

**UFSM**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NA CAMADA DE  
COBRIMENTO DO CONCRETO COM ALTOS TEORES DE CINZA  
VOLANTE**

---

**BIANCA PEREIRA MOREIRA**

**PPGEC**

**SANTA MARIA, RS, BRASIL**

**2004**

**ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NA CAMADA DE  
COBRIMENTO DO CONCRETO COM ALTOS TEORES DE CINZA  
VOLANTE**

---

por

**BIANCA PEREIRA MOREIRA**

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

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

**PPGEC**

**SANTA MARIA, RS, BRASIL**

**2004**

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

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

**ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NA CAMADA DE  
COBRIMENTO DO CONCRETO COM ALTOS TEORES DE CINZA  
VOLANTE**

elaborada por

**BIANCA PEREIRA MOREIRA**

como requisito parcial para obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia (Orientador) – UFSM/RS

---

Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini – UFSM/RS

---

Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães – FURG/RS

Santa Maria, 22 de dezembro de 2004

*Aos meus avós, pais e  
esposo.*

*“A vida não é um corredor reto e tranqüilo que nós percorremos livres e sem empecilhos, mas um labirinto de passagens, pelas quais nós devemos procurar nosso caminho, perdidos e confusos, de vez em quando presos em um beco sem saída. Porém, se tivermos fé, uma porta sempre será aberta para nós, não talvez aquela sobre a qual nós mesmos nunca pensamos, mas aquela que definitivamente se revelará boa para nós.”*

*(Fragmento retirado do livro  
“Quem mexeu no meu queijo?” de Spencer Johnson, M.D.)*

## AGRADECIMENTOS

Como de costume, reserva-se um espaço para que as pessoas em fase de conclusão de seus trabalhos possam lembrar todas aquelas outras pessoas que as circundam e, que de alguma maneira contribuíram para que o objetivo fosse alcançado.

No meu caso não poderia ser diferente. Meu trabalho não seria completo se eu não pudesse falar das pessoas que estiveram junto comigo nesta caminhada, como é o caso de meu orientador Geraldo Isaia que, utilizou sua experiência e sabedoria para enaltecer este estudo.

Outro, e não menos importante para o desenvolvimento dessa dissertação, foi o Professor Antônio Gastaldini que soube utilizar a co-orientação me dando subsídios para que pudesse buscar as respostas para minhas perguntas.

Devo, também, citar meus amigos Rodrigo, Simone e Elinor que, junto com os bolsistas da graduação foram meus parceiros no desenvolvimento do projeto de pesquisa que originou esta dissertação.

Além destes, houveram pessoas como o Emerson, o Alceu e demais funcionários do Laboratório de Materiais para Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria que contribuíram com seu apoio sempre que precisei.

Não poderia negligenciar o amigo e professor André Guimarães que contribuiu com seu incentivo.

Por fim, devo agradecer aos meus familiares que, como em todos os momentos importantes de minha vida estiveram juntos. Como é o caso de meus avós que com seu imenso e inesgotável amor, me deram forças para continuar, meu esposo, que não sabe dizer “*não*” quando o assunto é lutar por nossos interesses comuns e meus pais que foram o alicerce dessa construção, que são o alicerce de minha vida e, que serão, sempre, o alicerce de minha personalidade e caráter.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUÇÃO.....	1
<b>CAPÍTULO I – DURABILIDADE DA CAMADA DE COBRIMENTO DO</b>	
<b>CONCRETO.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 CAMADA DE COBRIMENTO.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 ADIÇÕES MINERAIS.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 CINZA VOLANTE.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4 CAL HIDRATADA.....</b>	<b>17</b>
<b>1.5 PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....</b>	<b>19</b>
<b>1.6 POTENCIAL DE ALCALINIDADE – pH.....</b>	<b>21</b>
<b>1.7 RELAÇÃO <math>Cl^-/OH^-</math>.....</b>	<b>22</b>
<b>1.8 COMPOSIÇÃO IÔNICA DA SOLUÇÃO DOS POROS.....</b>	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO II – CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO POR</b>	
<b>INFLUÊNCIA DE ÍONS CLORETO E pH.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 CORROSÃO LOCALIZADA.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2 CORROSÃO GENERALIZADA.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3 FATORES ACCELERANTES DA CORROSÃO.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL.....</b>	<b>32</b>
<b>2.5 INÍCIO DA CORROSÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6 TRANSPORTE DE FLUIDOS NO CONCRETO.....</b>	<b>35</b>
<b>2.7 FORMAÇÃO DA PILHA DE CORROSÃO.....</b>	<b>37</b>
<b>2.8 EFEITOS DA CORROSÃO.....</b>	<b>40</b>

<b>CAPÍTULO III – ESTUDO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2 PARTE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>50</b>
3.2.1 Variáveis Estudadas.....	50
3.2.2 Concreto Fresco.....	54
3.2.3 Concreto Endurecido.....	58
<b>CAPÍTULO IV – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>4.2 ESTRUTURA DOS POROS.....</b>	<b>69</b>
<b>4.3 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....</b>	<b>71</b>
<b>4.4 PENETRAÇÃO DE CLORETOS X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....</b>	<b>79</b>
<b>4.5 PENETRAÇÃO DE CLORETOS X DIMENSÃO DOS POROS.....</b>	<b>81</b>
<b>4.6 TEOR DE CLORETOS TOTAIS RETIDOS.....</b>	<b>85</b>
<b>4.7 TEOR DE CLORETOS X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....</b>	<b>90</b>
<b>4.8 TEOR DE CLORETOS X DIMENSÃO DOS POROS.....</b>	<b>91</b>
<b>4.9 TEOR DE CLORETOS X PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....</b>	<b>93</b>
<b>4.10 RELAÇÃO <math>Cl^-/OH^-</math>.....</b>	<b>95</b>
<b>4.11 RELAÇÃO <math>Cl^-/OH^-</math> X PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....</b>	<b>98</b>
<b>4.12 RELAÇÃO <math>Cl^-/OH^-</math> X TEOR DE CLORETOS.....</b>	<b>99</b>
<b>4.13 ÍONS PRESENTES NA SOLUÇÃO DOS POROS DO CONCRETO.....</b>	<b>100</b>
<b>4.14 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA ESPECÍFICA.....</b>	<b>105</b>
<b>4.15 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA X DIMENSÃO DOS POROS.....</b>	<b>109</b>
<b>4.16 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA X PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....</b>	<b>113</b>
<b>4.17 INTEGRAÇÃO DAS VARIÁVEIS.....</b>	<b>114</b>
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES.....</b>	<b>118</b>
<b>5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>125</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Corrosão das armaduras – tipos e fatores.....	27
Figura 2.2: Vida útil tendo por base o fenômeno da corrosão das armaduras em estruturas de concreto.....	33
Figura 2.3: Esquematização do processo de corrosão do aço no concreto .....	35
Figura 2.4: Transporte de massa no concreto.....	37
Figura 2.5: Formação da Pilha de Corrosão.....	39
Figura 2.6: Modelo de danos em estruturas de concreto armado expostas à água do mar ou a sais de degelo .....	40
Figura 3.1: Formas para a moldagem dos protótipos.....	56
Figura 3.2: Protótipos no período de cura – 7 dias.....	57
Figura 3.3: Protótipos em espera sob condições ambientais.....	58
Figura 3.4: Extração dos testemunhos.....	59
Figura 3.5: Esquema de extração de testemunhos.....	60
Figura 3.6: Corte dos testemunhos.....	61
Figura 3.7: Testemunhos preparados para o corte.....	61
Figura 3.8: Esquema de corte dos testemunhos - Camada 1.....	61
Figura 3.9: Esquema de corte dos testemunhos - Camada 2.....	62
Figura 3.10: Esquema de corte dos testemunhos - Camada 3.....	62
Figura 3.11: Células para o ensaio de penetração de cloretos.....	63
Figura 3.12: Fonte.....	63
Figura 3.13: Multímetro.....	63
Figura 3.14: Ensaio acelerado de penetração de cloretos.....	64
Figura 3.15: Testemunhos para a coleta de amostras pulverizadas.....	65
Figura 3.16: Armazenagem do material pulverizado.....	65

Figura 4.1: Resistência à compressão aos 28 e 91 dias.....	68
Figura 4.2: Distribuição das dimensões dos poros aos 91 dias.....	71
Figura 4.3: Permeabilidade a Cloretos aos 91 dias.....	72
Figura 4.4: Permeabilidade relativa a íons cloreto, aos 91 dias.....	75
Figura 4.5: Penetração de Cloretos na Camada 1.....	75
Figura 4.6: Penetração de cloretos na Camada 1 em porcentagem.....	76
Figura 4.7: Penetração de Cloretos na Camada 2.....	77
Figura 4.8: Penetração de cloretos na Camada 2 em porcentagem.....	77
Figura 4.9: Penetração de Cloretos na Camada 3.....	78
Figura 4.10: Penetração de cloretos na Camada 3 em porcentagem.....	78
Figura 4.11: Resistência à compressão X Penetração de íons cloreto....	79
Figura 4.12: Penetração de cloretos X Diâmetro crítico.....	82
Figura 4.13: Penetração de cloretos X Mesoporos + Macroporos.....	82
Figura 4.14: Penetração de cloretos X Poros do gel.....	83
Figura 4.15: Penetração de cloretos X Mesoporos.....	84
Figura 4.16: Penetração de cloretos X Macroporos.....	84
Figura 4.17: Teor de cloretos totais no concreto.....	87
Figura 4.18: Teor de cloretos totais após o ensaio de penetração de cloretos nos traços de baixa relação a/mc, nas camadas 1, 2 e 3.....	87
Figura 4.19: Teor de cloretos totais após o ensaio de penetração de cloretos nos traços de alta relação a/mc, nas camadas 1, 2 e 3.....	88
Figura 4.20: Teor de cloretos totais nos traços de referência.....	89
Figura 4.21: Teor de cloretos totais nos traços com substituição de 50% de cimento Portland por cinza volante.....	89
Figura 4.22: Teor de cloretos totais nos traços com cimento Portland, cinza volante e com adição de 20% de cal hidratada.....	89
Figura 4.23: Teor de cloretos retidos X Resistência à compressão.....	91
Figura 4.24: Teor de cloretos retidos X Diâmetro crítico.....	92
Figura 4.25: Teor de cloretos retidos X Mesoporos + Macroporos.....	93

Figura 4.26: Teor de cloretos retidos X Poros do gel.....	93
Figura 4.27: Teor de cloretos retidos X Penetração de cloretos.....	94
Figura 4.28: Relação iônica após o ensaio de penetração de cloretos.....	96
Figura 4.29: Relação $Cl^-/OH^-$ X Penetração de cloretos.....	98
Figura 4.30: Relação $Cl^-/OH^-$ – total X Teor de cloretos totais retidos.....	99
Figura 4.31: Concentrações de sódio.....	101
Figura 4.32: Concentrações de potássio.....	102
Figura 4.33: Concentrações de Cálcio.....	102
Figura 4.34: Concentrações de enxofre.....	103
Figura 4.35: Concentrações de hidroxila.....	104
Figura 4.36: Condutividade elétrica específica.....	106
Figura 4.37: Condutividade elétrica específica – $a/mc = 0,40$ .....	107
Figura 4.38: Condutividade elétrica específica – $a/mc = 0,75$ .....	107
Figura 4.39: Condutividade elétrica específica – relativa.....	108
Figura 4.40: Condutividade elétrica X Diâmetro crítico.....	110
Figura 4.41: Condutividade elétrica X Mesoporos + Macroporos.....	110
Figura 4.42: Condutividade elétrica X Poros do gel.....	111
Figura 4.43: Condutividade elétrica X Mesoporos.....	112
Figura 4.44: Condutividade elétrica X Macroporos.....	112
Figura 4.45: Condutividade elétrica X Penetração de cloretos.....	113
Figura 4.46: Comportamento das variáveis no traço R 75.....	115
Figura 4.47: Comportamento das variáveis no traço CV 75.....	115
Figura 4.48: Comportamento das variáveis no traço CV 75 c.....	116
Figura 4.49: Comportamento das variáveis no traço R 40.....	116
Figura 4.50: Comportamento das variáveis no traço CV 40.....	117
Figura 4.51: Comportamento das variáveis no traço CV 40 c.....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características físicas do cimento.....	44
Tabela 3.2: Características químicas do cimento.....	45
Tabela 3.3: Características físicas da cinza volante.....	46
Tabela 3.4: Características químicas da cinza volante.....	46
Tabela 3.5: Características físicas da cal hidratada.....	47
Tabela 3.6: Características químicas da cal hidratada.....	47
Tabela 3.7: Granulometria da Areia Média.....	48
Tabela 3.8: Características físicas da areia média.....	48
Tabela 3.9: Granulometria da brita 1.....	49
Tabela 3.10: Características físicas da brita1.....	49
Tabela 3.11: Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita a 25°C.....	53
Tabela 3.12: Quantidade de materiais por m <sup>3</sup> de concreto.....	54
Tabela 4.1: Resultados da resistência à compressão aos 28 dias.....	67
Tabela 4.2: Distribuição das dimensões dos poros por intrusão de mercúrio aos 91 dias.....	70
Tabela 4.3: Penetração de cloretos aos 91 dias.....	72
Tabela 4.4: Penetrabilidade a íons cloreto baseado na carga passante - Tabela 1 da ASTM C 1202/97.....	73
Tabela 4.5: Teor de cloretos percentuais retidos no concreto por camadas.....	86
Tabela 4.6: Relação Iônica após o ensaio de penetração de cloretos.....	95
Tabela 4.7: Teores de concentração no concreto.....	100
Tabela 4.8: Condutividade Elétrica.....	105
Tabela 4.9: Integração dos resultados.....	114

## **RESUMO**

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

### **ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NA CAMADA DE COBRIMENTO DO CONCRETO COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE**

Autora: ***BIANCA PEREIRA MOREIRA***

Orientador: **PROF. DR. GERALDO CECHELLA ISAIA**

Data e Local da Defesa: **SANTA MARIA, 22 DE DEZEMBRO DE 2004.**

O efeito parede entre a forma e o concreto aumenta a relação água/aglomerante nesta interface de modo que a durabilidade da peça estrutural fica na dependência das características desta camada que se estende desde a superfície contra a forma até a armadura. Para diminuir os poros desta camada pozolanas têm sido utilizadas para aumentar a impermeabilidade e diminuir o fluxo de fluidos entre o ambiente e o interior do concreto.

Esta investigação apresenta resultados sobre o estudo da camada de cobrimento de protótipos (vigas) para aproximar os resultados de laboratório aos de uma construção real, moldadas em formas de madeira e curadas em cura úmida durante 7 dias simultaneamente com corpos de prova moldados. Foram ensaiadas misturas com cimento Portland (referência) e com a sua substituição, em massa, por 50% de cinza volante, com e sem adição de cal hidratada. Esta última foi usada para aumentar a reserva alcalina. Foram extraídos testemunhos seccionados a cada 2,5 cm de distância da camada de cobrimento, da superfície até 5 cm de profundidade, e coletadas amostras pulverizadas, com perfuratrizes rotativas apropriadas, em profundidades idênticas às anteriores. Foram analisados as variáveis: resistência à compressão, penetração de cloretos (ASTM C 1202/97), cloretos totais solúveis em ácido, relação  $Cl^-/OH^-$  e condutividade elétrica específica.

Os resultados evidenciam que a penetração de cloretos, avaliada pela carga passante em Coulombs, no concreto de referência cresce a partir da superfície para o interior das peças, nas profundidades de 2,5 e 5,0 cm. Enquanto que nos traços com cinza volante, com e sem cal, a carga passante é menor do que nos concretos de referência quando comparada as camadas correspondentes de cada traço, demonstrando o efeito benéfico que esta pozolana oferece em termos de proteção contra o ingresso de cloretos e de outras substâncias agressivas, protegendo com maior eficiência a armadura contra a corrosão.

## **ABSTRACT**

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

### **CHLORIDE PENETRATION STUDY IN THE COVERCRETE OF HIGH CONTENT FLY ASH CONCRETE**

Author: ***BIANCA PEREIRA MOREIRA***  
Coordinator: **PROF. DR. GERALDO CECHELLA ISAIA**  
**SANTA MARIA, 22 DE DEZEMBRO DE 2004.**

The wall effect between the form and the concrete increases the water/cement relation in this interface so that the structural durability piece is in the dependence of the characteristics of this layer that extends from the surface against the form until the reinforcement. To reduce the pores of this layer, supplementary cementing materials have been used to increase the impermeability and decrease the fluids flow between the environment and the interior concrete interior.

This investigation presents results on the study of the covercrete prototypes layer (beam) to approach the laboratory test to the one of a real construction, moulded in wooden forms and cured in humid cure for 7 days simultaneously with cast specimens. Portland cement (reference) and with its substitution, in mass, for 50% fly ash, with and without addition of lime were tested. This calcium hydroxide was used to increase the alkaline reserve. The proprieties studied were tested at each 2,5cm of distance of the covercrete, from surface up to 5cm depth, also collected powdered samples, with appropriate rotative drilling machines, in identical depths to the previous ones. The analyzed variables were: compression strength, chloride-ion penetration (ASTM C 1202/97), total chloride-ion in acid,  $Cl^-/OH^-$  ratio and specific electric conductivity.

The results highlight that the chloride-ion penetration appraised by charge passed in Coulombs in the reference concrete increases from the surface to the depths 2,5 and 5,0 cm. While for the fly ash mixture with or without lime the charge passed is smaller than reference concrete when compared to the corresponding layers each mixture, showing the beneficial effect this supplementary cementing materials offer in terms of protection against chloride-ion penetration and other aggressive substances, protecting the reinforcement more efficiently against corrosion.

## INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é um material largamente utilizado na engenharia de construções devido a sua versatilidade. É, também, o repositório que possui maior potencialidade de incorporar adições minerais, com a correspondente diminuição de consumo de clínquer, devido ao fato dessas adições serem de origem sílico – aluminosa, mineralogicamente amorfas, e reagirem com água, podendo, desta forma, ser incorporadas a derivados de cimento Portland. Quanto maior é o teor de adições no concreto, maiores serão os benefícios sociais obtidos.

A viabilidade do emprego de altas quantidades de pozolanas em concreto estrutural utilizando uma tecnologia adequada permitirá fazer com que a cinza volante, resíduo poluidor, com grande ocorrência no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, em vez de causar um desequilíbrio ao meio ambiente, seja utilizada em outras finalidades, como por exemplo: substituição de parte do cimento em estruturas de concreto.

Um forte argumento para incentivar o uso da cinza volante, subproduto da geração de energia em usinas termelétricas, é sua disponibilidade, principalmente na região sul do Brasil, onde são pouco utilizadas atualmente, apesar do Rio grande do Sul ser o estado possuidor de cerca de 90% das reservas de carvão mineral do país.

O assunto desenvolvido nesta dissertação envolve questões de sustentabilidade (construções com menor impacto ambiental e de custo relativamente baixo), ecoeficiência (materiais ou produtos competitivos no mercado de baixo impacto ambiental), poluição ambiental (redução do consumo energético e da emissão de poluentes para atmosfera na produção do cimento, reduzindo o efeito estufa), economia (diminuição do consumo de cimento) e durabilidade das construções; temas estes, que preocupam a comunidade científica e a população em geral. Outro aspecto a ser considerado nesta pesquisa é o fato dos produtores de cimento, produtores de concreto e construtores, no intuito de preservar e

conservar o meio ambiente terem, procurado nos dias de hoje, aumentar o desempenho técnico e potencializar os ganhos econômicos e ecológicos através da introdução de teores crescentes de adições minerais em concreto estrutural, haja vista que, muitas vezes, os subprodutos industriais, que poderiam ser utilizados na construção civil, são lançados sem qualquer controle na superfície do solo.

A constituição da microestrutura do concreto estrutural revela que este é um material composto de três fases: agregado; pasta; interface pasta/agregado. Sua durabilidade e mecanismos de transporte de fluidos, em especial a porosidade e a conectividade dos poros, dependem principalmente da pasta e da interface pasta/agregado. Os poros capilares são os responsáveis pela permeação de fluidos através da estrutura porosa, na maioria das vezes, e as vias de acesso ou de saída da água necessária para realizar o equilíbrio higrométrico com o meio ambiente.

A substituição, no concreto, de parte do cimento por adições minerais, especialmente as pozolanas, além de possibilitar a diminuição de custos, atuam na microestrutura da pasta e na interface pasta/agregado através da formação de compostos hidratados secundários, os quais, por efeito químico, refinam os poros e o tamanho dos grãos, e, ainda, por efeito físico na obstrução e densificação das partículas finas. Dessa forma a microestrutura se torna mais fina e homogênea, aumentando a compacidade, a resistência e a durabilidade da pasta cimentícia. Da mesma maneira que as adições minerais reduzem a conectividade dos poros da pasta, também atuam na microestrutura da zona de cobrimento da armadura, densificando-a e tornando-a mais compacta e menos permeável.

No concreto fresco as adições minerais modificam a reologia, diminuem a exsudação e melhoram a trabalhabilidade. No concreto endurecido, ocasionam uma progressão mais lenta das resistências mecânicas iniciais, proporcionam uma menor permeabilidade e maior



suscetibilidade a carbonatação devido ao consumo do hidróxido de cálcio. Estas situações são válidas quando comparados concretos equivalentes com e sem adições minerais.

A estrutura de poros da pasta é o principal sistema de penetração de agentes agressivos no concreto. Sendo assim, o ataque de certas substâncias agressivas ao concreto armado pode levar à corrosão da armadura. Uma destas substâncias é o íon cloreto, que ao atingir a armadura, provoca sua despassivação e desencadeia o processo de corrosão com danos nefastos às estruturas de concreto armado (HELENE, 1993).

Os cloretos são prejudiciais ao concreto quando encontrado em teores ao redor de 0,4% em relação à massa de cimento, isso pode advir do uso inadequado de aditivos à base de cloreto, empregados na dosagem do concreto, ou pelo contato das estruturas de concreto armado com águas poluídas ou água do mar (HELENE, 1993).

Em decorrência da observação à possibilidade de degradação do concreto exposto a um ambiente agressivo, é necessário formar uma nova cultura no meio técnico, onde a preocupação com a durabilidade deve superar a expectativa da resistência mecânica satisfatória.

A camada de cobrimento da armadura constitui uma microestrutura diferenciada do restante da pasta cimentícia e, esta porção de concreto em estruturas reais apresenta características de desempenho diferentes dos corpos de prova moldados em laboratório. A introdução de adições minerais no concreto torna a microestrutura mais densa e menos permeável, dificultando o transporte de substâncias agressivas através dos canais capilares. Logo, a relevância do tema da pesquisa em pauta se fundamenta nos tópicos anteriores, quais sejam: a) estudo do comportamento da durabilidade do cobrimento de concreto de testemunhos extraídos de protótipos moldados e curados em laboratório em condições mais próximas possíveis das condições ambientais das estruturas convencionais; b) pesquisa de traços de concreto com altos

teores de adições minerais, em especial cinza volante, que é uma pozolanas encontrada com abundância no Rio Grande do Sul.

A camada de cobrimento da armadura é a porção da peça de concreto que deve ter maior estabilidade dimensional, maior resistência e compacidade para possibilitar maior proteção ao aço e durabilidade à estrutura.

Desta forma, constata-se existir uma divergência de constituição e de necessidades entre a microestrutura da superfície e aquela do interior de uma peça de concreto, ocasionando, assim, a ocorrência de grande número de patologias em estruturas, especialmente em ambientes agressivos, pois o concreto que deveria ser o escudo protetor da armadura (armadura: material sensível à degradação – corrosão), apresenta maior debilidade na zona de cobertura do aço, ou seja, na zona mais porosa e mais suscetível à fissuração.

Esta pesquisa é parte integrante de um estudo composto pelo desenvolvimento de quatro dissertações com o propósito de analisar o comportamento da camada de cobrimento de estruturas de concreto com elevados teores de cinza volante em substituição ao cimento frente à durabilidade e a microestrutura. Devido ao fato de a substituição de parte do cimento por adições minerais apresentar um concreto com carência de reserva alcalina foram, também, estudados traços de concretos equivalentes, porém, com adição de cal hidratada ao traço.

A adição de cal hidratada diminui a porosidade total, formando uma estrutura mais densa, acelerando a hidratação dos compostos cimentantes e proporcionando acréscimos de resistência à compressão. Os efeitos da cal, quando adicionada ao concreto, são de ordem química, pois produz carboaluminatos e de ordem física, porque sua finura tem papel de filler (HEIKAL, 2000).

Este trabalho teve por objetivo genérico a seguinte questão: qual o comportamento da camada de cobrimento de concretos com altos teores

de cinza volante, sem e com adição de cal hidratada, frente à penetração de íons cloreto?

Visa-se, assim, difundir a utilização, em altos teores, de cinza volante prevendo o comportamento dos concretos sujeitos a ação de íons cloreto, com o intuito de obter estruturas duráveis com reduzido consumo de cimento e elevado consumo de resíduos industriais, ou seja, estruturas ecoeficientes.

Com o desenvolvimento desta pesquisa foi possível estudar as diferenças que existem entre as propriedades do concreto da camada superficial e do interior das peças estruturais, especialmente as variações destas propriedades a partir da superfície em direção à armadura. Foram avaliadas as profundidades a partir da superfície do concreto, até 50 mm de espessura.

Com fins de aproximar da melhor forma possível o estudo de laboratório das estruturas de concreto in situ, os ensaios foram realizados tanto em corpos de prova moldados quanto em testemunhos extraídos de protótipos curados em condições ambientais que melhor representaram as construções reais. Quando se realiza pesquisa em laboratório em corpos de prova moldados, as porosidades da pasta e da interface são levadas em conta nesses estudos, concomitantemente, ao se medir ou determinar as variáveis ligadas à microestrutura ou durabilidade. Entretanto, este método de abordagem não está em completa sintonia com o concreto de uma estrutura real porque os diversos elementos que compõem o arcabouço de uma construção apresentam volume, forma e dimensões distintas, especialmente devido às diferenças entre a interface fôrma/concreto e o concreto do interior da peça.

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, subdivididos em pesquisa bibliográfica, variáveis estudadas, métodos adotados, resultados e conclusões.

O capítulo I se refere à parte da pesquisa bibliográfica e aborda o tema da constituição do concreto utilizado na construção de peças

estruturais, propriedades da camada de cobrimento, microestrutura e adições minerais.

O capítulo II, que também trata da pesquisa bibliográfica, apresenta a influência da constituição do concreto frente a sua durabilidade quando exposto a situações agressivas, principalmente a cloretos.

O terceiro capítulo trata das variáveis determinantes estudadas para caracterizar a durabilidade da camada de cobrimento de estruturas de concretos de cimento Portland, concretos de cimento Portland e cinza volante com e sem adição de cal hidratada. Os métodos empregados para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como, a caracterização dos materiais utilizados e os traços adotados para a confecção das peças de concreto encontram-se, neste capítulo.

No capítulo IV são apresentados os resultados encontrados a partir da realização dos ensaios pertinentes, necessários para determinar as variáveis descritas no capítulo anterior. Baseado nos resultados apresentados o capítulo trata, também, da avaliação destes dados.

Para finalizar, na conclusão, foram tratadas as questões elaboradas para o desenvolvimento desta dissertação, quanto à durabilidade da camada de cobrimento do concreto com altos teores de pozolanas frente ao ataque de cloretos.

## **CAPÍTULO I**

### **DURABILIDADE DA CAMADA DE COBRIMENTO DO CONCRETO**

O concreto é um material poroso composto de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual encontram-se partículas de agregados. O cimento Portland consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, que após a hidratação, tornam-se os principais responsáveis pela característica adesiva, e apresentam-se estáveis em meios aquosos. (METHA et al., 1994).

Após a reação desencadeada pela combinação do cimento com água formando uma pasta, surgem quatro fases sólidas presentes no meio ligante, que são: silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratado; e a presença de água nas formas de: água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada (METHA et al., 1994).

Além do meio ligante e dos agregados existe uma terceira fase, a zona de transição, que pode ser considerada como a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta (NEVILLE, 1997). A estrutura e propriedades da zona de transição do concreto embora seja constituída dos mesmos elementos que a pasta, privilegia seu estudo como uma fase distinta da estrutura do concreto (METHA et al., 1994; NEVILLE, 1997).

A zona de transição apresenta uma resistência mais fraca nas idades iniciais, uma vez que o volume e tamanho de vazios serão maiores do que na matriz de argamassa e, com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou superior a da matriz de argamassa. Reações químicas entre os componentes da pasta de cimento e o agregado contribuem para resistência tendendo a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição, resultante da cristalização nos vazios da zona de transição a partir dessas reações,

formando silicatos de cálcio hidratado no caso de agregados silicosos, ou carboaluminatos hidratados em caso de calcário. Outro fator responsável pela baixa resistência da zona de transição é o aparecimento de microfissuras, mesmo antes de qualquer carregamento. Dessa forma a resistência limite no concreto é a zona de transição, que também é a parte mais vulnerável e devido à sua presença, o concreto em questão rompe a um nível de tensão bem inferior a resistência dos dois constituintes principais – pasta e agregado (METHA et al., 1994).

As partículas de agregado não têm influência direta sobre a resistência do concreto, exceto o uso de agregados altamente porosos e fracos. A resistência pode ser afetada de modo indireto pelo tamanho e forma dos grãos. Também é possível observar alguns tipos de vazios, que podem afetar a resistência negativamente a impermeabilidade (METHA et al., 1994).

O concreto é um material de baixa resistência à tração, por isso nos projetos estruturais incorporam-se vergalhões de aço que constituem a armadura. O concreto armado muitas vezes é referido como um material resultante do feliz casamento do aço com o concreto. Essa harmoniosa relação deve-se a três qualidades básicas: ausência de corrosão da armadura quando bem dosado e executado, coeficiente de dilatação térmica de mesma ordem de grandeza e forte ligação por aderência entre o aço e o concreto.

A popularidade do concreto entre profissionais da construção civil levam-no a ser o material mais usado na engenharia, sendo considerado o material mais barato e facilmente disponível no canteiro de obras devido a três razões: a primeira é que o concreto possui excelente resistência à água, quando presente em estruturas destinadas ao seu controle, estocagem e transporte, ao contrário do aço e da madeira, que apresentam deterioração; a segunda é a durabilidade do concreto quando exposto a ambientes agressivos e; a terceira, é devida a facilidade com

que elementos estruturais de concreto podem ser executados numa variedade de formas e tamanhos (METHA et al., 1994).

## **1.1 CAMADA DE COBRIMENTO**

O conhecimento da distribuição dos tamanhos dos poros no concreto e a sua variação ao longo do tempo e no espaço são importantes para a durabilidade de uma estrutura de concreto. A camada próxima à fôrma influencia na distribuição de partículas sólidas e de água, permanecendo com mistura mais rica em cimento, embora com menor teor de compostos hidratados devido à maior porosidade e menor teor de umidade.

As diferenças entre o interior e o exterior das estruturas de concreto dependem, principalmente, do tempo em que o concreto permanece em cura úmida com as superfícies cobertas pelas fôrmas e do período adicional de cura úmida quando as faces das peças estão sujeitas às condições ambientais.

A microestrutura da camada externa é diferente do concreto do interior devido ao efeito parede, sedimentação, segregação, método de compactação e os processos de evaporação e absorção de água em ambos os sentidos. É através desta porção que as espécies agressivas penetram no concreto. Por esse motivo, o cobrimento da armadura desempenha missão fundamental para a durabilidade e vida útil das estruturas.

A percolação de fluidos a partir da superfície do concreto depende não só da porosidade como também da constituição físico – química das superfícies de contato fluido/sólido. O cobrimento de concreto compacto e pouco permeável mantém os elementos agressivos afastados do aço por meio de uma proteção mecânica. A proteção química advém da

formação de uma camada alcalina sobre a armadura, denominada passivação, já que o hidróxido de cálcio, que representa mais ou menos 25% do volume da pasta de cimento Portland comum com pH igual a 12,6, produz com a ferrugem inicial do aço uma película passivante de ferrato de cálcio que inativa a superfície do aço contra a dissolução anódica do ferro.

A proteção das armaduras está diretamente relacionada com a qualidade do concreto e a espessura do revestimento. O princípio da corrosão da armadura somente ocorrerá com a despassivação do aço, ou seja, quando houver diminuição do pH na solução aquosa da pasta de, em média, 12,6 para um valor inferior a 11,5, considerando-se neste caso a carbonatação. Assim como a carbonatação, o ingresso de cloretos através da camada de revestimento até a armadura depende de vários fatores ligados à qualidade do concreto da zona superficial.

A camada de revestimento da armadura é o fator mais crítico que preserva a estabilidade eletroquímica do aço em concretos contaminados por cloretos. A espessura da camada de revestimento deveria ser determinada de acordo com as condições ambientais ou, melhor, deveria ser estabelecida estritamente para garantir proteção do aço em todos os casos.

Para AITCIN (2000), a relação água/aglomerante baixa, um bom lançamento e boa cura são alguns fatores necessários para proteger as estruturas de concreto armado contra a corrosão do aço das armaduras. O concreto de relação água/aglomerante em torno de 0,30 e 0,35 pode ser considerado impermeável o bastante para oferecer adequada proteção contra a corrosão do aço usual, desde que a espessura do revestimento de concreto e a cura sejam adequadas.

GUIMARÃES (1999), pesquisou as camadas externas e internas em cubos de concreto moldados de 15x15x15 cm e observou que: a) as camadas externas nas laterais e no fundo apresentaram melhor desempenho frente a resistência a penetração de cloretos e



carbonatação, independente da relação água/cimento e “slump test” adotados; b) a resistência a penetração de cloretos no topo demonstrou grande variação e; c) o interior das peças de concreto apresentou uma maior suscetibilidade ao ataque de agentes agressores.

