora de broca diamantada do tipo copo com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. A extração foi perpendicular ao sentido da concretagem, os corpos de provas foram cortados discos de 5 cm para cada camada estudada. Os ensaios de absorção capilar e de difusividade de água foram realizados nas seguintes camadas:

- Camada 1: Superfície 0,0 cm;
- Camada 2: a partir da superfície 2,0 cm;
- Camada 3: a partir da superfície 4,5 cm.

As figuras de 6 a 8 mostram o processo de extração e corte dos testemunhos.



Figura 6 – Extração dos testemunhos (Petry, 2004)

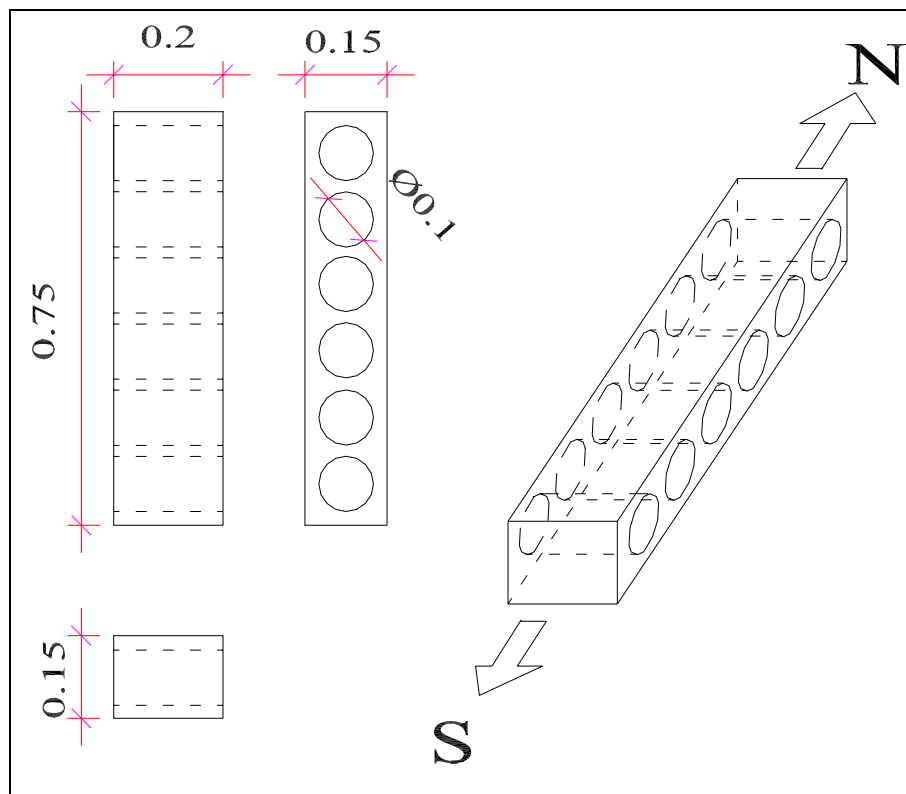


Figura 7 – Dimensões e furos dos protótipos (Petry, 2004)



Figura 8 – Corte dos testemunhos (Petry, 2004)

### 3.3 Ensaios realizados

#### 3.3.1 Pré-condicionamento

Para a realização do ensaio de absorção capilar é necessário realizar o pré-condicionamento do teor de umidade interna dos corpos de prova efetuado conforme recomendações da RILEM TC 116-PCD (RILEM, 1999). O pré-condicionamento tem como objetivo, através de uma pré-secagem, 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  $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ .

Dos protótipos, foram extraídos testemunhos com 10 cm de diâmetro e 20cm de altura, destes, três foram utilizados no ensaio de absorção capilar e os restantes no ensaio de difusividade à água. Após a extração, esses CP foram serrados a fim de obterem-se dois CP com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro para cada camada ensaiada, totalizando seis CP para cada traço a ser ensaiado, além de outros dois obtidos da sobra entre as camadas a fim de se obter os parâmetros de pré-condicionamento.

Para a determinação desses parâmetros, um dos CP sobressalentes foi mantido em estufa a uma temperatura de 105°C, até uma constância de peso de 0,5 g entre duas leituras com 24 horas de diferença, determinando-se a água total evaporável. O outro CP foi moído de modo a obter-se 500 g de concreto passante na peneira 6,3 mm e retido na peneira 2,4 mm colocado em uma bandeja na sala climatizada até a estabilização de peso com variação máxima de 0,1 g após 24 horas. Após a bandeja com este material era levada à estufa a 105°C, sendo realizadas pesagens a cada 24 horas até obter-se peso constante com variação máxima de 0,1 g.

Realizados esses procedimentos, calculavam-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 CP para a pré-secagem. A variação de peso necessária era atingida através de molhagens ou da colocação do testemunho em estufa ventilada, a 50°C, com monitoramento diário, sendo permitida uma variação máxima de 5% em relação à diferença determinada.

Atingindo o peso fixado, os testemunhos a serem ensaiados foram identificados, pesados e pintados na face lateral com três demãos de verniz poliuretânico, tornando-os impermeáveis nesta superfície. As faces superior e inferior foram mantidas livres de modo a permitir o fluxo de água no sentido longitudinal. Após a pintura, os testemunhos foram selados em camadas seqüenciais de filme de polietileno (PVC), saco de polipropileno selado a quente e saco de filme de polietileno e alumínio, utilizado em indústrias de café moído. Desse modo, ficava impedida a perda de massa dos testemunhos, por evaporação, durante a fase de redistribuição da umidade que consistia em mantê-los por um período mínimo de 14 dias e máximo de 27 dias, à temperatura de 50°C, 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.

Mantiveram-se os corpos de prova nessa situação até 24h antes do ensaio e então, foram transferidos para a sala climatizada, sendo mantidos selados até o momento de realização do ensaio.

### 3.3.2 - Ensaio de Absorção Capilar

A determinação experimental da retenção de água do concreto endurecido por absorção capilar foi realizado conforme recomendação da RILEM TC 116 – PCD, sendo os corpos de prova previamente preparados no pré-condicionamento conforme descrito anteriormente. Ao término do tempo de redistribuição de umidade, é retirada a selagem superficial dos corpos de prova sendo estes pesados e medidos com precisão de 0,1g e 0,1 mm. Esses valores são anotados para os cálculos posteriores. O ensaio consiste em manter a superfície de ensaio, não selada com verniz poliuretânico, imersa em água a uma temperatura mantida constante em  $(20 \pm 1)^\circ \text{C}$  até a profundidade máxima de 3 mm, constante durante todo o ensaio. A face posterior à ensaiada encontrava-se coberta por uma touca plástica impermeável e flexível para evitar pressão externa sobre os poros conforme a figura 9. O controle da ascensão de água por absorção capilar foi medida pelo peso dos corpos de prova em intervalos de 10 min, 1 h, 4 h, 24 h do contato com a água. Antes de cada pesagem, a superfície de contato com a água foi enxugada com uma esponja úmida para remover a película de água livre, permanecendo a superfície do concreto brilhante.

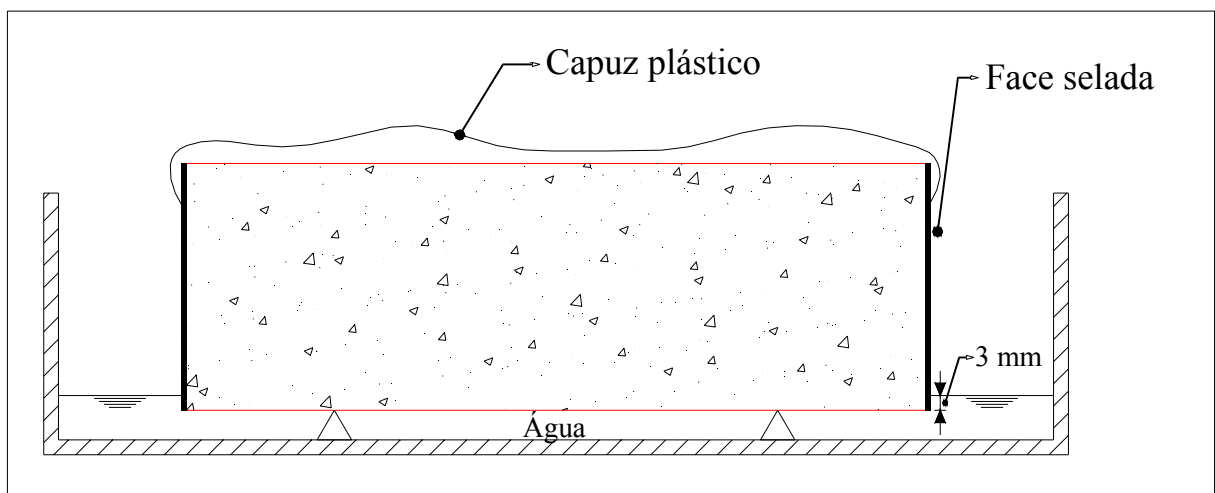


Figura 9 – Esquema do ensaio de absorção capilar

A absorção capilar era registrada para cada intervalo de tempo e calculada pela equação 5:

$$W_{(t)} = m_{(t)} - m_{(0)} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde: W = diferença de massa do corpo de prova em determinado tempo

$m_{(t)}$  = massa do corpo de prova em determinado tempo

$m_{(0)}$  = massa inicial do corpo de prova

A água de absorção foi registrada para cada intervalo de tempo e expressa por unidade de área de contato ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), conforme recomendado. Para este trabalho foram considerados apenas os valores referentes ao período de 24h.

### 3.3.3 - Ensaio de difusão de água

O ensaio de difusão de água foi realizado seguindo as diretrizes de DAN *et al* (1988) apresentado por Isaia (1995), baseados em publicações de CSTB. Os resultados deste ensaio expressam a aceleração ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) com que a água penetra no corpo de prova. O procedimento de ensaio consiste em, após a preparação dos corpos de prova, estes são pesados e colocados em estufa ventilada a uma temperatura constante de  $105^\circ\text{C}$  pesando-os em intervalos de 24h até que adquiram uma diferença de peso inferior a 1g, sendo este último o peso seco. Após, os CPs eram impermeabilizados com verniz poliuretânico, ficando exposta somente a face correspondente à camada a ser ensaiada, sendo que o ensaio foi realizado somente no dia posterior. Para realização do ensaio, utilizou-se uma balança hidrostática de precisão à qual foi acoplada uma cesta onde os CPs foram colocados submersos. Então seu peso foi anotado nos tempos de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420, 480 minutos e, após, em intervalos de 24h subsequentes a imersão até a sua estabilização (saturação).

De posse desses dados plotou-se o gráfico abaixo (figura 10) de onde retirou-se o coeficiente angular da reta para calcular o coeficiente de difusão através da equação 6 a fim de minimizar a variação dos resultados, foram utilizados 2 corpos de prova para cada camada estudada.

$$D = \left( \frac{\Pi \times a^2}{16} \right) \times \left( \frac{h}{Mm} \right)^2 \quad (\text{eq. 6})$$

Onde : D = coeficiente de difusividade ( $m/s^2$ )

a = coeficiente angular da reta do gráfico

h = espessura média do corpo de prova em metros

Mm = proporção de água na saturação

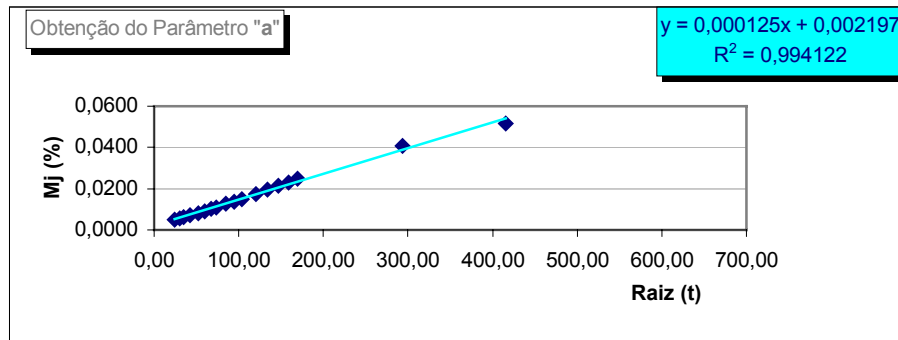


Figura 10 - Gráfico para obtenção do coeficiente angular da reta y

### 3.3.4 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 5739, ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Esse ensaio foi realizado a fim de ser utilizado em dissertação complementar a esta, bem como para observar qual o comportamento da absorção capilar e da difusividade à água em igualdade de resistência para os diferentes traços.

### 3.3.5 Ensaio de porosimetria de mercúrio

A percolação de água está diretamente relacionada à distribuição dos poros, de modo que o conhecimento destes é peça fundamental para a interpretação dos resultados. Os resultados apresentados posteriormente são derivados de ensaio realizado com testemunhos extraídos dos mesmos protótipos moldados e curados utilizados nesta pesquisa, ou seja, são originários do mesmo concreto.



## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Introdução

Este capítulo reúne os resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa. Para todas as amostras estudadas, os experimentos foram realizados seguindo os mesmos parâmetros, a fim de que a comparação entre os resultados fosse possível. Para cada mistura pesquisada, realizaram-se, aos 91 e 300 dias, os ensaios de absorção capilar de água (RILEM TC 116-PCD - RILEM, 1999) e difusividade de água (DAN *et al.*, 1988) apresentado por Isaia (1995), baseados em publicações de CSTB. Os resultados de resistência à compressão serão apenas apresentados, já que sua análise faz parte de outra dissertação. Os ensaios de porosimetria serão utilizados para comparar os resultados de absorção e difusividade com o volume total intrudido e diâmetro crítico, com o intuito de discutir e encontrar explicações para as variações encontradas na percolação da água pelos vazios.

Todos os resultados obtidos serão demonstrados neste capítulo, porém a análise só será realizada para a relação a/ag nominal 0,4 e 0,5. Portanto, para o traço de referência foi necessário realizar interpolação estatística a fim de se obterem os valores para a relação a/ag 0,5 já que este traço não foi moldado. Não foi realizada a análise em relação ao traço a/ag 0,3 por haver uma extrapolação muito grande no traço de referência (>10%). Também foi feita uma análise dos resultados com relação a/ag constante para o nível de resistência à compressão de 50 MPa.

### 4.2 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 28, 91, 182 e 300 dias. A escolha dessas datas deve-se ao fato que, em concretos com adições minerais, as reações de hidratação das pozolanas ocorrem de uma forma mais lenta do que em concretos somente com cimento, sendo necessários tempos superiores a 28 dias para que se obtenham valores representativos da evolução da resistência desses concretos.

A tabela 11 e a figura 11 mostram a evolução das resistências obtidas nas datas referidas acima. Nesta tabela, estão os valores dos protótipos que sofreram processo de cura ambiental. Ressalta-se que os valores de R5 foram calculados por interpolação estatística.

Tabela 11 - Resistência à compressão dos protótipos

TRAÇOS	a/ag	fc 28 (MPa)	fc 91 (MPa)	fc 182 (MPa)	fc 300 (MPa)	variação em % ( $\Delta_{28-91}$ )	variação em % ( $\Delta_{28-300}$ )
R4	0,4	55,0	62,5	68,3	71,7	13,6	30,3
R5*	0,491	43,9	48,9	52,5	54,8	11,3	24,8
R6	0,6	39,4	41,0	42,3	43,1	4,0	9,3
R8	0,827	17,8	21,6	23,8	25,7	17,9	44,3
EV3	0,302	35,4	51,6	55,1	62,1	45,7	75,4
EV4	0,402	30,3	45,3	47,9	52,4	49,5	72,9
EV5	0,491	24,3	32,8	37,0	41,0	34,9	68,7
EVC3	0,331	53,6	58,1	60,5	62,4	8,3	16,4
EVC4	0,402	39,8	48,0	50,2	52	20,6	30,6
EVC5	0,491	30,1	40,4	42,8	44,9	34,2	49,1

\* Resultados calculados por interpolação

Observa-se o comportamento característico dos concretos, pois, de acordo com a lei de Abrams, à medida que a relação a/ag decresce, o valor da resistência tende a aumentar. Nota-se, que o uso das adições minerais acarreta um decréscimo na resistência em relação ao traço de referência.

Comparando-se os dados da tabela 11, que demonstra a porcentagem de aumento na resistência nos protótipos dos 28 dias para os 91 dias e de 28 dias para os 300 dias, observa-se o acréscimo na resistência desses traços com o aumento na idade de ensaio. Analisando-se os traços com adições minerais com e sem cal, em igualdade de a/ag, aos 300 dias, os traços com a adição de cal possuem uma resistência ligeiramente superior entre 0,4% (EV3, EVC3) e 9,5% (EV5, EVC5), sendo um único caso inferior em -0,7% (EV4, EVC4). Esse fato deve-se ao restabelecimento total ou parcial do teor de hidróxido de cálcio que ficou bastante reduzido em função do alto valor de substituição de cimento por escória e cinza volante. Também se justifica devido à retenção de água que a cal proporciona e que fica disponível para hidratação dos compostos, auxiliando na cura.

