# UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**CENTRO TECNOLÓGICO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**SANDRA GONÇALVES MORAES**


# A capacidade de proteção de cobrimento de concretos com elevados teores de escória de alto-forno: avaliação da corrosão das armaduras


VITÓRIA (ES), JULHO/2008

# Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

**SANDRA GONÇALVES MORAES**

# A capacidade de proteção de cobrimento de concretos com elevados teores de escória de alto-forno: avaliação da corrosão das armaduras

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profª. Drª. Maristela Gomes da Silva

Co-orientador: Prof. MSc. Fernando Lordêllo dos Santos Souza

VITÓRIA (ES), JULHO/2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Moraes, Sandra Gonçalves, 1960-

M827c A capacidade de proteção de cobrimento de concretos com elevados teores de escória de alto-forno : avaliação da corrosão das armaduras / Sandra Gonçalves Moraes. – 2008.

167 f. : il.

Orientador: Maristela Gomes da Silva.

Co-Orientador: Fernando Lordêllo dos Santos Souza.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Escória de alto-forno. 2. Corrosão. 3. Resistividade. 4. Potencial de Corrosão. 5. Corrente de corrosão. I. Silva, Maristela Gomes da. II. Souza, Fernando Lordêllo dos Santos. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

---

# A capacidade de proteção de cobrimento de concretos com elevados teores de escória de alto-forno: avaliação da corrosão das armaduras

Sandra Gonçalves Moraes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Construção Civil.

Aprovado em 11/07/2008, por:

Profª. Drª. Maristela Gomes da Silva
Orientadora – Deptº. Eng. Civil/UFES

Prof. MSc. Fernando Lordêllo dos Santos Souza
Co-orientador - Deptº. Eng. Civil/UFES

Prof. Dr. Marcelo Camargo de Macedo
Deptº. de Eng. Mecânica/UFES

Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão
Deptº. de Eng. Civil/UFES

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo Matos
Examinador Externo/UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória (ES), julho de 2008.

*Ao Pai Celestial que permitiu que eu realizasse este estudo.*

# AGRADECIMENTOS

Este trabalho envolveu uma grande equipe, na qual cada pessoa teve indispensável contribuição para sua realização.

Agradeço, primeiramente, à professora Maristela Gomes da Silva por ter me inserido nas pesquisas com a escória de alto-forno e no mundo da corrosão. Agradeço também pela sua paciência e determinação.

Ao professor Fernando Lodêllo dos Santos Souza pela dedicação e pela orientação na operação e manutenção dos aparelhos de medida, pela paciência, pela ajuda na dissertação e pelo apoio indispensável para a realização dos ensaios.

Ao professor Marcelo Camargo S. de Macêdo pela ajuda na compreensão do importante assunto da corrosão.

Ao professor Fernando Avancini Tristão pelo apoio e pelos conselhos.

Agradeço a toda a equipe do projeto "Concreto de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno: estratégia para consolidar e ampliar o mercado da escória de alto-forno", que deu essencial apoio a todos os trabalhos relacionados a esta dissertação, e, em especial, agradeço à colega Kátia Maria Brunoro Grilo Bourguignon pelo acompanhamento no preparo dos concretos, pela ajuda na realização dos ensaios e dos diagramas para análises dos resultados.

Agradeço aos laboratoristas e auxiliares do Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Tecnológico da UFES, que ajudaram na preparação dos corpos-de-prova e na condução dos trabalhos laboratoriais.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos e à Companhia Siderúrgica de Tubarão, NEXES, IBS e FINEP pelo apoio financeiro e institucional.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que participaram deste extenso e importante trabalho, que contribui para a compreensão das possibilidades do uso da escória de alto-forno no concreto.

*The world is blue.*

*A terra é azul.*

Major Yuri A. Gagarin (1961)

# RESUMO

A qualidade e a espessura do concreto de cobrimento são muito importantes para minimizar o maior problema de durabilidade das estruturas de concreto armado enfrentado pela comunidade técnico-científica e pela prática das construções: a corrosão das armaduras. O concreto bem dosado com escória de alto-forno pode proporcionar, além de alta resistência mecânica, também alta durabilidade. Assim, o objetivo desta pesquisa é avaliar a capacidade de proteção de cobrimentos de concretos com altos teores de escória de alto-forno em diferentes classes de resistência, particularmente no que tange à corrosão das armaduras. São estudadas três classes de resistência (C20, C30 e C40), sendo utilizados, para cada classe, 3 tipos de materiais cimentícios: (i) o cimento Portland composto com escória CP II-E-32 (com 30% de escória de alto-forno), (ii) o cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS (com 66% de escória de alto-forno) e (iii) o material cimentício constituído por 50% de cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS e 50% de escória granulada de alto-forno moída (totalizando 83% de escória de alto-forno no aglomerante), representando a possibilidade de adição de escória de alto-forno na betoneira. São analisadas as características dos materiais constituintes e as propriedades resultantes nos concretos. Tais concretos são submetidos a ciclos acelerados com ataque de cloretos (câmara de névoa salina) e de dióxido de carbono (câmara de carbonatação), secos à estufa com temperatura de 50°C. Então, são tomadas as medidas de resistividade elétrica aparente do concreto (ρ) e potencial de corrosão ($E_{corr}$). Também são realizadas as medidas de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos, a cada ciclo, para, em seguida, relacioná-las com as medidas de resistividade elétrica aparente do concreto (ρ) e potencial de corrosão ($E_{corr}$). Ao final dos ciclos acelerados, estes resultados são comparados com os das medidas de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos. Os resultados sugerem que o teor de 83% de escória de alto-forno utilizado neste estudo é efetivo na proteção contra a corrosão das armaduras para os concretos de cobrimento de 30 mm com classe de resistência não inferior a 30 MPa e com relação água/material cimentício não superior a 0,5. Os resultados sugerem também que, com a utilização da escória de alto-forno em teores de escória variando de 66% a 83%, classe de resistência não inferior a 30 MPa e relação água/material cimentício inferior a 0,50, é possível contribuir para a obtenção de concreto durável em ambiente de agressividade ambiental classificada como do tipo III pela NBR 6118/2003.

**Palavras-chave:** escória de alto-forno•corrosão•resistividade•potencial de corrosão•corrente de corrosão.

# ABSTRACT

Concrete cover quality and thickness are very important to minimize the major durability problem of reinforced concrete structure faced by the scientific and technical community and construction practice: reinforcement corrosion. The good concrete mix proportion with ground granulated blast-furnace slag can provide both high compressive strength and high durability. This research aims to investigate the corrosion protection of concrete covers with high ground granulated blast-furnace slag contents in different compressive strengths, particularly with respect to the reinforcement corrosion. Three compressive strength classes (C20, C30 and C40) are studied, using for each class 3 types of cementitious materials: (i) Portland cement blended with ground granulated blast-furnace slag CP II-E-32 (30% slag substitution by weight relative to materials cementitious), (ii) blast-furnace Portland cement CP III-32-RS (66% slag substitution by weight relative to cementitious materials and (iii) cementitious materials composed by 50% of blast-furnace Portland cement CP III-32-RS and 50% of ground granulated blast-furnace slag (83% slag substitution by weight relative to cementitious materials which represent the possibility of ground granulated blast-furnace slag addition in the cement mixer. The characteristics of the concrete constituent materials and the resulting properties are analyzed. Such concretes are submitted to accelerated cycles with chloride attack (salt spray chamber) and with carbon dioxide (carbonation chamber), and are dried in the room at 50°C, followed by concrete apparent electric resistivity (ρ) and corrosion potential ($E_{corr}$) measurement. Carbonatation and chloride penetration depth measures per each cycle are also performed in order to eventually relate them with concrete apparent electric resistivity (ρ) and corrosion potential ($E_{corr}$) measures. At the cycles accelerated end, these results are compared with both the carbonatation and chloride penetration depth measures. The results suggest that the 83% slag substitution used in this study is effective for protection against reinforcement corrosion in 30 mm concrete cover with compressive strength class not lower than 30 MPa and with water–cementitious materials ratio not higher than 0,5. The results also suggest that, with ground granulated blast-furnace slag using in concretes with 66-83% slag substitution, with a compressive strength class not lower than 30 MPa and water–cementitious materials ratio not lower than 0,50, it is perfectly possible to contribute to obtaining durable concrete in NBR 6118/2003 type III environmental aggressiveness.



***Keywords***: blast-furnace slag•corrosion•resistivity•corrosion potential•corrosion current.

**SUMÁRIO**


| | | |
|---|---|---|
| **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO** | | 1 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 2 |
| 1.1.1 | Escória de alto-forno: tendência e normalização | 4 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 7 |
| 1.3 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 7 |
| **CAPÍTULO 2 - CORROSÃO DAS ARMADURAS: MECANISMOS E O PAPEL DA ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO** | | **9** |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 2.2 | ESCÓRIA DE ALTO-FORNO: OBTENÇÃO E CARACTERÍSTICAS | 10 |
| 2.3 | MECANISMOS DE TRANSPORTE E SUAS INFLUÊNCIAS NA CORROSÃO DAS ARMADURAS | 14 |
| 2.3.1 | Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios | 20 |
| 2.3.2 | Absorção capilar | 23 |
| 2.4 | FUNDAMENTOS DA CORROSÃO DAS ARMADURAS | 26 |
| 2.4.1 | Formação da camada passivadora na interface aço-concreto | 26 |
| 2.4.2 | Mecanismo fundamental da corrosão das armaduras | 27 |
| 2.5 | MECANISMOS DE INDUÇÃO DA CORROSÃO E A INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO | 29 |
| 2.5.1 | Corrosão induzida por carbonatação | 30 |
| 2.5.2 | Corrosão induzida por cloretos | 37 |
| 2.5.3 | Corrosão induzida pela ação conjunta de carbonatação e cloretos | 45 |
| 2.6 | RESISTIVIDADE, PROPRIEDADES ELETROQUÍMICAS E FATORES QUE INFLUENCIAM NA CORROSÃO DAS ARMADURAS | 49 |
| 2.7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 52 |
| **CAPÍTULO 3 – TÉCNICAS PARA MONITORAMENTO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS EM LABORATÓRIO** | | **54** |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 54 |
| 3.2 | TÉCNICA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE SUPERFICIAL DO CONCRETO | 55 |
| 3.3 | TÉCNICA DO POTENCIAL DE CORROSÃO | 57 |
| 3.4 | TÉCNICAS QUANTITATIVAS PARA MONITORAMENTO DA CORROSÃO | 59 |
| 3.5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 61 |

**CAPÍTULO 4 – PROJETO EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS 62**
4.1 INTRODUÇÃO 62
4.2 PROJETO EXPERIMENTAL 63
4.2.1 Fatores e variáveis 63
4.2.2 Tipos e número de corpos-de-prova 68
4.3 MATERIAIS 70
4.3.1 Materiais cimentícios 70
4.3.1.1 Cimento Portland composto CP II-E-32 e cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS 71
4.3.1.2 Mistura de escória granulada de alto-forno moída e cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS 72
4.3.1.3 Escória granulada de alto-forno moída 73
4.3.2 Agregado miúdo 74
4.3.3 Agregado graúdo 75
4.4 MÉTODOS 76
4.4.1 Dosagem experimental dos concretos com diferentes teores de escória de alto-forno 76
4.4.2 Propriedades mecânicas e físicas 79
4.4.3 Condições ambientais analisadas 80
4.4.4 Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos 81
4.4.4.1 Preparação dos corpos-de-prova 85
4.4.4.2 Métodos dos ensaios 86
4.4.4.3 Ensaio na condição natural 88
4.4.4.4 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado 88
4.4.5 Resistividade elétrica aparente do concreto 88
4.4.5.1 Preparação dos corpos-de-prova 88
4.4.5.2 Método do ensaio 88
4.4.5.3 Ensaio na condição natural 89
4.4.5.4 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado 89
4.4.6 Potencial de corrosão 90
4.4.6.1 Preparação dos corpos-de-prova 90
4.4.6.2 Método do ensaio 92
4.4.6.3 Ensaio na condição natural 94
4.4.6.4 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado 94
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS 94

**CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS** **95**
5.1 INTRODUÇÃO 95
5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS 95
5.3 RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO E À PENETRAÇÃO DE CLORETOS NA CONDIÇÃO NATURAL 95
5.4 RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO E À PENETRAÇÃO DE CLORETOS NA CONDIÇÃO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO 100
5.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO CONCRETO NA CONDIÇÃO NATURAL 113
5.6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO CONCRETO NA CONDIÇÃO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO 115
5.7 POTENCIAL DE CORROSÃO NA CONDIÇÃO NATURAL 121
5.8 POTENCIAL DE CORROSÃO NA CONDIÇÃO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO 126
5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS 132

**CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES** **135**
6.1 RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO E À PENETRAÇÃO DE CLORETOS 135
6.1.1 Condição natural 135
6.1.2 Condição de envelhecimento acelerado 136
6.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO CONCRETO 138
6.2.1 Condição natural 138
6.2.2 Condição de envelhecimento acelerado 138
6.3 POTENCIAL DE CORROSÃO 140
6.3.1 Condição natural 140
6.3.2 Condição de envelhecimento acelerado 140
6.4 APRECIAÇÃO INTEGRADA DAS QUESTÕES DA PESQUISA 141
6.5 CAPACIDADE DE PROTEÇÃO DO COBRIMENTO 143
6.6 PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS 144

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** **146**

**ANEXOS** **161**

**LISTA DE ANEXOS**


**ANEXO A:** Resistência à compressão aos 28 dias, massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios..... 161

**ANEXO B:** ANOVA e teste *a posteriori* de Duncan para massa específica, absorção de água por imersão, índice de vazios, absorção por capilaridade e altura de ascensão capilar..... 162

**ANEXO C:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos na condição natural..... 163

**ANEXO D:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos na condição de envelhecimento acelerado..... 164

**ANEXO E:** Influência dos diferentes teores de escória e da espessura de cobrimento na resistividade elétrica aparente dos concretos classe C20 e classe C30 na condição de envelhecimento acelerado..... 165

**ANEXO F:** Influência dos diferentes teores de escória e da espessura de cobrimento na resistividade elétrica do concreto classe C40 e no potencial de corrosão do concreto classe C20, na condição de envelhecimento acelerado..... 166

**ANEXO G:** Potencial de corrosão nos diferentes teores de escória nos concretos classe C30 e classe C40..... 167

## LISTA DE FIGURAS


**Figura 2.1:** Dimensões de poros/transporte de massa (adaptado de HELENE, 1993; SATO, 1998)..... 18

**Figura 2.2:** Variáveis em função da relação água/material cimentício: a) massa específica; b) absorção de água por imersão; c) índice de vazios (SILVA et al., 2006b)..... 21

**Figura 2.3:** Absorção por capilaridade aos 63 dias em função da: a) classe de resistência; b) relação água/material cimentício (SILVA et al., 2006b) 24

**Figura 2.4:** Altura de ascensão capilar em função da: a) classe de resistência; b) relação água/material cimentício (SILVA et al., 2006b)..... 25

**Figura 2.5:** Corrosão localizada na armadura do concreto: no ânodo ocorre a dissociação do ferro e no cátodo ocorre a formação da ferrugem..... 28

**Figura 2.6:** Mecanismo da corrosão por pite (TREADAWAY, 1988 apud CASCUDO, 1997)..... 38

**Figura 3.1:** Esquema do método de quatro pontos para medida da resistividade elétrica aparente do concreto (adaptado de GOWERS; MILLARD, 1999; DARBY, 1999 apud MEDEIROS, 2001)..... 56

**Figura 3.2:** Campo elétrico ao redor do ponto de corrosão (adaptado de MIETZ; LSECKE, 1996)..... 58

**Figura 4.1:** Fluxograma das atividades experimentais..... 62

**Figura 4.2:** Corpos-de-prova para o estudo da corrosão das armaduras: a) medida da resistividade elétrica aparente do concreto; b) medida do potencial de corrosão..... 69

**Figura 4.3:** Curva granulométrica da escória granulada de alto-forno ensaiada na ABCP (BOURGUIGNON, 2004)..... 74

**Figura 4.4:** Difração de raios X da escória granulada de alto-forno moída ensaiada na ABCP (BOURGUIGNON, 2004)..... 74

**Figura 4.5:** Curva granulométrica da areia..... 75

**Figura 4.6:** Curva granulométrica: a) da brita 0; b) da brita 1..... 76

**Figura 4.7:** Diagrama de dosagem aos 28 dias para a mistura com cimento Portland CP II-E-32 (BOURGUIGNON, 2004)..... 77

**Figura 4.8:** Diagrama de dosagem aos 28 dias para a mistura com cimento Portland CP III-32-RS (BOURGUIGNON, 2004)..... 77

**Figura 4.9:** Diagrama de dosagem aos 28 dias para a mistura em massa de 50% de cimento Portland CP III-32-RS e 50% de escória granulada de alto-forno moída (BOURGUIGNON, 2004)..... 78

**Figura 4.10:** Ciclo de envelhecimento acelerado e suas etapas..... 80

**Figura 4.11:** Câmaras para o envelhecimento acelerado e estufa..... 82

**Figura 4.12:** Seqüência de preparo das amostras: a) marcação dos corpos-de-prova; b) fratura da seção transversal; c) seção recém-fraturada; d) limpeza da seção..... 85

**Figura 4.13:** Seqüência de preparo do ensaio de profundidade de carbonatação: a) aspersão da solução de fenolftaleína; b) medida da profundidade de carbonatação..... 86

**Figura 4.14:** Seqüência de preparo do ensaio de profundidade de penetração de cloretos: a) aspersão da solução de nitrato de prata; b) medida da profundidade de penetração de cloretos..... 87

**Figura 4.15:** Ensaio de resistividade elétrica aparente do concreto com o uso do medidor RESI..... 89

**Figura 4.16:** Representação esquemática dos corpos-de-prova de dimensões: a) 70mmx150mmx150mm; b) 90mmx150mmx150mm..... 90

**Figura 4.17:** Processo de limpeza das barras de aço: a) imersão em solução de ácido clorídrico; b) escovação das barras; c) imersão em acetona; d) delimitação das barras..... 91

**Figura 4.18:** Esquema do corpo-de-prova sob ensaio do potencial de corrosão (cotas em mm)..... 92

**Figura 4.19:** Corpo-de-prova submetido ao ensaio de potencial de corrosão..... 93

**Figura 5.1:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos em função da relação água/material cimentício..... 97

**Figura 5.2:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos em função da classe de resistência..... 98

**Figura 5.3:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para as misturas com CP II-E-32 aos 365 dias, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício..... 98

**Figura 5.4:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para as misturas com CP III-32-RS aos 365 dias, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício..... 99

**Figura 5.5:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para as misturas com CP III-32-RS + e aos 365 dias, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício..... 99

**Figura 5.6:** Profundidade de carbonatação a cada ciclo de envelhecimento acelerado em função da classe de resistência e da relação água/material cimentício para concretos com: a), b) cimento CP II-E-32; c), d) cimento CP III-32-RS, e; e), f) cimento CP III-32-RS + e.... 101

**Figura 5.7:** Profundidade de penetração de cloretos a cada ciclo de envelhecimento acelerado em função da classe de resistência e da relação água/material cimentício para concretos com: a), b) cimento CP II-E-32; c), d) cimento CP III-32-RS, e; e), f) cimento CP III-32-RS + e..... 102

**Figura 5.8:** Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos no 5º ciclo, em função relação água/material cimentício..... 104

**Figura 5.9:** Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos no 5º ciclo, em função da classe de resistência..... 104

**Figura 5.10:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para o concreto com o cimento CP II-E-32, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício (após 5º ciclo)..... 105

**Figura 5.11:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para o concreto com o cimento CP III-32-RS, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício (após 5º ciclo)..... 105

**Figura 5.12:** Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para o concreto com o cimento CP III-32-RS + e, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício (após 5º ciclo) 106

**Figura 5.13:** Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos, para a classe C20 durante os ciclos..... 108

**Figura 5.14:** Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos, para a classe C30 durante os ciclos..... 109

**Figura 5.15:** Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos, para a classe C40 durante os ciclos..... 109

**Figura 5.16:** Carbonatação e cloretos da classe C20: a) a 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; b) após o 5º ciclo de envelhecimento acelerado... 112

**Figura 5.17:** Carbonatação e cloretos da classe C30: a) a 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; b) após o 5º ciclo de envelhecimento..... 112

**Figura 5.18:** Carbonatação e cloretos da classe C40: a) a 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; b) após o 5º ciclo de envelhecimento..... 112

**Figura 5.19:** Resistividade elétrica aparente do concreto em função do tempo de exposição para os traços: a) T1 (C20 CP II-E-32); b) T2 (C20 CP III-32-RS); c) T3 (C20 CPIII-32-RS + e); d) T4 (C30 CP II-E-32); e) T5 (C30 CP III-32-RS); f) T6 (C30 CPIII-32-RS + e)..... 114

**Figura 5.20:** Resistividade elétrica aparente do concreto em função do tempo de exposição para os traços: a) T7(C40 CP II-E-32); b) T8 (C40 CPIII-32-RS); c) T9 (C40 CPIII-32-RS + e)..... 115

**Figura 5.21:** Resistividade elétrica aparente do concreto na condição de envelhecimento acelerado em função do tempo de exposição para: a) classe C20; b) classe C30, e; c) classe C40..... 116

**Figura 5.22:** Resistividade elétrica aparente após o 5º ciclo de envelhecimento em função do tempo de exposição para as misturas com CP II-E-32, CP III-32-RS e com CP III-32-RS + e em função: a) da classe real de resistência; b) da relação água/material cimentício..... 117

**Figura 5.23:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C20 com o cimento CP II-E-32, na condição natural... 121

**Figura 5.24:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C20 com o cimento CP III-32-RS, na condição natural..... 122

**Figura 5.25:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C20 com o cimento CP III-32-RS + e, na condição natural..... 122

**Figura 5.26:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C30 com o cimento CP II-E-32, na condição natural..... 123

**Figura 5.27:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C30 com o cimento CP III-32-RS, na condição natural..... 123

**Figura 5.28:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C30 com o cimento CP III-32-RS + e, na condição natural..... 124

**Figura 5.29:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C40 com o cimento CP II-E-32, na condição natural..... 124

**Figura 5.30:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C40 com o cimento CP III-32-RS, na condição natural..... 125

**Figura 5.31:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C40 com o cimento CP III-32-RS + e, na condição natural..... 125

**Figura 5.32:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para a classe C20 na condição de envelhecimento acelerado para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm..... 127

**Figura 5.33:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para a classe C30 na condição de envelhecimento acelerado para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm..... 127

**Figura 5.34:** Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para a classe C40 na condição de envelhecimento acelerado para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm..... 128

**Figura 5.35:** Potencial de corrosão após o 5º ciclo de envelhecimento em função da classe de resistência para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm..... 131

**Figura 5.36:** Potencial de corrosão após o 5º ciclo de envelhecimento em função da relação água/material cimentício para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm..... 131

## LISTA DE QUADROS

**Quadro 1.1:** Limites dos teores de escória de alto-forno em cimentos de vários países (adaptado de SILVA et al., 2006a)..... 5

**Quadro 2.1:** Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento Portland (JOHN, 1995)..... 12

**Quadro 2.2:** Mecanismos de transportes e suas respectivas leis, força motriz e grau de saturação..... 15

**Quadro 3.1:** Critérios de avaliação da resistividade elétrica do concreto segundo o CEB 192 (1989 apud CASCUDO, 1997)..... 55

**Quadro 3.2:** Critérios de avaliação dos resultados das medidas de potenciais de acordo com a ASTM C 876:1999..... 59

**Quadro 4.1:** Fatores e variáveis da dosagem do concreto para confirmação da resistência à compressão..... 64

**Quadro 4.2:** Fatores e variáveis para análise das propriedades do concreto..... 64

**Quadro 4.3:** Fatores e variáveis para análise da resistência à carbonatação e à penetração de cloretos na condição natural..... 64

**Quadro 4.4:** Fatores e variáveis para análise da resistência à carbonatação e à penetração de cloretos, e resistividade do concreto na condição de envelhecimento acelerado..... 64

**Quadro 4.5:** Fatores e variáveis para análise da resistência à carbonatação e à penetração de cloretos, e potencial de corrosão na condição de envelhecimento acelerado..... 64

**Quadro 4.6:** Diretrizes da NBR 6118:2003 para os elementos viga e pilar de concreto armado..... 65

**Quadro 4.7:** Número de corpos-de-prova para avaliação das propriedades físicas e mecânicas e respectivas normas..... 68

**Quadro 4.8:** Dimensões e destinação dos corpos-de-prova..... 69

**Quadro 4.9:** Quantidade de corpos-de-prova e de leituras para avaliação da profundidade de carbonatação e de penetração de $Cl^-$ e da corrosão das armaduras na condição natural..... 70

**Quadro 4.10:** Quantidade de corpos-de-prova e de leituras para avaliação da profundidade de carbonatação e de penetração de $Cl^-$ e da corrosão das armaduras na condição de envelhecimento acelerado..... 70

**Quadro 4.11:** Análise química do cimento Portland composto CP II-E-32 (30% de escória de alto-forno) determinada por espectroscopia de raios X (SILVA et al., 2006b)..... 71

**Quadro 4.12:** Análise química do cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS (66% de escória de alto-forno) determinada por espectroscopia de raios X (SILVA et al., 2006b)..... 72

**Quadro 4.13:** Características físicas e químicas dos cimentos Portland composto CP II-E-32 (30% de escória) e de alto-forno CP III-32-RS (66% de escória) (SILVA et al., 2006b)..... 72

**Quadro 4.14:** Características físicas da mistura de 50% de escória granulada de alto-forno moída e 50% de cimento Portland CP III-32-RS totalizando 83% em massa de cimento (SILVA et al., 2006b)..... 73

**Quadro 4.15:** Análise química da escória granulada de alto-forno moída..... 73

**Quadro 4.16:** Características físicas da escória granulada de alto-forno moída..... 73

**Quadro 4.17:** Caracterização física da areia..... 75

**Quadro 4.18:** Características físicas das pedras britadas nº 0 e nº 1..... 75

**Quadro 4.19:** Traços em massa utilizados na produção dos concretos do estudo..... 79

**Quadro 4.20:** Concentração de $CO_2$ utilizada em diversas pesquisas (adaptado de BOURGUIGNON, 2004)..... 84

**Quadro 6.1**: Tendências de comportamento das propriedades em função da resistência à compressão, relação água/material cimentício e teor de escória de alto-forno..... 142

**LISTA DE TABELAS**


**Tabela 4.1:** Modelo de ajustes de curvas (BOURGUIGNON, 2004)..... 78

**Tabela 5.1:** Resistência à compressão aos 28 dias (média e desvio-padrão) dos concretos estudados..... 161

**Tabela 5.2:** ANOVA e teste *a posteriori* de Duncan para a variável resistência à compressão aos 28 dias com fator de variação material cimentício (n=4) 161

**Tabela 5.3:** Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios (média e desvio-padrão) dos concretos estudados (SILVA et al., 2006b). 161

**Tabela 5.4:** ANOVA e teste *a posteriori* de Duncan para a variável massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios com fator de variação material cimentício (n=3) (SILVA et al., 2006b)..... 162

**Tabela 5.5:** Absorção por capilaridade e altura de ascensão capilar aos 63 dias de idade (média e desvio-padrão) para os concretos estudados (SILVA et al., 2006b)..... 162

**Tabela 5.6:** Profundidade de carbonatação na condição natural..... 163

**Tabela 5.7:** Profundidade de penetração de cloretos na condição natural..... 163

**Tabela 5.8:** Profundidade de carbonatação na condição de envelhecimento acelerado 164

**Tabela 5.9:** Profundidade de penetração de cloretos na condição de envelhecimento acelerado..... 164

**Tabela 5.10:** Resistividade elétrica aparente (média e desvio-padrão) dos concretos classe C20..... 165

**Tabela 5.11:** Resistividade elétrica aparente (média e desvio-padrão) dos concretos classe C30..... 165

**Tabela 5.12:** Resistividade elétrica aparente (média e desvio-padrão) dos concretos classe C40..... 166

**Tabela 5.13:** Potencial de corrosão (média e desvio-padrão) dos concretos classe C20..... 166

**Tabela 5.14:** Potencial de corrosão (média e desvio-padrão) dos concretos classe C30..... 167

**Tabela 5.15:** Potencial de corrosão (média e desvio-padrão) dos concretos classe C40..... 167

**LISTA DE SIGLAS**

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI – American Concrete Institute
ASTM – American Society for Testing and Materials
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEB – Comité Euro-International du Betón
CMN – Comité Mercosur de Normalización
FEST – Fundação Espírito-santense de Tecnologia
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
GGBFS – Ground granulated blast furnace slag
IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia
INCAPER – Instituto de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural
LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção
NBR – Norma Brasileira Registrada
NEXES – Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas
SCA – Slag Cement Association
SHRP – Strategic Highway Research Program
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo
UNI – Ente Nazionale Italiano Di Unificazione
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

**NOMENCLATURA DA QUÍMICA DO CIMENTO**

Principais óxidos: A – $Al_2O_3$; C – CaO; F – $Fe_2O_3$; H – $H_2O$; K – $K_2O$; M – MgO; N – $Na_2O$; S – $SiO_2$

AFt – trissulfoaluminato de cálcio [$C_3A(\overline{C}S)_3H_{32}$] ou etringita; designação dada aos produtos estruturalmente similares à etringita, podendo possuir composição química variável e conter óxido de ferro em suas estruturas

AFm – monossulfoaluminato de cálcio [$C_3A(\overline{C}S)H_{12}$]

$AH_3$ – aragonita

$\overline{C}$ – óxido de carbono

$C_3S$ – silicato tricálcico (alita quando impuro)

$C_2S$ – silicato dicálcico (belita quando impuro)

$C_3A$ – aluminato tricálcico

$C_3A\overline{C}_xH_{12}$ (com x entre 0,25 e 0,5) – aluminato de cálcio hidratado carbonatado

$C_3A_2S_3O_{12}$ – hidrogranada

$C_4AF$ – ferroaluminato tetracálcico (ex.: ferrita)

$CaCO_3$ – carbonato de cálcio (ex.: calcita)

$CaMg(CO_3)_2$ – carbonato de cálcio e magnésio (ex.: dolomita)

CH ou $Ca(OH)_2$ – hidróxido de cálcio (ex.: portlandita)

$Cl^-$ – cloreto

$Cl^-/OH^-$ – relação iônica entre cloretos e hidroxilas

C-S-H tipo I – silicato de cálcio hidratado (ex.: tobermorita)

C-S-H tipo II – silicato de cálcio hidratado (ex.: tobermorita)

C/S – relação $CaO/SiO_2$

KOH – hidróxido de potássio

$Mg(OH)_2$ – hidróxido de magnésio (ex.: brucita)

NaOH – hidróxido de sódio (ex.: soda caustica)

$Na_2Oeq$ – equivalente alcalino ($\%Na_2O + 0{,}658\ \%K_2O$)

$OH^-$ – hidroxila

$SiO_2$ – sílica

$SiO_2nH_2O$ – gel de sílica

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O concreto oferece proteção especial às armaduras, em decorrência da alcalinidade da água de poro e da espessura de cobrimento. Porém, em virtude da grande periodicidade de manutenções exigidas, constata-se que a corrosão das armaduras é o principal problema das estruturas de concreto armado (CAIRNS; MELVILLE, 2003).

Aglomerantes alternativos têm sido utilizados na tentativa de diminuir o problema da corrosão das armaduras do concreto. Entre eles, a escória granulada de alto-forno, co-produto[1] da produção do aço, já é bem conhecida e intensivamente utilizada como adição mineral ao cimento Portland e ao concreto, adicionada, neste caso, diretamente na betoneira.

Assim, a escória granulada de alto-forno é uma das soluções encontradas para minimizar as manutenções e permitir o atendimento da vida útil de projeto das estruturas por meio da melhoria na qualidade do concreto de cobrimento, sobretudo pela grande redução nos coeficientes de transporte de fluidos no concreto.

Almejando o atendimento à durabilidade das estruturas de concreto armado, a NBR 6118:2003 prevê, com maiores detalhes, os critérios para a especificação da espessura de cobrimento e qualidade do concreto, considerando que os agentes agressivos, após atravessarem a camada de cobrimento, chegam às armaduras por mecanismos de transporte de massa, principalmente por absorção capilar e difusão, e podem ocasionar corrosão.

As propriedades dos concretos produzidos com escória variam significantemente de acordo com o teor, a reatividade e a finura da escória utilizada (HOPPE FO; ISAIA; GASTALDINI, 2002). Outros fatores não ligados diretamente ao teor e às características físico-químicas da escória também influenciam, tais como a relação água/material cimentício, a reatividade e a finura do clínquer Portland, e a variação e as características físico-químicas dos demais constituintes da mistura.

Do ponto de vista ambiental e econômico, a escória é muito atraente para ser utilizada como material de preenchimento no concreto fresco, o que proporciona a ele maior coesão e trabalhabilidade (ARAUJO et al., 2003; RAJAMANE, et al., 2003; SAMET; CHAABOUNI, 2004). Se bem proporcionada, a utilização da escória de alto-forno pode ajudar a estender a vida útil de projeto das estruturas de concreto armado (WEGNER et al., 2005).

---

[1] *Co-produto* é um material que deixou de ser classificado como resíduo por ter utilização técnica, econômica e ambiental viável. *Sub-produto* é o co-produto que já possui valorização comercial.

A preocupação em relação aos níveis crescentes de $CO_2$ e o impacto no aquecimento global, freqüentemente chamado efeito estufa, têm sido tema de debate contínuo em nível mundial. Estudos confirmam claramente que a concentração atmosférica de $CO_2$ aumentou aproximadamente 25% nos últimos 200 anos – ou com o início da Revolução Industrial – e tem crescido a uma velocidade exponencial (HOGAN; MEUSEL; SPELLMAN, 2001). O uso da escória de alto-forno nos cimentos e diretamente no concreto ajuda a diminuir a emissão de gases de efeito estufa.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Todos os anos são gastos bilhões de dólares em reparos e manutenção de estruturas de concreto armado, pois, com o passar do tempo, o aço fica mais suscetível à corrosão pela exposição a agentes agressivos, tais como cloretos e gás carbônico.

Muitos esforços têm sido empreendidos em projetos de novas estruturas para reduzir ou eliminar a corrosão das armaduras, tais como: o aumento da espessura de cobrimento do concreto; a utilização de concreto com coeficientes de transporte de massa reduzidos; a substituição da armadura de aço por materiais alternativos; ou, ainda, a combinação de duas ou de todas as três soluções.

Os custos de reparo e manutenção das estruturas de concreto armado excedem 0,5 bilhão de libras no Reino Unido (HOBBS, 1996, apud CAIRNS; MELVILLE, 2003). Somente em pontes, nos Estados Unidos, gastam-se 8,3 bilhões de dólares ao ano, e, se forem incluídos custos indiretos (demora de tráfego, queda de produtividade), esse número pode aumentar dez vezes (KOCH et al., 2002). Estima-se que essas manutenções aumentem 0,5 bilhão de dólares por ano (STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 1993).

Tais dados alarmantes em nível mundial motivam ações, programas e estudos na tentativa de proporcionar maior durabilidade às estruturas de concreto armado, principalmente por meio da iniciativa pública, já que muitas das estruturas mais suscetíveis, como pontes e túneis, pertencem aos governos.

Materiais cimentícios alternativos, resíduos sólidos industriais, além de novos conceitos e concepções de projeto estão sendo estudados e empregados. A escória granulada de alto-forno é uma das alternativas encontradas pelo meio técnico-científico.

Na vertente ambiental, se justifica a utilização da escória de alto-forno na produção de cimentos e concretos, porque na produção de cada tonelada de cimento é lançada 0,6 tonelada

de $CO_2$ na atmosfera. Além disso, reduz-se a exploração de recursos naturais esgotáveis (argila e calcário).

Do ponto de vista econômico, o uso da escória diminui o consumo de energia e de recursos naturais na produção de cimento; como material cimentício, ajuda na redução dos custos de disposição de resíduos (HOGAN; MEUSEL; SPELLMAN, 2001). Se a escória for bem empregada no concreto, observa-se a minimização de gastos em manutenções devidas à corrosão das armaduras.

Segundo dados estatísticos, a produção de aço bruto no Brasil foi de 34 427,9 milhões de toneladas nos últimos 12 meses (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2008). Os investimentos na siderurgia fazem a produção mundial de aço bruto atingir o patamar de 106,857 milhões de toneladas em fevereiro de 2008, com crescimento anual de 5,3% em relação a 2007 (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2008).

Como parte desses investimentos, a ArcelorMittal Tubarão eleva a capacidade de produção de semi-acabados de aço (placas e bobinas a quente) de 5 milhões para 7,5 milhões de toneladas por ano. Com a inauguração do Alto-forno 3, em julho de 2007, a produção de ferro gusa passa a ser de 2,8 milhões de toneladas ao ano (ARCELOR..., 2007).

Se forem produzidos 300 kg de escória de alto-forno por cada tonelada de gusa (SCHMIDT et al., 2004), pode-se estimar que a produção de escória de alto-forno no Brasil seja de aproximadamente 10,3 milhões de toneladas ao ano, com base nos últimos 12 meses.

A atual destinação desse co-produto é a indústria cimenteira, responsável por cerca de 7% das emissões artificiais totais de dióxido de carbono na atmosfera a cada ano (MEHTA, 2004). Comparada à produção de cimento Portland comum, a significante redução desse gás de efeito estufa a partir da produção de cimento Portland com escória já é bem reconhecida.

Somente no Brasil, com uma produção no ano de 2006 de 44,725 milhões de toneladas de cimento Portland (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2008), estima-se que sejam liberadas para a atmosfera aproximadamente 31,3 milhões de toneladas por ano de dióxido de carbono. Assim, uma substituição de 50%, em cada tonelada produzida, por escória granulada de alto-forno resulta em uma redução de aproximadamente 15,65 milhões de toneladas de emissão anual de $CO_2$ na atmosfera brasileira, já que a escória não precisa de calcinação.

Pode-se perceber que os investimentos na produção do aço apontam para um aumento na produção de escória de alto-forno e demais resíduos do processo siderúrgico, e que, por outro

lado, o aumento na produção de cimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2008) indica um débito no sistema de troca de cotas de $CO_2$. Constata-se com isso, que é necessário tomar medidas que dêem destinos ambiental e tecnicamente responsáveis à escória de alto-forno.

A ArcelorMittal Tubarão vem fomentando pesquisas para o aproveitamento dos seus resíduos e co-produtos industriais produzidos, entre os quais está a escória de alto-forno. Seus motivos são, principalmente, os conceitos firmados na sustentabilidade ambiental, econômica e social.

### 1.1.1 Escória de alto-forno: tendência e normalização

O reconhecimento das melhorias obtidas nas propriedades do concreto com escória de alto-forno tem ampliado mundialmente a sua utilização. Seu uso aumentou tanto nos últimos anos a ponto de não ser mais apenas uma opção, mas também uma exigência nas especificações técnicas.

Além das razões técnicas, observam-se ganhos ambientais e econômicos, já que o aumento mundial de seu uso proporciona economia na produção de cimentos compostos, cimentos de alto-forno e de concretos (ACI 233R:2003).

Na prática, o que inviabilizaria a utilização da escória de alto-forno sem ativadores diretamente como material cimentício seria a sua lenta hidratação em relação ao cimento Portland (SILVA, 1998). Essa lentidão pode ser contornada, pois o mecanismo fundamental da hidratação da escória de alto-forno é muito semelhante ao do cimento Portland. Se a escória é colocada em água com elevado pH – para isso podem-se usar ativadores químicos, como a cal hidratada, a calcita e o próprio cimento Portland – sua velocidade de dissolução aumenta e forma produtos hidratados estáveis, tal como ocorre no cimento Portland (JOHN, 1995; RICHARDSON, 2006; TAYLOR, 1992).

A união do clínquer Portland com a escória de alto-forno produz cimentos que são excelentes exemplos dos novos conceitos de produção holística das indústrias, pois podem reduzir o impacto ambiental (MEHTA, 2004). Seguindo essa tendência, já existem dez tipos de cimento com escória de alto-forno na Europa (GRUBE; KERKHOFF, 2004).

No estágio de conhecimento atual, os limites de teores de escória de alto-forno adicionada ao cimento variam nas normas de diversos países, conforme descrito no Quadro 1.1.

**Quadro 1.1: Limites dos teores de escória de alto-forno em cimentos de vários países (adaptado de SILVA et al., 2006a).**

| País | Teor (%) | Norma/referência |
|---|---|---|
| México | 60 | NMXC 414 ONNCCE |
| Estados Unidos | 70 | ASTM C 595:68 |
| Japão | 70 | JIS R 5211 |
| Brasil | 70 | NBR 5735:1991 |
| Argentina | 75 | IRAM 50000:2000 |
| Chile | 75 | NCh 148 Of 68 |
| Rússia | 80 | ROY:MALEK (1993) |
| República Tcheca | 80 | ROY:MALEK (1993) |
| Alemanha | 85 | ROY:MALEK (1993) |
| Inglaterra | 90 | BS 4246:1974 |
| União Européia | 90 | ENV 1997-1:2000 |

Na maioria dos países, o uso da escória de alto-forno nos concretos já está bem estabelecido, e é feito por meio da adição direta na mistura das concreteiras (CIVJAN et al., 2005; MUKHERJEE, 2004). Entretanto, em alguns países, incluindo o Brasil, existem algumas barreiras políticas, técnicas e econômicas que dificultam o uso intensivo desse material.

As barreiras políticas incluem a proibição ou a limitação do uso da escória nas especificações técnicas por parte de projetistas e concreteiras. Embora já existam alguns inventários transferindo suficiente conhecimento técnico para a aplicação da escória de alto-forno como material cimentício suplementar, as baixas resistências iniciais são a barreira técnica para sua utilização no concreto. As barreiras econômicas implicam a disponibilidade da escória a um preço acessível (MUKHERJEE, 2004).

No Brasil, o entrave na utilização da escória de alto-forno tem sido o seu emprego diretamente na betoneira para o preparo de concretos. Na recente publicação da NBR 12655:2006 (p. 2), o concreto é definido como um

> [...] material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água).

Apesar do atual entrave técnico no Brasil, os preços da escória de alto-forno subiram até vinte vezes depois dos processos de privatização, como resultado da crescente conscientização dos benefícios na durabilidade dos concretos produzidos com esse co-produto (JOHN, 1995). Hoje, internacionalmente, a escória granulada de alto-forno moída é vendida, em média, a 72 dólares a tonelada (OSS, 2006).

O custo da escória de alto-forno ainda é significativamente menor do que o custo do cimento Portland. No Brasil, o preço da escória de alto-forno moída é cerca de cinco vezes[2] menor do que o preço do cimento Portland; seu uso pode ser vantajoso econômica e ambientalmente se as distâncias de transporte forem mais curtas.

As normas nacionais somadas às diretrizes do ACI (American Concrete Institute) podem ser adequadas à utilização da escória de alto-forno nas usinas de concreto. Mas as implicações dos outros requisitos adotados em normas estrangeiras necessitam de revisão e maior entendimento para sua utilização no Brasil.

Para prever a vida útil das estruturas de concreto armado, as atuais normas européia e alemã (DIN EN 206-1:2000 e DIN EN 1045-2:2001)[3], por meio de uma estratégia descritiva, fazem associação do tipo de cimento, da relação água/cimento, do consumo de cimento e da resistência à compressão com as condições ambientais. Fornecem subsídios para estimar a vida útil das estruturas de concreto com base nas condições ambientais, levando em conta o tipo de ataque, se de $CO_2$ ou $Cl^-$, por exemplo, e a umidade (GRUBE; KERKHOFF, 2004).

Quando o concreto está sujeito à carbonatação, essas normas prevêem o ataque em ambiente interno seco, constantemente molhado (exposto à água não corrosiva), moderadamente úmido (ambiente abrigado e úmido) e condições sazonais entre seco e molhado (exposto à chuva). Quando o concreto está sujeito ao ataque de cloretos, prevê o ataque para moderadamente úmido (ação de cloretos por sais de degelo ou névoa salina), constantemente molhado (em contato contínuo com água salina), e condições sazonais entre seco e molhado (contato revezado entre água salina e secagem) (GRUBE; KERKHOFF, 2004).

Tais normas ainda não mostram que efeito prevalece em estruturas expostas ao ataque conjunto de $CO_2$ e cloretos, que é o caso de estruturas de concreto aparente expostas em região urbana, industrial e marinha, sujeitas à ação da poluição atmosférica e da névoa salina. A nomenclatura dessa condição, de acordo com as normas, é a ação conjunta de XC4 (condições sazonais entre seco e molhado com carbonatação, ou o mesmo que exposição à

---

[2] Especificamente na região da Grande Vitória, a demanda do mercado das cimenteiras tem sido cerca de 50% maior do que a oferta das siderúrgicas. Paulo César Goulart Lana, gerente de vendas especiais da CST-ARCELOR BRASIL, estima o preço de R$60,00 a tonelada para a escória em janeiro de 2007, incluindo os custos indiretos – aluguel de terreno, custo de amortização de capital, lucro e outros – e fixos – pessoal, investimento de equipamentos e outros – (informação verbal), ainda assim, muito menor do que o cimento Portland, cujo preço é de R$300,00 a tonelada.

[3] As normas alemãs são identificadas pela sigla DIN e, quando também são empregadas na comunidade européia, também apresentam a sigla EN, assim como no Brasil, onde as normas têm a sigla NBR e quando acompanham a sigla NM também fazem parte das normas da Associação Mercosul de Normalização.

chuva com carbonatação) e XD1 (névoa salina). Além disso, somente se aplicam a um teor comprovado de escória de alto-forno de até 70% em massa no cimento de alto-forno.