## **1.2 ADIÇÕES MINERAIS**

Toda atividade humana resulta em alguma degradação ambiental. O desafio é minimizar esta degradação a níveis compatíveis com o desenvolvimento sustentável, ou seja, a integração do ambiente, economia e considerações sociais sobre quando e como o desenvolvimento deverá ser procedido. Para a Engenharia Civil, o conceito de desenvolvimento sustentável envolve o uso de materiais de alta performance produzidos a custos aceitáveis e com o menor impacto ambiental possível. Reduzir o impacto ambiental significa, também, reduzir a emissão de gases prejudiciais ao efeito estufa e o desperdício de materiais.

A produção de cimento Portland libera grandes quantidades de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Este gás é o maior contribuinte para as conseqüências do efeito estufa e o aquecimento global do planeta. O uso eficiente dos recursos minerais é a utilização de materiais reciclados e a substituição de grandes proporções de cimento por outros materiais cimentícios, conhecidos, também, por adições minerais.

Quando empregadas em conjunto ao cimento na execução de obras de concreto, as adições minerais podem promover mudanças nas propriedades dos concretos tais como a minimização da reação expansiva álcali-agregado, diminuição da permeabilidade, diminuição do calor de hidratação, diminuição da retração por secagem, aumento da resistência

aos sulfatos, aumento da resistência mecânica à compressão a idades mais avançada e melhor proteção da armadura.

A pozolana, como é conhecida a adição mineral, é um material silicoso ou sílico – aluminoso, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, porém quando finamente moída e na presença de umidade, em temperatura ambiente, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio para formar compostos cimentantes (METHA et al., 1994; NEVILLE, 1997).

A maioria das adições minerais tem alguma forma de sílica vítrea reativa que na presença de água em temperatura ambiente pode se combinar com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário (AİTCIN, 2000).

Segundo ALVES (2000), por se tratar de um material extremamente fino, as pozolanas quando utilizadas no concreto proporcionam um efeito físico através do tamponamento dos poros, diminuindo o volume de vazios e efeito químico pela produção de C-S-H, através das reações pozolânicas. Em consequência disso, as pozolanas contribuem para uma menor porosidade, que permite ganhos de resistência mecânica e proporciona um concreto com baixa permeabilidade, garantindo proteção da estrutura frente a agentes agressivos que podem provocar a deterioração do concreto.

Particularmente a resistência à compressão das pastas de cimento depende de alguns fatores, dentre os quais pode ser destacada a finura do cimento, a qualidade do clínquer, a relação água/cimento influenciando na porosidade capilar, as condições de cura, o teor e a qualidade das adições – escórias ou pozolanas. A quantidade das adições minerais empregadas nos traços de concreto pode ser estabelecida de acordo com critérios descritos por HELENE e TERZIAN (1992).

O emprego de adições minerais além de alterar a microestrutura da pasta e reduzir a permeabilidade do concreto, reforça a zona de transição, haja vista que as fissuras nessa região são muito pequenas, mas têm

largura maior que as cavidades capilares, podendo aumentar a permeabilidade do sistema (METHA et al., 1994).

As adições minerais de elevada finura e atividade pozolânicas aumentam a resistência à compressão do concreto. As partículas finas preenchem as interfaces da pasta, refinando os poros, reduzindo o coeficiente de absorção do concreto. As adições cujas partículas são grossas podem causar diminuição da resistência à compressão (TASDEMIR, 2003).

Nos concretos com pozolanas a cura afeta a resistência à compressão mais diretamente que nos concretos de cimento Portland. Para que um concreto com adições minerais desempenhe um mesmo nível de resistência do concreto de cimento Portland é necessário um período maior de cura com água, haja vista que o ganho de resistência nos concreto com pozolanas continuam apresentado crescimento além dos 90 dias da concretagem enquanto nos traços de cimento Portland o ganho de resistência é pequeno a partir dos 90 dias (WANG et al., 2003).

As pozolanas podem ser naturais ou artificiais. As naturais são materiais de origem vulcânica ou de origem sedimentar. Já as artificiais são materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica, conforme a NBR 5736-91. Também, segundo a norma brasileira, a produção de cimento admite em sua composição a substituição de 15 a 50% do cimento Portland por pozolanas.

A sílica ativa, a escória de alto-forno, a cinza volante e a cinza de casca de arroz são as adições minerais mais utilizadas. A cinza volante com baixos teores de cálcio, a cinza de casca de arroz e a sílica ativa são chamadas de pozolanas, enquanto a escória de alto-forno e a cinza volante com altos teores de cálcio são chamadas de materiais cimentícios, pois geram compostos hidratados de cálcio no concreto apesar de participarem das reações pozolânicas.

### 1.3 CINZA VOLANTE

A cinza volante é constituída de partículas esféricas muito finas, em sua grande maioria têm diâmetro entre 1 e 100  $\mu\text{m}$  e área específica – Blaine, normalmente entre 250 e 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Por apresentar grande área específica a cinza volante está prontamente disponível para a reação com o hidróxido de cálcio (NEVILLE, 1997).

Normalmente, as cinzas são oriundas da combustão do carvão mineral, e assim denominados por cinzas volantes. São resíduos sólidos obtidos principalmente em usinas termoelétricas e suas partículas finas e esféricas são retidas por precipitadores eletrostáticos ou mecânicos e armazenadas em silos apropriados, sendo constituídas essencialmente de sílica, alumina e óxidos de ferro. Assim, cuidados especiais devem ser tomados com diferentes cinzas volantes, já que suas características físicas são muito variáveis e dependem da composição e grau de pulverização do carvão, da qualidade e do tipo de equipamento empregado na combustão, bem como do modo de coleta das cinzas (VAGHETTI, 1999). Suas principais variações são o teor do vidro, o teor do carvão, o tamanho das partículas, a presença de óxidos de magnésio e outros minerais, podendo ser a distribuição do tamanho dos grãos melhorada por meio de classificação e moagem (NEVILLE, 1997).

A cinza volante é a pozolana mais utilizada no concreto por causa da sua boa reatividade com o cimento e grande disponibilidade, especialmente no Rio Grande do Sul (estado que detém a maior quantidade de jazidas de carvão com boas características de qualidade no Brasil).

A introdução de cinza volante nos traços de concreto diminui a porosidade do sistema, reduzindo a permeabilidade a cloretos, em relação a concretos cujos traços sejam, somente, de cimento Portland. O uso destas cinzas permite reduzir a relação água/aglomerantes dos concretos para que seja obtida uma mesma trabalhabilidade. Porém, de acordo com

ISAIA (1995), altos teores de substituição de cimento Portland por cinza volante reduzem a absorção de água no concreto, mas podem reduzir em até 20% sua resistência à compressão em idades iniciais.

Com a substituição de cimento por cinza volante a trabalhabilidade do concreto aumenta com o aumento do percentual de substituição, devido à ação esférica das partículas, enquanto que o "*slump test*" diminui. Também com o aumento do percentual de substituição o tempo de endurecimento do concreto é maior do que para concretos somente de cimento Portland. Assim como a resistência inicial também sofre diminuição com a adição de cinza volante nos traços de concreto (SIDDIQUE, 2003).

Uma das vantagens da utilização da cinza volante é o baixo desprendimento de calor nas reações de hidratação do cimento que inicialmente ficam um pouco retardadas, fazendo com que os acréscimos na resistência à compressão sejam em longo prazo, em idades superiores aos 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 o aumento do pH na solução dos poros, ocorre a precipitação de C-S-H sobre as partículas de cinza volante, resultando no refinamento dos poros e dos grãos desta.

A ação da cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland frente à proteção contra a corrosão das armaduras proporciona, dessa forma: incremento das reações de hidratação do cimento e das reações pozolânicas; maior precipitação de produtos hidratados, bloqueando os poros com maior intensidade e proporcionando diminuição de suas dimensões e; diminuição da quantidade de cálcio disponível (ISAIA, 1995).

Para elevados teores de substituição do cimento por cinza volante o consumo de hidróxido de cálcio não atinge níveis tais que reduza o pH a valores que possam afetar a armadura, haja vista que a alcalinidade é mais dependente dos teores de hidróxido de sódio e potássio

provenientes do cimento do que do hidróxido de cálcio liberado das reações de hidratação (ISAIA, 1995).

A incorporação de cinza volante nos traços de concreto causa a segmentação dos poros maiores e aumenta a quantidade de locais de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação da pasta cimentícia, acelerando as reações e formando cristais menores de hidróxido de cálcio (ISAIA et al., 2000). As partículas de cinza volante que não foram completamente hidratadas tornam-se aptas para bloquear os vazios, aumentando a densidade da pasta.

A cinza volante propicia maior quantidade de produtos hidratados no concreto e, conseqüentemente, maior consumo de hidróxido de cálcio, decorrentes de atividade pozolânica (ISAIA et al., 2000). Esse consumo provoca o decréscimo da reserva alcalina, que para altos teores de substituição, favorecem a carbonatação do cobrimento e para compensar este efeito prejudicial a durabilidade das estruturas de concreto pode-se adicionar cal hidratada, em teores adequados, para obter-se um concreto com melhorias diante da durabilidade e que apresente teor remanescente de hidróxido de cálcio compatível com a vida útil estipulada para a estrutura.

CERVO (2001), salienta os efeitos benéficos das adições minerais nas propriedades do concreto, haja vista que o comportamento das mesmas está fundamentado principalmente na finura, composição mineralógica, história térmica e teor de substituição frente ao cimento.

O concreto composto por cimento Portland e cinza volante é um exemplo de material de construção em harmonia com o conceito de desenvolvimento sustentável, pois a emissão de CO<sub>2</sub> é reduzida, diminuindo o impacto ambiental e ainda apresenta a utilização racional de materiais reaproveitáveis.

O excelente desempenho da cinza volante recomenda sua utilização na produção de concretos expostos a agentes agressivos, onde a baixa permeabilidade e a baixa absorção capilar são fundamentais para

a durabilidade dos mesmos. Quanto maior o teor de cinza volante no concreto menor a quantidade de água absorvida nos concretos com relação a/mc elevada (FRIZZO, 2001).

Em um estudo de placas de concreto de cimento Portland (controle) e concretos com cinza volante, armados com barras de aço reforçados, expostos a uma solução de 4% de cloreto de cálcio a partir de vigésimo oitavo dia de concretagem até oito anos, MALHOTRA (2000) observou que em comparação com o traço de controle, os traços com cinza volante apresentaram ,melhor desempenho contra a corrosão e baixas variações dos teores de cloretos contidos ao longo do interir das placas avaliadas.

#### **1.4 CAL HIDRATADA**

Devido as reações entre o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$  – produto da hidratação do cimento) e a sílica amorfa (presente nas adições minerais) formando o C-S-H com menor densidade do que o formado na hidratação do cimento é dado o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto. Quando se utilizam adições minerais em substituição de parte do cimento ocorrem alterações no comportamento mecânico e na durabilidade do concreto, principalmente se cal hidratada é adicionada ao traço de concreto. Esse comportamento diferenciado é oriundo das características físico – químicas e mineralógicas das adições.

A cal hidratada é adicionada ao concreto com o objetivo de repor o hidróxido de cálcio consumido pelas reações pozolânicas. Em concretos com elevados teores de adições minerais a cal hidratada proporciona maiores valores de resistência à compressão devido ao efeito físico onde a finura do material funciona como filler e ao efeito químico onde as reações com a fase aluminato forma carboaluminatos, tornando a estrutura mais densa e diminuindo a porosidade (HEIKAL, 2000).

A cal hidratada, encontrada comercialmente na forma de um pó seco, com 24% a 27% de água combinada, quando cálcica ou hidratada sob pressão. Além de ser um aglomerante aéreo, apresenta elevada alcalinidade, com elevado teor de óxido de cálcio, possibilitando o seu emprego em concretos com altos teores de substituição de cimento por adições minerais. Ao reter água, diminui a disponibilidade desta para a hidratação do cimento, resultando em uma microestrutura mais compacta, com partículas anidras de cimento que, com a liberação progressiva da água, retida pela cal, ao longo do tempo, propiciará uma cura interna do concreto, hidratando as partículas anidras e conseqüentemente densificando o gel, sem que haja retração excessiva do concreto.

Além de restabelecer total ou parcialmente o teor de hidróxido de cálcio remanescente, a adição da cal hidratada no concreto atribui vantagens significativas frente aos parâmetros de durabilidade investigados, propiciando acréscimos de resistência à compressão quando comparados aos concretos correlatos sem o emprego da cal. Em concretos com altos teores de adições minerais conjugado com a cal hidratada os custos são minimizados e resíduos reutilizados, prolongando a vida útil das estruturas (HOPPE, 2002).

O emprego de cal hidratada elimina os efeitos colaterais advindos das reações pozolânicas, repondo a reserva de hidróxido de cálcio, embora um controle da relação água/aglomerantes faça-se necessário, juntamente com o maior consumo de aditivo superplastificante. Nos concretos com adições minerais, utilizando-se a mesma quantidade de água de amassamento, a adição da cal hidratada acarreta acréscimos de resistência à compressão frente aos concretos sem a reposição do hidróxido de cálcio (HOPPE, 2002).

A absorção capilar de água nos concretos com elevados teores de adições minerais utilizando cal hidratada apresenta coeficientes significativamente inferiores aos encontrados para concretos similares sem esta adição, devido à obstrução dos poros e ao refinamento da rede



capilar, dificultando a percolação de fluidos. Para o concreto com cinza volante, a adição da cal resultou em decréscimo médio de 298% no coeficiente de absorção capilar, tendo como parâmetro os valores médios do concreto de cimento Portland (HOPPE, 2002).

Nas mistura com elevados teores de cinza volante, a adição de cal hidratada resulta num aumento da penetração de cloretos, quando comparados a mesma mistura sem adição. Apesar deste acréscimo, os valores encontrados são inferiores aos obtidos para os traços de cimento Portland sem adições (DALRI, 2002).

## **1.5 PENETRAÇÃO DE CLORETOS**

A resistência à compressão e a relação  $a/mc$  são normalmente empregadas para descrever a qualidade do concreto. Porém, identificações e avaliações de outras propriedades do concreto devem ser consideradas caso as estruturas estejam expostas a ambientes marinhos, como por exemplo, a avaliação da permeabilidade a cloretos. No concreto armado, a corrosão induzida por cloretos é a maior causa da deterioração prematura e degradação das estruturas (WEE et al., 2000).

A penetração de cloretos é influenciada por variáveis presentes no concreto, que são a relação  $a/mc$ , idade, temperatura de cura, interação do tipo de cimento com a idade e interação do tipo de cimento com a temperatura. Para um mesmo material cimentício, quanto maior a relação  $a/mc$  maior é a penetração de cloretos (PEREIRA e DAL MOLIN, 2002).

A maresia, a água do mar ou o uso de sais de degelo são as principais causas externas da penetração de cloretos no concreto. Todavia, os cloretos podem estar incorporados em decorrência da utilização de aditivos aceleradores de pega ou de materiais contaminados.

Em estruturas existentes, os cloretos dissolvidos presentes no ambiente podem penetrar no concreto através dos mecanismos clássicos de penetração de água e transporte de íons. Na forma sólida, podem estar depositados na superfície do concreto e permanecer até que a chuva os dissolva e os transporte para o interior da estrutura por absorção capilar, difusão, permeabilidade ou migração de íons por ação de um campo elétrico (HELENE, 1993).

O ingresso prolongado e repetido de cloretos inicia-se na superfície movendo-se para o interior, podendo resultar em altas concentrações junto à superfície do aço com o passar do tempo. A corrosão das armaduras inseridas nas estruturas de concreto depende do teor de cloretos, da permeabilidade e da umidade (NEVILLE, 1997). Este ingresso pode ser reduzido quando a porosidade da pasta diminui ou quando a tortuosidade do sistema de poros aumenta, verificando que a composição e a estrutura da pasta podem influenciar na penetração de cloretos (JENSEN et al., 1998).

Segundo LIMA e HELENE (2001), o volume de pasta por m<sup>3</sup> de concreto tem elevada influência no comportamento da penetração de cloretos. Quanto maior o volume de pasta, maior a porosidade resultante. Assim sendo, é bem provável que a pasta apresente maior grau de conectividade entre os vazios presentes. No entanto, quanto mais fino o agregado miúdo menor será a penetração de cloretos no concreto, pois este se torna mais compacto, menos poroso e menos vulnerável a penetração de água (GRIGOLI et al., 2001).

De acordo com HELENE (1993), as adições minerais justificam a menor penetração de cloretos no concreto devido à modificação da estrutura dos poros. ISAIA (1995) e CERVO (2001), verificaram que a penetração de cloretos é reduzida quando adições minerais são introduzidas nos traços de concreto, reduzindo, conseqüentemente o teor de cloretos retidos.

Os íons cloreto presentes no amassamento do concreto podem se combinar com as fases alumínio – ferríticas formando principalmente cloroaluminatos, que ficam incorporados às fases sólidas do cimento hidratado, podendo ainda, ficarem dissolvidos na fase aquosa dos poros. Os cloretos combinados podem voltar à dissolução por efeito de processos como a carbonatação (ANDRADE, 1992).

Fatores associados ao risco de corrosão da armadura metálica, ligados a presença de umidade e oxigênio no ambiente e fatores relativos à vulnerabilidade do concreto, sejam pela porosidade propiciada na etapa da construção ou pela inserção em meio que favoreça a absorção de sais de cloreto, influem na deterioração do concreto pela presença desse sal.

## **1.6 POTENCIAL DE ALCALINIDADE – pH**

O pH da água intersticial do concreto varia de 12 a 13, o que confere ao concreto um caráter básico, gerando um meio adequado para as reações de passivação, ou seja, resistência à corrosão proporcionada por uma fina película de um filme de óxido estável e aderente à superfície do aço.

A alcalinidade do concreto deriva das reações de hidratação dos silicatos de cálcio, principais compostos do cimento, que libertam certa porcentagem de hidróxido de cálcio, podendo o  $\text{Ca(OH)}_2$  atingir até 25% da massa de cimento do traço de concreto.

O nível de pH da solução aquosa dos poros é um dos fatores que exerce uma influência significativa na durabilidade do concreto, podendo alterar a microestrutura e modificar a composição química das pastas de cimento hidratado que envolve o aço, formando uma camada protetora (DELAGRAVE et al., 1996). Esta camada, garantida pela presença de um pH alto da solução dos poros da pasta, proporciona uma proteção

completa contra a corrosão com o oxigênio e com a água, impedindo a formação de hidróxidos de ferro.

Através da ação de agentes agressivos, como por exemplo, os íons cloreto, o gás carbônico ou sulfatos pode acontecer a decomposição da camada protetora pela reação destes agentes com o C-H existente na interface da armadura e a conseqüente diminuição do pH da solução dos poros para valores inferiores a 11 (NEVILLE, 1997). A porosidade total e a profundidade de descalcificação aumentam com essa diminuição do nível de pH.

As misturas com pozolanas estudadas por CERVO (2001), com relação à alcalinidade, apresentaram pH superior a 11, garantindo a basicidade necessária para a proteção das armaduras.

Em concretos com superfície exposta a uma solução de cloreto de sódio o pH tende a diminuir podendo gerar expansão anisotrópicas, promovendo, deste modo, tensões de ruptura no cobrimento de concreto, que é menos expansível (BÉRUBÉ et al., 2003).

## **1.7 RELAÇÃO $Cl^-/OH^-$**

De acordo com NEVILLE (1997), para um dado teor de íons cloreto, quanto maior a quantidade de hidroxila ( $OH^-$ ), maior a quantidade de cloretos livres. Por este motivo, considera-se que a relação  $Cl^-/OH^-$  influencia na evolução da corrosão.

O risco de corrosão das armaduras aumenta com o aumento da relação  $Cl^-/OH^-$  presente na solução dos poros, sendo a relação crítica proposta por THOMAS (1996) de 0,6.

A relação  $Cl^-/OH^-$  depende da alcalinidade da solução dos poros, sendo que essa relação diminui com o aumento da alcalinidade. Essa

relação é, também, o mais seguro indicativo de corrosão, principalmente quando concretos com diferentes tipos e quantidades de adições minerais são comparados.

ISAIA (1995) observou que para concretos com altos teores de substituição de cimento por pozolanas, as relações  $Cl^-/OH^-$  encontradas foram inferiores as do concreto de referência, propiciando melhores condições de proteção das armaduras em ambientes com presença de cloretos. Para CERVO (2001), o aumento no teor de substituição de cimento Portland por pozolanas resultou no aumento da relação  $Cl^-/OH^-$ , porém, os valores encontrados para essas misturas também foram inferiores aos dos traços de referência.

## **1.8 COMPOSIÇÃO IÔNICA DA SOLUÇÃO DOS POROS**

Os poros do concreto são ocupados pela fase aquosa que contém concentrações de componentes iônicos, tais como:  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $K^+$ ,  $OH^-$ , e  $SO_4^{--}$ . O efeito da cinza volante na composição da solução dos poros depende do teor de álcalis da cinza, podendo aumentar ou diminuir as concentrações de  $Na^+$  e  $K^+$ , e diminuindo, normalmente, as concentrações de  $Ca^{++}$  e  $OH^-$  (SHI, 1998).

Em concretos com adição de pozolanas a concentração de íons  $OH^-$  na solução dos poros geralmente é considerada baixa, podendo diminuir a capacidade de difusão de cloretos nestes tipos de concreto. Assim, a difusão, também, pode ser influenciada pelo tipo de cimento e pelo tipo e teor da adição pozolânica.

A resistividade do concreto aumenta com o tempo de cura e com a diminuição da relação  $a/mc$  (AMPADU et al., 1999). Com o aumento do

teor de substituição das adições minerais aumenta a resistividade do concreto.

Segundo HANSON et al. (1998), o aumento da concentração iônica da solução dos poros aumenta a condutividade, diminuindo a resistividade elétrica. A composição da solução aquosa dos poros em contato com a armadura, juntamente com a estrutura da pasta são os principais responsáveis pela corrosão.

Os hidróxidos alcalinos de cálcio, de sódio e de potássio, geradores de hidroxilas, são os compostos decisivos para assegurar o nível básico da solução aquosa dos poros do concreto, necessários a passivação do aço, enquanto a presença dos cloretos contribui para a despassivação. A adição de cal hidratada gera um aumento no teor de cálcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) ocasionando um aumento na condutividade elétrica do concreto.

De acordo com os estudos de DALRI (2002) as misturas com adições minerais apresentam menores valores de condutividade do que as misturas de referência, devido à diminuição no teor de álcalis na solução dos poros e às modificações na estrutura de poros. Porém, com a adição de cal hidratada ocorreu aumento na condutividade elétrica do concreto, chegando a três vezes maior a encontrada para a mistura com cinza volante.

CERVO (2001) observou que as adições minerais proporcionam uma redução na condutividade elétrica do concreto em comparação a mistura de referência com cimento Portland, haja vista ter ocorrido diminuição nas quantidades de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ , e  $\text{SO}_4^{2-}$  da solução dos poros dos traços com pozolanas em comparação com o concreto de referência, apesar do pH ter permanecido superior a 12,8.

Em concretos com superfície exposta a uma solução de NaCl as concentrações de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  da solução dos poros próximo a camada externa tende a aumentar enquanto o pH diminui, não alterando a

composição química da solução dos poros desses concretos em uma profundidade maior que 60 ou 80 mm (BÉRUBÉ et al., 2003).

## **CAPÍTULO II**

### **CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO POR INFLUÊNCIA DE ÍONS CLORETO E PH**

Os danos causados pela corrosão das armaduras inseridas no concreto podem ocorrer devido à camada de cobrimento insuficiente ou inadequada. Os concretos que apresentam uma considerável porosidade e fissuração são propícios ao ingresso de dióxido de carbono, que resulta na carbonatação do concreto, ao ingresso de íons cloretos, que em quantidades relevantes conduz a destruição da camada protetora de passivação do aço, e ao ingresso de sulfatos, oxigênio e água. A ação destes agressores ao concreto está relacionada com as características da pasta, controle de execução da estrutura e espessura do cobrimento da armadura.

Em estruturas de concreto que a camada de cobrimento é espessa suficiente e impermeável observa-se a aderência entre a pasta e o aço e a proteção da armadura devido a camada passivadora. Nos concretos imersos totalmente em água, exceto quando o ar é incorporado à água, como quando existe a ação de ondas das águas do mar, ou concretos totalmente secos, não existem processos de corrosão na armadura do concreto (SATO, 1998).

Para os agentes externos agressores chegarem até as armaduras há uma dependência dos mecanismos de transporte de fluidos e gases, da presença de fissuras e da porosidade do concreto. Quando ocorre uma falta de qualidade da camada de cobertura a estrutura dos poros pode ser considerada um dos fatores que mais facilitam a corrosão, pois é determinante na permeabilidade do concreto, o que permite o ingresso de água, oxigênio, CO<sub>2</sub> e íons cloreto.

O processo corrosivo será desencadeado se existir um eletrólito, uma diferença de potencial de eletrodo e presença de oxigênio. A



corrosão também pode ocorrer devido ao dióxido de carbono que leva a carbonatação do concreto ou ao ingresso de cloretos que em elevados teores destrói a camada protetora do aço (HELENE, 1993).

A resistência à corrosão proporcionada por um filme de óxido estável e aderente na superfície do metal é conhecida por camada de passivação (HELENE, 1993). A passivação na superfície do aço é formada logo após o início da hidratação do cimento e enquanto estiver firmemente aderida ao aço, este permanece intacto (NEVILLE, 1997). A remoção da capa passivante do aço pode ser desencadeada pela presença de uma quantidade suficiente de cloretos, adicionada durante o amassamento do concreto ou penetrada do exterior ou, ainda, por íons despassivantes em contato com a armadura provocando a diminuição da alcalinidade do concreto por reação com substâncias ácidas do meio (ANDRADE, 1992).

Os fenômenos de corrosão geralmente não se apresentam em concretos sãos e de boa qualidade. Normalmente, estão associados a concretos de baixa qualidade ou com presença de íons promotores de ataque no aço. Uma corrosão provocada pelos íons despassivantes é dita do tipo localizada, enquanto que uma corrosão tipo generalizada é ocasionada pela redução do pH (Figura 2.1), permitindo a dissolução da capa passivante (ANDRADE, 1992).

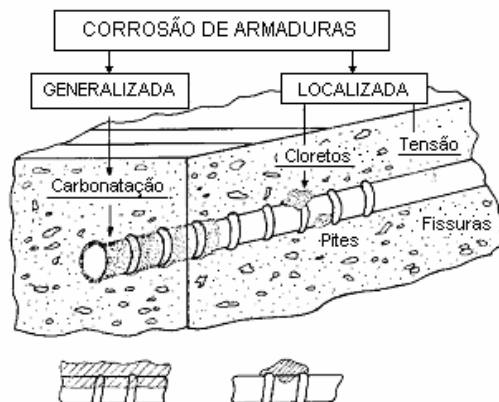


Figura 2.1: Corrosão das armaduras – tipos e fatores (ANDRADE, 1992)

## 2.1 CORROSÃO LOCALIZADA

Deve existir uma concentração mínima de cloretos junto a superfície do aço para que se inicie a corrosão (NEVILLE, 1997). Sendo assim, existe uma quantidade de cloreto que deve estar disponível para que a corrosão inicie, porém seu prosseguimento depende da resistividade da pasta. Os íons cloretos têm a propriedade de destruir de forma pontual a capa passivante, provocando uma corrosão localizada. Esta corrosão proporciona a formação de micro-crateras que são o ânodo da pilha de corrosão, podendo chegar a produzir a ruptura pontual das barras, dado ao fato que progredem em profundidade (ANDRADE, 1992).

Apenas os cloretos livres é que possibilitam a reação agressiva ao aço, sendo seu teor inter-relacionado com a quantidade de cloretos incorporados aos produtos de hidratação e adsorvidos nos poros de gel. A concentração de íons cloreto também é função de outros íons presentes no concreto.

A quantidade de cloretos varia com o tempo, podendo atacar toda a superfície da armadura e provocar velocidades de corrosão muito intensas e perigosas. Nos concretos em que os cloretos não são adicionados inicialmente a seus componentes, estes podem chegar até a armadura através da rede de poros, penetrando desde o exterior, principalmente se a estrutura estiver em ambientes marinhos ou se são adicionados à superfície quando se utilizam sais de degelo em estradas ou pontes, em climas frios, ou ainda, em atmosferas industriais (ANDRADE, 1992; HELENE, 1993).

Em estruturas com elevada concentração de cloretos, secas ou saturadas, a corrosão pode não ocorrer, pois existe a falta de água ou de oxigênio para dar início a reação de corrosão. De acordo com PRUDÊNCIO (1993) os cloretos não atacam o concreto propriamente dito, mas, ao penetrarem no material por difusão e/ou capilaridade, em presença de oxigênio e umidade, podem atingir a armadura iniciando um

processo de corrosão eletroquímica. Concretos esses localizados em ambientes industriais ou próximos do mar.

Porém, em estruturas onde ocorrem situações de molhagem e secagem, pode existir a presença e posterior penetração de sais, dentre os quais pode ser citado o cloreto de sódio (NaCl), agravando os problemas de corrosão. Os ciclos de molhagem e secagem podem facilitar a cristalização do sal no interior do concreto, onde as pressões de expansão pode alcançar até 60 MPa, uma pressão suficiente para romper o concreto (HELENE, 1993). A velocidade de molhagem está associada a fenômenos de sucção capilar, podendo ser relativamente superior à velocidade de secagem do concreto, a qual é dependente do sol, do vento ou da tensão saturante de vapor do ambiente externo (HELENE, 1993).

## **2.2 CORROSÃO GENERALIZADA**

O nível de pH das soluções agressivas é outro fator que exerce uma influência significativa na deterioração do concreto, podendo alterar a microestrutura e modificar a composição química da pasta. Para valores de pH inferiores a 12 a capa passivada do aço dos concretos pode ser destruída favorecendo os processos de corrosão.

Com a redução da alcalinidade do concreto, também conhecido por carbonatação, podendo ser devido a uma lixiviação por circulação de águas puras ou ligeiramente ácidas ou por reação dos compostos de caráter básico da fase aquosa do concreto com os componentes ácidos da atmosfera resultando em carbonatos-sulfatos e água, a corrosão generalizada é ocasionada. O agente muito comum de ataque é o CO<sub>2</sub>. Uma característica da carbonatação é a existência de uma frente de avanço do processo que separa com pH muito diferente, uma com pH maior que treze e outra com pH menor que oito (ANDRADE, 1992).

Quando a capa passivante perde sua função protetora na armadura do concreto e a umidade permanece no interior desse, o aço tende a se corroer de forma generalizada, tal como se estivesse exposto à atmosfera sem nenhuma proteção (ANDRADE, 1992).

## 2.3 FATORES ACELERANTES DA CORROSÃO

Em contato com o ar atmosférico e a umidade as armaduras de aço, do interior das peças de concreto armado, tendem a retornar a seu estado original, em virtude da corrosão química ou eletroquímica dos materiais metálicos (AMPADU, 1999).

Uma vez iniciada a despassivação do aço e a corrosão, para uma presença suficiente de oxigênio e água, ou ambiente com umidade relativa do ar de no mínimo 60%, a velocidade da deterioração, em termos de vida útil, pode ser considerada significativa.

Os fatores que fixam a cinética do processo de corrosão de armaduras são a oferta de eletrólito (hidróxido de cálcio + água) que por sua vez fixa a disponibilidade de oxigênio nas proximidades da armadura e a resistividade do concreto, ou ainda:

- **Temperatura**, pois sua diminuição pode dar lugar a condensações, que por sua vez podem produzir tensões localizadas onde existe umidade e seu aumento favorece o crescimento da velocidade de corrosão e a mobilidade dos íons (ANDRADE, 1992);
- **Macropares galvânicos**, ou seja, as pilhas de corrosão que podem ser geradas entre duas áreas distantes, no máximo alguns decímetros, onde uma delas está corroída e atua de ânodo e a outra se mantém passiva atuando como cátodo (ANDRADE, 1992);
- **Teor de umidade**, haja vista que, quando os poros estão saturados fazendo com que a pilha de corrosão tenha seu

desenvolvimento facilitado, o oxigênio terá primeiro que se dissolver na água para poder alcançar a armadura, tornando o processo controlado pelo acesso de oxigênio, e as velocidades de corrosão podem ser muito baixas, como é o caso das estruturas submersas em água do mar, ainda que a resistividade seja a menor possível; quando os poros contém pouquíssima umidade, resistividade é muito elevada e o processo de corrosão fica muito dificultado, ainda que o concreto se mostre carbonatado e contaminado de cloretos, a velocidade de corrosão será baixa; as velocidades de corrosão máximas só se dão em concretos com teores de umidade altos, porém sem saturar os poros, facilitando a chegada de oxigênio até a armadura e a resistividade é suficientemente baixa, permitindo elevadas velocidades de corrosão (ANDRADE, 1992);

- **Proporção de cloretos**, quando ocorre um aumento na velocidade de corrosão muitas vezes existe incremento na proporção de íons cloreto (ANDRADE, 1992); em média é aceito um teor de cloretos até 0,4% em relação à massa de concreto ou 0,05 a 0,1% em relação à massa de cimento; para a NBR 6118, o máximo teor de cloretos aceitável é de 500mg/l em relação à água de amassamento; de acordo com NEVILE (1997), na América do Norte o teor de cloretos no concreto armado é fixado em 0,15% da massa de cimento.

As estruturas mais sujeitas à corrosão, normalmente encontram-se em ambientes pouco ventilados e úmidos, com presença de bolor ou fungos que contribuem para o aumento da carbonatação e redução do pH do concreto de cobertura (HELENE, 1993).