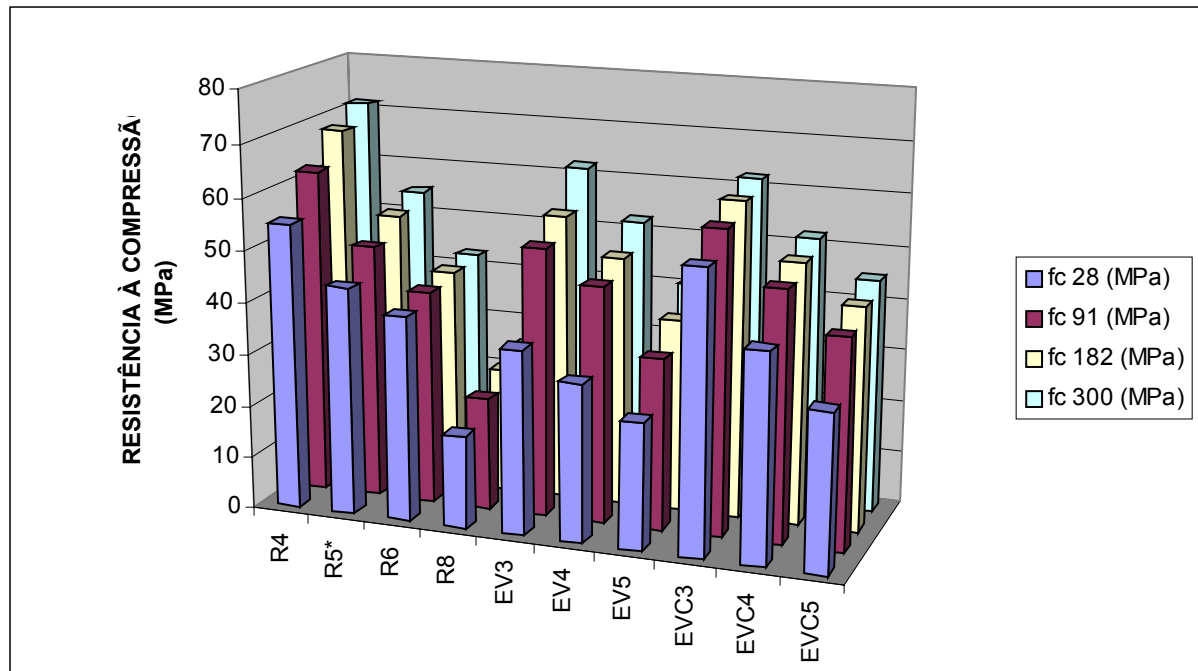


Figura 11 - Resistência à compressão dos protótipos

### 4.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Com o intuito de correlacionar a percolação de água com as variáveis da microestrutura do concreto, realizou-se o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para determinação do volume total intrudido e diâmetro crítico. Esta pesquisa limitar-se-á a apresentar os valores e realizar uma breve análise, já que o estudo mais aprofundado será feito em dissertação complementar a esta. Na tabela 12 estão os resultados dos diâmetros críticos e volume total intrudido

Da análise destes gráficos tem-se que o volume total intrudido aumentou com o aumento da relação  $a/ag$ , sendo esses acréscimos mais pronunciados para o concreto de referência, explicado pela maior diferença entre as  $a/ag$  estudadas (0.40, 0.60 e 0.80) que os concretos com adições (0.30, 0.40 e 0.50).

Com o avanço da idade ocorreu decréscimo no volume total intrudido devido ao progresso das reações de hidratação, sendo esses decréscimos maiores nos concretos com adições.

Tabela 12 – Volume total intrudido e diâmetro crítico aos 91 e 300 dias

Traço	Camada	91 DIAS		300 DIAS	
		$\Phi$ Crítico (nm)	Volume Total (ml/g)	$\Phi$ Crítico (nm)	Volume Total (ml/g)
R4	1	21	0,1013	9	0,0539
	2	50	0,0825	12	0,0548
	3	259	0,0589	40	0,0430
R6	1	47	0,1025	9	0,0672
	2	69	0,0899	56	0,0671
	3	264	0,0776	45	0,0561
R8	1	50	0,1039	11	0,0960
	2	44	0,0906	38	0,0923
	3	365	0,0893	50	0,0863
EV3	1	753	0,0859	129	0,0552
	2	690	0,0849	58	0,0502
	3	41	0,0759	20	0,0407
EV4	1	277	0,0898	200	0,0677
	2	128	0,0888	62	0,0508
	3	40	0,0886	9	0,0432
EV5	1	244	0,0971	219	0,0699
	2	100	0,0958	90	0,0509
	3	20	0,0942	20	0,0494
EVC3	1	245	0,0928	28	0,0530
	2	32	0,0933	17	0,0501
	3	9	0,0927	9	0,0499
EVC4	1	270	0,0976	146	0,0603
	2	36	0,0963	19	0,0572
	3	9	0,0946	9	0,0520
EVC5	1	310	0,0990	257	0,0771
	2	40	0,0980	20	0,0663
	3	9	0,0961	9	0,0580

Com o aumento da relação a/ag, exceto para o concreto EV na idade de 91dias, o diâmetro crítico apresentou tendência de acréscimo ou manteve-se aproximadamente constante. Esse comportamento de acréscimo do diâmetro crítico com o aumento da relação a/ag explica-se pelo fato de que a maior relação a/ag resultou em maior quantidade de poros e/ou poros com dimensões maiores, acarretando com maior facilidade a sua interconectividade. Com o avanço da idade houve decréscimo no diâmetro crítico, devido ao progresso das reações de hidratação que densificam a estrutura de poros.

O aumento da profundidade da camada 1 para a camada 3 originou duas tendências: acréscimo do diâmetro crítico nos concretos de referência e decréscimos nos concretos com adições.

#### 4.4 Absorção capilar de água

##### 4.4.1 Absorção capilar de água em igualdade de relação a/ag aos 91 dias

Os valores encontrados para a absorção capilar para aos 91 dias estão apresentados na tabela 13 e figura 12, em que  $\Delta Q_{31}(\%)$  corresponde ao percentual de redução ou de aumento na absorção capilar da camada três em relação à camada um. A análise em igualdade de a/ag será realizada somente para a relação nominal 0,4 e 0,5, sendo que para o concreto de referência com relação a/ag 0,5, os valores foram calculados por interpolação.

Tabela 13 - Resultados da absorção capilar aos 91 dias em  $g/m^2$

<b>TRAÇO</b>	<b>a/ag Nominal</b>	<b>a/ag Real</b>	<b>Camada 1</b>	<b>Camada 2</b>	<b>Camada 3</b>	<b><math>\Delta Q_{31} (\%)</math></b>
<b>R4</b>	0,4	0,400	4821	4856	5086	5,5
<b>R5*</b>	0,5	0,491	5561	5284	5594	0,5
<b>R6</b>	0,6	0,600	6469	5705	6150	-4,9
<b>R8</b>	0,8	0,827	6901	6367	6714	-2,7
<b>EV3</b>	0,3	0,302	2107	1772	1987	-5,7
<b>EV4</b>	0,4	0,402	2590	2337	2464	-4,8
<b>EV5</b>	0,5	0,491	2954	3021	2900	-1,8
<b>EVC3</b>	0,3	0,331	2449	2405	2428	-0,8
<b>EVC4</b>	0,4	0,402	3075	2478	2691	-12,4
<b>EVC5</b>	0,5	0,491	3604	2846	3102	-13,9

\* Resultados calculados por interpolação

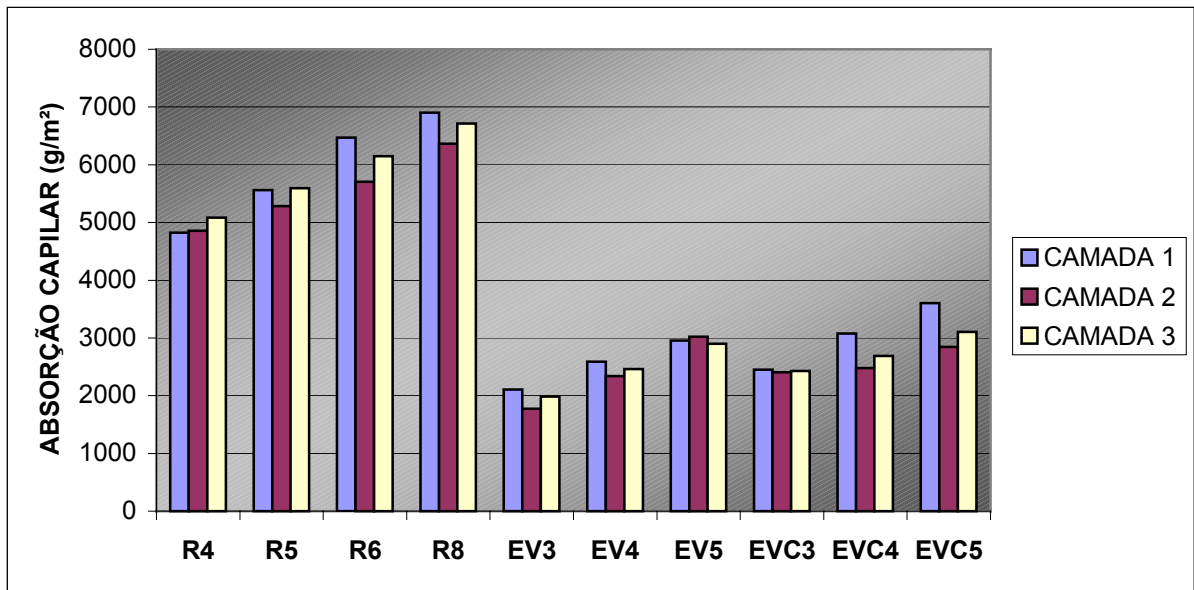


Figura 12 - Absorção capilar aos 91 dias

Analisando os resultados apresentados na tabela 13 e na figura 12, pode-se observar que, aos 91 dias, no traço de referência R4, a quantidade de água absorvida na camada 2 e na camada 3 é maior que na camada 1, 0,7% e 5,5% respectivamente. Já no traço R5, a camada 3 teve uma quantidade absorvida ligeiramente maior (0,5%) que a camada 1. Em relação aos traços com adições minerais, o único caso de absorção de água superior das camadas inferiores do concreto em relação à camada 1 foi no traço EV5, na camada 2 com uma absorção 2,2% maior.

A influência do uso das adições minerais na quantidade de água absorvida, comparada com o traço de referência nas camadas 1, 2 e 3 para as relações  $a/ag$  nominais 0,4 e 0,5 pode ser averiguada nas figuras 13, 14 e 15. Na tabela 14, pode ser analisada a diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, para os traços com relação  $a/ag$  0,4 e na tabela 15 para os traços com relação  $a/ag$  0,5.

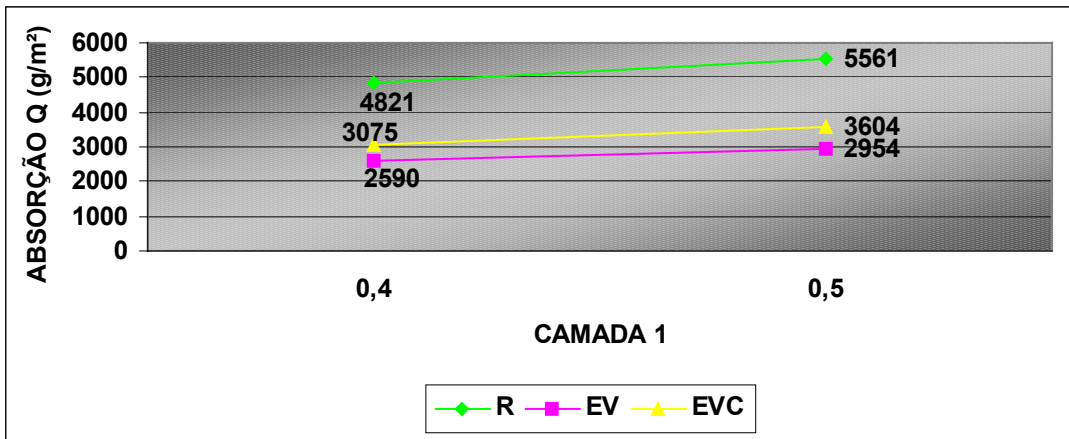


Figura 13 - Absorção capilar na camada 1

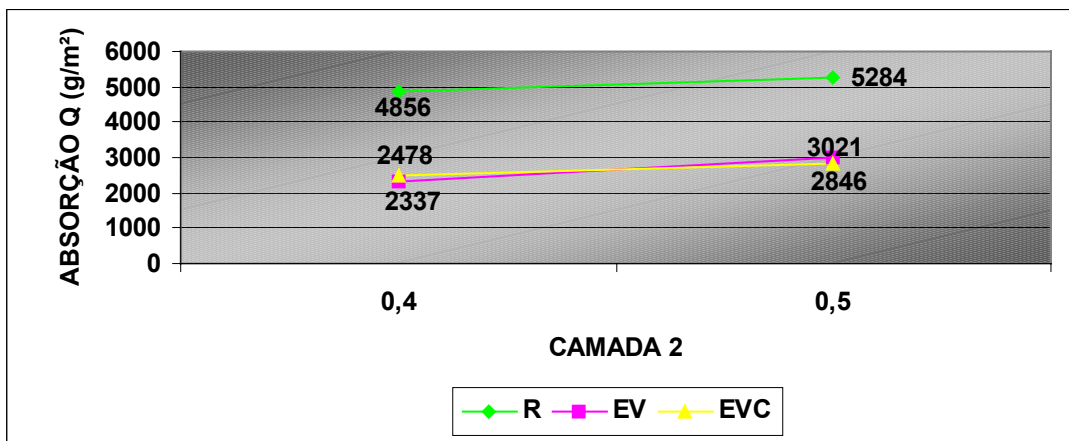


Figura 14 - Absorção capilar na camada 2

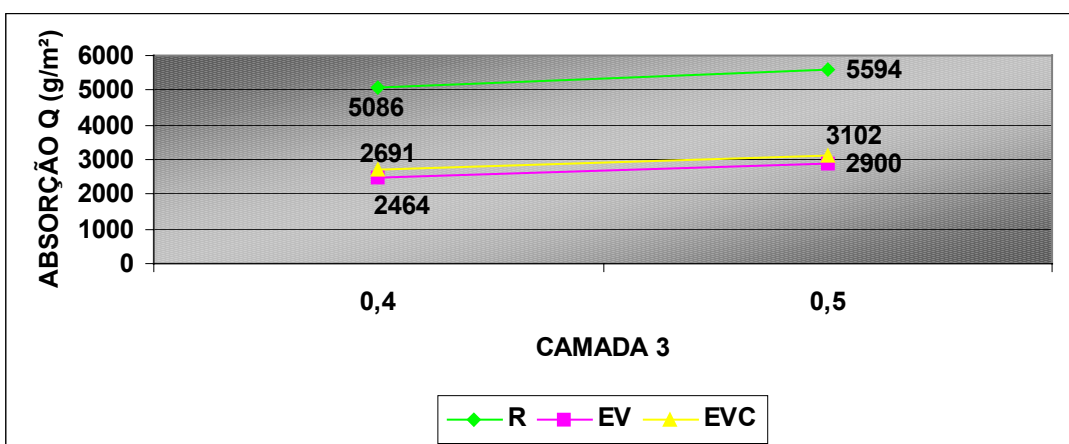


Figura 15 - Absorção capilar na camada 3

Tabela 14 - Diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, a/ag 0,4

Traço	Camada 1	Camada 2	Camada 3
	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )
<b>R4</b>	4821	4856	5086
<b>EV4</b>	2590	2337	2464
<b>EVC4</b>	3075	2478	2691
$\Delta Q_{R - EV} (\%)$	-46,2	-51,8	-51,5
$\Delta Q_{R - EVC} (\%)$	-36,2	-48,9	-47,0

Tabela 15 - Diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, a/ag 0,5

Traço	Camada 1	Camada 2	Camada 3
	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )
<b>R5*</b>	5561	5284	5594
<b>EV5</b>	2954	3021	2900
<b>EVC5</b>	3604	2846	3102
$\Delta Q_{R - EV} (\%)$	-46,8	-42,8	-48,1
$\Delta Q_{R - EVC} (\%)$	-35,1	-46,1	-44,5

\*Resultados calculados por interpolação

A análise das figuras 13, 14 e 15 e das tabelas acima permite afirmar que o uso de adições minerais nos teores estudados revelou-se benéfica quanto à absorção capilar aos 91 dias, pois em todos os casos essas adições ocasionaram uma redução no coeficiente de absorção, em relação ao concreto de referência. Observa-se que a redução no coeficiente de absorção é elevada em todos os traços, variando aproximadamente de 35% a 52%, sendo mais significativa no traço EV4 camada 2 com uma redução de 52% em relação ao referência. Já o pior resultado foi para o traço EVC5 camada 1 com uma redução de 35%. Analisando os resultados dos concretos com adições de cal hidratada em relação ao de referência, nota-se uma redução significativa na quantidade de água absorvida, variando de -35% para o traço EVC5 camada 1 até -49% para o traço EVC4 camada 2. Mas, quando comparados com os traços sem adição de cal, somente no traço EVC 5 camada 2 a absorção capilar é menor, em relação ao referência. Esse fato pode ser comprovado no comparativo da tabela 16.



Tabela 16 - Comparativo dos traços com e sem adição de cal hidratada.

Traço	Camada	ABSORÇÃO CAPILAR Q (g/m <sup>2</sup> )		$\Delta Q$ (g/m <sup>2</sup> )	$\Delta Q$ (%)
		SEM CAL	COM CAL		
EV4/EVC4	1	2590	3075	485	18,7
	2	2337	2478	141	6,0
	3	2464	2691	227	9,2
EV5/EVC5	1	2954	3604	650	22,0
	2	3021	2846	-175	-5,7
	3	2900	3102	202	6,9

Na análise da tabela, observa-se que a quantidade de água absorvida é maior em quase todos os traços com adição de cal hidratada, somente no traço EVC5 camada 2, a cal hidratada acarreta uma absorção inferior de -5,7%. Apesar de a quantidade de água absorvida ser maior para os traços com cal hidratada, sabe-se da importância deste elemento frente à carbonatação.

#### 4.4.2 Comparação dos resultados com trabalhos semelhantes

Petry (2004), estudando a influência da cinza volante com e sem adição de 20% de cal hidratada em concretos, aos 91 dias de cura, realizou pesquisa semelhante a esta com substituição de 50% do cimento por cinza volante utilizando relações  $a/ag = 0,40; 0,75$ . Os resultados obtidos nesta pesquisa que se apresenta são discordantes dos encontrados pelo autor, já que, em todos os traços e camadas estudados, a absorção capilar de água para os concretos com adições foi superior ao concreto de referência. No entanto, quando comparados os resultados individuais com esta pesquisa, para a relação  $a/ag = 0,40$ , constatou-se que estes possuem coeficientes de absorção relativamente menores tanto para o traço com cal como para o sem cal. Os resultados obtidos por Petry (2004) para as camadas 1, 2 e 3, comparados com os desta pesquisa estão na tabela 17, em que a letra P indica os resultados obtidos por Petry e C por esta pesquisa. Não foi realizada a comparação para a relação  $a/ag = 0,75$  e  $a/ag = 0,5$ , desta pesquisa, devido à grande diferença existente.