Percebe-se, assim, a necessidade de mais estudos e a importância de associar-se o consumo de cimento com escória (C), ou da massa total de materiais cimentícios, ou do concreto com escória adicionada diretamente na betoneira, à agressividade ambiental, incluindo-se as condições de umidade, e às principais características que definem o concreto: relação água/cimento, consumo de cimento Portland (C) e resistência à compressão.

É provável que no futuro a qualidade do concreto seja especificada por meio das constantes K dos principais mecanismos de transporte de íons, gases e líquidos pela rede de poros, que dependem essencialmente da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento (ANDRADE; ALONSO; GONZÁLEZ, 1990 apud HELENE, 2004).

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência de teores de escória de alto-forno de 30%, 66% e 83% (sobre a massa total de material cimentício) em classes de resistência à compressão C20, C30 e C40 sobre a capacidade de proteção de cobrimentos de concretos, dando ênfase à questão da corrosão das armaduras. Os passos para atingir esse objetivo são:

- levantamento bibliográfico sobre os mecanismos de corrosão das armaduras e os efeitos da adição da escória de alto-forno na proteção frente à corrosão;
- estudo de diversas técnicas para monitoramento da corrosão em laboratório;
- estudo do efeito da resistência à compressão aos 28 dias, da relação água/material cimentício, da espessura de cobrimento e dos teores de escória de alto-forno na resistividade elétrica aparente do concreto e no potencial de corrosão;
- estudo do efeito da profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos em função da resistência à compressão, da relação água/material cimentício, da espessura de cobrimento, e dos teores de escória de alto-forno; e comparação com os resultados da resistividade elétrica aparente do concreto e do potencial de corrosão.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. No capítulo 1, apresentam-se a introdução e as justificativas para este estudo.

No capítulo 2, por meio de revisão bibliográfica, justificar-se-á a influência da escória nas propriedades do concreto, com ênfase na durabilidade que ela favorece. Será apresentado, também, o mecanismo da corrosão das armaduras, destacando-se a corrosão induzida por carbonatação, por cloretos e pela ação conjunta de carbonatação e cloretos, embora existam outros mecanismos.

O capítulo 3 tratará das técnicas para monitoramento, em laboratório, da corrosão das armaduras, com ênfase particular nas técnicas utilizadas nesta pesquisa: resistividade elétrica aparente do concreto e potencial de corrosão.

O capítulo 4 descreverá os materiais, os métodos e o planejamento experimental.

No capítulo 5, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. As variáveis deste estudo serão avaliadas na condição de envelhecimento acelerado, e parte delas avaliadas na condição natural.

No capítulo 6, serão apresentadas as principais conclusões e sugestões de possíveis estudos para questões surgidas a partir desta dissertação.

Após o capítulo 6, as referências bibliográficas, e finalmente, os anexos com suas tabelas estarão disponíveis para consulta do leitor.

# CAPÍTULO 2 – CORROSÃO DAS ARMADURAS: MECANISMOS E O PAPEL DA ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

## 2.1 Introdução

Geralmente, a suscetibilidade do aço à corrosão se deve à alta energia de Gibbs para sua produção a partir do minério de ferro, sendo necessário empregar-se a mesma energia para que o metal não sofra corrosão e retorne ao seu estado original de baixa energia.

No caso do concreto armado, essa energia é bastante minimizada pela boa proteção química e física oferecida pelo concreto de cobrimento à armadura de aço. A proteção química é fornecida, principalmente, pela natureza alcalina da água de poro, com pH entre 13 e 14, que passiva as armaduras e as protege da corrosão; já a proteção física é fornecida, principalmente, pela espessura de cobrimento, seja retardando ou prevenindo a penetração de agentes agressivos.

Essa proteção pode ser potencializada aumentando-se a espessura de cobrimento, ou melhorando-se as propriedades do concreto de cobrimento (seção 2.3), ou os dois procedimentos simultaneamente. Por sua vez, as propriedades do concreto de cobrimento podem ser melhoradas com o emprego da escória de alto-forno, dentre outros tipos de adições minerais, o que resulta em aumento da resistência mecânica em idades finais, aumento de durabilidade e diminuição nos coeficientes de transporte de massa (BABU; KUMAR, 2000; HOGAN; MEUSEL; SPELLMAN, 2001; MUKHERJEE, 2004).

Tais melhorias são resultantes do refinamento de poros do concreto, o que dificulta a penetração de dióxido de carbono ($CO_2$), cloretos e sulfatos (BAUER; HELENE, 1993; HOGAN, MEUSEL; SPELLMAN, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Este capítulo tem o objetivo de discutir o mecanismo de passivação e o de corrosão das armaduras; também trata com mais detalhes da corrosão induzida por carbonatação, por cloretos e pela ação conjunta de carbonatação e cloretos, por ser o objeto deste estudo.

Entretanto, a corrosão também pode ser induzida por substâncias ácidas (BELIE et al., 1996; SAKR, 2004), substâncias básicas (GENTIL, 1996), pela ação conjunta de cloretos e sulfatos (DEHWAH; MASLEHUDDIN; AUSTIN, 2002), por fragilização por hidrogênio (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994), por cloro (atômico) em obras hidráulicas (nas paredes laterais e fundo) (CENTRO DE PESQUISAS E

DESENVOLVIMENTO, 1992), ou por um ou mais desses agentes agressivos em ação conjunta.

Este capítulo trata das características da escória granulada de alto-forno como material hidráulico latente, de alguns mecanismos de transporte de $CO_2$ e de cloretos, com ênfase na absorção de água por imersão e capilar, e dos mecanismos de corrosão das armaduras induzida por $CO_2$ e cloretos. E, por último, trata dos efeitos na durabilidade obtidos com o uso de concretos com escória de alto-forno.

## 2.2 Escória de alto-forno: obtenção e características

O processo para a produção de ferro gusa e escória de alto-forno ocorre em um alto-forno à temperatura de 1650°C (HOGAN; MEUSEL; SPELLMAN, 2001), onde o minério de ferro, fundentes (calcário ou dolomita) e combustível ou redutores (coque metalúrgico ou carvão) são introduzidos a fim de efetuar a separação de ferro gusa das impurezas ou gangas, ou seja, promover a redução[1] de seus óxidos (LITTLE; SETEPLA, 1999).

As escórias formam-se pela fusão das impurezas do minério de ferro (ganga) com os fundentes e as cinzas do coque. Por meio dos fundentes é possível retirar-se a ganga e obter-se uma escória suficientemente líquida, o que permite ao mesmo tempo as reações com o metal e o controle de sua qualidade. As espécies químicas mais utilizadas como fundentes são CaO, MgO, $CaF_2$ e, em alguns casos, um fundente ácido, como o $SiO_2$ (GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995; WAELKENS; CARMINE, 1985).

Por sua insolubilidade e menor densidade, a escória fundida sobrenada no ferro gusa, e então pode ser conduzida por canais ao pátio de resfriamento ao ar, ou aos granuladores (GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995; WAELKENS; CARMINE, 1985).

Quando a escória, ao sair do alto-forno, é conduzida aos granuladores e resfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão, obtém-se a escória granulada de alto-forno. A granulometria obtida é semelhante à da areia de rio, com uma estrutura porosa, textura áspera e massa unitária em torno de 1000 kg/m³ (ALDASORO, 1985; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995; HOGAN; MEUSEL; SPELLMAN, 2001).

O resfriamento brusco da escória impede que os átomos se organizem em estrutura cristalina. Com isso, o sólido vítreo formado apresenta um nível mais elevado de energia por reter a energia de cristalização, constituindo-se um material predominantemente amorfo com

[1] Em termos de siderurgia, redução é a retirada do oxigênio do minério.

atividade hidráulica latente (DRON, 1984 apud SILVA, 1998). Ao ser seca e moída, obtém-se a escória granulada de alto-forno moída, que tem características de material cimentício.

As principais características que influenciam a reatividade da escória de alto-forno são: o grau de vitrificação (teor de vidro), a finura, e a composição química e mineralógica (SAMET; CHAABOUNI, 2004; TAYLOR, 1992).

A fração vítrea deve representar pelo menos dois terços da escória de alto-forno para atendimento aos requisitos de reatividade (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003), sabendo que somente o vidro apresenta solubilidade suficiente para participar das reações de hidratação (COELHO, 2002; JOHN, 1995).

A hidraulicidade da escória também depende da sua reatividade (COELHO, 2002). Por sua vez, a reatividade depende da temperatura da escória líquida dentro do alto-forno e das condições de resfriamento, fatores que modificam as valências de coordenação e as energias de ligação das escórias. A finura é de grande influência na atividade e hidraulicidade da escória, pois uma maior finura aumenta a atividade da escória (MUKHERJEE, 2004).

A velocidade de hidratação da escória sem ativadores é mais lenta do que a do cimento Portland. Dados mostram que entre 8% e 16% de escória se hidratam na idade de 3 dias, e entre 30% e 37%, aproximadamente, antes de completar 28 dias. Aos 150 dias, ocorre a hidratação dos grãos anidros da escória sem ativadores (RAJAOKARIVONY-ANDRIAMBOLONA et al.1990 apud SILVA, 1998), e medidas eletroquímicas (potencial de corrosão, taxa de corrosão) podem apresentar altos coeficientes de variação (JUNG; YOON; SOHN, 2003). Partículas maiores do que 45 μm são difíceis de hidratar-se e as maiores do que 75 μm nunca se hidratam completamente (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A composição química das escórias de alto-forno contém entre 95% e 96% do total de óxidos, CaO, $SiO_2$, $Al_2O_3$ e MgO, que são os mesmos que compõem o clínquer Portland, porém em proporções diferentes. Podem ainda existir em quantidades menores FeO, MnO, enxofre, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 1994). O teor desses óxidos pode variar na composição da escória, dependendo da composição das matérias-primas e do processo.

As escórias de alto-forno são classificadas como ácidas ou básicas; quanto mais básica for a escória, maior será sua atividade hidráulica na presença de ativadores alcalinos (JOHN, 1995;

SILVA, 1998). A basicidade[2] da escória pode ser determinada por meio de diversos módulos definidos por diferentes autores. Mas o módulo de basicidade mais simples e mais aplicável em pesquisas é a relação $CaO/SiO_2$.

No Quadro 2.1 observa-se a composição química média das escórias de alto-forno básicas e ácidas produzidas no Brasil, comparada à do cimento Portland (JOHN, 1995; LITTLE; SETEPLA, 1999; WAELKENS; CARMINE, 1985).

**Quadro 2.1: Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento Portland (JOHN, 1995).**

| | Escória Básica (BATTAGIN; ESPER, 1988). | Escória Ácida (adaptado de SOARES, 1982). | Cimento Portland (TAYLOR, 1992). |
|---|---|---|---|
| CaO | 40-45 | 24-39 | 66 |
| $SiO_2$ | 30-35 | 38-55 | 22 |
| $Al_2O_3$ | 11-18 | 8-19 | 5 |
| MgO | 2,5-9 | 1,5-9 | - |
| $Fe_2O_3$ | 0-2 | 0,4-2,5 | 3 |
| FeO | 0-2 | 0,2-1,5 | - |
| S | 0,5-1,5 | 0,03-0,2 | - |
| $CaO/SiO_2$ média | 1,31 | 0,68 | 3 |

Mantendo-se a basicidade constante, a resistência à compressão aumenta com o teor de alumina, $Al_2O_3$, e uma deficiência de CaO pode ser compensada por uma quantidade maior de alumina (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003). Para predizer-se a atividade hidráulica da escória de alto-forno, também são propostos vários módulos de hidraulicidade (SMOLCZYK, 1978 apud PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003).

A composição química da escória granulada de alto-forno moída é de suma importância para a eficiência de suas reações com o $Ca(OH)_2$, ou para sua reatividade com o clínquer Portland, pois seus teores de vidro reativo e sua finura somente influenciam significantemente se sua composição química estiver dentro de certos limites. A discussão desses limites, que auxiliam na previsão da reatividade da escória, pode ser encontrada no trabalho de Babu e Kumar (2000) e no de Pal, Mukherjee e Pathak (2003). Mas, como norteamento, a NBR 5735:1991 recomenda que o resultado da fórmula $(CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2$ seja maior que 1 para que a escória de alto-forno possa ser utilizada na fabricação de cimento Portland de alto-forno.

Já a ASTM C 989:2004 propõe um ensaio capaz de comparar a resistência de uma pasta com cimento de escória e outra de referência com apenas cimento Portland e, assim, classificar a

[2] A escória de alto-forno é ácida quando é produzida no alto-forno aquecido por carvão vegetal e tem relação $CaO/SiO_2$ inferior a 1, e é básica quando é produzida no alto-forno aquecido por coque e tem relação $CaO/SiO_2$ maior do que 1.

atividade da escória. O índice de atividade (IAE) é considerado por alguns países como o melhor critério para avaliar-se a hidraulicidade da escória.

O concreto produzido com escória possui estrutura de pasta e composição química da solução de poro alteradas; podendo também ser alteradas as exigências relativas à capacidade resistente, ao desempenho em serviço[3] e à durabilidade, se comparado ao mesmo concreto sem escória. Ou seja, os critérios de projeto que visam à durabilidade poderão ser suplantados se o concreto for adicionado com escória.

Uma das alterações químicas possíveis é em relação ao teor de $Ca(OH)_2$ formado, que dá a alcalinidade necessária para proteger as armaduras contra a corrosão. No cimento Portland e na maioria das misturas de cimento Portland e escória, os íons alcalinos, predominantemente $Na^+$ e $K^+$, também são determinantes na alcalinidade da água do poro.

Alguns autores concordam que, quanto maior for o teor de substituição de escória no concreto, menor será o teor de hidróxido de cálcio proveniente do clínquer Portland, e um menor teor de cálcio resultaria em pH menores (BELIE et al., 1996; HOU; CHANG; HWANG, 2004; LONGO, 1985).

Contudo, valores de pH da solução aquosa de concretos com substituição de até 70% de escória de alto-forno são muito pouco afetados pelas reações cimentícias da escória, sendo superiores a 12,78 e nunca inferiores a 11,5 (COSTA; GASTALDINI; ISAIA, 2002; GASTALDINI; ISAIA; ZANELLA, 1999; HELENE, 1993; SUN et al., 2004). Estudos anteriores de Sellevold e Nielsen (1987 apud HELENE, 1993) condizem com esses resultados.

Em alguns casos encontra-se pH em cimento adicionado com escória até mesmo superior ao do cimento Portland comum, fato atribuído ao teor total de álcalis e à reatividade da escória utilizada (KOLLEK et al., 1986 apud BAUER, 1995). Mesmo que ocorra uma leve queda do pH em concretos com escória não haverá impacto na passividade das armaduras em termos de alcalinidade da água de poro (ACI 233-R:2003).

Outra alteração é a relação C/S do C-S-H. Vários estudos mostram que o aumento do teor de escória em pastas de cimento Portland comum reduz a relação C/S do C-S-H e progressivamente muda a morfologia dos produtos de hidratação (RICHARDSON; GROVES, 1992 apud SONG et al., 2000).

[3] Consiste na capacidade de a estrutura manter-se em condições plenas de utilização, não devendo apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o qual foi projetada (NBR 6118:2003, p. 11).

## 2.3 Mecanismos de transporte e suas influências na corrosão das armaduras

O mecanismo de transporte de agentes externos pelo interior do concreto de cobrimento é de suma importância quanto à corrosão das armaduras. É também por meio desses mecanismos que se estima a vida útil das estruturas ou o tempo decorrido para que o agente externo possa atingir as armaduras, chamado período de iniciação (seção 2.5.1), que depende da qualidade do concreto de cobrimento e das exigências de durabilidade.

Em princípio, parece estar subentendido na NBR 6118:2003, p. 45, que a vida útil de projeto[4] deve ter um período mínimo de 50 anos. Especificações diretas de vida útil associadas ao tipo de estrutura podem ser verificadas nas normas internacionais BS 7543:1992 e CEN EN 206:1994 (HELENE, 2004).

A especificação do projeto não pode se ater apenas à capacidade resistente da estrutura, mas também, aos requisitos de qualidade estabelecidos nas normas técnicas, ao desempenho em serviço e à durabilidade[5] da estrutura (NBR 6118:2003, p.11). Os critérios de projeto que visam à durabilidade incluem, entre outros, a qualidade do concreto de cobrimento a qual poderá ser especificada por meio de coeficientes dos mecanismos de transporte de massa pela rede de poros do concreto (HELENE, 2004).

Os mecanismos de transporte de massa, principalmente de substâncias agressivas que participam do processo físico-químico de deterioração, e que afetam a durabilidade das estruturas são: difusão de gases e líquidos, absorção capilar, permeabilidade a gases e líquidos, migração de íons (HELENE, 1993), fluxo por convecção e mecanismos combinados de fluxo de substâncias (NEPOMUCENO, 2005). Todos podem ser simplificadamente expressos por meio da equação $C = K\sqrt{t}$, na qual C é a extensão percorrida pelo agente agressivo em centímetro, K é o coeficiente de um dos mecanismos, e *t* é a vida útil em anos (HELENE, 2004).

Vários modelos já foram propostos para explicar os mecanismos de transporte (Quadro 2.2). Esses modelos são meramente aproximados, pois consideram poros uniformes e contínuos, o que não ocorre na realidade. Deve-se levar em conta que, durante o fluxo, a água reage com

[4] Período no qual são mantidas as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais (NBR 6118:2003).

[5] Capacidade de a estrutura manter-se em condições plenas de utilização, não devendo apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o qual foi projetada (NBR 6118:2003, p. 11).

compostos ainda anidros dos materiais cimentícios, refinando os poros; íons agressivos reagem com compostos da pasta para formar outros compostos, como cloretos que formam cloroaluminatos; e que compostos solúveis podem ser lixiviados, dependendo do pH. Ou seja, a estrutura de poros pode ser substancialmente modificada durante a vida útil do concreto.

O Quadro 2.2, abaixo, mostra resumidamente os mecanismos de transportes com suas leis, forças motrizes, e graus de saturação de poro que os regem.

**Quadro 2.2: Mecanismos de transportes e suas respectivas leis, força motriz e grau de saturação.**

| Mecanismo | Leis/Modelos | Força motriz | Grau de saturação | Unidade |
|---|---|---|---|---|
| Absorção capilar | D'Arcy modificada, Jurin, Laplace, e Arrhenius | Ascensão capilar | insaturado | m/s; g/cm²; m |
| Difusão | Arrhenius, 1ª e 2ª Leis de Fick, e Langmuir | Diferença de concentração* | saturado e parcialmente saturado | m²/s; cm²/s |
| Permeabilidade | D'Arcy e Arrhenius | Diferença de pressão | saturado | m/s; cm/s |
| Migração iônica | Nernst-Planck, Arrhenius, 1ª e 2ª Leis de Fick, Langmuir | Diferença de potencial elétrico | saturado | m²/s; cm²/s |

*Apesar dessa terminologia já firmada na literatura pertinente, na verdade, a força motriz da difusão é o potencial químico, pois determinada região do concreto com certa diferença de concentração de mesma espécie química pode não apresentar diferença de potencial químico total.

Em qualquer situação de transporte duas ocorrências devem ser consideradas. Primeiramente, há a força motriz causadora do movimento; na migração essa força é o gradiente de potencial elétrico, na permeabilidade é o gradiente de pressão, na difusão é a concentração ou gradiente da atividade (STANISH; HOOTON; THOMAS, 2004) e na absorção capilar é a diferença de saturação (Quadro 2.2). Depois, há a resistência ao movimento que impede a taxa de transporte acelerar-se indefinidamente (STANISH; HOOTON; THOMAS, 2004). Essa resistência é determinada pela porosidade[6] da pasta, que é dependente da combinação da relação água/material cimentício e do grau de hidratação. Devem-se ainda considerar as condições ambientais, como temperatura e umidade relativa, que influenciam na velocidade de transporte.

A **absorção por imersão** representa a porosidade efetiva aberta[7] e avalia o volume de poros comunicáveis. Não segue um modelo específico de mecanismo de transporte e é expressa em

[6] Expressão que compreende o volume total de vazios (poros), absorção de água total (imersão), a distribuição em tamanhos e formas, e a intercomunicabilidade e arranjo espacial dos poros.

[7] Porosidade aberta é aquela que possui os poros comunicáveis, e porosidade fechada é aquela que possui vazios não comunicáveis.

porcentual de massa de água necessária para saturar o concreto (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001; BAUER, 1995; FIGUEIREDO; NEPOMUCENO, 2004).

Um aumento na relação água/material cimentício promove uma maior absorção de água por imersão, pois representa o aumento dos vazios capilares. Além disso, há uma maior possibilidade de interconexão dos poros, que significa maior facilidade de transporte de água (BAUER, 1995; FERREIRA et al., 2004). Para a mesma consistência, isso ocorre de maneira mais significativa nas argamassas com cimento com 24% de escória (CP II-E) do que nas argamassas com cimento sem escória (CP II-F) (BAUER, 1995).

Aumentando-se o consumo de cimento, ocorre um aumento na absorção por imersão (LARA, 2003). Esse aumento foi mais notado em argamassas com cimento com 24% de escória (CP II-E) do que em argamassas com cimento sem escória (CP II-F) (BAUER, 1995).

As estruturas de concreto estão permanentemente sujeitas à penetração de água por capilaridade, principalmente as áreas expostas às intempéries, visto que a **absorção capilar** é uma propriedade de materiais insaturados, situação do concreto nas estruturas comuns (CAMARINI, 1999).

A absorção capilar deve ser primeiramente motivada por tensões capilares para imediatamente ocorrer por simples contato. Depende da porosidade aberta e, sobretudo, do diâmetro dos poros, que, por sua vez, depende da composição química e do grau de hidratação do cimento, e da existência de adições minerais no cimento (BRÜHWILER; DENARIÉ; CONCIATORI, 2001; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; HELENE, 2004; PEREIRA; CINCOTTO, 2001). Ela pode ser controlada, principalmente, pela relação água/aglomerante. Consideram-se também a temperatura, a umidade do meio ambiente, o tipo de cimento, os agregados utilizados, a dosagem, e as condições de cura[8] (CAMARINI, 1999; CANTARELLI et al., 2005; FRIZZO; ISAIA; GASTALDINI, 2002; HELENE, 2004).

Por um lado, a absorção capilar aumenta com o aumento da relação água/aglomerante para diversos aglomerantes estudados em concretos binários ou ternários (cimento Portland, escória de alto-forno, cinza volante, cinza da casca de arroz, cal hidratada, metacaulinita e

[8] Cura é a manutenção de um teor de umidade e temperatura satisfatórias no concreto durante suas fases iniciais de forma que as propriedades desejadas possam se desenvolver (ACI 308:1992). O projeto das normas alemãs futuras vai considerar que a cura deverá estender-se o suficiente para que o elemento estrutural atinja pelo menos 50% de sua resistência característica à compressão ($f_{ck}$) (GRUBE; KERKHOFF, 2004). Maiores esclarecimentos quanto às condições e aos métodos de cura podem ser encontrados na norma ACI 308:1992.

sílica ativa) (CANTARELLI et al., 2005; FERREIRA et al., 2004; HOPPE FO.; ISAIA; GASTALDINI, 2002). Por outro lado, diminui com a substituição de cimento por adições minerais (FERREIRA et al., 2004).

Comparando com pastas e argamassas com cimento sem adição de escória (CP II-F), o aumento da relação água/cimento de 0,40 para 0,60 em pastas e argamassas com cimento com 24% de escória (CP II-E) mostrou maior volume total de poros nas pastas, maior absorção por imersão e absorção capilar nas argamassas e, proporcionalmente, a maior formação de poros de menor diâmetro (3 a 5 ηm) nas pastas (BAUER, 1995).

Mas, ao reduzir-se a relação água/cimento, apesar do maior volume total de poros em argamassas com o cimento com 24% de escória (CP II-E) do que em argamassa com cimento sem escória (CP II-F), e ao atingir-se uma microestrutura com maior volume de poros pequenos proporcionada por aquela, a absorção capilar diminuiu (BAUER, 1995).

O refinamento de poros promovido pela presença de escória de alto-forno na pasta de cimento Portland pode aumentar a resistência à compressão, e geralmente causa reduções significativas na absorção dos concretos (CASTRO, 2003; BELIE et al., 1996; HOU; CHANG; HWANG, 2004; FERREIRA et al., 2004; NEVILLE, 1997). Porém, o progresso das reações de hidratação promove a redução do diâmetro dos poros, que aumenta as tensões capilares e, conseqüentemente, a capacidade de adsorção de água nas paredes dos poros, podendo resultar, assim, em maiores absorções capilares e maiores alturas de ascensão de água (BAUER, 1995; FERREIRA et al., 2004).

A **altura de ascensão capilar**, limitada ao máximo pela Lei de Jurin, é governada pelo equilíbrio entre a tensão superficial e a massa específica da água: a partir desse limite, a água, juntamente com íons agressivos, continua a penetrar por mecanismos de difusão ou de migração (havendo um campo elétrico), e não mais por absorção capilar (HELENE, 1993).

No ensaio de absorção capilar (NBR 9779:1995), observa-se maior predominância das características dos poros superficiais, onde o corpo-de-prova é simplesmente apoiado numa lâmina de água de (5 ± 1) mm, enquanto que no ensaio de absorção total, ou absorção de água por imersão (NBR 9778:1987), há certa predominância das características dos poros internos do concreto, onde todo o corpo-de-prova é imerso na água (FIGUEIREDO; NEPOMUCENO, 2004).

Pode-se estabelecer uma correlação entre a durabilidade e a porosidade do concreto, mas não com a permeabilidade, que muitas vezes é confundida com a difusividade de íons (HELENE,

1993); ou é tratada como a taxa de fluxo de fluidos pela porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994), que pode ocorrer tanto pelo mecanismo de permeabilidade, cuja força motriz é a diferença de pressão, quanto pelos demais mecanismos de transporte de fluidos.

É principalmente a microestrutura do concreto que controla os fenômenos associados ao movimento de água e o transporte de íons, ácidos, oxigênio e dióxido de carbono no concreto. Com isso, a obtenção de uma estrutura interna com poros de menor tamanho e não comunicáveis influencia diretamente a durabilidade (BAUER, 1995; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O que realmente interessa para a qualidade do concreto é a avaliação da intercomunicabilidade e distribuição dos diâmetros e tamanhos dos poros[9] (HELENE, 1993). Por sua vez, os fatores que determinam a estrutura de poro incluem a quantidade de água da mistura, o consumo de cimento (C), as condições de cura – ou o grau de hidratação dos materiais cimentícios – e a condição de adensamento (JAU; TSAY, 1998).

Os poros no concreto podem originar-se por aprisionamento de ar durante operações de lançamento, devido à evaporação da água utilizada em excesso, ou ainda, por microfissuras ocasionadas pela exsudação, retração por secagem, expansão térmica e/ou cura inadequada. Quanto maior for a quantidade de água adicionada à mistura, e menor o grau de hidratação, maiores serão o tamanho, volume e diâmetro dos poros (CANTARELLI et al., 2005). A Figura 2.1 relaciona os mecanismos de transporte de massa com as dimensões de poro.

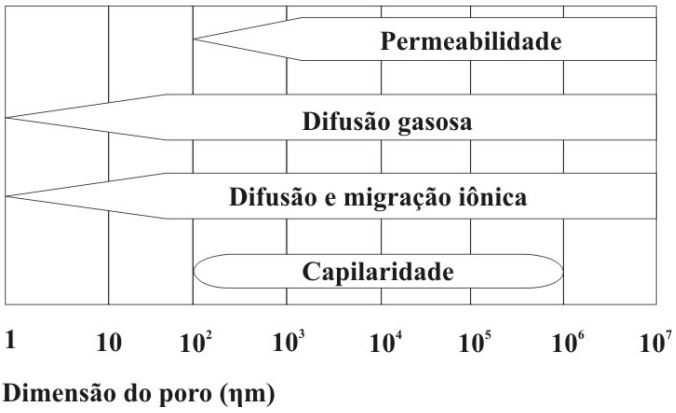



**Figura 2.1: Dimensões de poros/transporte de massa (adaptado de HELENE, 1993; SATO, 1998).**

[9] A distribuição e o tamanho de poros indicam a freqüência dos diversos tamanhos e volumes de poros e são obtidos por meio da técnica de porosimetria de mercúrio ou de hélio.

Poros com diâmetro maior que 0,1 μm contribuem para o transporte de massa por difusão, migração iônica, capilaridade e permeabilidade, enquanto que poros menores influem apenas no processo de difusão gasosa e de difusão e migração iônica (HELENE, 1993; SATO, 1998).

Deve-se considerar que poros capilares de gel pequenos, com diâmetros entre 2,5 ηm até 10 ηm, com perda de 50% de água em seu interior, provocam retração mais imediata; já os microporos de gel com diâmetros de 0,5 ηm a 2,5 ηm e microporos de gel interlamelares com diâmetros inferiores a 0,5 ηm provocam retração com deformação lenta, quando perdem água (MINDESS; YOUNG, 1981 apud GRIGOLI; HELENE, 2000).

Na dosagem do concreto com escória, a relação água/aglomerante pode ser diminuída já que a trabalhabilidade aumenta, o que resulta numa estrutura de pasta mais densa (HOU; CHANG; HWANG, 2004; MUKHERJEE, 2004; RICHARDSON, 2006). Além disso, a estrutura de poro da pasta é modificada pela reação da escória com o hidróxido de cálcio e com os álcalis liberados durante a hidratação do cimento Portland. É a formação de C-S-H e $C_4AH_{13}$ – produtos das reações de hidratação do $Al_2O_4$ e $SiO_3$ provenientes da escória com o $Ca(OH)_2$ liberado do clínquer Portland – que promove o preenchimento dos poros (BAKKER, 1983 apud RICHARDSON, 2006; HOU; CHANG; HWANG, 2004; SPOT; WOJTAROWICZ, 2004).

Isso leva à redução do volume de poros grandes ou macroporos (50 ηm) – os quais são prejudiciais à resistência e os que mais contribuem para o transporte de massa – e ao aumento do volume de poros pequenos ou microporos (< 50,0 ηm), embora esses sejam mais danosos à retração por secagem e fluência. O benefício disso é a melhoria na distribuição da dimensão de poro e a conseqüente redução nos coeficientes de transporte, apesar de um possível aumento do volume total de poros (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001; HOU; CHANG; HWANG, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 1994; SATO, 1998; SPOT; WOJTAROWICZ, 2004).

Do ponto de vista da durabilidade, a utilização de escória de alto-forno passa a ser vantajosa em concretos desenvolvidos com baixas relações água/aglomerante (BAUER, 1995; CASTRO, 2003; CASTRO et al., 2004; HELENE, 1993; MONTEIRO; NEPOMUCENO, 1996). São tecnicamente mais corretas as especificações de durabilidade do concreto que limitem relação água/cimento máxima do que consumo mínimo de cimento por metro cúbico de concreto (HELENE, 1993).

Castro (2003), comparando concretos com diversas adições (10% de sílica ativa, 10% de cinza da casca de arroz, 10% de metacaulinita, 25% de cinza volante, 65% de escória de alto-forno) com concretos de referência sem adição, nas relações água/aglomerantes de 0,40, 0,55 e 0,70, constatou que aqueles com escória apresentaram os menores valores quanto à absorção por imersão e por capilaridade nas resistências à compressão aos 28 dias de 31 MPa, 25 MPa e 23 MPa, respectivamente.

A absorção é um mecanismo de transporte de massa, que é função da estrutura de poros (tortuosidade, dimensão, quantidade de poros). As análises da massa específica do concreto e de seu índice de vazios ajudam a compreender essa estrutura de poros. O relatório "Concreto de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno: estratégia para consolidar e ampliar o mercado da escória de alto-forno", de autoria de Silva et al. (2006b)[10], contém as análises dessas propriedades para os mesmos traços utilizados no presente estudo.

Na seção seguinte, esses resultados são apresentados graficamente e discutidos. Os valores apresentam-se também na Tabela 5.3 (Anexo A).

### 2.3.1 Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios

As classes de resistência à compressão desta dissertação, C20, C30 e C40, contêm os mesmos traços e materiais caracterizados do Relatório de Silva et al. (2006), cujas classes estudadas foram C20, C30, C35 e C40.

Para a análise da resistência à compressão fixou-se a classe de resistência e a idade dos corpos-de-prova. Para serem verificadas as diferenças estatisticamente significantes das distintas classes de resistência C20, C30 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória – o último aqui denominado CP III-32-RS + e), e das variáveis massa específica, absorção de água por imersão, e índice de vazios, também chamadas abreviadamente MAV, e absorção capilar, realizou-se o teste estatístico de Análise de Variância (ANOVA) e o teste *a posteriori* de DUNCAN (MONTGOMERY, 1991). Os resultados são apresentados na Tabela 5.2, Anexo A, e Tabela 5.4, Anexo B.

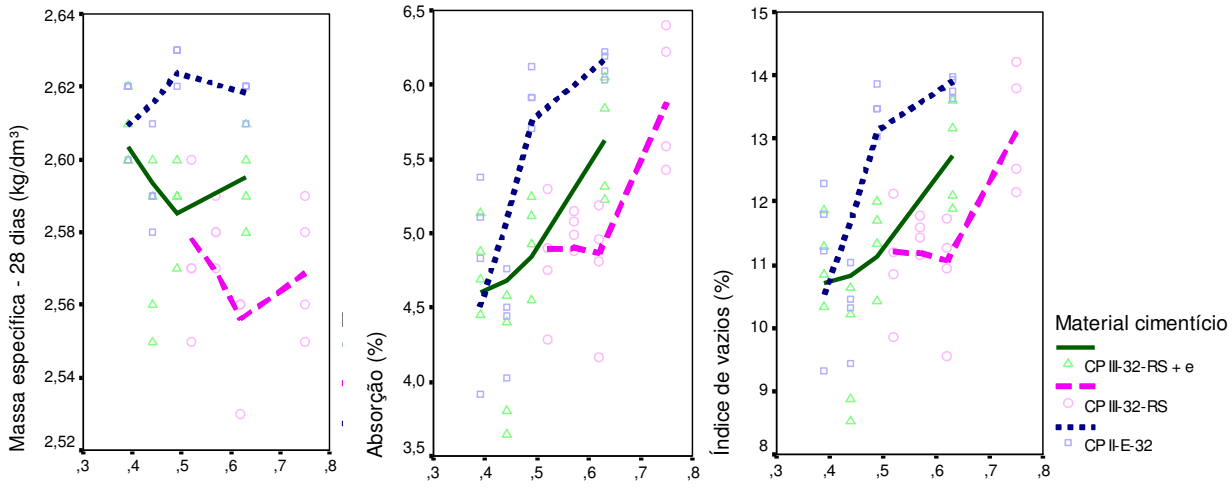
Na análise estatística, os concretos de menor e maior classe de resistência estudada, C20 e C40, não apresentaram diferenças significativas para o índice de vazios e absorção de água de água por imersão, com os diferentes teores de escória de alto-forno.

[10] A partir desta nota, a referência a tal relatório será Relatório de Silva et al. (2006b).

A Figura 2.2-a apresenta o comportamento da variável massa específica para as classes de concreto estudadas, C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + e) e em função da relação água/material cimentício, respectivamente.

De maneira geral, ocorreu influência da classe de resistência na absorção de água de água por imersão, que mostrou valores menores para as classes de maior resistência (Tabela 5.3, Anexo A). Isso ocorreu em virtude da descontinuidade de poros proporcionada pelas classes de resistência maiores e principalmente pelos teores de escória. Outros estudos corroboram essas observações (CASTRO, 2003; CASTRO et al., 2004; FERREIRA et al., 2004; NEVILLE, 1997).

Para os concretos com o cimento CP III-32-RS e CP III-32-RS + e, observa-se que, com a diminuição da relação água/material cimentício, ocorreu um aumento na massa específica, em decorrência da formação de microestrutura mais densa para os concretos com maiores teores de escória de alto-forno (Figura 2.2-a); de outra forma, ocorreu o contrário em concretos com menores teores de escória, como o concreto com o cimento CP II-E-32.




a) b) c)

**Figura 2.2: Variáveis em função da relação água/material cimentício: a) massa específica; b) absorção de água por imersão; c) índice de vazios (SILVA et al., 2006b).**

Verifica-se também que o concreto com o cimento CP III-32-RS apresentou os menores valores de massa específica em relação aos demais concretos (Figura 2.2-a), em virtude do seu menor consumo de materiais cimentícios (C) (Quadro 4.19, Capítulo 4), visto que o maior consumo de materiais cimentícios pode produzir concreto com maior volume de pasta, e vice-

versa (BAUER, 1995; LARA, 2003). A pasta tem massa maior do que os demais constituintes no concreto tradicional.

Os resultados encontrados no Relatório de Silva et al. (2006b) atendem ao preconizado pela NBR 6118:2003, a qual estabelece valores de massa específica na faixa de 2000 kg/m$^3$ a 2800 kg/m$^3$.

Comparando-se cada classe de resistência, verifica-se no Quadro 4.19, Capítulo 4, que os concretos com o cimento CP III-32-RS possuem massa de agregados (m) maior, consumo de material cimentício (C) menor e relação água/material cimentício maior. As massas específicas dos agregados (Quadros 4.17 e Quadro 4.18, Capítulo 4) são menores do que as dos materiais cimentícios (Quadros 4.13 e 4.16, Capítulo 4). Logo, os concretos com menor consumo de materiais cimentícios, menor massa específica dos materiais cimentícios e maior relação água/material cimentício sugerem menor massa específica.

O menor consumo de materiais cimentícios e a maior relação água/material cimentício dos concretos com o cimento CP III-32-RS (Quadro 4.19, Capítulo 4) correspondem à menor massa específica dos concretos produzidos com esse cimento (Figura 2.2-a). Por outro lado, o maior consumo de materiais cimentícios do concreto com o cimento CP II-E-32 e a sua maior massa específica (Quadro 4.13) correspondem à maior massa específica dos concretos produzidos com ele (Figura 2.2-a).

A Figura 2.2-b mostra o comportamento da variável absorção para as diferentes classes de resistência, C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados, CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + e, e em função da relação água/material cimentício, respectivamente.

Existe boa correlação entre a absorção de água de água por imersão e o índice de vazios, em função da relação água/material cimentício, quando se comparam as Figuras 2.2-b e 2.2-c, quase idênticas, indicando que existem poucos poros não preenchidos pela absorção de água por imersão. Comparando-se os traços dos concretos com o cimento CP III-32-RS e com o cimento CP III-32-RS + e (Quadro 4.19, Capítulo 4), a maior absorção de água de água por imersão deste explica-se por seu maior volume de pasta, visto que seu consumo de materiais cimentícios (C) foi relativamente maior; a porosidade total se expressa no maior volume de pasta, e pastas com escória apresentam maior volume total de poros, apontado pela absorção de água de água por imersão e índice de vazios (BAUER, 1995; LARA, 2003; MEHTA, 1980 apud RICHARDSON, 2006).

Nos concretos com escória pode haver maior quantidade de poros, porém com diâmetros muito menores, os quais podem não se revelar totalmente no ensaio de índice de vazios. Sato (1998) verificou, realmente, que concreto com escória pode apresentar volume total de poros maior que concreto sem escória de mesmo traço. Bauer (1995) constatou o mesmo efeito em pastas utilizando ensaio de intrusão de mercúrio.

A Figura 2.2-c apresenta o comportamento da variável índice de vazios para as classes de concreto estudadas, C20, C30, C35 e C40, com os três tipos de materiais cimentícios utilizados, CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + e, em função da relação água/material cimentício.

Aumentando-se a relação água/material cimentício, ocorre um aumento nos valores da absorção de água por imersão e de índice de vazios (Figuras 2.2-b e 2.2-c). Estudos de Hoppe Fo., Isaia e Gastaldini (2002) e Ferreira et al. (2004) corroboram esses resultados. Para uma relação água/material cimentício superior a 0,52 (Quadro 4.19, Capítulo 4), os menores valores de absorção de água por imersão e de índice de vazios foram os do concreto com o cimento CP III-32-RS, e os maiores foram os do concreto com o cimento CP II-E-32. Os menores valores do concreto com o cimento CP III-32-RS se deveram provavelmente, ao efeito combinado da dosagem com teor ótimo de escória de alto-forno (66%) para dada relação água/material cimentício, que produziu concreto com menor volume total de poros.

Para uma relação água/material cimentício superior a 0,52, os valores de absorção de água por imersão e de índice de vazios do concreto com o cimento CP III-32-RS + e (Figuras 2.2-b e 2.2-c) mostraram-se intermediários, indicando que o aumento do teor de escória (superior a 66%) para as classes de resistência deste estudo teve menor influência na diminuição desses valores que no caso supracitado.

Já para uma relação água/material cimentício abaixo de 0,52 nas classes de resistência deste estudo, o teor de escória de 83% do concreto com o cimento CP III-32-RS + e teve maior influência na diminuição da absorção de água por imersão e do índice de vazios do que o concreto com o cimento CP II-E-32 (30% de escória) (Figuras 2.2-c e 2.2-c). Além disso, indica que os maiores teores são mais influentes para obtenção de menor absorção de água por imersão em relações água/materiais cimentícios mais baixas, o que corrobora por analogia os resultados obtidos por Castro (2003) e Castro et al. (2004).

### 2.3.2 Absorção capilar

Com todos os resultados, máximos e mínimos obtidos no Relatório de Silva et al. (2006b), traçaram-se as curvas de tendência em função da classe de resistência e da relação água/material cimentício para cada material cimentício utilizado (Figuras 2.3 e 2.4).

Aos 63 dias de idade, observa-se que, nas menores classes de resistência, os concretos com adição de escória de alto-forno apresentam maior absorção capilar (Figura 2.3-a). Porém, com o aumento da resistência à compressão, esse comportamento tende a mudar para os concretos com CP III-32-RS + e, ocorrendo a diminuição da absorção de água por capilaridade (Figura 2.3-a). Estudos de Ferreira (2003) em concretos e de Bauer (1995) em pastas comprovam esse efeito.

Observa-se na Figura 2.3-b que, aumentando-se a relação água/material cimentício, ocorre um aumento na absorção capilar para todos os concretos (CANTARELLI et al., 2005; FERREIRA et al., 2004; HOPPE FO.; ISAIA; GASTALDINI, 2002). A mudança é mais significativa no concreto com o cimento CP III-32-RS + e.

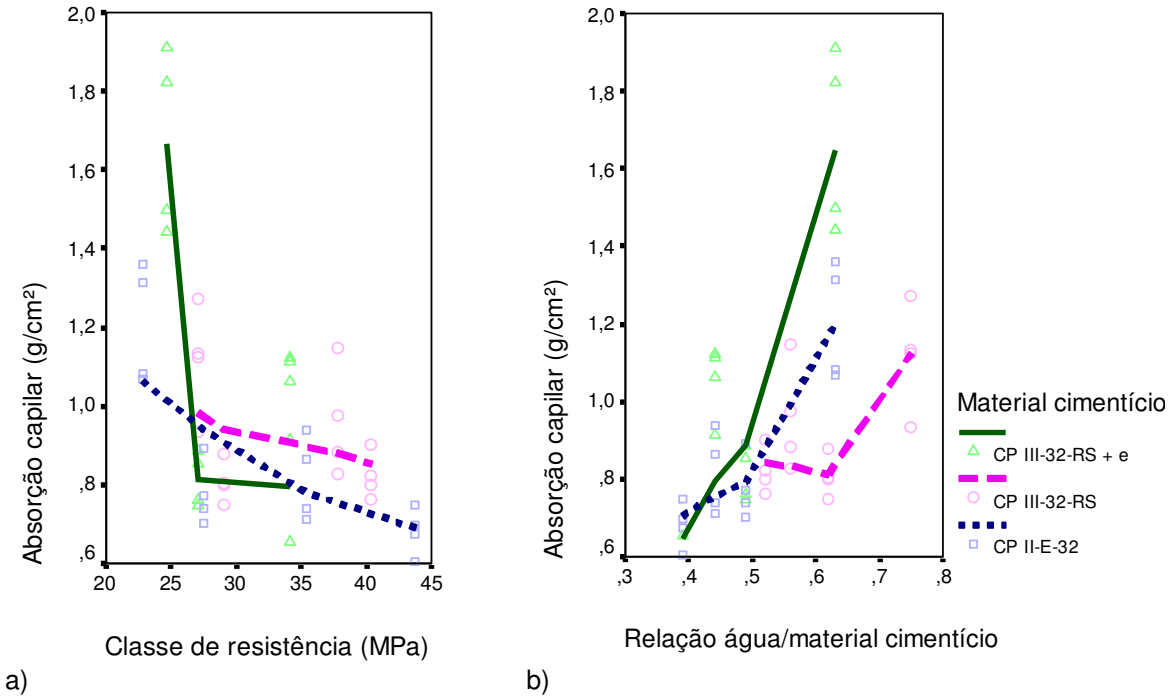



**Figura 2.3: Absorção por capilaridade aos 63 dias em função da: a) classe de resistência; b) relação água/material cimentício (SILVA et al., 2006b).**

Os principais fatores que determinam a porosidade da pasta são o consumo de cimento (C), a relação água/cimento e o teor de escória. Qual desses fatores irá prevalecer na obtenção de menor volume total de poros, absorção capilar e altura capilar dependerá da porosidade formada. Uma mistura com maior consumo de cimento ou maior volume de pasta e maior teor

de escória tende a ter maior volume total de poros e, proporcionalmente, maior volume de microporos. Apesar disso, pode apresentar a menor absorção capilar (BAUER, 1995).