## 2.4 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

De acordo com o Comitê 201 do American Concrete Institute (ACI), a durabilidade do concreto é definida como sendo a capacidade de resistir à ação de intempéries, ataques químicos, abrasão ou outro processo de deterioração qualquer.

A durabilidade das estruturas de concreto armado é o resultado da dupla proteção que o concreto exerce sobre o aço. A primeira por parte do revestimento de concreto, que é uma barreira física, e a segunda, pela elevada alcalinidade do concreto que desenvolve sobre o aço uma camada passiva que o mantém inalterado por um tempo definido. Além de apresentar características mecânicas muito amplas, o concreto armado, tem demonstrado possuir uma durabilidade adequada para a maioria dos usos a que se destina (HELENE, 1993).

Vida útil, geralmente é descrita como sendo o período durante o qual a estrutura conserva todas as mínimas características de resistência, funcionalidade e aspectos externos exigíveis, sem manutenções não previstas (ANDRADE, 1992). O conceito de vida útil das estruturas de concreto conforme a Figura 2.2 (HELENE, 1994) define que a deterioração das estruturas por meio da corrosão das armaduras pode ocorrer em situações distintas, onde se considera que:

a) Vida útil de projeto é o período de utilização de uma dada estrutura antes da despassivação de sua armadura;

b) Vida útil de serviço ou utilização é o período de utilização de uma dada estrutura que antecede o aparecimento de manchas na superfície do concreto, a ocorrência de fissuras na camada de revestimento, ou até mesmo o destacamento do concreto de cobertura;

c) Vida útil última ou total é o período de utilização de uma dada estrutura entre a ruptura e o colapso parcial ou total desta;

d) Vida útil residual, sendo aquela estabelecida a partir de uma vistoria da estrutura, portanto já com um tempo de serviço, e também é

determinada de maneira similar à vida útil de serviço, ou seja, conforme a necessidade da construção.

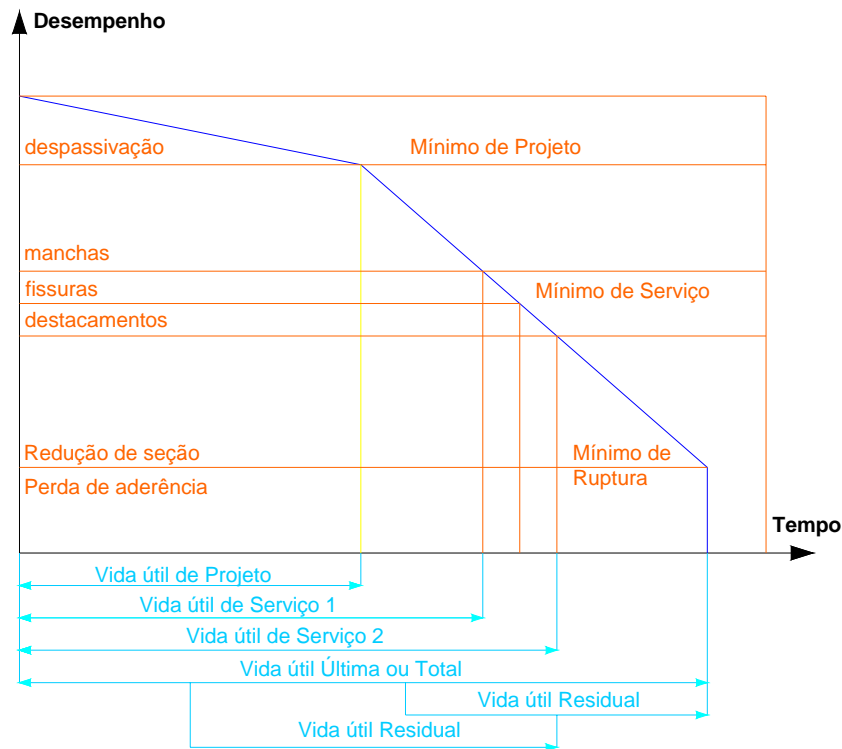


Figura 2.2: Vida útil tendo por base o fenômeno da corrosão das armaduras em estruturas de concreto (HELENE, 1994)

## 2.5 INÍCIO DA CORROSÃO

O tempo que o agente agressivo demora em atravessar o cobrimento, alcançar a armadura e provocar sua despassivação é conhecido por período de iniciação. Podem ser citadas a presença de cloretos e a diminuição da alcalinidade como fatores desencadeantes que atuam durante o período de iniciação.

Embora a penetrabilidade aos cloretos seja controlada diretamente pela relação água/cimento e pelo grau de hidratação, a capacidade de

fixação do cloreto é função do tipo e quantidade de aglomerante. O teor de cloretos livres a partir do qual ocorre o início do processo de corrosão independe do teor de  $C_3A$ , porém, esse influencia no teor de cloretos totais. Todavia, para um teor de cloreto total constante, o teor de cloreto livre depende dos teores de  $C_3A$  e álcalis do cimento, do teor de sulfatos presentes no cimento hidratado e da temperatura de exposição (LIMA e HELENE, 2001).

No modelo de TUUTTI (1980), o tempo que os cloretos demoram até chegar a armadura denominado período de iniciação, dependerá principalmente da concentração de cloretos no meio externo, natureza do cátion que acompanha o íon cloreto, qualidade do concreto (tipo de cimento, proporção de aluminato tricálcico, relação a/mc e outros), temperatura, abertura e quantidade das fissuras (ANDRADE, 1992; HELENE, 1993).

Passado o período de iniciação ocorre o chamado período de propagação, que se refere ao tempo compreendido por uma acumulação progressiva da deterioração, até que seja alcançado um nível inaceitável da mesma. Os fatores acelerantes que interferem na duração do período de propagação, uma vez atingida a armadura, são o conteúdo de umidade e o oxigênio (ANDRADE, 1992).

O somatório dos períodos de iniciação e propagação é denominado vida útil ou tempo antes de reparo, conforme demonstra a Figura 2.3 (ANDRADE, 1992; TUUTTI, 1980). O tempo necessário para que o processo de corrosão, devido à presença de cloretos junto à armadura, seja desencadeado é conhecido, também, como tempo de vida útil de serviço (PRUDÊNCIO, 1993).



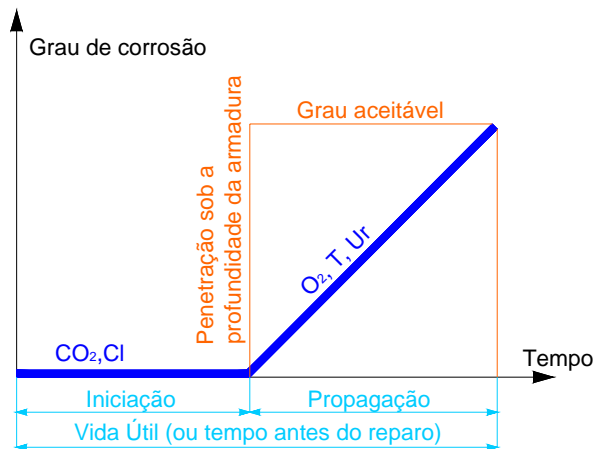


Figura 2.3: Esquematização do processo de corrosão do aço no concreto (TUUTTI, 1980)

## 2.6 TRANSPORTE DE FLUIDOS NO CONCRETO

Os diversos componentes do cimento, quando misturados com a água, se hidratam formando um conglomerado sólido, constituído pelas fases hidratadas do cimento e uma fase aquosa. Esta fase aquosa resulta do excesso de água de amassamento necessária para a mistura adequada de todos os componentes do cimento. O concreto resultante é um sólido compacto e denso, porém poroso com um entremeado de canais e capilares, nem sempre comunicados entre si, que permitem ao concreto apresentar uma certa permeabilidade aos líquidos e aos gases, conhecido por rede de poros. Mesmo que o cobrimento das armaduras seja uma barreira física, esta é permeável em certa medida e permite o acesso de elementos agressivos até o aço (ANDRADE, 1992).

Qualquer concreto com relação  $a/mc$  superior a 0,5 possui microestrutura muito aberta, que oferece largas avenidas para a penetração de agentes agressivos (AITCIN, 2000). As maiores causas da porosidade são o excesso de água de amassamento que após evaporar

gera poros capilares de grande tamanho e o lançamento inadequado que aprisiona ar formando macroporos na estrutura do concreto.

Em função da umidade relativa do ar, os poros do concreto podem dispor de quantidades de água diferenciadas. A difusão de um gás é bastante diferente quando o difusor é a água ou o ar. De acordo com NEVILLE (1997), os gases podem se difundir através de um espaço preenchido com água ou com ar, mas, no caso desse espaço estar preenchido com água, o processo de difusão pode ser de  $10^4$  a  $10^6$  vezes mais lento do que no ar.

Todos os processos que causam deterioração do concreto ou a corrosão da armadura envolvem fenômenos de transporte de fluidos e agentes agressores pelos poros da pasta por absorção, permeabilidade, difusão ou migração.

De acordo com GUIMARÃES e HELENE (2001) o grau de saturação da pasta de cimento é um fator mais decisivo na intensidade de penetração de cloretos do que o teor de umidade, da mesma forma que a interligação dos poros é mais relevante que o teor de vazios. Sendo assim, o grau de saturação deve ser considerado na estimativa da vida útil de uma estrutura de concreto armado sujeita ao ataque de cloretos.

Os mecanismos de transporte ilustrados na Figura 2.4 são facilmente influenciados pelas condições ambientais e pelas condições de produção de concreto, mais especificadamente pelo seu lançamento e cura que são decisivos para a porosidade do concreto.

Os poros e vazios inerentes ao concreto armado são um caminho rápido de penetração dos agentes agressivos até a armadura. A abertura máxima admissível das fissuras na superfície para ambientes não agressivos está situada entre 0,3 e 0,4 mm, e nos ambientes agressivos até 0,1 mm (ANDRADE, 1992).

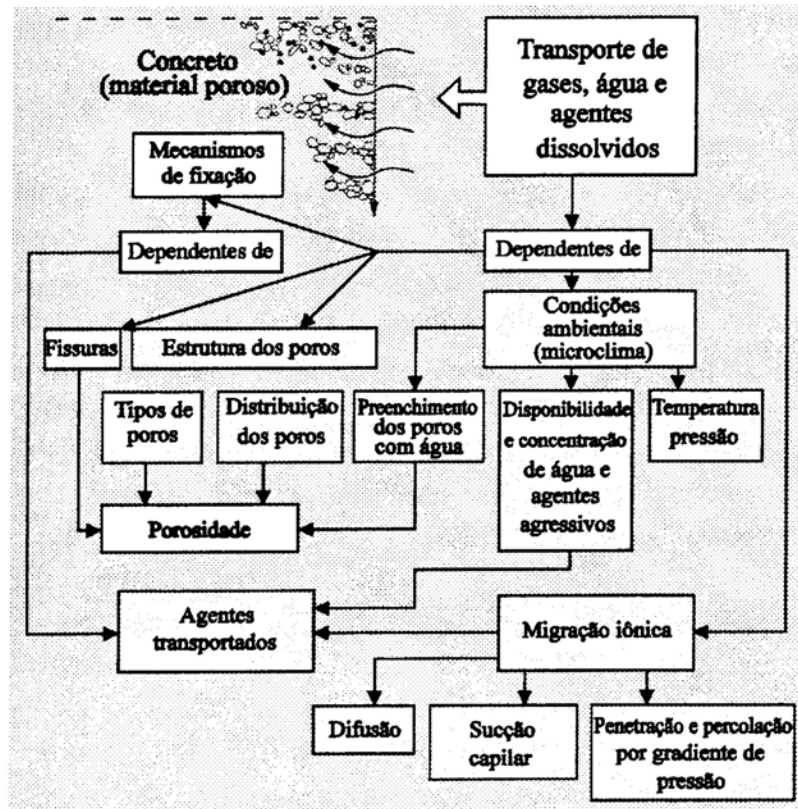


Figura 2.4: Transporte de massa no concreto (CEB 1992 – pág 3, apud ISAIA, 1995)

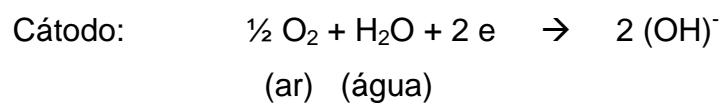
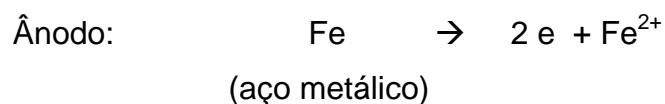
## 2.7 FORMAÇÃO DA PILHA DE CORROSÃO

A corrosão do aço no concreto é um processo eletroquímico, tal que a maioria das reações corrosivas ocorrem em presença de água ou ambiente úmido, onde os pontos de concentração são formados pela diferença de concentração de íons corrosivos dissolvidos na superfície do aço (HELENE, 1993; METHA, 1994). O aço do concreto voltará ao seu estado original de minério, sofrendo corrosão e/ou oxidação caso não possua proteção adequada, através da camada de cobertura.

Devido à existência de uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos do aço no concreto, ocorre a formação de uma célula

eletroquímica, ligada pela solução dos poros da pasta endurecida, que se torna o eletrólito (NEVILLE, 1997). A constituição de uma pilha eletroquímica ocasiona o processo de corrosão. A corrosão através de um metal e do eletrólito entre o ânodo e o cátodo pressupõe o funcionamento de um circuito fechado (Figura 2.5). A pilha não pode funcionar se o circuito é interrompido em algum de seus pontos, e a corrosão se detém (ANDRADE, 1992).

Os íons com carga positiva no ânodo ( $\text{Fe}^{2+}$ ) passam para a solução enquanto os elétrons livres ( $e^-$ ) passam pelo aço para o cátodo, onde, combinando-se com a água e o oxigênio, são absorvidos pelos constituintes do eletrólito formando íons de hidroxila ( $\text{OH}^-$ ). Os íons hidroxila se deslocam pelo eletrólito e combinam-se com íons ferrosos formando ferrugem (hidróxido férrico –  $4\text{Fe}(\text{OH})_3$ ). Desta forma, a corrosão pode evoluir lentamente que a efeitos de vida útil seja desprezível (ANDRADE, 1992; NEVILLE, 1997). Com a formação das células de corrosão, algumas partes do metal tornam-se anódicas e outras partes, catódicas formando as pilhas eletrostáticas, cujas reações químicas fundamentais que ocorrem são:



A reação anódica, envolvendo a ionização do aço metálico, não irá progredir se não for mantido o consumo de elétrons no cátodo e, para isso é necessária a presença simultânea de ar e de água na superfície do cátodo. Porém, quando há concentração suficiente de cloretos na superfície das barras, estes agem como catalisadores para a corrosão. Os íons cloreto atravessam a camada passivada tornando-a cátodo e ativam a superfície do aço formando o ânodo (NEVILLE, 1997). A ferrugem formada pela reação química não consome os íons cloreto, e estes

quando livres permitem que a corrosão progrida rapidamente, destruindo constantemente a camada passivadora, até a corrosão de todo aço do concreto.

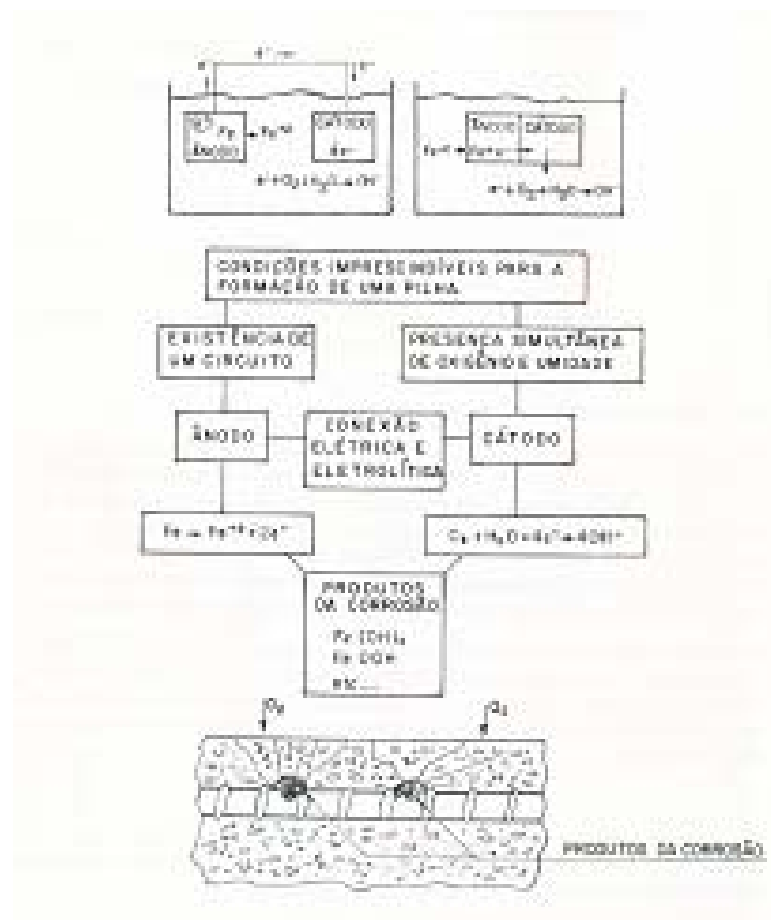


Figura 2.5: Formação da Pilha de Corrosão (ANDRADE, 1992)

Os danos causados no concreto pela corrosão da armadura manifestam-se sob a forma de expansão, fissuração e lascamento do cobrimento, já que a transformação do aço metálico em ferrugem é acompanhada por um aumento no volume, que dependendo do estado de oxidação, pode ser de até 600% do metal original (METHA, 1994). Nas regiões onde o concreto é de qualidade inadequada ou há cobrimento deficiente da armadura, há progresso da corrosão com formação de óxido ou hidróxido de ferro, ocupando volumes entre 3 a 10 vezes maiores do

que o volume inicial da armadura causando, assim, pressões de expansão superiores a 15 MPa (150 kgf/cm<sup>2</sup>) (FORTES, 1995).

## 2.8 EFEITOS DA CORROSÃO

A permeabilidade da camada de cobrimento sob ação de agentes agressivos ou cargas externas favorece a despassivação do aço, resultando na formação de corrosão, como esquematizado por METHA (1994) e apresentado na Figura 2.6, onde, uma vez desencadeado este ingresso a deterioração ocorre em um circuito.

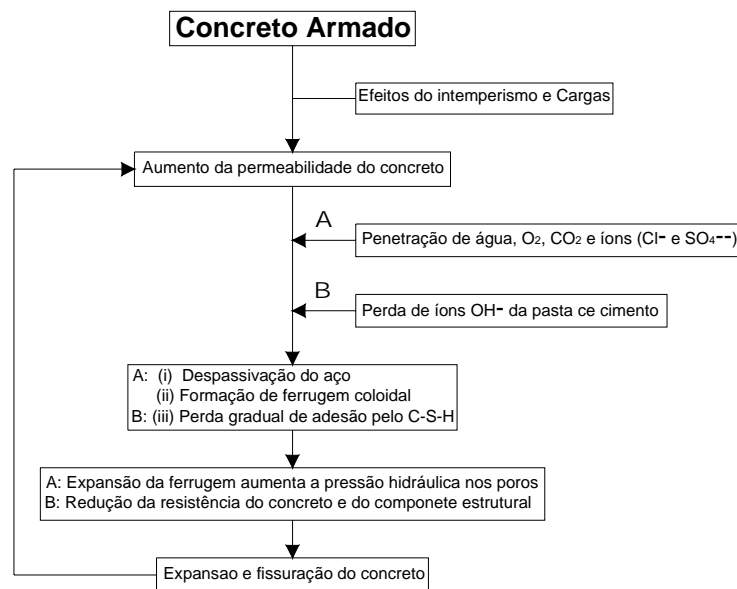


Figura 2.6: Modelo de danos em estruturas de concreto armado expostas à água do mar ou a sais de degelo (METHA, 1994)

Os efeitos da corrosão se manifestam sobre o aço com uma diminuição de sua capacidade mecânica, sobre o concreto quando este se fissa ou, ainda, sobre a aderência entre o aço e o concreto.

A fissuração da camada de cobrimento ocorre longitudinalmente paralela às armaduras corroídas originada pelo fato dos produtos resultantes serem o mais volumosos que o aço original com o aparecimento de tensões radiais que deformam o concreto submetendo-o a tensões de tração. Se o processo não é detido pode destacar todo o cobrimento, deixando a armadura descoberta, ficando seriamente comprometida a comprovação dos estados limites de ancoragem e superposição por transpasse (ANDRADE, 1992).

Se existir circulação de água, proveniente de chuva, por exemplo, aparecem manchas onde emerge a umidade sem coincidir com posição das armaduras. Caso o concreto esteja muito úmido, os produtos da corrosão são gerados a uma velocidade constante e podem emigrar através da rede de poros e aparecer na superfície em forma de manchas, sem produzir fissuras. (ANDRADE, 1992).

## **CAPÍTULO III**

### **ESTUDO EXPERIMENTAL**

Nesta pesquisa foram adotados os procedimentos descritos a seguir para posterior análise e discussão dos resultados das variáveis relacionadas com a microestrutura e com a durabilidade.

Foram estudadas misturas com somente cimento Portland, chamadas traços de referência e também foram investigadas misturas com alto teor de cinza volante, entendendo-se como tal a substituição de cimento Portland por igual massa desta adição mineral em limite superior aos máximos recomendados por normas ou, ainda, por resultados de trabalhos similares já divulgados. Para a mistura binária de cinza volante foi utilizado o teor de 50% de substituição de cimento. Para esta mesma proporção foi realizado traço equivalente com a adição de 20% de cal hidratada, com o objetivo de repor a quantidade de hidróxido de cálcio consumida nas reações, além de evidenciar os benefícios da cal em termos de diminuir a velocidade de carbonatação, aumentar a resistência à compressão e propiciar maior trabalhabilidade do concreto.

Com a presença de adições minerais nas misturas, ocorrem as reações pozolânicas pelo consumo de C-H, tanto maior quanto mais elevado é o teor de pozolana no traço e quanto mais reativa é a adição mineral. Com isto, decresce a quantidade de hidróxido de cálcio, que ocasiona aumento da velocidade de carbonatação, podendo chegar ao seu esgotamento quando houver quantidades muito elevadas de pozolanas.

Com o intuito de aproximar os resultados de laboratório aos de uma construção real, preparou-se peças protótipos (vigas) de dimensões semelhantes às de uma estrutura, moldadas em fôrmas de madeira e curadas em cura úmida durante o prazo de 7 dias. Após a desmoldagem e decorrido o período de cura úmida, as vigas foram colocadas a céu



aberto até a data de ensaio de cada uma das variáveis previstas no plano da pesquisa. Adotou-se a idade de 91 dias para os ensaios acelerados, com o objetivo de dar tempo para que as reações pozolânicas tivessem um percentual considerável de hidratação e que os resultados fossem mais adequados com os de uma estrutura em utilização. Sabe-se, entretanto, que este tempo ainda é pequeno para comparar com condições próximas às das estruturas expostas ao meio ambiente; todavia, a disponibilidade de tempo para o término da pesquisa não permitiu que fossem estudadas idades maiores para a realização dos ensaios; na data aprazada foram extraídos testemunhos das peças protótipos com extratores de diâmetro apropriado para a realização dos ensaios específicos; foram coletadas amostras pulverizadas, extraídas com perfuratrizes rotativas apropriadas, em profundidades crescentes e subseqüentes a cada 2,5 cm, desde a superfície até a 5 cm, com o objetivo de determinar a variação das propriedades ensaiadas.

Os materiais a serem utilizados foram os seguintes:

a) cimento Portland de alta resistência inicial (CP V - ARI), por ser o aglomerante que fornece maior teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  após a hidratação, pela sua maior quantidade de  $\text{C}_3\text{S}$  (silicato tricálcico) e por conter o menor teor de adições em sua constituição após a hidratação, ou seja, por conter maior quantidade de clínquer;

b) cinza volante proveniente de usina geradora de vapor de uma fábrica de celulose da região;

c) cal hidratada cálcica, de procedência nacional (ICAL);

d) areia natural lavada, com  $D_{\text{máx}} = 4,8$  mm;

e) pedra britada com  $D_{\text{máx}} = 19$  mm, de rocha diabásica;

f) aditivo superplastificante (GLENIUN), quando necessário, de constituição de éter carboxílico modificado, de produtor nacional.

Todos estes materiais foram previamente caracterizados através da realização de ensaios pertinentes, para a determinação de suas propriedades físicas e químicas, o que permitirá a realização de outras

pesquisas com materiais de características semelhantes, seguindo os mesmos experimentos e, conseqüentemente, permitindo a comparação de resultados.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

- ***Cimento – CP V ARI***

A caracterização física e química do cimento Portland industrializado de alta resistência inicial (CP V - ARI), em conformidade com a EB-NBR 5733 foi determinada através dos ensaios de: a) finura # 0,075 mm – NBR 11579; b) tempo de pega – NBR 11581; c) análise química – NBR 5743, 5744, 5745, 5747, 7227 e 9203; d) superfície específica – Blaine – NBR 7224; e) massa específica – NBR 6474; f) resistência à compressão da argamassa normal – NBR 7215.

Tabela 3.1: Características físicas do cimento

<b>Característica do Cimento</b>	<b>Resultado</b>
Resistência (MPa) – 1 dia	28,0
Resistência (MPa) – 3 dias	33,5
Resistência (MPa) – 7 dias	41,3
Resistência (MPa) – 28 dias	50,4
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,15
Superfície Específica - Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	436
Finura # 0,075 mm (%)	0,25
Tempo de início de pega (min.)	144
Tempo de fim de pega (min.)	225

Tabela 3.2: Características químicas do cimento

<b>Composição química</b>	<b>Teor em massa %</b>
Perda ao Fogo	3,0
SiO <sub>2</sub>	19,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0
CaO	63,4
MgO	1,8
SO <sub>3</sub>	3,1
Na <sub>2</sub> O	0,1
K <sub>2</sub> O	0,9

- **Pozolana – Cinza Volante**

A cinza volante foi a pozolana utilizada como substituição em igualdade de massa de cimento. Após o recebimento da cinza, procedeu-se a moagem em um moinho de bolas, por 30 minutos. A moagem da cinza se justifica pelo fato de se obter, pela liberação das partículas aglomeradas, uma maior superfície específica das partículas: com isso, têm-se uma maior superfície de adsorção.

A caracterização física e química da cinza volante empregada como substituição ao cimento Portland foram determinadas através dos ensaios de: a) finura # 0,075 mm – NBR 11579; b) análise química – procedimento do IPT; c) superfície específica – Blaine – NBR 7224; d) massa específica – NBR 6474.

Tabela 3.3: Características físicas da cinza volante

<b>Característica da Cinza Volante</b>	<b>Resultado</b>
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,15
Superfície Específica - Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	361

Tabela 3.4: Características químicas da cinza volante

<b>Composição química</b>	<b>Teor em massa %</b>
Perda ao Fogo	1,2
SiO <sub>2</sub>	64,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2
CaO	1,5
MgO	0,8
SO <sub>3</sub>	0,1
Na <sub>2</sub> O	0,2
K <sub>2</sub> O	1,5

- **Cal Hidratada**

A cal hidratada industrializada do tipo cálcica (teor de cálcio maior que 95%), foi utilizada como adição nos traços estudados. Sua caracterização química e física foi realizada através dos ensaios: a) retirada e preparação da amostra – NBR 6471; b) análise química – NBR 6473; c) massa específica – NBR 6474; d) finura por peneiramento – NBR 9289; e) superfície específica Blaine – NBR 7224.

Tabela 3.5: Características físicas da cal hidratada

<b>Característica da Cal</b>	<b>Resultado</b>
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,34
Superfície Específica - Blaine (m <sup>2</sup> /Kg)	900

Tabela 3.6: Características químicas da cal hidratada

<b>Composição química</b>	<b>Teor em massa %</b>
Perda ao Fogo	26,1
SiO <sub>2</sub>	0,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16
CaO	73,1
MgO	0,4
SO <sub>3</sub>	0,2
Na <sub>2</sub> O	0,1
K <sub>2</sub> O	0,1

- ***Agregado Miúdo – Areia Média***

O agregado miúdo utilizado foi areia natural quartzosa, proveniente de Santa Maria/RS, peneirada na peneira 4,8 mm, seca em estufa e armazenada em caixas de madeira com tampa. Esta areia pertence à zona 3, de acordo com distribuição dos grãos dentro dos limites da NBR 7211. Suas características físicas foram determinadas pelos ensaios normatizados: a) composição granulométrica – NBR 7217; b) massa específica – NBR 9776; c) massa unitária solta – NBR 7251; d) absorção de água; inchamento do agregado miúdo – NBR 6467; f) umidade crítica.

Tabela 3.7: Granulometria da Areia Média

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Percentual Retido</b>
4,8	---
2,4	1
1,2	3
0,6	20
0,3	74
0,15	90
< 0,15	100

Tabela 3.8: Características físicas da areia média

<b>Característica da areia média</b>	<b>Resultado</b>
Módulo de Finura	1,98
Diâmetro máximo (mm)	1,2
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,63
Massa unitária solta (kg/dm <sup>3</sup> )	1,65
Absorção de água (%)	0,5
Coeficiente de inchamento médio	1,31
Umidade crítica (%)	2,1

- ***Agregado Graúdo – Brita 1***

O agregado graúdo de rocha diabásica britada classificado como brita 1, foi peneirado, utilizando-se a fração passante na peneira 19,0 mm e retida na peneira 6,3 mm, lavado, seco em estufa e estocado em caixa de madeira com tampa. A determinação das características físicas dos agregados basearam-se nos seguintes ensaios normalizados: a) composição granulométrica – NBR 7217; b) massa específica – NBR 9937; c) massa unitária solta – NBR 7251; d) massa unitária compactada

– NBR 7810; e) absorção de água – NBR 9937; f) índice de forma pelo método do paquímetro – NBR 7809; g) abrasão Los Angeles – NBR 6465.

Tabela 3.9: Granulometria da brita 1

<b>Peneira (mm)</b>	<b>PERCENTUAL RETIDO</b>
19,0	1
12,5	36
9,5	76
6,3	98
4,8	100
2,4	100
1,2	100
0,6	100
0,3	100
0,15	100
< 0,15	100

Tabela 3.10: Características físicas da brita1

<b>Característica da areia média</b>	<b>Resultado</b>
Módulo de Finura	6,77
Diâmetro máximo (mm)	19
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,49
Massa unitária solta (kg/dm <sup>3</sup> )	1,28
Massa unitária compactada (kg/dm <sup>3</sup> )	1,40
Absorção de água (%)	1,60
Índice de forma	2,93
Abrasão Los Angeles (%)	18,8

- **Aditivo Químico – Glenium**

O aditivo químico GLENIUM 51 da MBT é um produto 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%. Sua utilização foi procedida de acordo com as especificações do fabricante.

O slump test de projeto para os traços utilizados foi de 100 mm, com uma variação de 20 mm para mais ou para menos e se necessário, para atingir este valor sem variações na relação água/aglomerante de cada traço, foi utilizado o aditivo superplastificante. A dosagem inicial de aditivo, nos traços de concretos utilizados desta pesquisa, deu-se através de ensaios de trabalhabilidade para cada mistura, resultados estes que serviram de parâmetro para as moldagens definitivas.

## **3.2 PARTE EXPERIMENTAL**

### **3.2.1 Variáveis Estudadas**

Algumas variáveis e o método do desenvolvimento foram definidos previamente no início desta pesquisa. Pode-se dividir as variáveis relacionadas nesta pesquisa como variáveis dependentes e independentes. Como variáveis independentes podemos citar a relação a/mc, composição dos traços, tipo de cura e abatimento no tronco de cone de Abrahms. As variáveis dependentes descritas a seguir são as variáveis diretamente influenciadas por alguma variável independente e estão relacionadas com as propriedades do concreto.



## • ***Permeabilidade aos Íons Cloretos***

Os cloretos e sulfatos podem estar presentes no concreto desde a mistura introduzidos, por exemplo, na água de amassamento. E, também, podem resultar da penetração de agentes externos, dependendo da força desses agentes e da permeabilidade do concreto.

O ensaio de penetração de cloretos foi conduzido conforme a norma ASTM C 1202/97 em testemunhos de 100mm de diâmetro, extraídos por perfuratriz apropriada dos protótipos, aos 91 dias, os quais, foram devidamente preparados antes de serem submetidos ao ensaio conforme exemplificado por WINCK (2002) e descrição que segue neste capítulo.

## • ***Teor de Cloretos Totais Retidos***

No diagnóstico de fenômenos patológicos e em estudos de durabilidade do concreto é importante quantificar adequadamente o teor de cloreto presente, envolvendo, portanto, a sistemática de coleta e preparação das amostras para ensaio.

A extração de material pulverizado do concreto por meio de furos com broca de 12 mm de diâmetro é referida por ANDRADE (1992), HELENE (1993) e GUIMARÃES (2000), na obtenção do perfil de penetração de cloretos em concreto.

A determinação dos cloretos totais ou solúveis em ácido nítrico segue as diretrizes gerais da ASTM C 1152/90. A determinação é feita por titulação potenciométrica com solução de nitrato de prata, empregando-se eletrodo combinado de prata/cloreto de prata, conforme prescrito na ASTM C 114/99.

O material coletado pulverizado deve ser previamente moído até passar totalmente em peneira ABNT n° 20 (0,84mm). Cabe registrar que as amostras, na maioria das vezes, são coletadas com pequenas frações retidas nessa peneira.