Tabela 17 - Comparativo da absorção capilar entre Cantarelli e Petry

<b>TRAÇO</b>	<b>a/ag</b>	<b>CAMADA 1</b>	<b>CAMADA 2</b>	<b>CAMADA 3</b>
<b>R4 - C</b>	0,4	4821	4856	5086
<b>R4 - P</b>	0,4	1890	1821	1766
<b>EV4 - C</b>	0,4	2590	2337	2464
<b>V4 - P</b>	0,4	2470	2066	1938
<b>EVC4 - C</b>	0,4	3075	2478	2691
<b>VC4 - P</b>	0,4	2590	2337	2464

O comparativo entre esta pesquisa e Hoppe (2002), que estudou concretos com adição de 70% de escória e 20% de cinza volante, com e sem adição de 18% de cal, com relação a/ag 0,35; 0,45 e 0,55 está na tabela 18.

Tabela 18 - Comparativo da absorção capilar entre Cantarelli e Hoppe

<b>TRAÇO</b>	<b>a/ag</b>	<b>Q (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>a/ag</b>	<b>Q (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>a/ag</b>	<b>Q (g/m<sup>2</sup>)</b>
<b>R - C</b>	-	-	0,4	4821	0,5	5561
<b>R - H</b>	-	-	0,45	470	0,55	655
<b>EV - C</b>	0,3	2107	0,4	2590	0,5	2954
<b>EV - H</b>	0,35	1438	0,45	3107	0,55	4743
<b>EVC - C</b>	0,3	2449	0,4	3075	0,5	3604
<b>EVC - H</b>	0,35	187	0,45	1465	0,55	2710

Para as pesquisas referidas, ambos os corpos de prova passaram por um período de pré-condicionamento como o realizado nesta pesquisa. A única diferença está no período de cura para a realização do ensaio. Para Hoppe, os corpos ficavam durante 7 dias em câmara úmida controlada, após seguiam para o pré-condicionamento. Já para Petry, foi realizada cura ambiental durante 49 dias e após eram realizados os procedimentos do pré-condicionamento até a data de ensaio (91 dias).

O confronto desses dados numéricos, de concretos com relação a/ag e adições minerais semelhantes, confirma a visão de que a cura laboratorial em câmara úmida e a exposição ambiental têm conseqüências diferentes daquelas constatadas em concretos cuja cura se dá 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 à formação do C-S-H secundário na hidratação do cimento, é corroborada pelos resultados apresentados.

#### 4.4.3 Absorção capilar de água em igualdade de relação a/ag aos 300 dias

Os valores encontrados para a absorção capilar aos 300 dias estão apresentados na tabela 19 e figura 16, onde  $\Delta Q_{31}(\%)$  corresponde ao percentual de redução ou de aumento na absorção capilar da camada três em relação à camada um. A análise em igualdade será realizada somente para relação a/ag nominal 0,4 e 0,5, sendo que para o concreto de referência com relação a/ag 0,5, os valores foram calculados por interpolação.

Tabela 19 - Resultados da absorção capilar aos 300 dias em  $g/m^2$

<b>TRAÇO</b>	<b>a/ag Nominal</b>	<b>a/ag Real</b>	<b>Camada 1</b>	<b>Camada 2</b>	<b>Camada 3</b>	<b><math>\Delta Q_{31} (\%)</math></b>
<b>R4</b>	0,4	0,400	975	957	900	-7,6
<b>R5*</b>	0,5	0,491	2155	2239	2208	2,4
<b>R6</b>	0,6	0,600	3456	3609	3597	4,0
<b>R8</b>	0,8	0,827	4726	5159	5208	10,2
<b>EV3</b>	0,3	0,302	720	335	336	-53,3
<b>EV4</b>	0,4	0,402	1110	563	615	-44,5
<b>EV5</b>	0,5	0,491	2280	1752	1842	-19,2
<b>EVC3</b>	0,3	0,331	623	426	299	-52,0
<b>EVC4</b>	0,4	0,402	804	522	378	-52,9
<b>EVC5</b>	0,5	0,491	1008	647	456	-54,7

\* Resultados calculados por interpolação

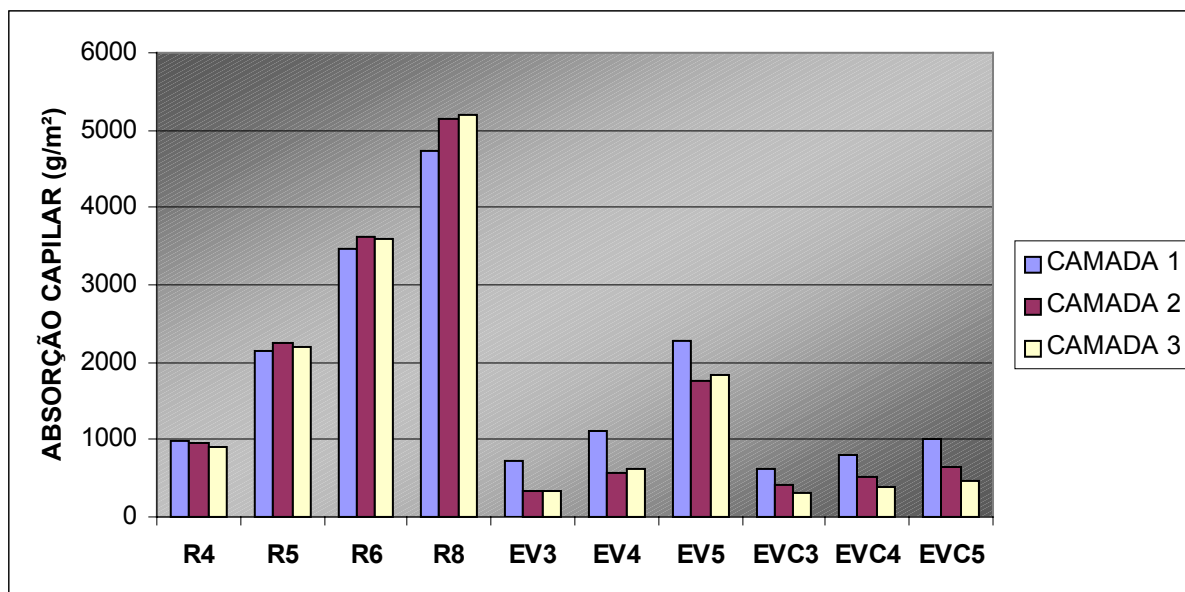


Figura 16 - Absorção capilar aos 300 dias

Analisando os resultados apresentados na tabela 19 e na figura 16, pode-se observar que, aos 300 dias, no traço de referência R4, ao contrário do que acontece aos 91 dias, a quantidade de água absorvida na camada 2 e na camada 3 é menor do que na camada 1, -1,8% e -7,6% respectivamente. Já no traço R5, a quantidade de água absorvida na camada 2 e na camada 3 é 3,8% e 2,4% maior do que na camada 1. Em relação aos traços com adições minerais, em todos os traços analisados, a quantidade de água absorvida nas camadas 2 e 3 é consideravelmente inferior à camada 1, com percentual variando de -19,2% (EV5 camada 3) até -54,7% (EVC5 camada 3).

A influência do uso das adições minerais na quantidade de água absorvida, comparada com o traço de referência nas camadas 1, 2 e 3 para as relações a/ag nominais 0,4 e 0,5 pode ser averiguada nas figuras 17,18 e 19. Na tabela 20, pode ser analisada a diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, para os traços com relação a/ag 0,4 e na tabela 21, para os traços com relação a/ag 0,5.

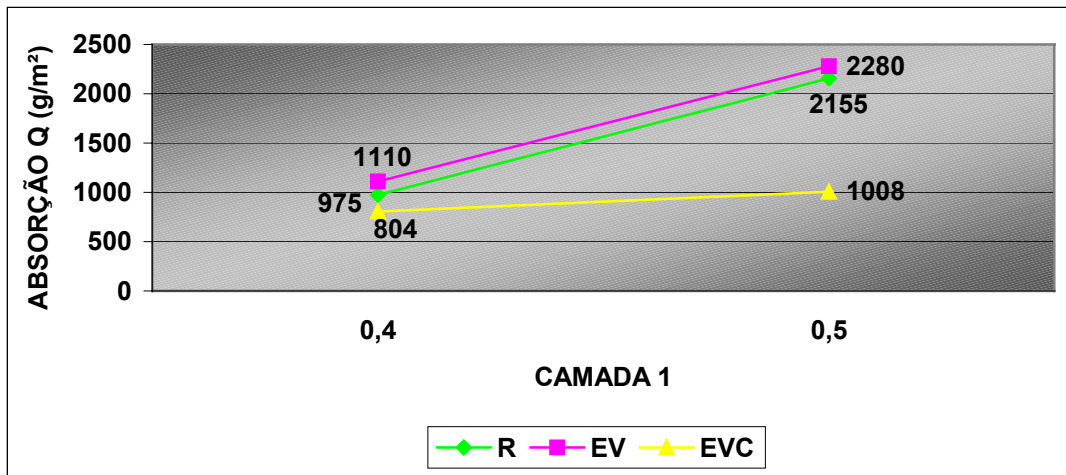


Figura 17 - Absorção capilar na camada 1

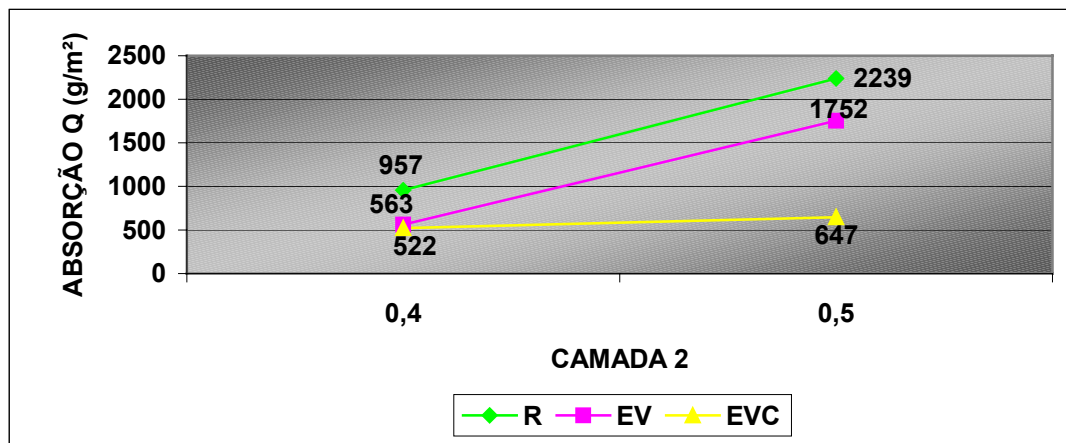


Figura 18 - Absorção capilar na camada 2

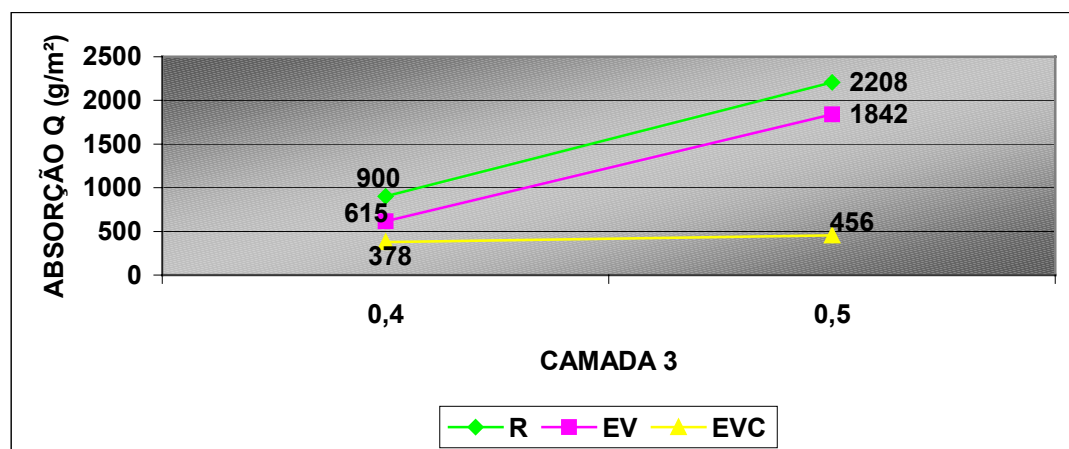


Figura 19 - Absorção capilar na camada 3

A análise das figuras 17,18 e 19 e das tabelas 20 e 21, permite afirmar que o uso de adições minerais nos teores estudados revelou-se benéfico quanto à absorção capilar aos 300 dias. O único caso que fugiu à regra dos acontecimentos foi no traço somente com escória e cinza volante na camada 1, em que o concreto de referência obteve uma absorção menor que o traço citado. Em todas as outras camadas e traços, houve redução na quantidade de água absorvida.

Tabela 20 - Diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, a/ag 0,4

Traço	Camada 1	Camada 2	Camada 3
	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )
<b>R4</b>	975	957	900
<b>EV4</b>	1110	563	615
<b>EVC4</b>	804	522	378
$\Delta Q_{R-EV}$ (%)	13,8	-41,1	-31,6
$\Delta Q_{R-EVC}$ (%)	-17,5	-45,4	-58,0

Tabela 21 - Diferença na quantidade de água absorvida, em porcentagem, a/ag 0,5

Traço	Camada 1	Camada 2	Camada 3
	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )
<b>R5*</b>	2155	2239	2208
<b>EV5</b>	2280	1752	1842
<b>EVC5</b>	1008	647	456
$\Delta Q_{R-EV}$ (%)	5,8	-21,7	-16,5
$\Delta Q_{R-EVC}$ (%)	-53,2	-71,1	-79,3

\*Resultados calculados por interpolação

No que diz respeito à quantidade de água absorvida em relação ao referência, merecem destaque os traços com adição de cal hidratada com uma redução de 17,5% a 58,0% para o traço com relação a/ag 0,4 nas camadas 1 e 3, respectivamente. No traço a/ag 0,5, essa redução foi mais significativa, 53,2% a 79,3% nas camadas 1 e 3 respectivamente. Os benefícios advindos da adição da cal hidratada podem ser analisados no comparativo realizado na tabela 22.

Tabela 22 - Comparativo dos traços com e sem adição de cal hidratada.

Traço	Camada	ABSORÇÃO CAPILAR Q (g/m <sup>2</sup> )		$\Delta Q$ (g/m <sup>2</sup> )	$\Delta Q$ (%)
		SEM CAL	COM CAL		
EV4/EVC4	1	1110	804	-306	-27,5
	2	563	522	-41	-7,2
	3	615	378	-237	-38,5
EV5/EVC5	1	2280	1008	-1272	-55,7
	2	1752	647	-1105	-63,0
	3	1842	456	-1386	-75,2

Na análise da tabela, observa-se que a quantidade de água absorvida é menor em todos os traços com adição de cal hidratada. Esse fato contraria os resultados dos ensaios realizados aos 91 dias, em que as reduções mais significativas foram para o traço EVC 5, variando de -55,7% a -75,2%, nas camadas 1 e 3 respectivamente, em relação ao traço sem cal hidratada. Essa redução acentuada deve-se ao fato da reposição do hidróxido de cálcio e, como as reações de hidratação das adições minerais se processam de forma mais lenta, o consumo desse hidróxido ocorre posteriormente tornando a matriz do concreto mais compacta.

#### 4.4.4 Absorção capilar 91 x 300 dias

Sendo esta pesquisa realizada em duas datas avançadas, observa-se a necessidade de uma comparação entre essas datas. Tal análise é apresentada na tabela 23, onde  $\Delta Q$  (%) é a redução no coeficiente de absorção dos 91 para os 300 dias.

Como era de se esperar, com o aumento da idade, ocorre uma redução no coeficiente de absorção, devido ao fato de as adições minerais possuírem uma reação de hidratação mais tardia que o cimento. Nesse aspecto, destacam-se os traços com adição de cal hidratada com reduções relativamente constantes para a camada 1 e 3, em torno de 73% e 85% respectivamente. Isso pode ser explicado devido à ação física (filler) da cal e à retenção de água que esta possibilita. Comparando os traços sem cal hidratada, apesar de haver redução, ela não se dá

de forma tão acentuada, diminuindo à medida que a quantidade de água aumenta e, nesse caso, a água em excesso é prejudicial ao concreto.

Tabela 23 - Comparativo da absorção capilar 91 x 300 dias

TRAÇO	DATA	Camada 1	Camada 2	Camada 3
		(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )
R4	91	4821	4856	5086
	300	975	957	900
	$\Delta Q$ (%)	<b>-80</b>	<b>-80</b>	<b>-82</b>
R5*	91	5561	5284	5594
	300	2155	2239	2208
	$\Delta Q$ (%)	<b>-61</b>	<b>-58</b>	<b>-61</b>
R6	91	6469	5705	6150
	300	3456	3609	3597
	$\Delta Q$ (%)	<b>-47</b>	<b>-37</b>	<b>-42</b>
R8	91	6901	6367	6714
	300	4726	5159	5208
	$\Delta Q$ (%)	<b>-32</b>	<b>-19</b>	<b>-22</b>
EV3	91	2107	1772	1987
	300	720	335	336
	$\Delta Q$ (%)	<b>-66</b>	<b>-81</b>	<b>-83</b>
EV4	91	2590	2337	2464
	300	1110	563	615
	$\Delta Q$ (%)	<b>-57</b>	<b>-76</b>	<b>-75</b>
EV5	91	2954	3021	2900
	300	2280	1752	1842
	$\Delta Q$ (%)	<b>-23</b>	<b>-42</b>	<b>-36</b>
EVC3	91	2449	2405	2428
	300	623	426	299
	$\Delta Q$ (%)	<b>-75</b>	<b>-82</b>	<b>-88</b>
EVC4	91	3075	2478	2691
	300	804	522	378
	$\Delta Q$ (%)	<b>-74</b>	<b>-79</b>	<b>-86</b>
EVC5	91	3604	2846	3102
	300	1008	647	456
	$\Delta Q$ (%)	<b>-72</b>	<b>-77</b>	<b>-85</b>

\* Resultados calculados por interpolação

4.4.5 Absorção capilar de água em igualdade de resistência à compressão aos 91 dias e 300 dias



Para a análise dos coeficientes de absorção capilar no patamar de 50 MPa, utilizaram-se equações de regressão linear que correlacionam absorção capilar de água com a resistência à compressão. Na tabela 24, e figura 20, estão relatados os dados para os patamares de resistência em questão da absorção capilar, onde  $\Delta_{3-1}$  é a porcentagem de aumento ou redução da absorção capilar das camadas 3 para 1.