Essa tendência foi mais notada por Bauer (1995) ao aumentar a relação água/cimento de pastas, cuja proporção de microporos resultante entre 3 a 5 ηm foi maior do que a dos demais tamanhos de poros. Se a mistura da pasta tiver, além do maior consumo de cimento e maior teor de escória, uma baixa relação água/cimento, em torno de 0,3, por exemplo, poderá apresentar maior volume total de poros. Bauer (1995) constatou isso ao comparar argamassa com cimento com 24% de escória (CP II-E) e argamassa com cimento sem escória (CP II-F).

O maior volume de pasta do concreto com o cimento CP III-32-RS + e, proveniente do maior consumo de material cimentício (C) (Quadro 4.19, Capítulo 4), teve como conseqüência a formação de poros de menor diâmetro, resultando em maior absorção capilar, quando comparada ao concreto com o cimento CP III-32-RS. Ao aumentar-se a relação água/material cimentício, essas diferenças se tornam crescentemente mais nítidas (Figura 2.3).

Com o aumento da classe de resistência (Figura 2.4-a) e com a diminuição da relação água/material cimentício (Figura 2.4-b), ocorre uma diminuição nos valores de ascensão capilar, sendo essa mudança mais significativa em concretos com maiores teores de escória (cimento CP III-32-RS + e).

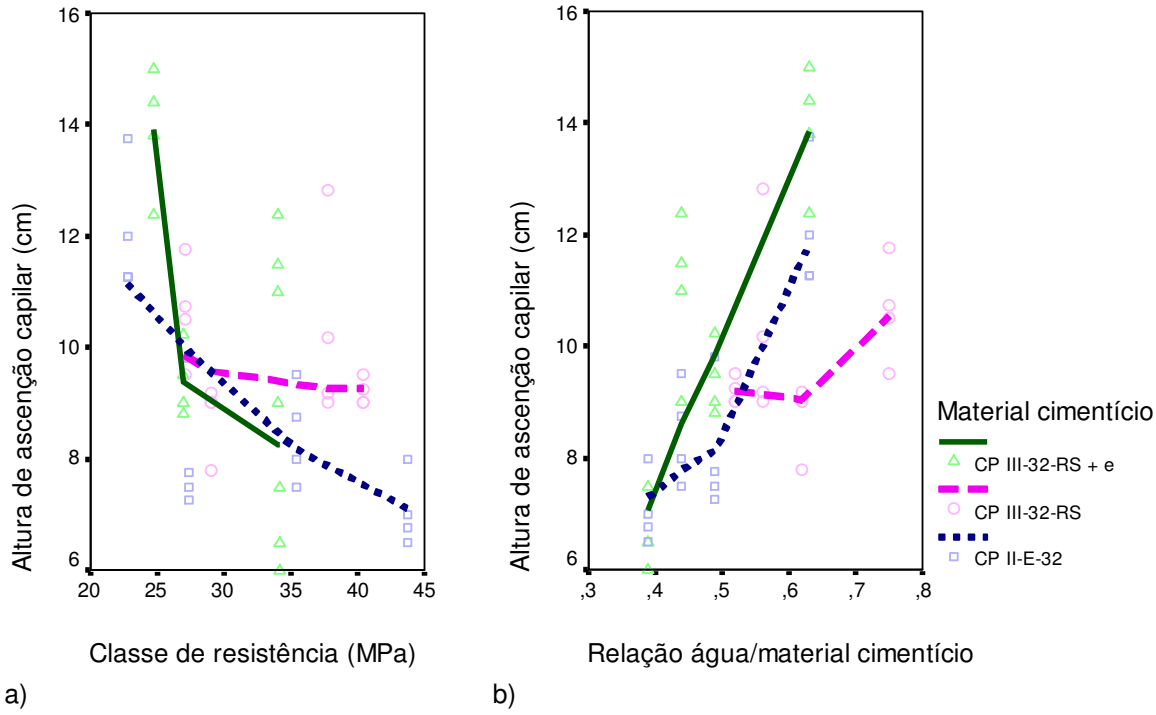



**Figura 2.4: Altura de ascensão capilar em função da: a) classe de resistência; b) relação água/material cimentício (SILVA et al., 2006b).**

Esse comportamento está de acordo com estudos nos quais os concretos com menor relação água/material cimentício e maior resistência à compressão têm menor absorção (CASTRO, 2003; FERREIRA, 2003; HOPPE FO; ISAIA; GASTALDINI, 2002), principalmente nos concretos com escória, pois ela ajuda na redução do diâmetro dos poros da matriz.

Os mecanismos de transporte de massa estão diretamente ligados à corrosão das armaduras, pois é por meio deles que o concreto é suprido com as condições necessárias (existência de eletrólito, oxigênio e diferença de potencial) e/ou agravantes (presença de agentes agressivos) para desencadear o mecanismo da corrosão das armaduras, o qual se discutirá na próxima seção.

## 2.4 Fundamentos da corrosão das armaduras

### 2.4.1 Formação da camada passivadora na interface aço-concreto

Dentro do ambiente de alto pH, e na ausência de íons agressivos, logo após o início da hidratação do cimento, desenvolve-se lentamente uma fina camada de passivação das armaduras. Ainda no concreto fresco, inicia-se o mecanismo da corrosão a uma taxa sempre decrescente até que a dissolução do metal se torne desprezível (BROWN, 2002; GAIDIS, 2004; HELENE, 1993; TUUTTI apud BAUER, 1995; UZEDA, 1998). O mecanismo de passivação das armaduras estabiliza-se após a deposição de várias camadas e separa efetivamente o metal do eletrólito (BROWN, 2002; FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2004; THAN hematita, hematita, hematita, hematita, GAVEL; RENGASWAMY, 1998).

É necessária a dissolução do metal para que se forme a camada passiva. Ela é constituída por um filme estratificado, com magnetita ($Fe_3O_4$) condutiva aderida à superfície do aço coberta por camada isolante de moléculas de oxidado férrico, hematita ($Fe_2O_3$), impermeável a íons, e de oxidado ferroso (FeO), que são produtos estáveis da corrosão (CASCUDO, 1997; ST. JOHN; POOLE; SIMS, 1998 apud BROWN, 2002; THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998).

Acima da camada passiva pode haver a deposição de ferrita de cálcio, resultante da reação do $Fe_2(OH)_3$ com o $Ca(OH)_2$ (BASÍLIO, 1972 apud HELENE, 1993):

$$2Fe(OH)_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaO{\bullet}Fe_2O_3 + 4\ H_2O. \qquad \textbf{Equação 2.1}$$

Por último, as barras de aço já passivadas também são cercadas pela camada de $Ca(OH)_2$, proveniente das reações de hidratação do cimento, pois o $Ca(OH)_2$ contribui para que o pH da

água de poro fique em torno de 12,6 (a temperatura ambiente), proporcionando a passivação do aço (CASCUDO, 1997; GENTIL, 1982; THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998).

A presença de hidróxido de sódio (NaOH) e de hidróxido de potássio (KOH) dissolvidos na água de poro também ajuda a manter a alta alcalinidade (HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994; SATO, 1998). A camada passivada permanece estável, contanto que o valor de pH permaneça acima de 11,5, e desde que na ausência de íons cloreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Uma vez formada e nessas condições, nem água e nem oxigênio podem penetrar tal camada (TAYLOR, 1992).

Foi comprovado que para o sistema Fe-$H_2O$, a 25°C e a 1 atm, o diagrama obtido por potenciais, medidos por meio do eletrodo padrão de hidrogênio versus pH mostra uma região formada por potenciais entre +100 e -400 mV, normalmente encontrados no concreto, com pH entre 12,5 e 13,5, na qual o metal ferro está em condições de passivação (POURBAIX, 1974 apud HELENE, 1993; PANOSSIAN apud CASCUDO, 1997). A corrosão significativa ocorre somente com valores de pH abaixo de 9 ou acima de 14 (HOU; CHANG; HWANG, 2004).

Mapeamentos de Stratfull (1973 apud HELENE, 1993), efetuados no início da década de 70, em tabuleiros de ponte com manifestações patológicas típicas de ação de sais de degelo, formaram a base da norma ASTM C 876:1999, a qual fornece parâmetros gerais para avaliar-se a corrosão das armaduras como descritos no Quadro 3.2, Capítulo 3.

### 2.4.2 Mecanismo fundamental da corrosão das armaduras

O desencadeamento da corrosão das armaduras não depende necessariamente da penetração de agentes agressivos. Basta que haja a presença de eletrólito, de oxigênio e de uma diferença de potencial (HELENE, 1993; CONCIATORI, 2002; SAKR, 2004).

Os agentes agressivos que quebram ou não permitem a formação da película passivadora e que podem induzir a corrosão das armaduras são: sulfetos, cloretos, dióxido de carbono, nitritos, gás sulfídrico, óxidos de enxofre, entre outros (HELENE, 1993).

Dependendo das condições acima, e dentro de determinada faixa de potencial eletroquímico ao longo da superfície da armadura, podem ocorrer as reações de oxidação, de acordo com as Equações 2.2 a 2.5 (AHMAD, 2003; FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2004; THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998).

**Reações anódicas:**

$$3Fe + 4H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + 8H^+ + 8e^-, \quad \textbf{Equação 2.2}$$

$$2Fe + 3H_2O \longrightarrow Fe_2O_3 + 6H^+ + 6e^-, \quad \textbf{Equação 2.3}$$

$$Fe + 2H_2O \longrightarrow HFeO_2^- + 3H^+ + 2e^-, \quad \textbf{Equação 2.4}$$

$$Fe \longrightarrow Fe^{+2} + 2e^-. \quad \textbf{Equação 2.5}$$

Desde que a reação libere elétrons ($2e^-$) nas regiões anódicas, eles se orientam pelo aço na direção das áreas catódicas e são simultaneamente recebidos onde ocorre a redução do oxigênio dissolvido, formando hidroxila.

Cria-se, na barra de aço, uma corrente elétrica, $I_{corr}$, do ânodo para o cátodo, que forma uma pilha eletroquímica ou célula de corrosão de circuito, com o fluxo de elétrons no aço e o fluxo de íons na solução de poro do concreto, porque a oxidação do metal é equilibrada pela redução de outra substância em outro ponto ou região da superfície metálica (ACI COMMITTEE 222 R, 1996; AHMAD, 2003; FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2004; SAKR, 2004; THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998) (Figura 2.5).

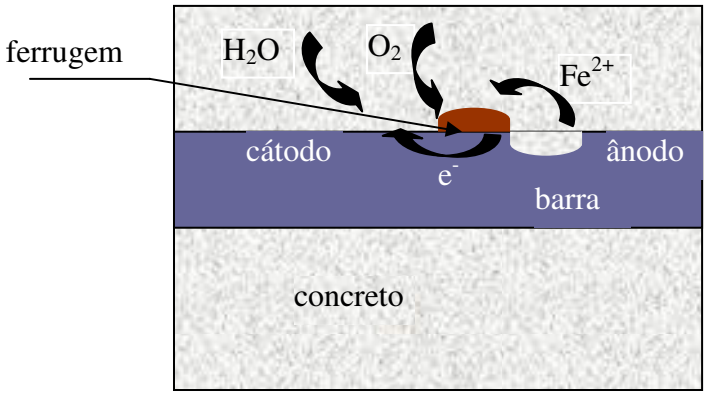



**Figura 2.5: Corrosão localizada na armadura do concreto: no ânodo ocorre a dissociação do ferro e no cátodo ocorre a formação da ferrugem.**

Quando o concreto está seco, o oxigênio penetra por difusão e alcança a armadura. Por outro lado, quando o concreto está úmido, a água ($H_2O$) pode atingi-la, pois as condições de exposição são aspectos importantes que influenciam a corrosão da armadura (HELENE, 1993). Esses agentes propiciam as **reações catódicas** nas quais para pH > 7 ocorre a reação (LIU, 1996; GENTIL, 1982)

$$\tfrac{1}{2}\, O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2\, OH^-, \quad \textbf{Equação 2.6}$$

e para pH < 7 ocorre a reação (LIU, 1996; GENTIL, 1982)

$$2\, H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2. \quad \textbf{Equação 2.7}$$

Os íons ferro subseqüentemente reagem para formar óxidos seqüenciais (AHMAD, 2003; FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2004):

$$Fe^{+2} + 2\,OH^{-} \longrightarrow Fe(OH)_2 \quad e \qquad \textbf{Equação 2.8}$$

$$2\,Fe(OH)_2 + \tfrac{1}{2}\,O_2 \longrightarrow 2\,\gamma\text{-}FeOOH + H_2O, \qquad \textbf{Equação 2.9}$$

em que o produto férrico posterior (leptocrocita - γ-FeOOH) é mais protetor que o ferroso. A conversão de ferroso para férrico ocorre com o passar do tempo e nunca se completa, e, invariavelmente, acontece o rompimento da camada passiva (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2004). Apesar da alta alcalinidade do concreto, pode ocorrer a acidificação nas proximidades das regiões anódicas, devido à depleção do oxigênio e hidrólise[11] de íons ferro (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2004; HELENE, 1993).

Assim, na reação

$$Fe^{2+} + 2\,H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2\,H^{+} \qquad \textbf{Equação 2.10}$$

o produto $H^+$ pode ser reduzido e, simultaneamente com a redução de $O_2$ nas regiões catódicas mais distantes, o mecanismo anódico pode acelerar-se. Logo em seguida, a oxidação pode ocorrer como (AHMAD, 2003; VIRMANI, 1984 apud FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2004):

$$4\,Fe(OH)_2 + 2\,H_2O + O_2 \longrightarrow 4\,Fe(OH)_3 \quad e \qquad \textbf{Equação 2.11}$$

$$2\,Fe(OH)_3 \longrightarrow Fe_2O_3 + 3\,H_2O. \qquad \textbf{Equação 2.12}$$

Na solução de poro, a reação do $Fe(OH)_2$ com a água e o oxigênio resulta na transformação dos produtos de corrosão insolúveis em compostos de óxido de ferro hidratado que se acumulam nos poros e na interface ao redor da armadura (BROWN, 2002; HELENE, 1993; SAKR, 2004). Os óxidos de ferro incluem óxido férrico ($Fe_2O_3$, ferrugem vermelho-marrom) e magnetita ($Fe_3O_4$, ferrugem preta) (HELENE, 1993).

## 2.5 Mecanismos de indução da corrosão e a influência da escória de alto-forno

Juntamente com cloretos e carbonatação, muitos são os fatores que influenciam no mecanismo de corrosão das armaduras, sendo os principais: a dosagem, as condições de cura,

[11] Entende-se por hidrólise a reação de fixação de íons hidroxila em um composto, em presença de água, ou a quebra e dissolução de compostos disponibilizando íons ao sistema.

a composição química da água de poro e as propriedades do cobrimento de concreto. Além desses fatores, existem as variáveis locais, como a mineralogia dos agregados, condições ambientais e as práticas construtivas que atuam fortemente no mecanismo de corrosão (MORRIS et al., 2002).

Na especificação da vida útil das estruturas de concreto armado, as normas de diversos países consideram que o mais importante é tentar-se prolongar o período de iniciação, pois ele corresponde à vida útil de projeto.

### 2.5.1 Corrosão induzida por carbonatação

O efeito da carbonatação pela penetração do $CO_2$ e outros gases ácidos, como $SO_2$, $NO_2$ e do $SO_3$, em relação à corrosão das armaduras, dá-se pela redução do pH da água de poro.

A queda no pH a certos níveis pode primeiramente causar perda de passividade, em seguida a iniciação da corrosão e, com o tempo, severa corrosão das armaduras (CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O $CO_2$ penetra nos poros parcialmente cheios de água para em seguida dissolver-se e reagir com os álcalis da água do poro, formando ácido carbônico. Após a dissolução em água, primeiramente ocorrem as reações com NaOH e KOH, que são mais solúveis, e depois com o $Ca(OH)_2$, produzindo carbonato de cálcio de acordo com a reação generalizada (BAUER, 1995; HELENE, 1993; HOUST; WITTMANN, 2002; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; MEHTA; MONTEIRO, 1994; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002):

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O. \qquad \textbf{Equação 2.13}$$

A formação de $CaCO_3$ consome a reserva alcalina e reduz o pH da água de poro entre 8 e 9 (BAUER, 1995; BROWN, 2002; HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994). Se a frente de carbonatação alcançar a armadura, e se umidade e oxigênio suficientes estiverem presentes, a camada passiva protetora é removida e a corrosão pode se instalar (BROWN, 2002; HELENE, 1993; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; HOUST; WITTMANN, 2002; NEVILLE, 1997).

Quando o $Ca(OH)_2$ se esgota, por exemplo, por meio de uma reação secundária com as pozolanas ou pela ativação da escória de alto-forno, também é possível ocorrer a carbonatação do C-S-H, o que leva, além da formação de $CaCO_3$, à formação de gel de sílica com poros grandes, maiores do que 100 ηm, e facilita a continuidade da carbonatação (ÇOPUROĞLU;

FRAAIJ; BIJEN, 2006; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; MUKHERJEE, 2004; NEVILLE, 1997; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002):

$$C\text{-}S\text{-}H + CO_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + SiO_2nH_2O + H_2O, \qquad \textbf{Equação 2.14}$$

$$\text{Hidratos de Aluminato} + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + \text{alumina hidratada}, \qquad \textbf{Equação 2.15}$$

$$\text{Hidratos de Ferrita} + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + \text{alumina hidratada} + \text{óxidos de ferro}. \qquad \textbf{Equação 2.16}$$

Como a penetração de gases acontece uniformemente por difusão, formando uma frente homogênea de penetração no concreto, a corrosão induzida por carbonatação se manifesta na armadura de forma generalizada, e, quando intensa, causa trincas no concreto que se desenvolvem paralelas às barras (BROWN, 2002; HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

À medida que o $CO_2$ vai penetrando nos poros parcialmente cheios de água, por meio de difusão, formam-se zonas com pHs diferentes: uma zona com alto pH, região não carbonatada, e uma zona com pH $\leq$ 9, denominada zona carbonatada ou **frente de carbonatação** (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Elas são identificadas por meio de um indicador de pH, normalmente fenolftaleína, cuja viragem é em torno de 9; conseqüentemente, áreas de carbonatação parcial nas quais o pH varia de 9 a 11,5 não podem ser detectadas por esse indicador. Considerando-se que a um pH de 11,5 a armadura já é despassivada, em muitos trabalhos as profundidades de carbonatação no concreto podem estar subestimadas (CHANG; CHEN, 2006).

Ao serem utilizadas técnicas de ATG (análise termogravimétrica), DRX (difração de raios X) e FTIR (espectroscopia de infravermelho de transformação de Fourier), foram identificadas três zonas no concreto carbonatado: a primeira, que ficava próxima à superfície externa, na qual o valor de pH da água de poro estava compreendido entre 7,5 e 9, e o grau de carbonatação[12] era de 50 a 100%; a segunda, chamada frente de carbonatação, que era uma zona de transição em que o pH da água de poro era de 9 a 11,5, e o grau de carbonatação era de 0 a 50%; finalmente, a terceira zona que não era carbonatada (CHANG; CHEN, 2006; HOUST; WITTMANN, 2002; SAETTA; VITALIANI, 2005).

[12] O grau de carbonatação foi formulado como $D_c\ (\%) = (C - C_o)/(C_{max} - C_o)100$, de maneira que C, $C_o$ e $C_{max}$ são a quantidades de $CO_2$ na amostra, a quantidade de $CO_2$ na amostra não carbonatada e a quantidade teórica de $CO_2$ necessária para combinar com o CaO total na amostra para formar $CaCO_3$, respectivamente.

Tais técnicas (ATG, DRX e FTIR) mostraram que a profundidade de frente de carbonatação era duas vezes maior do que a determinada por fenolftaleína, apesar de considerar-se esse indicador seguro para a análise da corrosão das armaduras (CHANG; CHEN, 2006).

A resistividade elétrica aparente do concreto registrada no medidor RESI (como definida nos Capítulos 3 e 4) equivale às resistividades mistas das 3 zonas com diferentes concentrações de $CaCO_3$.

O $CO_2$ penetra por mecanismo de difusão e a profundidade de carbonatação aumenta, inicialmente, a uma taxa maior, progredindo mais lentamente com o tempo em uma curva exponencial, tendendo assintoticamente a uma profundidade máxima (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001; BAUER, 1995; HELENE, 1993).

A constante K (seção 2.3) para o $CO_2$ depende da concentração dele e das características do concreto e do ambiente, como tipo de cimento, relação água/material cimentício, condições de cura, grau de hidratação, consumo de cimento (C), umidade relativa, umidade de equilíbrio, eventuais ciclos de molhagem e secagem, temperatura, teor de álcalis, grau de carbonatação, resistividade elétrica, presença de zonas deterioradas, fissuras, entre outras (ANDRADE, 2005; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; HELENE, 2004; HOUST; WITTMANN, 2002; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; JUNG; YOON; SOHN, 2003; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002). Um dos fatores mais significativos é a umidade relativa, cuja faixa entre 50 e 65% mostra a maior taxa de carbonatação (BROWN, 2002; CASCUDO, 1997).

O coeficiente de carbonatação apresenta uma boa relação com a absorção total do concreto, e sua velocidade pode ser lenta no concreto com menor volume de poros comunicáveis, dependendo da espessura de cobrimento do concreto (BAUER, 1995; BROWN, 2002; FIGUEIREDO; NEPOMUCENO, 2004).

A capacidade de proteção do concreto de cobrimento em determinado ambiente pode ter diversos fracassos em razão da falta de um adequado estudo de dosagem e de durabilidade: o concreto com maior absorção de água, em decorrência de uma baixa relação água/material cimentício, pode causar a difusão mais rápida do anidrido carbônico e ficar mais suscetível à carbonatação; a baixa relação água/material cimentício pode causar retração por secagem autógena[13], ou o concreto pode mostrar alta absorção capilar, devido à diminuição do

[13] Retração autógena é a redução volumétrica do material cimentício em virtude da diminuição da umidade relativa dos poros da pasta de cimento com a evolução da hidratação, à temperatura constante e sem troca de

diâmetro dos poros (BROWN, 2002; CASCUDO, 1997; HOUST; WITTMANN, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

É sabido que a escória de alto-forno tem o efeito de diminuir a resistividade da matriz de cimento e as propriedades de transporte, pela diminuição do diâmetro e conectividade da rede de poros. Se as reduções nas propriedades de transporte e na condutividade superarem a redução de hidróxidos, a carbonatação global será reduzida. Esse efeito pode aumentar o período de iniciação[14] da corrosão e diminuir a taxa de corrosão no período de propagação[15].

Concretos que passam por cura úmida eficiente apresentam menores coeficientes de carbonatação que os curados ao ar (HELENE, 1993; CASTRO et al., 2004; DIAS, 2000), e concretos com menor relação água/aglomerante resultam em menor carbonatação do que os com maior relação água/aglomerante (BAUER, 1995; CASTRO et al., 2004; COELHO, 2002; HELENE, 1993; TAYLOR, 1992; HOUST; WITTMANN, 2002).

Além disso, mudanças na temperatura interferem na cinética das reações e, ao longo da altura de peças estruturais ou de edificação pode haver diferentes concentrações de $CO_2$ e de névoa salina (HOUST; WITTMANN, 2002). Isso pode causar diferença de potencial ao longo da estrutura, o que pode facilitar o desencadeamento da corrosão das armaduras. Além disso, como períodos cíclicos de molhagem-secagem são freqüentes em condições ambientais ao ar livre, caso das partes externas das edificações, a frente de carbonatação pode avançar relativamente rápido (HELENE, 1993; HOUST; WITTMANN, 2002).

Com a elevação da temperatura, o teor de umidade vai sendo reduzido, fornecendo mais espaço para a difusão do gás, e aumentando a difusividade do $CO_2$. Apesar de o concreto seco, ou exposto a ambiente interno seco, ter a sua difusividade de $CO_2$ máxima, a inexistência de água pode impedir as reações de carbonatação, visto que é necessário um meio aquoso para haver a dissolução do $CO_2$ e do $Ca(OH)_2$ (BAUER, 1995; GRUBE; KERKHOFF, 2004; HOUST; WITTMANN, 2002; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; MEHTA; MONTEIRO, 1994; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

---

umidade com o ambiente. Ela ocorre devido aos esforços dos meniscos capilares formados (BALTHAR et al., 2004).

[14] O período de iniciação da corrosão corresponde àquele necessário para que os agentes agressivos despassivantes atinjam a armadura, ou que existam eletrólito, oxigênio e diferença de potencial suficientes que desencadeiem o mecanismo de corrosão significativa. Esse período é influenciado pelos mecanismos de transporte e pelas características do concreto (HELENE, 1993; TTUTTI, 1982 apud BAUER, 1995).

[15] O período de propagação é aquele compreendido após a despassivação, no qual a corrosão se desenvolve influenciada pela resistividade e umidade do concreto, e pela disponibilidade de oxigênio para alimentar as reações catódicas (TTUTTI, 1982 apud BAUER, 1995).

Alguns autores acreditam que uma menor quantidade de $Ca(OH)_2$ em concretos com escória de alto-forno resulta na redução do pH e, conseqüentemente, o tempo necessário para a despassivação das armaduras induzida por carbonatação, que consome a reserva alcalina, seria também reduzido (FRANKE; SISOMPHON, 2004).

Entretanto, uma menor quantidade de $Ca(OH)_2$ não significa necessariamente que sejam encontrados valores muito baixos de pH. Foram encontrados valores de pH superiores a 12,78 em concretos com escória de alto-forno (em teores de substituição de 50% e 70%) e nunca inferiores a 11,5 (COSTA; GASTALDINI; ISAIA, 2002; GASTALDINI; ISAIA; ZANELLA, 1999). A alcalinidade da solução de poro parece depender da basicidade da escória de alto-forno empregada no concreto; mas, mesmo com pH de 11,5, a difusividade do $CO_2$ e a condutividade elétrica são dificultadas na matriz densa de concretos com adições e com baixa relação água/material cimentício (BAUER; HELENE, 1993).

Os efeitos da carbonatação no concreto parecem variar dependendo do teor de adições e do estágio de deterioração da estrutura. Nos pouco carbonatados, se houver a colmatação por carbonato de cálcio da camada mais próxima à superfície, a taxa de carbonatação parece ser mais lenta. Em concretos com avançado estágio de carbonatação, se houver a dissolução do hidróxido de cálcio e de compostos carbonatáveis, poderá ocorrer aumento de volume, tamanho e diâmetro de poros nas camadas mais profundas e perda subseqüente da resistência.

Os produtos de hidratação ocupam volumes menores do que os produtos da carbonatação, que incluem o aumento de massa de água (Equações 2.13 e 2.14). Com isso, a compressibilidade da pasta de cimento hidratada aumenta temporariamente, o que causa a chamada **retração por carbonatação** (BAUER, 1995; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; HOUST; WITTMANN, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 1994; RICHARDSON, 1998).

Por causa da carbonatação, a pasta ou concreto de **cimento Portland sem adições** cria uma camada de superfície densa, rica em carbonato de cálcio, a qual forma uma barreira para difusão, limitando o acesso de $CO_2$, enquanto que o volume, tamanho e diâmetro de poros nas camadas não carbonatadas ou internas podem ser maiores. Assim, a sorção (taxa de absorção) e a taxa de carbonatação na camada externa ficam menores do que na camada interna. Isso leva ao progresso lento da carbonatação, que diminui com o tempo (BIER, 1987 apud BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2001; DIAS, 2000; HELENE, 1993).

Foi verificado nos estudos de De Ceukelaire e Van Nieuwenburg (1993 apud DIAS, 2000) que na carbonatação do concreto de cimento Portland sem adições ocorreu um aumento de

volume sólido ao redor de 11% na conversão de $Ca(OH)_2$ para $CaCO_3$, e de massa em torno de 35% com base nos pesos moleculares; percebeu-se uma expansão desse volume na pasta e, conseqüentemente, uma redução no volume total de poros.

A carbonatação no concreto sem adições, apesar de lenta, pode provocar algumas alterações físico-químicas e eletroquímicas, como o aumento da resistência à compressão, na massa específica, no módulo de deformação, e na dureza; diminuição nas propriedades de transporte, como na absorção, na sortividade com a idade, na permeabilidade, na difusão de cloretos; aumento na resistividade elétrica, diminuição no potencial de corrosão e dificuldade na extração eletroquímica de cloretos (DIAS, 2000; HELENE, 1993; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996); e menor capacidade de proteção do cobrimento frente aos agentes agressivos, como sulfatos (VERBECK, 1958 apud CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000) e cloretos (DIHR et al., 1993 apud MONTEIRO; NEPOMUCENO, 1996).

Em **concretos com escória**, a carbonatação do hidróxido de cálcio e de outros compostos, dependendo de seus teores, conduz inicialmente a uma diminuição do volume de poro em virtude da colmatação, e sequencialmente, ocorre um aumento depois da formação de sílica porosa ou gel de sílica (ÇOPUROĞLU; FRAAIJ; BIJEN, 2006; DIAS, 2000; NGALA, PAGE, 1997; MUKHERJEE, 2004). A sílica porosa ou gel de sílica, que é o produto de reação do silicato de cálcio hidratado com o $CO_2$, tem microporosidade mais aberta (CEUKELAIRE; VAN NIEUWENBURG, 1993 apud DIAS, 2000). Por isso, a redução no volume e diâmetro de poros por causa da carbonatação em estágio avançado pode não acontecer em concreto com escória de alto-forno.

Bauer (1995) constatou aumento de massa, em virtude da carbonatação, mais significativo em argamassas com cimento com 24% de escória (CP II-E) do que em argamassas com cimento sem escória (CP II-F).

O menor teor de $Ca(OH)_2$ no concreto com adições minerais, devido à substituição de parte do cimento Portland, dá oportunidade para o $CO_2$ atacar mais rapidamente o C-S-H, pois o $Ca(OH)_2$ se esgota mais rapidamente; dessa forma, o avanço da carbonatação e o aumento do volume de poros de maior diâmetro podem ser mais rápidos no concreto com adições, dependendo das outras propriedades do concreto.

Assim, o aumento da taxa de carbonatação em concretos com altos teores de escória (BOURGUIGNON, 2004; COELHO, 2002; ISAIA; VAGUETTI; GASTALDINI, 2001; MUKHERJEE, 2004) se deve a duas razões: ao mais baixo teor de hidróxido de cálcio

(BAUER, 1995; BELIE et al., 1996) e outros compostos disponíveis para reagir com o $CO_2$ atmosférico (PAPADAKIS, 2000), e à conseqüente mudança na distribuição da porosidade na fração de pasta do concreto devida à própria carbonatação (MUKHERJEE, 2004), que acelera ainda mais o mecanismo.

A redistribuição da porosidade depende do coeficiente de difusão e do grau de carbonatação, e afeta especialmente as zonas de transição em pastas de cimento rico em escória (ÇOPUROĞLU; FRAAIJ; BIJEN, 2006; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002). A deterioração mais rápida de zona de transição facilita ainda mais a penetração de agentes agressivos, o que leva a um encurtamento na fase de iniciação induzida por carbonatação, e aumenta o risco de corrosão (PAPADAKIS, 2000).

A difusividade iônica pode aumentar em uma ordem de grandeza se o concreto carbonatado sofrer lixiviação suficiente para criar uma microestrutura com poros de maior volume (BENTZ; GARBOCZI, 1992 apud CHEN; THOMAS; JENNINGS, 2006). Após a dissolução do CH, podem ocorrer diversos resultados em pastas de cimento; os mais óbvios são o aumento no volume total de poros e a perda subseqüente de resistência (CHEN; THOMAS; JENNINGS, 2006; HEUKAMP; ULM; GERMAINE, 2001; NGALA, PAGE, 1997).

Muitas vezes, a lixiviação do concreto é o resultado de um ataque fluido (água pura ou água com pH muito baixo comparada à água de poro do concreto), e induz à hidrólise dos compostos hidratados da pasta de cimento, em virtude da difusão dos agentes agressivos transportados da superfície do cobrimento para o interior do concreto, e da difusão dos produtos dissolvidos do interior do concreto para a superfície. Isso conduz a um aumento importante no volume e diâmetro de poros da pasta de cimento, algo que traz como conseqüência o aumento dos coeficientes de transporte de massa (BURLION; BERNARD; CHEN, 2006).

Um maior volume total de poros porventura produzidos por certas dosagens de concretos com maiores teores de adições pode contribuir para a difusão de $CO_2$, pois o que influencia a taxa de carbonatação não é apenas o teor de $CO_2$, mas também a sua difusão no interior do concreto, que é aumentada pela maior distribuição de porosidade, apesar de poros mais refinados, e da menor quantidade relativa de $Ca(OH)_2$ disponível para carbonatar.

Um exemplo de dosagem bem sucedida é a diminuição da carbonatação no desempenho em serviço para alguns estudos europeus, que utilizaram teores de escória de 85%. Carece, pois, de mais conhecimento nessa área (MUKHERJEE, 2004).

Castro et al. (2004), estudando a carbonatação em concretos com adição de escória de alto-forno em teores de 65% em massa de materiais cimentícios, constataram que o refinamento microestrutural, proporcionado pela escória de alto-forno ao concreto com baixa relação água/material cimentício, pode superar o problema de suposta redução da reserva alcalina (em conseqüência da redução da quantidade de hidróxido de cálcio proveniente do proporcionamento).

Pelo exposto acima, o efeito deletério da carbonatação pode ser minimizado por meio de estudos de dosagem e durabilidade, com o intuito de se obter concreto durável de microestrutura mais densa ou de porosidade descontínua, que é obtido, entre outros fatores, com a adoção de uma baixa relação água/material cimentício (FIGUEIREDO; NEPOMUCENO, 2004; HELENE, 1993).

### 2.5.2 Corrosão induzida por cloretos

Considera-se que a corrosão das armaduras induzida por cloretos seja o maior problema para a durabilidade das estruturas de concreto armado, pois é um mecanismo relacionado às condições físico-químicas da estrutura e ao ambiente externo (HELENE, 1993). Ela é observada com freqüência, principalmente nas estruturas expostas ao ambiente marinho.

A **corrosão localizada** ou **por pites** ocorre normalmente pela formação de microcélulas, sendo observada na corrosão da armadura induzida por cloretos. Cloretos penetram no concreto por gradiente de concentração, cujo ataque se apresenta muito mais intenso do que com a carbonatação, resultando em rápida formação de pites (BROWN, 2002; CASCUDO, 1997; ELSENER, 2002). Em muitos casos a corrosão sob a forma de pites tem início nos pontos próximos à armadura com maior concentração de cloretos[16] e/ou nas inclusões da superfície ou da camada passiva do aço. (CASCUDO, 1997; BROWN, 2002).

A partir de determinada concentração de cloretos, a despassivação começa primeiramente pela dissolução da camada de portlandita ao redor da armadura; devido ao aumento da migração de íons segue-se a desestabilização com pouca ou nenhuma dissolução química da camada passiva (LEEK; POOLE, 1990 apud SAKR, 2004). A proximidade de cloretos aumenta a migração dos íons ferrosos na camada passiva de tal forma que a barreira passiva fica menos efetiva para manter os últimos na ligação metálica. Finalmente, em algum ponto, a

[16] Obtém-se a concentração de cloretos a partir do extrato aquoso dos poros do concreto retirado por meio de uma seringa na amostra submetida à compressão triaxial. O resultado é geralmente expresso em concentração de cloretos em moles/dm³, moles/*l*, mmol/*l* (HELENE, 1993).

camada deixa de existir e é substituída por uma região anódica (TRAUENBERG; FOLEY, 1971 apud GAIDIS, 2004).

Apesar dessa explicação, o mecanismo pelo qual cloretos aceleram a corrosão das armaduras é complexo e não compreendido completamente (CASCUDO, 1997; GAIDIS, 2004). Sabe-se que, na presença de cloretos, a camada protetora pode ser destruída até mesmo a valores de pH consideravelmente acima de 11,5, se houver ao redor das armaduras uma concentração de cloretos suficiente (JUNG; YOON; SOHN, 2003).

A presença de cloretos no concreto, em concentração acima de certo limite, produz dois efeitos simultâneos: aumento da condutividade do eletrólito e rompimento da camada de óxido protetora da armadura. A quebra da camada de óxido se deve à formação de um complexo solúvel de cloreto de ferro e cloretos que a torna permeável e instável, facilitando a dissolução dos íons do metal (BROWN, 2002; HELENE, 1993; SAKR, 2004; YALQYN; ERGUN, 1996). Depois de iniciado o mecanismo, os pites começam a funcionar como cátodos (SAKR, 2004), assim (Figura 2.6):

$$Fe^{2+} + 2Cl^- \longrightarrow FeCl_2. \qquad \textbf{Equação 2.17}$$

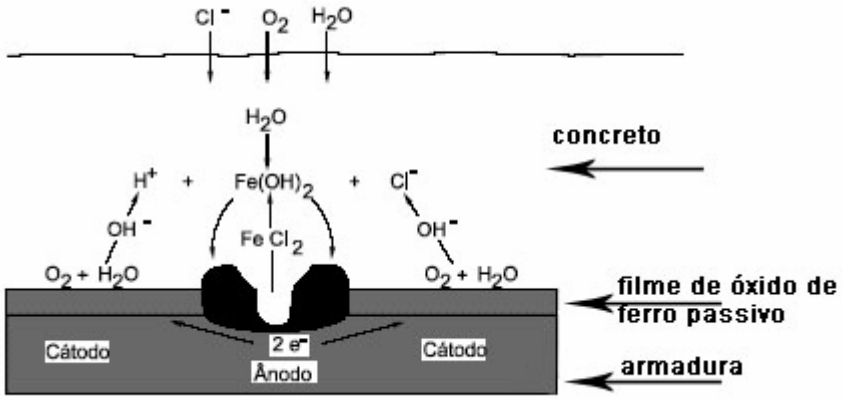



**Figura 2.6: Mecanismo da corrosão por pite (TREADAWAY, 1988 apud CASCUDO, 1997).**

Elétrons liberados nas áreas anódicas são atraídos à área catódica formando uma corrente elétrica, $I_{corr}$ (SAKR, 2004). A diferença de potencial existente em diferentes locais no concreto, que pode ser resultante do próprio gradiente de concentração de cloretos, é a força eletromotriz que dá início às reações entre ânodo e cátodo (THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998).

Após a destruição da camada passiva, com a presença de água (umidade) e oxigênio, o cloreto de ferro reage com hidroxilas formando hidróxido ferroso, $Fe(OH)_2$, a corrosão sob a forma

de ferrugem, podendo haver perda na seção transversal das barras (BROWN, 2002; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993, NEVILLE, 1997; SAKR, 2004):

$$FeCl_2 + 2H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2Cl^-. \qquad \textbf{Equação 2.18}$$

O íon cloro pode ser utilizado diversas vezes nas reações, funcionando como catalisador (BROWN, 2002; HELENE, 1993; THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998):

$$6FeCl_2 + O_2 + 6H_2O \longrightarrow 2Fe_3O_4 + 12H^+ + 12Cl^-. \qquad \textbf{Equação 2.19}$$

Por causa disso, uma vez iniciada, até mesmo uma pequena quantidade de cloretos pode sustentar o mecanismo da corrosão, sendo sua influência decisiva (BROWN, 2002; HELENE, 1993; THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998).

Efetivamente, não é apenas a concentração de cloretos que governa a perda da passividade sob todas as condições de exposição, mas também a **relação cloreto-hidroxila** ($Cl^-/OH^-$), porque os íons hidroxila agem como inibidores. Experiências mostram que, com o aumento do pH, o limite de cloretos para a perda de passivação das armaduras também aumenta. Outros parâmetros, como a difusão do oxigênio até as áreas catódicas, também têm influência significante (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; JUNG; YOON; SOHN, 2003).

A situação de equilíbrio proporcionada pela elevada alcalinidade da fase aquosa do concreto, proveniente dos compostos alcalinos $Na^+$, $K^+$, $Ca^{++}$ e $OH^-$, pode ser alterada quando a relação $Cl^-/OH^-$ atinge valores superiores a 0,61 (HAUSINAN, 1967 apud HELENE, 1993). Quando essa situação de equilíbrio deixa de existir, inicia-se a despassivação das armaduras (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; MONTEIRO; NEPOMUCENO, 1996).

Entretanto, essa relação é controversa, e outros autores discutem outras relações $Cl^-/OH^-$ limites, dependendo de variáveis como a relação água/material cimentício, a composição do cimento (teor de álcalis), a alcalinidade da interface aço-concreto e o teor de adições (BAUER, 1995; COSTA; GASTALDINI; ISAIA, 2002; ERDOGDU; KONDRATOVA; BREMNER, 2004; LAMBERT; SOYLEV; FRANÇOIS, 2003).

A penetração de cloretos pode modificar pontualmente o pH da solução de poro. Cloretos deslocam hidroxilas por meio de uma troca de íons sobre a interface aço-concreto (BYFORS, 1986 apud BROWN, 2002). Se cloretos se difundem ligados como NaCl, podem ocorrer reações de troca de $Cl^-$ por $OH^-$, o que faz elevar o pH pela formação de NaOH (BIRNIN-YAURI; GLASSER, 1998).

Por outro lado, se as hidroxilas forem lixiviadas, até mesmo impulsionadas pelos deslocamentos, cloretos são difundidos para o interior do concreto, causando uma redução localizada no pH da água de poro (BYFORS, 1986 apud BROWN, 2002).

No ânodo, o hidrogênio livre, formado conforme equação 2.19, pode baixar o pH entre 7 e 4,6. Com isso, os pites podem ter pH menor que 7 (BAUER, 1995; GLASS; BUENFELD, 2000; HELENE, 1993), enquanto no cátodo o pH pode aumentar (BAUER, 1995).

O mecanismo de transporte de cloretos pelo concreto pode ocorrer por absorção total em simples contato, seguida por difusão, ou seguida por capilaridade e depois difusão. Quando os poros capilares estão relativamente secos ou parcialmente saturados, cloretos podem penetrar por absorção e por capilaridade, ou podem permanecer dissolvidos nas gotículas de névoa salina na sua superfície, mas a absorção tende a dominar (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001; CONCIATORI, 2002; HONG; HOOTON, 1999).

E quando estão relativamente saturados, a difusão se torna o mecanismo de transporte dominante, impulsionada pela diferença de potencial químico, principalmente até maiores espessuras. Mesmo nos períodos de secagem, a difusão de cloretos para o interior do concreto continua ocorrendo, pois os poros permanecem saturados por algum tempo (ANDRADE, 1993; BASHEER et al., 2002; BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001; BAUER, 1995; CASCUDO, 1997; CONCIATORI, 2002; HELENE, 1993; HONG; HOOTON, 1999).

Esses mecanismos podem agir simultaneamente ou podem prevalecer numa seqüência durante períodos sucessivos. De forma semelhante, o tipo de mecanismo de transporte pode variar em localizações diferentes dentro do concreto (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

Cloretos também podem penetrar por acesso direto, através das fissuras no concreto ou por migração (BASHEER et al., 2002; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993). Entretanto, o tempo necessário para que cloretos se difundam pela espessura de cobrimento até a armadura, em quantidade suficiente para quebrar a sua camada passiva depende principalmente da absorção capilar (NEPOMUCENO, 2005).

A intensidade da difusão de cloretos[17] está relacionada ao proporcionamento do concreto, à estrutura de poro, às fissuras presentes na superfície do concreto, à espessura de cobrimento e

[17] Geralmente, o ensaio para medir a difusão de cloretos no concreto é semelhante ao ensaio prescrito pela ASTM 1202:1997. Porém nesse caso, não existe gradiente de pressão hidráulica, nem tampouco aplicação de diferença de potencial. O resultado normalmente é dado em m²/s (HELENE, 1993).

à capacidade de fixação de cloretos nas fases alumino-ferríticas (ERDOGDU; KONDRATOVA; BREMNER, 2004; HELENE, 1993).

A relação água/cimento controla a penetração de cloretos devida à sua influência na porosidade e propriedades de transporte. Seguramente, o concreto com relação água/material cimentício tão baixa quanto possível é igualmente ou mais importante para que se produzam concretos com baixos coeficientes de difusão de cloretos (CASCUDO, 1997; ERDOGDU; KONDRATOVA; BREMNER, 2004; HELENE, 1993; JAU; TSAY, 1998; MEHTA; MONTEIRO, 1994; OH et al., 2002). Page, Short e El Tarras (1981 apud HELENE, 1993) constataram que a velocidade de difusão de cloretos aumentou de 4 a 5 vezes com um aumento da relação água/cimento entre 0,4 e 0,6.

O refinamento de poros promovido pela escória pode diminuir a penetrabilidade de cloretos, conforme ensaio prescrito pela ASTM 1202:1997[18] (HOU; CHANG; HWANG, 2004; YEAU; KIM, 2005).

Foi constatado que concretos de cimento Portland resistente a sulfatos, de baixo teor de aluminato tricálcico, $C_3A$, apresentaram o mais alto coeficiente efetivo de difusão[19], variando de 60 m²/s a $115 \cdot 10^{-13}$ m²/s para uma relação água/cimento de 0,5; logo abaixo vieram os cimentos Portland comum e os cimentos com adições de materiais pozolânicos. Concretos com cimentos com teor maior que 65% de escória de alto-forno mostraram o menor coeficiente efetivo de difusão, com valores na faixa de 0,3 m²/s a $2 \cdot 10^{-13}$ m²/s (MEHTA; SCHIESSL; RAUPACH, 1992 apud HELENE, 1993).