### • **Condutividade Elétrica Específica**

A durabilidade do concreto quanto a sua resistência contra a corrosão da armadura pode ser avaliada por meio de vários ensaios, como carbonatação, ingresso de cloretos, permeabilidade ao oxigênio, difusão ou absorção de água. Entretanto, a determinação da condutividade elétrica do concreto parece ser um ensaio genérico e um parâmetro universal que caracteriza a possibilidade do concreto de ser permeado por fluidos. Como a condutividade é função da estrutura da fase sólida e da composição da solução dos poros, pode apresentar informações sobre o teor de saturação e a proporção de poros disponíveis para a penetração de fluidos ou, no caso de cloretos, poderia fornecer informações sobre a difusão de cloretos.

A condutividade elétrica foi determinada indiretamente em amostras pulverizadas de concreto coletadas dos mesmos protótipos de onde foram retirados os testemunhos para o ensaio de permeabilidade a cloretos. As amostras pulverizadas foram submetidas à análise química para a obtenção da composição iônica do material.

Para o cálculo da condutividade elétrica específica do concreto utilizaram-se as equações propostas por SHI et al (1998):

$$\lambda_i = \lambda_{i,o} - A_i \sqrt{C_i} \quad (1)$$

$$A_i = 0,2289 \cdot \lambda_{i,o} + 60,19 \quad (2)$$

$$\rho = \rho_{\text{água}} + \sum \frac{C_i \cdot \lambda_i}{1000} \quad (3)$$

onde:

$\lambda_i$  = condutividade equivalente do íon i;

$\lambda_{i,0}$  = condutividade equivalente a concentração infinita;

$C_i$  = concentração equivalente do íon i;

$\rho$  = condutividade elétrica da solução;

$\rho_{\text{água}}$  = condutividade elétrica da água (desconsiderada pelo seu valor ser insignificante nesta situação).

A Tabela 3.11 apresenta os valores de  $\lambda_{i,0}$  dos íons presentes na solução dos poros do concreto.

Tabela 3.11: Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita a 25°C

Íon	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>
Condutividade equivalente m <sup>2</sup> .equi. <sup>-1</sup> .ohm <sup>-1</sup>	0,00501	0,00735	0,00595	0,00798	0,0198

### • **Relação Iônica Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>**

O acréscimo da relação Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> é dado em função da presença de íons cloreto que foram introduzidos no concreto através do ensaio acelerado de penetração de cloretos.

A concentração de íons cloreto é dependente da concentração de outros íons. Por exemplo, quanto maior a concentração de hidroxilas, para uma dada concentração de íons cloreto, maior a quantidade de cloretos livres presentes. Assim, pode-se dizer, que existe uma concentração mínima de cloretos para que ocorra a corrosão, influenciada pela relação

cloretos/hidroxila, ou simplesmente:  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  (NEVILLE, 1997). Esta relação é determinada por medição em laboratório das concentrações de cloretos totais ( $\text{Cl}^-$ ) e potencial de alcalinidade (pH) dos concretos em estudo. Desta forma, quando a concentração de cloretos excede 0,6 da concentração de hidroxila, a corrosão é observada (METHA, 1994; NEVILLE, 1997). Porém, este valor de 0,6 é controvertido, sendo geralmente expresso para pastas e não para concreto.

### 3.2.2 Concreto fresco

Para realização desse estudo foram moldadas vigas de concreto – protótipos, com o consumo de materiais por  $\text{m}^3$ , discriminados abaixo, na Tabela 3.12, de onde foram extraídas as amostras para os ensaios.

Tabela 3.12: Quantidade de materiais por  $\text{m}^3$  de concreto

Traço	a/mc	Componentes (kg/m <sup>3</sup> )							
		MC	C	CV	CaI	AG	AM	Água	Aditivo
<b>R 45</b>	0,45	427	427	-	-	1025	683	192	-
<b>CV 40</b>	0,40	482	241	241	-	1075	491	192	1,45
<b>CV 40 c</b>	0,40	560	280	280	112	1057	221	222	1,93
<b>R 60</b>	0,60	319	319	-	-	1004	801	191	-
<b>CV 55</b>	0,55	348	174	174	-	1054	656	191	0,29
<b>CV 55 c</b>	0,55	404	202	202	81	1031	451	221	0,93
<b>R 80</b>	0,80	238	238	-	-	977	899	190	-
<b>CV 75</b>	0,75	254	127	127	-	1004	807	190	0,42
<b>CV 75c</b>	0,75	294	147	147	59	977	649	221	-

**MC:** Materiais Cimentícios  
**C:** Cimento Portland ARI – CP V  
**CV:** Cinza Volante  
**AG:** Agregado Graúdo – Brita 1  
**AM:** Agregado Miúdo – Areia Média

Para as moldagens das vigas e coletas do material foram utilizados as instalações e equipamentos do Laboratório de Materiais para

Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Os ensaios de análise química foram realizados no Laboratório de Química da Universidade Federal de Santa Maria.

A nomenclatura utilizada para denominação dos traços, apresentada na Tabela 3.12, refere-se:

a) R 45, R 60 e R 80 – traços do concreto de referência somente com cimento Portland, CP V – ARI como aglomerante com relação a/mc de 0,45, 0,60 e 0,80 respectivamente;

b) CV 40, CV 55 e CV 75 – traços de concreto com 50% de substituição do cimento Portland por cinza volante com relação a/mc de 0,40, 0,55 e 0,75 respectivamente;

c) CV 40 c, CV 55 c e CV 75 c – traços de concreto com 50% de substituição do cimento por cinza volante e adição de 20% de cal hidratada sobre a massa de materiais cimentícios (cimento Portland e cinza volante) com relação a/mc de 0,40, 0,55 e 0,75 respectivamente.

Previamente às moldagens, foram realizados ensaios de trabalhabilidade em cada traço, onde foi verificado o “*slump test*” no tronco de cone de ABRAHMS.

Todos os traços foram executados em uma betoneira de eixo inclinado, com as proporções de material determinadas no processo de dosagem de cada traço e a pesquisa foi conduzida conforme as seguintes etapas descritas abaixo.

### • **Moldagem dos Protótipos**

Foram confeccionados trinta e três protótipos prismáticos de concreto de 75 cm X 20 cm X 15 cm para coletas de material estudado com idade de 28 e 91 dias, na intenção de aproximar estas amostras com uma viga estrutural de uma obra e comparar o desempenho de

testemunhos extraídos destes protótipos com outros setenta e dois corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm X 20 cm moldados e curados sob condições controladas para ensaio de resistência à compressão conforme a NBR 5739/94, também nas idades de 28 e 91 dias.

Os corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura foram moldados e adensados em mesa vibratória, desmoldados após vinte e quatro horas, identificados e acondicionados em câmara úmida com temperatura e umidade controladas em  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e 95% de umidade relativa, para serem curados até as idades de ensaio.

Os protótipos foram moldados em fôrmas, as quais eram compostas de cinco segmentos de chapas de compensado naval de 1,5 mm de espessura e encaixadas dentro de uma armação metálica, presa e regulada por parafusos, que fornecia rigidez às faces da fôrma, como apresentado na Figura 3.1. Por se tratar de uma junção de chapas, em algumas montagens das fôrmas ocorreu o aparecimento de frestas, para isso usou-se fita adesiva entre as juntas do compensado, evitando, assim, que houvesse vazamento da pasta de cimento durante as moldagens. Após a montagem e vedação das fôrmas foi aplicada uma fina camada de óleo queimado nas faces internas para facilitar a desmoldagem.



Figura 3.1: Fôrmas para a moldagem dos protótipos

As vigas (protótipos) foram moldadas em três camadas, cada uma adensada com vibrador de imersão com agulha de 2,5 mm de diâmetro e desmoldadas vinte e quatro horas após a moldagem de cada traço, identificados e acondicionados dentro de sacos de aniagem e armazenados ao abrigo do sol e vento, e mantidos úmidos durante sete dias, conforme Figura 3.2. Após o período de cura, as vigas foram colocadas ao ar livre, com seu eixo longitudinal orientado no sentido norte-sul, apoiados com a face de 20 x 75 cm sobre roletes de concreto (Figura 3.3). Assim, mantiveram-se, expostas às condições ambientais até a data das extrações dos testemunhos para resistência à compressão (28 e 91 dias), para o ensaio de permeabilidade a cloretos (91 dias) e coleta de amostras pulverizadas para a determinação de cloretos totais, composição iônica e condutividade elétrica específica (91 dias).



Figura 3.2: Protótipos no período de cura – 7 dias

A avaliação da resistência à compressão dos traços estudados foi realizada em corpos-de-prova cilíndricos, de dez centímetros de diâmetro e vinte centímetros de altura, moldados e curados sob condições controladas, como, também, em testemunhos extraídos com perfuratriz apropriada dos protótipos prismáticos (vigas), com as mesmas

dimensões, porém curados em condições ambientais. O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado para determinar uma das propriedades do concreto mais referenciada na literatura e considerada como sendo uma das mais importantes. O estudo da resistência à compressão do concreto é parte integrante do estudo da microestrutura do concreto, assunto desenvolvido em outra dissertação simultaneamente a esta por SILVEIRA (2004).



Figura 3.3: Protótipos em espera sob condições ambientais

### **3.2.3 CONCRETO ENDURECIDO**

Os ensaios, foram realizados pela extração de testemunhos seccionados a cada 2,5 cm de espessura da camada de cobrimento, da superfície até 5 cm de profundidade, de modo que o fluido agressivo penetrasse a partir das posições cada vez mais interiores da camada de cobrimento. Este procedimento tem por objetivo traçar o perfil da variação da propriedade estudada com a espessura da cobertura.



- **Extração de testemunhos**

As extrações dos protótipos de concretos foram realizadas sobre uma base firme e fixa, com equipamento adequado em boas condições de utilização, como está apresentado na Figura 3.4. Os testemunhos extraídos de cada protótipo de 75 cm X 20 cm X 15 cm, no sentido perpendicular ao sentido de concretagem, por máquina perfuratriz com broca de coroa diamantada do tipo copo, tinham dimensões idênticas aos corpos-de-prova moldados, ou seja, 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, seguindo as recomendações da NBR 7680/83. O esquema das extrações pode ser verificado na Figura 3.5.

Para o ensaio de permeabilidade a cloretos foram extraídos três testemunhos de um protótipo, por traço, na idade de 91 dias. Deste protótipo, também, foram coletadas amostras pulverizadas pertinentes.



Figura 3.4: Extração dos testemunhos

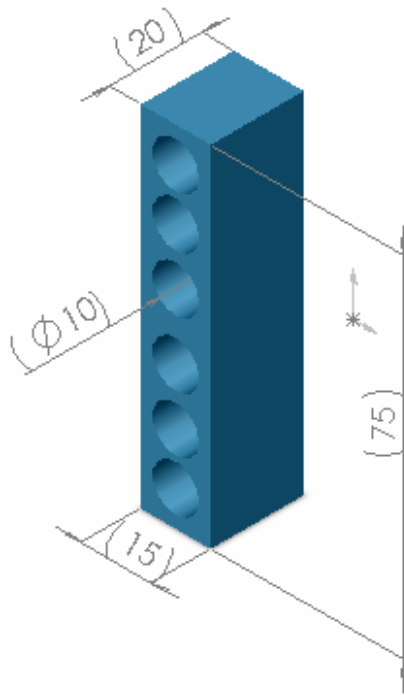


Figura 3.5: Esquema de extração de testemunhos (medidas em cm)

- ***Preparo do Ensaio de Penetração de Íons Cloreto***

Os testemunhos extraídos foram devidamente seccionados (Figura 3.6) nas profundidades já mencionadas, as quais podem ser entendidas através da Figura 3.7 ou pelo esquema de corte apresentado nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10. Depois de secos ao ar livre, foram selados com resina epóxi e colocados com as duas faces expostas ao vácuo num dessecador com dispositivo apropriado de pressão constante em 1mm de mercúrio (Hg), por três horas.



Figura 3.6: Corte dos testemunhos



Figura 3.7: Testemunhos preparados para o corte

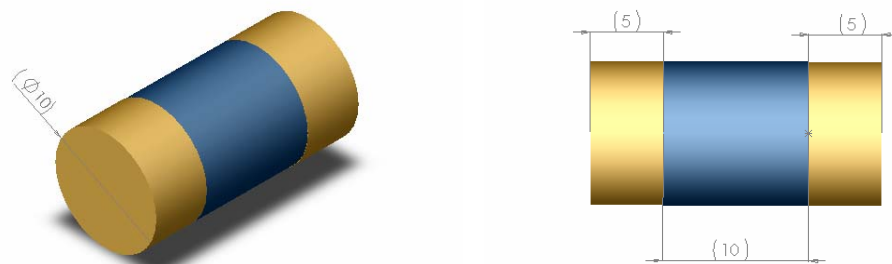


Figura 3.8: Esquema de corte dos testemunhos - Camada 1  
(medidas em cm)

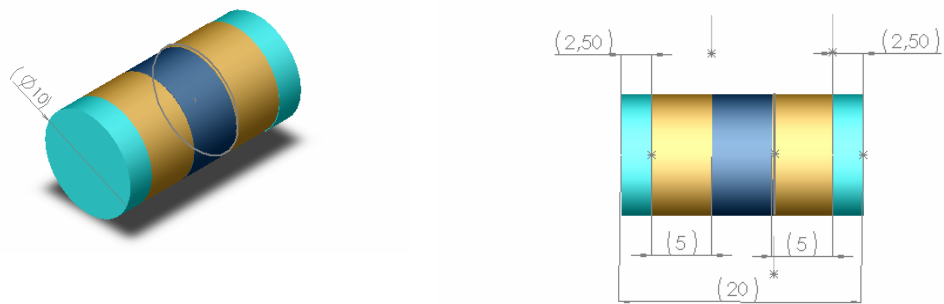


Figura 3.9: Esquema de corte dos testemunhos - Camada 2  
(medidas em cm)

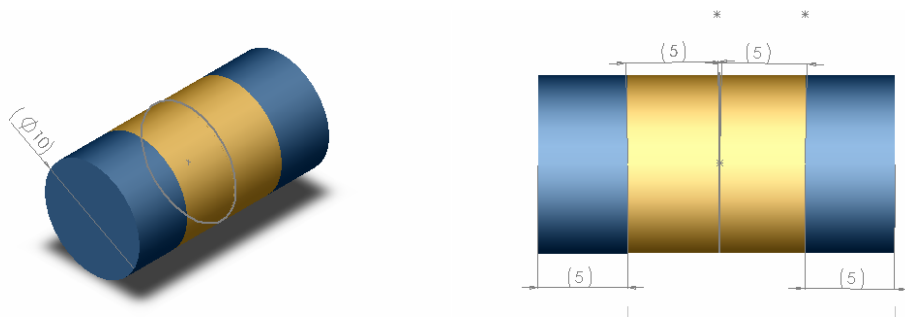


Figura 3.10: Esquema de corte dos testemunhos - Camada 3  
(medidas em cm)

Passado esse período de tempo, era inserida no dessecador, com a bomba de vácuo em funcionamento ininterrupto, água deaerada em quantidade suficiente para cobrir as amostras, na temperatura entre 20°C e 25°C, preparada previamente. A bomba de vácuo permanecia ligada por mais uma hora e após o desligamento as amostras permaneciam submersas por  $18 \pm 2$  horas até que se iniciasse o preparo das células para o ensaio de permeabilidade a cloretos, propriamente dito.

As células de acrílico apropriadas ao ensaio eram montadas através do acondicionamento das amostras por meio de fixação com silicone, o que pode ser observado na Figura 3.11. Na lateral da célula carregada positivamente era inserida solução de 0,3 N de NaOH e na lateral negativa uma solução de NaCl a 3%.

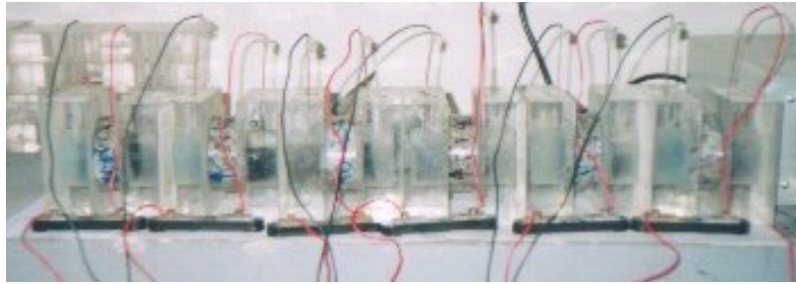


Figura 3.11: Células para o ensaio de penetração de cloretos

Os terminais da célula eram conectados a uma fonte que fornece uma diferença de potencial de 60V por seis horas consecutivas e sem interrupção, apresentada na Figura 3.12. A cada 30 minutos eram realizadas leituras da diferença de potencial entre os terminais das células, com o auxílio de um multímetro, conforme a Figura 3.13.



Figura 3.12: Fonte



Figura 3.13: Multímetro

A Figura 3.14 apresenta a disposição dos equipamentos utilizados durante o ensaio de penetração de cloretos, conforme a ASTM C1202/97.

Durante o ensaio, a temperatura do ambiente era monitorada e mantida entre 20°C e 25°C, bem como a temperatura das soluções que não poderia ultrapassar 90°C para evitar danos às células, e, também evitar que as soluções não fervessem (ASTM C1202/97). Ao término das leituras o equipamento de ensaio era desligado, as células eram desmontadas e após prévia secagem das amostras eram coletadas amostras pulverizadas para os ensaios de cloretos totais.

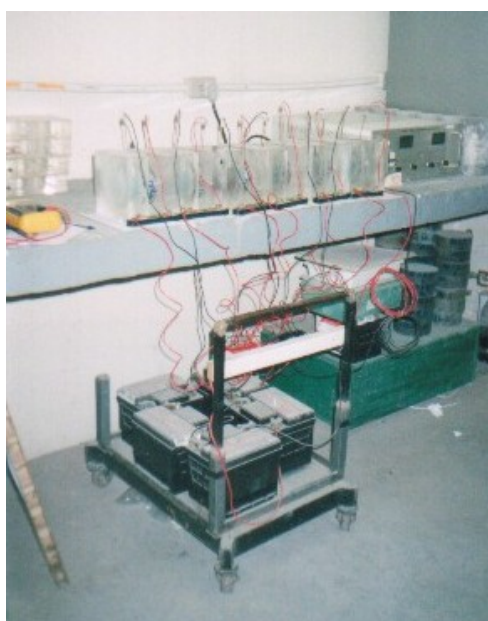


FIGURA 3.14: Ensaio acelerado de penetração de cloretos

- ***Coleta de Material Pulverizado***

A coleta de material pulverizado foi realizada por meio de furadeira de precisão tipo martelete, com aspirador e filtro para o pó, com broca de 12 mm de diâmetro e nas profundidades distintas, da superfície até 6 cm de profundidade, em quantidade mínima para representar o concreto amostrado destinado aos ensaios químicos. Cabe registrar, que se trata de uma forma bastante prática de coleta de amostras, pois o material

coletado já é obtido com uma granulometria quase em condições de ser ensaiado no laboratório, exigindo apenas uma ligeira moagem, que pode ser feita manualmente em almofariz de porcelana (CLIMENT et al., 2001).

A extração das amostras pulverizadas para os ensaios de composição iônica do concreto foi proveniente dos protótipos, na idade de 91 dias, para cada traço e o pó coletado foi passado na peneira de malha #200. Já a extração das amostras pulverizadas para os ensaios de cloretos totais, cloretos livres e pH foi realizada nos testemunhos sujeitos ao ensaio de permeabilidade a cloretos (Figura 3.15), logo após o término deste ensaio aos 91 dias e passado na peneira ABNT número 20 (0,84mm). Após o peneiramento, as amostras pulverizadas passaram por um processo de lavagem em álcool etílico absoluto para que as reações de hidratação do cimento fossem paralisadas. O volume de líquido da amostra coletada na forma de pó foi filtrado em papel filtro apropriado e as amostras submetidas à secagem em estufa à 60°C por 24 horas. Depois de secas as amostras pulverizadas foram acondicionadas em recipientes de vidro vedado até serem submetidas aos ensaios químicos (Figura 3.16).



FIGURA 3.15: Testemunhos para a coleta de amostras pulverizadas



FIGURA 3.16: Armazenagem do material pulverizado

## **CAPÍTULO IV**

### **APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

O concreto sem adição mineral, denominado concreto de referência, foi utilizado como parâmetro para a comparação entre as propriedades das demais misturas investigadas. Também, foram investigadas misturas com substituição de cimento por cinza volante, com e sem adição de cal hidratada, para repor o hidróxido de cálcio consumido nas reações pozolânicas.

Os resultados desta pesquisa foram obtidos pelo estudo de seis misturas investigadas, na idade de 91 dias, nas relações  $a/mc = 0,40$  e  $0,75$ , através de regressão estatística pela equação de Abrahms dos traços de referência de  $a/mc = 0,45$  e  $0,80$ . Fez-se uma análise comparativa entre os resultados dos traços com diferentes materiais cimentícios permitindo a interpretação desses e enfatizando a penetração de cloretos, o teor de cloretos totais, a relação  $Cl^-/OH^-$  e a condutividade elétrica específica do concreto.

Foram comparados os resultados das amostras em diferentes camadas de profundidade do concreto para cada mistura investigada, onde os valores analisados provieram da média dos resultados obtidos nos ensaios. As camadas citadas referem-se: Camada 1 – superfície externa a 1 cm de profundidade; Camada 2 – de 2,5 cm a 3,5 cm de profundidade; Camada 3 – de 5 cm a 6cm de profundidade.

#### **4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

A apresentação dos resultados de resistência à compressão das misturas de concreto foi através de tabelas e gráficos, objetivando facilitar



a interpretação e determinação do comportamento de cada traço estudado.

Com o aumento da idade, o acréscimo da resistência à compressão dos traços com cinza volante torna-se consequência das reações da própria pozolana com o hidróxido de cálcio e da hidratação do clínquer, além do efeito das atrações físicas entre as partículas (potencial zeta). Este acréscimo de resistência também foi observado por WINCK (2002), confirmando, assim, que as pozolanas proporcionam um maior e melhor refinamento dos poros.

Observou-se que os traços com cinza volante apresentaram comportamento diferenciado dos traços de referência. A Tabela 4.1 apresenta o valor médio da resistência à compressão aos 28 dias dos traços descritos na Tabela 3.12 do capítulo anterior, juntamente com o valor médio da resistência à compressão aos 91 dias e o acréscimo percentual de resistência dos 28 para os 91 dias.

Tabela 4.1: Resultados da resistência à compressão aos 28 dias

a/mc	Traços	Resistência à compressão (MPa)				Acréscimo de resistência nos testemunhos aos 91 dias (%)
		28 dias		91 dias		
		CP	Test.	CP	Test.	
0,75	R 80	23,3	23,8	28,0	30,0	26,1
	R 75 *	26,1	26,7	29,9	32,4	21,4
	CV 75	13,9	8,8	20,4	15,0	70,5
	CV 75 c	12,2	12,6	19,8	19,5	54,8
0,55	R 60	38,4	39,6	38,9	44,1	11,4
	R 55 *	43,6	45,9	46,7	53,3	16,1
	CV 55	21,5	27,2	35,0	34,7	27,6
	CV 55 c	28,0	27,5	36,3	37,4	36,0
0,40	R 45	60,2	64,9	64,3	75,5	16,3
	R 40 *	73,7	79,9	74,1	88,9	11,3
	CV 40	36,1	41,2	51,2	50,6	22,8
	CV 40 c	41,2	44,0	56,2	57,1	29,8

\* valores obtidos por regressão estatística, pela equação de Abrahms

Pode-se verificar com os resultados apresentados na Tabelas 4.1 que as misturas com cinza volante tem crescimentos na resistência à compressão encontrada aos 28 dias para aqueles obtidos aos 91 dias, em média, de: 26% para os traços com relação  $a/mc = 0,40$ , 32% nos traços com relação  $a/mc = 0,55$  e 62% para os traços com relação  $a/mc = 0,75$ . Esses valores, apesar do crescimento acentuado, são inferiores aos resultados da resistência a compressão dos traços de referência, sendo que, as misturas com cinza volante ao 91 dias, apresentaram em média: nos traços com relação  $a/mc = 0,40$  resistência à compressão 40% inferior, o equivalente a uma redução de 35 MPa, para este caso; quando a relação  $a/mc = 0,55$  a resistência à compressão é 32% inferior a do traço de referência, ou seja, 17,3 MPa a menos que o resultado do traço R 55 e; para a relação  $a/mc = 0,75$  a resistência é 47% inferior a do traço de referência, o que equivale a 15,2 MPa.

Na Figura 4.1 é apresentado em forma de gráfico o desenvolvimento da resistência à compressão das misturas de concreto nas idades de 28 e 91 dias. Desta forma, podemos observar que o acréscimo de resistência dos 28 aos 91 dias nas misturas contendo cinza volante, é percentualmente maior que nos traços de referência.

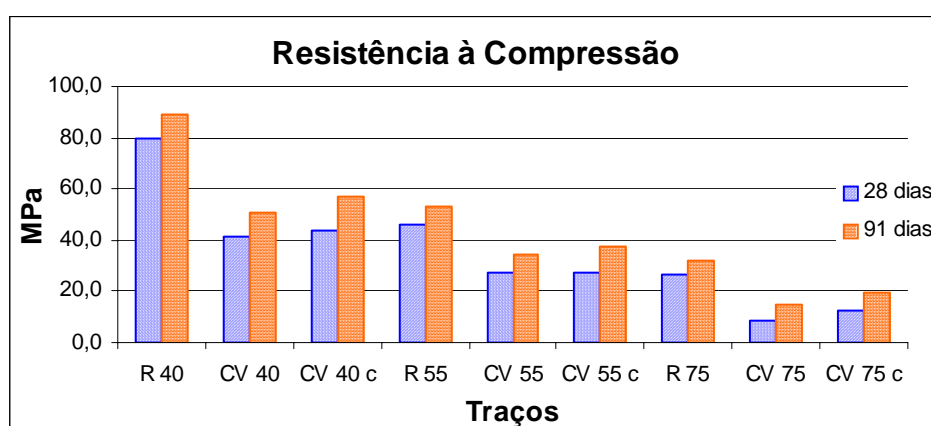


Figura 4.1: Resistência à compressão aos 28 e 91 dias

Quando analisados os testemunhos extraídos constatou-se que, para os traços com substituição de 50% de cinza volante, o acréscimo mínimo foi de 22% dos 28 para os 91 dias no traço CV 40. Nos demais traços, inclusive os traços com adição de 20% de cal hidratada, o acréscimo foi superior, chegando até a 70% no traço CV 75.

A adição da cal hidratada no concreto repõe o teor de hidróxido de cálcio que deixou de ser formado pela substituição do cimento Portland e, que, por seu efeito plastificante e retentor de água, contribuiu para acréscimos de resistência à compressão aos 91 dias, comparando-se aos concretos com mesma relação a/mc sem o emprego da cal, o que se evidencia na Tabela 4.1.

## **4.2 ESTRUTURA DOS POROS**

Os mecanismos de transporte são facilmente influenciados, não apenas pelas condições ambientais, como também pelas condições de produção de concreto, mais especificamente seu lançamento e cura que são decisivos para a porosidade do concreto.

A penetração de agentes agressivos está diretamente relacionada com o diâmetro crítico e a distribuição dos poros, de modo que o conhecimento destes é peça fundamental para a interpretação dos resultados. Desta forma, a Tabela 4.2 apresenta os resultados determinados por SILVEIRA (2004) através de ensaios realizados com testemunhos extraídos de protótipos moldados e curados juntamente com os protótipos utilizados para estudo nesta dissertação, ou seja, são originários do mesmo concreto. Essa dissertação e os estudos de SILVEIRA (2004) e PETRY (2004) fazem parte de um mesmo projeto de pesquisa desenvolvido no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria.

O efeito parede, causado pelo acúmulo de água na interface forma/concreto, tem sua existência verificada pela indicação de uma maior porosidade na camada exterior do concreto. Conforme se observa em todos os traços, onde a porcentagem de poros com diâmetros maiores que 50 nm diminui à medida que a profundidade aumenta (Figura 4.2).

Comparando os traços de referência com os traços binários de cimento Portland e cinza volante, com e sem adição de cal hidratada, verifica-se que a pozolana proporciona ao concreto uma diminuição do volume de poros capilares, tanto por seu efeito químico como pela sua atuação como filler inerte. Nos traços com cinza volante há uma menor porcentagem de poros grandes (macroporos –  $\Phi > 50\text{nm}$ ), quando comparados com o traço de referência nas mesmas profundidades, como pode ser observado, também na Figura 4.2.

Tabela 4.2: Distribuição das dimensões dos poros por intrusão de mercúrio aos 91 dias

Traço	Camada	Volume total de Hg (ml/g)	$\Phi_{\text{Crítico}}$ (nm)	Poros do gel		Mesoporos	Macroporos	Mesoporos + Macroporos
				$\Phi < 10 \text{ nm}$ (%)	$10 < \Phi < 50 \text{ nm}$ (%)	$\Phi > 50 \text{ nm}$ (%)	(%)	
R 75	1	0,0294	148	4,9	20,3	74,8	95,1	
	2	0,0461	136	7,2	18,7	74,1	92,8	
	3	0,0387	84	10,0	24,7	65,3	90,0	
CV 75	1	0,0534	175	5,1	38,0	56,9	94,9	
	2	0,0677	170	10,2	39,7	50,1	89,8	
	3	0,0780	155	19,1	35,0	45,9	80,9	
CV 75 c	1	0,0758	110	8,2	42,3	49,5	91,8	
	2	0,0755	90	13,0	40,1	46,9	87,0	
	3	0,0655	80	19,7	37,4	42,9	80,3	
R 40	1	0,0359	97	14,0	13,4	72,6	86,0	
	2	0,0208	100	15,2	12,7	72,1	84,8	
	3	0,0078	73	16,7	28,8	54,5	83,3	
CV 40	1	0,0403	80	20,0	52,0	28,0	80,0	
	2	0,0390	55	23,3	55,4	21,3	76,7	
	3	0,0574	40	30,0	58,7	11,3	70,0	
CV 40 c	1	0,0929	90	19,8	43,5	36,7	80,2	
	2	0,0949	80	22,8	43,5	33,7	77,2	
	3	0,0898	70	28,0	44,2	27,8	72,0	

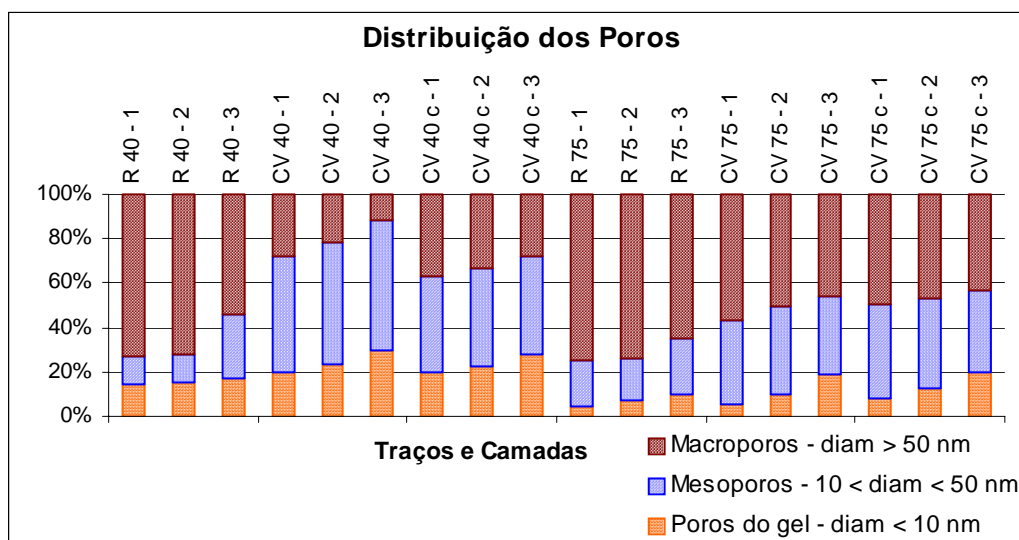


Figura 4.2: Distribuição das dimensões dos poros aos 91 dias

### 4.3 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

A Tabela 4.3 apresenta um quadro resumo do cálculo da carga passante das leituras realizadas a cada trinta minutos, durante seis horas, conforme ASTM C 1202/97, em amostras cilíndricas de concreto com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, submetidas ao ensaio de penetração de íons cloreto para análise das camadas de 0 a 1 cm (Camada 1), de 2,5 a 3,5 cm (Camada 2) e de 5 a 6 cm de profundidade (Camada 3), e fornece dados para cálculo da carga passante em Coulombs (C) nos traços analisados nas distintas profundidades desde a superfície externa em direção ao interior.

A Figura 4.3 corresponde aos valores de carga passante, em Coulombs, para os traços estudados na idade de 91 dias.

É possível perceber, através da análise da Tabela 4.3, que há uma redução na penetração de cloretos com a diminuição da relação  $a/mc$  e com a substituição de parte do cimento por cinza volante, conforme apresentado em termos relativos na Figura 4.3 que segue. A redução da

penetração de cloretos em função da redução da relação a/mc também é observada nos estudos realizados por CERVO (2001) e DALRI (2002).