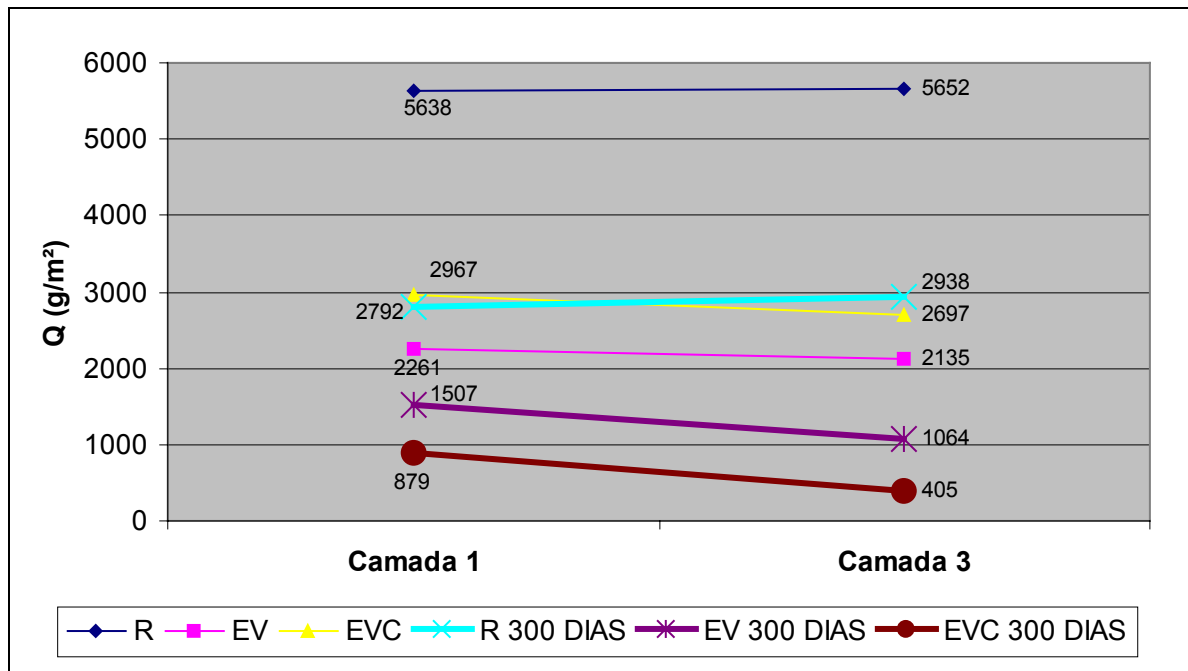


Figura 20 - Absorção capilar em igualdade de resistência aos 91 e 300 dias

Na figura 20 e tabela 24, que comparam os concretos com adições minerais, com e sem cal hidratada, com o concreto de referência aos 91 e 300 dias para o nível de resistência de 50 MPa, verifica-se, em todos os traços com adições minerais, uma redução bastante significativa no coeficiente de absorção em relação ao concreto de referência. Destaca-se a camada 3 do traço EVC aos 300 dias, com uma redução de 86%; as demais porcentagens de redução estão na tabela 25. Comparando a camada 3 com a camada 1 dos traços com adições minerais aos 91 dias, tem-se um coeficiente de absorção praticamente constante, com reduções de 5% para o traço sem cal e de 9% para o traço com cal. Aos 300 dias, a porcentagem de redução é mais acentuada, em torno de 29% para o traço sem cal e de 53% para o traço com cal.

Tabela 24 - Absorção capilar de água em igualdade de resistência à compressão aos 91 e 300 dias

TRAÇO	91 DIAS				$\Delta_{3-1}$
		Camada 1	Camada 2	Camada 3	%
R	Q	5638	5336	5652	0,2
	$r^2$	0,93	1	0,98	
	I*	100	95	100	
EV	Q	2261	1938	2135	-5,5
	$r^2$	0,93	0,98	0,95	
	I*	40	34	38	
EVC	Q	2967	2548	2697	-9,1
	$r^2$	1	0,81	0,96	
	I*	53	45	48	
300 DIAS					
R	Q	2792	2952	2938	5,2
	$r^2$	1	1	1	
	I*	50	52	42	
EV	Q	1507	1008	1064	-29,4
	$r^2$	0,95	0,9	0,91	
	I*	27	18	19	
EVC	Q	879	570	405	-53,9
	$r^2$	0,98	0,97	0,99	
	I*	16	10	7	

\*I = 100 índice da camada 1 para o traço de referência

Tabela 25 - diferença na quantidade de água absorvida em relação ao referência, em porcentagem

$\Delta_{R - EV/EVC}$	91 DIAS		300 DIAS	
	Camada 1	Camada 3	Camada 1	Camada 3
$\Delta_{R - EV} (%)$	-59,9	-62,2	-46,0	-63,7
$\Delta_{R - EVC} (%)$	-47,3	-52,2	-68,5	-86,2

#### 4.5 Difusão de água

Os ensaios foram realizados com dois corpos de prova para cada camada, ficando submersos durante todo o processo de ensaio até que o peso estivesse estabilizado entre duas pesagens consecutivas de 24h, conforme recomendações de Dan *et al* (1998).

#### 4.5.1 Difusão de água em igualdade de relação a/ag aos 91 dias

Os valores encontrados para a difusão de água aos 91 dias estão apresentados na tabela 26 e figura 21,  $\Delta D_{31}(\%)$ , correspondem ao percentual de redução ou de aumento na difusão de água da camada três em relação à camada um. A análise será realizada somente para relação a/ag nominal 0,4 e 0,5 sendo que para o concreto de referência com relação a/ag 0,5, os valores foram calculados por interpolação.

Tabela 26 - Resultados da difusão de água aos 91 dias em  $m/s^2$

TRAÇO	a/ag nominal	a/ag real	CAMADA 1 ( $\times 10^{-9} m/s^2$ )	CAMADA 2 ( $\times 10^{-9} m/s^2$ )	CAMADA 3 ( $\times 10^{-9} m/s^2$ )	$\Delta D_{31} (\%)$
R4	0,4	0,400	4,15	3,98	3,95	-4,8
R5*	0,5	0,491	4,53	4,27	4,33	-4,4
R6	0,6	0,600	5,00	4,52	4,79	-4,2
R8	0,8	0,827	6,54	6,67	6,55	0,1
EV3	0,3	0,302	1,86	1,71	1,61	-13,4
EV4	0,4	0,402	1,98	1,84	1,72	-13,1
EV5	0,5	0,491	2,25	2,20	1,81	-19,5
EVC3	0,3	0,331	2,49	2,39	2,40	-3,6
EVC4	0,4	0,402	3,05	2,67	2,56	-16,1
EVC5	0,5	0,491	3,34	3,09	2,75	-17,6

\* Resultados calculados por interpolação

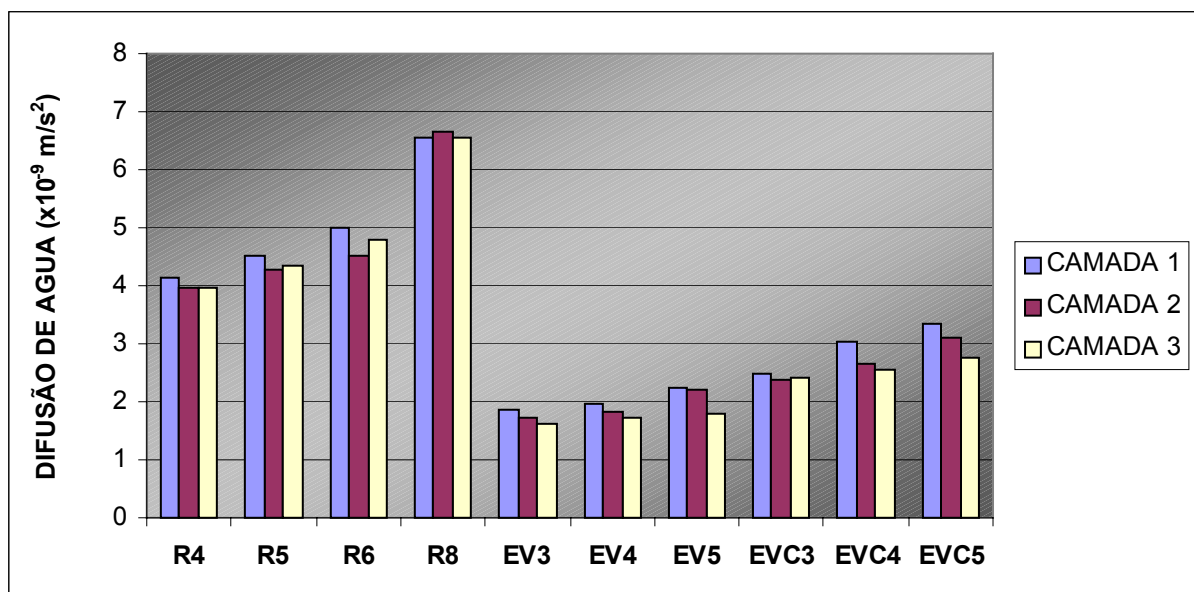


Figura 21 - Difusão de água aos 91 dias

Considerando a análise por mistura, somente no traço R8 as camadas 2 e 3 obtiveram um aumento na aceleração em relação à camada de cobrimento. Nos traços restantes, essas camadas obtiveram reduções significativas em relação à camada de cobrimento, tendo destaque para a camada 3 do traço EC5 com uma redução de aproximadamente 19%, sendo também neste traço para a camada 2 a menor redução, 2,2%. Destacam-se, ainda, resultados obtidos pelo traço EVC5 nas camadas 2 e 3, com reduções de aproximadamente de 7% e 17% em relação à camada 1.

A influência do uso das adições minerais na difusão de água, comparada com o traço de referência nas camadas 1, 2 e 3 para as relações a/ag nominais 0,4 e 0,5 pode ser averiguada nas figuras 22, 23 e 24. Na tabela 27, pode ser analisada a diferença na quantidade de água difundida, em porcentagem, para os traços com relação a/ag 0,4 e na tabela 28 para os traços com relação a/ag 0,5.

Tabela 27 - Diferença na difusão de água, em porcentagem, a/ag 0,4

<b>Traço</b>	<b>Camada 1 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>	<b>Camada 2 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>	<b>Camada 3 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>
<b>R4</b>	4,15	3,98	3,95
<b>EV4</b>	1,98	1,84	1,72
<b>EVC4</b>	3,05	2,67	2,56
<b><math>\Delta D_{R-EV}</math> (%)</b>	-52	-54	-56
<b><math>\Delta D_{R-EVC}</math> (%)</b>	-27	-33	-35

Tabela 28 - Diferença na difusão de água, em porcentagem, a/ag 0,5

<b>Traço</b>	<b>Camada 1 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>	<b>Camada 2 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>	<b>Camada 3 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>
<b>R5*</b>	4,53	4,27	4,33
<b>EV5</b>	2,25	2,20	1,81
<b>EVC5</b>	3,34	3,09	2,75
<b><math>\Delta D_{R-EV}</math> (%)</b>	-50	-48	-58
<b><math>\Delta D_{R-EVC}</math> (%)</b>	-26	-28	-36

\*Resultados calculados por interpolação

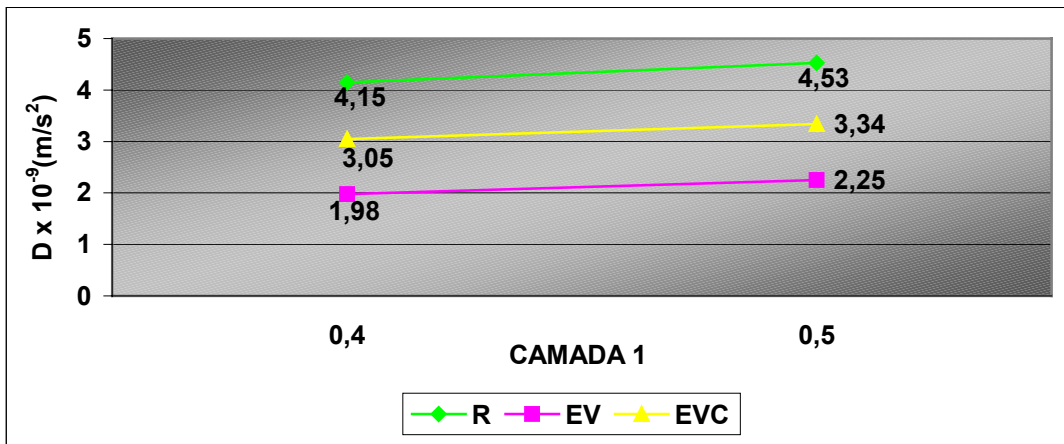


Figura 22 Difusividade na camada 1

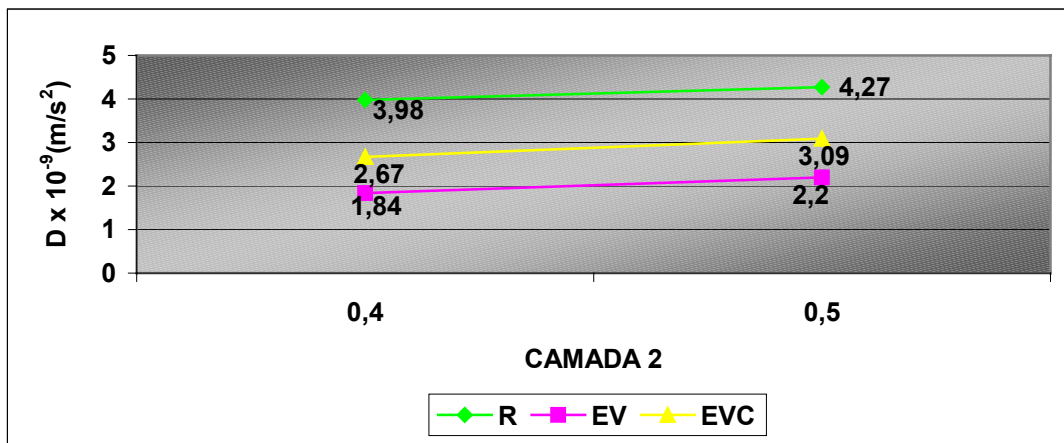


Figura 23 - Difusividade na camada 2

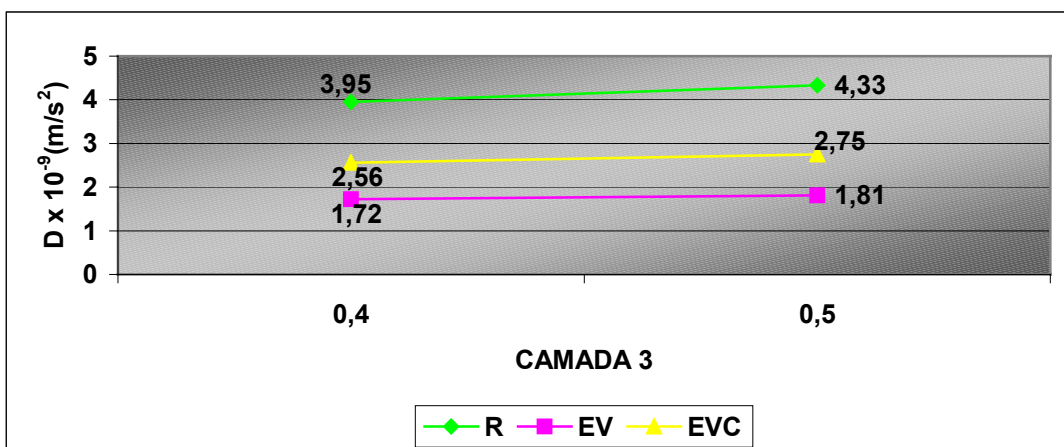


Figura 24 - Difusividade na camada 3

A interpretação desses dados permite chegar a conclusões. Apesar do alto teor de adições minerais, o coeficiente de difusividade é menor em todas as camadas para os traços analisados em relação ao concreto de referência, destacando-se os traços sem adição de cal hidratada. O traço com relação a/ag 0,4 obteve reduções de aproximadamente 52% a 56%, o traço com relação a/ag 0,5 obteve reduções, em relação ao referência, de aproximadamente 50% a 58%. Para os traços com cal, as reduções no coeficiente de difusividade em relação ao referência variaram de 26% a 35% para o traço a/ag = 0,4 e de 26% a 36% para o traço a/ag = 0,5.

A influência da cal hidratada pode ser analisada na tabela 29:

Tabela 29 - Comparativo dos traços com e sem adição de cal hidratada

Traço	Camada	DIFUSÃO DE ÁGUA D ( $\times 10^{-9}$ m/s <sup>2</sup> )		$\Delta D$	%D
		SEM CAL	COM CAL		
EV4 / EVC4	1	1,98	3,05	1,07	54
	2	1,84	2,67	0,83	45
	3	1,72	2,56	0,84	49
EV5 / EVC5	1	2,25	3,34	1,09	48
	2	2,20	3,09	0,89	40
	3	1,81	2,75	0,94	52

No comparativo acima, observa-se que o uso da cal hidratada não trouxe benefícios quanto à difusividade, aos 91 dias, já que em todos os traços analisados o acréscimo foi de aproximadamente 40%, traço EVC5, a 54%, traço EVC4, em relação aos traços sem cal hidratada.