Trabalho de Oh et al. (2002) demonstrou que o concreto com escória de alto-forno moída em teor de 25% (em massa total de aglomerante) e resistência à compressão aos 28 dias de 41,8 MPa, apresentou penetrabilidade de cloretos de aproximadamente 1/3 do concreto de referência (sem escória e com resistência à compressão aos 28 dias de 42,3 MPa).

A redução na penetrabilidade de cloretos observada em concreto com escória (teor de adição de 65% em massa total de material cimentício) em relação ao concreto de referência, foi em torno de 86% no trabalho de Castro et al. (2004).

---

[18] No ensaio prescrito por essa norma, avalia-se, durante determinado tempo, a carga passante numa amostra de concreto causada pela diferença de potencial de 60 V, aplicada entre duas células de difusão (uma contendo solução de cloreto de sódio a 3,0%, e a outra solução de hidróxido de sódio a 0,3 N) localizadas em cada uma de suas extremidades. Uma carga inferior a 100 coulombs indica penetrabilidade de cloretos desprezível.

[19] Coeficiente efetivo de difusão, também chamado de difusividade ou penetrabilidade de cloretos, é o obtido no ensaio de migração de cloretos (ASTM 1202:1997).

Experiência de Sivasundaram e Malhotra (1992) mostrou que, aos 28 dias, a carga passante de penetrabilidade de cloretos de concretos com altos teores de escória (50 a 75% em massa de total de materiais cimentícios) foi excepcionalmente mais baixa quando comparada aos concretos de controle, e variou entre 174 coulomb e 383 coulomb[20].

Ozyildirim (1994) dosou concreto com relação água/material cimentício de 0,45, teor de escória de 33% e de sílica ativa de 7% (em massa total de material cimentício), que apresentou carga passante de 319 coulomb na idade de 1 ano.

De acordo com a literatura pesquisada, cloretos podem coexistir sob formas diferentes no concreto atacado: sob a forma de íons livres, adsorvidos na superfície dos poros; (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; JUCÁ, 2002); adsorvidos ou quimisorvidos na superfície do C-S-H, ou nos espaços interlamelares do C-S-H, ou compondo a estrutura do C-S-H (BEAUDOIN et al., 1990 apud DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996; LAMBERT; PAGE; SHORT, 1985 apud DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996); ou quimicamente combinados às fases aluminato e ferro-aluminato (BAUER, 1995; BIRNIN-YAURI; GLASSER, 1998; CASCUDO, 1997; DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996; HELENE, 1993; ISAIA, 1995; JUCÁ, 2002; MONTEIRO; NEPOMUCENO, 1996; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996; TAYLOR, 1992; TREADAWAY, 1988 apud GLASS; BUENFELD, 2000); ao $Al_2O_3$ e ao $Fe_2O_3$ (BAUER, 1995; DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996; GLASS; BUENFELD, 2000; ISAIA, 1995; JUCÁ, 2002).

São os **cloretos livres**[21], não fixados, que mais favorecem a corrosão das armaduras (CASCUDO, 1997; ISAIA, 1995). O somatório de cloretos livres e combinados é denominado **cloretos totais**[22] (BAUER, 1995; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; ISAIA, 1995; JUCÁ, 2002; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996).

Grande parte dos trabalhos empreendidos com a escória granulada de alto-forno atesta que a capacidade de fixação de cloretos é melhorada em pastas e concretos que contêm esse material em comparação com outros somente com cimento Portland, por diminuir o teor de

[20] De acordo com a ASTM 1202:1997, carga passante menor do que 1000 coulomb caracteriza penetrabilidade de cloretos muito baixa.

[21] O ensaio para medir o teor de cloretos livres utiliza a dissolução em água. O teor de cloretos pode ser expresso como teor de cloretos por massa de concreto, ou por unidade de massa de cimento, ou ainda por unidade de massa de água de amassamento (HELENE, 1993).

[22] O ensaio para medir o teor de cloretos totais utiliza a dissolução em ácido, que é expresso da mesma forma que para o teor de cloretos livres (HELENE, 1993).

cloretos livres e por reduzir o coeficiente de difusão de cloretos (CASTRO et al., 2004; COSTA; GASTALDINI; ISAIA, 2002; LENG; FENG; LU, 2000; XU, 1997).

A fixação de cloretos nesses compostos reduz a concentração de cloretos livres em determinada região no concreto e, como conseqüência, a tendência da difusão para o interior pode ser depois reduzida (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001). Em idades avançadas, o benefício do refinamento dos poros propicia difusão ainda mais baixa, além de baixos índices de permeabilidade, sendo essa propriedade uma das mais significativas nos cimentos adicionados com escória (BAUER, 1995). Outros íons dissolvidos na solução de poro do concreto com escória de alto-forno ajudam a restringir a mobilidade de cloretos por terem menor capacidade de difusão (HELENE, 1993; LENG; FENG; LU, 2000).

Porém, os sais formados nas reações de fixação poderão ser cristalizados e causar retração e conseqüentes microfissuras, que, por sua vez, podem facilitar de forma acelerada a migração de fluidos agressivos (KURDOWSKI, 2004). Isso ocorre eminentemente nas estruturas reais expostas em ambiente externo não abrigado, e principalmente com névoa salina, que são o resultado dos efeitos de molhagem e secagem e causam a cristalização de sais no seu interior (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A análise de concretos com permeabilidade ao ar relativamente semelhante, mostrou que a capacidade de fixação de cloretos da matriz de cimento se tornou o principal fator determinante de quanto o concreto com escória é resistente à penetração de cloretos. Ao ser mantida a permeabilidade ao ar e aumentado o teor de substituição de escória (0%, 33,3%, 50% e 66,7%), ocorreu aumento na fixação e diminuição na difusão de cloretos (DHIR, EL-MOHR, DYER, 1996).

As reações químicas de cloretos com a pasta de cimento começam com o hidróxido de cálcio e o aluminato de cálcio hidratado, dependendo dos cátions na solução (TREADAWAY, 1988 apud GLASS; BUENFELD, 2000). Cloretos reagem com o $C_3A$ e o $C_4AF$ do cimento Portland e produzem cloroaluminatos (sal de Friedel ou $3CaO•Al_2O_3•CaCl_2•10H_2O$) e cloroferratos ($3CaO•Fe_2O_3•CaCl_2•10H_2O$) (BUENFELD, 2000; DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996; JUCÁ, 2002; TREADAWAY, 1988 apud GLASS; TAYLOR, 1992).

Estudos de Dhir, El-Mohr e Dyer (1996) sugeriram por medidas de análises térmicas que a grande melhoria na fixação de cloretos foi resultado do maior teor de alumina da escória granulada de alto-forno em relação ao clínquer Portland, haja vista a produção de quantidades maiores de sal de Friedel. A capacidade de fixação de cloretos se ampliou com um aumento

do teor de substituição de até 66,7% de escória granulada de alto-forno moída (DHIR, EL-MOHR, DYER, 1996). Bauer (1995) verificou que o cimento composto com escória de alto-forno (24% em massa) teve um efeito benéfico na capacidade de fixação de cloretos para uma relação água/cimento de 0,5.

Quanto à fixação de cloretos ao C-S-H, os concretos com elevados teores de escória têm menor capacidade de fixação se comparados aos concretos sem escória, pois os primeiros têm menor relação C/S no C-S-H (BAUER, 1995; TAYLOR, 1992).

Além da presença de compostos aluminatos e ferro-aluminatos, outros fatores importantes influenciam na fixação de cloretos: a proporção de substituição do cimento por escória granulada de alto-forno, a concentração de hidroxila na solução de poro (ou pH), o cátion do sal de cloretos, a relação água/material cimentício, sulfatos, a alcalinidade, entre outros (BAUER, 1995; GLASS; BUENFELD, 2000; HELENE, 1993; JAU; TSAY, 1998; LUO et al., 2003; XU, 1997).

Em materiais cimentícios, a inter-relação $Cl^-/OH^-$ é mais complexa por causa da fixação de cloretos e da dependência dela ao pH (SANDBERG; LARSSON, 1993). Foi constatado que a fixação e a capacidade de adsorção de cloretos diminuíram com o aumento da concentração de hidroxilas (BAUER, 1995) no pH acima de 12,6, e reciprocamente uma diminuição no pH resultou na diminuição dessa relação $Cl^-/OH^-$ (TRITTHART, 1989 apud DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996).

A **dissociação de cloretos** fixados na forma do sal de Friedel, durante a vida útil da estrutura de concreto, submete a armadura a um maior risco de corrosão (BIRNIN-YAURI; GLASSER, 1998; GLASS; BUENFELD, 2000; GOÑI; GUERRERO, 2003; HELENE, 1993; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996). Constatou-se que cloretos quimicamente combinados e fisicamente adsorvidos foram rapidamente liberados quando o pH da água de poro diminuiu para menos de 12,5. Menos de 2% do cloreto solúvel em ácido permaneceu fixado depois que o pH caiu a 11,5, pois, pelo menos duas fases, sal de Friedel e C-S-H, fixaram cloretos (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001; GLASS; BUENFELD, 2000; PRUCKNER; GJØRV, 2004).

Teoricamente, cloretos fixados podem apresentar um risco de corrosão bem parecido com o de cloretos livres. A implicação prática desse fato é que, enquanto a fixação de cloretos retarda a sua própria penetração, simultaneamente permite o acúmulo de teores de cloretos

maiores que possam aumentar o risco de corrosão em algumas situações (GLASS; BUENFELD, 2000; HELENE, 1993).

Em virtude da desestabilização do hidróxido de cálcio e do aluminato de cálcio hidratado nas reações químicas e na fixação de cloretos, dependendo da solubilidade de cloretos, uma substancial redução do pH da água de poro acontece e muitos produtos hidratados tornam-se instáveis (KURDOWSKI, 2004). Se ocorrer também o efeito da hidrólise e da lixiviação, isso poderá conduzir a um aumento importante no volume total de poros da pasta de cimento (BURLION; BERNARD; CHEN, 2006).

A taxa de corrosão induzida por cloretos em concretos com escória está tratada na seção 2.6.

### 2.5.3 Corrosão induzida pela ação conjunta de carbonatação e cloretos

A corrosão induzida pela ação conjunta de cloretos e carbonatação é comum em região urbana e ao mesmo tempo marinha e industrial, pois, nesses tipos de agressividade ambiental, tanto dióxido de carbono quanto cloretos estão presentes. Essa interação entre carbonatação e contaminação por cloretos no concreto é considerada a causa provável dos problemas de corrosão mais severos encontrados na prática (SCHIEßL P., 1988 apud BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

A presença de cloretos no concreto pode **desacelera**r a frente de carbonatação (CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000). Na ação conjunta de carbonatação e cloretos pode prevalecer o ingresso de cloretos com um aumento de sua penetração (**aceleração**) de até 100% (DIHR et al., 1993 apud MONTEIRO; NEPOMUCENO, 1996). Altas concentrações de cloreto podem causar saturação de água em função da higroscopicidade[23] apresentada por ele. Como conseqüência, a película de água dentro dos poros se torna mais espessa, diminuindo a difusão de $CO_2$ e a taxa de carbonatação (CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000).

Dependendo dos teores de $CO_2$ e de NaCl e da composição química da água de poro, o sal de Friedel pode ser carbonatado (GOÑI; GUERRERO, 2003). Por outro lado, a solução agressiva de cloretos pode descalcificar o $CaCO_3$ (BURLION; BERNARD; CHEN, 2006; CHEN; THOMAS; JENNINGS, 2006).

Resultados obtidos em soluções simulando concreto carbonatado mostraram que a concentração de cloretos crítica para iniciação do pite era maior quando se aumentava o pH da

[23] Absorção por capilaridade, ou quando um material poroso varia o seu conteúdo de umidade em função da variação da umidade relativa.

solução. Sob condições de fraca carbonatação, o aço carbono não se passivava, e a manutenção de uma acidificação local na interface solução-metal era condição necessária para a iniciação e propagação do pite (MORENO et al., 2004).

No concreto parcialmente saturado, podem ocorrer, simultaneamente, a difusão de dióxido de carbono e oxigênio, a penetração de cloretos por capilaridade, a carbonatação e a corrosão das armaduras (ANDRADE, 1993; BASHEER et al., 2002; HONG; HOOTON, 1999; HOUST; WITTMANN, 2002; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002). Nessa condição, existem água e dióxido de carbono suficientes para propiciar as reações de carbonatação, e também, água, oxigênio, queda de pH e cloretos suficientes para propiciar o mecanismo de corrosão.

O planejamento experimental da corrosão acelerada das armaduras com aumento de temperatura, em algumas circunstâncias, pode ser a conseqüência da ativação térmica e liberação de cloretos (BROWN; BOTHE JR., 2004).

Se o período de secagem de ciclos acelerados for longo, ou se a temperatura for muito alta, de maneira que o concreto parcialmente saturado chegue a secar, a resistividade do concreto aumenta, e os mecanismos de carbonatação e de corrosão cessam, pois é necessário água para dissolver $CO_2$ e $Ca(OH)_2$ a fim de que ocorra a carbonatação. Além disso, apesar de haver $O_2$, é necessário eletrólito para ocorrer o mecanismo da corrosão. Se as condições ambientais levarem à secagem prolongada do concreto, o teor de cloretos pode ser um fator secundário na corrosão das armaduras (GRUBE; KERKHOFF, 2004; LÓPEZ; GONZÁLEZ; ANDRADE, 1993).

No concreto que passa de um período saturado ou parcialmente saturado para um período de secagem, os sais tendem a concentrar-se no interior do concreto; e, num ciclo sazonal ou experimental subseqüente, cloretos podem ser levados ainda mais para o interior do concreto por capilaridade (HONG; HOOTON, 1999; LÓPEZ; GONZÁLEZ; ANDRADE, 1993; HOUST; WITTMANN, 2002; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

O aumento da temperatura pode também causar retração por secagem induzindo a fissuras, na maioria dos tipos de dosagens de concretos, e, embora um concreto com escória possa ter uma retração macroscópica pequena, a retração microscópica pode ser alta. Se o concreto com escória apresentar retração por secagem, poderá haver uma pequena diminuição de volume total de poros; porém, internamente podem formar-se poros de maior volume (medidos pela

intrusão de mercúrio) devido a uma maior abertura de fissura (KANNA; OLSON; JENNINGS, 1998).

Experimentos de Kanna, Olson e Jennings (1998) em pastas de cimento composto com escória mostraram que a combinação de cura inadequada a 50% de umidade relativa seguida por secagem a 105°C teve efeito drástico na estrutura de poro.

Assim, dependendo das demais propriedades, o concreto com escória sujeito à secagem severa pode resultar em diminuição de água de poro, causando aumento na resistividade, aumento no potencial eletroquímico e diminuição na taxa de corrosão. Causa também aumento de quantidade e abertura de fissuras, e de tamanho de poros, possibilitando que, mais tarde, o concreto exposto a situações sazonais absorva com maior facilidade os agentes agressivos do ambiente de exposição, tais como dióxido de carbono e cloretos, e diminua a resistividade e o potencial de corrosão e aumente a taxa de corrosão nas situações de umidade.

A queda do pH provocada pela carbonatação dificulta a fixação de cloretos em virtude das condições desfavoráveis para a cristalização do sal de Friedel. Estudos mostraram que esse sal somente se manteve estável em pH acima de 12,5, o que aumentou a quantidade de cloretos livres (BIRNIN-YAURI; GLASSER, 1998; GLASS; BUENFELD, 2000; GOÑI; GUERRERO, 2003; JOUKOSKI et al., 2001; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996).

Os produtos da reação deletéria da ação conjunta de cloretos e carbonatação no concreto dependem do grau de carbonatação, que por sua vez depende não apenas do teor de $CO_2$ atmosférico, como também do intervalo da profundidade analisada. Trabalho de Suryavanshi e Swamy (1996) mostrou que, no intervalo de profundidade de 0 a 5 mm ocorreu uma diminuição na quantidade do sal de Friedel na presença de carbonatação atmosférica forte. Porém, a quantidade do sal de Friedel aumentou em maiores profundidades em que a carbonatação atmosférica não foi dominante. Na superfície, entre 0 e 5 mm de profundidade, ocorreu maior grau de carbonatação.

Cloretos porventura fixados podem mais tarde piorar a situação da estrutura. Quando ela estiver bastante deteriorada, e o concreto carbonatado já apresentar poros de maior diâmetro (CHEN; THOMAS; JENNINGS, 2006; NGALA; PAGE, 1997; MUKHERJEE, 2004); cloretos antes fixados sob a forma de sal de Friedel são novamente liberados na solução de poro devido à desestabilização desse sal em baixo pH. Isso também ocorre com o aumento da temperatura (BROWN; BOTHE JR., 2004; GLASS; BUENFELD, 2000; ISAIA, 1995; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996).

Também é provável que a desestabilização da fase AFm seja o resultado da penetração de $CO_2$. Na pasta de cimento facilmente carbonatada, as fases $Ca(OH)_2$, C-S-H, entre outras, continuam a modificar o pH, de forma que a fase AFm permaneça localmente estável e possa continuar ajustando sua composição para atrair e fixar cloretos (BIRNIN-YAURI; GLASSER, 1998).

Termogramas de concretos carbonatados e contaminados por cloretos confirmaram a ausência de etringita a intervalo de profundidade entre 0 e 5 mm, enquanto que sua presença foi confirmada nas maiores profundidades nas quais não havia carbonatação. Esse trabalho sugeriu que a estabilidade da etringita também depende do pH (SURYAVANSHI; SWAMY, 1996).

Se o concreto apresentar uma alta ascensão capilar, o efeito da queda do pH causado pela carbonatação e por cloretos pode ser ainda mais ampliado, atraindo ainda mais cloretos (HOPPE FO; ISAIA; GASTALDINI, 2002; PEREIRA; CINCOTTO, 2001), considerando-se que o diâmetro dos poros capilares varia aproximadamente entre 15 Å e 1000 Å e que o diâmetro do íon cloro é menor que 2 Å (1 ηm equivale a 10 Å).

Levando-se em conta que ambos os contaminantes, dióxido de carbono e cloretos, podem baixar o pH da água de poro (BYFORS, 1986 apud BROWN, 2002; GLASS; BUENFELD, 2000; HELENE, 1993; KURDOWSKI, 2004; ST. JOHN; POOLE; SIMS, 1998 apud BROWN, 2002) e que existe dificuldade para fixar cloretos em baixo pH (GLASS; BUENFELD, 2000; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996), esse efeito interativo pode induzir muito mais rapidamente à corrosão das armaduras do que se tais mecanismos agissem separadamente (ALONSO; ANDRADE, 1988 apud MONTEIRO; NEPOMUCENO, 1996; IHEKWABA; HOPE; HANSSON, 1996; ROPER; BAWEJA, 1991, apud CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996).

Após o início do mecanismo da corrosão, a combinação de cloretos com carbonatação aumenta a cinética da corrosão e reduz o valor crítico para o risco de corrosão (JOUKOSKI et al., 2001).

Monteiro e Nepomuceno (1996) constataram que a eficiência de **adições** utilizadas em cimentos comerciais com o objetivo de reduzir a penetração de cloretos ficou limitada quando o concreto estava carbonatado. Os resultados obtidos por eles mostraram que, se a carbonatação do concreto anteceder a ação de soluções de cloreto, a corrosão das armaduras pode ser intensificada.

O efeito do ataque conjunto por carbonatação e cloretos é mais pronunciado com um aumento na relação água/material cimentício (MONTEIRO; NEPOMUCENO, 1996; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996; ZIVICA, 2003).

Dependendo das concentrações de $CO_2$ e de $Cl^-$ e das demais propriedades do concreto, é provável que a frente de cloretos prevaleça sobre a frente de carbonatação em concretos com adições, devido ao fato de a higroscopia de cloretos reduzir o diâmetro dos capilares, o que dificulta a penetração de dióxido de carbono (CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000), e, também devido à maior altura de ascensão capilar desses concretos, que atraem cloretos para o interior (HOPPE FO; ISAIA; GASTALDINI, 2002; PEREIRA; CINCOTTO, 2001).

Trabalho de Chrisp et al. (2002) sugeriu que o refinamento adicional da estrutura de poro devido ao efeito de fixação de cloreto, à cristalização de NaCl nos poros e ao aumento da viscosidade da solução salina dificultou, por determinado período, a absorção volumétrica de solução com cloretos; mas, por exemplo, os concretos com 40% de escória sobre a massa total de materiais cimentícios apresentaram maior amplitude de condutividade (ou maior sensibilidade), em ciclos alternados de molhagem e secagem em solução salina, do que concretos com cimento Portland comum.

## 2.6 Resistividade, propriedades eletroquímicas e fatores que influenciam na corrosão das armaduras

A resistividade do concreto e as grandezas eletroquímicas traduzem bem a proteção do concreto frente à corrosão das armaduras. Suas definições estão descritas no Capítulo 3 desta dissertação. Nesta seção são tratados os seus efeitos nos concretos com escória de alto-forno.

A **resistividade elétrica do concreto** é função das características físicas da porosidade – principalmente da conectividade entre os poros ou da porosidade permeável –, da quantidade de eletrólito ou da umidade de equilíbrio, e da quantidade de íons na solução de poro (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993). A medida dessa propriedade também responde diferentemente de acordo com as fases de hidratação de materiais cimentícios (HELENE, 1993; KRIZAN; ZIVANOVIC, 2002).

Ela depende do tipo de cimento, da relação água/cimento, da existência de adições minerais, da idade do concreto, e das condições de cura (GÜNEYISI; ÖZTURAN; GESOĐLU, 2005; HOU; CHANG; HWANG, 2004; LIU, 1996; POLDER; PEELEN, 2002; WEE; SURYAVANSHI; TIN, 1999).

A diminuição da relação água/aglomerante e a adição de escória de alto-forno ajudam a diminuir o volume e diâmetro de poros capilares de forma significativa. Em decorrência disso, a resistividade elétrica do concreto aumenta várias vezes e a taxa de corrosão diminui consideravelmente (HELENE, 1993; HOU; CHANG; HWANG, 2004; VAGHETTI; MULLER; ISAIA, 2005). A diminuição da umidade de equilíbrio faz aumentar a resistividade elétrica do concreto (HOU; CHANG; HWANG, 2004; LIU, 1996; POLDER; PEELEN, 2002; WEE; SURYAVANSHI; TIN, 1999).

Os concretos de cimento composto dos experimentos de Güneyisi, Özturan e Gesoðlu (2005) mostraram maior resistividade elétrica que os concretos de cimento Portland comum para as relações água/cimento de 0,45 e 0,65 e todas as idades de ensaio (28 dias, 90 dias e 180 dias).

Constatou-se que, entre as adições minerais, a escória de alto-forno foi a que proporcionou maior resistividade elétrica do concreto para o mesmo grau de saturação de poro, tendo ocorrido um aumento no concreto com cimento com 70% de escória de alto-forno em substituição ao clínquer Portland, ou com CEM III/B[24] (HOU; CHANG; HWANG, 2004; GÜNEYISI; ÖZTURAN; GESOĐLU, 2005; POLDER; PEELEN, 2002; VAGHETTI; MULLER; ISAIA, 2005).

A diminuição no teor de clínquer Portland de misturas com adições minerais pode resultar numa menor concentração de íons $Na^+$, $K^+$, $Ca_2^+$, $SO_4^{2-}$ e, principalmente, $OH^-$, responsáveis por aumento na resistividade elétrica do concreto (SHI et al., 1998, apud WEGNER et al., 2005), principalmente com as fases de cimentícios estabilizadas. Por outro lado, a escória pode conter maior teor de compostos de enxofre, e, em situações de desestabilização de fases por queda no pH, pode ocorrer a liberação de seus íons.

Para uma determinada relação água/aglomerante, quanto maior o período de cura úmida maior é a resistividade elétrica do concreto (HELENE, 1993; HOU; CHANG; HWANG, 2004; WEE; SURYAVANSHI; TIN, 1999); já para uma determinada condição de cura, diminuindo-se a relação água/cimento do concreto, a resistividade elétrica aumenta; e para uma determinada relação água/cimento, a melhoria das condições de cura resulta, invariavelmente, em aumento da resistência à compressão, o que promove um aumento da resistividade elétrica (GÜNEYISI; ÖZTURAN; GESOĐLU, 2005; HOU; CHANG; HWANG, 2004; MISSAU et al., 2004).

[24] 75% de escória de alto forno sobre massa total de aglomerante.

Em ensaios acelerados, constatou-se que a carbonatação causou maior queda na resistência ôhmica em argamassas de cimento com 24% de escória (CP II-E) do que em argamassas de cimento sem escória (CP II-F) (BAUER, 1995). Isso foi atribuído ao eletrólito formado a partir da liberação de água proveniente das reações de carbonatação. Por analogia, pode-se supor que o mesmo efeito ocorra na resistividade elétrica do concreto.

Existe uma correlação entre a resistividade do concreto e a penetração de cloretos: uma maior resistividade está relacionada a uma menor penetração de cloretos (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; GÜNEYISI; ÖZTURAN; GESOĐLU, 2005; POLDER; PEELEN, 2002).

Quanto ao **potencial de corrosão**, muitas variáveis intervenientes podem alterar suas medidas. Não é raro que se encontrem discrepâncias de resultados entre vários trabalhos analisados. Uma camada muito carbonatada, concreto com alta resistividade, presença de adições e espessura de cobrimento muito alta podem dificultar as leituras, mostrando potenciais mais positivos (CASCUDO, 1997; ELSENER, 2002; HELENE, 1993).

Por outro lado, concretos com menor resistividade elétrica, maior relação água/material cimentício, menor cobrimento, e/ou contaminados por cloretos ou por altas concentrações de outros íons ou compostos de enxofre podem tornar os potenciais mais negativos. O aumento de ciclos nos envelhecimentos acelerados também pode induzir a leituras de potenciais mais negativos (ELSENER, 2002; GÜNEYISI; ÖZTURAN; GESOĐLU, 2005; POLDER; PEELEN, 2002; YEAU; KIM, 2005).

Jau e Tsay (1998) analisaram a corrosão das armaduras em concretos contendo diferentes teores de escória. As porcentagens de substituição de escória em massa relativa ao cimento foram 0%, 10%, 20%, 30%, e 50%, e as relações água/cimento foram 0,48 e 0,60. Após a cura úmida por 28 dias, os concretos foram submetidos a ciclos de molhagem (3 dias) e secagem à temperatura ambiente (4 dias) na água do mar, durante um ano. Os resultados dos ensaios mostraram que os concretos com 20 a 30% de escória em substituição ao cimento Portland mostraram valores de potencial de corrosão relativamente altos, o que levou à interpretação de que esses concretos tiveram menor probabilidade de corrosão induzida por cloretos, e que os concretos com relação água/material cimentício de 0,48 apresentaram menor concentração de cloretos.

Já outro estudo mostrou que o potencial de corrosão em corpos-de-prova de concretos com escória de alto-forno foi muito baixo, até mesmo antes de submetê-los ao envelhecimento acelerado, devido aos efeitos redutores dos compostos de enxofre da escória, tais como S,

$SO_2$, $S_2O_3$ e outros (AL-AMOUID et al., 1994, apud YEAU; KIM, 2005). Entretanto, um potencial de corrosão baixo não significa necessariamente que a taxa de corrosão seja alta (POLDER; PEELEN, 2002; YEAU; KIM, 2005), pois essa é controlada pela resistividade e pela disponibilidade de oxigênio no concreto, que, por sua vez, são controladas pelas características da porosidade e pelas propriedades de transporte.

Para uma mesma resistência à compressão de um concreto de referência ocorreu redução significativa nas **taxas de corrosão** das armaduras em concretos com 70% escória granulada de alto-forno moída em substituição ao cimento (VAGHETTI; MULLER; ISAIA, 2005).

Geralmente, ocorre pouca corrosão, ou corrosão desprezível, se a umidade relativa está abaixo de 60% sem cloretos, mas, se a umidade relativa aumentar além desse ponto, a taxa de corrosão também aumenta. No entanto, a corrosão também pode desenvolver-se com umidade relativa abaixo de 60% se a concentração de cloretos nas armaduras for suficiente para despassivá-las (JUNG; YOON; SOHN, 2003).

Para prolongar o período até a despassivação por cloretos, o uso de adições minerais é de grande importância, já que limita, substancialmente, a penetração de cloretos pelo concreto (ERDOGDU; KONDRATOVA; BREMNER, 2004). Além da adição da escória de alto-forno, ou da adição de pozolanas, as propriedades do concreto de cobrimento também são de primordial importância.

A corrosão causada pelo ingresso de cloretos progride a uma taxa muito mais alta que a causada por carbonatação (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001). Em casos extremos, a taxa de corrosão em estruturas reais pode ser de 5 mm/ano em comparação aos 0,05 mm/ano da corrosão induzida por carbonatação (ARUP, 1984, apud BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

São comuns as altas amplitudes de condutividade, resistência ôhmica e potencial de corrosão em concretos ou argamassas com adição de escória submetidos a ciclos de envelhecimento acelerado ou de molhagem e secagem (BAUER, 1995; CHRISP et al., 2002). Tais amplitudes são maiores do que em concretos e argamassas sem a presença de escória.

## 2.7 Considerações finais

As características da escória de alto forno determinam a sua hidraulicidade, pois um alto teor de vidro produz maior quantidade de C-S-H, composto responsável pela resistência do concreto e pela densificação da matriz. Essa microestrutura mais densa influencia

beneficamente na capacidade de proteção do concreto de cobrimento, pois aumenta a resistividade elétrica e diminui os coeficientes de transporte de massa, e, com isso, dificulta a entrada de agentes externos que possam despassivar as armaduras.

O mecanismo de corrosão depende da presença de eletrólito (ou de água) e de oxigênio, da existência de diferença de potencial, e da presença ou não de agentes agressivos. Em concretos com dosagem e cura apropriadas, a presença da escória de alto-forno induz ao refinamento de poros e reduz a velocidade de transporte de massa, diminuindo, assim, a disponibilidade de eletrólito e a penetração de agentes que possam induzir à corrosão.

A carbonatação reduz o pH da solução de poro e pode causar a despassivação das armaduras, podendo ser maior em concretos com altos teores de escória, dependendo das demais propriedades do concreto; e isso de deve à mudança na distribuição de tamanho de poro na fração de pasta do concreto.

A presença de cloretos pode despassivar as armaduras em qualquer pH, mas a sua penetração pode ser reduzida em concretos com escória, pois esse material pode diminuir o teor de cloretos livres, reduzir o coeficiente de difusão de cloretos e diminuir a probabilidade da corrosão induzida por cloretos.

O ataque conjunto de carbonatação e de cloretos pode causar deterioração mais rápida do que se somente um dos dois agentes, dióxido de carbono ou cloretos, estiver disponível, porque o efeito da carbonatação em reduzir o pH do concreto pode ser um incentivo para cloretos causarem a corrosão severa das armaduras.

Concretos com baixas relações água/material cimentício e altos teores de escória podem apresentar alto valor de resistividade e baixos coeficientes de transporte. Concretos com escória de alto-forno com as maiores resistências à compressão e menores relações água/materiais cimentícios especificadas pela NBR 6118:2003 podem apresentar menor absorção, maior resistividade, menores coeficientes de transporte, menor taxa de carbonatação, menor penetrabilidade de cloretos e menor taxa de corrosão das armaduras.

# CAPÍTULO 3 – TÉCNICAS PARA MONITORAMENTO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS EM LABORATÓRIO

## 3.1 Introdução

A corrosão dos metais pode se desenvolver, basicamente, por dois mecanismos: corrosão seca[1] e corrosão eletroquímica (GENTIL, 1982). Graças à sua natureza, a suscetibilidade da corrosão eletroquímica das armaduras pode ser estudada por meio de técnicas eletroquímicas.

As técnicas de potencial de corrosão e de resistividade elétrica do concreto são simples de aplicar e são reconhecidas na maioria dos procedimentos de normas de ensaios. O potencial de corrosão é a grandeza termodinâmica que indica a probabilidade da existência de reações de corrosão. A resistividade elétrica avalia a qualidade do concreto de cobrimento, indicando seu grau de umidade e sua resistência ao transporte de massa pela porosidade, e a existência de íons na solução de poro.

Essas técnicas não podem quantificar ou fornecer a taxa da corrosão das armaduras, e, quando utilizadas isoladamente, não podem dar certeza do ataque. Mas em conjunto, principalmente em ensaios que indiquem a profundidade de penetração de agentes agressivos, podem oferecer maior segurança na interpretação de resultados de laboratório, e são preciosos parâmetros de auxílio para analisar o mecanismo da corrosão (GONZÁLEZ; MIRANDA; FELIU, 2004; HELENE, 1993). Tanto a resistividade quanto o potencial de corrosão são grandezas que indicam a probabilidade de corrosão e qualificam o estado da armadura (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993).

A técnica da perda de massa, apesar de destrutiva, é a única que permite dar certeza da corrosão das armaduras em determinado período, porém não permite estimar a taxa de corrosão instantânea, possível apenas com técnicas com as quais se calcula a resistência de polarização, $R_p$, ou a resistência de transferência de carga, $R_t$ (esta obtida por meio da técnica de impedância eletroquímica).

Dentre as demais técnicas, algumas caíram em desuso devido ao longo período de monitoramento exigido para se obter resultados, como a técnica do ruído eletroquímico, ou devido ao seu caráter destrutivo, mas que não deixam de ter o seu emprego adequado.

Este Capítulo tratará apenas das técnicas mais conhecidas, estudadas e utilizadas na atualidade para o monitoramento da corrosão em laboratório.

---

[1] Na corrosão seca ocorrem reações químicas puras e diretas entre o metal e o meio corrosivo de forma generalizada (GENTIL, 1982).

## 3.2 Técnica da resistividade elétrica aparente superficial do concreto

A resistividade elétrica (ρ) é a propriedade elétrica que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, isto é, ela é influenciada pelo fluxo de íons que se difundem no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros; é dependente da porosidade, do grau de ionização e altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto. A resistividade, também chamada resistência específica, é a resistência elétrica de um material homogêneo e isotrópico de seção reta e comprimento unitário (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993).

Num mesmo elemento estrutural podem ser encontradas pelo menos duas regiões nas quais os valores da resistividade são distintos: uma superficial, correspondente à região de cobrimento da armadura e que pode sofrer ciclos permanentes de molhagem e secagem, denominada **resistividade elétrica aparente**; e outra interna, em que a umidade é mais estável, denominada **resistividade elétrica volumétrica** (HELENE, 1993).

Por ser uma grandeza de condução elétrica, a resistividade do concreto, em especial a aparente, está ligada à probabilidade de corrosão e está relacionada à corrosão após a despassivação (GONZÁLEZ; MIRANDA; FELIU, 2004; POLDER; PEELEN, 2002).

Os critérios mais aceitos que se avaliem os resultados de resistividade do concreto são os prescritos pelo Comiteé Euro-International du Betón - CEB 192 (1989 apud CASCUDO, 1997) (Quadro 3.1):

**Quadro 3.1: Critérios de avaliação da resistividade elétrica do concreto segundo o CEB 192 (1989 apud CASCUDO, 1997).**

| Resistividade do concreto (kΩ.cm) | Indicação da probabilidade de corrosão |
|---|---|
| > 20 | desprezível |
| 10 a 20 | baixa |
| 5 a 10 | alta |
| < 5 | muito alta |

Outras faixas de resistividade para as mesmas indicações de probabilidade de corrosão foram defendidas por outros autores como González, Miranda e Feliu (2004) e Morris et al. (2002).

Uma das técnicas para determinar a resistividade elétrica aparente do concreto é denominada técnica de quatro pontos ou de Wenner. Ela foi desenvolvida, originalmente, para prospecção geofísica, mas depois começou a ser aplicada também em concretos (ASTM G 57-84:1990 apud CASCUDO 2005; ASTM G 57-84:1990 apud HELENE, 1993; NBR 7117:1981).

A resistividade do concreto pode ser medida diretamente na superfície da estrutura, não sendo necessário um contato com a armadura. Nessa técnica usam-se quatro eletrodos igualmente espaçados em contato com a superfície do concreto, de maneira que a resistividade elétrica é definida como a relação entre o potencial aplicado entre os dois eletrodos internos e a corrente que circula entre os dois eletrodos extremos (CASCUDO, 2005; POLDER; PEELEN, 2002) (Figura 3.1):

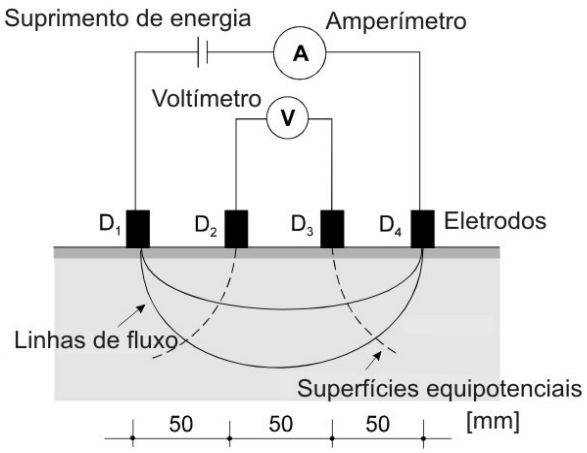



**Figura 3.1: Esquema do método de quatro pontos para medida da resistividade elétrica aparente do concreto (adaptado de GOWERS; MILLARD, 1999; DARBY, 1999 apud MEDEIROS, 2001).**

A resistividade é calculada pela seguinte equação:

$$\rho = 2 \bullet \pi \bullet a \bullet R_{medido} \qquad \textbf{Equação 3.1}$$

em que ρ é a resistividade elétrica do concreto (em Ωm), $R_{medido}$ a resistência elétrica obtida pela medida entre os quatro eletrodos (potencial aplicado dividido pela corrente resultante, em Ω), e *a* é a distância entre os eletrodos.

Como se pode perceber na Equação 3.1 e no esquema da Figura 3.1, os resultados refletem a resistividade elétrica aparente do concreto, mostrando uma profundidade aproximadamente igual ao espaçamento entre eletrodos (MEDEIROS, 2001).

Além de fornecer indícios da probabilidade de corrosão das armaduras, a resistividade elétrica pode indiretamente avaliar o concreto por suas propriedades, como a porosidade, por suas características, como o grau de saturação e agressividade da solução de poro, e mecanismos, como a difusividade de ânions como cloreto, sulfato, entre outros (DEHWAH; MASLEHUDDIN; AUSTIN, 2002; POLDER; PEELEN, 2002; YALQYN; ERGUN, 1996).

A existência de íons faz aumentar a condutividade elétrica do concreto, alterando suas propriedades de condução elétrica e diminuindo a resistividade elétrica (DEHWAH; MASLEHUDDIN; AUSTIN, 2002; YALQYN; ERGUN, 1996). Por exemplo, uma baixa resistividade pode ser atribuída à alta concentração dos íons $Na^+$, $K^+$, $Ca_2^+$, $SO_4^{2-}$ e $OH^-$ na solução dos poros (SHI et al., 1998 apud WEGNER et al., 2005) e também à comunicabilidade da rede de poros (CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A mobilidade de íons relaciona-se ao teor de umidade dos poros, mas se a água dos capilares for removida por secagem, a corrente elétrica pode passar pela água de cristalização do C-S-H, resultando em grande aumento da resistividade (NEVILLE, 1997).

No concreto com baixo teor de umidade, o que limita as reações do mecanismo de corrosão é a resistividade elétrica do concreto, pois há a dificuldade de transporte de íons em baixa umidade que possa completar as reações. Já no concreto saturado ou parcialmente úmido, o que limita o mecanismo de corrosão é a reação catódica por causa da depleção de oxigênio, pois se sabe que o transporte de gases é muito mais lento no concreto saturado que no concreto seco, o que limita a produção de hidroxila no cátodo (Equação 2.6, Capítulo 2) (GONZÁLEZ; LOPEZ; RODRIGUEZ, 1993 apud SAGÜÉS; PECH-CANUL; AL-MANSUR, 2003; LÓPEZ; GONZÁLEZ; ANDRADE, 1993; HELENE, 1993; KOBAYASHI; DHUTTOH, 1991 apud SAGÜÉS; PECH-CANUL; AL-MANSUR, 2003).

## 3.3 Técnica do potencial de corrosão

O potencial de corrosão é a grandeza termodinâmica que indica a probabilidade da existência das reações de corrosão, caracterizando o estado do metal em seu ambiente (CASCUDO, 1997). Se o metal estiver corroendo, ocorre a formação de uma pilha ou célula eletroquímica de corrosão, em que a taxa de oxidação no ânodo é exatamente igual à taxa da reação de redução no cátodo, ou seja, todos os elétrons liberados nas reações anódicas de oxidação são consumidos nas reações catódicas de redução (CASCUDO, 1997; GENTIL, 2003).

Como as pilhas de corrosão ou o local do ânodo são microscópicos, e a colocação de um eletrodo diretamente no sistema aço-concreto implicaria a destruição do concreto e a adição de outro pólo; para medir-se o potencial de corrosão das armaduras de forma não destrutiva utiliza-se um eletrodo de referência colocado na superfície do concreto.

Isso envolve a criação de uma célula, de forma que uma das meias-células é composta pelo eletrodo de referência em um eletrólito apropriado. A outra meia-célula é atribuída à

armadura ou outro metal em monitoramento (eletrodo de trabalho), embutido no ambiente aquoso (BROW, 2002; MIETZ; LSECKE, 1996). O fluxo de corrente corresponde a um campo elétrico com potenciais de corrosão, entre ânodos e cátodos, medidos por um voltímetro de alta impedância. A metodologia e o equipamento para medida são descritos na ASTM C 876:1999, e seu esquema pode ser verificado na Figura 4.18, Capítulo 4.

Como os potenciais não podem ser medidos diretamente na superfície da armadura por causa do cobrimento do concreto, somente potenciais mistos, os equivalentes às linhas de equipotenciais, são obtidos por esse método não destrutivo (BROWN, 2002; GONZÁLEZ; MIRANDA; FELIU, 2004; MIETZ; LSECKE, 1996) (Figura 3.2):

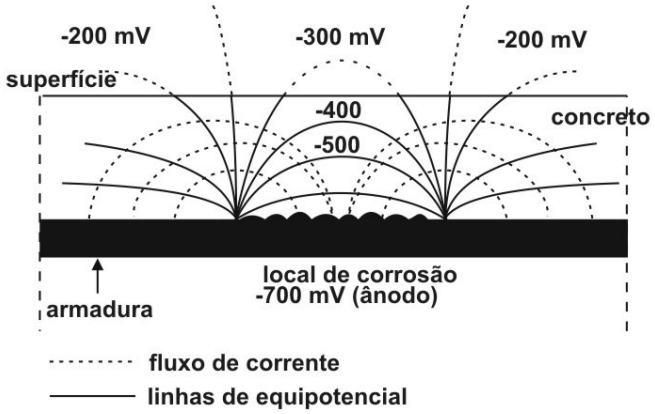



**Figura 3.2: Campo elétrico ao redor do ponto de corrosão (adaptado de MIETZ; LSECKE, 1996).**

Assim, o potencial de corrosão, simbolizado por $E_{corr}$, é definido como a diferença de potencial entre a armadura, que é o eletrodo de trabalho, e um eletrodo de referência (ASTM C 876:1999; BROWN, 2002; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; LIU, 1996; MIETZ; LSECKE, 1996). Portanto, deve-se inferir do potencial de corrosão medido que a armadura poderá apresentar diversos estados – passivo ou de corrosão significativa.

Geralmente, o eletrodo de calomelano saturado (ECS)[2] é o eletrodo de referência escolhido nos ensaios laboratoriais devido à simplicidade de manuseio, baixo custo e estabilidade (BROW, 2002; MIETZ; LSECKE, 1996).

Os primeiros experimentos com essa técnica foram feitos em tabuleiros de pontes de concreto armado nos Estados Unidos, no início da década de 70, e, apesar de algumas desvantagens, essa é uma das técnicas eletroquímicas mais amplamente utilizadas até hoje, no mundo todo,

[2] Consiste de um bastão com mercúrio, coberto por uma pasta de cloreto mercuroso ($Hg_2Cl_2$), imerso num eletrólito contendo íons cloreto, normalmente uma solução saturada de cloreto de potássio (KCl) (CASCUDO, 1997). Uma ponte apropriada no eletrodo de referência, normalmente uma ponta porosa de cerâmica, permite o fluxo de íons, mas impede a mistura entre os dois eletrólitos (BROW, 2002).

devido à sua simplicidade. O significado das leituras de meia-célula e sua relação com o potencial de corrosão foram bem documentados nos trabalhos de Stratfull (1973 apud HELENE, 1993).

As observações do potencial eletroquímico estabeleceram os primeiros critérios de avaliação da corrosão das armaduras. Anos depois, foram editados na ASTM C 876:1999, conforme Quadro 3.2:

**Quadro 3.2: Critérios de avaliação dos resultados das medidas de potenciais de acordo com a ASTM C 876:1999.**

| Potencial de corrosão (mV) relativo ao eletrodo de referência de calomelano saturado | Probabilidade de corrosão (%) |
|---|---|
| mais negativo que -276 | > 90 |
| mais positivo que -126 | < 10 |
| de -126 a -276 | incerta |

Outros autores (GONZÁLEZ; MIRANDA; FELIU, 2004) defenderam outras faixas de potencial para definir a probabilidade de corrosão, mas geralmente os critérios prescritos pela ASTM C 876:1999 são bem aceitos e praticados no mundo todo.

Observa-se o tempo de início da despassivação do aço quando ocorre uma queda brusca no potencial de corrosão, com variações de mais de 100 mV indicando corrosão ativa (ACI 222 R:1996; BROW, 2002; SAKR, 2004).