Tabela 4.3: Penetração de cloretos aos 91 dias

<b>Penetração de íons cloreto (Coulombs)</b>			
<b>Traço</b>	<b>Camada: 1</b>	<b>Camada: 2</b>	<b>Camada: 3</b>
<b>R 80</b>	4391	4659	5035
<b>R75 *</b>	4078	4345	4708
<b>CV 75</b>	1108	927	843
<b>CV 75 c</b>	1766	1458	1332
<b>R 45</b>	2269	2502	2768
<b>R40 *</b>	1982	2502	2449
<b>CV 40</b>	570	582	555
<b>CV 40 c</b>	1328	1097	925

\* valores obtidos por regressão estatística, pela equação de potência

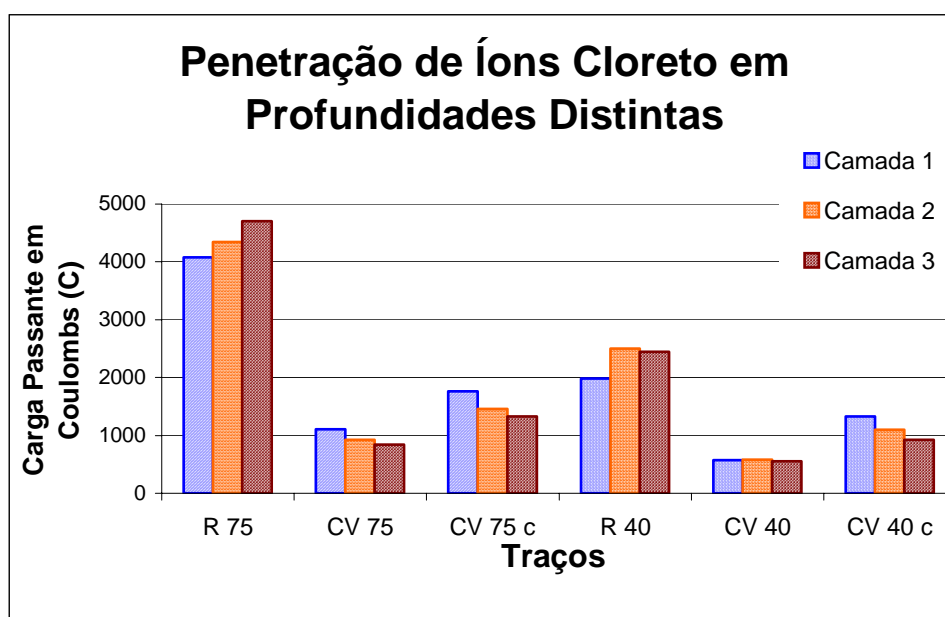


Figura 4.3: Permeabilidade a Cloretos aos 91 dias

A Tabela 1 da ASTM C 1202/97, representada nesta dissertação pela Tabela 4.4, define a penetração de cloretos que classifica o concreto a partir da carga passante medida em Coulombs.

Tabela 4.4: Penetrabilidade a íons cloreto baseado na carga passante  
 – Tabela 1 da ASTM C 1202/97 –

<b>Carga Passante (Coulombs)</b>	<b>Penetração de Cloretos</b>
> 4000	Alta
2000 a 4000	Moderada
1000 a 2000	Baixa
100 a 1000	Muito Baixa
< 100	Desprezível

Confrontando-se os resultados das Tabelas 4.4 e 4.5 e Figura 4.3, pode ser concluído que:

- para o concreto de traço **R 40** a permeabilidade a cloretos é considerada baixa para a Camada 1 e moderada nas demais camadas;
- para o concreto de traço **R 75** a permeabilidade a cloretos é considerada alta para as três camadas de profundidade;
- para o concreto de traço **CV 40** a permeabilidade a cloretos é muito baixa em todas profundidades analisadas;
- para o concreto de traço **CV 75** a permeabilidade a cloretos é baixa para a camada de 0 a 1 cm de profundidade e muito baixa para as demais camadas;
- para o concreto de traço **CV 40 c** a permeabilidade a cloretos é baixa nas Camadas 1 e 2 e muito baixa na Camada 3 e;
- para o concreto de traço **CV 75 c** a permeabilidade a cloretos é baixa em todas as camadas estudadas também.

Assim, podemos verificar que a utilização de adições minerais reduz a permeabilidade a cloretos quando comparados a traços de cimento Portland (neste estudo – R 40 e R 75) sem adições. O emprego de cinza volante nos traços de concreto, segundo informações de ISAIA (1995), refina os poros e obstrui os canais capilares reduzindo a penetração de cloretos.

De acordo com os estudos desenvolvidos por DALRI (2002), os resultados demonstram que misturas com teor de substituição de 50% de cimento por cinza volante apresentam, também, redução na penetração de íons cloreto; redução essa que não possui igual desempenho quando as misturas têm cal hidratada adicionada ao traço. A adição de cal pode aumentar a condutividade da solução aquosa dos poros, propiciada por uma maior concentração de OH, apesar da distribuição dos poros ser alterada por ações físicas e químicas, juntamente, aumentando a resistência à compressão do concreto. CERVO (2001) também concluiu em seus estudos que o decréscimo da penetração de cloretos pode ser explicado pela diminuição do teor de cal livre e da menor permeabilidade do concreto proporcionada pelas reações pozolânicas.

Pode-se ainda verificar que, para os traços dos concretos de referência a permeabilidade a cloretos aumenta do exterior para o interior da peça, enquanto os traços compostos por igual massa de cimento e cinza volante, com e sem adição de cal hidratada, têm no interior da peça menor permeabilidade a cloretos que na camada exterior, conforme a Figura 4.3 em termos absolutos e a Figura 4.4 em termos relativos. Mesmo sendo maior, a carga passante na camada mais exterior das peças de concreto com cinza volante, é considerada de baixa (1000 C a 2000 C) a muito baixa (100 C a 1000C), enquanto que, nos traços de referência, apresenta-se de moderada (2000 C a 4000 C) a alta (maior que 4000 C).

O maior teor de macroporos do concreto de referência, devido à cura ambiental dos protótipos, pode ter ocasionado uma maior interação com as modificações de umidade no meio ambiente e, possivelmente, ocasionado à solubilização de íons em contato com o exterior e, assim, aumentado à resistividade elétrica do concreto superficial, diminuindo a carga em Coulombs, em relação às camadas mais interiores. Outros fatores que podem ser levados em consideração são a menor da soma de



cátions (Si+Al+Fe) e a ausência do refinamento dos poros dos concretos de referência em relação aos de cinza volante.

Como a natureza catiônica da adição mineral é maior que a do cimento (maior teor de sílica, alumina e ferro), as misturas pozolânicas são mais suscetíveis a adsorver os íons e reduzir a migração de cloretos.

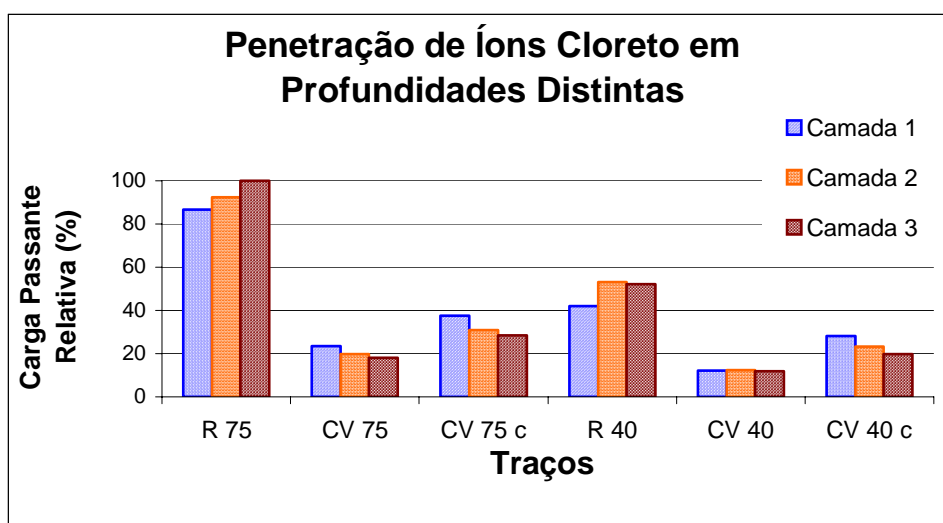


Figura 4.4: Permeabilidade relativa a íons cloreto, aos 91 dias

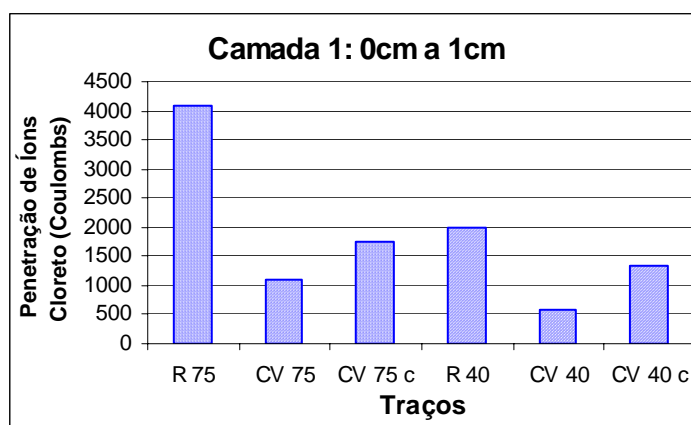


Figura 4.5: Penetração de Cloretos na Camada 1

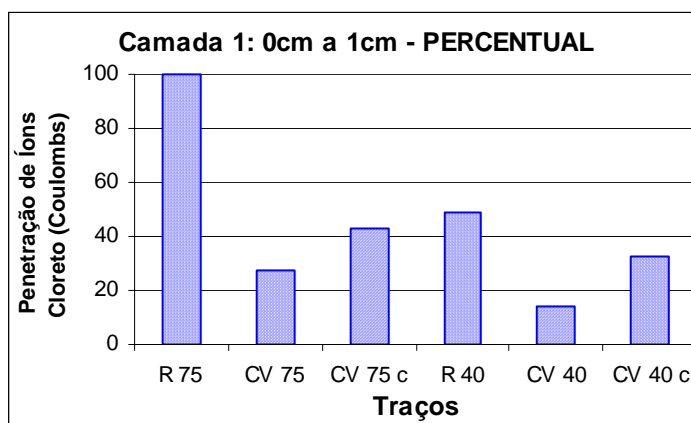


Figura 4.6: Penetração de cloretos na Camada 1 em porcentagem

As Figuras 4.5 e 4.6 referem-se a penetração de íons cloreto na camada mais superficial do concreto. Como pode ser observado, existe um decréscimo significativo de mais de 70% na penetração de cloretos nos traços com cinza volante, apesar desta redução ser inferior nos traços de cinza volante com adição de cal hidratada devido à reposição do teor de hidróxido de cálcio que é consumido na reação com a pozolana. Outra diminuição significativa na penetração de cloretos pode ser verificada pela redução da relação a/mc.

Os traços com adição de cal hidratada demonstram maior penetração de cloretos quando comparados aos traços de cimento Portland e cinza volante sem adição de cal, devido, provavelmente, a maior quantidade de cátions  $\text{Ca}^{++}$  na solução aquosa dos poros, que diminui a resistividade elétrica e aumenta a passagem de íons  $\text{Cl}^-$ .

A redução da relação a/mc promoveu, na camada de cobertura externa do concreto uma redução na penetração de cloretos de aproximadamente 51% para os traços de referência, 48% para os traços com substituição de cimento por cinza volante e, aproximadamente, 24% nos traços compostos por cimento, cinza volante e cal hidratada.

De maneira semelhante a camada exterior do concreto, na camada intermediária, denominada por Camada 2, variando de 2,5 a 3,5 cm de

profundidade, a permeabilidade a cloretos também apresenta uma diminuição nos traços compostos com cinza volante, o que está ilustrado nas Figuras 4.7 e 4.8.

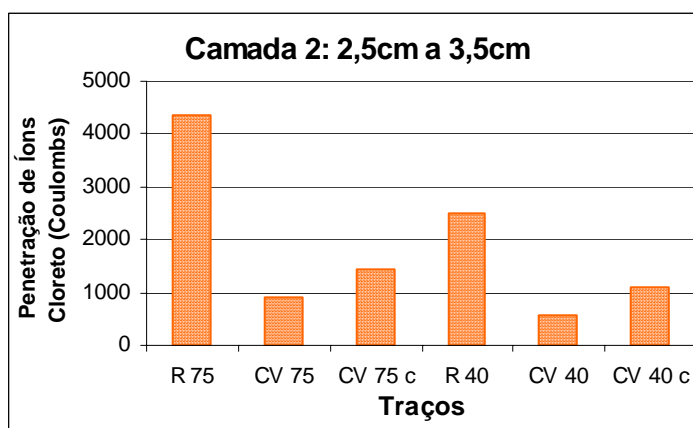


Figura 4.7: Penetração de Cloretos na Camada 2

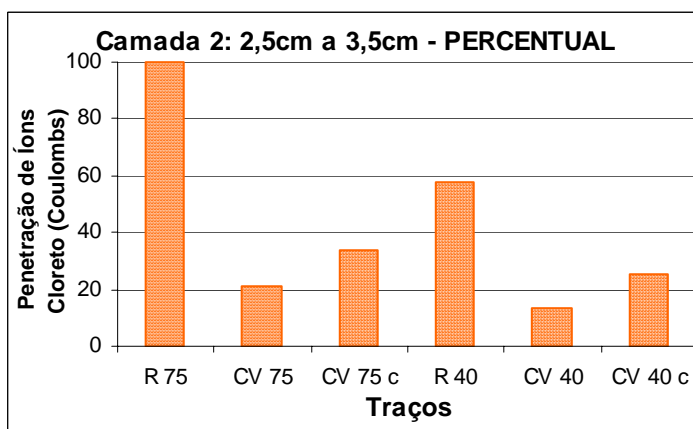


Figura 4.8: Penetração de cloretos na Camada 2 em porcentagem

Com a diminuição da relação  $a/mc$  na Camada 2 houve uma redução na penetração de cloretos de 42% nos traços de referência, 37% nos traços com substituição de 50% do cimento por cinza volante e de 24% nos traços com substituição de cimento por cinza volante e adição de cal.

Em comparação com as camadas mais exteriores, a camada mais interna do concreto estudada nesta dissertação, Camada 3, apresentou um comportamento similar as demais, fato que pode ser observado através das Figuras 4.9 e 4.10.

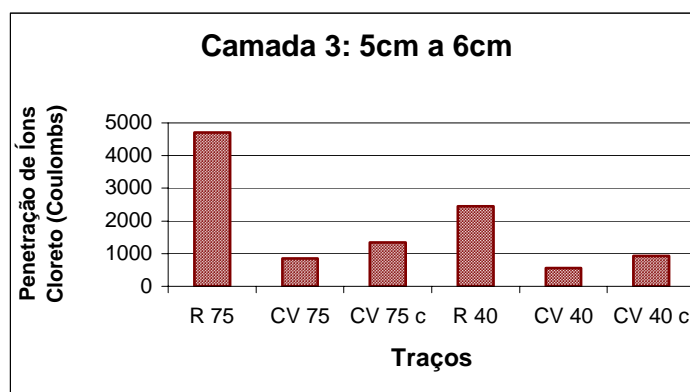


Figura 4.9: Penetração de Cloretos na Camada 3

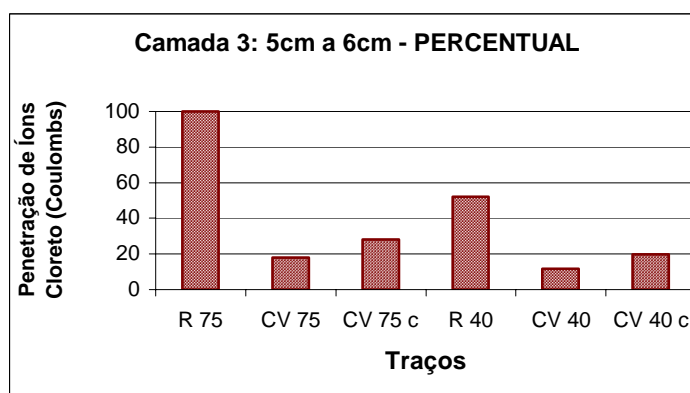


Figura 4.10: Penetração de cloretos na Camada 3 em porcentagem

Por fim, a redução da relação a/mc para Camada 3 apresentou um benefício relativo à diminuição da penetração de cloretos em 47% nos traços de referência, 34% nos traços com cinza volante e cimento e de 30% nos traços com cimento Portland, cinza volante e adição de cal hidratada.

Em todos os traços com cinza volante a penetração de cloretos foi inferior que nos traços de referência, fato também constatado por WINCK

(2002), observando-se que a rede de poros capilares se tornou mais fina e tortuosa. A diminuição pode ter sido ocasionada pela redução da permeabilidade propiciada pelas reações pozolânicas com o uso de cinza volante e, também, pela redução do teor de hidróxido de cálcio, haja vista que, quando se trata de traços com adição de 20% de cal hidratada, o hidróxido de cálcio é repostado e esta diminuição é prejudicada devido ao maior teor de íons na solução aquosa dos poros.

#### 4.4 PENETRAÇÃO DE CLORETOS X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para uma melhor análise da correlação entre as propriedades de resistência à compressão e penetração de cloretos foi construído o gráfico representado pela Figura 4.11, onde, pode ser verificado que à medida que aumenta a resistência à compressão do concreto, diminui a penetração de cloretos, como é demonstrado pelas equações lineares das retas que representam cada tipo de mistura.

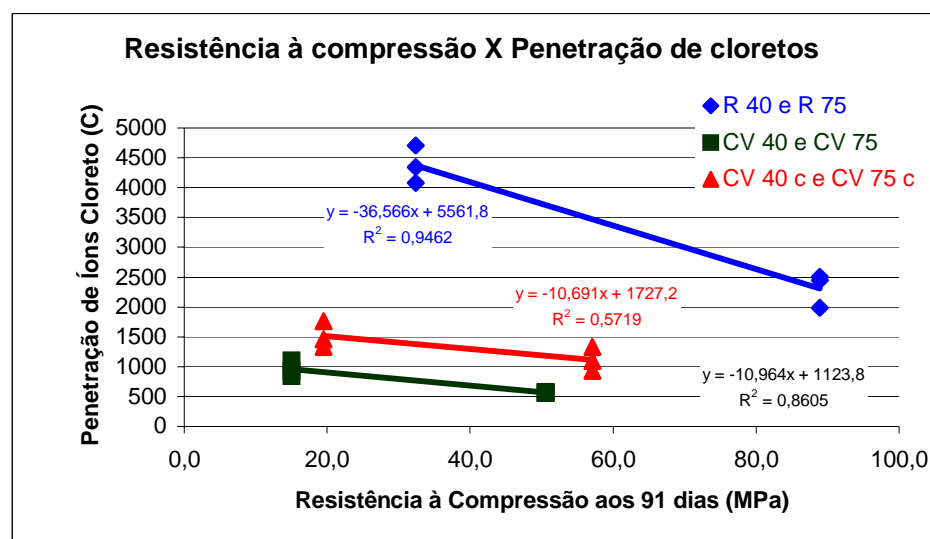


Figura 4.11: Resistência à compressão X Penetração de íons cloreto

Para os traços de referência R 40 e R 75 a carga passante decresce com o ganho de resistência propiciado pela redução a/mc, haja vista que o coeficiente angular da reta em questão é negativo. No entanto, para os traços com cinza volante, o decréscimo da penetração de cloretos é menos acentuado que nos traços de somente cimento Portland, porém a carga passante é inferior que nos traços de referência, tendo em vista que o valor absoluto do coeficiente angular das retas que representam essa situação é menor que o coeficiente angular da reta dos traços de referência.

Segundo WINCK (2002), para as misturas de referência também ocorre uma queda acentuada na penetração de cloretos com o aumento da resistência à compressão e, para os traços com substituição de cimento Portland por pozolanas, dentre elas a cinza volante, existe uma menor dependência entre a penetração de cloretos e a resistência à compressão, confirmando o estudo desenvolvido nesta dissertação.

ISAIA (1995), demonstra que pozolanas inseridas no traço do concreto têm maior predomínio sobre a redução da carga passante do que o aumento da resistência à compressão. Fato este, verificado na Figura 4.11, onde para os traços de cimento Portland e cinza volante, com ou sem adição de cal hidratada, apesar da resistência à compressão ser inferior as obtidas para os traços de referência, apresentam menor penetração de íons cloreto.

O nível de resistência à compressão, por si só, não assegura a durabilidade do concreto exposto a agentes agressores, como, por exemplo, os íons cloreto, não devendo ser considerado como o único parâmetro a ser analisado para especificar as características do concreto (WINCK, 2002).

#### 4.5 PENETRAÇÃO DE CLORETOS X DIMENSÃO DOS POROS

Através do estudo da penetração de cloretos nas três camadas de cada traço de concreto juntamente com o estudo da distribuição dos poros observa-se, na camada mais externa do revestimento, uma região de concreto com poros de maior diâmetro e interconectados com maior capacidade de permitir o ingresso de agentes agressores e de absorver água, conforme citações de PETRY (2004), constatando a existência do “efeito parede” entre a forma e a pasta.

A predominância do volume de macro e mesoporos na Camada 1, variando de 80% a 95% dos poros, aponta que na primeira camada existe a maior concentração de poros responsáveis pela permeabilidade, independentemente da relação a/mc e da mistura testada, e que os traços de baixa relação a/mc, apresentam menor volume de macro e mesoporos juntos.

Para os traços com cinza volante, com ou sem a adição de cal hidratada, a maior quantidade de carga passante ocorre na camada mais externa do concreto, o que pode ser explicado pelo maior diâmetro crítico dos poros na Camada 1.

O diâmetro crítico é considerado como sendo o valor a partir do qual os poros se tornam conectados e formam canais por onde a passagem da água é possível. Portanto, como demonstra a Figura 4.12, existe uma dependência entre a penetração de cloretos e o diâmetro crítico, sendo que essa dependência interfere mais na durabilidade do concreto do que a existente entre o volume de poros com diâmetro superior a 10 nm e a penetração de cloretos (Figura 4.13), haja vista da penetrabilidade de agentes agressores depender mais da conectabilidade dos poros do que propriamente do tamanho dos mesmos.

Na figura 4.12 existe tendência, não muito significativa de aumento da penetração de cloretos com o diâmetro crítico, mas não detectada estatisticamente. Na figura 4.13 a dispersão é menor e mostra uma

tendência mais nítida de aumento de íons cloreto para poros com diâmetro maior que 10 nm.

Em todos os gráficos de correlação entre duas variáveis, quando a dependência estatística não é significativa a equação da linha de tendência e o  $R^2$  foram suprimidos.

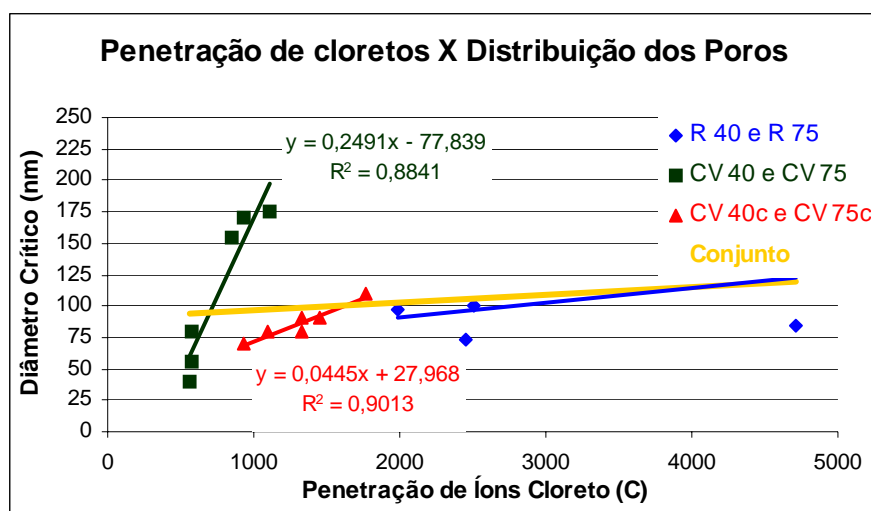


Figura 4.12: Penetração de cloretos X Diâmetro crítico

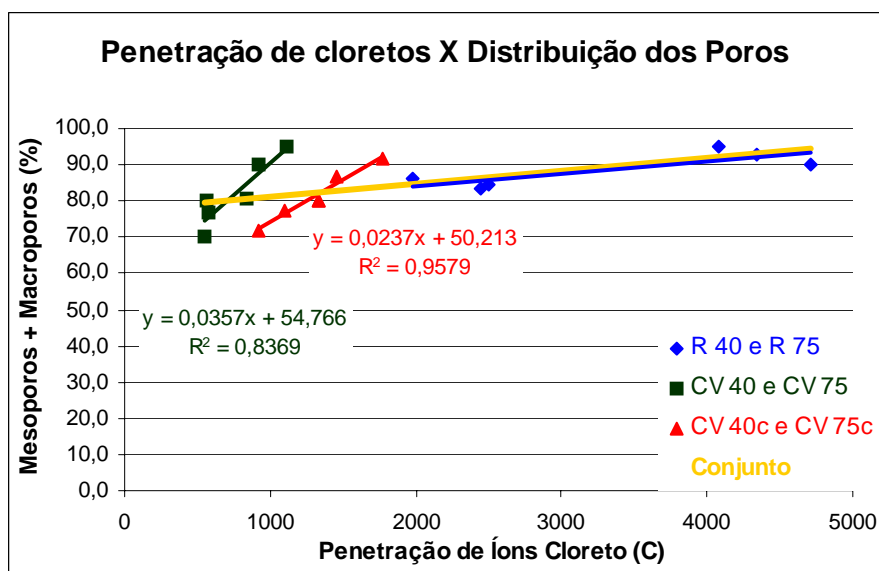


Figura 4.13: Penetração de cloretos X Mesoporos + Macroporos



Analisando a Figura 4.14, verifica-se que quanto maior for o volume de poros do gel no concreto menor será a penetração de íons cloreto: fato observado nos traços com cinza volante, devido ao refinamento dos poros proporcionado pela pozolana.

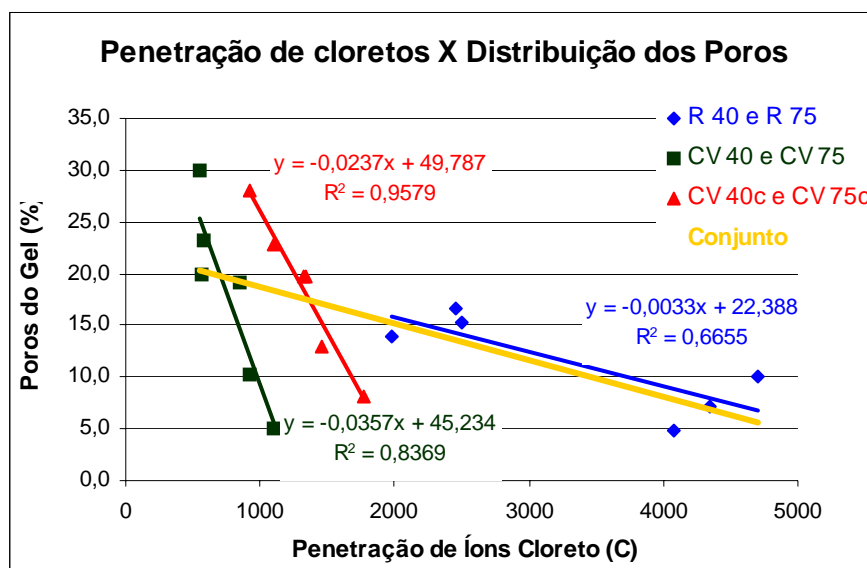


Figura 4.14: Penetração de cloretos X Poros do gel

Comparando as Figuras 4.13 e 4.14, através da análise das tendências, confirma-se que os poros capilares, de diâmetro acima de 10nm, influem na permeabilidade da água, uma vez que a penetração de íons cloreto aumenta com o maior volume de mesoporos e macroporos, confirmando que, para menores quantidades de poros do gel, encontra-se maiores valores de penetração de cloretos.

Quanto maior a presença de poros do gel maior é o volume de mesoporos e menor o volume de macroporos na estrutura do concreto (conforme Figura 4.2), melhorando a distribuição destes: assim, conforme a Figura 4.15, observa-se que o volume de mesoporos é inversamente proporcional a penetração de íons cloretos, da mesma forma que na Figura 4.14 para os poros de gel.

Inversamente ao constatado para os poros do gel e para os

mesoporos, a penetração de cloretos é diretamente proporcional ao volume de macroporos no concreto, ou seja, quanto maior a quantidade de poros com diâmetro maior que 50 nm maior a possibilidade de agentes agressivos penetrarem no concreto. Essa proporcionalidade, entre macroporos e penetração de cloretos, para os traços estudados, pode ser verificada na Figura 4.16.

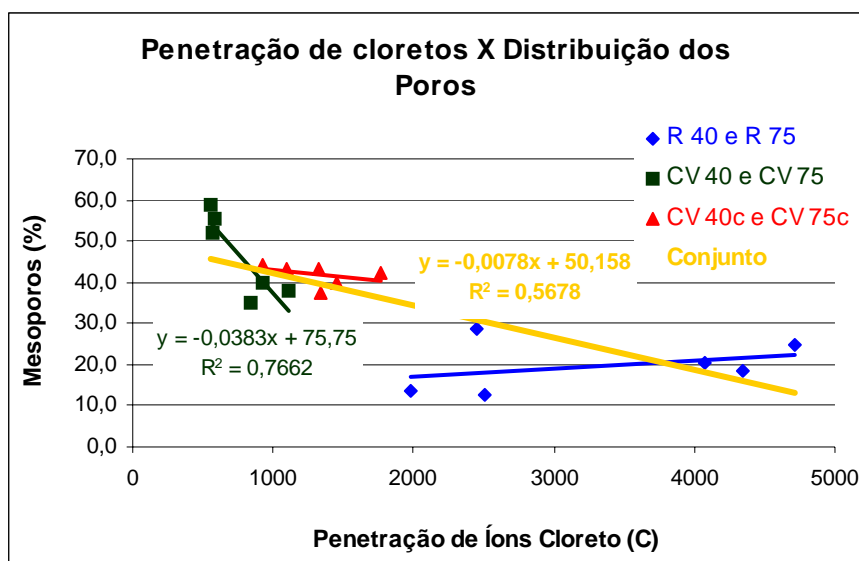


Figura 4.15: Penetração de cloretos X Mesoporos

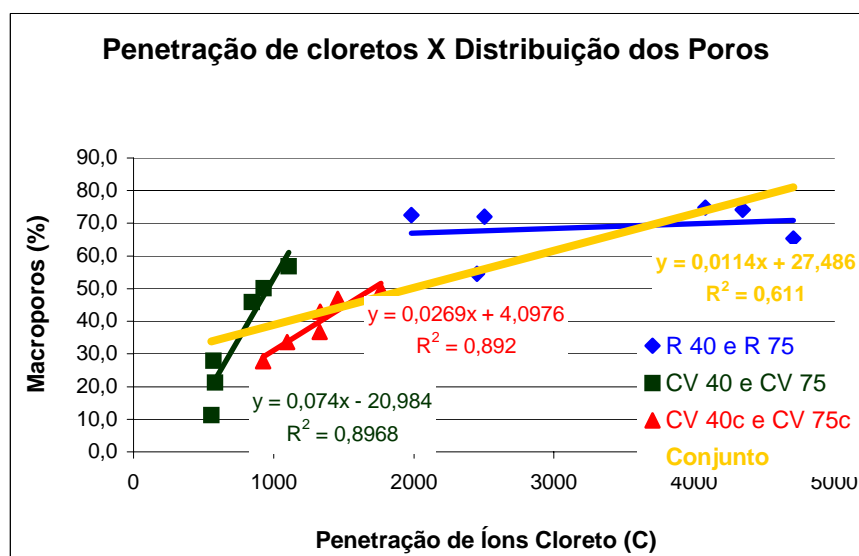


Figura 4.16: Penetração de cloretos X Macroporos

De acordo com os relatos de PETRY (2004), os concretos com menor relação  $a/mc$  apresentam menor influência da ação da água e agente deletérios por ela introduzidos, haja vista terem absorvido menor quantidade de água que os de maior relação  $a/mc$ . Esta comparação é aceita uma vez que os traços investigados são iguais, os protótipos foram moldados e curados juntamente e os ensaios foram realizados na mesma data.

Observa-se nas figuras 4.12 a 4.16 que o valor absoluto dos coeficientes angulares das retas das misturas com cinza volante (sem e com cal) são maiores do que os das misturas de referência. Esta tendência revela que a penetração de cloretos nos traços com cinza volante depende em maior grau da estrutura dos poros (refinamento) do que os traços cimento Portland que apresentam textura de poros mais grossa. Nos traços com adição de cal este comportamento não é tão acentuado quanto nas misturas sem cal.

#### **4.6 TEOR DE CLORETOS TOTAIS RETIDOS**

Os valores percentuais da concentração de cloretos totais retidos, nas três profundidades estudadas, em relação à massa de concreto de todas as misturas estão apresentados na Tabela 4.5.

Para a análise do teor de cloretos totais retidos no concreto o valor crítico de 0,1% sobre a massa de concreto foi ultrapassado, conforme pode ser observado na Figura 4.17. O traço que apresentou melhor resistência ao ingresso de cloretos foi o CV 40 devido ao refinamento dos poros promovido pela cinza volante e da baixa relação  $a/mc$ . Os traços de relação  $a/mc = 0,75$  apresentam a maior propensão ao ingresso de íons cloretos. Como pode ser observado, o teor de cloretos totais nos traços de

concreto estudados é superior para as misturas com relação  $a/mc = 0,75$  quando comparados com os traços de relação  $a/mc = 0,40$ .