Comparando os traços com relação a/ag = 0,4 e a/ag = 0,5, em todas as camadas, tanto para o traço com cal como para o sem cal, a maior quantidade de água acarreta coeficientes de difusividade maiores, com aumentos de 5% a 19% para o traço sem cal e de 7% a 15% para o traço com cal

#### 4.5.2 Comparação dos resultados com trabalhos semelhantes

Petry (2004), estudando a influência da cinza volante com e sem adição de 20% de cal hidratada em concretos, aos 91 dias de cura, realizou pesquisa semelhante a esta com substituição de 50% do cimento por cinza volante, utilizando

relações  $a/ag = 0,40$ ;  $0,75$ . Os resultados obtidos por Petry (2004) para as camadas 1, 2 e 3, comparados com esta pesquisa, estão na tabela 30, em que a letra P indica os resultados obtidos por Petry e C por esta pesquisa. Não foi realizada a comparação para a relação  $a/ag = 0,75$  e  $a/ag = 0,5$ , desta pesquisa, devido à grande diferença existente entre ambas.

Tabela 30 - Comparativo da difusão de água entre Cantarelli e Petry

<b>TRAÇO</b>	<b>a/ag</b>	<b>CAMADA 1</b> <b>(<math>\times 10^{-9}</math> m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>CAMADA 2</b> <b>(<math>\times 10^{-9}</math> m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>CAMADA 3</b> <b>(<math>\times 10^{-9}</math> m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>R4 - C</b>	0,4	4,15	3,98	3,95
<b>R4 - P</b>	0,4	5,09	3,91	3,15
<b>EV4 - C</b>	0,4	1,98	1,84	1,72
<b>V4 - P</b>	0,4	3,91	3,67	3,49
<b>EVC4 - C</b>	0,4	3,05	2,67	2,56
<b>VC4 - P</b>	0,4	3,41	2,46	2,02

Comparando as pesquisas em função do aumento e redução, em porcentagem, para o traço sem cal, os valores encontrados por Petry são na ordem de 97% a 102% superiores aos encontrados nesta pesquisa. Porém, quando comparados os traços com adição de cal, Petry obteve aumento de 12% para a camada 1 e uma redução de 8% e 21% para as camadas 2 e 3 em relação a esta pesquisa.

#### 4.5.3 Difusão de água em igualdade de relação $a/ag$ aos 300 dias

Os valores encontrados para a difusão de água aos 300 dias estão apresentados na tabela 31 e figura 25, onde  $\Delta D_{31}(\%)$  corresponde ao percentual de redução ou de aumento na difusão de água da camada três em relação à camada um. A análise em igualdade será realizada somente para relação  $a/ag$  nominal 0,4 e 0,5, sendo que para o concreto de referência com relação  $a/ag$  0,5, os valores foram calculados por interpolação.

Tabela 31 - Resultados da difusão de água aos 300 dias em  $m/s^2$ 

TRAÇO	a/ag nominal	a/ag real	Camada 1 ( $\times 10^{-9} m/s^2$ )	Camada 2 ( $\times 10^{-9} m/s^2$ )	Camada 3 ( $\times 10^{-9} m/s^2$ )	$\Delta D_{31}$ (%)
R4	0,4	0,4	3,89	3,72	3,56	-8,4
R5*	0,5	0,491	4,04	3,95	3,87	-4,2
R6	0,6	0,6	4,06	4,10	4,14	1,9
R8	0,8	0,827	6,31	6,38	6,42	1,7
EV3	0,3	0,302	1,00	1,06	0,79	-21,0
EV4	0,4	0,402	1,53	1,26	1,12	-26,8
EV5	0,5	0,491	2,01	1,83	1,61	-19,9
EVC3	0,3	0,331	1,38	1,15	1,11	-19,5
EVC4	0,4	0,402	1,53	1,34	1,20	-21,5
EVC5	0,5	0,491	1,79	1,50	1,22	-31,8

\* Resultados calculados por interpolação

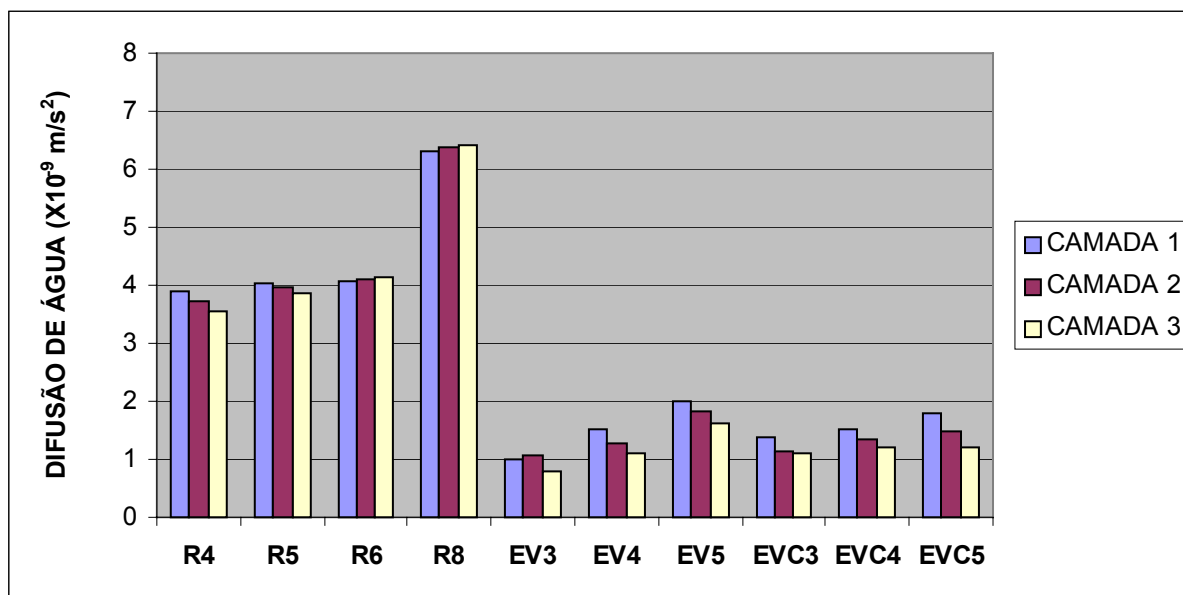


Figura 25 - Difusão de água aos 300 dias

Considerando a análise para os traços de referência, somente nos traços R6 e R8, a camada 3 obteve um aumento insignificante na aceleração em relação à camada de cobertura. Nos traços restantes, essa camada obteve reduções bem significativas em relação à camada de cobertura, tendo destaque para o traço EVC5, com uma redução de aproximadamente 32%. Destacam-se, também,



resultados obtidos pelos traços EC na camada 3, com reduções de, aproximadamente, 19% a 27% em relação à camada 1.

A influência do uso das adições minerais na difusão de água, comparada com o traço de referência nas camadas 1, 2 e 3 para as relações a/ag nominais 0,4 e 0,5, pode ser averiguada nas figuras 26, 27 e 28. Na tabela 32, pode ser analisada a diferença na quantidade difusa, em porcentagem, para os traços com relação a/ag 0,4 e na tabela 33, para os traços com relação a/ag 0,5.

Tabela 32 - Diferença na difusão de água, em porcentagem, a/ag 0,4

<b>Traço</b>	<b>Camada 1 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>	<b>Camada 2 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>	<b>Camada 3 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>
<b>R4</b>	3,89	3,72	3,56
<b>EV4</b>	1,53	1,26	1,12
<b>EVC4</b>	1,53	1,34	1,20
<b><math>\Delta D_{R-EV}</math> (%)</b>	-61	-66	-69
<b><math>\Delta D_{R-EVC}</math> (%)</b>	-61	-64	-66

Tabela 33 - Diferença na difusão de água, em porcentagem, a/ag 0,5

<b>Traço</b>	<b>Camada 1 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>	<b>Camada 2 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>	<b>Camada 3 (<math>\times 10^{-9} \text{ m/s}^2</math>)</b>
<b>R5*</b>	4,04	3,95	3,87
<b>EV5</b>	2,01	1,83	1,61
<b>EVC5</b>	1,79	1,50	1,22
<b><math>\Delta D_{R-EV}</math> (%)</b>	-50	-54	-58
<b><math>\Delta D_{R-EVC}</math> (%)</b>	-56	-62	-68

\*Resultados calculados por interpolação

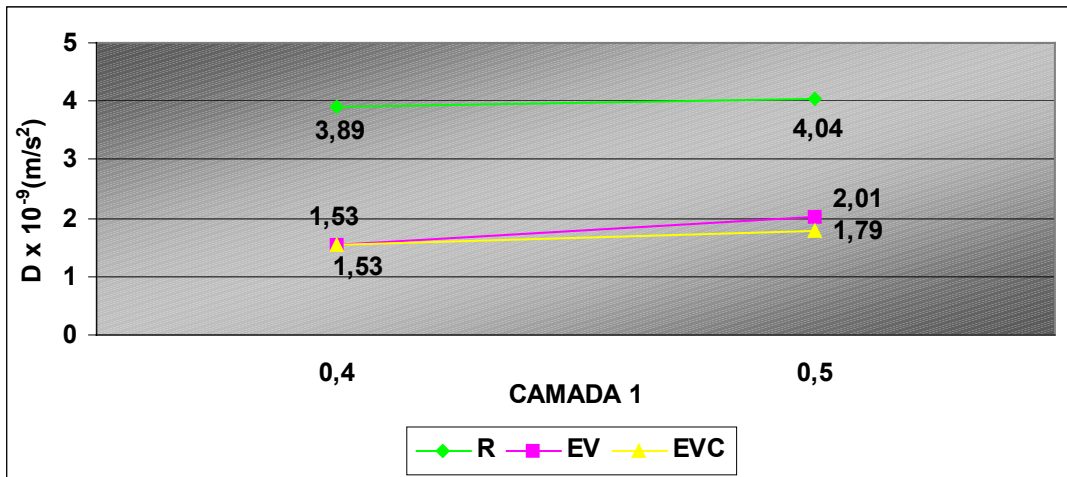


Figura 26 - Difusividade na camada 1

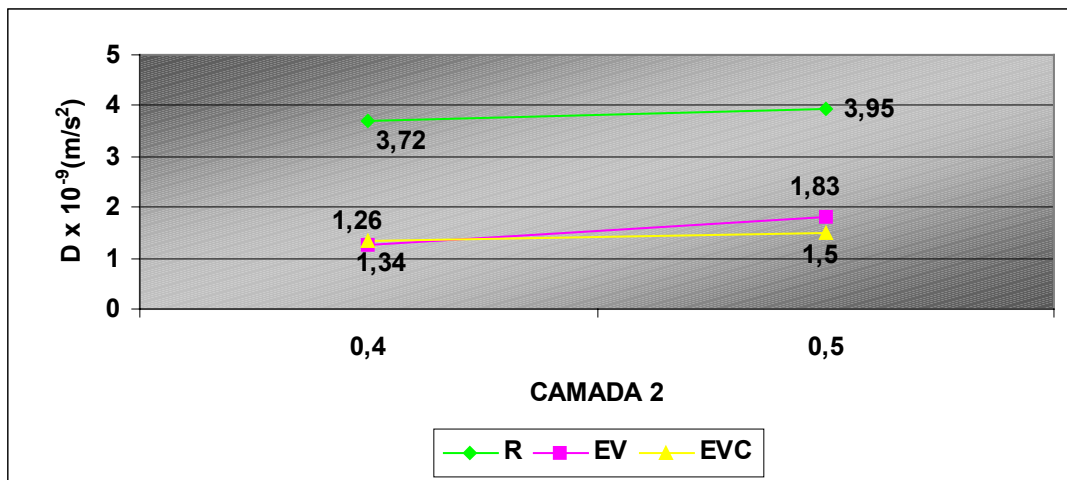


Figura 27 - Difusividade na camada 2

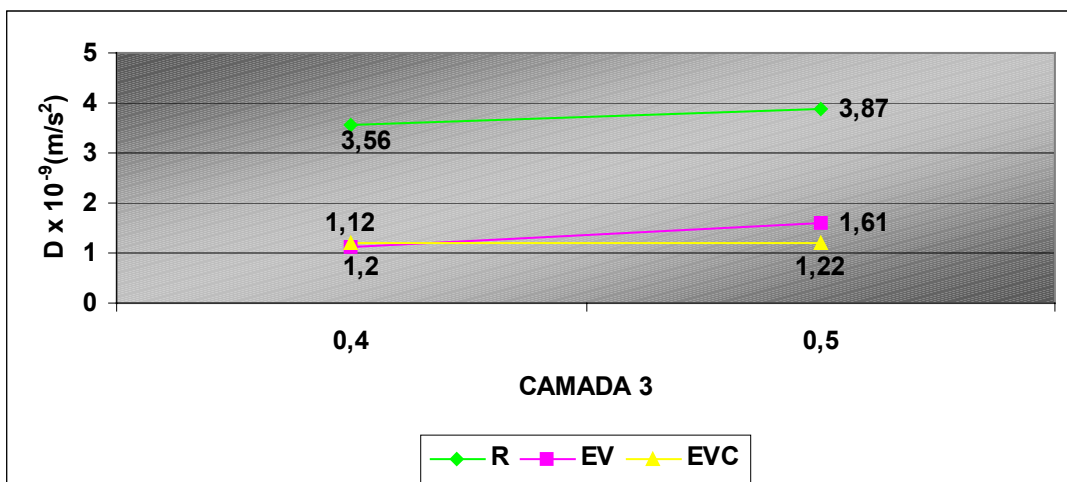


Figura 28 - Difusividade na camada 3

A interpretação desses dados permite chegar a algumas conclusões. Em primeiro lugar, apesar do alto teor de adições minerais, o coeficiente de difusividade é menor em todos os traços analisados em relação ao concreto de referência, destacando-se os traços com relação a/ag 0,4 que obtiveram reduções praticamente constantes, independentemente da adição da cal hidratada, de aproximadamente 60% a 68%. O traço com relação a/ag 0,5, em relação ao referência para o traço sem cal hidratada, obteve reduções de aproximadamente 50% a 58%. Para os traços com cal, as reduções no coeficiente de difusividade em relação ao referência variam de 55% a 68%.

A influência da cal hidratada pode ser analisada na tabela 34.

Tabela 34 - Comparativo dos traços com e sem adição de cal hidratada

Traço	Camada	DIFUSÃO DE ÁGUA D ( $\times 10^{-9}$ m/s <sup>2</sup> )		$\Delta D$	%D
		SEM CAL (g/m <sup>2</sup> )	COM CAL (g/m <sup>2</sup> )		
EV4/EVC4	1	1,53	1,53	0	0
	2	1,26	1,34	0,08	6,3
	3	1,12	1,20	0,08	7,1
EV5/EVC5	1	2,01	1,79	-0,22	-10,9
	2	1,83	1,50	-0,33	-18,0
	3	1,61	1,22	-0,39	-24,2

Na análise da tabela, observa-se que o coeficiente de difusão é menor em todos os traços com adição de cal hidratada para a relação a/ag 0,5. Esse fato contraria os resultados obtidos nos ensaios realizados aos 91 dias. Para o traço com relação a/ag 0,4, pode-se dizer que a cal trouxe benefícios já que as variações foram de 0% a 7%, sendo bem inferiores às observadas aos 91 dias.

#### 4.5.4 Difusão de água 91 x 300 dias

Sendo esta pesquisa realizada em duas datas avançadas, percebe-se a necessidade de uma comparação entre essas duas datas, a fim de verificarmos a verdadeira influência das adições minerais no concreto. Essa análise é apresentada na tabela 35, onde  $\Delta D$  (%) é a redução no coeficiente de difusão dos 91 para os 300 dias.

Tabela 35 - Comparativo da difusão de água 91 x 300 dias

TRAÇO	DATA	Camada 1 ( $\times 10^{-9}$ m/s <sup>2</sup> )	Camada 2 ( $\times 10^{-9}$ m/s <sup>2</sup> )	Camada 3 ( $\times 10^{-9}$ m/s <sup>2</sup> )
R4	91	4,15	3,98	3,95
	300	3,89	3,72	3,56
	$\Delta D$ (%)	<b>-6,3</b>	<b>-6,5</b>	<b>-9,9</b>
R5*	91	4,53	4,27	4,33
	300	4,04	3,95	3,87
	$\Delta D$ (%)	<b>-10,8</b>	<b>-7,5</b>	<b>-10,6</b>
R6	91	5,00	4,52	4,79
	300	4,06	4,10	4,14
	$\Delta D$ (%)	<b>-18,8</b>	<b>-9,3</b>	<b>-13,6</b>
R8	91	6,54	6,67	6,55
	300	6,31	6,38	6,42
	$\Delta D$ (%)	<b>-3,5</b>	<b>-4,3</b>	<b>-2,0</b>
EV3	91	1,86	1,71	1,61
	300	1,00	1,06	0,79
	$\Delta D$ (%)	<b>-46,2</b>	<b>-38,0</b>	<b>-50,9</b>
EV4	91	1,98	1,84	1,72
	300	1,53	1,26	1,12
	$\Delta D$ (%)	<b>-22,7</b>	<b>-31,5</b>	<b>-34,9</b>
EV5	91	2,25	2,20	1,81
	300	2,01	1,83	1,61
	$\Delta D$ (%)	<b>-10,7</b>	<b>-16,8</b>	<b>-11,0</b>
EVC3	91	2,49	2,39	2,40
	300	1,38	1,15	1,11
	$\Delta D$ (%)	<b>-44,6</b>	<b>-51,6</b>	<b>-53,7</b>
EVC4	91	3,05	2,67	2,56
	300	1,53	1,34	1,20
	$\Delta D$ (%)	<b>-49,9</b>	<b>-49,8</b>	<b>-53,1</b>
EVC5	91	3,34	3,09	2,75
	300	1,79	1,50	1,22
	$\Delta D$ (%)	<b>-46,4</b>	<b>-51,5</b>	<b>-55,7</b>

\*Resultados calculados por interpolação

Observa-se que o aumento da idade para os traços de referência não acarreta em grandes reduções no coeficiente de difusividade, sendo a maior redução de 19% para o traço R6. No entanto, nos traços com adições minerais, as reduções são bem mais elevadas devido ao fato de as reações de hidratação se processarem de forma mais lenta. Para os traços sem cal hidratada, à medida que a relação a/ag aumenta,

observa-se, uma diminuição na porcentagem de redução, variando em torno de 10% (EV5) a 50% (EV3). Já nos traços com adição de cal hidratada, esse comportamento é diferente, pois as reduções são praticamente constantes à medida que a relação a/ag aumenta, devido ao fato de a cal hidratada ocasionar um refinamento dos poros capilares e uma maior retenção de água no interior do concreto para as reações de hidratação das adições minerais. A menor variação observada foi de 44% e a maior de 55%.