## 3.4 Técnicas quantitativas para monitoramento da corrosão

Pode-se avaliar a taxa de corrosão das armaduras diretamente por método gravimétrico, o que leva à destruição de parte da estrutura de concreto ou do corpo-de-prova; ou também indiretamente, mediante métodos eletroquímicos que permitem o monitoramento e o cálculo da densidade de corrente de corrosão ou taxa de corrosão, $i_{corr}$, sem a destruição da amostra. Durante qualquer período de monitoramento, podem ser elaboradas equações de predição de propagação da corrosão a partir dos resultados da taxa de corrosão instantânea (JUNG; YOON; SOHN, 2003).

Uma vez obtida a taxa de corrosão, pode-se avaliar o seu grau recorrendo-se aos critérios recomendados por Alonso e Andrade (2001 apud CASCUDO, 2005) ou por González, Miranda e Feliu (2004), dependendo da precisão desejada, e de tratar-se de corpos-de-prova em laboratório ou de medidas em campo.

A técnica gravimétrica consiste em pesar as amostras de barras antes de serem introduzidas no concreto e depois de ele ter sido submetido ao envelhecimento. Os procedimentos do ensaio

para preparar, limpar, e avaliar as amostras estão descritos na ASTM G1 (1988 apud BAUER, 1995). É demorada, pois é necessário aguardar o período de envelhecimento e de corrosão das armaduras, e somente é aplicável para estudos de laboratório. Mas se trata de uma ferramenta muito útil na conferência da precisão das técnicas eletroquímicas não destrutivas que medem quantitativamente a corrente de corrosão ($I_{corr}$) ou a taxa de corrosão ($i_{corr}$) (LIU, 1996).

As técnicas aptas a medir a taxa de corrosão ($i_{corr}$) são: resistência de polarização, ou polarização linear, resistência elétrica do aço, impedância de corrente alternada, ruído eletroquímico, curvas de Tafel, resistência elétrica e a técnica do pulso.

As técnicas da resistência elétrica de polarização, curvas de Tafel, ruído eletroquímico e resistência elétrica do aço são fundamentadas no estado estacionário de resposta à aplicação de algum nível de potencial (potenciostático ou potenciodinâmico) ou corrente (galvanostático ou galvanodinâmico) ao eletrodo de trabalho, enquanto as técnicas de pulso e de impedância são fundamentadas no estado não estacionário de resposta.

As técnicas quantitativas não destrutivas se baseiam na aplicação de uma pequena polarização ao eletrodo de trabalho, de forma a poder-se aplicar a Lei de Ohm e utilizar-se o parâmetro *B*. Stern e Geary (1957 apud LUPING, 2002) foram os que primeiramente apresentaram a relação entre a resistência de polarização, $R_p$ (em kΩ), e a corrente de corrosão, $I_{corr}$. Se não for obtido pela técnica de curvas de Tafel, pode-se adotar o valor de *B* como 13 e 52 mV, dependendo se armadura está em estado ativo ou passivo de corrosão, respectivamente (GONZALEZ et al., 1985 apud CASCUDO, 1997), e assim ser encontrado o valor de $I_{corr}$.

A técnica do pulso, ainda sem muitos trabalhos nacionais disponíveis, estuda a resposta potencial-corrente em estado não estacionário, transitório, a uma pequena perturbação potenciostática ou galvanostática no domínio do tempo (ELSENER et al., 1997; ELSENER, 2005; LUPING, 2002). Tal como na técnica de polarização linear, a corrente ou potencial aplicados devem ser pequenos o bastante para assegurar uma resposta na faixa de polarização linear (ELSENER et al., 1997; LUPING, 2002; MIETZ; LSECKE, 1996).

Por não fazer parte do escopo deste estudo, todas essas técnicas quantitativas não destrutivas poderão ser consultadas em diversos trabalhos já muito bem documentados e que estão disponíveis na literatura pertinente, como nos de Al-Tayyb e Khan (1988), Cascudo (1997), Elsener et al. (1997), Elsener (2005), Luping (2002) e Mancio, Zhang e Monteiro (2004).

A corrente de corrosão ($I_{corr}$) determinada por técnicas eletroquímicas não destrutivas pode ser convertida em massa (m) pela Equação da Lei de Faraday[3] (GENTIL, 2003; JUNG; YOON; SOHN, 2003; LUPING, 2002) e ser comparada à perda de massa real das armaduras determinada pela técnica gravimétrica:

$$m = \frac{M \bullet I_{corr} \bullet t}{z \bullet F}$$ **Equação 3.2**

na qual $t$ é o tempo da corrosão, M é a massa atômica do metal (M = 56 g/mol para o Fe), $z$ é a valência do metal ($z$ = 2 para o Fe), F é a constante de Faraday (F = 96 480 C/mol ou $A^{\cdot s}$/mol para o Fe) e $I_{corr}$ é a corrente de corrosão.

Também se pode utilizar a Equação 3.2 para se estimar a taxa gravimétrica de corrosão durante o tempo considerado de corrosão significativa, mas deve-se considerar a área de metal efetivamente corroída por causa do significado da Lei de Faraday.

## 3.5 Considerações finais

Cada técnica é adequada ou adaptada para cada situação específica. Vários parâmetros devem ser analisados antes de se projetar um método de pesquisa ou monitoramento da corrosão: o local onde será aplicada a técnica, se em laboratório ou em campo; a densidade e a existência de adições do concreto; o tipo de armadura, se ativa ou passiva; o prazo disponível para a realização da pesquisa; a precisão almejada dos resultados; os equipamentos disponíveis, técnicas e ensaios auxiliares; e outros fatores intervenientes na escolha.

O estudo do potencial de corrosão e da resistividade elétrica do concreto em laboratório possibilita a homogeneidade das condições de armazenagem e exposição ambiental de corpos-de-prova, algo que aumenta o controle e a segurança na comparação de misturas. Além disso, possibilita a obtenção de um estado de saturação ideal, em todo o grupo de corpos-de-prova, que dê condições adequadas para a medida do potencial de corrosão e da resistividade elétrica do concreto.

Assim, as técnicas resistividade elétrica do concreto e potencial de corrosão, com as características da porosidade do concreto e medidas de profundidade de carbonatação e de penetração de íons agressivos no concreto, formam uma bateria de ensaios que permitem qualificar a corrosão num determinado período de exposição.

[3] Michael Faraday (1791 – 1867) físico, químico e experimentalista inglês, foi um dos cientistas mais influentes de todos os tempos e deixou contribuições aos fenômenos da eletricidade e do magnetismo e à química.

# CAPÍTULO 4 – PROJETO EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

## 4.1 Introdução

O estudo da corrosão das armaduras, nesta dissertação, teve como objetivo comparar a capacidade de proteção do concreto de cobrimento com diferentes classes de resistência e teores de escória de alto-forno, considerando-se uma espessura de cobrimento de 20 mm, especificada pela NB 1/1978, e outra de 30 mm, especificada pela norma NBR 6118:2003, válida a partir de 30 de março de 2004. Para atingir esse objetivo, seguiu-se o fluxograma das atividades experimentais apresentado na Figura 4.1:

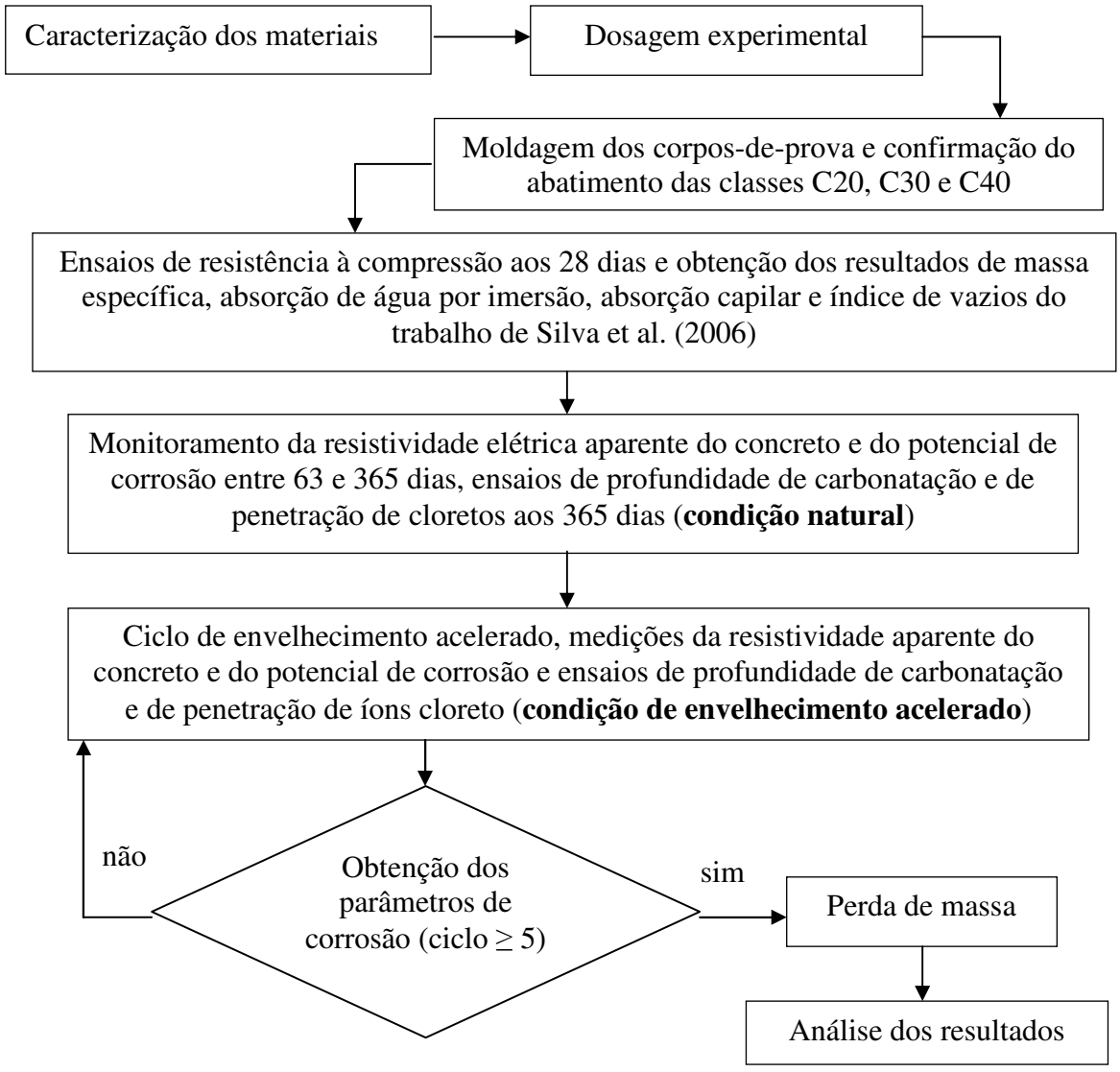



**Figura 4.1: Fluxograma das atividades experimentais.**

Neste trabalho estudaram-se os efeitos da espessura de cobrimento, da resistência à compressão, do teor de escória de alto-forno e da relação água/material cimentício sobre os valores obtidos para índice de vazios, absorção de água por imersão, absorção capilar, profundidade de carbonatação, profundidade de penetração de cloretos, resistividade elétrica aparente do concreto e potencial de corrosão.

As condições de ensaio para as medidas de resistividade, potencial de corrosão e profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos foram duas: condição natural, de forma que os corpos-de-prova permaneceram em ambiente de laboratório, sem controle de temperatura e umidade; e a condição de envelhecimento acelerado, de acordo com a qual os corpos-de-prova foram envelhecidos aceleradamente, em condições controladas por meio da câmara de névoa salina e da câmara de carbonatação.

No intervalo entre a saída da câmara de névoa salina e a entrada na câmara de carbonatação, os corpos-de-prova passaram pela estufa a 50°C a fim de que deles fosse retirado o excesso de umidade, para que fossem melhoradas a difusão do $CO_2$ e as reações de carbonatação. Isto é, procurou-se aproximar a umidade de equilíbrio do concreto à umidade relativa ótima entre 60% e 70% para maior carbonatação (AL-KADHIMI et al., 1995; COELHO, 2002).

## 4.2 Projeto experimental

### 4.2.1 Fatores e variáveis

A classe de resistência, o tipo e o teor de material cimentício e a relação água/material cimentício definem a porosidade do concreto de cobrimento. Os Quadros 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram os fatores e as variáveis selecionados para avaliar a capacidade de proteção de cobrimento de concreto com diferentes teores de escória de alto-forno, na condição natural e de envelhecimento acelerado.

A classe C20 ainda pode ser usada nas especificações atuais para estruturas expostas a ambiente rural ou submersas. Em ambiente urbano também, desde que os elementos estruturais estejam em ambientes internos secos, embora não esteja sendo praticada nos edifícios da Grande Vitória (ES). Para ambas as classificações de ambiente, incluindo as notas da Tabela 6.1 da NBR 6118:2003, a agressividade ambiental é considerada fraca (classe I) e o risco de deterioração insignificante. Amparada pela NB 1:1978, há bem pouco tempo a classe C20 era a mais utilizada em Vitória.

A escolha da classe C30 neste estudo se justifica por ser a classe de resistência habitualmente

especificada nos projetos estruturais para edificações na Grande Vitória, cuja agressividade ambiental é forte (classe III), marinha e industrial, em atendimento às especificações da NBR 6118:2003.

**Quadro 4.1: Fatores e variáveis da dosagem do concreto para confirmação da resistência à compressão**

| Fatores | Variáveis |
|---|---|
| Material cimentício<br>Relação água/material cimentício<br>Resistência característica à compressão | Resistência à compressão axial aos 28 dias. |

**Quadro 4.2: Fatores e variáveis para análise das propriedades do concreto**

| Fatores | Variáveis |
|---|---|
| Material cimentício<br>Relação água/material cimentício<br>Resistência característica à compressão | Abatimento do tronco de cone;<br>Resistência à compressão axial aos 28 dias;<br>Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios aos 28 e 63 dias;<br>Absorção por capilaridade aos 28 e 63 dias. |

**Quadro 4.3: Fatores e variáveis para análise da resistência à carbonatação e à penetração de cloretos na condição natural**

| Fatores | Variáveis |
|---|---|
| Material cimentício<br>Relação água/material cimentício<br>Resistência característica à compressão | Profundidade de carbonatação aos 365 dias de idade;<br>Profundidade de penetração de $Cl^-$ aos 365 dias de idade;<br>Resistividade elétrica aparente do concreto (ρ) a partir da idade de 63 dias a cada 15 dias até completar 365 dias;<br>Potencial de corrosão ($E_{corr}$) medido a partir da idade de 63 dias a cada 15 dias até completar 365 dias. |

**Quadro 4.4: Fatores e variáveis para análise da resistência à carbonatação e à penetração de cloretos, e resistividade do concreto na condição de envelhecimento acelerado**

| Fatores | Variáveis |
|---|---|
| Material cimentício<br>Relação água/material cimentício<br>Resistência característica à compressão<br>Número de ciclos | Profundidade de carbonatação (10% de $CO_2$, U.R. entre 60% e 70%, e (26 ± 2)°C);<br>Profundidade de penetração de $Cl^-$ (NaCl a 5% e (28 ± 2)°C);<br>Resistividade elétrica aparente do concreto (ρ). |

**Quadro 4.5: Fatores e variáveis para análise da resistência à carbonatação e à penetração de cloretos, e potencial de corrosão na condição de envelhecimento acelerado**

| Fatores | Variáveis |
|---|---|
| Material cimentício<br>Relação água/material cimentício<br>Resistência característica à compressão<br>Cobrimento<br>Número de ciclos | Profundidade de carbonatação (10% de $CO_2$, U.R. entre 60% e 70%, e (26 ± 2)°C);<br>Profundidade de penetração de $Cl^-$ (NaCl a 5% e (28 ± 2)°C);<br>Potencial de corrosão ($E_{corr}$). |

Utilizou-se a classe C40 especificada pela NBR 6118:2003 em estruturas de concreto armado ou protendido sujeitas a uma agressividade ambiental muito forte (classe IV), classificada como ambiente industrial ou com respingos de maré, cujo risco de deterioração é elevado,

característico de estruturas de concreto armado ou protendido expostas diretamente à névoa salina e ao ar poluído da Grande Vitória. Essa classe também foi analisada por outros autores, como Coelho (2002) e Bourguignon (2004), em estudos anteriores, cujos resultados podem complementar os resultados e as discussões deste trabalho.

As classes C20 e C40 foram consideradas, também, para comparação com a classe C30, especificada para o ambiente de agressividade do tipo III, objeto deste estudo.

Considerando-se os elementos viga e pilar de concreto armado, o Quadro 4.6, a seguir, resume as classes de concreto, a relação água/cimento e a espessura de cobrimento nominal para obras correntes, permitidas na NBR 6118:2003, em função da classe de agressividade ambiental.

**Quadro 4.6: Diretrizes da NBR 6118:2003 para os elementos viga e pilar de concreto armado.**

| Concreto | NBR 6118:2003 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Classe de agressividade ambiental | | | |
| | I | II | III | IV |
| Classe de concreto | ≥ C20 | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C40 |
| Relação água/cimento | ≤ 0,65 | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,45 |
| Cobrimento nominal (mm) | 25 | 30 | 40* | 50 |

* Foi considerado o cobrimento mínimo especificado pela NBR 6118:2003 para este estudo.

A relação água/material cimentício foi determinada com base nos diagramas das curvas de dosagem de concreto elaborados por Bourguignon (2004), de acordo com o descrito na seção 4.4 deste Capítulo. Com base nos diagramas de dosagem, a relação água/material cimentício variou de 0,39 a 0,75. Essa ampla variação possibilitou boas comparações nos resultados.

Neste estudo, considerou-se o cobrimento mínimo de 30 mm, que corresponde ao cobrimento nominal de 40 mm, descontando-se a tolerância de execução de 10 mm prescrita pela NBR 6118:2003 para ambiente de agressividade do tipo III de obras correntes. A observância do cobrimento mínimo neste estudo favorece a segurança, pois as frentes de carbonatação e de penetração de cloretos chegam primeiramente à espessura de cobrimento mínima, na qual poderia iniciar-se a corrosão induzida. Também foram consideradas a relação água/cimento e a classe do concreto prescritas pela NBR 6118:2003 para atendimento à agressividade ambiental do tipo III.

Já a NB 1:1978 especifica cobrimento mínimo de 20 mm para concreto revestido com argamassa de espessura mínima de 1 cm em vigas, pilares e arcos ao ar livre. A falta de classificação da agressividade dos ambientes nessa norma poderia induzir a uma especificação insegura da espessura de cobrimento. A NB 1:1978 não especifica cobrimento nominal,

apenas cobrimento mínimo.

O espaçamento mínimo entre as armaduras nos corpos-de-prova prismáticos foi dimensionado de acordo com as NBR 6118:2003 e NB 1:1978, em função do diâmetro da barra de aço e da dimensão máxima característica do agregado utilizado. Essas normas especificam que o espaço livre entre duas barras não deve ser menor que 2 cm, menor que o diâmetro da barra, nem menor que 1,2 vezes a dimensão máxima do agregado, nas camadas horizontais, e 0,5 vezes a mesma dimensão no plano vertical.

Na escolha dos materiais cimentícios pretendeu-se verificar a influência de diferentes teores de escória no atendimento à dosagem. O teor de escória do cimento CP II-E-32 foi de 30% em relação à massa total de cimento, e o do CP III-32-RS foi de 66%, conforme ensaios de caracterização descritos na seção 4.3.1.

Considerando-se que o teor de escória nos cimentos, de acordo com a literatura pesquisada, pode chegar a 95% (BS 4246:1974), este estudo verifica a capacidade de proteção do concreto de cobrimento quanto à corrosão das armaduras empregando os cimentos nacionais, com seus teores normalizados, e do concreto produzido com a adição de escória de alto-forno diretamente na betoneira, correspondendo a 50% de cimento Portland CP III-32-RS e 50% de escória – o que resulta num teor total de 83% de escória de alto-forno sobre a massa total de material cimentício.

À medida que se tem um aumento no número de ciclos, maiores são as influências nas variáveis estudadas: resistividade elétrica do concreto, potencial de corrosão e profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos. A condição dos ensaios também influencia, uma vez que a condição natural em ambiente interno seco e protegido de laboratório equivale ao interior de edifícios, e a condição de envelhecimento acelerado tenta simular o ataque de névoa salina do ambiente costeiro marinho.

Devido aos resultados obtidos das diferenças estatísticas entre os materiais cimentícios para a mesma classe de resistência, as análises deste trabalho consideraram a classe de resistência calculada a partir dos desvios-padrão reais, com base nos resultados reais da resistência à compressão aos 28 dias, utilizando a equação da NBR 12655:2006; isto é, fez-se um cálculo inverso para verificar-se a classe de resistência.

As propriedades físicas do concreto avaliadas até a idade de 63 dias no Relatório "Concreto de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno: estratégia para consolidar e

ampliar o mercado da escória de alto-forno", de autoria de Silva et al. (2006b)[1], como massa específica, índice de vazios, absorção de água por imersão e absorção por capilaridade, ajudaram a explicar as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos.

Aceitando-se que a massa específica é inversamente proporcional ao volume de poros, os fatores que afetam a porosidade da matriz da pasta de cimento e da zona de transição são importantes (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A massa específica do concreto é sensível ao consumo de material cimentício (C) e ao volume de pasta, uma vez que a massa específica do cimento pode ser maior que os demais constituintes (BAUER, 1995).

Estudos mostraram que a profundidade de carbonatação depois de 1,5 anos de exposição, tanto em laboratório quanto em campo, ficou relacionada à absorção de água por imersão, depois de 4 horas de umedecimento (PARROTT, 1992 apud BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001). Além de apresentar relação com a carbonatação, a absorção de água por imersão dá informação da porosidade efetiva aberta e do volume de poros comunicáveis (FIGUEIREDO; NEPOMUCENO, 2004). Por comparação, o índice de vazios aponta a existência de poros não comunicáveis, pois seu valor é calculado pela relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total do concreto.

Na prática, a maioria das edificações de concreto armado permanece a maior parte de suas vidas úteis em estado não saturado (CAMARINI, 1999). A absorção capilar ocorre nesse estado, além de ser o mais comum e intenso mecanismo de transporte de agentes agressivos (HELENE, 1993). Trabalho anterior verificou que o teor de cloretos em certas profundidades é superior ao teor calculado por coeficientes de difusão; fato que evidencia a significância da absorção capilar nos ensaios cíclicos (PAGE et al., 1991 apud BAUER, 1995). Por esses motivos, a absorção capilar também é escolhida como variável deste trabalho.

Por sua vez, as propriedades resistência do concreto à carbonatação e à penetração de cloretos em ação conjunta, bem como resistividade elétrica do concreto e potencial de corrosão das armaduras resultantes desse ataque, relacionam-se à durabilidade das estruturas de concreto armado e são preciosos parâmetros para especificar-se a vida útil de projeto.

A profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos influencia na capacidade de proteção do concreto de cobrimento quanto à qualidade e espessura, pois, quanto mais densa for a matriz de cimentícios, mais difícil será a penetração de líquidos, de $CO_2$ e $Cl^-$, e menores as profundidades das frentes de carbonatação e de cloretos.

[1] A partir desta nota, a referência ao Relatório passará a ser Relatório de Silva et al. (2006b).

### 4.2.2 Tipos e número de corpos-de-prova

Nesta pesquisa utilizaram-se dois tipos de corpos-de-prova: prismáticos e cilíndricos. Estes foram destinados aos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, profundidade de carbonatação, profundidade de penetração de cloretos e resistividade elétrica do concreto, e aqueles se destinaram aos ensaios de potencial de corrosão.

Para que fosse definido o número de corpos-de-prova para as propriedades abatimento do tronco de cone, resistência à compressão axial aos 28 dias, massa específica, absorção de água por imersão, índice de vazios e absorção por capilaridade, adotaram-se as recomendações de normas conforme Quadro 4.7.

**Quadro 4.7: Número de corpos-de-prova para avaliação das propriedades físicas e mecânicas e respectivas normas.**

| Ensaio | Número de corpos-de-prova/leituras | | Norma |
|---|---|---|---|
| | Por mistura | Total | |
| Abatimento do tronco de cone | 1 | 1 | NBR NM 67:1998 |
| Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade | 4 | 36 | NBR 5739:1994 |
| Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios. | 4 por idade | 36 | NBR 9778:1987 |
| Absorção por capilaridade | 8 | 64 | NBR 9779:1995 |

Para definir-se o número de corpos-de-prova das medidas de profundidade de carbonatação, tomou-se como base o estudo estatístico dos trabalhos de Bourguignon (2004) e de Silva et al. (2006b), a partir dos quais se verificou que o tamanho da amostra atendeu aos objetivos propostos. Para tal verificação, utilizou-se a Equação 4.1 (COCHRAN, 1997).

**Equação 4.1**

$$n = \frac{z_{1-\alpha/2}^2 s^2}{d^2}$$

na qual:
n – tamanho da amostra;
$z_{1-\alpha/2}$ – abscissa padrão da curva normal e igual a 1,96 para $\alpha$=0,05;
s – desvio-padrão;
d – erro admitido.

Com base nesses resultados, adotou-se para análise da profundidade de penetração de cloretos o mesmo número de corpos-de-prova utilizado no trabalho de Bourguignon (2004) para análise da profundidade de carbonatação.

Os corpos-de-prova cilíndricos de concreto destinados às medidas de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos foram divididos em quatro partes, conforme detalhado na seção 4.4.4.1; assim, cada um correspondeu a 4 amostras.

O Quadro 4.8 apresenta as dimensões e a destinação dos corpos-de-prova para o estudo da capacidade de proteção do cobrimento à corrosão.

**Quadro 4.8: Dimensões e destinação dos corpos-de-prova.**

| Formato | Dimensões | Destinação |
|---|---|---|
| prismático | 70x150x150 mm<br>90x150x150 mm | Monitoramento do potencial de corrosão ($E_{corr}$) |
| cilíndrico | $\phi$ = 100 mm<br>h = 200 mm | Acompanhamento da profundidade de carbonatação<br>Acompanhamento da profundidade de penetração de cloretos<br>Monitoramento da resistividade do concreto |

Quanto à resistividade elétrica e ao potencial de corrosão, encontrou-se na literatura pesquisada um número de corpos-de-prova ou de determinações igual a quatro para cada traço de concreto estudado (COUTO, 2003; FERREIRA, 2003). Assim, para este trabalho experimental, adotou-se o mesmo número de corpos-de-prova utilizado naqueles trabalhos.

Cada corpo-de-prova prismático de concreto destinado à medida do potencial de corrosão possuiu em seu interior duas barras de armadura, de forma que cada um correspondeu a duas amostras (Quadro 4.9, Quadro 4.10 e Figura 4.2-b). Os demais corpos-de-prova não foram divididos em partes; portanto o número de amostras correspondeu ao de corpos-de-prova.

A Figura 4.2-a mostra os corpos-de-prova cilíndricos para avaliação da resistividade elétrica aparente do concreto e da profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos; e a Figura 4.2-b mostra os corpos-de-prova prismáticos com duas amostras de barra de armadura embutidas em cada um, para avaliação do potencial de corrosão.

a) corpos-de-prova cilíndricos

b) corpos-de-prova prismáticos

**Figura 4.2: Corpos-de-prova para o estudo da corrosão das armaduras: a) medida da resistividade elétrica aparente do concreto; b) medida do potencial de corrosão.**

Os Quadros 4.9 e 4.10 apresentam as propriedades avaliadas, ensaios, número de corpos-de-prova, número de amostras e número de leituras realizadas, na condição natural e na condição de envelhecimento acelerado, respectivamente.

**Quadro 4.9: Quantidade de corpos-de-prova e de leituras para avaliação da profundidade de carbonatação e de penetração de $Cl^-$ e da corrosão das armaduras na condição natural.**

| Ensaio | Quantidade de datas de leitura | nº por traço | | | nº de leituras | | total do experimento | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | de C.P. | de amostra por data | de amostra total | por amostra | por traço | de C.P. | de leituras |
| Potencial de corrosão | 29 | 4 | 8 | 232 | 1 | 232 | 36 | 2088 |
| Resistividade elétrica aparente do concreto | 29 | 4 | 4 | 116 | 1 | 116 | 36 | 1044 |
| Profundidade de carbonatação | 1 | 1 | 4 | 4 | 8 | 32 | 9 | 288 |
| Profundidade de penetração de cloretos | 1 | 1 | 4 | 4 | 8 | 32 | 9 | 288 |

**Quadro 4.10: Quantidade de corpos-de-prova e de leituras para avaliação da profundidade de carbonatação e de penetração de $Cl^-$ e da corrosão das armaduras na condição de envelhecimento acelerado.**

| Ensaio | Quantidade de datas de leitura | nº por traço | | | nº de leituras | | total do experimento | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | de C.P. | de amostra por data | de amostra total | por amostra | por traço | de C.P. | de amostra por data |
| Potencial de corrosão | 5 | 4 | 8 | 40 | 1 | 40 | 36[1] | 360 |
| Resistividade elétrica aparente do concreto | 5 | 4 | 4 | 20 | 1 | 20 | 36[1] | 180 |
| Profundidade de carbonatação | 5 | 6 | 4 | 20 | 8 | 160 | 52[2] | 1440 |
| Profundidade de penetração de cloretos | 5 | 6 | 4 | 20 | 8 | 160 | 52[2] | 1440 |

1 - Número total de corpos-de-prova de todo o experimento (natural e envelhecimento acelerado)
2 - Esta quantidade somada à quantidade da condição natural resulta no total de corpos-de-prova de todo o experimento, ou seja, 61 corpos-de-prova.
Obs.: A última e única leitura de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos na condição natural é também a 1ª na condição de envelhecimento acelerado.

## 4.3 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo – cimentos Portland nacionais com escória de alto-forno (CP II-E-32 e CP III-32-RS), escória granulada de alto-forno moída, areia e pedras britadas – foram caracterizados em estudos anteriores do Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES); nesta dissertação, apresentam-se apenas os resultados.

### 4.3.1 Materiais cimentícios

Os materiais cimentícios caracterizados foram: o cimento Portland composto com escória CP II-E-32, com 30% de escória de alto-forno (NBR 11578:1991), o cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS, com 66% de escória de alto-forno (NBR 5735:1991), e a mistura, em massa, de 50% de cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS, com 50% de escória granulada de alto-forno moída, correspondente a um teor total de 83% de escória de alto-forno sobre a massa total de material cimentício.

#### 4.3.1.1 Cimento Portland composto CP II-E-32 e cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS

Esses cimentos foram adquiridos na região da Grande Vitória, e suas composições químicas foram determinadas por espectrometria de raios X e foram ensaiados na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Já os ensaios para a determinação da finura (resíduo na peneira de 0,075 mm – NBR 11579:1991), da quantidade de água necessária para obter-se a pasta de consistência normal (NBR NM 43:2003), do tempo de início e fim de pega (NBR NM 65:2003), dos ensaios para determinação da expansibilidade a quente (NBR 11582:1991), da massa específica (NBR NM 23:2001), da superfície específica Blaine (NBR NM 76:1998) e da resistência à compressão axial (NBR 7215:1996) foram executados no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) da UFES.

O teor de escória determinado por dissolução seletiva por ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA), ensaiado na ABCP, foi de 30% para o cimento CP II-E-32, e de 66% para o CP III-32-RS em relação à massa do cimento.

Os resultados das análises químicas dos cimentos Portland CP II-E-32, com 30% de escória de alto-forno, e CP III-32-RS, com 66% de escória de alto-forno, apresentam-se nos Quadros 4.11 e 4.12; e as características físicas e mecânicas, no Quadro 4.13.

**Quadro 4.11: Análise química do cimento Portland composto CP II-E-32 (30% de escória de alto-forno) determinada por espectroscopia de raios X (SILVA et al., 2006b).**

| Composição química | | Normas | % em massa | Limites da NBR 11578:1991 |
|---|---|---|---|---|
| Perda ao fogo | PF | NM 18:2004 | 5,4 | < 6,5% |
| Dióxido de silício | $SiO_2$ | NBR NM 14:2004 | 22,11 | *** |
| Óxido de alumínio | $Al_2O_3$ | NBR NM 14:2004 | 6,09 | *** |
| Óxido de ferro | $Fe_2O_3$ | NBR NM 14:2004 | 3,52 | *** |
| Óxido de cálcio total | CaO | NBR NM 14:2004 | 54,16 | *** |
| Óxido de magnésio | MgO | NBR NM 14:2004 | 5,95 | < 6,5% |
| Anidrido sulfúrico | $SO_3$ | NBR NM 16:2004 | 1,58 | < 4,0% |
| Óxido de sódio | $Na_2O$ | NM 17:2004 | 0,27 | *** |
| Óxido de potássio | $K_2O$ | NM 17:2004 | 0,32 | *** |
| Enxofre | S | NBR NM 19:2004 | 0,31 | *** |
| Anidrido Carbônico | $CO_2$ | NBR NM 20:2004 | 3,76 | < 5,0% |
| Resíduo insolúvel | RI | NBR NM 15:2004 | 1,39 | < 2,5% |
| Óxido de Cálcio livre | CaO | NBR NM 12:2004 | 3,61 | *** |
| Óxido de titânio | $TiO_2$ | PO-GT-6021 | 0,31 | *** |
| Equivalente alcalino em $Na_2O$ | ($0,658xK_2O\%$ + $Na_2O\%$) | - | 0,48 | *** |

**Quadro 4.12: Análise química do cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS (66% de escória de alto-forno) determinada por espectroscopia de raios X (SILVA et al., 2006b).**

| Composição química | | Normas | % em massa | Limites da NBR 5735:1991 |
|---|---|---|---|---|
| Perda ao fogo | PF | NM 18:2004 | 0,32 | < 4,5% |
| Dióxido de silício total | $SiO_2$ | NBR NM 14:2004 | 29,88 | *** |
| Óxido de alumínio | $Al_2O_3$ | NBR NM 14:2004 | 9,92 | *** |
| Óxido de ferro | $Fe_2O_3$ | NBR NM 14:2004 | 1,43 | *** |
| Óxido de cálcio total | CaO | NBR NM 14:2004 | 50,95 | *** |
| Óxido de magnésio | MgO | NBR NM 14:2004 | 5,78 | *** |
| Anidrido sulfúrico | $SO_3$ | NBR NM 16:2004 | 0,69 | < 4,0% |
| Óxido de sódio | $Na_2O$ | NM 17:2004 | 0,09 | *** |
| Óxido de potássio | $K_2O$ | NM 17:2004 | 0,32 | *** |
| Enxofre | S | NBR NM 19:2004 | 0,62 | < 1,0% |
| Anidrido Carbônico | $CO_2$ | NBR NM 20:2004 | 0,15 | < 3,0% |
| Resíduo insolúvel | RI | NBR NM 15:2004 | 0,35 | < 1,5% |
| Óxido de Cálcio livre | CaO | NBR NM 12:2004 | 2,30 | *** |
| Óxido de titânio | $TiO_2$ | PO-GT-6021 | 0,38 | *** |
| Equivalente alcalino em $Na_2O$ | ($0,658x K_2O\%$ + $Na_2O\%$) | - | 0,33 | *** |

**Quadro 4.13: Características físicas e químicas dos cimentos Portland composto CP II-E-32 (30% de escória) e de alto-forno CP III-32-RS (66% de escória) (SILVA et al., 2006b).**

| Característica | CP II-E-32 | CP III-32-RS |
|---|---|---|
| Finura peneira nº 200 (75 μm) (%) | 0,2 | 0,6 |
| Água para pasta de consistência normal (g) | 149 | 152 |
| Início de pega | 2h50min | 2h80min |
| Fim de pega | 4h50min | 4h30min |
| Expansibilidade a quente (mm) | 1 | 0 |
| Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) | 36,5 | 49,5 |
| Superfície específica Blaine ($cm^2/g$) | 4140 | 4220 |
| Massa específica ($g/cm^3$) | 2,99 | 2,97 |

### 4.3.1.2 Mistura de escória granulada de alto-forno moída e cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS

Utilizou-se a proporção de 1:1, em massa, para a mistura de escória granulada de alto-forno moída e o cimento CP III-32-RS, resultando num teor total de escória de 83% em massa de material cimentício.

Os ensaios de caracterização da mistura realizados pelo LEMAC foram os seguintes: finura por meio da peneira 75 μm (NBR 11579:1991); quantidade de água necessária para se obter a pasta de consistência normal (NBR NM 43:2003); tempo de início e fim de pega (NBR NM 65:2003); expansibilidade a quente (NBR 11582:1991); massa específica (NBR NM 23:2001); superfície específica Blaine (NBR NM 76:1998); e resistência à compressão axial (NBR 7215:1996). Os resultados dos ensaios estão representados no Quadro 4.14.

**Quadro 4.14: Características físicas da mistura de 50% de escória granulada de alto-forno moída e 50% de cimento Portland CP III-32-RS totalizando 83% em massa de cimento (SILVA et al., 2006b).**

| Finura peneira #200 (%) | Água para pasta consistência normal (g) | Pega | | Exp. a quente (mm) | Resistência à compressão (média e desvio-padrão em MPa) | | | Sup. espec. Blaine | Massa específica (g/cm³) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | inicio | fim | | 3 dias | 7 dias | 28 dias | | |
| 0,4 | 159 | 2h05min | 4h50min | 1 | 14,2 (1,9) | 23,4 (3,4) | 42,8 (3,5) | 4150 | 2,94 |

### 4.3.1.3 Escória granulada de alto-forno moída

A escória granulada de alto-forno moída utilizada na produção dos concretos proveio de uma siderúrgica da Grande Vitória, obtida por resfriamento brusco e moída em moinho vertical de rolos, e foi a mesma utilizada nos trabalhos de Coelho (2002) e Bourguignon (2004). Suas características físicas, análise química e microestrutura foram realizadas nos laboratórios LEMAC, da ABCP, e no laboratório do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, respectivamente.

A composição química da escória, seu grau de vitrificação, seus índices de refração e de basicidade, superfície específica Blaine (NBR NM 76:1998) e massa específica (NBR NM 23:2001) podem ser vistos nos Quadros 4.15 e 4.16.

**Quadro 4.15: Análise química da escória granulada de alto-forno moída.**

| Composição química | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | S | $Na_2O$ | $K_2O$ | $TiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Teor (% em massa) | 33,02 | 12,64 | 0,68 | 42,83 | 7,71 | 1,06 | 0,17 | 0,31 | 0,6 |

**Quadro 4.16: Características físicas da escória granulada de alto-forno moída.**

| Características físicas da escória | valores |
|---|---|
| Grau de vitrificação (%) por microscopia de luz transmitida | 96 |
| Índice de refração por microscopia de luz transmitida | 1,65 |
| Natureza | básica |
| Superfície específica Blaine (NBR NM 76:1998) (cm²/g) | 4100 |
| Finura por meio da peneira nº 325 (NBR 9202:1985) | 0,4% |
| Massa específica (NBR NM 23:2001) (g/cm³) | 2,906 |

O grau de vitrificação da escória de alto-forno deste estudo foi da ordem de 96%, o que a classificou como de boa qualidade, por possuir solubilidade suficiente para sua atividade hidráulica (JOHN, 1995).

Os resultados do ensaio de distribuição granulométrica a laser da escória granulada de alto-forno são mostrados na Figura 4.3, e a difração de raios X na Figura 4.4.

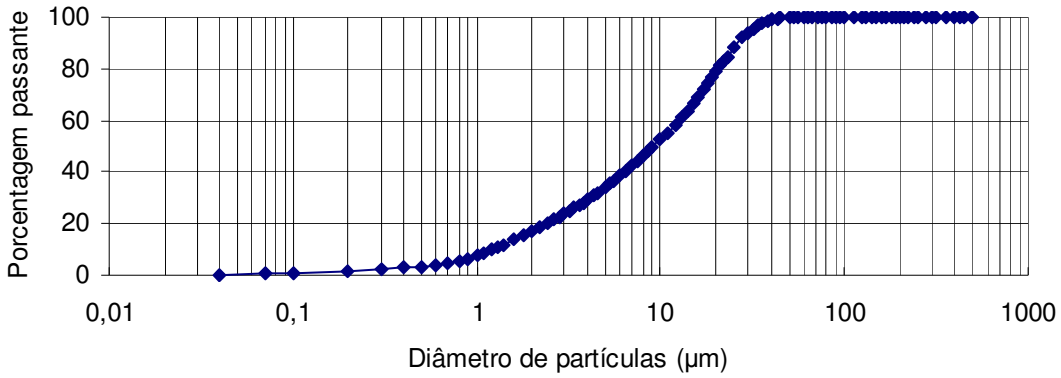



**Figura 4.3: Curva granulométrica da escória granulada de alto-forno ensaiada na ABCP (BOURGUIGNON, 2004).**

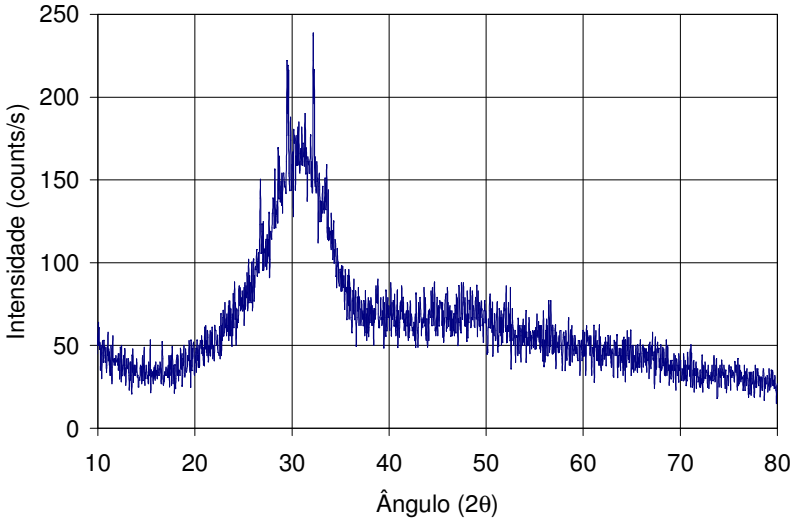



**Figura 4.4: Difração de raios X da escória granulada de alto-forno moída ensaiada na ABCP (BOURGUIGNON, 2004).**

Na difração de raios X (Figura 4.4), observa-se uma amostra com halo amorfo bem formado e três picos que representam os constituintes cristalinos Quartzo – $SiO_2$, Calcita – $CaCO_3$ e Silicato de Cálcio – CaxSiyOz (BOURGUIGNON, 2004).

### 4.3.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na dosagem do concreto foi a areia quartzosa de depósitos naturais da região da Grande Vitória, que atendeu às especificações da NBR 7211:2005. O Quadro 4.17 mostra a caracterização física da areia, e a Figura 4.5 a curva granulométrica da areia com as curvas de limites inferiores e superiores da zona utilizável.

**Quadro 4.17: Caracterização física da areia.**

| Características físicas da areia | Normas | Amostra | Limites máximos da NBR 7211:2005 |
|---|---|---|---|
| Dimensão máxima característica (mm) | NBR NM 248:2003 | 2,40 | - |
| Módulo de Finura | NBR NM 248:2003 | 2,56 | - |
| Massa específica (g/cm³) | NBR NM 52:2003 | 2,65 | - |
| Massa unitária no estado solto (g/cm³) | NBR 7251:1982 | 1,43 | - |
| Teor de materiais pulverulentos (%) | NBR NM 46:2003 | 0,14 | 3,0 a 5,0 |
| Impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo | NM 49:2001 | cor clara | cor clara |
| Teor de argila e partículas friáveis (%) | NM 44:1995 | 0,00 | 3,0 |

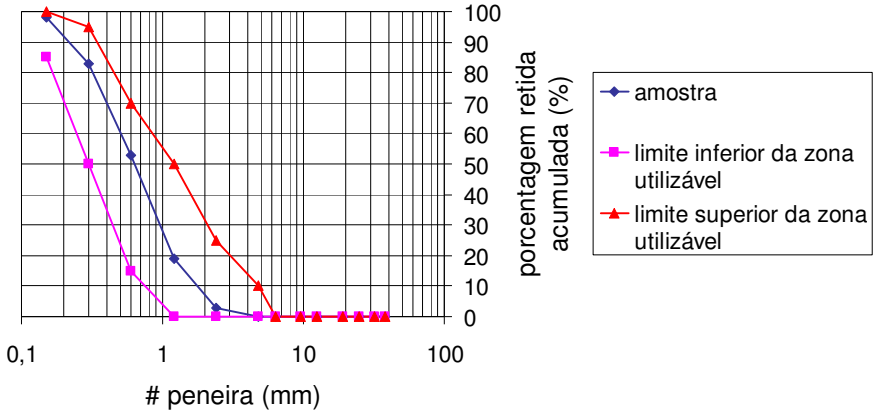



**Figura 4.5: Curva granulométrica da areia.**

### 4.3.3 Agregado graúdo

Os agregados graúdos utilizados na dosagem do concreto foram as pedras britadas cujas zonas granulométricas foram de 4,75/12,5 mm (antiga brita 0) e de 9,5/25 mm (antiga brita 1) provenientes da região da Grande Vitória e de natureza gnáissica. Os resultados de caracterização física são apresentados no Quadro 4.18, e a granulometria das amostras com as curvas de menor e maior dimensão do agregado permitidas pela NBR 7211:2005 está na Figura 4.6.