Tabela 4.5: Teor de cloretos percentuais retidos no concreto por camadas

<b>Traços</b>	<b>Profundidades</b>	<b>Concentração Cl<sup>-</sup> totais (%)</b>
<b>R 45</b>	Camada 1: 0cm a 1cm	0,087
	Camada 2: 2,5cm a 3,5cm	0,162
	Camada 3: 5cm a 6cm	0,211
<b>R 40 *</b>	Camada 1: 0cm a 1cm	0,071
	Camada 2: 2,5cm a 3,5cm	0,145
	Camada 3: 5cm a 6cm	0,199
<b>CV 40</b>	Camada 1: 0cm a 1cm	0,087
	Camada 2: 2,5cm a 3,5cm	0,112
	Camada 3: 5cm a 6cm	0,112
<b>CV 40 c</b>	Camada 1: 0cm a 1cm	0,129
	Camada 2: 2,5cm a 3,5cm	0,145
	Camada 3: 5cm a 6cm	0,228
<b>R 80</b>	Camada 1: 0cm a 1cm	0,240
	Camada 2: 2,5cm a 3,5cm	0,278
	Camada 3: 5cm a 6cm	0,278
<b>R 75 *</b>	Camada 1: 0cm a 1cm	0,214
	Camada 2: 2,5cm a 3,5cm	0,262
	Camada 3: 5cm a 6cm	0,270
<b>CV 75</b>	Camada 1: 0cm a 1cm	0,284
	Camada 2: 2,5cm a 3,5cm	0,339
	Camada 3: 5cm a 6cm	0,306
<b>CV 75 c</b>	Camada 1: 0cm a 1cm	0,147
	Camada 2: 2,5cm a 3,5cm	0,224
	Camada 3: 5cm a 6cm	0,191

\* valores obtidos por regressão estatística, pela equação de potência

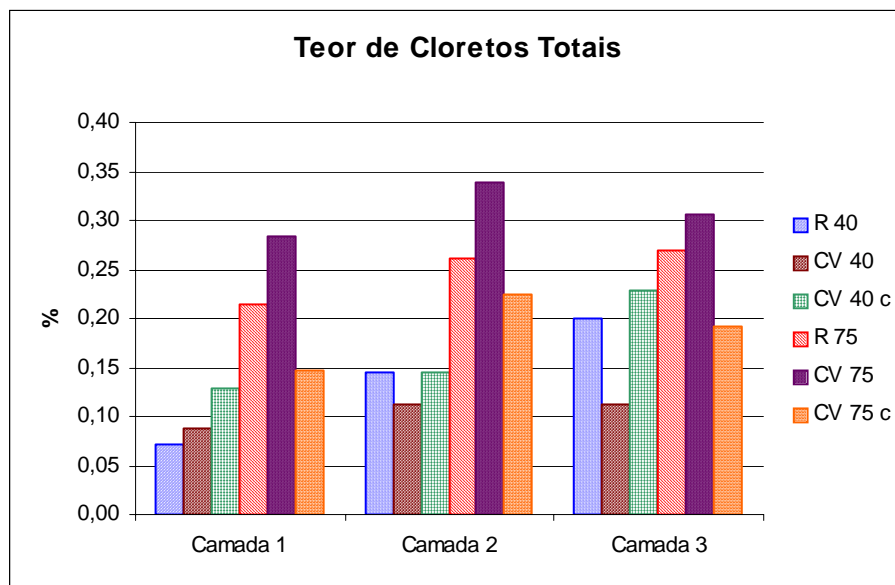


Figura 4.17: Teor de cloretos totais no concreto

A Figura 4.18 apresenta o comportamento do teor de cloretos totais para os traços com relação  $a/mc = 0,40$ . Nesta figura pode ser verificado que, para todos os traços, o teor de cloretos retidos é crescente do exterior para o interior das peças de concreto. O traço CV 40 c tem o teor de cloretos retidos superior ao outros dois traços (R 40 e CV 40), nas Camadas 1 e 3, devido a reposição de hidróxido de cálcio.

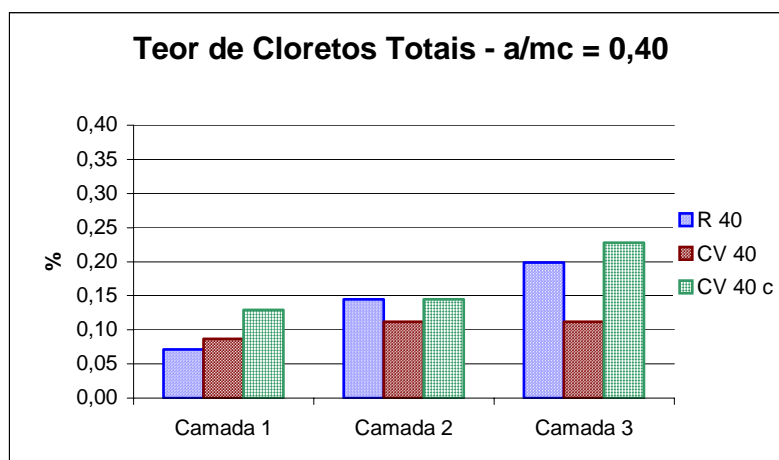


Figura 4.18: Teor de cloretos totais após o ensaio de penetração de cloretos nos traços de baixa relação  $a/mc$ , nas camadas 1, 2 e 3

Por sua vez, a Figura 4.19, apresenta o teor de cloretos totais dos traços com relação  $a/mc = 0,75$ . Nesta figura observa-se que o teor de cloretos totais no concreto após o ensaio de penetração para o traço com 50% de cinza volante (CV 75) mostrou-se superior ao traço de referência. Porém, quando cal hidratada foi adicionada a mistura o teor tornou-se inferior ao concreto de referência e ao concreto com cinza volante sem cal.

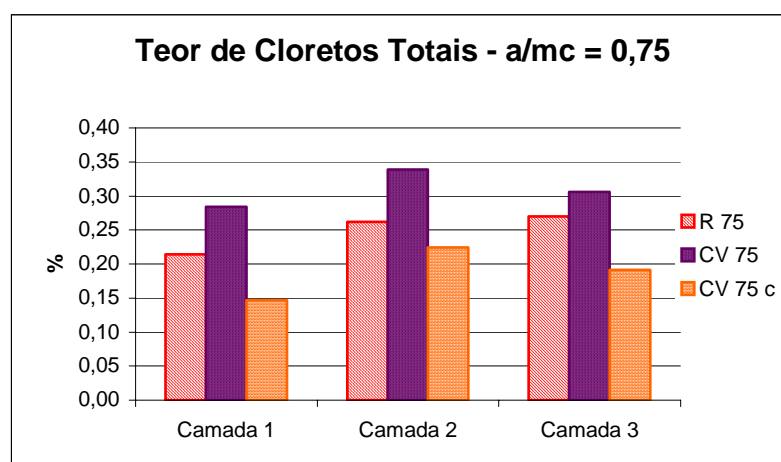


Figura 4.19: Teor de cloretos totais após o ensaio de penetração de cloretos nos traços de alta relação  $a/mc$ , nas camadas 1, 2 e 3

Nas três figuras seguintes, denominadas 4.20, 4.21 e 4.22, pode ser verificado que a relação  $a/mc$  influencia no teor de cloretos totais retidos no concreto, pois quanto maior a quantidade de água maior a concentração de íons cloreto.

Na figura 4.22, pode ser verificado que, exceto para o caso dos traços com adição de 20% de cal hidratada (CV 40 c e CV 75 c), na Camada 3, onde a penetração de íons cloreto no traço de relação  $a/mc = 0,4$  é superior ao teor do traço de  $a/mc = 0,75$ , a penetração de cloretos tem o mesmo comportamento dos demais traços.

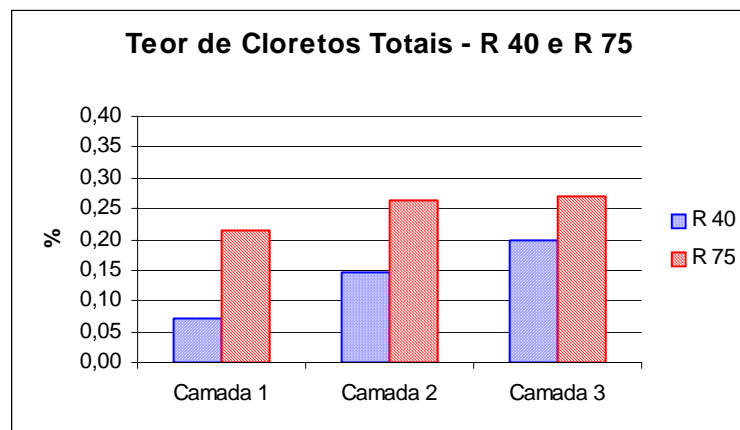


Figura 4.20: Teor de cloretos totais nos traços de referência

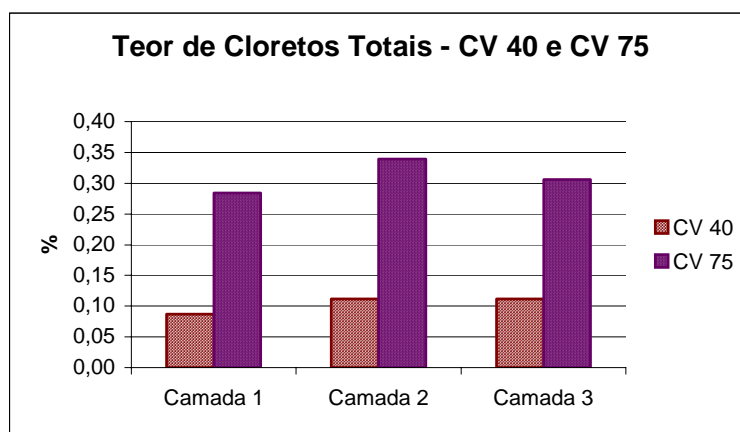


Figura 4.21: Teor de cloretos totais nos traços CV 40 e CV 75

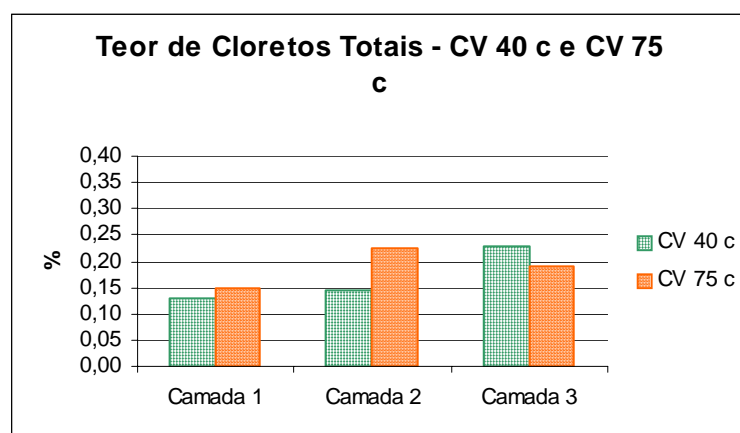


Figura 4.22: Teor de cloretos totais nos traços com cimento Portland, cinza volante e com adição de 20% de cal hidratada

Os traços com adição de cal hidratada, CV 40 c e CV 75 c, foram os que apresentaram menos diferença entre o teor de cloretos retidos quando comparados entre si, com diferentes relações a/mc.

O pH da água intersticial do concreto varia entre 12 e 13, o que confere ao concreto um caráter básico, gerando um meio adequado para a passivação de onde provém a importante e eficaz proteção química contra a corrosão das armaduras.

De acordo com DALRI (2002), a adição de cal hidratada resulta em aumento na retenção total de cloretos, porém como pode ser verificado nas Figuras 4.18 e 4.19, somente para o traço com relação a/mc = 0,40 essa afirmação é confirmada, haja vista que no traço CV 75 c o teor de cloretos retidos é inferior ao traço de referência R 75. A provável causa desta discrepância entre os resultados dos traços com relação a/mc 0,40 e 0,75 se dá, possivelmente, pela melhor atuação da cinza volante no refinamento dos poros do concreto com a/mc = 0,75, inibindo o ingresso de cloretos na estrutura.

#### **4.7 TEOR DE CLORETOS X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

A Figura 4.23 apresenta a correlação entre as propriedades de resistência à compressão e teor de cloretos totais retidos no concreto, onde, pode ser verificado que à medida que aumenta a resistência à compressão do concreto diminui a concentração de cloretos, como é demonstrado pelas equações lineares das retas que representam essa correlação para os traços de referência e para os traços com cinza volante sem adição de cal hidratada. Os traços denominados CV 40 c e CV 75 c por não apresentarem boa correlação entre as variáveis tiveram a equação linear da reta e o  $R^2$  suprimidos do gráfico.



Assim, pode-se admitir que a resistência à compressão é uma das formas de garantir a qualidade do concreto, pois quanto maior sua resistência mecânica menor será a tendência de concentrações elevadas de cloretos totais retidos.

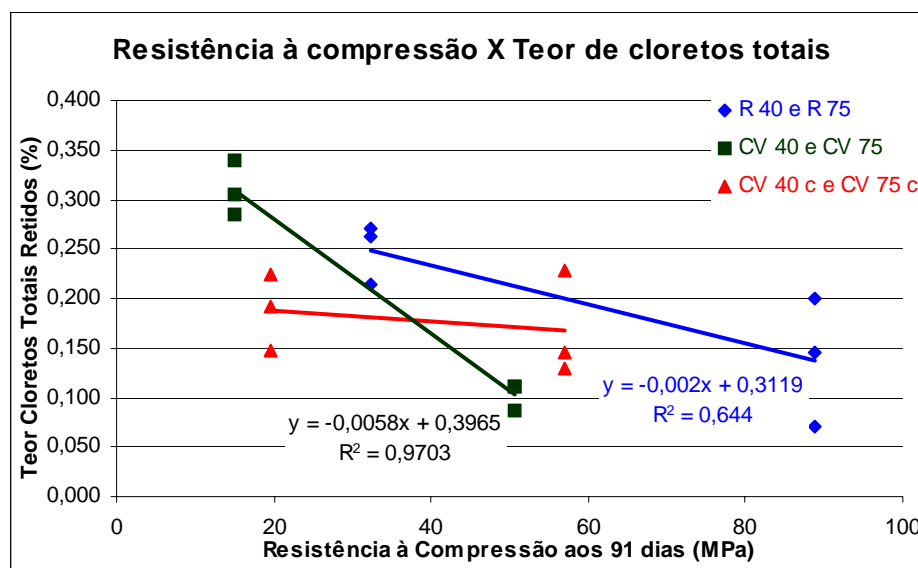


Figura 4.23: Teor de cloretos retidos X Resistência à compressão

#### 4.8 TEOR DE CLORETOS X DIMENSÃO DOS POROS

A primeira camada dos traços de concreto estudados apresenta maior concentração de poros responsáveis pela permeabilidade (Tabela 4.3) independentemente da relação  $a/mc$  e da mistura testada, e, os traços de baixa relação  $a/mc$  apresentam menor volume de macro e mesoporos juntos.

Na medida em que são analisados os coeficientes angulares das retas que contém os dados de todos os traços analisados com as respectivas equações de regressão linear, para as variáveis: teor de cloretos totais retidos e diâmetro crítico (Figura 4.24) e volume de poros

capilares e o teor de cloretos totais (Figura 4.25), a dependência entre essas variáveis para a primeira situação é mais acentuada que a existente na segunda situação.

A Figura 4.26 demonstra que quanto maior for o volume de poros do gel no concreto menor será o teor de cloretos totais, o que pode ser devido ao refinamento dos poros proporcionado pela pozolana nos traços com cinza volante.

Através da análise das linhas de tendência nas Figuras 4.25 e 4.26, verifica-se que os poros com diâmetro acima de 10nm influem na permeabilidade da água, haja vista que o teor de cloretos retidos aumenta com o aumento do volume de mesoporos e macroporos; a reta representativa da situação que envolve os poros do gel (Figura 4.26) tem coeficiente angular negativo e é de mesmo módulo que a reta representativa da situação de mesoporos e macroporos juntos (Figura 4.25), ou seja, para menores quantidades de poros do gel maior o teor de cloretos totais retidos no concreto. As retas que envolvem os volumes de poros do gel e poros capilares têm inclinação invertida devido ao somatório desses volumes equivaler a 100% da porosidade do concreto.

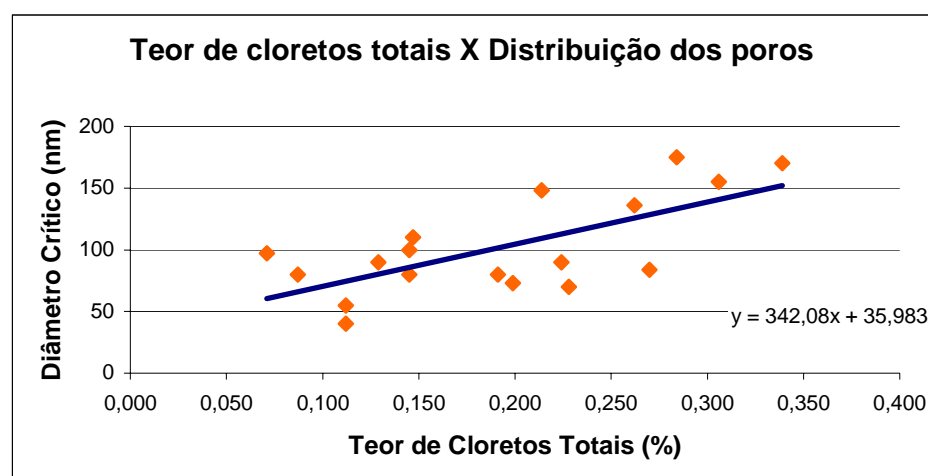


Figura 4.24: Teor de cloretos retidos X Diâmetro crítico

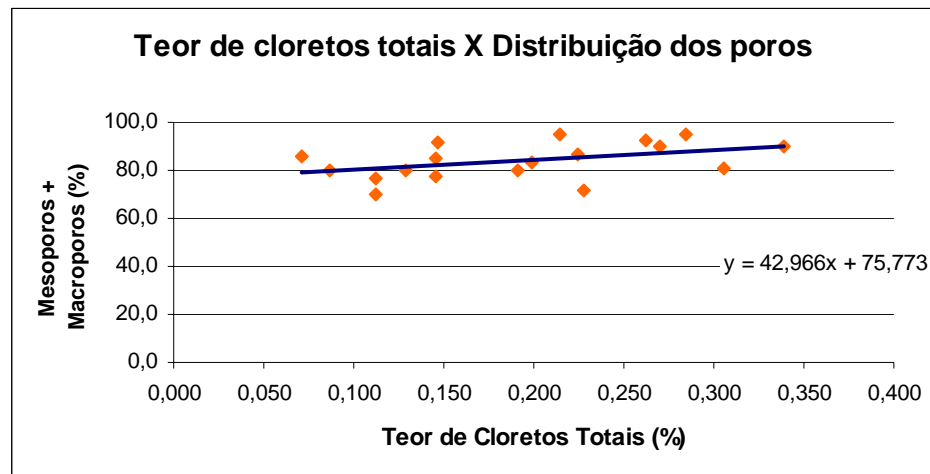


Figura 4.25: Teor de cloretos retidos X Mesoporos + Macroporos

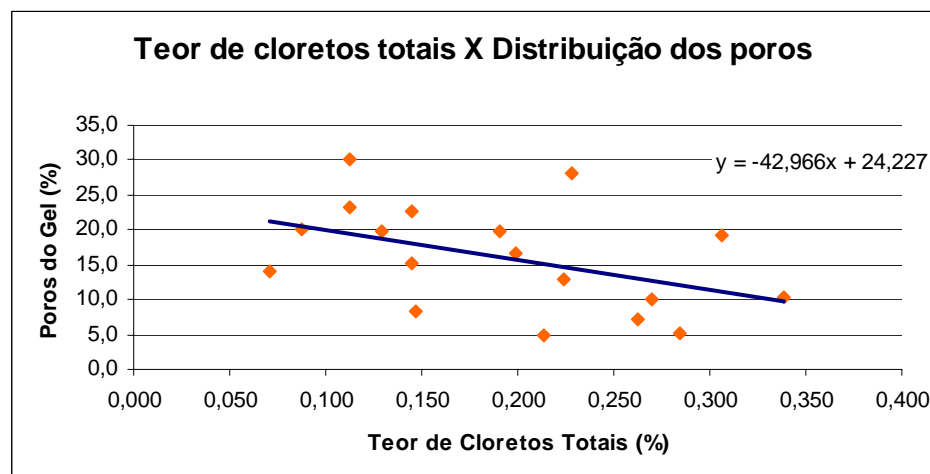


Figura 4.26: Teor de cloretos retidos X Poros do gel

As figuras 4.24, 4.25 e 4.26 não apresentam o valor de  $R^2$  devido a correlação entre as variáveis ser fraca, com  $r < 0,7$ .

#### 4.9 TEOR DE CLORETOS X PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Para demonstrar a correlação entre o teor de cloretos totais e a penetração de íons cloreto no concreto, foi realizada uma análise através

da Figura 4.27 onde se constatou que à medida que a penetração de cloretos no concreto aumenta, cresce o teor de cloretos totais retidos. Porém, quando as diferentes misturas estudadas são analisadas independentemente, verifica-se que existe uma forte correlação para os traços de referência e para os traços com cinza volante sem adição de cal, para os traços CV 40 c e CV 75 c a correlação é baixa.

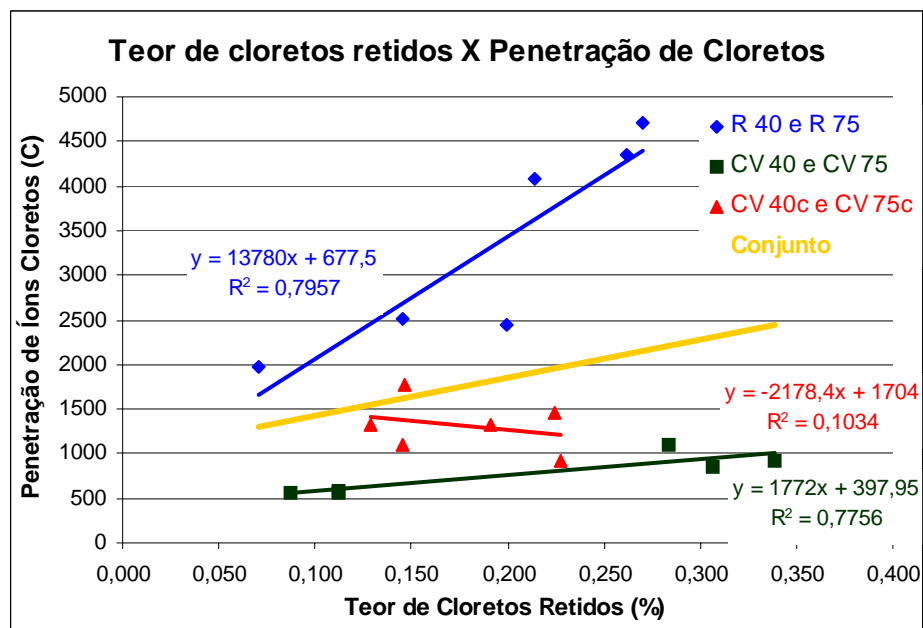


Figura 4.27: Teor de cloretos retidos X Penetração de cloretos

De acordo com ISAIA (1995), CERVO (2001) e WINCK (2002), apesar do ensaio acelerado de penetração de cloretos, conforme e ASTM C 1202/97, englobar todo o fluxo iônico, e não somente o de cloretos, pode ser considerada como parâmetro confiável para avaliar a quantidade de cloretos retidos no concreto.

#### 4.10 RELAÇÃO $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$

Na idade de 91 dias foi determinada a relação iônica a partir de amostras coletadas dos testemunhos submetidos ao ensaio acelerado de penetração de cloretos, conforme a ASTM C 1202/97. Dessas amostras foram determinados os valores do teor de cloretos totais retidos e pH para o cálculo da relação cloreto/hidroxila de cada um dos traços de concreto estudados, em cada uma das três profundidades, conforme está apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Relação Iônica após o ensaio de penetração de cloretos

Traço	Camada	Valores Totais			
		pH	OH <sup>-</sup> (mg/kg)	Cl <sup>-</sup> total (mg/kg)	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>
<b>R 45</b>	1	12,65	759,72	871,53	1,15
	2	12,61	692,87	1615,96	2,33
	3	12,51	550,37	2112,25	3,84
<b>R 40*</b>	1	12,66	770,54	708,19	0,92
	2	12,60	677,10	1445,65	2,14
	3	12,49	522,56	1996,07	3,82
<b>C 40</b>	1	12,62	709,01	871,53	1,23
	2	12,62	709,01	1119,67	1,58
	3	12,62	709,01	1119,67	1,58
<b>CV 40 c</b>	1	12,78	1024,83	1285,10	1,25
	2	12,65	759,72	1450,53	1,91
	3	12,62	709,01	2277,68	3,21
<b>R 80</b>	1	12,62	709,01	2401,93	3,39
	2	12,65	759,72	2784,62	3,67
	3	12,62	709,01	2784,62	3,93
<b>R 75*</b>	1	12,62	709,01	2143,75	3,02
	2	12,65	759,72	2619,72	3,45
	3	12,61	692,87	2699,62	3,90
<b>CV 75</b>	1	12,65	759,72	2839,29	3,74
	2	12,62	709,01	3385,99	4,78
	3	12,62	709,01	3057,97	4,31
<b>CV 75 c</b>	1	12,50	537,84	1472,54	2,74
	2	12,60	677,10	2237,92	3,31
	3	12,62	709,01	1909,90	2,69

\* valores obtidos por regressão estatística

Na Figura 4.28 pode ser observado que somente o traço CV 75 ultrapassou a relação iônica do traço de referência R 75 em todas as profundidades. Os traços com relação  $a/mc = 0,40$  quando compostos por cinza volante apresentam relação  $Cl^-/OH^-$  inferior aos valores do traço de referência R 40.

O aumento da relação iônica no traço com cinza volante CV 75, pode ser explicado pelo consumo de hidróxido de cálcio pelas reações da pozolana.

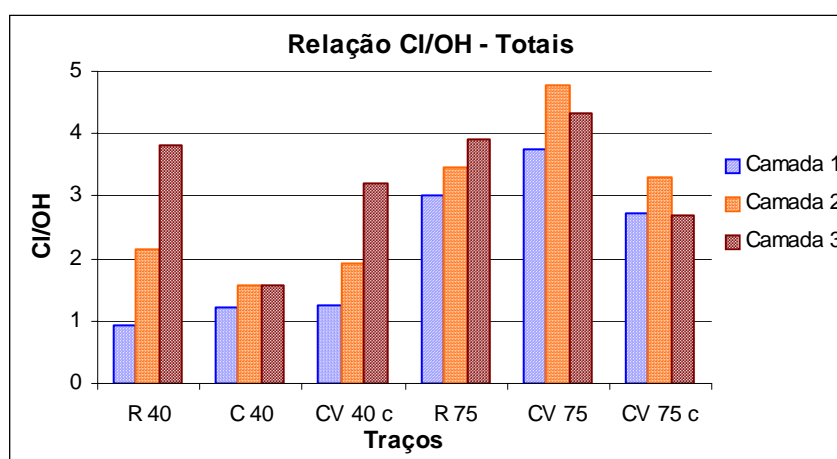


Figura 4.28: Relação iônica após o ensaio de penetração de cloretos

Conforme os estudos de DALRI (2002), as misturas com cinza volante apresentaram relações  $Cl^-/OH^-$  inferiores as dos traços de referência.

De acordo com ISAIA (1995), a reação entre a cinza volante e hidróxido de cálcio não reduziu o pH para valores inferiores ao concreto de referência, fato também observado por SHI (1998), onde o menor valor encontrado para o pH foi 12,8. No entanto, é confirmado que o uso de pozolanas no concreto proporcionam uma maior proteção a armadura do que somente quando utilizado o concreto de cimento Portland, tendo em vista serem a maioria dos valores da relação  $Cl^-/OH^-$  dos traços com cinza volante inferiores a dos traços R 40 e R 75, excetuando o traços CV 40 na

Camada 1, CV 40 c na Camada 1 e CV 75 em todas camadas. O aumento das relações iônicas nos traços com cinza volante em comparação ao traço de referência, pode ser explicado pelo maior consumo de CH.

Para CERVO (2001) uma das misturas com cinza volante apresentou valor da relação  $Cl^-/OH^-$  superior ao traço de referência, conjunto de quinze traços estudados. Entretanto, para ISAIA (1995) todas as misturas com cinza volante apresentaram relação  $Cl^-/OH^-$  inferiores o traço de referência.

A relação iônica máxima recomendada pela bibliografia igual a 0,6 (THOMAS, 1996) foi ultrapassada por todas as misturas em todas as profundidades investigadas. Somente o traço R 40 na Camada 1 apresentou relação  $Cl^-/OH^-$  inferior a 1. Conforme CERVO (2001) dois terços dos traços de referência e dos traços com cinza volante apresentaram valores da relação iônica superiores a 1.

Conforme ISAIA (1995) e CERVO (2001), a substituição de 50% de cimento por cinza volante não é prejudicial a despassivação da armadura, pois propicia melhores condições de proteção em ambientes com presença de cloretos, haja vista que os valores encontrados para essas relações  $Cl^-/OH^-$  na maioria das profundidades estudadas não ultrapassam os valores dos traços de referência.

Os traços de referência, R 40 e R 75, apesar de apresentarem relação  $Cl^-/OH^-$  aproximadas na Camada 3, demonstram que quanto menor a relação a/mc maior é a proteção da armadura, pois no traço R 40 é observado um acréscimo acentuado da relação  $Cl^-/OH^-$  com o aumento da profundidade, enquanto que no traço R 75 a relação  $Cl^-/OH^-$  na Camada 1 é três vezes a do traço R 40 na mesma camada, demonstrando um crescimento dessa relação com o aumento da profundidade menos acentuado.

#### 4.11 RELAÇÃO $Cl^-/OH^-$ X PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Da correlação entre a relação  $Cl^-/OH^-$  e a penetração de íons cloreto no concreto foi possível constatar que somente para os traços CV 40 e CV 75 essa correlação é confiável e diretamente proporcional, ou seja, à medida que a penetração de cloretos no concreto aumenta, aumenta a relação iônica, como é visualizado na Figura 4.29.

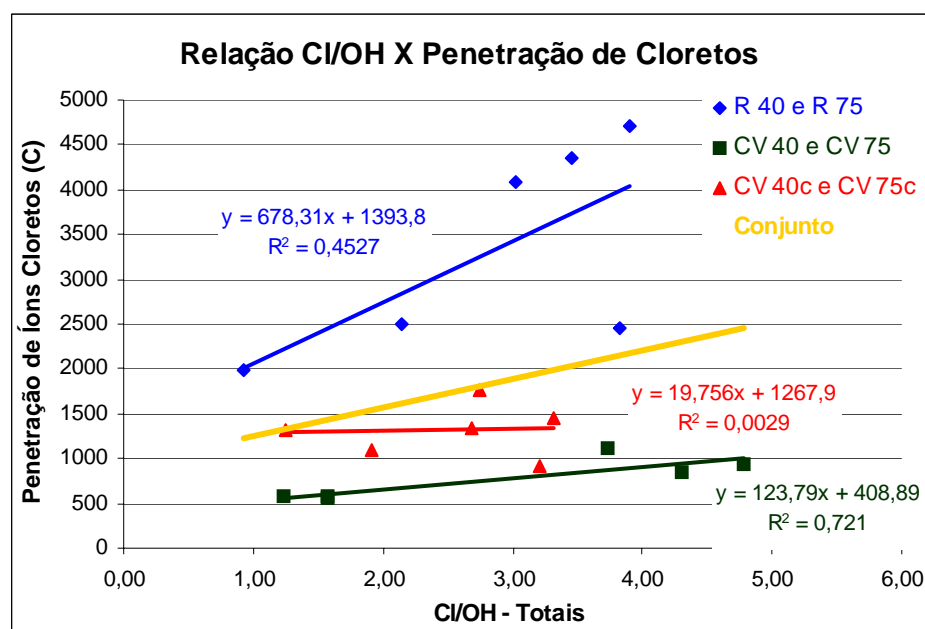


Figura 4.29: Relação  $Cl^-/OH^-$  X Penetração de cloretos

Para os traços de referência (R 40 e R 75) e para os traços com cal hidratada (CV 40 c e CV 75 c) a relação  $Cl^-/OH^-$  aumenta à medida que a penetração de cloretos aumenta, mas nada é possível afirmar uma vez que a correlação  $r$  é menor que 0,7 ( $R^2 < 0,49$ ).



## 4.12 RELAÇÃO $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ X TEOR DE CLORETOS

Na Figura 4.30 está apresentada a correlação entre as variáveis “relação iônica” e “teor de cloretos retidos”, cujas amostras foram coletadas dos testemunhos, extraídos das peças de concreto aos 91 dias, expostos a penetração acelerada de íons cloretos, conforme as recomendações da ASTM C 1202/97.

Já que o pH das amostras de concreto, independentemente da mistura e da situação de coleta (antes ou depois do ensaio de penetração de cloretos), não varia significativamente e que a correlação entre as variáveis pode ser considerada forte ( $r > 0,7$ ), conclui-se que as relações iônicas encontradas são diretamente proporcionais ao teor de cloretos encontrados e praticamente independem do tipo de mistura.