#### 4.5.5 Difusão de água em igualdade de resistência à compressão aos 91 dias e 300 dias

Para a análise dos coeficientes de difusão de água no patamar de 50 MPa, foram utilizadas equações de regressão linear que correlacionam difusão de água com a resistência à compressão. Na tabela 36 e figura 29, estão relatados os dados para os patamares de resistência em questão da difusão de água, onde  $\Delta_{3-1}$  é a porcentagem de aumento ou redução no coeficiente de difusão da camadas 3 para 1.

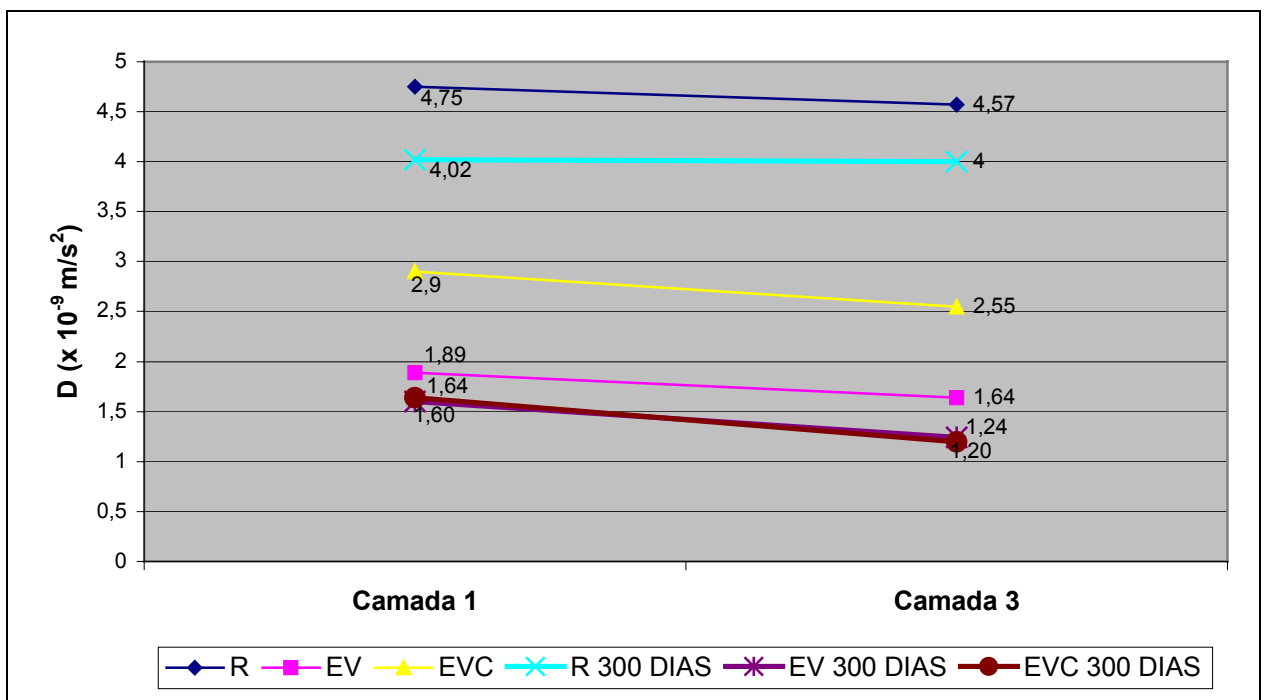


Figura 29 - Difusão de água em igualdade de resistência aos 91 e 300 dias

Tabela 36 - Difusão de água em igualdade de resistência à compressão aos 91 e 300 dias

TRAÇO	91 DIAS			$\Delta_{3-1}$ %	
		Camada 1	Camada 2		Camada 3
R	D	4,75	4,52	4,57	-3,8
	$r^2$	0,96	0,87	0,95	
	I	100	95	96	
EV	D	1,89	1,74	1,64	-13,2
	$r^2$	1	0,99	0,94	
	I	40	36	35	
EVC	D	2,90	2,67	2,55	-12,1
	$r^2$	1	0,98	0,99	
	I	61	56	54	
<b>300 DIAS</b>					
R	D	4,02	4,01	4,00	-0,5
	$r^2$	*	*	*	
	I	85	84	84	
EV	D	1,60	1,45	1,24	-22,5
	$r^2$	0,99	0,95	1	
	I	34	31	26	
EVC	D	1,64	1,39	1,20	-26,8
	$r^2$	0,93	1	0,94	
	I	35	29	25	

Na ilustração 29 e tabela 37, em que se comparam os concretos com adições minerais, com e sem cal hidratada, com o concreto de referência aos 91 e 300 dias para o nível de resistência de 50 MPa, verifica-se em todos os traços com adições minerais uma redução bastante elevada no coeficiente de difusão em relação ao concreto de referência. Destaca-se, aos 91 dias, a camada 3 do traço EV com uma redução de 64% e, aos 300 dias, a camada 3 do traço EVC com uma redução de 70%. As demais porcentagens de redução estão na tabela 37.

Comparando a camada 3 com a camada 1 dos traços com adições minerais, aos 91 dias, tem-se um coeficiente de absorção praticamente constante, com reduções aproximadas de 13% para o traço sem cal e de 12% para o traço com cal. Aos 300 dias, a porcentagem de redução é mais acentuada, em torno de 22% para o traço sem cal e de 26% para o traço com cal.

Tabela 37 - Diferença na difusão de água em relação ao referência, em porcentagem

$\Delta_{R - EV/EVC}$	91 DIAS		300 DIAS	
	Camada 1	Camada 3	Camada 1	Camada 3
$\Delta_{R - EV} (\%)$	-60	-64	-60	-69
$\Delta_{R - EVC} (\%)$	-39	-44	-59	-70

#### 4.6 Correlações entre absorção capilar e difusão de água

A percolação de água no concreto para a absorção e difusão não possuem o mesmo mecanismo, embora ambas dependam da porosidade, distribuição e interconexão dos poros. Nota-se, nas figuras 30 e 31, o crescimento mais acentuado na absorção capilar do que na difusão, visto que a absorção dá-se sob pressão atmosférica e relaciona-se com a porosidade aberta ao meio externo, enquanto na difusão, o fluido deve percolar por todo corpo de prova, dependendo da interconectividade dos poros. Para os gráficos abaixo foram utilizados os resultados obtidos de todas as camadas aos 91 e 300 dias aglutinados

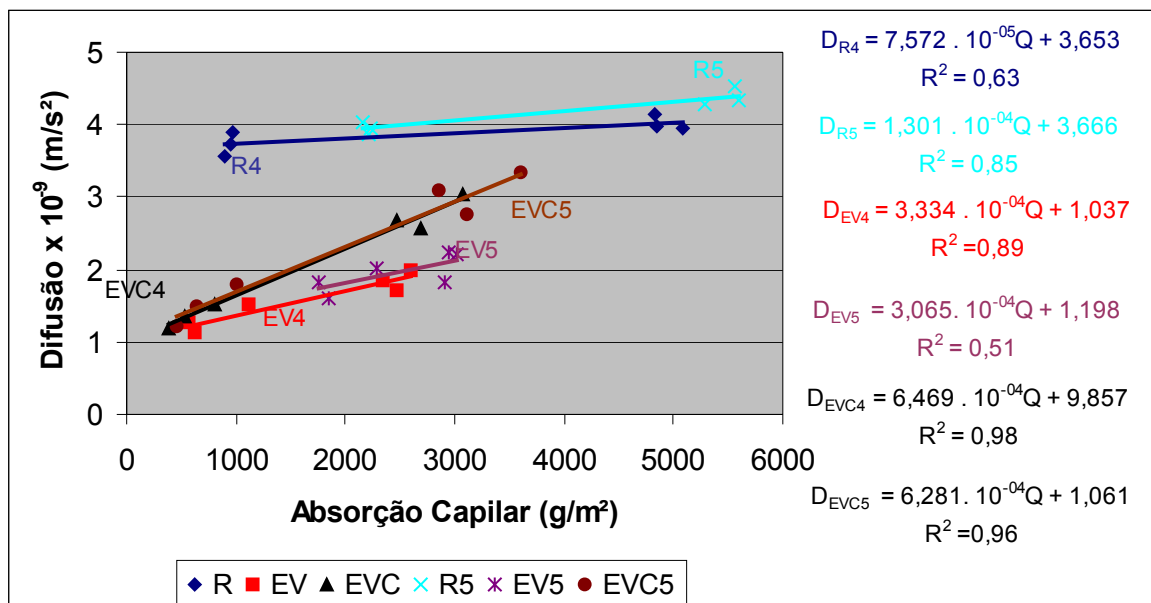


Figura 30 - Correlação entre difusão e absorção capilar de água para os traços com relação a/ag 0,4 e 0,5

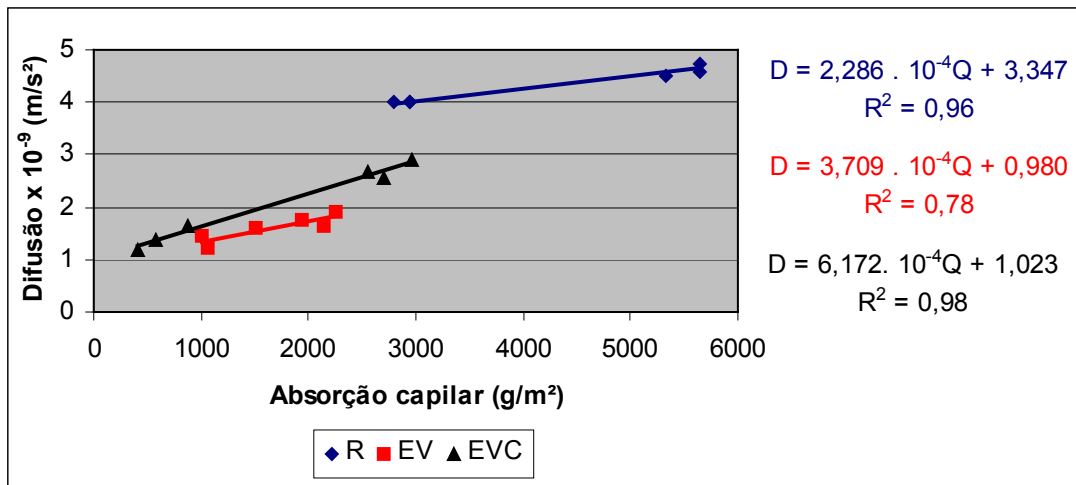


Figura 31 - Correlação entre difusão e absorção capilar de água em igualdade de resistência de 50MPa

Observa-se, nas figuras, que o uso de adições minerais acarreta uma maior correlação entre difusão e absorção do que o concreto de referência. Em relação aos traços com adições minerais e cal hidratada, o coeficiente angular das retas aumenta, ou seja, ficam mais inclinadas em relação ao eixo das abscissas (Q). Isto quer dizer que, à medida que aumenta o teor de adições minerais e o refinamento dos poros, o processo de absorção capilar diminui em relação ao de difusão. Em outras palavras, a absorção tem queda mais acentuada do que a difusão, devido à diminuição do diâmetro crítico dos poros e à conectividade entre eles, fator que prepondera no fenômeno de sorção, o qual depende essencialmente dos poros conectados com a superfície externa.

#### 4.7 Absorção capilar de água x Volume total e Diâmetro crítico

Os resultados para o volume total intrudido foram confrontados com os resultados obtidos no ensaio de absorção capilar aos 91 e 300 dias (figura 32). Pela análise da figura, observam-se coeficientes de correlação baixos ( $R^2 < 0,7$ ) aos 91 dias e elevados aos ( $R^2 < 0,7$ ) 300 dias.



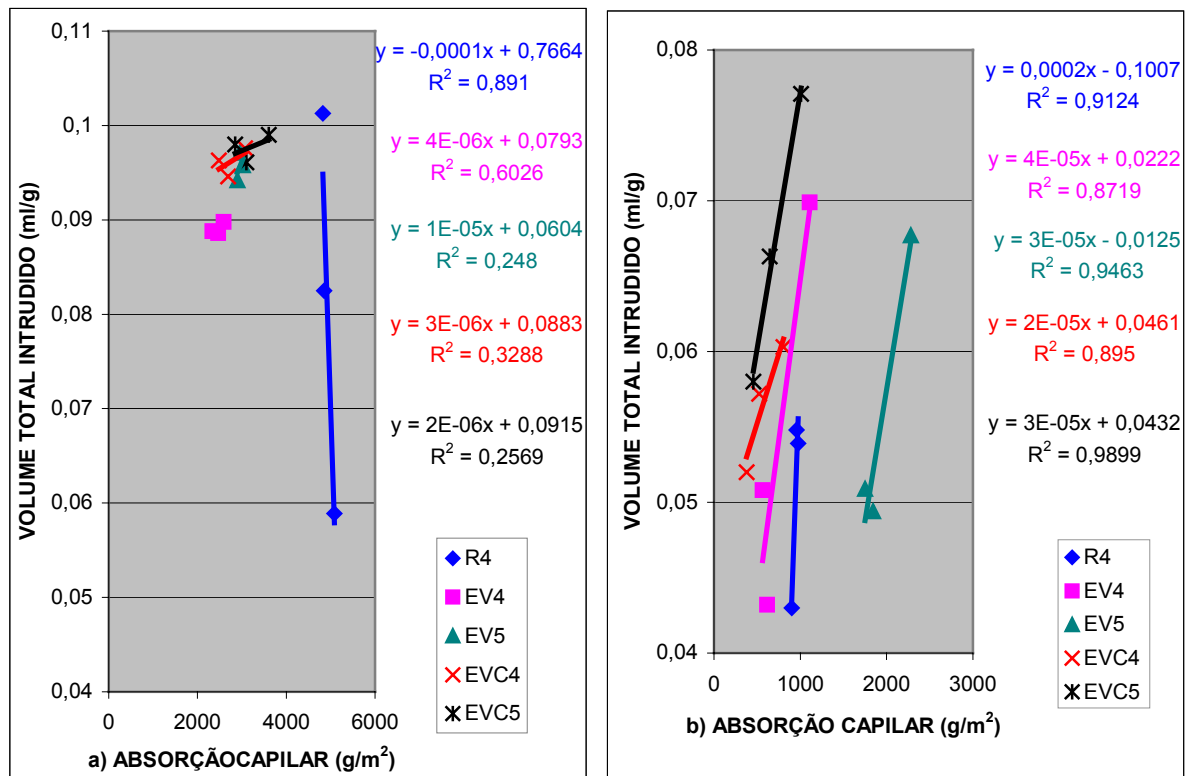


Figura 32 - Volume total intrudido x absorção capilar aos 91 dias (a) e 300 dias(b)

Observam-se nas figuras dois comportamentos completamente distintos. Aos 91 dias, a correlação entre volume total intrudido e a absorção capilar praticamente inexistente, exceto para o traço de referência que a essa idade sua rede de poros está praticamente formada. Mesmo assim, em todos os traços com adições minerais, apesar de um volume intrudido relativamente maior que o referência (13% para o traço EV - C1 e estatisticamente igual para o traço EVC - C1, para a C3 o volume total é 50% - EV e 61% - EVC, superior ao referência), a quantidade de água absorvida é menor. Ou seja, apesar da absorção capilar ser menor que no referência, a estrutura de poros ainda não está definida nos traços com adições minerais devido às reações mais lentas. Já aos 300 dias, tem-se uma forte correlação entre o volume total intrudido e a absorção capilar e, apesar de um volume de intrusão maior, a quantidade de água absorvida continua sendo inferior ao traço de referência, exceto para o traço EV5. Essa inversão na correlação pode ser explicada devido ao fato de o processo de hidratação das adições minerais ocorrer de forma mais lenta. A diminuição na absorção de água em relação ao referência deve-se ao fato de as adições minerais ocasionarem um rompimento da

intercomunicabilidade dos poros. Como o processo de absorção capilar depende diretamente desse fato, tem-se uma redução na quantidade de água absorvida.

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. A existência dessas relações é comprovada através da figura 33 que contém dados de todos os traços analisados com as respectivas equações e tendências, confirmando as tendências acima apontadas (exceto para o traço EV aos 91 dias, que não apresenta correlação). Observa-se que os concretos de referência quase independem do diâmetro crítico, enquanto que os com adições minerais têm retas mais inclinadas, demonstrando uma maior dependência entre a absorção e o diâmetro crítico.