**Quadro 4.18: Características físicas das pedras britadas nº 0 e nº 1.**

| Características físicas | Norma | Brita 0 | Brita 1 | Limites máximos da NBR 7211:2005 |
|---|---|---|---|---|
| Dimensão máxima característica (mm) | NBR NM 248:2003 | 12,5 | 19,00 | - |
| Módulo de Finura | NBR NM 248:2003 | 6,12 | 6,93 | - |
| Massa específica (g/cm³) | NBR NM 53:2003 | 2,75 | 2,77 | - |
| Massa unitária no estado solto (g/cm³) | NBR 7251:1982 | 1,43 | 1,47 | - |
| Teor de materiais pulverulentos (%) | NBR NM 46:2003 | 0,45 | 0,43 | 1,0 |
| Teor de argila e partículas friáveis (%) | NM 44:1995 | 0,12 | 0,16 | 1,0 a 3,0 |
| Abrasão Los Angeles (%) | NBR NM 51:2001 | - | 38,0 | 50 |
| Absorção | NBR NM 53:2003 | 0,60 | 0,50 | - |

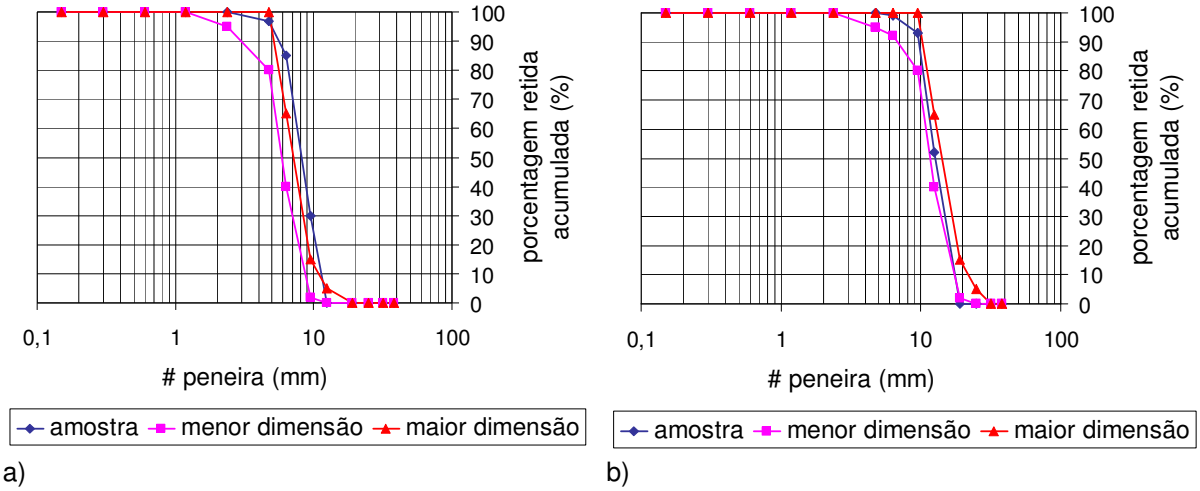



**Figura 4.6: Curva granulométrica: a) da brita 0; b) da brita 1.**

## 4.4 Métodos

### 4.4.1 Dosagem experimental dos concretos com diferentes teores de escória de alto-forno

A dosagem experimental do concreto teve como base os diagramas traçados por Bourguignon (2004), conforme recomendações de Helene e Terzian (1993). Esse método já havia sido utilizado por Souza (1992) para estudar concretos de alta resistência com escória de alto-forno. Na dosagem deste estudo, consideraram-se os materiais cimentícios (i) cimento Portland composto com escória CP II-E-32 (30% de escória de alto-forno), (ii) cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS (66% de escória de alto-forno) e (iii) o obtido pela mistura de 50% de cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS e 50% de escória granulada de alto-forno moída (correspondente a um teor total de 83% de escória de alto-forno sobre a massa de material cimentício).

Por meio de análises estatísticas e das correlações da Lei de Abrams, da Lei de Lyse e da Lei de Molinare foram obtidas as curvas de dosagem e suas respectivas equações, conforme apresentação nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e Tabela 4.1, respectivamente (BOURGUIGNON, 2004).

Para o traçado dos diagramas de dosagem, primeiramente determinaram-se o teor adequado de argamassa e o consumo de água para um abatimento de (70 ± 10) mm. Em seguida, para cada material cimentício, dosaram-se três traços com diferentes consumos de material cimentício (C), de forma que se avaliaram as resistências à compressão axial nas idades de 7 e 28 dias de idade.

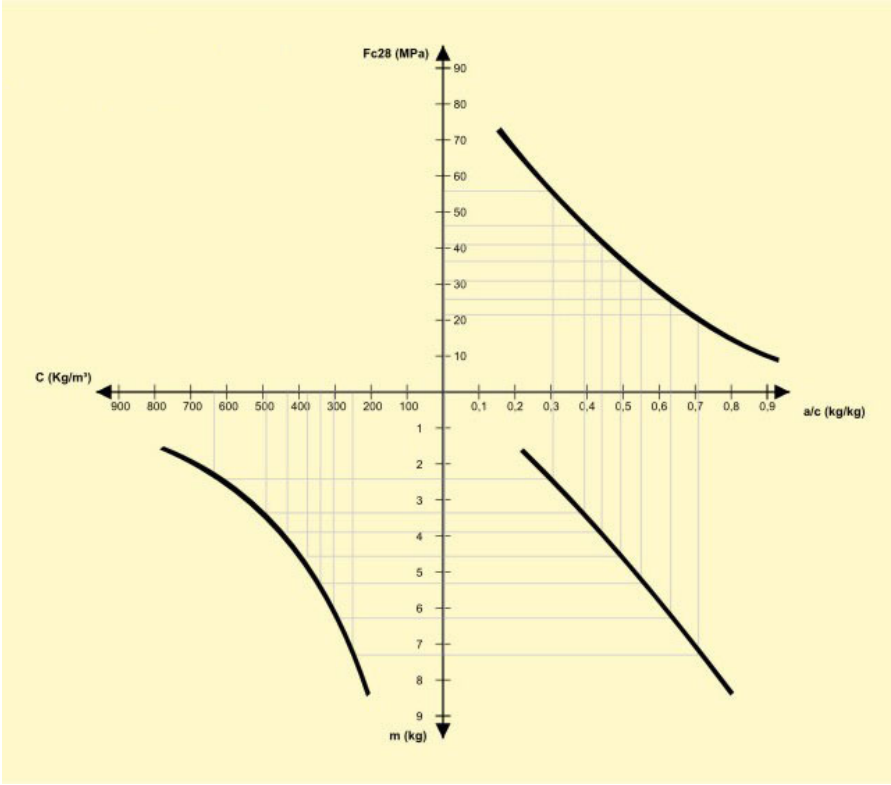



**Figura 4.7: Diagrama de dosagem aos 28 dias para a mistura com cimento Portland CP II-E-32 (BOURGUIGNON, 2004).**

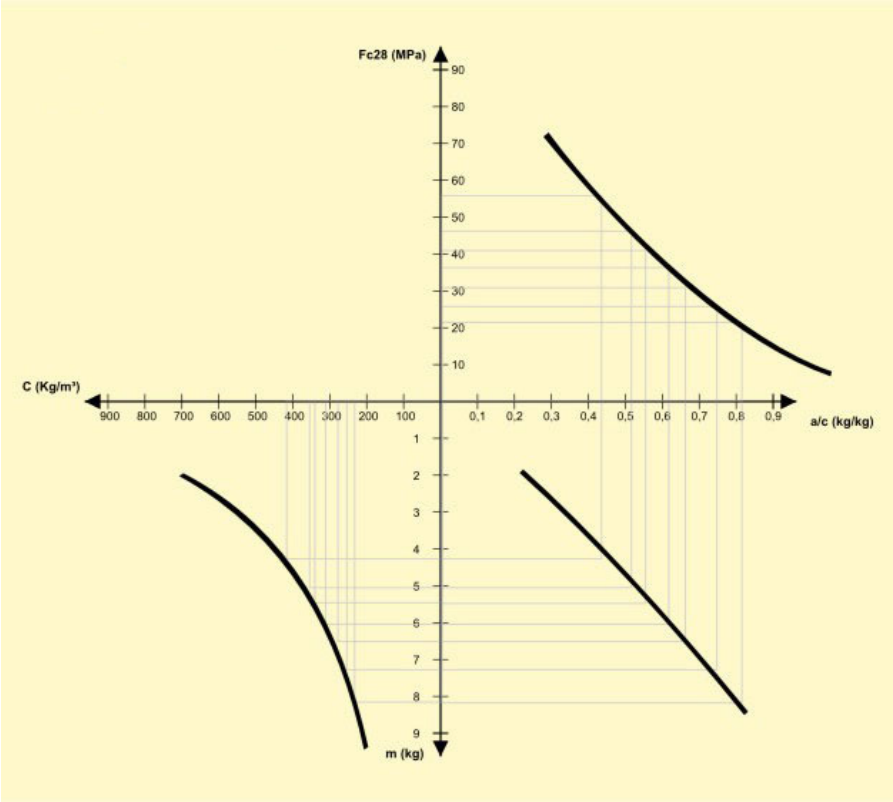



**Figura 4.8: Diagrama de dosagem aos 28 dias para a mistura com cimento Portland CP III-32-RS (BOURGUIGNON, 2004).**

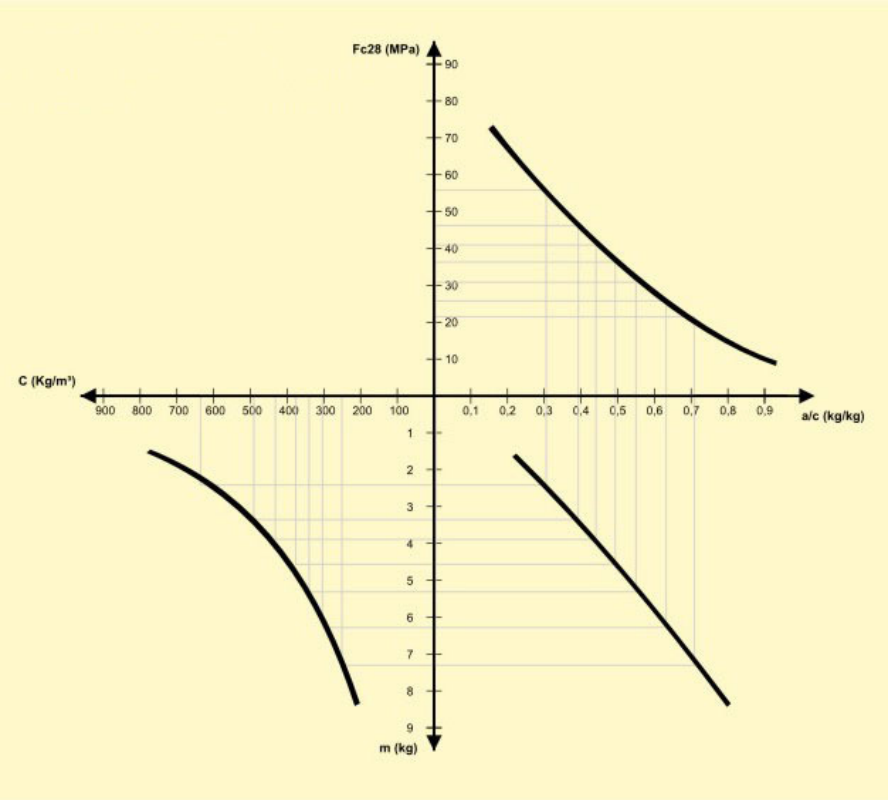



**Figura 4.9: Diagrama de dosagem aos 28 dias para a mistura em massa de 50% de cimento Portland CP III-32-RS e 50% de escória granulada de alto-forno moída (BOURGUIGNON, 2004).**

**Tabela 4.1: Modelo de ajustes de curvas (BOURGUIGNON, 2004)**

| y | x | Modelo | Coeficiente 1 | Coeficiente 2 | Teste de significância do modelo | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | F | p-valor | R2 |
| Diagrama 1 (CP II-E-32) | | | | | | | |
| $f_{ck}$ | a/mat. cim. | Lny = Lnk1– x.Ln k2 + ε | Ln k1=116,488 | Ln k2= -2,3336 | 548,33 | 0,00 | 0,982 |
| m | x | y = k3 + k4x | k3 = -1,2192 | k4 =11,8012 | 848,26 | 0,00 | 0,988 |
| C | m | y=1000/(k5+k6.m) | k5=0,4732365 | k6=0,4572186 | | | 0,99974 |
| Diagrama 2 (CP III-32-RS) | | | | | | | |
| $f_{ck}$ | a/mat. cim. | Lny = Lnk1– x.Ln k2 + ε | Ln k1=165,910 | Ln k2= -2,4393 | 646,57 | 0,00 | 0,985 |
| m | x | y = k3 + k4x | k3= 0,0486 | k4=9,6823 | 1.311,91 | 0,00 | 0,992 |
| C | m | y=1000/(k5+k6.m) | k5=0,3655175 | k6=0,4771054 | | | 0,99975 |
| Diagrama 3 (50% de CP III-32-RS + 50% de escória de alto-forno moída) | | | | | | | |
| $f_{ck}$ | a/mat. cim. | Lny = Lnk1– x.Ln k2 + ε | Ln k1 =117,367 | Ln k2 = -2,3532 | 196,10 | 0,00 | 0,951 |
| m | x | y = k3 + k4x | k3= -1,4723 | k4=12,4667 | 9.003,97 | 0,00 | 0,999 |
| C | m | y=1000/(k5+k6.m) | k5=0,468506717 | k6=0,458158089 | | | 0,99998 |

Bourguignon (2004) constatou que o melhor modelo de ajuste das variáveis resistência à compressão aos 28 dias (MPa) e relação água/material cimentício (Lei de Abrams) para os traços estudados foi o exponencial.

Com base nas curvas de dosagem, foram produzidas três séries de concreto de cada tipo de material cimentício para atender às resistências à compressão de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa, aos 28 dias de idade. Utilizou-se uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 320 litros para que se produzissem as misturas. Os traços obtidos nos diagramas de dosagem e

as resistências à compressão obtidas aos 28 dias apresentam-se no Quadro 4.19.

**Quadro 4.19: Traços em massa utilizados na produção dos concretos do estudo.**

| Traço | Aglomerante | $f_{ck}$ | *m | **C (kg/m³) | Traços em massa *** |
|---|---|---|---|---|---|
| T1 | CP II E-32 | 20 | 6,25 | 300,24 | 1: 2,99: 1,63: 1,63: 0,63 |
| T2 | CP III-32-RS | 20 | 7,31 | 259,38 | 1: 3,57: 1,87: 1,87: 0,75 |
| T3 | CP III-32-RS + e | 20 | 6,39 | 294,39 | 1: 3,07: 1,66: 1,66: 0,63 |
| T4 | CP II E-32 | 30 | 4,64 | 385,70 | 1: 2,10: 1,27: 1,27: 0,50 |
| T5 | CP III-32-RS | 30 | 6,05 | 307,60 | 1: 2,88: 1,59: 1,59: 0,62 |
| T6 | CP III-32-RS + e | 30 | 4,70 | 381,35 | 1: 2,14: 1,28: 1,28: 0,50 |
| T7 | CP II E-32 | 40 | 3,41 | 491,59 | 1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,39 |
| T8 | CP III-32-RS | 40 | 5,09 | 357,97 | 1: 2,35: 1,37: 1,37: 0,52 |
| T9 | CP III-32-RS + e | 40 | 3,42 | 491,16 | 1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,39 |

* agregados no traço do concreto
**C = consumo de material cimentício
*** material cimentício: areia: brita 0: brita 1: relação água/material cimentício

### 4.4.2 Propriedades mecânicas e físicas

As propriedades dos concretos foram avaliadas por meio dos ensaios de abatimento do tronco de cone, da resistência à compressão axial aos 28 dias, da massa específica, do índice de vazios, da absorção de água por imersão e da absorção capilar.

Os corpos-de-prova para avaliação da massa específica, do índice de vazios e da absorção de água por imersão foram moldados durante os trabalhos de laboratório do Relatório de Silva et al. (2006b). Usou-se forma cilíndrica, de acordo com a NBR 5738:2003, nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

A escolha do abatimento teve como referência as recomendações de Helene e Terzian (1993), nas quais a consistência deve ser $\leq (70 \pm 10)$ mm, utilizada usualmente em concreto, para atender a todo tipo de elemento estrutural com alta densidade de armadura (muito armado). Realizou-se um ensaio a cada vez que foram moldados corpos-de-prova para cada traço, conforme determina a NBR 12655:1996.

Após 24 horas da moldagem, todos os corpos-de-prova foram desmoldados e submetidos à cura em câmara úmida com umidade relativa superior a 95% por 28 dias, segundo os procedimentos da NBR 9778:1987.

Os corpos-de-prova destinados à avaliação da resistência à compressão aos 28 dias foram previamente capeados e depois rompidos, conforme prescrição da NBR 5739:1994. Obteve-se a resistência à compressão axial dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal

do corpo-de-prova. Na definição do número de corpos-de-prova, aproveitou-se o estudo estatístico do Relatório de Silva et al. (2006b).

Os ensaios para determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão foram realizados conforme prescrições da NBR 9778:1987. Já os ensaios para determinação da absorção por capilaridade e altura de ascensão capilar seguiram prescrições da NBR 9779:1995. Seus resultados foram discutidos no Capítulo 2 desta dissertação. O número de corpos-de-prova pode ser consultado no relatório de Silva et al. (2006b).

### 4.4.3 Condições ambientais analisadas

Após o período de cura úmida, todos os corpos-de-prova destinados à avaliação da capacidade de proteção dos cobrimentos passaram por período de cura ao ar em ambiente de laboratório, neste trabalho denominado condição natural. Também passaram por período que visa à aceleração de seu envelhecimento, denominado condição de envelhecimento acelerado.

A condição de envelhecimento acelerado possibilita o planejamento experimental de curto prazo, pois permite encurtar os períodos de iniciação e propagação da corrosão. Nesta dissertação, simulou-se o mecanismo desenvolvido pelo ataque conjunto de $Cl^-$ e de $CO_2$, por meio das etapas na câmara de névoa salina e na câmara de carbonatação.

Nesta pesquisa, cada ciclo de envelhecimento era iniciado com (i) a passagem dos corpos-de-prova por ambiente de câmara de névoa salina, com temperatura controlada de 28°C, durante três dias (Figura 4.10).

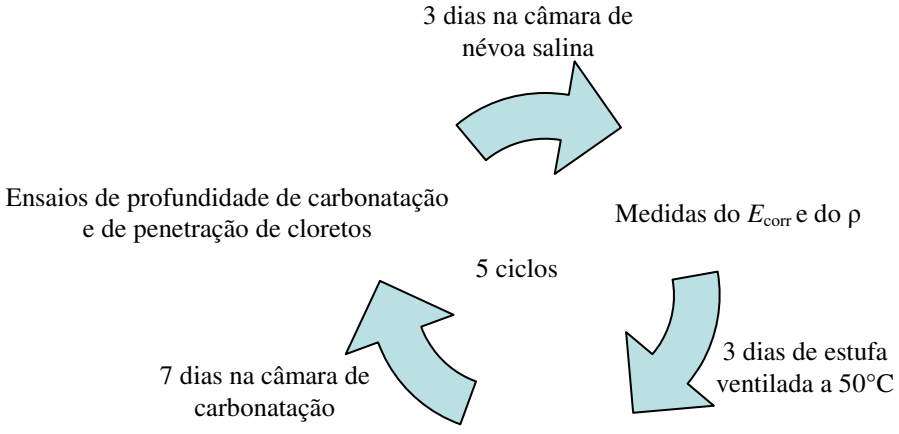



**Figura 4.10: Ciclo de envelhecimento acelerado e suas etapas.**

A seguir, realizavam-se os ensaios de potencial de corrosão ($E_{corr}$) e resistividade elétrica do concreto (ρ) nos corpos-de-prova, que, (ii) posteriormente, passavam por um processo de

secagem, em estufa ventilada a 50ºC durante três dias; (iii) finalmente, eram levados à câmara de carbonatação em ambiente com 10% de $CO_2$, umidade relativa entre 60% e 70% e temperatura de (26 ± 2)ºC, durante sete dias. Determinavam-se, em seguida, a profundidade de carbonatação e a profundidade de penetração de cloretos (Figura 4.10).

O envelhecimento acelerado foi interrompido no terceiro ciclo, por doze dias, logo após a passagem pela estufa, a fim de dar-se manutenção às câmaras de névoa salina e de carbonatação. Durante esse intervalo, os corpos-de-prova foram acondicionados em manta de polietileno e permaneceram sobre a bancada de laboratório, a fim de que não sofressem interferências externas e mantivessem as profundidades de agentes externos. Depois eles foram levados novamente à estufa por 24 horas para que as características do concreto se homogeneizassem, quando, então, foram tomadas as medidas de resistividade do concreto e de potencial de corrosão, para mais uma vez, serem postos na estufa por 24 horas.

A variabilidade de planejamento de ciclos na literatura pesquisada é muito grande: encontra-se a simulação de ciclos naturais, que são mais prolongados, atingindo meses e até anos de monitoramento, como no trabalho de Kaushik e Islan (1995).

O número de ciclos foi limitado em virtude do prazo para realização dos experimentos desta dissertação, e pelo entendimento de que seria suficiente para simular condições ambientais muito agressivas. Limitou-se também pelo espaço para disposição de corpos-de-prova na câmara de carbonatação, na câmara de névoa salina e na estufa ventilada.

As condições ambientais internas das câmaras estão descritas na seqüência.

### 4.4.4 Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos

A maioria dos ciclos de envelhecimento acelerado com soluções ácidas ou com cloretos utiliza método de imersão de corpos-de-prova em soluções saturadas que contêm agentes de ataque, como NaCl ou $H_2SO_4$.

Entretanto, as condições ambientais e os prazos de cada etapa nos ciclos de envelhecimento acelerado, assim como o planejamento do período de ataque dos agentes agressivos ($CO_2$ e $Cl^-$) e de seus teores, não são padronizados na literatura pesquisada.

Sabe-se que ao empregar-se a câmara de névoa salina, o ingresso de cloretos ocorre primeiramente por absorção e, após saturação, por difusão (BAUER, 1995). A câmara de névoa salina utilizada neste trabalho foi de fabricação da BASS Equipamentos Ltda., a qual tenta simular um ambiente marinho (Figura 4.11-a).

Para fixarem-se suas condições ambientais, tomou-se como temperatura a média do ano de 2004 no Boletim Agroclimático de Vitória, disponível na página eletrônica do Instituto de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural – INCAPER (2006). Essa temperatura média foi de aproximadamente 28°C. Nesta dissertação, o teor de NaCl de 5% representou a concentração de cloretos próxima a da água do mar, que é de 3,5%, e seguiu exemplo de trabalhos anteriores em soluções salinas de NaCl, como o de Bauer e Helene (1995), Dehwah, Maslehuddin e Austin (2002), Dhir, Hewlett e Dyer (1999), Dhir, Hewlett e Dyer (1995) e o de Ferreira (2003).

a) câmara de névoa salina b) estufa c) câmara de carbonatação

**Figura 4.11: Câmaras para o envelhecimento acelerado e estufa.**

Após a passagem pela câmara de névoa salina, os corpos-de-prova seguiram para a estufa (Figura 4.11-b), a fim de que se diminuísse a umidade proveniente da névoa e fossem preparados para umidade entre 60% e 70%, ideais para acelerar o mecanismo de carbonatação (AL-KADHIMI et al., 1995; COELHO, 2002).

Dependendo da porosidade, a etapa de secagem em estufa a 50°C atua de forma diferenciada, especialmente em relação ao volume de poros existente e à distribuição de tamanho de poro. A etapa de secagem responde diferentemente conforme o grau de umidade final, que depende da porosidade do concreto. Bauer (1995) constatou que a secagem é mais efetiva quando o volume e a dimensão de poro são maiores, e que o grau de umidade final, após a etapa de secagem, influenciou diretamente nos valores de resistência ôhmica e na variação porcentual de massa, e de forma indireta no potencial de corrosão. Por analogia se supõe que o grau de umidade final, após a etapa de secagem, possa influenciar de maneira direta na resistividade elétrica do concreto.

A difusividade de $CO_2$ e $O_2$ cresce com o aumento na temperatura, pois maiores temperaturas

reduzem o teor de umidade, fornecendo mais espaço para a difusão do $CO_2$ e $O_2$ e, conseqüentemente, aumentando a taxa de difusão (HELENE, 1993; TUUTTI, 1982 apud HOUST; WITTMANN, 2002). Temperaturas elevadas podem aumentar a velocidade das reações de carbonatação e de formação de cloroaluminatos, desde que sejam mantidas as condições de umidade interna suficientes para propiciá-la (HELENE, 1993; NEVILLE, 1997). Havendo também a intenção de propagar a corrosão das armaduras nos ensaios acelerados, deve haver, inclusive, oxigênio para alimentar as reações catódicas de corrosão.

Outro efeito do aumento da temperatura no concreto úmido é a possibilidade de aumento da capilaridade que transporta cloretos para o seu interior. Como resultado desses efeitos, foi constatado que um aumento de temperatura de 20°C, por exemplo, para 30°C praticamente dobra o coeficiente efetivo de difusão de cloretos (HELENE, 1993).

Ao serem pesquisados alguns trabalhos, verificou-se que certos autores usaram temperatura de secagem de 50°C (BAUER, 1995; LIMA et al., 1999), embora outros utilizaram 60°C (YEAU; KIM, 2005), 80°C (BAUER; NEPOMUCENO; LINS, 1999) e 38°C (CIVJAN et al., 2005). A exemplo de trabalhos nacionais (BAUER, 1995; LIMA et al., 1999), esta pesquisa empregou a temperatura de secagem de 50°C.

Sabe-se que a velocidade de carbonatação aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração de $CO_2$, principalmente para concretos com elevadas relações água/cimento (FERREIRA, 2003). No ambiente natural das grandes cidades, os teores de $CO_2$ da atmosfera estão entre 0,3% e 1% (HELENE, 1993). Porém, nos experimentos realizados em laboratório, é preciso acelerar o mecanismo de carbonatação por meio de concentrações maiores que a concentração natural de $CO_2$.

Os elevados teores de $CO_2$ empregados em ensaios acelerados podem afetar a microestrutura da pasta carbonatada. Em situação normal, a reação entre o $Ca(OH)_2$ e o $CO_2$ resulta na formação de $CaCO_3$ e $H_2O$, mas se há altas concentrações de $CO_2$, essa reação pode ficar instável por causa da geração de ácido carbônico e transformação do $Ca(OH)_2$ (insolúvel) em bicarbonato de cálcio (solúvel) (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os valores de pH medidos em soluções de poro do concreto variam significativamente com a concentração de gás carbônico utilizada no ambiente de carbonatação. A mineralogia e a estrutura de poro das fases sólidas presentes em corpos-de-prova de concreto carbonatado também variam significativamente com a concentração de gás carbônico do ambiente de

carbonatação, e ainda com a proporção de cloretos adicionados propositalmente durante a mistura (ANSTICE; PAGE; PAGE, 2005).

A formação de compostos solúveis facilita a migração do $CaCO_3$ pelos poros da pasta de cimento e pode gerar uma região carbonatada cuja microestrutura apresenta características distintas daquela gerada em exemplares carbonatados com pequenas concentrações de $CO_2$, que se aproximam mais das condições naturais (KAZMIERCZAK, 1995 apud FIGUEIREDO, 2005).

Nos ensaios acelerados são utilizados teores de $CO_2$ que variam de 3% a 100% (BOURGUIGNON, 2004), mas, freqüentemente, utiliza-se teor de $CO_2$ de 10%, como se pode ler no Quadro 4.20. Portanto, diante das variações nos teores pesquisados na literatura e das limitações necessárias para que não ocorressem mudanças na microestrutura dos concretos pesquisados (MEHTA; MONTEIRO, 1994), esta pesquisa aplicou teor de $CO_2$ de 10%, adotado pela maioria dos autores pesquisados (BOURGUIGNON, 2004; LARA, 2003).

**Quadro 4.20: Concentração de $CO_2$ utilizada em diversas pesquisas (adaptado de BOURGUIGNON, 2004).**

| Pesquisadores | % $CO_2$ |
|---|---|
| CASTRO, 2003 | 4 a 6 |
| ISAIA, 1995; ISAIA; NGALA; PAGE, 1997; GASTALDINI; ISAIA; ZANELLA, 1999; CASTRO, 2003; LARA, 2003 | 10 |
| NUNES, 1998 | 15 |
| KAZMIERCZAK, 1995; YING-YU; QUI-DONG, 1987 | 20 |
| PAPADAKIS et al., 1992 | 50 |
| AL-KADHMI et al., 1996; COELHO, 2002 | 100 |
| FERREIRA JUNIOR, 2003 | Fluxos contínuos: 10 *l*/min de $CO_2$/2h |
| NEPOMUCENO; PESSOA, 2004 | Fluxos contínuos: 5 *l*/min de $CO_2$/30min |

As condições ambientais internas da câmara de carbonatação fundamentaram-se nos trabalhos anteriores do Relatório de Silva et al. (2006b). Num deles, a dissertação de Coelho (2002), a partir de constatações de Al-Kadhimi et al. (1995), considerou-se a temperatura de (26 ± 2)°C e umidade relativa entre 60% e 70%. No trabalho de Bourguignon (2004), que utilizou os mesmos traços de concreto desta pesquisa, a condição natural com umidade relativa de 50% e temperatura variando de 21°C a 27ºC foi considerada favorável para o mecanismo de carbonatação.

A temperatura ótima utilizada na câmara de carbonatação (Figura 4.11-c) do trabalho de Bourguignon (2004), aquela que juntamente com a umidade ótima pudesse intensificar o mecanismo de carbonatação, foi de (26 ± 2)°C. Por isso, neste trabalho, depois de o ciclo oferecer condições propícias para a penetração de cloretos, os corpos-de-prova passaram por

condições favoráveis que pudessem desencadear o mecanismo da carbonatação.

#### 4.4.4.1 Preparação dos corpos-de-prova

Controlou-se a profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos na condição de envelhecimento acelerado utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos, de 100x200 mm, sem armaduras, moldados segundo a NBR 5738:2003.

Antes do ensaio, marcaram-se com giz de cera os corpos-de-prova nas posições nas quais seriam seccionados (cor preta). Fizeram-se marcações longitudinais (cores vermelha e verde) para localizar-se a posição das leituras de carbonatação e de cloretos, em cada face rompida. Essa marcação prévia objetivava a redução de interferência, por parte do observador, na escolha dos pontos analisados, e a constância das linhas para cada uma das oito determinações, em cada idade (Figura 4.12-a).

Na data do ensaio, cada corpo-de-prova era seccionado transversalmente e retirado um segmento correspondente à metade da altura do corpo-de-prova, aproximadamente 10 cm (Figuras 4.12-b e 4.12-c). A outra metade do corpo-de-prova retornava ao ciclo.

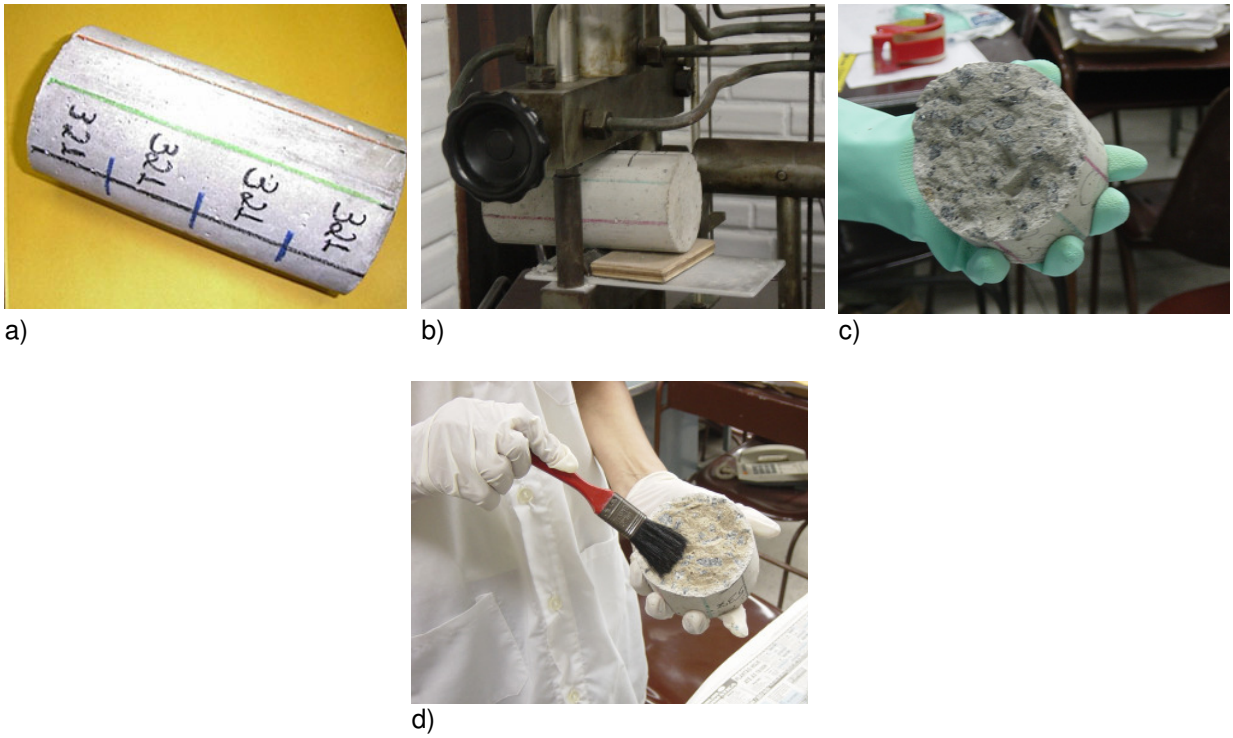



**Figura 4.12: Seqüência de preparo das amostras: a) marcação dos corpos-de-prova; b) fratura da seção transversal; c) seção recém-fraturada; d) limpeza da seção.**

Em seguida, a metade do corpo-de-prova destinada aos ensaios de carbonatação e de cloretos era novamente rompida meio a meio, restando duas partes com aproximadamente 5 cm de espessura. Dessas partes, uma era destinada ao ensaio de carbonatação, na qual se aspergia

solução de fenolftaleína, e a outra ao ensaio de cloretos, em que se borrifava solução de nitrato de prata.

Após rompimento das amostras, as faces destinadas aos ensaios de carbonatação e de cloretos eram limpas com um pincel a seco (Figuras 4.12-d). As faces a serem avaliadas, tanto para carbonatação quanto para cloretos, eram adjacentes (justapostas), para que os resultados correspondessem ao mesmo eixo de seção da amostra.

#### 4.4.4.2 Métodos dos ensaios

O indicador de pH fenolftaleína é a ferramenta mais comum para se medir a profundidade de carbonatação, e consiste em aspergir a solução numa seção fraturada de concreto, paralela à direção do avanço da frente de carbonatação.

A despeito da dificuldade na precisão das medidas de carbonatação pelo indicador fenolftaleína (STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002), o presente trabalho utilizou esse método: após o procedimento de fratura da seção e limpeza da peça recém-fraturada, aspergia-se a solução de 1% de fenolftaleína em 100 ml de etanol (Figura 4.13-a) e, passados 10 minutos, efetuava-se a medida da profundidade de carbonatação nos pontos previamente marcados, utilizando-se um paquímetro (CASCUDO, 2005; CASTRO, 2003) (Figura 4.13-b).

O pH de viragem de cor da fenolftaleína está na faixa de 8,0 a 9,8, acima da qual apresenta tonalidade violeta e fica incolor abaixo dela (CASCUDO, 2005). Por ter pH abaixo dessa faixa, a parte da superfície do concreto fraturada que estiver carbonatada permanece incolor.

a) b)

**Figura 4.13: Seqüência de preparo do ensaio de profundidade de carbonatação: a) aspersão da solução de fenolftaleína; b) medida da profundidade de carbonatação.**

O método do colorímetro para que se possa determinar a profundidade de penetração de cloretos consiste em borrifar uma solução aquosa de 0,1 M de nitrato de prata ($AgNO_3$) em um corte transversal de uma amostra de concreto (COLLEPARDI; MARCIALA;

TURRIZIANI, 1970; OTSUKI; NAGATAKI; NAKASHITA, 1992 apud JUCÁ, 2002) (Figura 4.14-a).

a) b)

**Figura 4.14: Seqüência de preparo do ensaio de profundidade de penetração de cloretos: a) aspersão da solução de nitrato de prata; b) medida da profundidade de penetração de cloretos.**

A solução de nitrato de prata ao ser aspergida sobre a superfície fraturada da amostra, reage com cloretos livres presentes no local, formando um precipitado branco de cloreto de prata (AgCl) que indica a profundidade de penetração de cloretos. Onde não há presença de cloretos livres, a amostra adquire uma tonalidade marrom por causa da formação de um precipitado escuro de óxido de prata (Figura 4.14-b). Esse método tem o objetivo de observar se a frente de cloretos alcança as armaduras.

Quando feito isolado, sem a presença de carbonatos, o ensaio com a solução de 0,1 M de $AgNO_3$ pode dar certeza do risco de corrosão das armaduras (MECK; SIRIVIVATNANON, 2003). Na presença de carbonatos pode haver desvantagem desse método: a coloração branca apresentada na amostra indica não apenas a presença de sais de cloretos, como também de carbonatos ou sulfatos, entre outros possíveis sais agressivos à armadura ou ao concreto (JUCÁ, 2002). Outras desvantagens são o desconhecimento da concentração de cloretos no limiar da diferença das cores e a ampla faixa mostrada pelos altos coeficientes de variação (MECK; SIRIVIVATNANON, 2003).

A despeito dessas incertezas, esse método foi utilizado nesta dissertação, a exemplo de vários trabalhos descritos na literatura, por serem consideradas as suas vantagens: simplicidade, praticidade e baixo custo. Preparava-se a solução a 0,1 M de nitrato de prata em água destilada ou deionizada; logo após o seccionamento, as amostras eram aspergidas com a solução de nitrato de prata e colocadas imediatamente em local iluminado para que a solução pudesse reagir com cloretos (JUCÁ, 2002). Depois de cerca de 15 minutos, identificava-se a coloração na superfície do corpo-de-prova e registravam-se as medidas.

A solução de nitrato de prata é nociva à pele humana; por esse motivo, recomenda-se sempre que ela seja preparada por pessoal de laboratório e manipulada com equipamento de proteção individual adequado. Ela deve permanecer em ambiente com temperatura em torno de 25°C e em frasco escuro até o momento do ensaio. Esse procedimento, além de ser mais seguro, é necessário para que se evite sua decomposição pela luz (redução fotoquímica), pois o nitrato de prata é facilmente solúvel em água. Portanto, devem ser evitados calor, luz, fontes de ignição e contaminantes.

#### 4.4.4.3 Ensaio na condição natural

Após a cura por 28 dias em câmara úmida, os corpos-de-prova permaneciam sob cura ao ar, em ambiente de laboratório, até a idade de 365 dias, quando então eram fraturados em duas partes iguais. Na primeira metade, que era dividida novamente ao meio, realizavam-se os ensaios com o indicador fenolftaleína e com o reagente nitrato de prata, para medida da profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos, respectivamente. A segunda metade seguia para os ciclos de envelhecimento acelerado.

#### 4.4.4.4 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado

A cada ciclo de envelhecimento acelerado, após a passagem pela câmara de carbonatação, eram realizados os ensaios para medição da profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos, utilizando-se as soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata, respectivamente.

### 4.4.5 Resistividade elétrica aparente do concreto

#### 4.4.5.1 Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova destinados ao ensaio da resistividade elétrica aparente do concreto foram cilíndricos, com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, idênticos aos corpos-de-prova prescritos para o ensaio de resistência à compressão da NBR 5738:2003.

#### 4.4.5.2 Método do ensaio

Este ensaio é capaz de fornecer informações qualitativas quanto à porosidade do concreto, à existência de cloretos e outros íons dissolvidos na solução de poro e à probabilidade de corrosão das armaduras. O medidor de resistividade RESI, fabricado pela PROCEQ, utilizado nesta pesquisa, é a adaptação de um amperímetro ligado aos eletrodos das extremidades e de um voltímetro ligado aos eletrodos internos (Figura 3.1, Capítulo 3, e Figura 4.15).

Um bom contato entre o bloco de espuma da sonda de resistividade e a superfície do concreto

é essencial para uma medida segura. O medidor indica por meio do visor o nível de contato obtido pela pré-umidificação do corpo-de-prova e pela saturação dos blocos de espuma das sondas: de 50% a 100% indica que o valor medido está com precisão satisfatória.

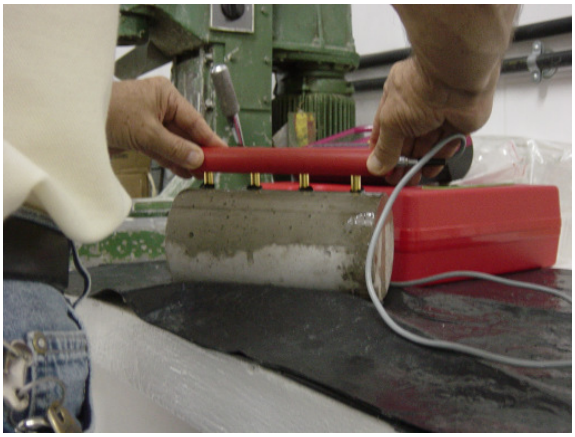


**Figura 4.15: Ensaio de resistividade elétrica aparente do concreto com o uso do medidor RESI.**

Analisaram-se os resultados com base nos valores definidos no Comiteé Euro-International du Betón – CEB 192 (1989 apud CASCUDO, 1997) (Quadro 3.1, Capítulo 3).

#### 4.4.5.3 Ensaio na condição natural

Após cura úmida por 28 dias, os corpos-de-prova destinados ao ensaio de resistividade elétrica do concreto permaneceram em ambiente natural de laboratório até a idade de 365 dias. Os ensaios foram realizados a partir da idade de 63 dias, primeiramente a cada semana, e, depois de verificada a estabilização das medidas, passaram a ser realizados a cada 15 dias. A última data de medida coincidiu com a idade de 365 dias, cujos valores também foram as primeiras medidas de referência para o início dos ciclos de envelhecimento acelerado.

#### 4.4.5.4 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado

Nos trabalhos encontrados na literatura pesquisada, ocorre variação na idade dos corpos-de-prova para dar-se início ao ciclo de envelhecimento acelerado e às medições eletroquímicas. No trabalho de Bauer (1995), essa idade foi de 63 dias, e os corpos-de-prova permaneceram todo esse período por cura úmida; no de Ferreira (2003), foi de 91 dias. Esses trabalhos se basearam nas observações da idade de estabilização da evolução da resistência à compressão e do teor de água combinada avaliada pelo ensaio de perda ao fogo.

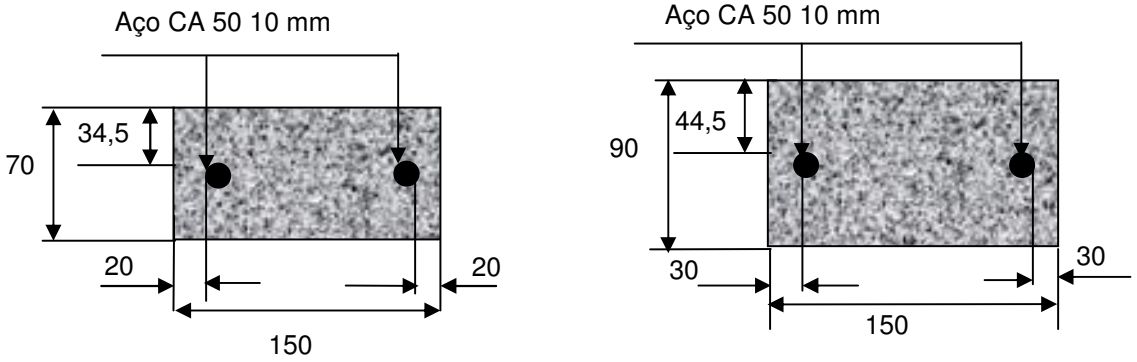
Neste trabalho, após a idade de 365 dias, período no qual os corpos-de-prova foram submetidos à cura úmida por 28 dias, seguida de cura ao ar na condição natural, iniciou-se o ciclo de envelhecimento acelerado. Esse período foi considerado suficiente para a

estabilização das perturbações na resistividade elétrica do concreto e no potencial de corrosão oriundas da hidratação dos materiais cimentícios e para a plena passivação das armaduras.

### 4.4.6 Potencial de corrosão

#### 4.4.6.1 Preparação dos corpos-de-prova

Dimensionaram-se os dois grupos de corpos-de-prova para avaliação do potencial de corrosão na forma prismática, com espessuras de cobrimento conforme determinadas especificações das normas NB 1:1978 e NBR 6118:2003. Um grupo tinha dimensões de 70mmx150mmx150mm e cobrimento de 20 mm, correspondente ao que especifica a NB 1:1978 para vigas, pilares e arcos em concreto armado, revestidos com argamassa de espessura mínima de 1 cm e expostos a ambiente externo. Outro grupo tinha dimensões de 90mmx150mmx150mm e cobrimento de 30 mm, correspondente ao cobrimento mínimo especificado pela NBR 6118:2003 para viga e pilar em concreto armado, expostos a ambiente externo de agressividade ambiental do tipo III. Ambos tiveram altura de 150 mm e contiveram em seus interiores duas barras de aço CA-50 de 10 mm de diâmetro cada um (Figura 4.16):




a) corpo-de-prova 70mmx150mmx150mm b) corpo-de-prova 90mmx150mmx150mm

**Figura 4.16: Representação esquemática dos corpos-de-prova de dimensões: a) 70mmx150mmx150mm; b) 90mmx150mmx150mm.**

Na escolha do material mais apropriado à confecção dos moldes para produção dos corpos-de-prova prismáticos destinados à avaliação da corrosão das armaduras, optou-se por metal, por causa de sua resistência mecânica necessária para suportar os impactos de adensamento manual e vibração mecânica, e por causa da precisão nas dimensões exigida para uniformização dos corpos-de-prova e no posicionamento das barras de armaduras para obtenção dos cobrimentos escolhidos.