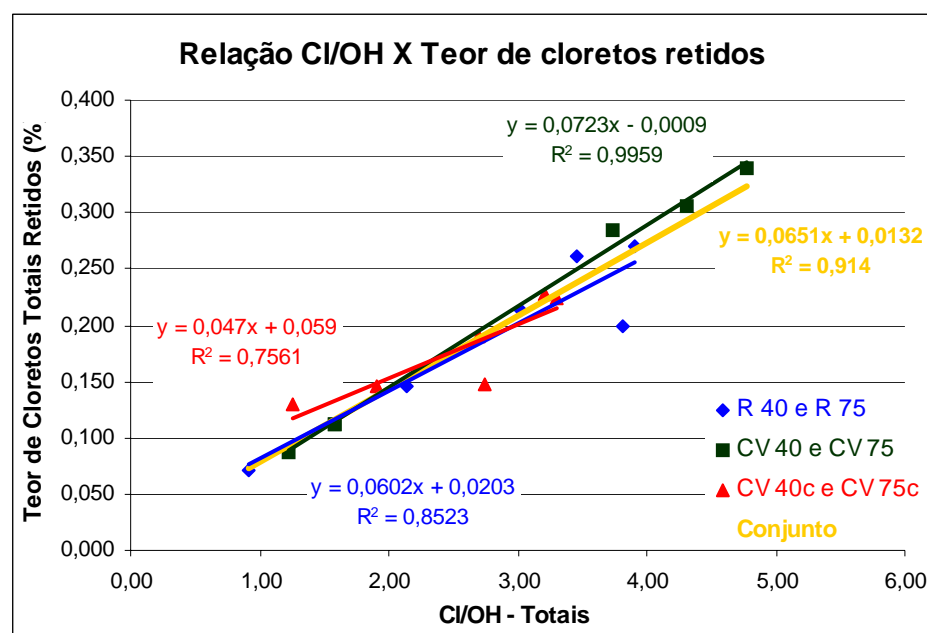


Figura 4.30: Relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  – total X Teor de cloretos totais retidos

### 4.13 ÍONS PRESENTES NA SOLUÇÃO DOS POROS DO CONCRETO

A Tabela 4.7 apresenta, discriminadas, as concentrações dos íons encontrados nas amostras pulverizadas coletadas antes do concreto ser submetido ao ensaio de penetração de cloretos, que serviram de base para o cálculo da condutividade elétrica específica dos traços de concreto estudados nesta dissertação. O íon  $\text{Cl}^-$  livre, também constante na solução aquosa dos poros, foi desconsiderado devido seu teor ser significativamente inferior aos demais íons presentes, não alterando de modo representativo o cálculo da condutividade elétrica específica.

Tabela 4.7: Teores de concentração no concreto

Traço	Camada	pH	Concentração (Ci) mmol/l				
			$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{SO}_4^{--}$	$\text{OH}^-$
R 45	1	12,57	4,750	0,214	0,903	0,002	37,154
	2	12,61	3,384	0,234	0,886	0,003	40,738
	3	12,64	3,232	0,232	0,833	0,003	43,652
R 40*	1	12,57	4,862	0,220	1,011	0,002	37,154
	2	12,62	3,184	0,235	0,947	0,003	42,105
	3	12,66	3,044	0,234	0,865	0,003	45,544
CV 40	1	12,51	1,244	0,191	1,045	0,003	32,359
	2	12,49	2,453	0,254	0,898	0,001	30,903
	3	12,49	0,666	0,243	1,135	0,005	30,903
CV 40 c	1	12,64	4,176	0,209	1,522	0,009	43,652
	2	12,64	4,058	0,325	1,899	0,009	43,652
	3	12,62	3,562	0,338	1,884	0,009	41,687
R 80	1	12,57	4,237	0,189	0,521	0,003	37,154
	2	12,54	4,559	0,229	0,641	0,001	34,674
	3	12,55	4,328	0,224	0,691	0,001	35,481
R 75*	1	12,57	4,292	0,192	0,554	0,003	37,154
	2	12,55	4,409	0,230	0,665	0,001	35,307
	3	12,56	4,189	0,225	0,706	0,001	36,316
CV 75	1	11,73	1,505	0,150	0,262	0,052	5,370
	2	12,38	1,622	0,231	0,492	0,001	23,988
	3	12,46	1,209	0,225	0,407	0,005	28,840
CV 75 c	1	11,78	3,602	0,171	0,472	0,028	6,026
	2	12,58	3,206	0,271	0,714	0,002	38,019
	3	12,60	2,719	0,261	0,731	0,004	39,811

\* valores obtidos por regressão estatística

Por meio dos valores constantes na Tabela 4.7, as cinco figuras que seguem, demonstram a variação de cada íons da solução aquosa dos poros em função da profundidade e o tipo de mistura utilizada.

A concentração de sódio apresentou seu valor máximo na camada externa do traço R 40. Os traços com cinza volante e adição de cal hidratada obtiveram valores superiores aos traços CV 40 e CV 75, compostos cimento Portland e cinza volante, conforme pode ser verificado na Figura 4.31.

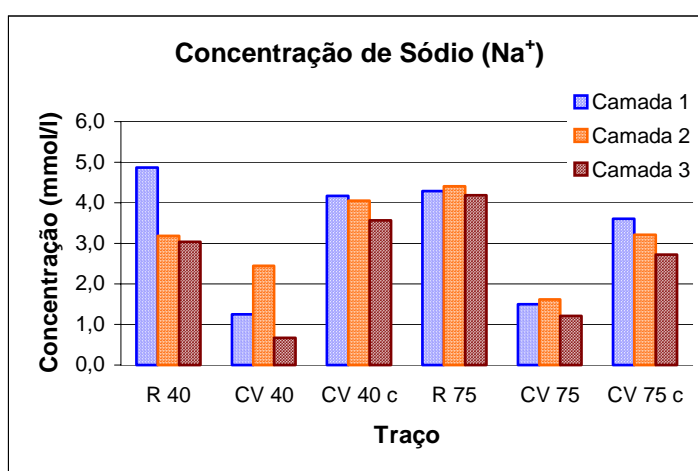


Figura 4.31: Concentrações de sódio

Para os traços estudados o comportamento da concentração de potássio foi praticamente constante, exceto no traço CV 40 c, onde a concentração da Camada 2, superior nos demais traços, foi superada pela concentração da Camada 3. De acordo com a Figura 4.32, assim como, para a concentração de sódio, a concentração de potássio nos traços sem cal hidratada foram inferiores as dos traços com 20% de adição sobre a massa de materiais cimentícios. As concentrações de potássio nos traços CV 40 c e CV 75 c, também, superaram as concentrações dos concretos de referência R 40 e R 75.

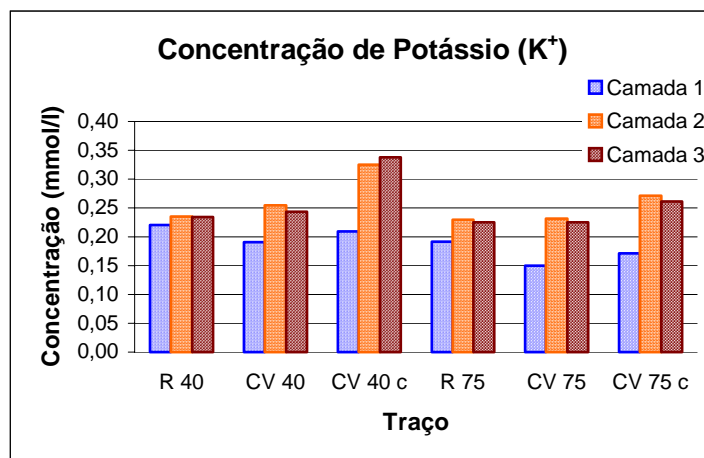


Figura 4.32: Concentrações de potássio

A Figura 4.33 apresenta as concentrações de cálcio encontradas para os traços de concreto estudados. De maneira semelhante ao ocorrido com as concentrações de sódio e potássio, a adição de cal hidratada no concreto revela maiores valores para as concentrações desses íons, superando em algumas profundidades, no caso do íon  $\text{Ca}^{++}$ , os valores encontrados para os traços de referência. Nos traços com relação  $a/mc = 0,75$  o teor de cálcio na primeira camada é inferior que nas demais, provavelmente devido à lixiviação e maior teor de macro e mesoporos.

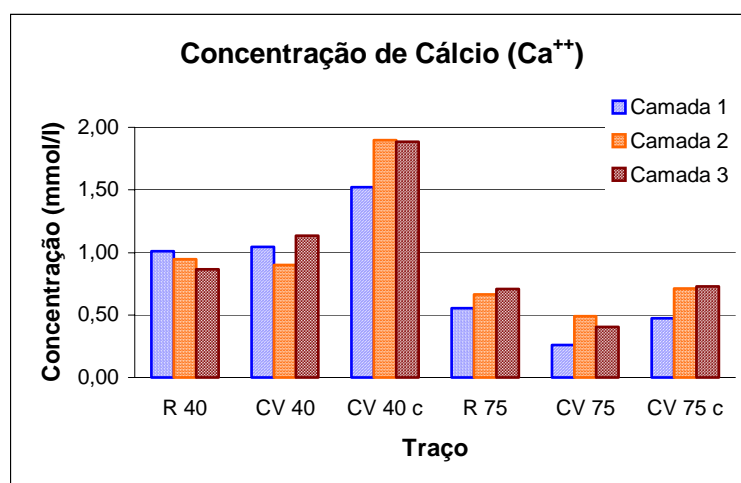


Figura 4.33: Concentrações de Cálcio

A adição de cal hidratada no concreto revelou maiores concentrações de sódio, potássio e cálcio na solução dos poros. Para o caso do sódio a adição de cal não superou os valores encontrados para os traços de referência e seu teor nos traços CV 40 c e CV 75 c apresentam um comportamento decrescente com o aumento da profundidade. No entanto, as concentrações de potássio e cálcio dos traços com cal foram superiores aos demais, apresentando um comportamento crescente do seu teor com o aumento da profundidade estudada.

Os valores determinados das concentrações de enxofre demonstram picos nos traços com cinza volante e relação  $a/mc = 0,75$ , como pode ser verificado na Figura 4.34. O maior teor na camada 1 dos traços CV 75 e CV 75 c poderia ser explicado pela maior proporção de macroporos na superfície e a maior quantidade de cátions apresentado pelas misturas com cinza volante do que com o traços de referência, o que possibilitaria retenção mais alta de enxofre, originado provavelmente da sua dissolução na água da chuva.

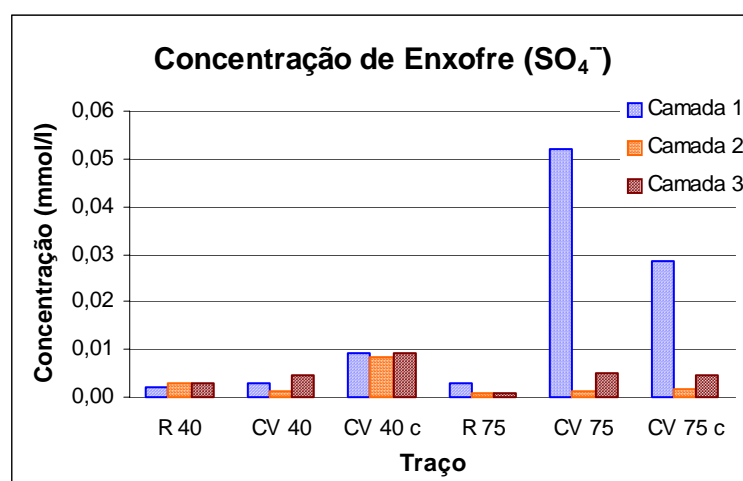


Figura 4.34: Concentrações de enxofre

O íon OH<sup>-</sup>, apresentado na Figura 4.35, demonstra que sua atividade iônica aumentou quando foram comparados os traços CV 40 e

CV 75 com os traços CV 40 c e CV 75 c. Fato esse, também observado nos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{++}$ . Os baixos valores de  $\text{OH}^-$  na Camada 1 dos traços CV 75 e CV 75 c estão coerentes com os respectivos teores de enxofre mostrados na figura 4.34, acima comentado, que demonstra a maior acidificação da camada superficial.

O efeito da cinza volante na composição da solução dos poros depende do teor de álcalis na cinza, podendo aumentar ou diminuir a concentração de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  e diminuindo, normalmente a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{--}$  (SHI, 1998).

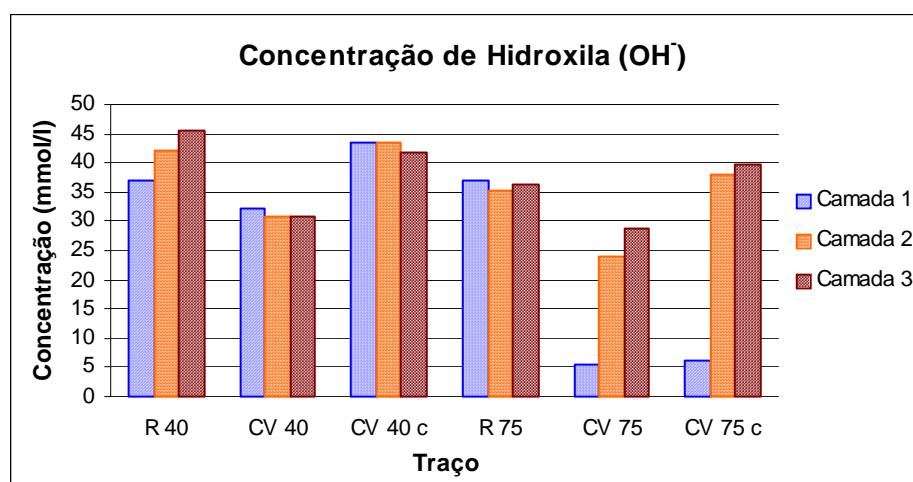


Figura 4.35: Concentrações de hidroxila

De acordo com citações de CERVO (2001) e DALRI (2002), nas misturas com cinza volante sem adição de cal hidratada observa-se redução na concentração dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$ , quando comparados com o traço de referência, haja vista que ocorreu redução do pH da solução dos poros.

Com a adição de cal hidratada ocorre aumento na concentração dos íons e do pH dos traços CV 40 c e CV 75 c, conforme também observado por DALRI (2002).

#### 4.14 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA ESPECÍFICA

A condutividade elétrica específica dos traços de concreto estudados nesta dissertação baseia-se nos valores das concentrações dos íons discriminados na Tabela 4.7, encontrados para as amostras pulverizadas coletadas antes do concreto ser submetido ao ensaio de penetração de cloretos. E, na Tabela 4.8 são apresentados os valores para a condutividade elétrica específica, determinada pelas equações apresentadas por SHI et al (1998), como visto no capítulo anterior.

Tabela 4.8: Condutividade Elétrica

Traço	Profundidade	Condutividade elétrica ( $\text{ohm}^{-1}$ )	Condutividade elétrica relativa(%)
R 40	Camada 1: 0 a 1 cm	0,69	84,08
	Camada 2: 2,5 a 3,5 cm	0,76	93,22
	<b>Camada 3: 5 a 6 cm</b>	<b>0,82</b>	<b>100,00</b>
CV 40	Camada 1: 0 a 1 cm	0,59	72,27
	Camada 2: 2,5 a 3,5 cm	0,57	69,88
	Camada 3: 5 a 6 cm	0,57	69,03
CV 40 c	Camada 1: 0 a 1 cm	0,80	97,23
	Camada 2: 2,5 a 3,5 cm	0,80	97,53
	Camada 3: 5 a 6 cm	0,77	93,30
R 75	Camada 1: 0 a 1 cm	0,68	83,44
	Camada 2: 2,5 a 3,5 cm	0,65	79,83
	Camada 3: 5 a 6 cm	0,67	81,81
CV 75	Camada 1: 0 a 1 cm	0,11	13,70
	Camada 2: 2,5 a 3,5 cm	0,45	54,63
	Camada 3: 5 a 6 cm	0,53	64,53
CV 75 c	Camada 1: 0 a 1 cm	0,14	16,47
	Camada 2: 2,5 a 3,5 cm	0,70	84,81
	Camada 3: 5 a 6 cm	0,72	88,20

Como podem ser observados na Figura 4.36, os traços com baixa relação a/mc, R 40, CV 40 e CV 40 c, apresentam maiores valores de condutividade elétrica do que os traços com relação a/mc = 0,75.

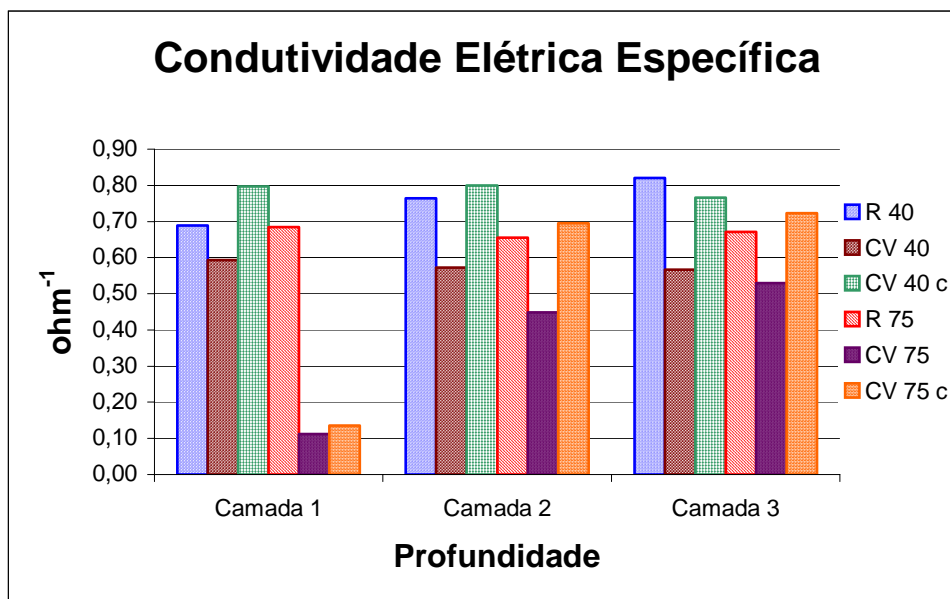


Figura 4.36: Condutividade elétrica específica

As Figuras 4.37 e 4.38 apresentam condutividade elétrica específica para os traços de  $a/mc = 0,40$  e  $a/mc = 0,75$ , respectivamente, para que o comportamento de cada conjunto de traços seja observado individualmente.

A condutividade elétrica do traço CV 40 foi inferior ao traço de referência em todas as profundidades. No entanto, para o traço CV 40 c, somente na Camada 3, a condutividade elétrica não ultrapassou o traço de referência.

O comportamento dos traços CV 75 e CV 75 c apresentou um crescimento da condutividade elétrica específica da camada externa para as camadas interiores. Nas Camadas 2 e 3 o traço CV 75 c obteve valores superiores ao concreto de referência.



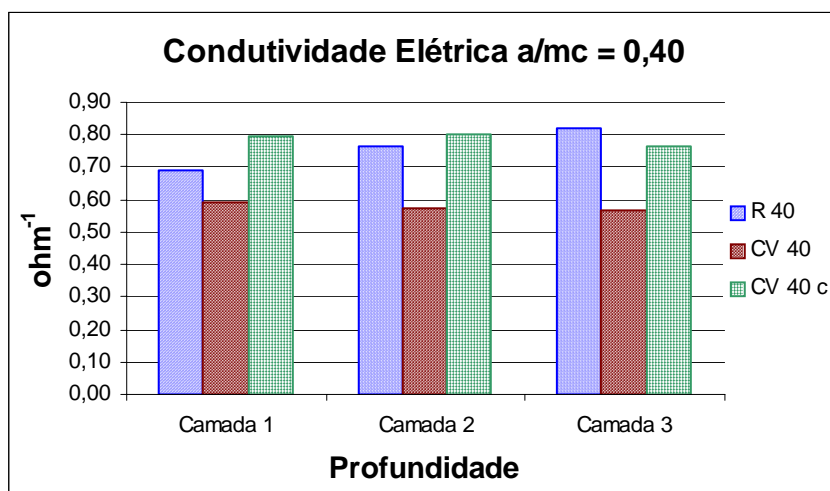


Figura 4.37: Condutividade elétrica específica – a/mc = 0,40

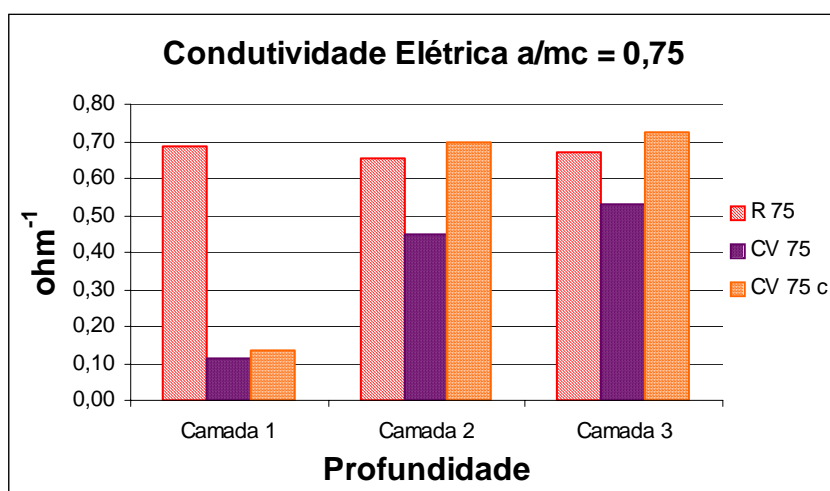


Figura 4.38: Condutividade elétrica específica – a/mc = 0,75

Considerando os resultados encontrados para a camada mais externa do concreto, tanto nos traços de baixa como nos traços de elevada relação a/mc, nota-se que a substituição de 50% do cimento por cinza volante reduz a condutividade elétrica específica, semelhante ao acontecido nos estudos de CERVO (2001) e DALRI (2002). Essa redução pode ter sido ocasionada pela diminuição no teor de OH na solução dos poros, e, também pelas modificações na estrutura dos poros, os quais

tornaram a pasta mais densa, diminuindo assim a condutividade elétrica específica.

Segundo DALRI (2002), a adição de cal hidratada resultou em acréscimo na condutividade elétrica, porém não ultrapassou os valores do concreto de referência.

A Figura 4.39 apresenta a condutividade elétrica dos traços de concreto estudados em representação percentual. Considerando como a referência de condutividade específica para todos os traços o valor encontrado para o traço R 40 na Camada 3.

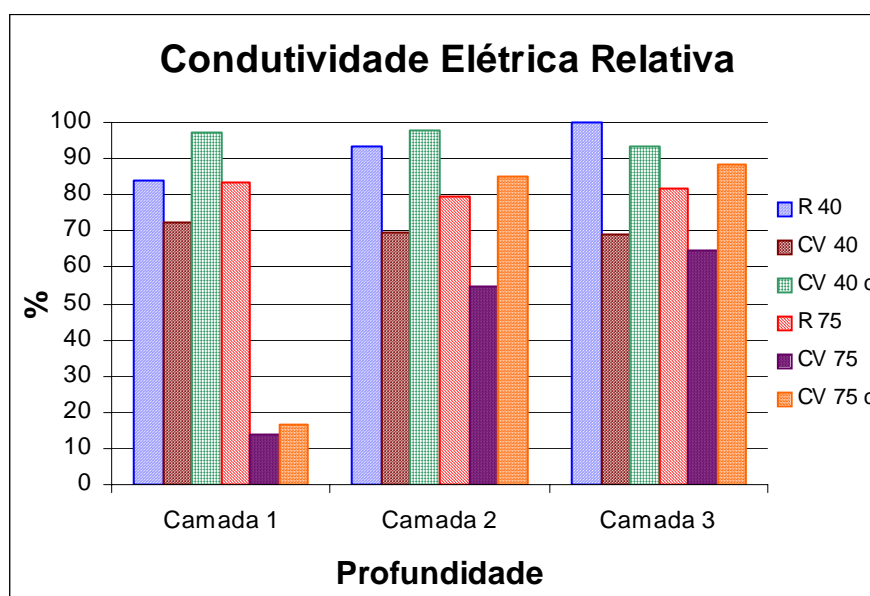


Figura 4.39: Condutividade elétrica específica - relativa

Considerando a média das concentrações nas três profundidades estudadas, pode-se concluir, em comparação com o referencial de 100%, que: o traço R 75 apresentou uma condutividade elétrica média 18% menor que a referência; o traço CV 40 possui condutividade elétrica 30% inferior, em média, que o R 40; para o traço CV 75 a condutividade elétrica média foi 55% inferior; no traço CV 40 c a condutividade elétrica foi apenas 4%, em média, inferior a do traço tomado como referência;

para o traço CV 75 c a condutividade elétrica média foi 37% inferior, aproximadamente.

SHI et al (1998) afirma que a condutividade elétrica específica da solução dos poros do concreto depende das modificações na solução aquosa dos poros, bem como das modificações na distribuição dos poros do concreto.

#### **4.15 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA X DIMENSÃO DOS POROS**

Observa-se na camada mais externa do cobrimento uma região de concreto com poros de maior diâmetro e interconectados, com maior capacidade de permitir o ingresso de agentes agressores e de absorver água. A predominância do volume de macro e mesoporos na Camada 1, dos traços estudados, aponta que na primeira camada existe a maior concentração de poros responsáveis pela permeabilidade, independente da relação a/mc e da mistura testada, e que, os traços de baixa relação a/mc apresentam menor volume de macro e mesoporos juntos (Tabela 4.3).

Nas cinco figuras que seguem, o  $R^2$  não é apresentado devido a correlação entre as variáveis ser baixa ( $r < 0,7$ ). E não foi realizada a comparação por tipo de traço estudado, também, devido a correlação entre as variáveis ser baixa.

O coeficiente angular das retas que contém os dados de todos os traços analisados com as respectivas equações de regressão linear, nas Figuras 4.40 e 4.41, indica que a dependência entre as variáveis é maior para o caso do diâmetro crítico do que para os poros capilares com  $\Phi > 10\text{nm}$  (Mesoporos + Macroporos).

A Figura 4.42 demonstra que quanto maior for o volume de poros do gel no concreto menor será a condutividade elétrica, o que pode ser

devido ao refinamento dos poros proporcionado pela pozolana nos traços com cinza volante.

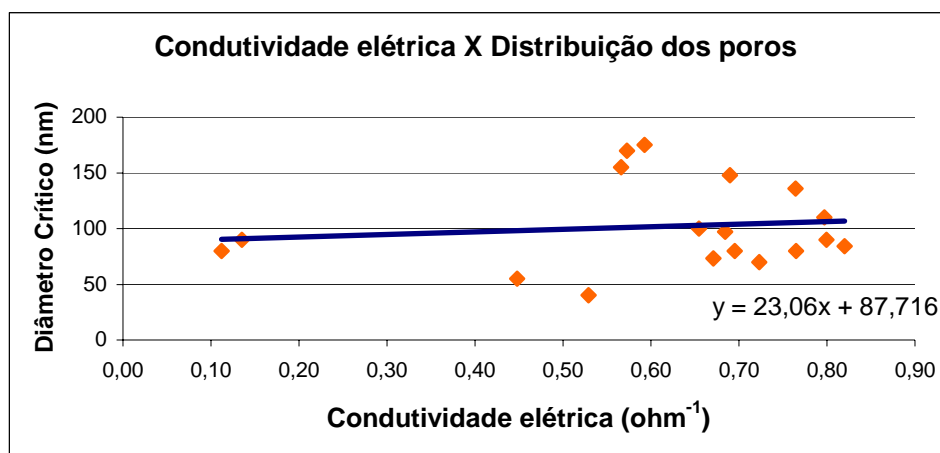


Figura 4.40: Condutividade elétrica X Diâmetro crítico

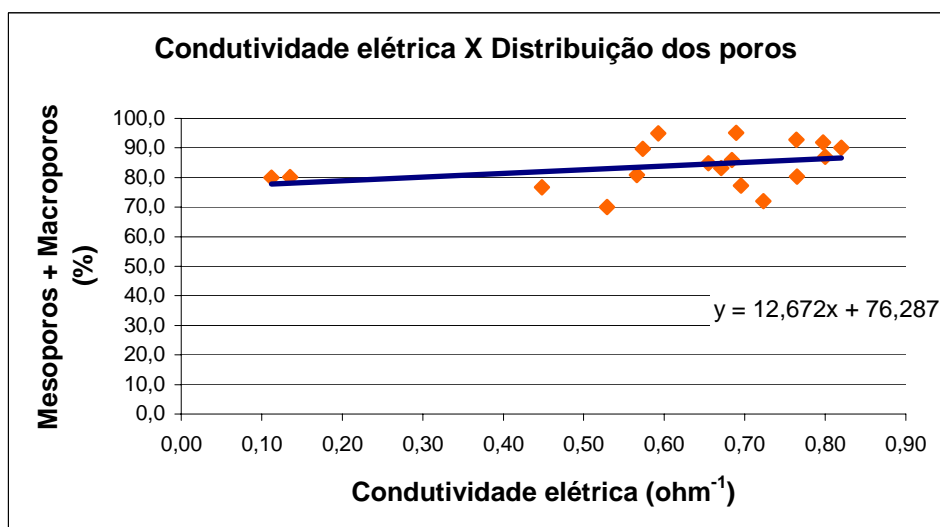


Figura 4.41: Condutividade elétrica X Mesoporos + Macroporos

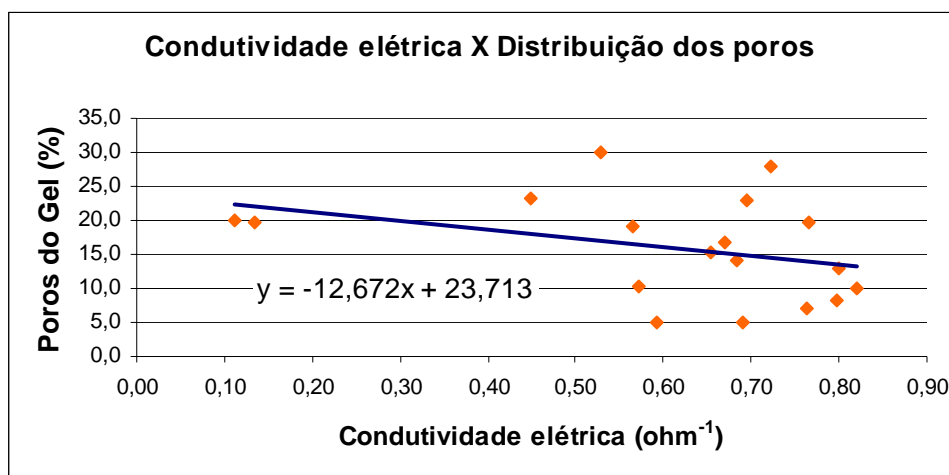


Figura 4.42: Condutividade elétrica X Poros do gel

Através da análise das linhas de tendência nas Figuras 4.41 e 4.42, verifica-se que os poros capilares influem na permeabilidade da água, haja vista que a condutividade elétrica aumenta com o aumento do volume de mesoporos e macroporos. A reta representativa da situação que envolve os poros do gel (Figura 4.42) tem coeficiente angular negativo e é de mesmo módulo que a reta representativa da situação de mesoporos e macroporos juntos (Figura 4.41), ou seja, para menores quantidades de poros do gel, maior a condutividade elétrica do concreto.

Quando existe uma maior presença de poros do gel no concreto, maior é o volume de mesoporos e menor o volume de macroporos na estrutura do concreto, melhorando a distribuição destes. Assim, conforme a Figura 4.43, observa-se que o volume de mesoporos é inversamente proporcional a condutividade elétrica específica.

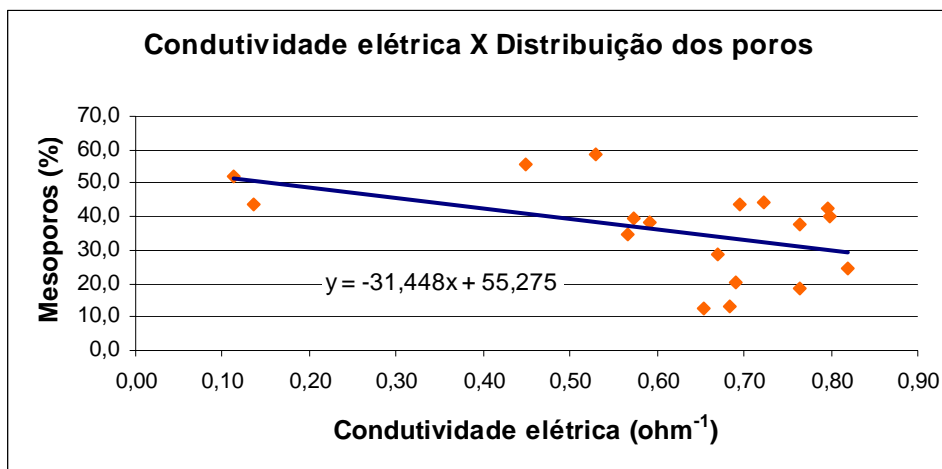


Figura 4.43: Condutividade elétrica X Mesoporos

A condutividade elétrica específica é diretamente proporcional ao volume de macroporos no concreto, ou seja, quanto maior a quantidade de poros com diâmetro maior que 50 nm maior a possibilidade de agentes agressivos penetrarem no concreto, alterando a solução dos poros (Figura 4.44).