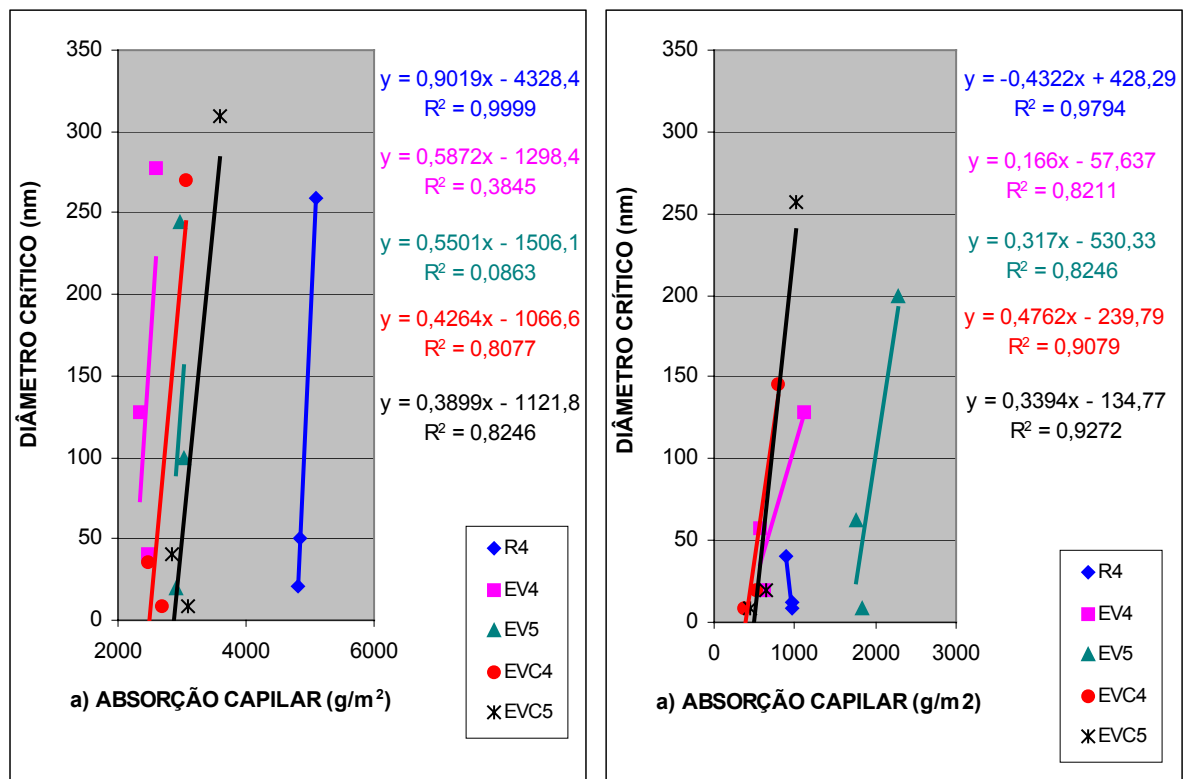


Figura 33 - Diâmetro crítico x absorção capilar aos 91 dias (a) e 300 dias (b)

A correlação entre absorção capilar e volume total intrudido em igualdade de resistência de 50 MPa está ilustrada na figura 34.

Aos 91 dias, não há nenhuma correlação entre a absorção e o volume total intrudido. Para a idade de 300 dias, o traço de referência continua sem ter nenhuma correlação. Já para os traços com adições minerais, a correlação é bastante elevada, tendo destaque o traço com cal hidratada em que, apesar de um volume intrudido maior, a absorção capilar é menor.

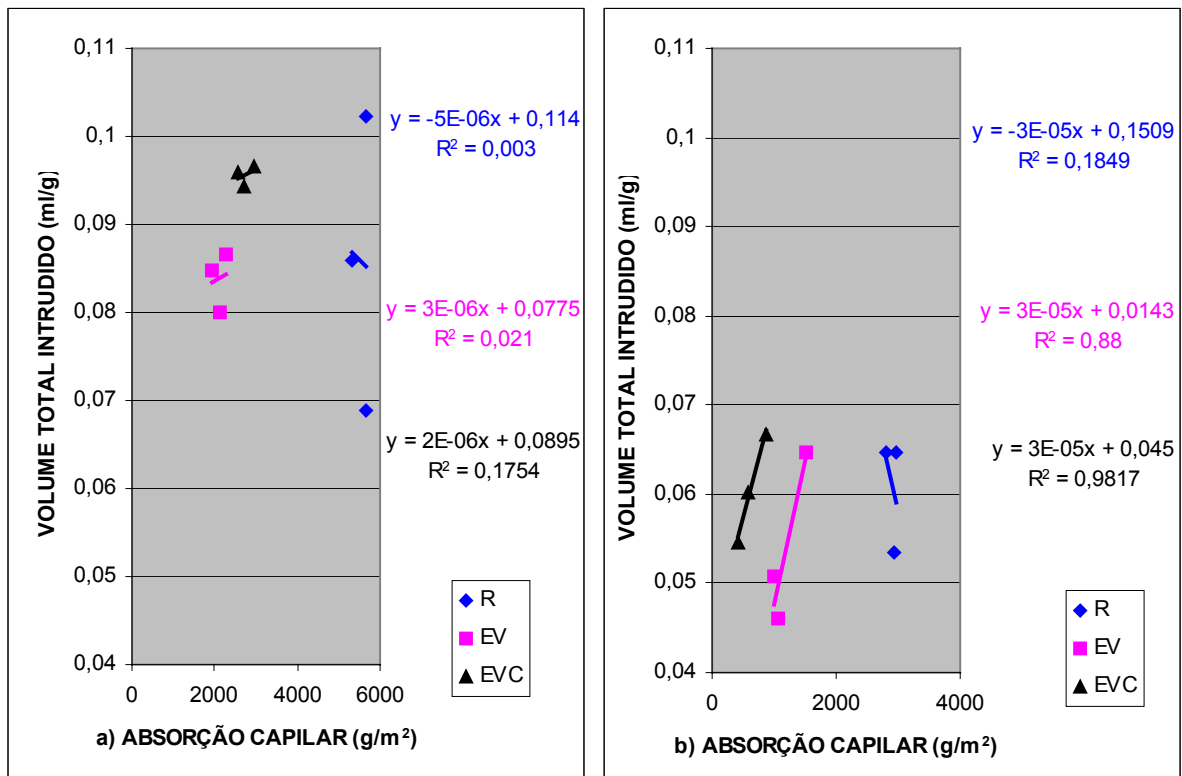


Figura 34 - Volume total intrudido x absorção capilar, em igualdade de resistência, aos 91 dias (a) e 300 dias (b)

#### 4.8 Difusão de água x Volume total e Diâmetro crítico

Analisando a figura 35, observa-se uma boa correlação existente entre a difusão de água e o volume total intrudido, bem como para o diâmetro crítico, aos 91 e 300 dias.

Ao contrário da absorção capilar, a correlação entre difusão e o volume total intrudido já ocorre a partir dos 91 dias.

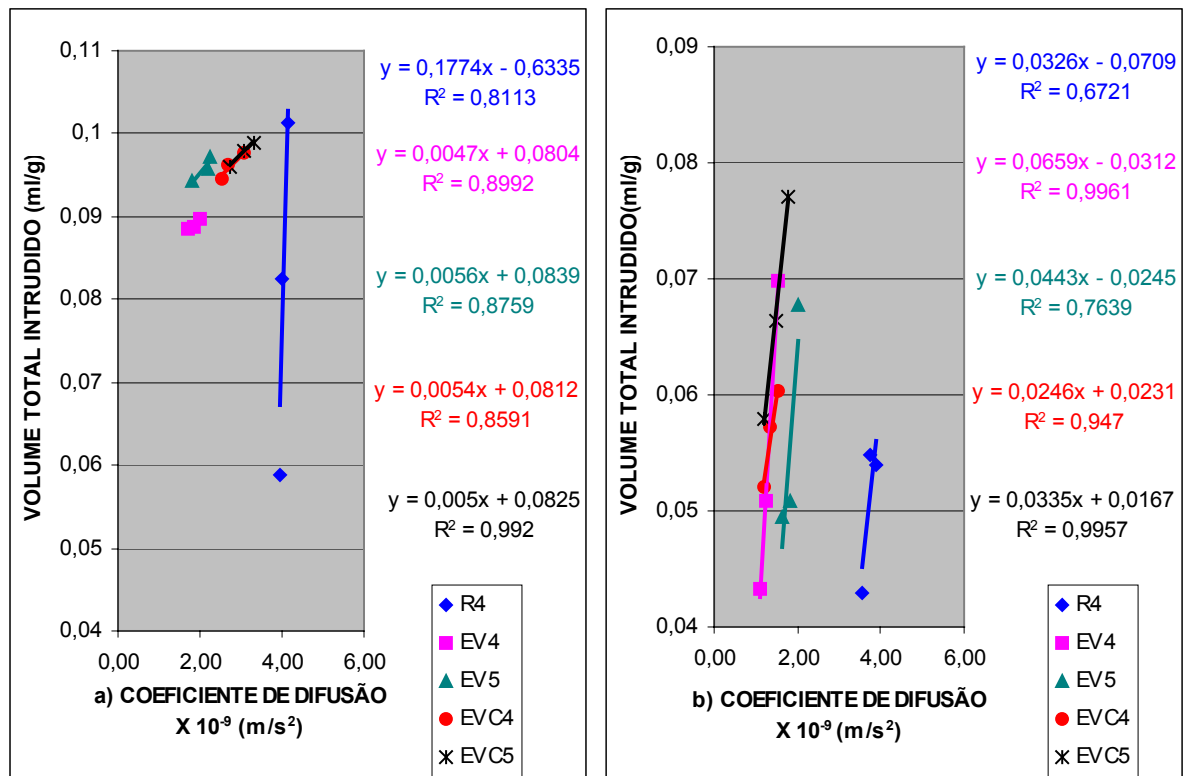


Figura 35 - Volume total intrudido x difusão de água aos 91 dias (a) e 300 dias (b)

Observa-se nas figura 35 que a difusão, para os traços com adições minerais, aos 91 dias, depende mais da porosidade do que aos 300 dias, pois as retas são mais inclinadas (valores dos coeficientes X) devido ao refinamento dos poros com o tempo que diminui a porosidade. No entanto, a redução da difusão não é proporcional, é consideravelmente menor.

Em relação ao referência, praticamente não há dependência entre a difusão e o volume total intrudido para as duas idades ensaiadas

Observa-se na figura 36, aos 91 dias, que, apesar da correlação existente entre o diâmetro crítico e a difusão, não há tanta dependência entre esses parâmetros. Isso é demonstrado pelas inclinações das retas, ao contrário dos 300 dias cuja dependência da difusão com o diâmetro crítico é maior (retas menos inclinadas). Isso ocorre devido ao fato de as reações pozolânicas ocorrerem de forma mais lenta. As adições minerais possuem maiores correlações do que os concretos de referência, pois estes não apresentam os mecanismos de refinamento dos poros devido as reações pozolânicas e de hidratação com o tempo resultantes da ação do tempo sobre as superfícies.

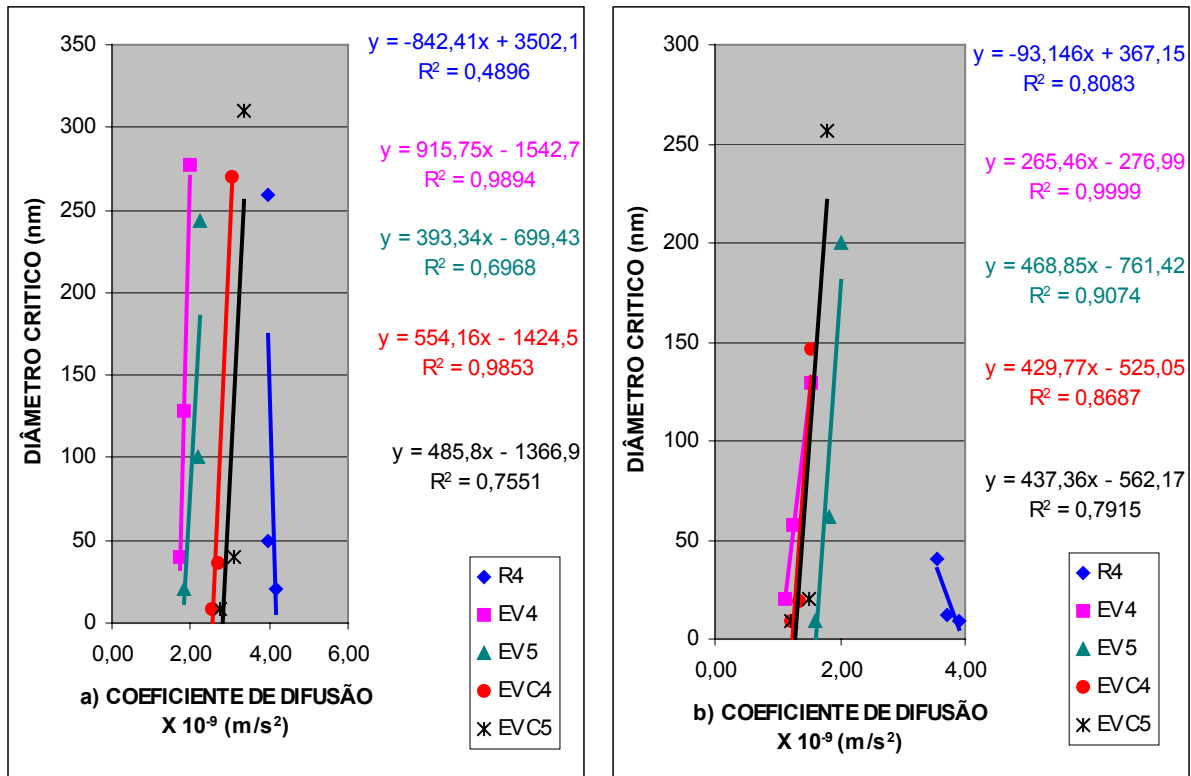


Figura 36 - Diâmetro crítico x difusão de água aos 91dias (a) e 300 dias (b)

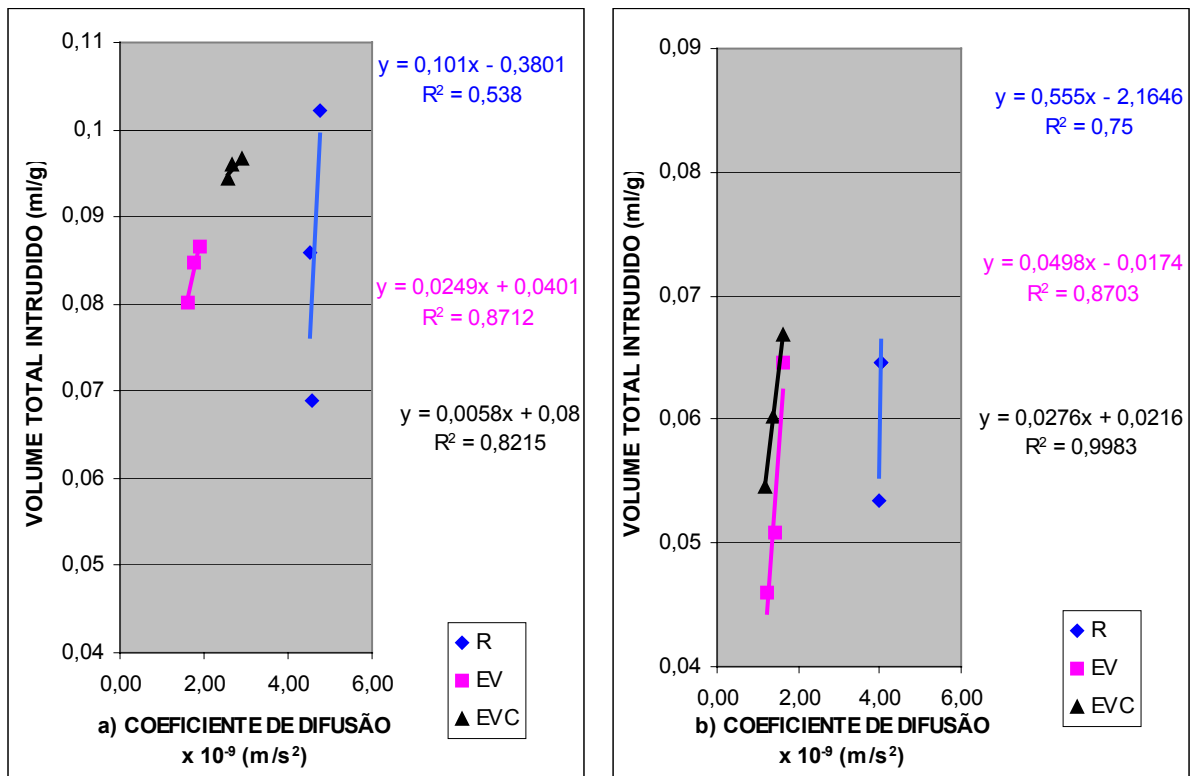


Figura 37 - Volume total intrudido x difusão de água, em igualdade de resistência, aos 91dias (a) e 300 dias (b)

A correlação entre difusão de água e volume total intrudido em igualdade de resistência de 50 MPa está ilustrada na figura 37. Ao contrário da absorção capilar, as correlações entre a difusão e o volume total intrudido já ocorre a partir dos 91 dias para os traços com adições minerais, porém é muito baixa para o traço de referência nesta data. Para a idade de 300 dias, o traço de referência continua com baixa correlação; já para os traços com adições minerais, a correlação é elevada, tendo destaque o traço com cal hidratada em que, apesar de um volume intrudido maior, o coeficiente de difusão é menor.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Influência das adições minerais sobre a absorção capilar

#### 5.1.1 Em igualdade de relação água/materiais cimentícios

A utilização de elevados teores de adições minerais resulta em decréscimos significativos nos coeficientes de absorção capilar de água quando comparados com concretos similares sem esses materiais, para todas as idades e traços estudados.

Em relação à questão de pesquisa, conclui-se que a substituição de cimento por escória de alto forno e cinza volante acarreta em significativas reduções no processo de absorção capilar, independentemente da relação a/mc, idade e camada analisados. Exceto na camada 1, aos 300 dias, essa mudança demonstra que esta camada é a que mais resente a exposição climática e o longo processo de cura. Os resultados obtidos para a camada 3, demonstram a compacidade conferida pelas adições minerais às camadas mais internas do concreto devido a uma maior retenção de água para os processos de hidratação, processo auxiliado pela adição de cal hidratada que atua como repositor de hidróxido de cálcio e retentor de água indispensáveis ao processo de hidratação.