As barras de armadura empregadas tiveram comprimento total de 190 mm e foram limpas de

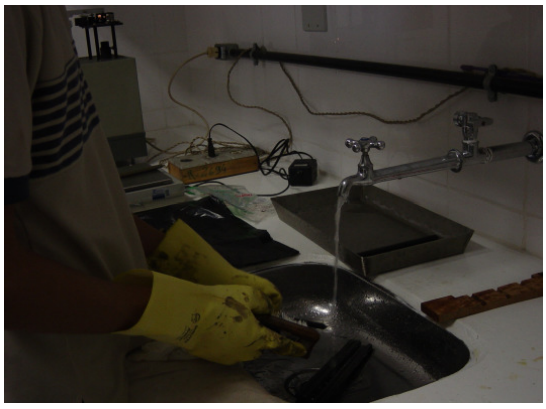
modo a conferir condições superficiais idênticas entre si. Uma das extremidades de cada barra passou por processo de usinagem, para possibilitar posterior fixação de fios por meio de conectores – conexões elétricas para serem utilizadas nos ensaios das medidas de potencial de corrosão.

As barras de aço foram submetidas ao processo de limpeza recomendado pela norma ASTM G1:1988, citada por Bauer (1995), a fim de que todas apresentassem as mesmas condições superficiais.

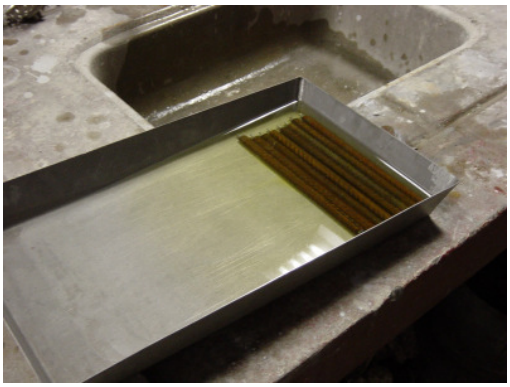
O procedimento foi constituído das seguintes etapas (Figura 4.17):

- imersão das barras em uma solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/*l* de hexametilenotetramina, durante 15 minutos;
- lavagem em água corrente e escovação das barras com escova de cerdas plásticas para remoção dos óxidos;
- imersão em acetona, por 2 minutos, para a retirada de elementos gordurosos e favorecer a evaporação da água na superfície;
- secagem com jato de ar quente.

a)



b)



c)

d)

**Figura 4.17: Processo de limpeza das barras de aço: a) imersão em solução de ácido clorídrico; b) escovação das barras; c) imersão em acetona; d) delimitação das barras.**

Fizeram-se, com fita isolante, as delimitações das barras a serem expostas ao ataque dos agentes agressivos conservando-se com sílica gel em ambiente fechado, para evitar-se o contato com a umidade, até o momento de montagem do corpo-de-prova.

Após a colocação das armaduras nos moldes, o concreto foi lançado em duas camadas, por adensamento, utilizando-se um bastão de aço. Em seguida, os corpos-de-prova já moldados passaram por vibração em mesa vibratória.

Após 15 dias de cura, foram feitas as conexões elétricas destinadas às futuras medidas de potencial de corrosão e, em seguida, o capeamento com silicone, tomando toda a parte superior do corpo-de-prova e as conexões elétricas. Esse procedimento expôs apenas as extremidades dos fios ligados às armaduras pelas conexões elétricas, a fim de que se evitasse um possível ingresso de umidade e/ou agentes corrosivos ($Cl^-$ ou $O_2$).

### 4.4.6.2 Método do ensaio

O potencial de corrosão indica a probabilidade de despassivação e de corrosão da armadura, e a leitura se faz diretamente no voltímetro com o auxílio do eletrodo de calomelano saturado (Figura 4.18):

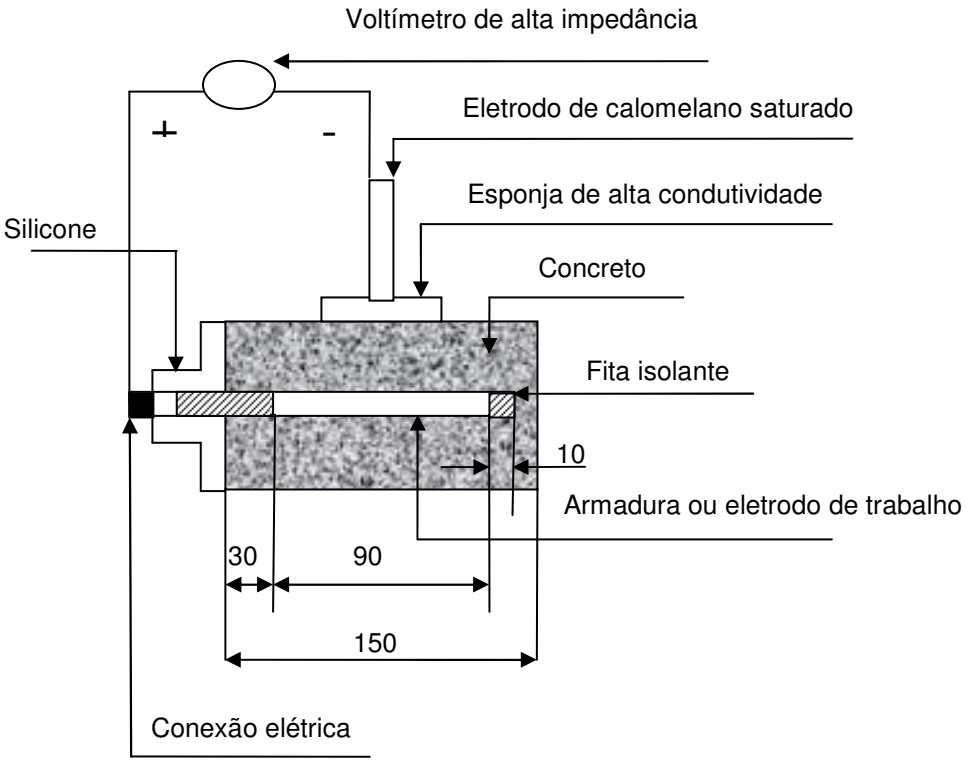



**Figura 4.18: Esquema do corpo-de-prova sob ensaio do potencial de corrosão (cotas em mm).**

Os equipamentos e acessórios necessários ao ensaio do potencial de corrosão foram

estabelecidos conforme a descrição da ASTM C 876:1999:

- voltímetro com sensibilidade de décimo de mV e com impedância não menor que 10 MΩ quando operado a uma escala completa de 100 mV;
- eletrodos de trabalho (armadura embutida no corpo-de-prova) e de referência (os mais utilizados são o de calomelano saturado (ECS) e o de cobre/sulfato de cobre (ESC));
- esponja de alta condutividade (na prática, esponja umedecida em uma solução com detergente na proporção de 4 a 5 ml, por litro de água potável, destinada a melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto);
- fio elétrico, para conexão dos pólos, com comprimento que não cause perturbação no circuito elétrico, proveniente da resistência elétrica do fio, por mais de 0,0001 V (não mais que 150 m de fio de pelo menos 24 AWG).

Deve-se conectar o pólo positivo do voltímetro à armadura e o pólo negativo ao eletrodo de referência (Figura 4.18).

Com o objetivo de manter-se idêntico procedimento nas medidas do potencial de corrosão e facilitar-se a realização dos ensaios, utilizou-se um suporte para fixar-se o eletrodo de calomelano com a mesma pressão na superfície do corpo-de-prova, de forma que ele ficasse no centro da barra, na direção perpendicular (Figura 4.19). Convém lixar as pontas dos fios de prolongamento das barras, a fim de melhorar-se o contato elétrico entre os eletrodos, o que foi feito no presente experimento.

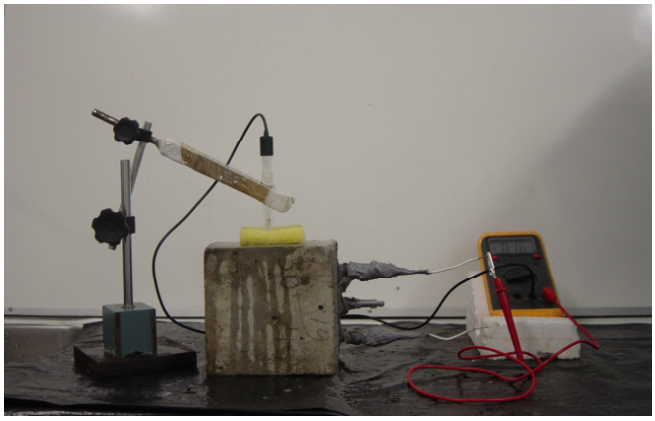


**Figura 4.19: Corpo-de-prova submetido ao ensaio de potencial de corrosão.**

Logo após a instalação do suporte com o eletrodo de calomelano saturado e ligação dos pólos, registrava-se o valor de potencial somente quando constatada a estabilização (±0,02 V) por período mínimo de 5 minutos, conforme preconiza a norma ASTM C 876:1999 na condição de flutuações dos valores iniciais lidos no multivoltímetro. A seguir, retirava-se a

aparelhagem e realizava-se a medida, da mesma forma, na seqüência dos corpos-de-prova (Figura 4.19). Os resultados foram analisados observando-se os critérios definidos em tal norma (Quadro 3.2, Capítulo 3).

#### 4.4.6.3 Ensaio na condição natural

Após cura úmida por 28 dias, os corpos-de-prova destinados ao ensaio do potencial de corrosão mantiveram-se por cura ao ar, em ambiente de laboratório, durante 365 dias. Com a idade de 63 dias, iniciou-se o monitoramento na condição natural, primeiramente ensaiando-se a cada semana. Depois, verificada a estabilização das medidas, ensaiava-se a cada 15 dias até a idade de 365 dias, quando então se realizavam as últimas medidas na condição natural, as quais serviam de referências para as medidas iniciais na condição de envelhecimento acelerado.

#### 4.4.6.4 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado

Após o período de 365 dias na condição natural, quando se iniciaram os ciclos de envelhecimento acelerado, assumiu-se que as perturbações no potencial de corrosão oriundas da hidratação estivessem mínimas, conforme explicitadas na seção 4.4.5.4. Os corpos-de-prova seguiram, então, para o monitoramento na condição de envelhecimento acelerado. Após a passagem pela câmara de névoa salina, quando eles estavam ainda úmidos, realizaram-se as medidas de potencial de corrosão. Esse estado foi considerado ideal para a realização de tais medidas devido a uma melhor disponibilidade de eletrólito.

### 4.5 Análise estatística dos resultados

Na análise estatística dos resultados foi utilizado o software "SPSS for Windows", versão 11.5. Foram utilizadas as técnicas de estatística descritiva (cálculo de média, desvio-padrão e gráficos de média) para a análise estatística na caracterização das variáveis, segundo os fatores estudados. O erro admitido para as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos foi de meio milímetro – que foi o grau de precisão da leitura no ensaio com aspersão de solução de fenolftaleína (BOURGUIGNON, 2004). Quando o desvio-padrão foi menor que o erro admitido, adotou-se o valor do erro igual ao desvio-padrão.

# CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 5.1 Introdução

Realizou-se a análise dos resultados obtidos por meio de técnicas de estatística descritiva (cálculo da média, desvio-padrão, gráfico de linhas), a fim de se caracterizarem as variáveis: resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água por imersão, absorção por capilaridade, índice de vazios, profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos, resistividade elétrica aparente do concreto e potencial de corrosão.

## 5.2 Resistência à compressão aos 28 dias

Os resultados médios obtidos para as resistências à compressão aos 28 dias ($f_{cm}$) de cada série e seus respectivos desvios-padrão apresentam-se na Tabela 5.1, Anexo A.

Para que se verificassem as diferenças estatísticas dos resultados obtidos das resistências à compressão aos 28 dias entre os materiais cimentícios para cada série, fez-se a análise de variância ANOVA e, *a posteriori*, o teste de DUNCAN (Tabela 5.2, Anexo A). Constatou-se que na classe C30 não há diferenças estatísticas das resistências à compressão aos 28 dias para os três tipos de materiais cimentícios; no entanto, nas classes C20 e C40 elas ocorrem.

Assim sendo, a partir dos resultados de desvio-padrão real, utilizou-se a equação estabelecida pela NBR 12655:2006 para calcular-se a sua classe de resistência real correspondente a cada série. As classes de resistência utilizadas para o traçado das curvas de tendência foram essas resistências reais calculadas para cada série, correspondentes ao $f_{ck}$ da equação. As variáveis deste estudo foram analisadas nessa base.

## 5.3 Resistência à carbonatação e à penetração de cloretos na condição natural

Os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos (e demais precipitados brancos) nos corpos-de-prova cilíndricos, mantidos em ambiente seco e protegido de laboratório, realizados na data em que os corpos-de-prova completaram 365 dias de moldados, são apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7, Anexo C.

Apesar de pouca diferença, as maiores profundidades médias de carbonatação[1] e de penetração de cloretos (e demais precipitados brancos) se dão na Classe C20 e na mistura com

[1] A profundidade de carbonatação deste trabalho se refere à profundidade medida da viragem do pH, entre 8,3 e 10, indicada pela solução de fenolftaleína, podendo haver carbonatação além dela em diferente grau.

o maior teor de escória (cimento CP III-32-RS + escória[2], Tabela 5.6, Anexo C). Nas classes C30 e C40, observa-se um aumento na profundidade média de carbonatação e de penetração de cloretos (e demais precipitados brancos)[3] com o aumento do **teor de escória** (Figuras 5.2-a e 5.2-b). Isso se deve à redução na quantidade de hidróxido de cálcio com o aumento do teor de escória de alto-forno, e, como a carbonatação potencializa o efeito de cloretos, a penetração deles também aumenta conforme resultados anteriores (BAUER, 1995; BELIE et al., 1996; CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000; HELENE, 1993; HELENE, 1995).

As maiores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos na classe C20 se devem aos seus maiores valores de absorção capilar e ascensão capilar (Figuras 2.3-a e 2.4-a, Capítulo 2), o que facilita a entrada de $CO_2$ e de $Cl^-$. Esses valores resultam da classe de resistência mais baixa com maior relação água/material cimentício e baixo teor de escória de alto-forno. Percebe-se também que, mantendo-se a mesma **relação água/material** cimentício (acima de 0,52), as menores profundidades são as do concreto com o cimento CP III-32-RS, que possui teor de escória de 66% (Figuras 5.1-a e 5.1-b).

Os resultados de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos das Tabelas 5.6 e 5.7, Anexo C, e das Figuras 5.1-a e 5.1-b concordam com os resultados de absorção capilar e altura de ascensão capilar em função da relação água/material cimentício (Figuras 2.3-b e 2.4-b, Capítulo 2). Observa-se que essas variáveis na condição natural têm mais influência do que as variáveis massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios (Figuras 2.2-a, 2.2-b e 2.2-c, Capítulo 2).

Figueiredo e Nepomuceno (2004) encontraram boa correlação entre a absorção de água por imersão e a profundidade de carbonatação, avaliando testemunhos de estruturas externas expostas a ambiente natural protegidas da chuva.

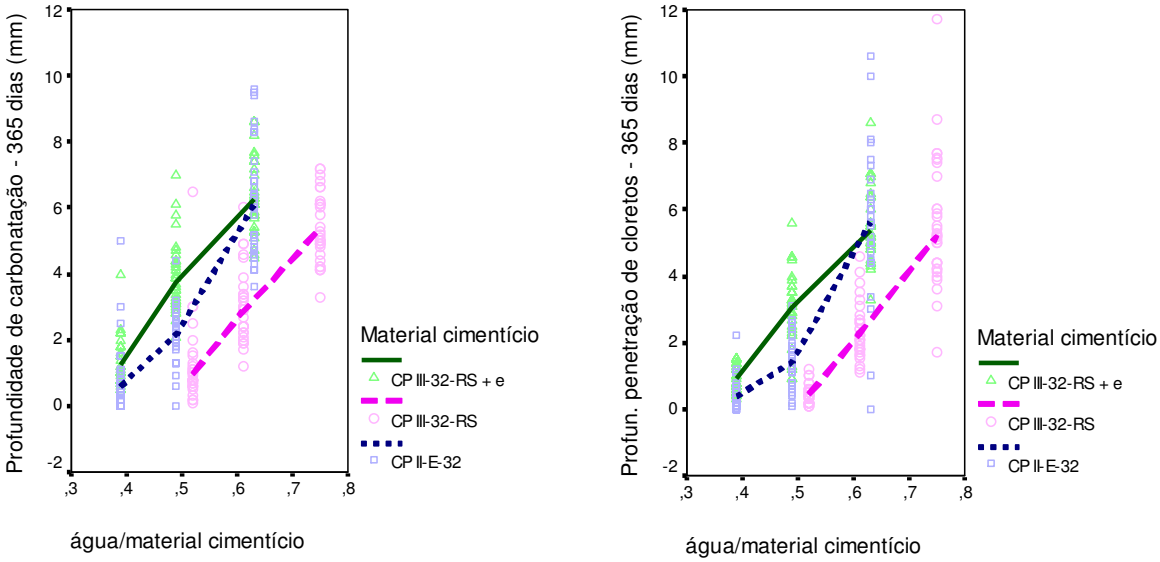
A profundidade de penetração de cloretos na condição natural foi maior em concretos com maior relação água/material cimentício (Figura 5.1-b), conforme resultados de estudos anteriores (PECH-CANUL; CASTRO, 2002).

Os resultados de absorção capilar, altura de ascensão capilar e profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos seguiram a ordem CP III-32-RS < CP II-E-32 < CP III-32-RS + e. O teor de escória de alto-forno, o consumo de materiais cimentícios (C) e a relação

[2] A expressão CP III-32-RS + escória será daqui para frente abreviada como CP III-32-RS + e.

[3] Por questões de abreviatura, doravante se deve entender que o termo "penetração de íons cloretos" designará também a penetração dos demais precipitados brancos no ensaio de nitrato de prata.

água/material cimentício influenciaram na resistência à compressão, na absorção capilar, na altura de ascensão capilar e no teor de hidróxido de cálcio existente no concreto. Esses fatores governaram a profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos na condição natural em ambiente interno, protegido e seco; essas influências na carbonatação também foram observadas em estudos de Figueiredo e Nepomuceno (2004).

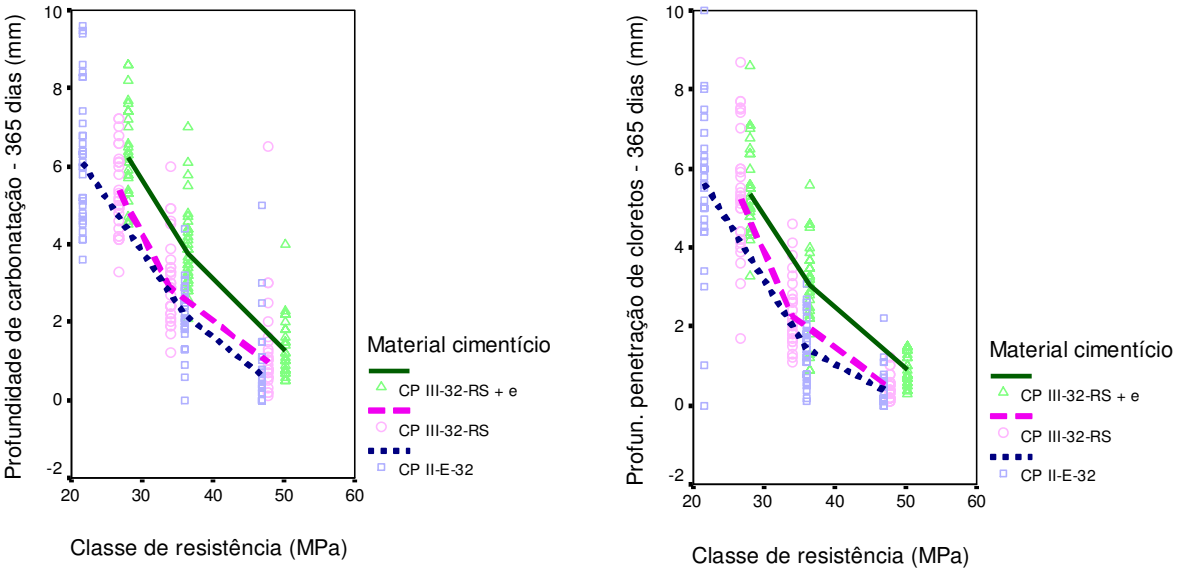



a) profundidade de carbonatação b) profundidade de penetração de cloretos

**Figura 5.1: Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos em função da relação água/material cimentício.**

Comparando-se as Figuras 5.1-a e 5.1-b percebe-se que, fixando-se a relação água/material cimentício, a mistura com o cimento CP III-32-RS + e apresenta praticamente a mesma profundidade de penetração de cloretos e de carbonatação. A despeito do maior teor de escória que dificulta a penetração de cloretos, o resultado deste trabalho, com relação a cloretos, pode também ser atribuído à grande mobilidade desses íons por causa da sua afinidade iônica e de seu pequeno diâmetro em relação ao diâmetro de poro, além da alta ascensão capilar constatada, o que vai de encontro do trabalho de Nepomuceno (2005).

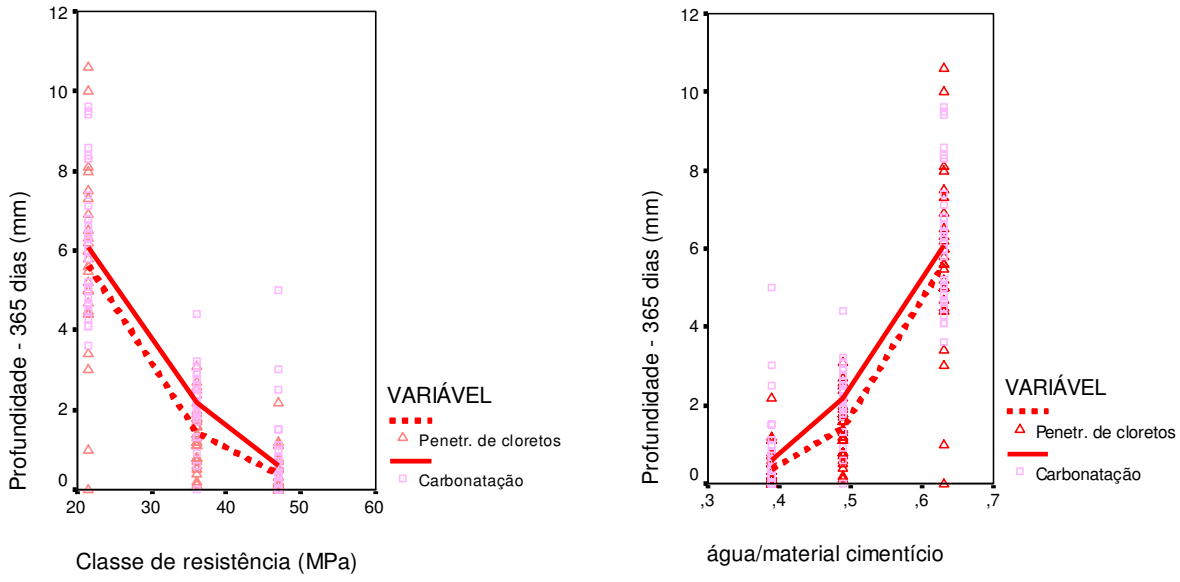
Aumentando-se a **classe de resistência**, há uma diminuição na profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos (Figuras 5.2-a e 5.2-b). Observa-se também que, ao se fixar a classe de resistência, as maiores profundidades, para ambos os agentes agressivos, apresentam-se na mistura com o cimento CP III-32-RS + e. Tais resultados também concordam com os resultados de absorção capilar e ascensão capilar do concreto com esse teor nas mais baixas classes de resistência (Figuras 2.3-a e 2.4-a). Um aumento na classe de resistência corresponde a uma diminuição na absorção capilar e ascensão capilar, mesmo em altos teores de escória, e na profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos.




a) profundidade de carbonatação b) profundidade de penetração de cloretos

**Figura 5.2: Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos em função da classe de resistência.**

Com relação ao **tipo de material cimentício**, percebe-se, nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5, que a profundidade de carbonatação é maior do que a de penetração de cloretos. A carbonatação parece anteceder a ação de cloretos conforme verificado no trabalho de Monteiro e Nepomuceno (1996), apesar de ínfima diferença, ao menos em concreto submetido à condição natural em local interno, abrigado e seco (HELENE, 1993; HOUST; WITTMANN, 2002).




a) b)

**Figura 5.3: Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para as misturas com CP II-E-32 aos 365 dias, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício.**

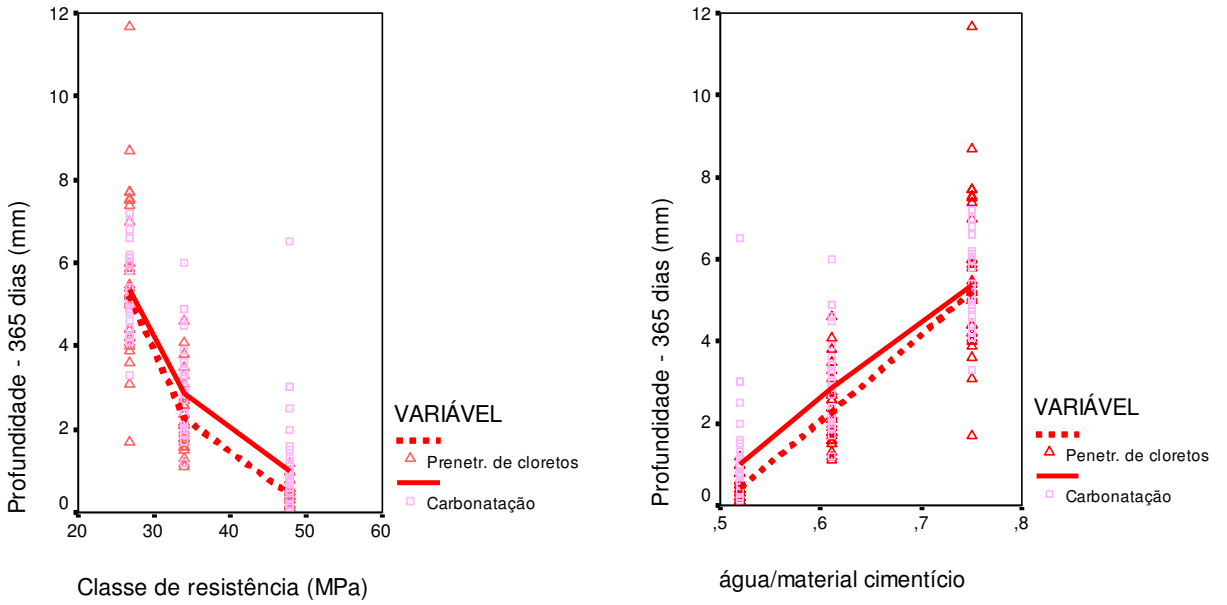



**Figura 5.4: Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para as misturas com CP III-32-RS aos 365 dias, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício.**

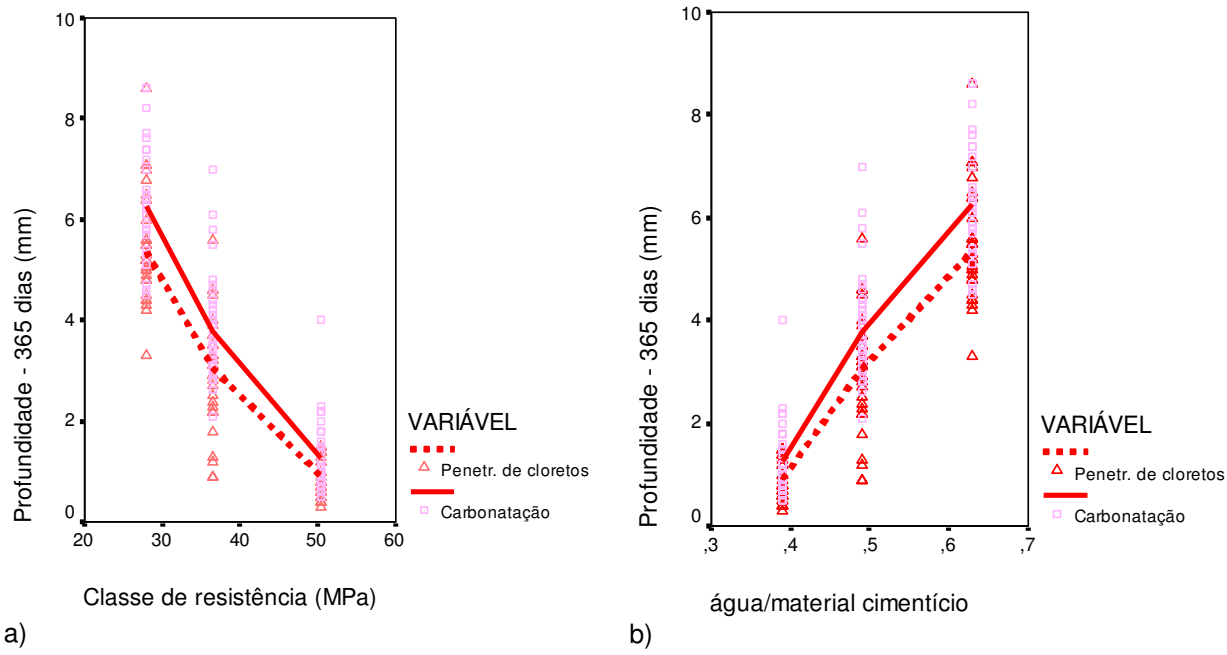



**Figura 5.5: Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para as misturas com CP III-32-RS + e aos 365 dias, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício.**

Considerando-se, ainda, que a profundidade do pH de viragem da fenolftaleína (8,0 a 9,8) é menor do que o pH de despassivação da armadura (11,5), isto é, a profundidade agressiva às armaduras é maior do que a mostrada pelo ensaio com solução de fenolftaleína.

Deve-se ter atenção às incertezas dos ensaios com as soluções de nitrato de prata (JUCÁ, 2002) e de fenolftaleína (CHANG; CHEN, 2006; HOUST; WITTMANN, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 1994; SAETTA; VITALIANI, 2005) e à influência de uma frente em relação à outra (CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000).

## 5.4 Resistência à carbonatação e à penetração de cloretos na condição de envelhecimento acelerado

As medidas iniciais das profundidades de penetração de cloretos e de carbonatação se referem aos ensaios realizados nos corpos-de-prova com a idade de 365 dias. As demais medidas se referem a cada ciclo na condição de envelhecimento acelerado (Tabelas 5.8 e 5.9, Anexo D e Figuras 5.6 e 5.7).

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos resultantes nos ensaios com as soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata, respectivamente, a cada ciclo de envelhecimento acelerado e para todas as misturas, podendo-se verificar a influência da classe de resistência e da relação água/material cimentício, respectivamente.

Percebe-se que, a cada ciclo de envelhecimento, as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos ficam maiores e crescem principalmente em menores classes, maiores relações água/material cimentício, em baixo teor de escória (CP II-E-32) e em alto teor, no caso de carbonatação (CP III-32-RS + e) (Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12). Esse efeito foi constatado em trabalhos anteriores (CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000; DIHR et al., 1993 apud MONTEIRO; NEPOMUCENO, 1996).

Ao contrário, aumentando-se a classe de resistência e diminuindo-se a relação água/material cimentício, ocorrem menores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos, com as diferenças tornando-se cada vez menores, mesmo em baixo ou alto teor de escória (Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12).

Esse fato é corroborado por outros estudos nos quais foi verificado que a menor relação água/aglomerante produz concretos de melhor comportamento, tanto na resistência ao ataque de carbonatação quanto na resistência ao ataque de cloretos (CASTRO, 2003; CASTRO et al., 2004; COELHO, 2002; HOUST; WITTMANN, 2002).

Repetindo-se a mesma tendência da condição natural, as menores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos, para todos os ciclos, são as do concreto com o cimento CP III-32-RS (66% de escória em massa total de materiais cimentícios).

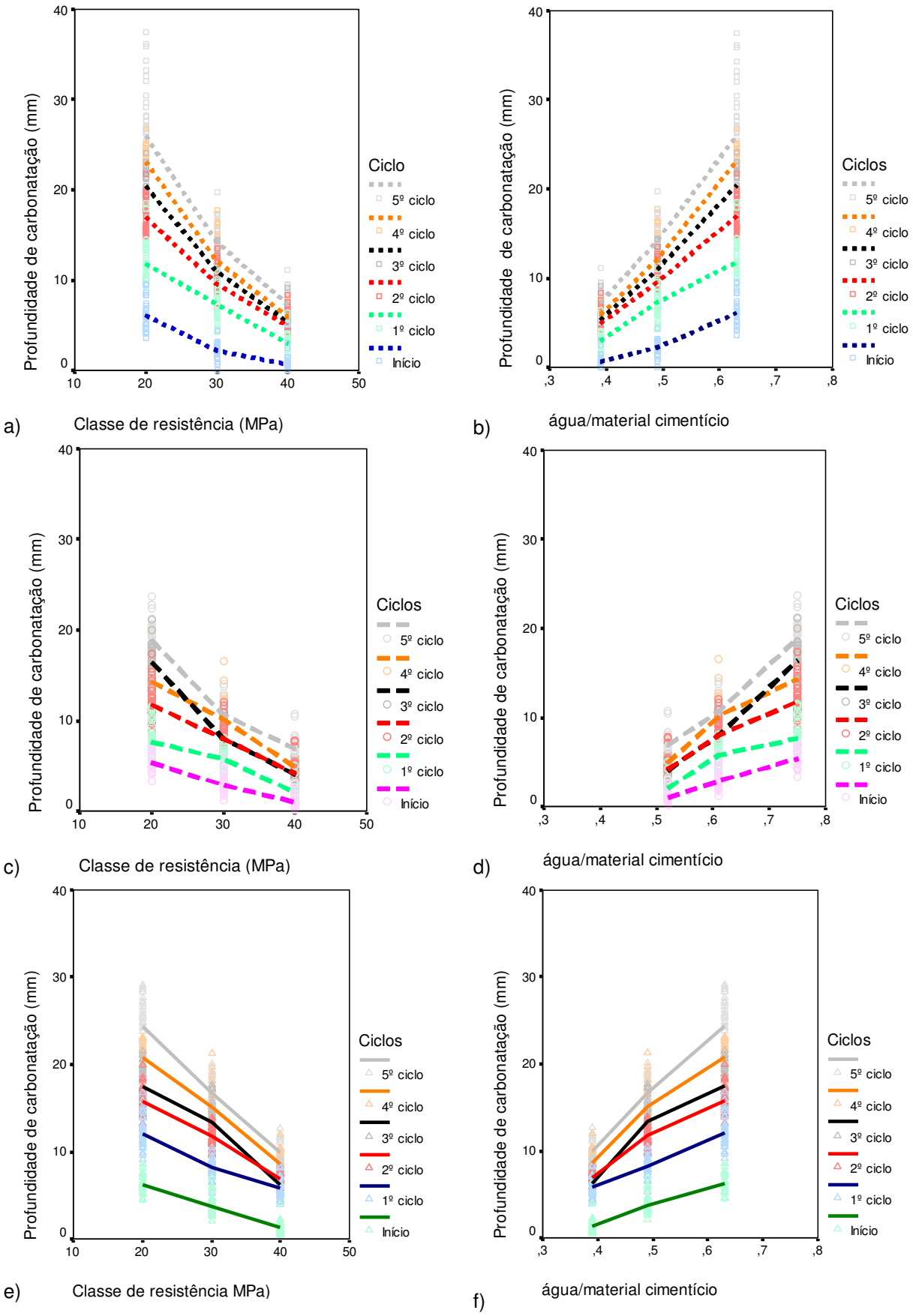



**Figura 5.6: Profundidade de carbonatação a cada ciclo de envelhecimento acelerado em função da classe de resistência e da relação água/material cimentício para concretos com: a), b) cimento CP II-E-32; c), d) cimento CP III-32-RS, e; e), f) cimento CP III-32-RS + e.**

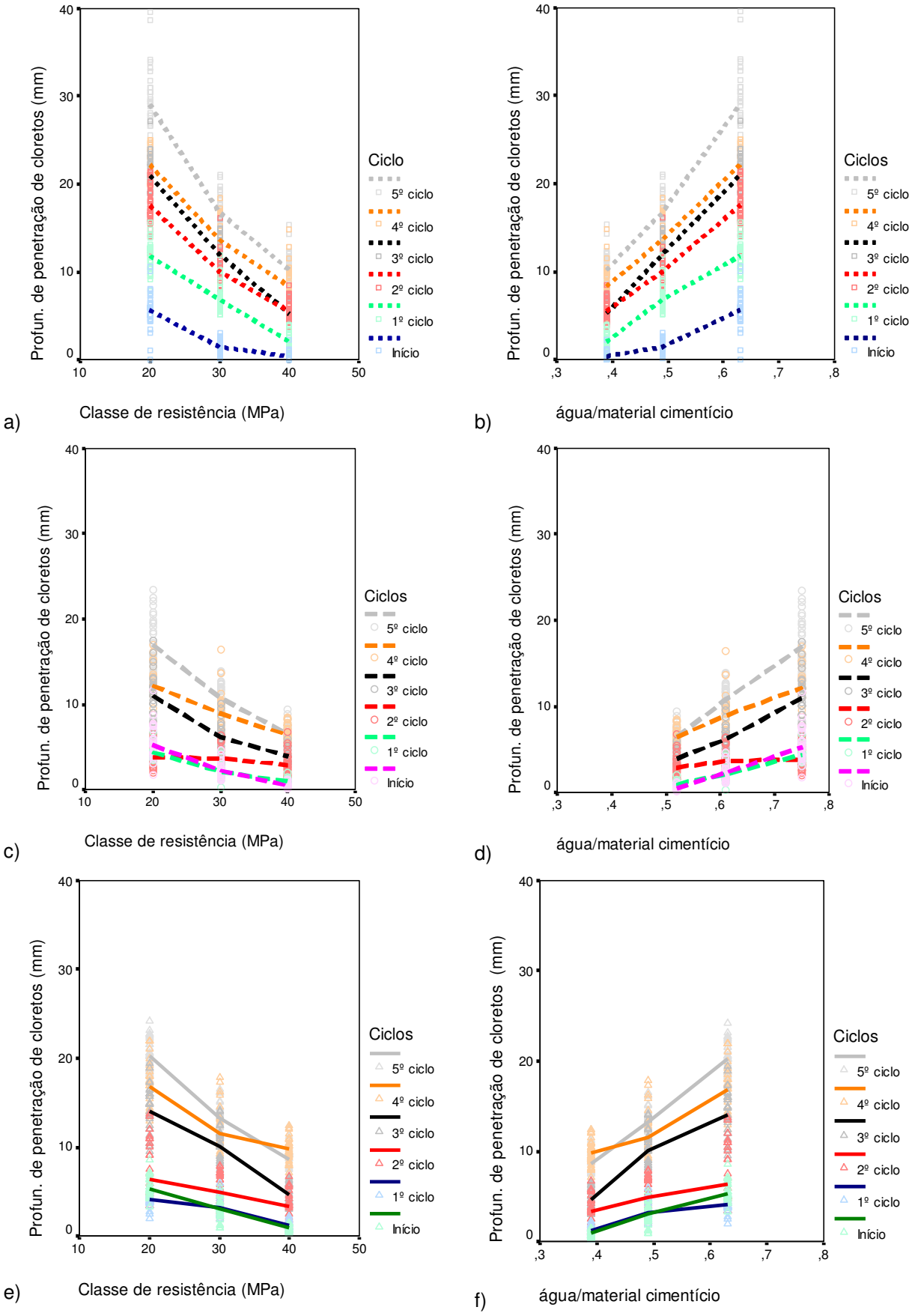



**Figura 5.7: Profundidade de penetração de cloretos a cada ciclo de envelhecimento acelerado em função da classe de resistência e da relação água/material cimentício para concretos com: a), b) cimento CP II-E-32; c), d) cimento CP III-32-RS, e; e), f) cimento CP III-32-RS + e.**

O concreto com o cimento CP III-32-RS é o que apresenta as menores profundidades (Tabelas 5.8 e 5.9, Anexo D e Figuras 5.6-c, 5.6-d e 5.7-c, 5.7d, 5.8-a, 5.8-b, 5.9-a, 5.9-b, 5.13-a, 5.13-b, 5.14-a, 5.14-b, 5.15-a e 5.15-b). Esse resultado concorda com os de absorção capilar, que são menores para essa mistura e para uma relação água/material cimentício, no caso maior do que 0,52 (Figura 2.3-b, Capítulo 2).

Provavelmente, o efeito combinado da dosagem ótima de escória de alto-forno e da relação água/material cimentício foi uma menor ascensão capilar, que dificultou a penetração de $CO_2$ e $Cl^-$. Além disso, pode ter havido um equilíbrio entre o efeito positivo do teor de escória e o teor de hidróxido de cálcio resultante que não facilitou a carbonatação (HOPPE FO; ISAIA; GASTALDINI, 2002).

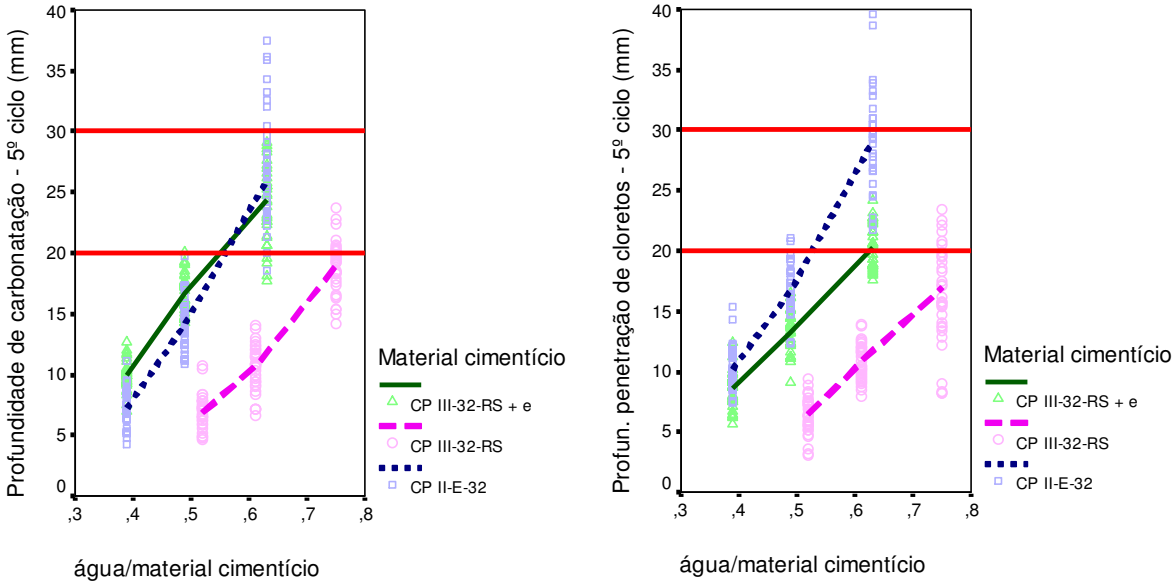
As maiores profundidades de carbonatação se verificam no concreto com cimento CP III-32-RS + e (83% de escória em massa total de materiais cimentícios) nas classes C30 e C40, principalmente, para uma relação água/material cimentício menor do que 0,52 (Tabela 5.8, Anexo D, Figuras 5.6-e, 5.6-f, 5.8-a, 5.9-a, 5.14-a e 5.15-a). Isso se deve, provavelmente, ao menor teor de hidróxido de cálcio resultante no concreto, que facilita a difusão de $CO_2$ a maiores profundidades e a carbonatação (BAUER, 1995; BELIE et al., 1996; HELENE, 1995).

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam a profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos após o $5^{o}$ ciclo, em função da relação água/material cimentício e em função da classe de resistência, respectivamente.

Os resultados referentes à profundidade de carbonatação da mistura com o cimento CP III-32-RS + e (Figuras 5.8-a e 5.9-a) concordam com os de absorção capilar verificados nas Figuras 2.3-a, 2.3-b, 2.4-a e 2.4-b, Capítulo 2, principalmente quando se diminui a classe abaixo de 25 MPa, os quais são maiores do que nas demais misturas deste estudo. Assim, nesses concretos existem condições que facilitam a difusão do $CO_2$ e a carbonatação: a menor classe de resistência, a maior relação água/material cimentício, a maior absorção capilar e, provavelmente, o menor teor de hidróxido de cálcio resultante.