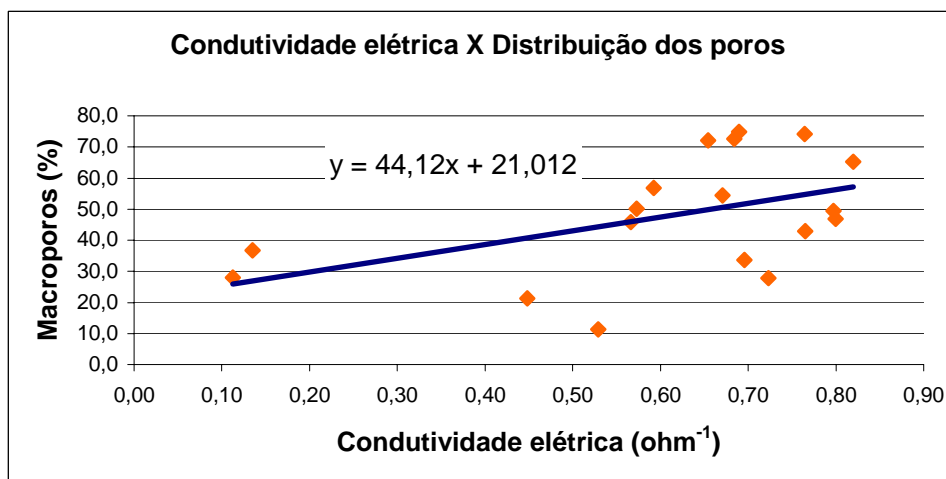


Figura 4.44: Condutividade elétrica X Macroporos

#### 4.16 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA X PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Através da Figura 4.45 foi realizada a análise da correlação entre a condutividade elétrica específica e a penetração de íons cloreto no concreto, onde se constata que à medida que a condutividade elétrica no concreto aumenta, cresce, também, a carga passante em Coulombs durante o ensaio acelerado de penetração de cloretos, conforme ASTM C 1202/97.

Uma vez que, os dados de base para o cálculo da condutividade elétrica foram coletados sem que o concreto fosse submetido ao ensaio de penetração de cloretos, essa correlação demonstrou que um concreto de elevada condutividade permite o maior ingresso de agentes agressores, interferindo negativamente em sua durabilidade. Desta forma, os concretos que apresentaram maior penetração de cloretos possuem menor resistividade elétrica.

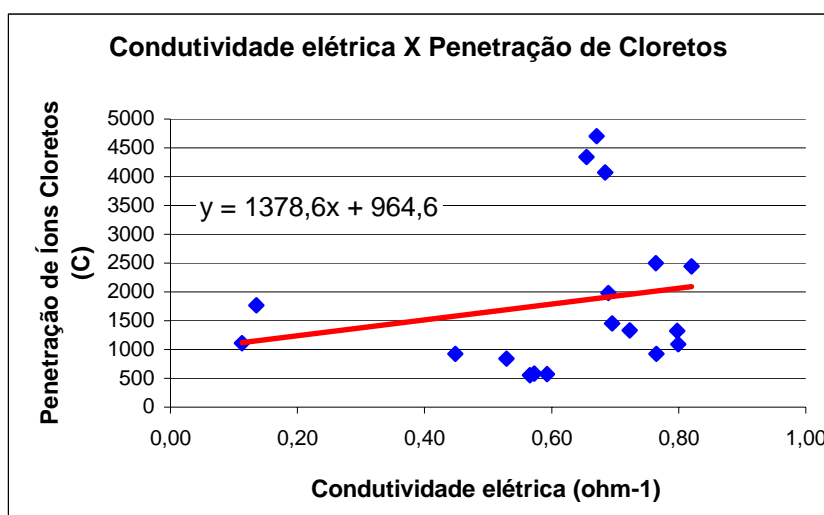


Figura 4.45: Condutividade elétrica X Penetração de cloretos

#### 4.17 INTEGRAÇÃO DAS VARIÁVEIS

A Tabela 4.9 apresenta o conjunto de resultados encontrados para cada traço, nas três profundidades analisadas de cada uma das variáveis estudadas nesta pesquisa.

Tabela 4.9: Integração dos resultados

Traços	Camada	Macroporos (%)	Penetração de cloretos (C)	Cloretos Totais (%)	Cl/OH	Condutividade elétrica (ohm <sup>-1</sup> )
<b>R 75</b>	1	74,8	4078	0,214	3,02	0,69
	2	74,1	4345	0,262	3,45	0,76
	3	65,3	4708	0,270	3,90	0,82
<b>CV 75</b>	1	56,9	1108	0,284	3,74	0,59
	2	50,1	927	0,339	4,78	0,57
	3	45,9	843	0,306	4,31	0,57
<b>CV 75 c</b>	1	49,5	1766	0,147	2,74	0,80
	2	46,9	1458	0,224	3,31	0,80
	3	42,9	1332	0,191	2,69	0,77
<b>R 40</b>	1	72,6	1982	0,071	0,92	0,68
	2	72,1	2502	0,145	2,14	0,65
	3	54,5	2449	0,199	3,82	0,67
<b>CV 40</b>	1	28,0	570	0,087	1,23	0,11
	2	21,3	582	0,112	1,58	0,45
	3	11,3	555	0,112	1,58	0,53
<b>CV 40 c</b>	1	36,7	1328	0,129	1,25	0,14
	2	33,7	1097	0,145	1,91	0,70
	3	27,8	925	0,228	3,21	0,72

As seis figuras que seguem representam o comportamento em termos relativos, de cada traço em cada variável perante a profundidade da camada de revestimento estudada. Tomando-se como base os valores da Camada 1.

Na Figura 4.46 encontra-se representado o comportamento do traço R 75 nas Camadas 1, 2 e 3, para as variáveis de distribuição dos poros, penetração de cloretos, teor de cloretos totais, relação Cl/OH e condutividade elétrica. Neste traço, somente o volume de macroporos apresentou maior concentração na camada mais externa, diminuindo este



valor para as camadas mais internas, as demais variáveis apresentaram um crescimento da camada externa para as internas.

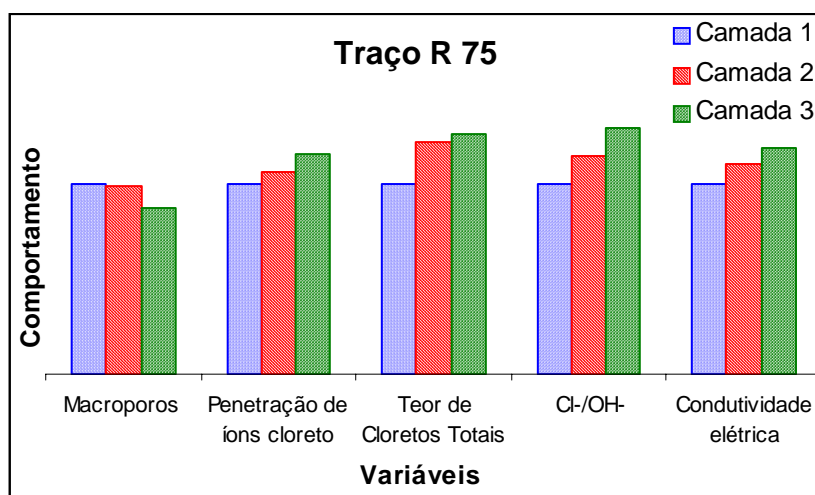


Figura 4.46: Comportamento das variáveis no traço R 75

Os traços com cinza volante e relação  $a/mc = 0,75$  apresentaram um comportamento semelhante em todas as variáveis, como pode ser verificado nas Figuras 4.47 e 4.48.

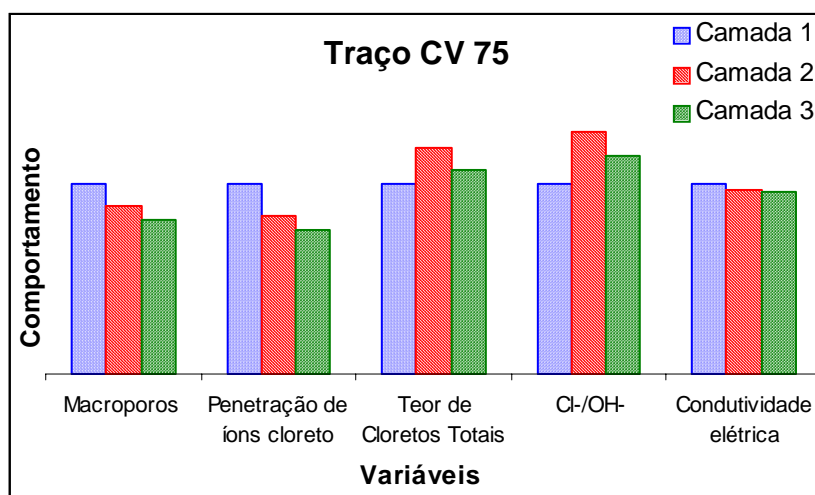


Figura 4.47: Comportamento das variáveis no traço CV 75

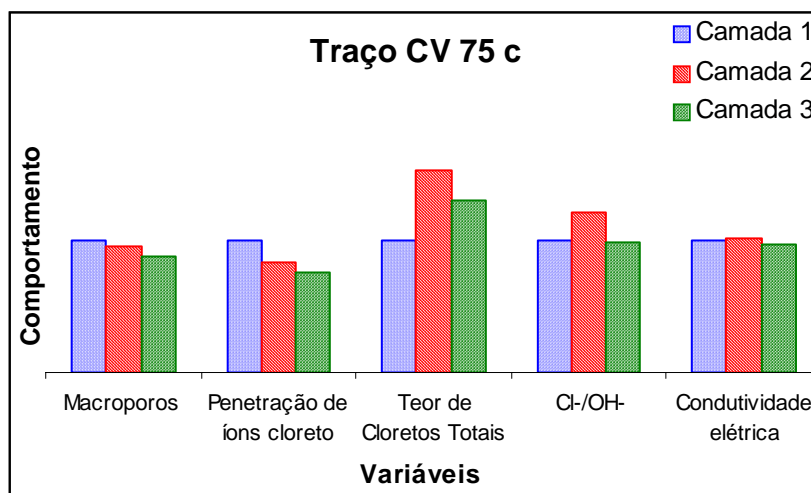


Figura 4.48: Comportamento das variáveis no traço CV 75 c

O traço R 40, assim como o traço R 75, apresentou um decréscimo no volume de macroporos da camada externa para as camadas interiores (Figura 4.49), também apresentou o mesmo comportamento nas variáveis de penetração de cloretos, teor de cloretos totais e relação Cl/OH, tendo como única divergência do traço R 75 o comportamento da condutividade elétrica.

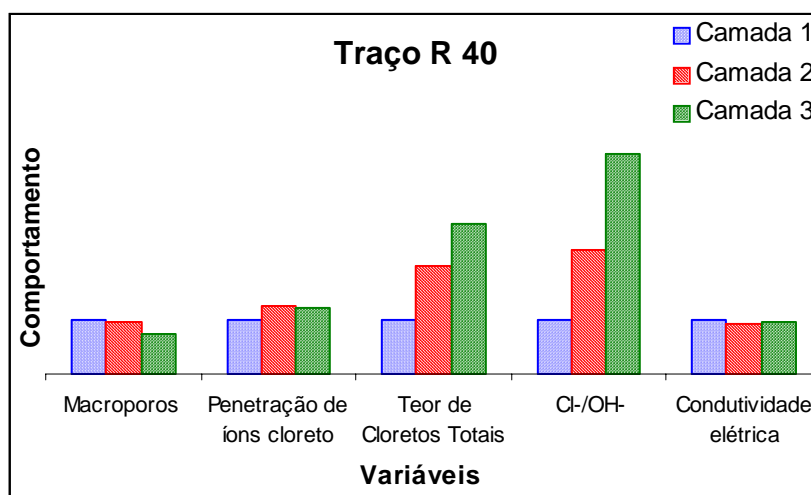


Figura 4.49: Comportamento das variáveis no traço R 40

Para os traços com cinza volante e relação  $a/mc = 0,4$ , o comportamento de cada variável foi semelhante. Tanto o CV 40 como o CV 40 c, apresentaram decréscimo nos valores encontrados para o volume de macroporos e para a penetração de cloretos da camada externa para as camadas internas estudadas. As variáveis de teor de cloretos totais, relação Cl/OH e condutividade elétrica apresentaram crescimento nos valores encontrados do exterior para o interior das peças de concreto, conforme pode ser verificado nas Figuras 4.50 e 4.51.

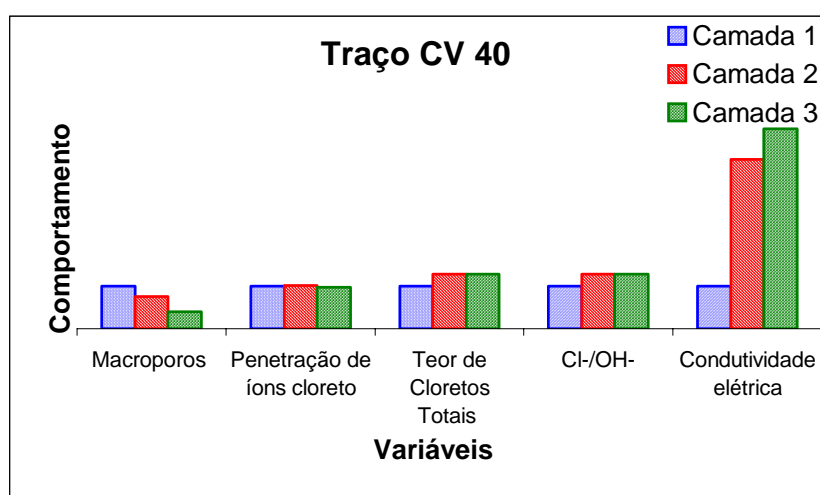


Figura 4.50: Comportamento das variáveis no traço CV 40

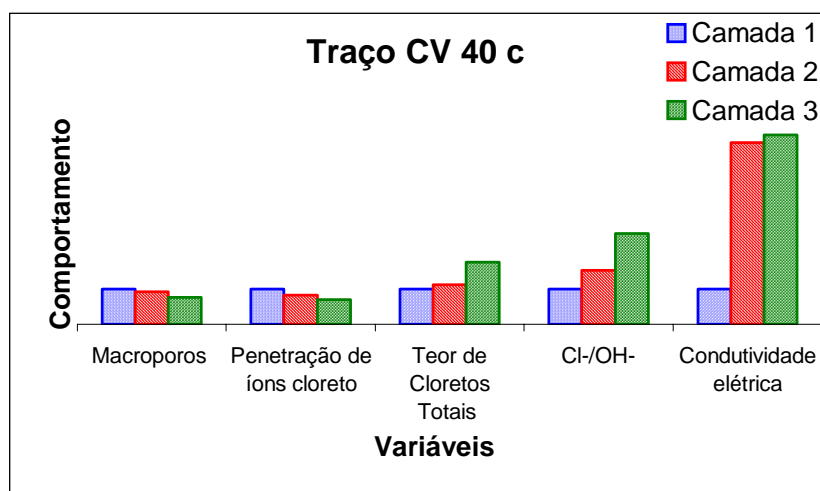


Figura 4.51: Comportamento das variáveis no traço CV 40 c

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

A engenharia civil, como toda atividade humana causa algum tipo de degradação ambiental. O desafio proposto nesta dissertação foi minimizar esta degradação a níveis compatíveis com o desenvolvimento sustentável, envolvendo questões de ecoeficiência, poluição ambiental, economia, visando uma maior durabilidade das construções.

Esta dissertação procurou, também, responder ao questionamento proposto sobre o comportamento da camada de cobrimento de concretos com altos teores de cinza volante, com e sem adição de cal hidratada, frente à penetração de cloretos, haja vista que para a Engenharia Civil o conceito de desenvolvimento sustentável envolve o uso de materiais de alta performance produzidos a custos aceitáveis e com menor impacto ambiental possível.

A substituição parcial de parte do cimento Portland por cinza volante nos traços de concreto além de diminuir custos modifica microestrutura da camada de cobrimento reduzindo a permeabilidade de agentes deletérios no interior das estruturas de concreto.

Com o aumento da idade, o acréscimo da resistência à compressão dos traços com cinza volante torna-se consequência das reações da própria pozolana com o hidróxido de cálcio e da hidratação do clínquer, além do efeito das atrações físicas entre as partículas. Pode-se verificar que as misturas com cinza volante tem crescimentos médios na resistência à compressão encontrada aos 28 dias para aqueles obtidos aos 91 dias de: 26% para os traços com relação  $a/mc = 0,40$ , 32% nos traços com relação  $a/mc = 0,55$  e 62% para os traços com relação  $a/mc = 0,75$ . Os valores aos 91 dias, apesar do crescimento acentuado, são inferiores aos resultados da resistência a compressão dos traços de referência.

A adição da cal hidratada no concreto repôs o teor de hidróxido de cálcio que deixou de ser formado pela substituição do cimento Portland e, que, por seu efeito plastificante e retentor de água, contribuiu para acréscimos de resistência à compressão aos 91 dias, comparando-se aos concretos com mesma relação a/mc sem o emprego da cal, atribuindo vantagens significativas frente aos parâmetros de durabilidade investigados.

O efeito parede, causado pelo aumento da relação água/aglomerante na interface forma/concreto, tem sua existência verificada pela indicação de uma maior porosidade na camada exterior do concreto. Em todos os traços, a porcentagem de poros com diâmetros maiores que 50 nm diminui à medida que a profundidade aumenta. Comparando os traços de referência com os traços binários de cimento Portland e cinza volante, com e sem adição de cal hidratada, verifica-se que a pozolana proporciona ao concreto uma diminuição do volume de poros capilares, tanto por seu efeito químico como pela sua atuação como filler inerte. Nos traços com cinza volante há uma menor porcentagem de poros grandes (macroporos –  $\Phi > 50\text{nm}$ ), quando comparados com o traço de referência nas mesmas profundidades.

A penetração de cloretos é reduzida com a diminuição da relação a/mc e com a substituição de parte do cimento por cinza volante. A redução da relação a/mc promoveu, na camada de cobertura externa do concreto uma redução na penetração de cloretos de aproximadamente 51% para os traços de referência, 48% para os traços com substituição de cimento por cinza volante e, aproximadamente, 24% nos traços compostos por cimento, cinza volante e cal hidratada.

Pode-se ainda verificar que, para os traços dos concretos de referência a permeabilidade a cloretos aumenta em média 20% do exterior para o interior da peça, enquanto os traços compostos por igual massa de cimento e cinza volante, com e sem adição de cal hidratada, têm no interior da peça menor permeabilidade a cloretos que na camada

exterior. Mesmo sendo maior, a carga passante na camada mais exterior das peças de concreto com cinza volante, é considerada de baixa (1000 C a 2000 C) a muito baixa (100 C a 1000C), enquanto que, nos traços de referência, apresenta-se de moderada (2000 C a 4000 C) a alta (maior que 4000 C).

Os traços com adição de cal hidratada demonstram maior penetração de cloretos quando comparados aos traços de cimento Portland e cinza volante sem essa adição, devido, provavelmente, a maior quantidade OH na solução aquosa dos poros, que diminui a resistividade elétrica e aumenta a passagem de íons  $\text{Cl}^-$ .

Para os traços com cinza volante, com ou sem a adição de cal hidratada, a maior quantidade de carga passante ocorre na camada mais externa do concreto, o que pode ser explicado pelo maior diâmetro crítico dos poros na Camada 1.

Verifica-se, também, que quanto maior for o volume de poros do gel no concreto menor será a penetração de íons cloreto: fato observado nos traços com cinza volante, devido ao refinamento dos poros proporcionado pela pozolana.

Pela a análise do teor de cloretos retido no concreto após ser submetido ao ensaio acelerado de penetração de cloretos o valor crítico de 0,1% sobre a massa de concreto foi ultrapassado. O traço que apresentou melhor resistência ao ingresso de cloretos foi o CV 40 devido ao refinamento dos poros promovido pela cinza volante e da baixa relação a/mc. Os traços de relação a/mc = 0,75 apresentam a maior propensão ao ingresso de íons cloretos. Como pode ser observado, o teor de cloretos totais nos traços de concreto estudados é superior para as misturas com relação a/mc = 0,75 quando comparados com os traços de relação a/mc = 0,40.

Pode ser verificado que, para todos os traços com a/mc = 0,40, o teor de cloretos retidos é crescente do exterior para o interior (em média 95%) das peças de concreto. O traço CV 40 c tem o teor de cloretos

retidos superior ao outros dois traços (R 40 e CV 40), nas Camadas 1 e 3, devido a reposição de hidróxido de cálcio.

Quando analisado o teor de cloretos totais dos traços com relação  $a/mc = 0,75$ , observa-se que no traço CV 75 esse teor mostrou-se superior ao traço de referência. Porém, quando cal hidratada foi adicionada a mistura o teor tornou-se inferior ao concreto de referência e ao concreto com cinza volante sem cal.

A relação  $a/mc$  influencia no teor de cloretos totais retidos no concreto, pois quanto maior a quantidade de água maior a concentração de íons cloreto. À medida que aumenta a resistência à compressão do concreto diminui a concentração de cloretos, como é demonstrado pela equação linear da reta que representa essa correlação. Quanto maior for o volume de poros do gel no concreto menor será o teor de cloretos totais, o que pode ser devido ao refinamento dos poros proporcionado pela pozolana nos traços com cinza volante.

À medida que a penetração de cloretos no concreto aumenta, cresce o teor de cloretos totais retidos.

A relação iônica máxima recomendada pela bibliografia igual a 0,6 (THOMAS, 1996) foi ultrapassada por todas as misturas em todas as profundidades investigadas. Somente o traço R 40 na Camada 1 apresentou relação  $Cl^-/OH^-$  inferior a 1.

É parcialmente confirmado que o uso de pozolanas no concreto proporcionam uma maior proteção à armadura do que somente quando utilizado o concreto de cimento Portland, tendo em vista serem a maioria dos valores da relação  $Cl^-/OH^-$  dos traços com cinza volante inferiores a dos traços R 40 e R 75, excetuando o traços CV 40 na Camada 1, CV 40 c na Camada 1 e CV 75 em todas camadas. O aumento das relações iônicas nos traços com cinza volante em comparação ao traço de referência, pode ser explicado pelo maior consumo de CH.

O aumento da relação iônica no traço com cinza volante CV 75, pode ser explicado pelo consumo de hidróxido de cálcio pelas reações da pozolana.

Como o pH das amostras de concreto, independentemente da mistura e da situação de coleta (antes ou depois do ensaio de penetração de cloretos), não varia significativamente, conclui-se que as relações iônicas encontradas são diretamente proporcionais ao teor de cloretos encontrados e praticamente independem do tipo de mistura.

A adição de cal hidratada no concreto revelou maiores concentrações de sódio, potássio e cálcio na solução dos poros, sem que o concreto fosse submetido ao ensaio acelerado de penetração de cloretos. Para o caso do sódio a adição de cal não superou os valores encontrados para os traços de referência e seu teor nos traços CV 40 c e CV 75 c apresentam um comportamento decrescente com o aumento da profundidade. No entanto, as concentrações de potássio e cálcio dos traços com cal foram superiores aos demais, apresentando um comportamento crescente do seu teor com o aumento da profundidade estudada.

Os valores determinados das concentrações de enxofre demonstram picos nos traços com cinza volante e relação  $a/mc = 0,75$ . O maior teor na camada 1 dos traços CV 75 e CV 75 c poderia ser explicado pela maior proporção de macroporos na superfície e a maior quantidade de cátions apresentado pelas misturas com cinza volante do que com o traços de referência, o que possibilitaria retenção mais alta de enxofre, originado provavelmente da sua dissolução na água da chuva.

Os traços com baixa relação  $a/mc$ , R 40, CV 40 e CV 40 c, apresentam maiores valores de condutividade elétrica do que os traços com relação  $a/mc$  0,75. Considerando os resultados encontrados para a camada mais externa do concreto, tanto nos traços de baixa como nos traços de elevada relação  $a/mc$ , nota-se que a substituição de 50% do cimento por cinza volante reduz a condutividade elétrica específica. Essa



redução pode ter sido ocasionada pela diminuição no teor de OH na solução dos poros, e, também pelas modificações na estrutura dos poros, os quais tornaram a pasta mais densa, diminuindo assim a condutividade elétrica específica.

Através da análise da correlação entre a condutividade elétrica específica e a penetração de íons cloreto no concreto, constatou-se que à medida que a condutividade elétrica no concreto aumenta, cresce, também, a penetração de cloretos.

## **5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Sendo o concreto de cimento Portland o repositório que possui maior potencialidade de incorporar adição mineral, com a correspondente diminuição de consumo de clínquer, quanto maior é o teor de adições no concreto, maiores serão os benefícios sociais obtidos. A viabilidade do emprego de altas quantidades de pozolanas em concreto estrutural permitirá, no futuro, aumentar o emprego em estruturas de concreto da cinza volante, subproduto da geração de energia em usinas termoelétricas, resíduo poluidor do ambiente, com grande ocorrência no Rio Grande do Sul.

Acredita-se, que os resultados desta pesquisa possam contribuir para a conscientização dos formadores de opinião que fazem parte de comissões de estudos de normas ou recomendações nacionais e/ou internacionais, sobre os limites máximos que podem ser adotados para a substituição de cimento por adições minerais, de modo a tornar estes documentos menos prescritivos e mais orientados para o desempenho do concreto.

Quanto maior a profundidade da camada estudada maior a tendência à durabilidade. A maior permeabilidade do concreto superficial,

faz com que a camada de revestimento perca a função de proteção do aço. Deste modo, a produção de estruturas mais duráveis e com menor incidência de reparos precoces, dependem de melhorias nesta camada que podem ser alcançadas através do uso de adições como a cinza volante, cujos benefícios contra a penetração de agentes agressivos (íons cloreto) foram comprovados nesta pesquisa.

O GEPECON da UFSM tem desenvolvido pesquisas que buscam o pleno entendimento do comportamento da camada de revestimento do concreto, buscando enfatizar a construção civil sustentável, baseada na tecnologia de concretos com altos teores de adições minerais, com projeto de dosagem e execução desses concretos visando a durabilidade e desempenho ótimo dos mesmos.

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

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **Standard test method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement-ASTM C114-99**.

\_\_\_\_\_. **Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete - ASTM C1152-90**.

\_\_\_\_\_. **Standard test method for electrical indication of concret's ability to resist chloride ion penetration - ASTM C1202-97**.

AMPADU, K. O.; TORII, K. e KAWAMURA, M.. **Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity hardened cement paste**. Cement and Concrete Research 29, 1999. pág 585 a 590.

ANDRADE Perdrix, Maria del Carmen. **Manual para diagnóstico de obras deteriorada por corrosão de armaduras**. tradução Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, PINI. 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da abrasão – Los Angeles:** NBR 6465. Rio de Janeiro, 1984.

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

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

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

\_\_\_\_. **Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo:** NBR 6467. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_. **Agregados em estado compactado seco - Determinação da massa unitária:** NBR 7810. Rio de Janeiro, 1983.

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

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

\_\_\_\_. **Agregado para concreto:** NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_. **Cal hidratada para argamassas – Determinação da finura:** NBR 9289. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cal virgem e cal hidratada – Retirada e preparação de amostra – Procedimento:** NBR 6471. Rio de Janeiro.

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

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland comum e clínquer – análise química por complexometria:** NBR 9203. Rio de Janeiro, 1985.

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

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland: determinação da finura por meio da peneira nº 200:** NBR 11579. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

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

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

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

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland: determinação do resíduo insolúvel:** NBR 5744/89. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **Cimento Portland: determinação dos tempos de pega:** NBR 11581. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **Cimento Portland e outros materiais em pó, determinação da área específica:** NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da área específica:** NBR 7224. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **Cimento Portland pozolânico:** NBR 5736. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. **Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto:** NBR 7680. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_\_. **Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone:** NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.
- \_\_\_\_\_. **Moldagem e cura de corpos de prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Método de ensaio:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **Projeto e execução de obras de concreto armado:** NBR 6118. Rio de Janeiro, 2000.

BÉRUBÉ, M.A.; DORIONA, J.F.; DUCHESNEA, J.; FOURNIERB, B. e VÉZINAC, D.. **Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali–silica reactivity.** Cement and Concrete Research 33, 2003. pág 77 a 84.

CERVO, T. C. **Influência da finura do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

CLIMENT, M. A.; DE VERA, G. e VIQUEIRA, E. **Bit shape geometric considerations when sampling by dry drilling for obtaining chloride profiles in concrete.** Material and Structures vol 34. 2001 pág 150-154

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

DALRI, Márcia. **Efeitos da adição de cal hiodratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto.** Santa Maria, 2002  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

DELAGRAVE, A.; PIGEON, M.; MARCHAND, J. et al. **Influence of chloride íons and pH level on the durability of high performance cement pastes (Part II).** Cement and Concrete Research 26, 1996. pág 749 a 760.

- FORTES, L. R. **Corrosão na armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo**. Fortaleza, 1995. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, 1995.
- FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto**. Santa Maria, 2001. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2001.
- GRIGOLI, Ademir Scobin; HELENE, Paulo e DJANIKIAN, João Gaspar. **Penetração de íons cloreto em concretos executados com areia muito fina – Aspectos de Durabilidade**. II Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá – ENTECA 2001. Maringá, Paraná 2001.
- GUIMARÃES, A. T. C.; TULA, L. e HELENE, P.. **Performance of surface concrete elements**. In: Malhotra, V. M. (ed) International Conference on High-Performance Concrete, 2nd, Gramado, 1999. **Proceedings**. American Concrete Institute, 1999, supplementary papers 05.
- GUIMARÃES, André Tavares da Cunha. **Vida útil em estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. Tese. Universidade de São Paulo, 2000.
- GUIMARÃES, André Tavares da Cunha e HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Grau de Saturação do Concreto: um fator importantena difusão de cloretos**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº 2, p. 55-64, Maio, 2001.



- HANSON, C.M.; MAMMOLITI, L. e HOPE, B.B.. **Corrosion inhibitors in pozzolanic cement**. Cement and Concrete Research 30, 2000. pág 1827 a 1834.
- HEIKAL, M; EL-DIDAMONY, H e MORSY,M. S.. **Limestone – filled pozzolanic cement**. Cement and Concrete Research, 2000.
- HELENE, P. R. L. e TERZIAN, P.. **Manual de dosagem de concretos com adições minerais**. Editora Pini. São Paulo, 1992.
- HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese. Universidade de São Paulo, 1993.
- HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição à normalização: A resistência sob carga mantida e a idade de estimativa da resistência característica; Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado**. São Paulo, 1994. (Monografias. EPUSP).
- HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto**, III Seminário Internacional de Durabilidade de Materiais, Componentes e Estruturas. São Paulo, 1997.
- HOPPE FILHO, J. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e a absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**. Santa Maria, 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura.** Tese. Universidade de São Paulo, 1995.

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 millenium, João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2000. v.1, p. 229-244.

JENSEN, M.; HANSEN, P. F.; COATS, A. M. e GLASSER, F. P.. **Chloride ingress in cement paste and mortar.** Cement and Concrete Research 28, 1998. pág 1367 a 1371.

KAZMIER, Leonard J.. **Estatística Aplicada a Economia e Administração.** tradução Carlos Augusto Crusius. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 1982.

LIMA, Eliane Pereira de e HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Influência do volume de pasta na zona de Transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.** Boletim Técnico – São Paulo: EPUSP, 2001a.

MALHOTRA, V. M.; ZHANG, M. H. e LEMAN, G.. **Long-term performance of steel reinforcing bars in portland cement, concrete and concrete incorporating moderate and high**

**volumes of ASTM class F fly ash.** ACI Materials Journal, v. 97, n°. 4, p. 409-417, 2000.

METHA, Povindar Kumar. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais** / P. Kumar Metha, Paulo J. M. Monteiro. São Paulo, PINI. 1994.

NEVILLE, Adam M.. **Propriedades do Concreto.** tradução Salvador E. Giannusso. São Paulo, PINI. 1997.

PEREIRA, Valéria G. A. e DAL MOLIN, Denise C. C.. **Avaliação da penetração acelerada de íons cloreto em concretos confeccionados com diferentes tipos de cimento, relação a/c, temperatura e tempo de cura.** IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil. Maio de 2002.

PETRY, Simone Bassan. **Estudo da permeabilidade à água na camada de cobrimento de protótipos de concretos com altos teores de cinza volante.** Santa Maria, 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

PRUDÊNCIO Júnior, Luiz Roberto. Durabilidade do Concreto Frente ao Ataque de Cloretos e Sulfatos, **Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto.** Porto Alegre, UFRGS. 1993.

SATO, Neide Matiko Nakata. **Análise da Porosidade e de Propriedades de Transporte de Massa em Concretos.** Tese. Universidade de São Paulo, 1998.

SHI, Caijun; STEGEMANN, Julia A. E CALDWELL, Robert J.. **Effect of supplementary cementing materials on the specific of pore solution and its implications on the rapid chloride Permeability test (AASHTO T277 and ASTM C 1202) Results.** ACI Materials Journal, 95. 1998

SIDDIQUE, Raft. **Properties of concrete incorporating high volumes of class F fly ash and san fibers.** Cement and Concrete Research - received 20 September 2002; accepted 19 May 2003. 2003.

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

TASDEMIR, Canan. **Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete.** Cement and Concrete Research 33, 2003. pág 1637 a 1642.

THOMAS, M.. **Chloride thresholds in marine concrete.** Cement and Concrete Research 26, 1996. pág 513 a 519.

TUUTTI, K. **Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel.** In: PERFORMANCE OF CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENT, ACI SP-65, p.223-37, 1980.

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

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland.** Santa Maria, 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 1999.

WANG, Aiqin; ZHANGB, Chengzhi e SUNA, Wei. **Fly ash effects: I. The morphological effect of fly ash.** Cement and Concrete Research 33, 2003. pág 2023 a 2029.

WEE, T. H., SURYAVANSHI, A. K. e TIN, S. S.. **Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containig mineral admixtures.** ACI Materials Journal, 97. 2000.

WINCK, Maristela de Lima. **Efeitos Físico e Pozolânico de Adições Minerais sobre a Penetração de Cloretos no Concreto.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria, 2002.