#### 5.1.2 Em igualdade de resistência à compressão

Em relação à questão de pesquisa, conclui-se que o uso de adições minerais, aos 91 dias, não acarreta em reduções significativas no coeficiente de absorção da camada de cobertura em relação à camada 3. Fato contrário constatou-se aos 300 dias, quando as reduções no coeficiente de absorção são mais expressivas. Quando comparados os traços com adições e o referência, independentemente da camada, os benefícios já ficaram evidentes a partir dos 91 dias e intensificaram-se aos 300 dias, o que comprova a necessidade de um maior período de cura para esses concretos.

## **5.2 Influência das adições minerais sobre a difusão de água.**

### **5.2.1 Em igualdade de relação água/materiais cimentícios**

Assim como na absorção capilar, a utilização de elevados teores de adições minerais resulta em decréscimos significativos nos coeficientes de difusão de água, quando comparados com concretos similares sem esses materiais, para todas as idades e traços estudados.

Em relação à questão de pesquisa, conclui-se que a substituição de cimento por escória de alto forno e cinza volante acarreta em significativas reduções no processo de difusão de água, quando comparados com o referência, independentemente da relação a/mc, idade e camadas analisadas. Os resultados obtidos para a camada 3 demonstram a compacidade conferida pelas adições minerais às camadas mais internas do concreto devido a uma maior retenção de água para os processos de hidratação. Para o coeficiente de difusão, aos 91 dias, para ambos os traços analisados, a adição de cal hidratada ocasionou um aumento significativo em relação ao traço sem cal, aos 300 dias. Para o traço a/mc = 0,4, esta diferença tornou-se praticamente inexistente e para o traço a/mc = 0,5 o traço com cal possui um coeficiente de difusão inferior ao traço sem cal.

### **5.2.2 Em igualdade de resistência à compressão**

Em relação à questão de pesquisa conclui-se que, em igualdade de resistência, nos traços com adições minerais à medida que a profundidade aumenta, diminui o coeficiente de difusão, fato que se intensifica aos 300 dias. Comparando os traços com adições minerais com o referência, observa-se uma redução significativa no coeficiente de difusão para ambos os traços, camadas e idade de cura analisados, o que demonstra os benefícios da substituição do cimento por escória de alto forno e cinza volante com e sem adição de cal hidratada.



### **5.3 Considerações sobre as correlações entre difusão de água e absorção capilar**

O uso de adições minerais acarreta uma maior dependência entre absorção e difusão. Esse fato foi observado pelo aumento na inclinação das retas em relação ao eixo das abscissas (absorção capilar de água), a adição de cal hidratada intensifica esse aumento. Esse comportamento revela que a adição de cal hidratada rebaixa com mais intensidade os coeficientes de difusão de água do que a absorção capilar de água. Isso se dá devido ao efeito microfiller, que obstrui os poros, associado ao refinamento da rede capilar, advindo das reações pozolânicas, o que dificulta a percolação de fluidos pelo concreto.

### **5.4 Correlação entre absorção capilar, volume total intrudido e diâmetro crítico**

A análise da absorção capilar em relação ao volume total intrudido revela que, aos 91 dias, as correlações praticamente inexistem, exceto para o traço de referência. Mesmo assim, em todos os traços com adições minerais, apesar de apresentarem um volume total intrudido relativamente maior que o referência, a quantidade de água absorvida é menor. Já aos 300 dias, tem-se uma forte correlação entre o volume total intrudido e a absorção capilar, com  $r^2$  variando de 0,87 a 0,99 e, apesar de apresentar um volume de intrusão maior, a quantidade de água absorvida continua sendo inferior à do traço de referência, exceto para o traço EV5.

Em relação ao diâmetro crítico, as correlações já ocorrem a partir dos 91 dias para os traços com cal hidratada e referência, não havendo correlação com o traço sem cal. Aos 300 dias, essas correlações intensificam-se, inclusive para o traço sem cal hidratada, com  $r^2$  variando de 0,82 a 0,97. Observa-se que os concretos de referência quase independem do diâmetro crítico, enquanto que os com adições minerais têm retas mais inclinadas demonstrando uma maior dependência entre a absorção e o diâmetro crítico.

### **5.5 Correlação entre difusão de água, volume total intrudido e diâmetro crítico**

Ao contrário da absorção capilar, a correlação entre difusividade, volume total intrudido e diâmetro crítico já ocorre a partir das primeiras idades, intensificando-se com o passar do tempo. A diferença para ambas as correlações, dos 91 dias para os 300 dias, é que aos 91 dias, o volume total intrudido e o diâmetro crítico são maiores que aos 300 dias, o que ocasiona em coeficientes de difusão superiores.

### **5.6 Considerações finais**

A pesquisa realizada permitiu concluir que a substituição de cimento por escoria de alto forno e cinza volante, com e sem adição de cal hidratada, rebaixa com intensidade os coeficientes de absorção e difusão de água, devido à obstrução dos poros, associada ao refinamento da rede capilar, advindo das reações pozolânicas, o que dificulta a percolação de fluidos pelo concreto. Para tanto, um período maior de cura faz-se interessante para maximizar os efeitos das reações pozolânicas e densificar ainda mais a estrutura dos poros, a fim de diminuir a porosidade da camada de cobertura que sofre influências significativas com a variação do tempo de cura.

Em relação ao comportamento das variáveis estudadas com o aumento da profundidade, o concreto de referência, aos 91 dias, foi o único que apresentou um coeficiente de absorção maior da camada 1 para a camada 3; aos 300 dias, somente o traço R4 tem esse comportamento. Para o coeficiente de difusão, tal fato não ocorreu, apesar de as diferenças serem pequenas. Para os traços com adições com e sem cal hidratada, para ambas as variáveis de estudo, independentemente da idade, a camada 3 apresentou uma melhoria em relação a camada 1, provavelmente devido a uma maior retenção de água para os processos de hidratação.

Os resultados obtidos nesta pesquisa atestam que a substituição de 90% de cimento por adições minerais, sem ou com adição de cal hidratada, é benéfica quanto à percolação de água a partir da superfície de contato da fôrma, em direção ao interior do concreto, até a profundidade de 50 mm. Os traços com adições minerais apresentaram melhor desempenho em relação ao concreto de referência,

tanto para a absorção quanto difusão de água, sendo os resultados aos 300 dias melhores (mais baixos) do que aos 91 dias.

Para o patamar de resistência à compressão de (50 MPa), os concretos com adições minerais apresentaram coeficientes de absorção capilar e difusão inferiores aos desenvolvidos pelo concreto de cimento portland..

Para futuras pesquisas sugere-se o estudo comparativo entre testemunhos retirados de protótipos, como realizado nesta pesquisa, e de corpos de prova moldados, em igualdade de condições de umidade interna. O estudo comparativo de absorção de água pelo método da RILEM e da norma brasileira (NBR 9779), a determinação do coeficiente de difusão de água segundo a lei de Fick.

## BIBLIOGRAFIAS

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1.ed. São Paulo: Pini, 2000. 667p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Coletânea Estruturas de Concreto**: NBR 6118, NBR 14931, NBR 12655, NBR 8953, NBR 8681, NBR 7187. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Agregado em estado solto – determinação da massa unitária**: NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **Agregado em estado compactado e seco – determinação da massa unitária**: NBR 7810 – MB1733. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**: NBR 7809. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **Agregado graúdo – determinação da abrasão Los Angeles**: NBR 6465. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **Agregado miúdo – Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio**: NBR 6467. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **Agregados – determinação da composição granulométrica**: NBR 7217 – NM248. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman**: NBR 9776 – NM 52. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Agregados – determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo**: NBR 9937 – NM 53. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Agregados para concreto**: NBR 7211. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **Análise química de cimento Portland – determinação da perda ao fogo**: NBR 5743 – NM 12. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **Análise química de cimento Portland – determinação do resíduo insolúvel:** NBR 5744 – NM 13. Rio de Janeiro. 1989.

\_\_\_\_\_. **Análise química de cimento Portland – determinação do anidrido sulfúrico:** NBR 5745 – NM 14. Rio de Janeiro. 1989.

\_\_\_\_\_. **Análise química de cimento Portland – determinação do óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama:** NBR 5747 – NM 15. Rio de Janeiro. 1989.

\_\_\_\_\_. **Análise química de cimento Portland – determinação do óxido de cálcio livre por etileno glicol:** NBR 7227 – NM16. Rio de Janeiro. 1989.

\_\_\_\_\_. **Cal virgem e cal hidratada - Retirada e preparação de amostra - Procedimento :** NBR 6471. Rio de Janeiro. 1998.

\_\_\_\_\_. **Cal virgem e cal hidratada – Analise química:** NBR 6473. Rio de Janeiro. 2003.

\_\_\_\_\_. **Cimento portland – determinação da resistência à compressão:** NBR 7215. Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_. **Cimento portland - determinação do tempo de pega:** NBR 11581 – NM 65. Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_. **Cimento portland e outros materiais em pó, determinação da massa específica:** NBR 6474 – NM 23. Rio de Janeiro. 2001.

\_\_\_\_\_. **Cimento portland e outros materiais em pó, determinação da área específica:** NBR 7224 – NM 76. Rio de Janeiro. 1984.

\_\_\_\_\_. **Cimento portland - determinação da finura por meio da peneira 200:** NBR 11579. Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_. **Cimento portland de alta resistência inicial:** NBR 5733. Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_. **Cimento portland – determinação da água da pasta de consistência normal:** NBR 11580. Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_. **Cimento portland comum e clínquer – análise química por complexometria:** NBR 9203 - NM 17, NM 18 e NM 19. Rio de Janeiro. 1985.

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

\_\_\_\_\_. **Ensaio de compressão em corpos de prova 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.

\_\_\_\_\_. **Materiais pozolânicos – especificação:** NBR 12653. Rio de Janeiro. 1992.

BAI, J.; WILD, S.; SABIR, B. B. **Sorptivity and strength of air-cured and watercured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth.** Cement and Concrete Research, v. 33, p. 1813-1821, 2002.

BALLIM, Y. **Curing and durability of OPC, fly ash and blast-furnace slag concretes.** Materials And Structure, London, v.6, n. 158, p. 238-244, 1993.

BASHEER, L; KROPP, J; CLELAND, D.J. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review.** Construction And Building Materials, v. 15 n. 2/3, p. 93-103, mar/apr. 2001.

CALLEJA, J. **Las puzolanas.** Monografia nº 281. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1969.

CAMARINI, G. **Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água.** Artigo 2-4-14. São Paulo: IBRACON, 1999.

CARASEK, H; CASCUDO, O Projeto integrado: **Características do concreto de cobrimento e o seu papel na durabilidade das estruturas de concreto armado.** Goiânia 2001. (projeto de pesquisa)

CASCUDO, O. **Notas de aula da disciplina durabilidade do concreto armado**. Curso de mestrado em Engenharia civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2003.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997.

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). **Durable concrete structures Design Guide**. Bulletin d'Information n.183. Thomas Telford, Londres, 1992.

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.

DeSOUZA, S.J; HOOTON, R.D & Bckley, J.A. **A field test for evaluating high performance concrete covercrete quality**. Canadian journal of civil engineering, v 25, p. 551 – 556, 1998.

DHIR, R.K., BYARS, E. PFA. **Pulverized fuel-ash concrete: intrinsic permeability**. ACI Materials Journal, Detroit, v. 90, n. 6, p. 571-580, 1993.

DUARTE, D., PELISSER, P. **Avaliação Do Desempenho Do Concreto Com Adição De Cinza Volante E Cinza Pesada**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45º, 2003, São Paulo. Anais: IBRACON, 2003.

FERREIRA. R.B. **Influencia das adições nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

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

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

GASTALDINI, A.L.G., ISAIA, G.C. Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto: GEPECON, 2002, 2003, 2004 e 2005. <http://ufsm.br/gepecon>

GLUKHOVSKY, V.D.; ROSTOVSKAJA, G.S.; RUMYNA, G.V. **High strength slagalkaline cements**. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7. Paris, 1980. Proceedings. Paris : Spetima, 1980. v.V, p.164-168.

HASSAN, K. E., CABRERA, J. G. **The use of classified fly ash to produce high performance concrete**. In: MALHOTRA, V. M. (ed). Sixth CANMET/ACI International Conference. Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Bangkok, Thailand, 1998. Proceedings. American Concrete Institute, 2 v., v. 1, p. 21-36 (SP 178-2).

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. (tese de Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Introdução na durabilidade no projeto das estruturas de concreto**. São Leopoldo, 1997, anais... São Leopoldo, UNISINOS/ANTAC, 1997. P. 31- 42.

HO D. W. S.; LEWIS, R.K. **The water sorptivity of concrete:the influence of constituents under continuous during**. In:DURABILITY OF BUILDING MATERIALS, Amesterdan, 1987.

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. **Avaliação técnico-econômica de concreto de alta resistência com elevados teores de cinzas volantes**. Porto Alegre, 1991. 302p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 1991.

\_\_\_\_\_**Carbonatação do concreto: uma revisão**. Santa Maria, março 1999. Polígrafo.

\_\_\_\_\_**Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo.



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

\_\_\_\_ **Pesquisa sobre o cobrimento da armadura das estruturas de concreto: revisão sobre estrutura dos poros e mecanismos de transporte.** Santa Maria, 2000. Polígrafo

ISAIA, G. C., GASTALDINI, A. L. G., MORAES, R. C. **The physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete.** In: SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM ENVIRONMENTALLY-FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction into the next millennium, João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2000. v.1, p. 229-244.

JOHN, V. M. **Cimentos de Escória Ativada com Silicatos de Sódio.** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo.  
MALHOTRA, V. M. CANMET. **Investigations dealing with high-volume fly ash concrete.** In: Malhotra, V. M. (ed) *Advances in Concrete Technology.* Ottawa: Energy, Mines and Resources, 1992, p. 433-470.

MALHOTRA, V. M. **Supplementary Cementing Materials for concrete.** Canadian Government Publishing Centre, Ottawa – Canada, 1987.

McCARTER, W. J., CHRISP, T. M., STARRS, G., BASHEER, P. A. M. **Developments in near-surface testing of covercrete.** In: MALHOTRA, V. M. (ed). INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 5<sup>th</sup>, 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.

MEHTA, P. K. **Concrete: structure, properties and materials.** New jersey. 1986.

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

NAKAMOTO, J., TOGAWA, T., MIYAGAWA, M., NAGAOKA, S. **Freezing and thawing resistance of high slag content concrete.** In: Malhotra, V. M. (ed.) CANMET/ACI/JCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, 4<sup>th</sup>, Tokushima, 1998. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 1998, p. 1059-1072 (SP-179).

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

PAULON, V. A. **Um estudo comparativo da influência da adição de nanosílica e sílica ativa na permeabilidade dos concretos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40<sup>o</sup>, 2000, Fortaleza. Anais: IBRACON, 2000

PECCHIO, M. & BATTAGIN, A. F. **Estudo do envelhecimento de escórias granuladas de alto-forno.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5<sup>o</sup>, 1999, São Paulo.

PEREIRA, V.G.A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influencia do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura.** 2001. Dissertação (mestrado em Engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PETRY S. B.. **Estudo Da Permeabilidade À Água Na Camada De Cobrimento De Protótipos Concretos Com Altos Teores De Cinza Volante.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

REINHARDT, H. W. **Transport of chemical trough concrete materials science of concrete.** Sidney: Jan Skalny, 1992.

REINHARDT, H. W., SOSORO, M., AUFRECHT, M. **Development of HPC in germany with special emphasis on transport phenomeno.** In: INTERNATIONAL WHORKSHOP ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE. Bangkok, 1994. Proceeding. American Concrete Institute. p. 177-192 (SP-159-12).

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

SARKAR, S. L. **Roles of silica fume, slag and fly ash in the development of high-performance concrete microstructure.** In: Malhotra, v. m. (ed). international conference on the use of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 5<sup>rd</sup>. Milwaukee, 1995. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 1995, 2 v., v. 1 (SP-149).

SATO, N., AGOPYAN, V., QUARCIONI, V. **Durability of portland cement concrete and blast-furnace slag cement concrete.** In: Gjorv, O., Sakai, K., Banthia, N. (eds.) In: International conference on concrete under severe conditions, 2<sup>nd</sup>, Tromso, 1998. Proceedings. Suffolk: E & F N Spon, 1998, 3 v., v. 3, p. 2065-2073.

SAVASTANO, H; AGOPYAN, V. **Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites.** Cement and Concrete Composites. V. 21, p.49 – 57, 1999.

SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade do concreto a ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica.** 1994. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SWAMY, N. **Design for durability and strength through the use of fly ash and slag concrete.** In: Malhotra, V. M. (ed.) CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, 3<sup>rd</sup>, Auckland, 1997. **Proceedings.** Detroit: American Concrete Institute, 1997, p. 1-72 (SP-171).

SWAMY, R. N. & DARWISH, A. A. **Effectiveness of mineral admixtures and curing regimes on air permeability of concrete.** In: MALHOTRA, V. M. (ed). INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 4<sup>th</sup>, Sydney, 1997. Proceedings. American Concrete Institute, 2 v., v. 1, p. 207-230 (SP 170).

TÜRKMEN, I.; GAVGALI, M.; GÜL, R. **Influence of mineral admixtures on the mechanical properties and corrosion of steel embedded in high strength concrete.** Materials Letters. v. 57, p. 2037-2043, 2003.

VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

YUASA, N., KASAI, Y., MATSUI, I. **Inhomogeneous distribution of compressive strength from surface layer of concrete structures.** In: V. M. Malhotra (ed). 5<sup>th</sup> International Conference on Durability of concrete. Barcelona, 2000. Proceedings. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2000. 2v., v.2, p. 269-281 (SP-192).