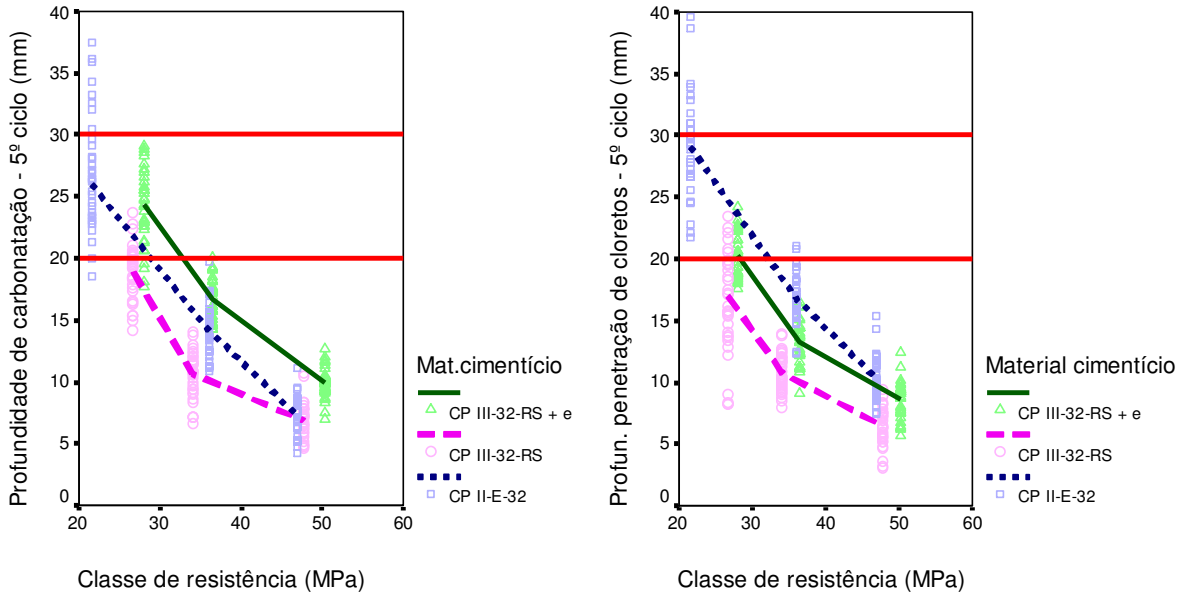
As maiores profundidades de penetração de cloretos verificam-se no concreto com o cimento CP II-E-32 (Figuras 5.7-c, 5.7-d, 5.8-b e 5.9-b). Esses resultados concordam com os de maior absorção de água por imersão e de maior índice de vazios das Figuras 2.2-b e 2.2-c, Capítulo 2, respectivamente. Além disso, concretos com menores teores de escória têm menor

resistência à penetração de cloretos (CASTRO et al., 2004; COSTA; GASTALDINI; ISAIA, 2002; LENG; FENG; LU, 2000; XU, 1997).




a) profundidade de carbonatação b) penetração de cloretos

**Figura 5.8: Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos no 5º ciclo, em função relação água/material cimentício.**




a) profundidade de carbonatação b) penetração de cloretos

**Figura 5.9: Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos no 5º ciclo, em função da classe de resistência.**

Com relação ao **tipo de material cimentício**, as Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os resultados da profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos ao final dos ciclos para os concretos com o cimento CP II-E-32, com o cimento CP III-32-RS e com a mistura de

CP III-32-RS + e, respectivamente. Na condição de envelhecimento acelerado, parece que no concreto com o cimento CP II-E-32, as variáveis massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios (Figuras 2.2-a, 2.2-b e 2.2-c, Capítulo 2) têm maior influência na penetração de cloretos.

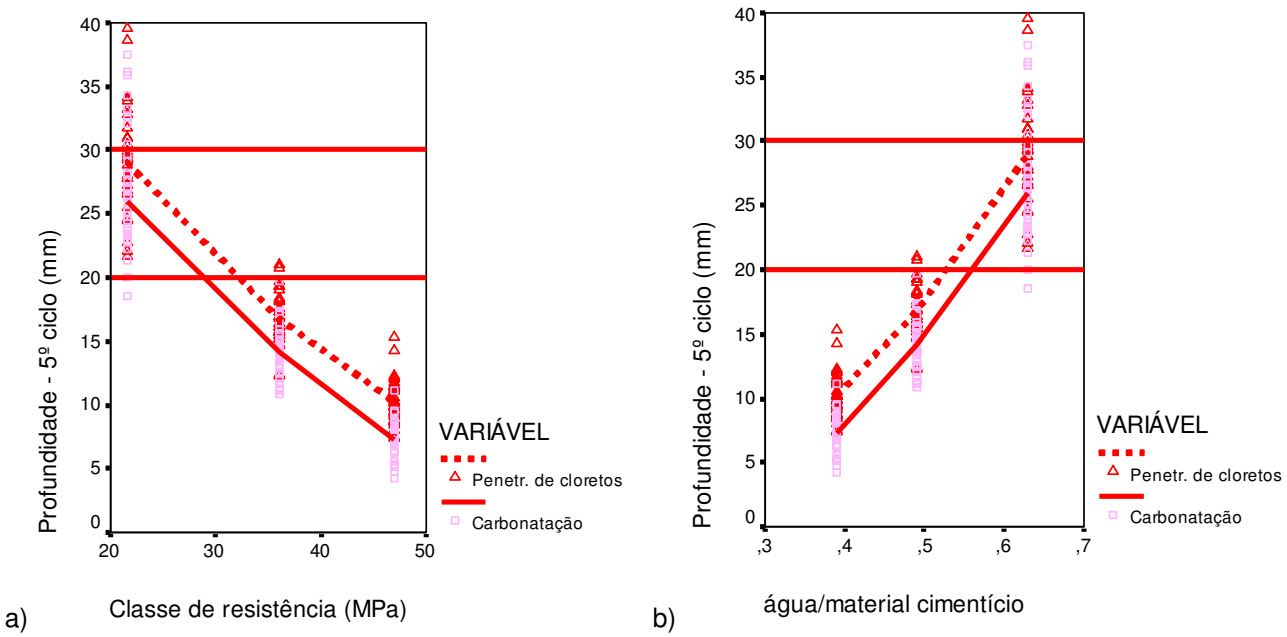



**Figura 5.10: Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para o concreto com o cimento CP II-E-32, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício (após 5º ciclo).**

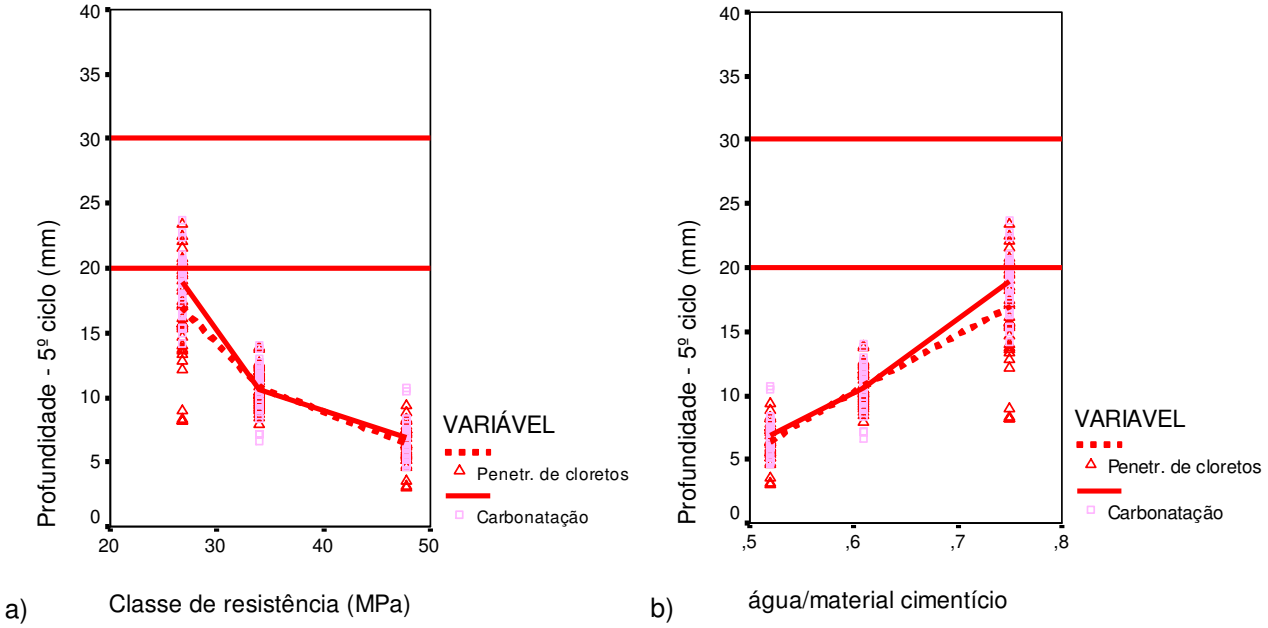
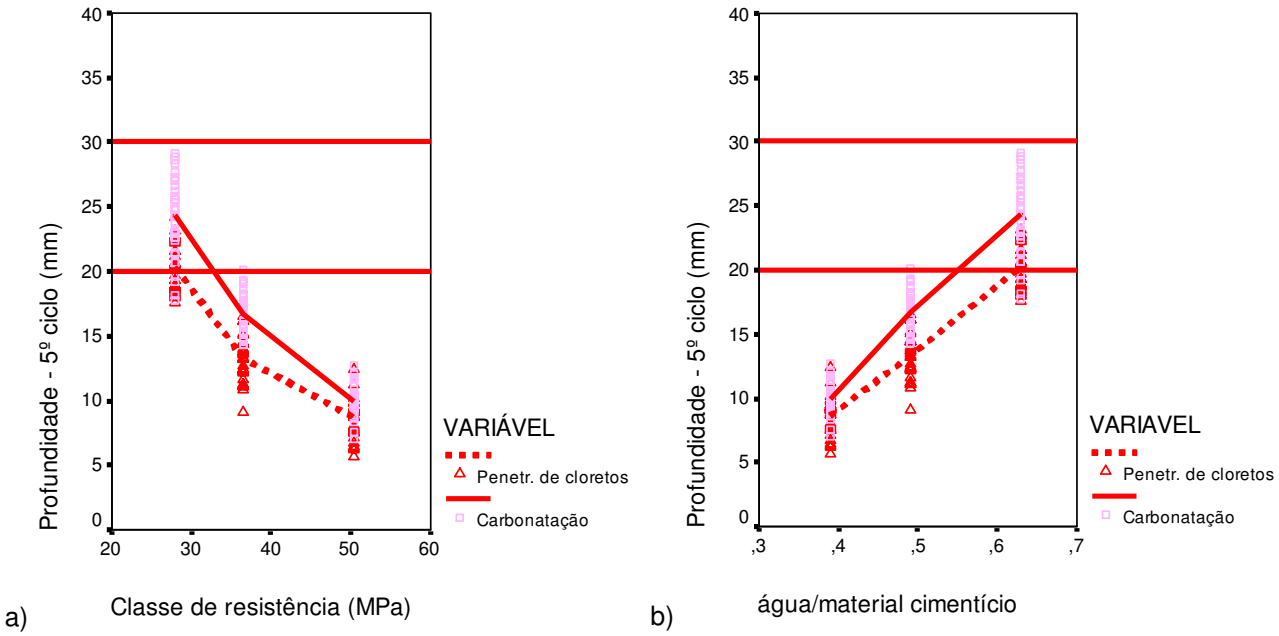



**Figura 5.11: Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para o concreto com o cimento CP III-32-RS, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício (após 5º ciclo).**




a) b)

**Figura 5.12: Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos para o concreto com o cimento CP III-32-RS + e, em função da: a) classe real de resistência; b) relação água/material cimentício (após 5º ciclo).**

Essa influência não foi notada na condição natural que mostrou comportamento contrário, ou seja, a frente de carbonatação prevaleceu sempre em todos os concretos. Provavelmente, poros de maior volume e comunicáveis facilitam a penetração de cloretos por difusão nas condições de maior umidade (névoa salina). Castro et al., (2004), Costa, Gastaldini e Isaia (2002), Leng, Feng, Lu (2000) e Xu (1997) também verificaram a prevalência da frente de cloretos sobre a de carbonatação.

Além disso, no envelhecimento acelerado, há maior probabilidade do ataque pela carbonatação ao C-S-H com a formação de sílica gel, o que ocasiona rearranjo da porosidade e aumento de poros de maior volume, e também abre caminho para a penetração de cloretos (ÇOPUROĞLU; FRAAIJ; BIJEN, 2006; DIAS, 2000; NGALA, PAGE, 1997; MUKHERJEE, 2004). Deve-se considerar também que cloretos são liberados em baixo pH (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001; GLASS; BUENFELD, 2000; PRUCKNER; GJØRV, 2004).

O comportamento do concreto com o cimento CP III-32-RS (Figura 5.11) na condição de envelhecimento acelerado é quase o contrário do comportamento na condição natural (em comparação com a Figura 5.4). No envelhecimento acelerado, com maior grau de carbonatação, as frentes de carbonatação e de cloretos tendem a se inverter, suavemente, no ponto da curva de resistência à compressão de 35 MPa e relação água/material cimentício de 0,62, estando na situação intermediária quando se aumenta a classe de resistência de C20 para

C40. Kulakowski e Dal Molin (2004) verificaram esse tipo de inversão estudando concretos com sílica ativa para uma relação água/aglomerante de 0,4 e 0,5. Abaixo dessa faixa, a carbonatação foi regida principalmente pela porosidade da matriz cimentante (KULAKOWSKI; DAL MOLIN, 2004).

A observação da relação água/material cimentício mostra concordância na ordem de tendência de teores de escória na absorção capilar e na carbonatação, mas o concreto com o cimento CP II-E-32 parece tender a modificar mais a sua porosidade, tendo em vista a sua maior profundidade de carbonatação que a do concreto com o cimento CP III-32-RS + e na relação água/material cimentício de 0,63 (Figuras 2.3-b e 5.8-a). No controle da frente de carbonatação, Castro et al. (2004) constataram que a utilização da escória de alto-forno somente é vantajosa numa relação água/material cimentício baixa (0,55 e 0,40).

Na condição de envelhecimento acelerado, aumentando-se o teor de escória, a frente de carbonatação tende a prevalecer (Figuras 5.10, 5.11 e 5.12). Mas ocorre diminuição das diferenças para os maiores teores de escória de alto-forno nas maiores classes de resistência à compressão e menores relações água/material cimentício, principalmente na dosagem ótima do concreto com o CP III-32-RS (Figuras 5.11-a e 5.11-b).

A absorção capilar aumenta consideravelmente para relações água/material cimentício maiores que 0,61 (Tabela 5.5, Anexo B e Figura 2.3-b, Capítulo 2) e classes de resistência menores que 27 MPa (Tabela 5.5, Anexo B e Figura 2.3-a, Capítulo 2), principalmente no concreto com maior teor de escória de alto-forno. Por outro lado, diminui radicalmente para relações água/material cimentício menores do que 0,52 (Tabela 5.5, Anexo B e Figura 2.3-b, Capítulo 2) e classes de resistência maiores que 27 MPa no concreto com maior teor de escória (CP III-32-RS + e) (Tabela 5.5, Anexo B e Figura 2.3-a, Capítulo 2).

Nesse concreto prevaleceu a influência da frente de carbonatação, tanto na condição natural quanto na condição de envelhecimento acelerado, porque o alto teor de escória favorece a fixação de cloretos – ajudando a desacelerar a penetração de cloretos enquanto a perda alcalina não começar a desestabilizar a fase cloroaluminato (GLASS; BUENFELD, 2000; KURDOWSKI, 2004; PRUCKNER; GJØRV, 2004) – e facilita a carbonatação devida ao menor teor de hidróxido de cálcio (Figuras 5.5 e 5.12).

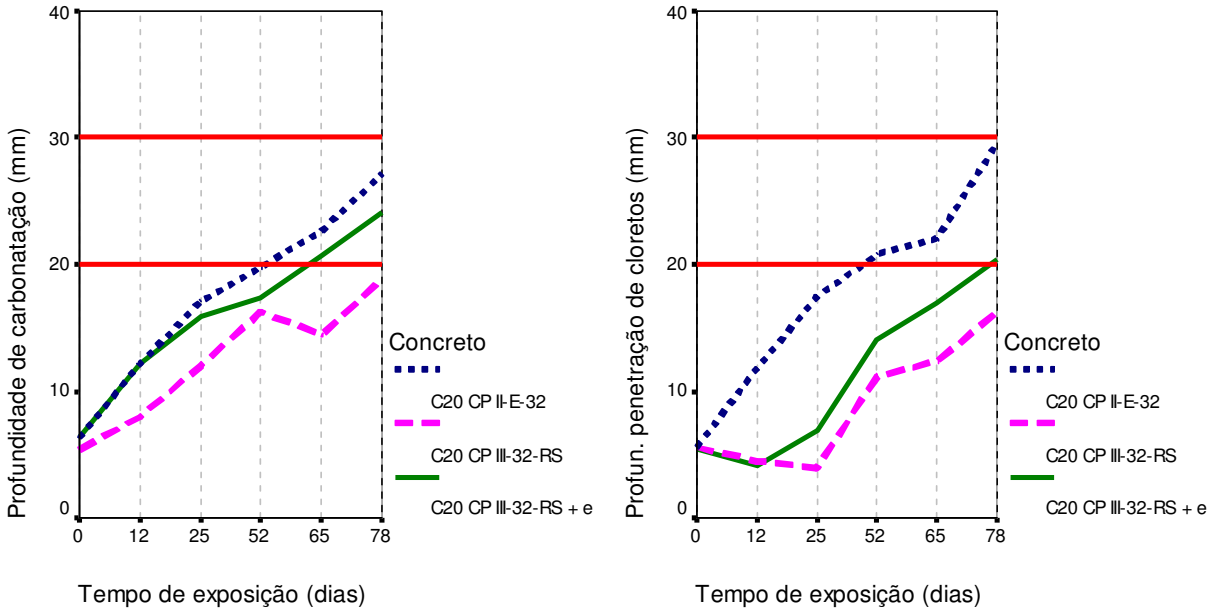
Além disso, esse concreto tem consumo de material cimentício (C) praticamente equivalente ao do concreto com o CP II-E-32 e maior que o do concreto com o CP III-32-RS para a mesma classe de resistência (Tabela 4.19, Capítulo 4 e Figura 5.12), o que resulta em maior

volume de pasta e conseqüente maior teor relativo de escória de alto-forno, que por sua vez diminui o teor de hidróxido de cálcio que possa reagir com $CO_2$ na frente de carbonatação (BAUER, 1995; JAU; TSAY, 1988).

No concreto com o menor teor de escória – com o cimento CP II-E-32 – prevaleceu a frente de cloretos após o 5º ciclo, pois a fixação de cloretos foi provavelmente mais baixa em baixo teor de escória, o que fez a frente de cloretos avançar (Figura 5.10). Além disso, esse concreto possui maior consumo de material cimentício (C) e maior teor de pasta para a mesma classe de resistência (Tabela 4.19, Capítulo 4), o que intensifica a influência do menor teor de escória (30%) que tem menor capacidade de fixação de cloretos (BAUER, 1995; JAU; TSAY, 1988).

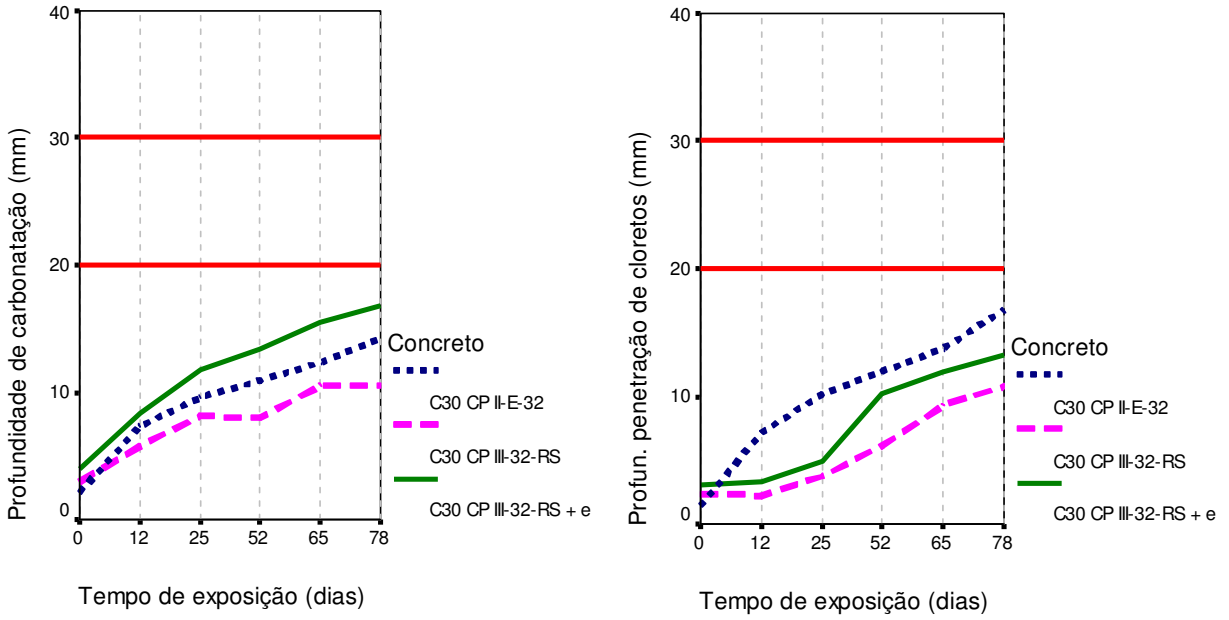
As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam a profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos ao longo do **tempo de exposição**. Em todas as classes de resistência, observa-se que, aumentando-se o tempo de exposição aos ciclos, há um aumento da profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos (Figuras 5.13, 5.14 e 5.15).

Após o período da bancada, compreendido entre o 25º e o 52º dia de exposição ao envelhecimento acelerado, ocorrem oscilações nas profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos (Figuras 5.13, 5.14 e 5.15).



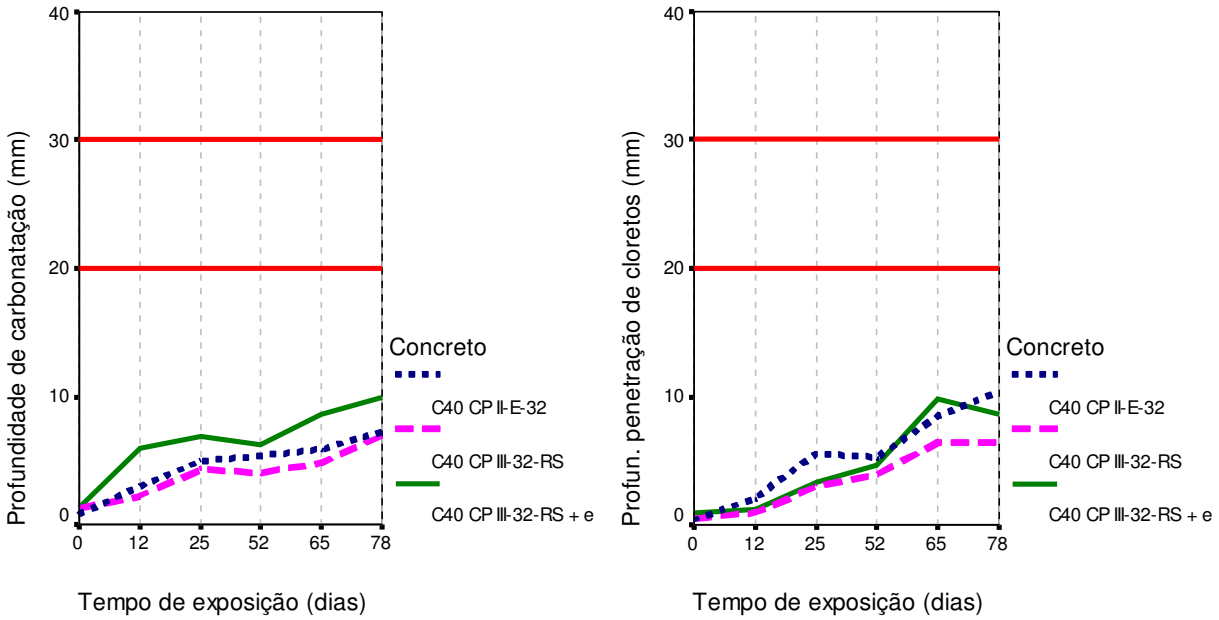

a) profundidade de carbonatação b) penetração de cloretos

**Figura 5.13: Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos, para a classe C20 durante os ciclos.**




a) profundidade de carbonatação b) penetração de cloretos

**Figura 5.14: Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos, para a classe C30 durante os ciclos.**




a) profundidade de carbonatação b) penetração de cloretos

**Figura 5.15: Profundidade de: a) carbonatação, b) penetração de cloretos, para a classe C40 durante os ciclos.**

Nesse período, o concreto passou primeiramente por 3 dias na estufa, depois ficou 12 dias na bancada, e em seguida passou mais duas vezes sucessivas pela estufa a 50°C (24 horas, e depois mais 24 horas). Seguiu o ciclo, passando pela câmara de carbonatação, e depois se

efetuaram as medidas de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos. Essas leituras correspondem ao tempo de exposição de 52 dias.

Existem algumas possibilidades que explicam essas oscilações. A primeira é que pode ter havido modificações microestruturais favoráveis devido à cura em ambiente natural protegido com manta de polietileno sobre a bancada – oscilações também verificadas nos trabalhos de Jau e Tsay (1998) e de Suryavanshi e Swamy (1996). O pequeno recuo na frente de carbonatação de alguns concretos pode apontar para uma recuperação da alcalinidade, em virtude da interrupção do envelhecimento acelerado por $CO_2$, que provavelmente modificou ligeiramente o pH. Outros estudos corroboram esse efeito (DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996; SURYAVANSHI; SWAMY, 1996).

Por outro lado, o mecanismo de carbonatação é dificultado em ambiente interno seco, ou no concreto seco. Essa possibilidade foi explicada por López, González e Andrade (1993) e por Steffens, Dinkler e Ahrens (2002), e está bem clara na tabela de classes de exposição das normas européia e alemã, na qual a classe de exposição ambiental, na condição de carbonatação em ambiente interno seco, é considerada a menos agressiva (GRUBE; KERKHOFF, 2004).

Estender o período de secagem pode aumentar o ingresso de cloretos através de absorção capilar. A taxa de secagem depende da estrutura de poro do concreto, e, como resultado, concretos ou argamassas de estrutura de poro mais densa secam a uma taxa mais lenta (BAUER, 1995; HONG; HOOTON, 1999), fazendo com que os concretos com maiores teores de escória e menores relações água/material cimentício apresentem um aumento de penetração de cloretos no período de bancada, ou logo após, por causa da ascensão capilar (Figuras 5.13-b, 5.14-b e 5.15-b).

A higroscopia de cloretos, o efeito de fixação de cloretos, a cristalização de NaCl nos poros e o aumento da viscosidade da solução salina também podem afetar o acesso de $CO_2$ no concreto e dificultar a carbonatação. Variações na porosidade, na resistência à compressão, na umidade e temperatura do concreto, embora pequenas, são refletidas no comportamento da carbonatação (CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000; CHRISP et al., 2002).

Outra influência é a própria carbonatação que, em alguns estágios, pode dificultar a carbonatação subseqüente devido à obturação dos poros. Nos primeiros ciclos, a taxa ou coeficiente de carbonatação é maior, principalmente nos concretos com maior teor de escória, maior volume de pasta e menor relação água/material cimentício. Também é maior em virtude

da grande quantidade de fissuras de retração química provenientes da hidratação (autógena). Depois de o concreto sofrer alguma carbonatação, essa taxa tende a diminuir por algum tempo por causa da obturação dessas fissuras (CASTRO et al., 2004; HOUST; WITTMANN, 2002).

Mas, quando o $Ca(OH)_2$ se esgota, e o $CO_2$ começa a reagir com o C-S-H, ocorre a formação de sílica gel, e, como conseqüência, um aumento no volume e na comunicabilidade de poros. Com o progresso do mecanismo, as fissuras começam a se desenvolver novamente, devido à retração por carbonatação, o que acelera novamente a taxa de carbonatação (ÇOPUROĞLU; FRAAIJ; BIJEN, 2006; IHEKWAHA; HOPE; HANSSON, 1996; MUKHERJEE, 2004; NEVILLE, 1997; RICHARDSON, 1998; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Os menores resultados de profundidade, tanto de carbonatação quanto de penetração de cloretos, são os do concreto com o cimento CP III-32-RS, que apresenta as menores profundidades durante todos os ciclos e em todas as classes (Figuras 5.13, 5.14 e 5.15).

Durante o período de envelhecimento acelerado, o concreto com o cimento CP III-32-RS + e mantém os maiores resultados de profundidade de carbonatação nas classes C30 e C40 (Figuras 5.14-a e 5.15-a). Esses concretos mostram ser mais sensíveis às modificações microestruturais causadas pela carbonatação, durante a exposição ao envelhecimento acelerado (Figuras 5.14-a e 5.15-a). Isso se deve ao maior teor de escória combinado ao maior consumo de materiais cimentícios (C) dos traços dessas classes, conforme resultados de outros autores (BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2001; BAUER, 1995; CASTRO, 2003; ÇOPUROĞLU; FRAAIJ; BIJEN, 2006; NEVILLE, 1997).

Para a resistência ao ataque de cloretos, o concreto com o CP III-32-RS + e apresenta profundidades intermediárias entre o concreto com o cimento CP II-E-32 e o com o cimento CP III-32-RS e, também, para todas as classes de resistência durante o envelhecimento acelerado ao longo do tempo de exposição (Figuras 5.13-b, 5.14-b e 5.15-b). Por possuir maior teor de escória, pode apresentar menor profundidade de penetração de cloretos.

Percebe-se que, aumentando-se a classe de resistência, as diferenças no comportamento entre os concretos com os três tipos de materiais cimentícios diminuem (Figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15), o que sugere que a formação de microestrutura mais densa nas classes de maior resistência sobrepõe-se às diferenças nos teores de escória (CASTRO et al., 2004).

As Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 expõem as amostras fraturadas dos ensaios com as soluções de fenolftaleína e nitrato de prata, de maneira que se podem observar a profundidade atingida por carbonatação, na faixa branca, e a profundidade atingida por cloretos, na faixa mais clara.

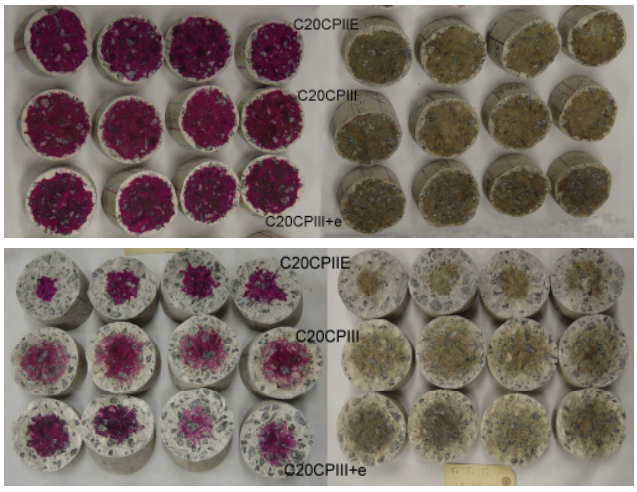



**Figura 5.16: Carbonatação e cloretos da classe C20: a) a 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; b) após o 5º ciclo de envelhecimento acelerado.**

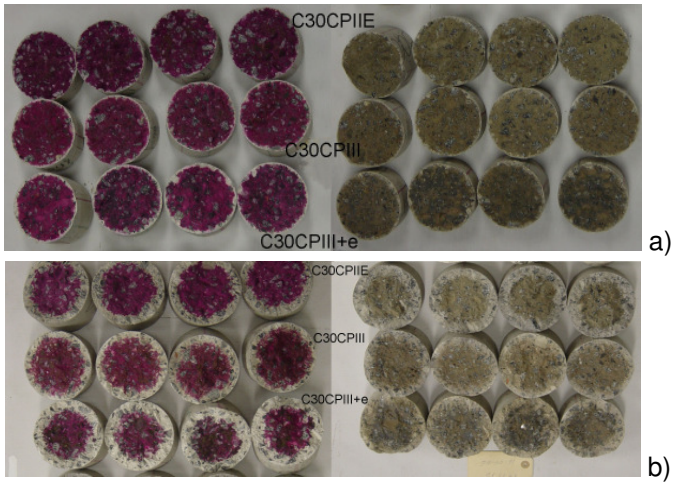



**Figura 5.17: Carbonatação e cloretos da classe C30: a) a 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; b) após o 5º ciclo de envelhecimento.**

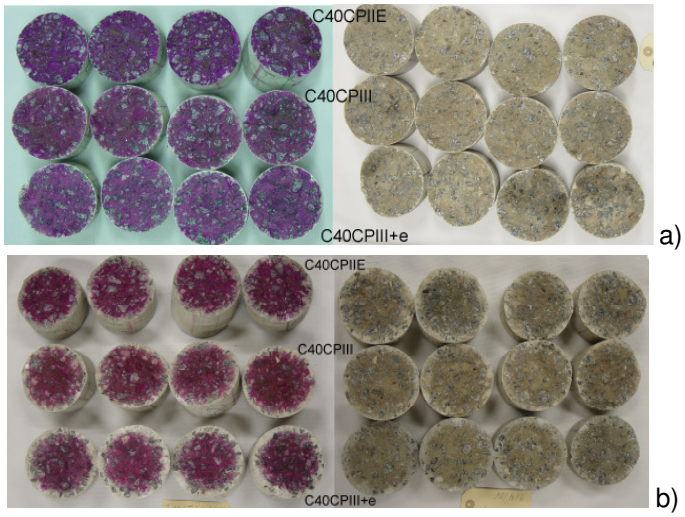



**Figura 5.18: Carbonatação e cloretos da classe C40: a) a 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; b) após o 5º ciclo de envelhecimento.**

## 5.5 Resistividade elétrica aparente do concreto na condição natural

Nas Figuras 5.19 e 5.20, verifica-se que, aumentando-se o período de exposição ou o grau de hidratação, os valores de resistividade elétrica aparente também aumentam (GÜNEYISI; ÖZTURAN; GESOĐLU, 2005; HOU; CHANG; HWANG, 2004; MISSAU et al., 2004).

Pode-se notar neste estudo que os valores de resistividade elétrica aparente extrapolam até mesmo a capacidade de leitura do equipamento de medida utilizado, que é de 99 kΩ.cm. Os concretos com o maior teor de escória, com o cimento CP III-32-RS + e, tendem a superar esse valor. Esse comportamento observado em todas as classes de resistência (Figuras 5.19 e 5.20) é confirmado por resultados de trabalhos anteriores, que mostraram um grande aumento de resistividade elétrica em concretos com alto teor de escória: 65% no de Castro (2003), 70% no de Wegner et al. (2005) e 75% no trabalho de Polder e Peelen (2002).

Além disso, a resistividade elétrica tende a diminuir com o aumento da relação água/material cimentício e depende também da umidade de equilíbrio do concreto, resultados também confirmados por outros estudos (LIU, 1996; POLDER; PEELEN, 2002; WEE; SURYAVANSHI; TIN, 1999; WEGNER et al., 2005).

Percebe-se que os valores de resistividade elétrica aparente do concreto na condição natural aumentam com o aumento do teor de escória e da classe de resistência (Figuras 5.19, 5.20); e que ocorre maior dispersão dos valores, ou maior desvio-padrão, nas misturas de maior relação água/material cimentício (Figuras 5.19-b, 5.19-e e 5.20-b).

O refinamento de poros proporcionado por concretos com maiores classes de resistência, maior teor de escória de alto-forno e menores relações água/material cimentício (Figuras 2.3 e 2.4, Capítulo 2) sugere uma maior densificação da matriz de cimentícios, o que aumenta a resistividade (Figuras 5.19-c, 5.19-f e 5.20-c) (BAUER, 1995).

Os concretos com o cimento CP III-32-RS são os que têm o menor consumo de material cimentício (C) e a maior relação água/material cimentício (Quadro 4.19, Capítulo 4); e, por classe de resistência e para relação água/material cimentício acima de 0,50, possuem a menor absorção de água por imersão, o menor índice de vazios e a menor absorção capilar (Figuras 2.2-b, 2.2-c e 2.3-c, Capítulo 2). Considerando-se que a resistividade é influenciada pela umidade, esses concretos aparentam ter umidade mais heterogênea, tendo em vista a maior dispersão dos valores de resistividade (Figuras 5.19-b, 5.19-e, 5.20-b) (LIU, 1996; POLDER; PEELEN, 2002; WEE; SURYAVANSHI; TIN, 1999).

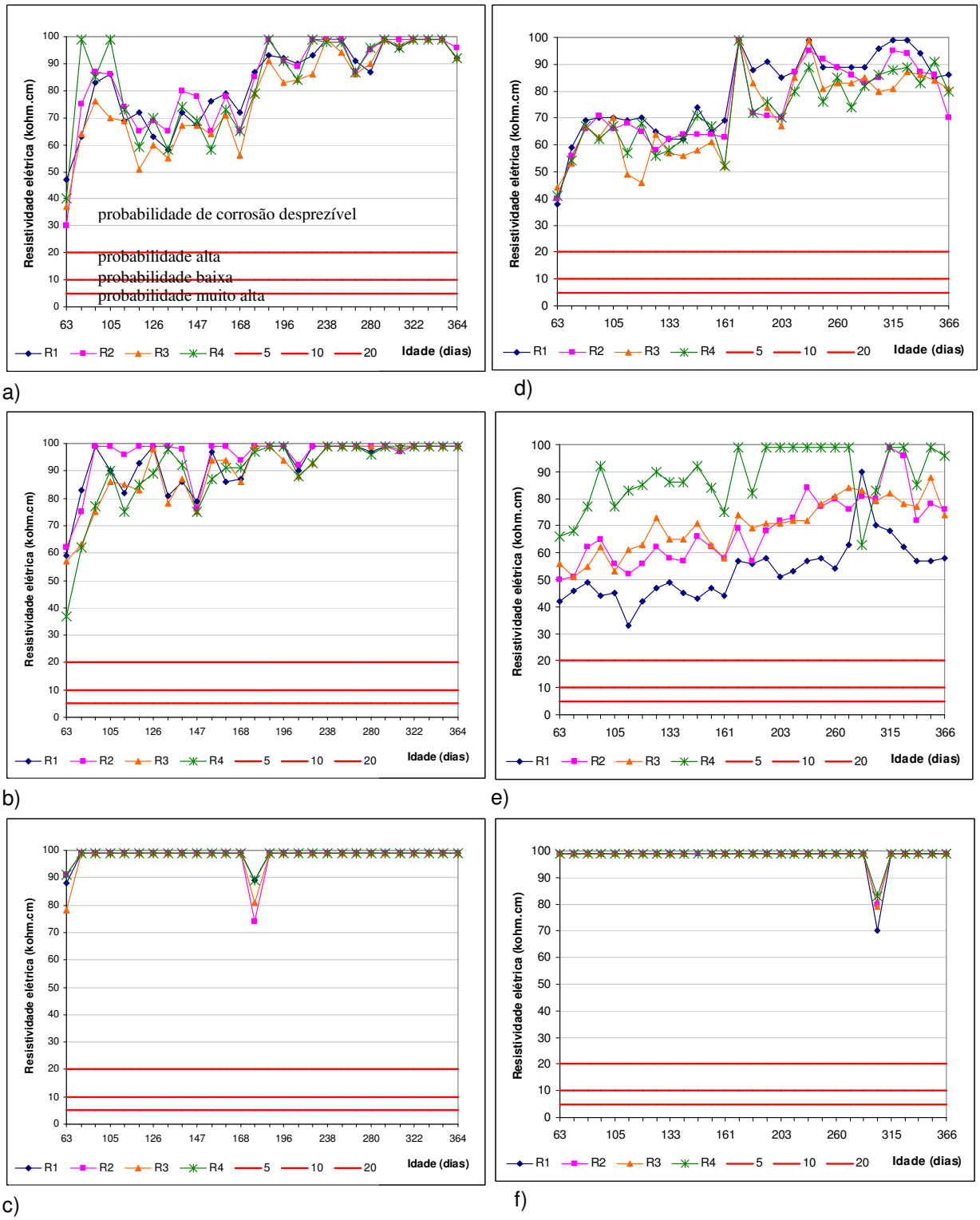



**Figura 5.19: Resistividade elétrica aparente do concreto em função do tempo de exposição para os traços: a) T1 (C20 CP II-E-32); b) T2 (C20 CP III-32-RS); c) T3 (C20 CPIII-32-RS + e); d) T4 (C30 CP II-E-32); e) T5 (C30 CP III-32-RS); f) T6 (C30 CPIII-32-RS + e).**

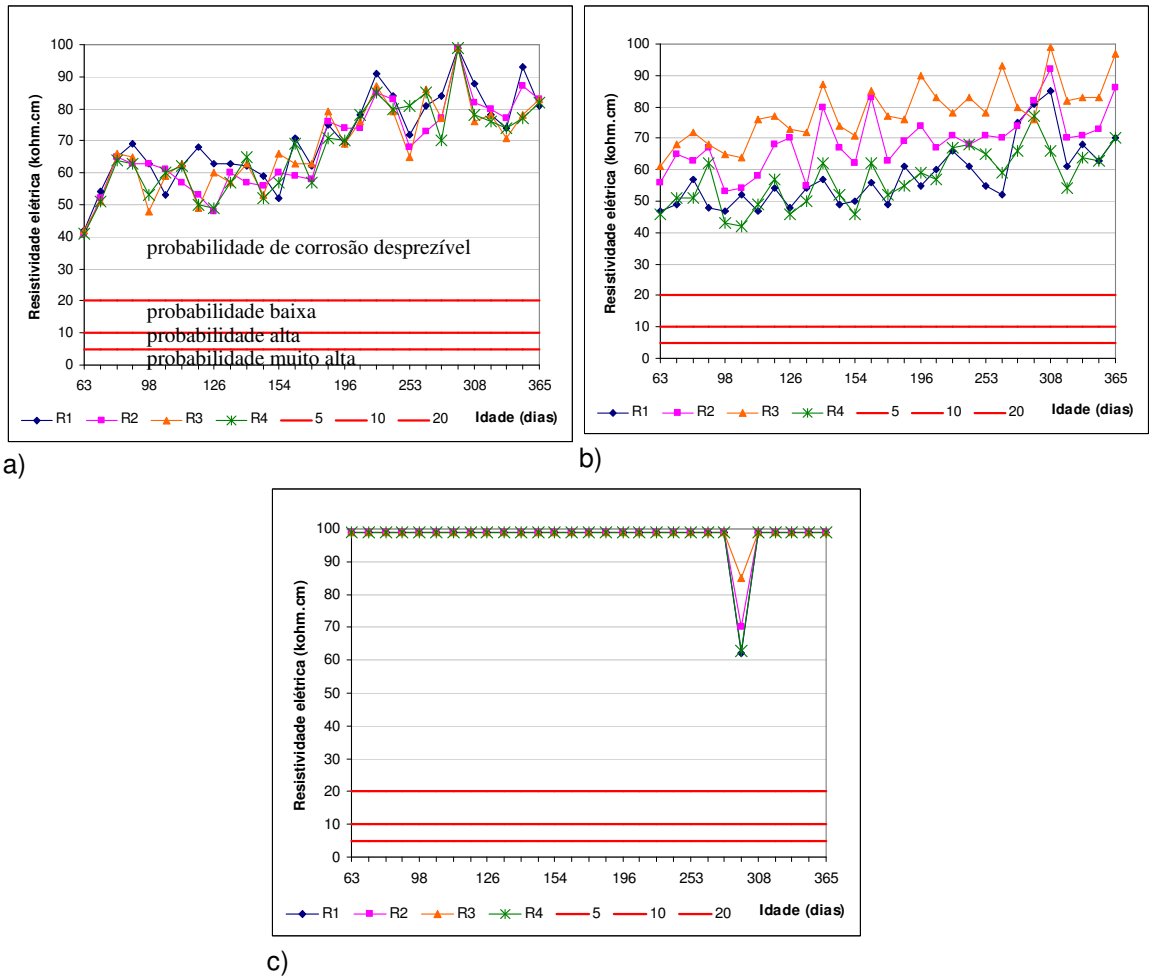



**Figura 5.20: Resistividade elétrica aparente do concreto em função do tempo de exposição para os traços: a) T7(C40 CP II-E-32); b) T8 (C40 CPIII-32-RS); c) T9 (C40 CPIII-32-RS + e).**

## 5.6 Resistividade elétrica aparente do concreto na condição de envelhecimento acelerado

Na Figura 5.21 e nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12, Anexos E e F, observa-se que um aumento do período de exposição ao envelhecimento acelerado corresponde à queda na resistividade elétrica aparente do concreto; esse período leva a uma aceleração nas modificações microestruturais causadas pelos mecanismos simultâneos de carbonatação e de penetração de cloretos.

Observando-se os valores de resistividade elétrica aparente do concreto, verifica-se que as maiores classes de resistência sofrem menor influência do efeito do ataque conjunto de carbonatação e cloretos.

Nos concretos das maiores classes de resistência, os valores de resistividade elétrica aparente são maiores do que nos concretos de menor classe de resistência, mesmo após o ataque conjunto de carbonatação e cloretos (Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12, Anexos E e F, e Figuras 5.21 e

5.22-a). Esses valores tendem a ser maiores do que 20 kΩ.cm (probabilidade de corrosão desprezível) com o aumento da classe de resistência, durante o envelhecimento acelerado. Isso se deve à menor absorção capilar e altura de ascensão capilar, ou, provavelmente, ao maior refinamento, descontinuidade e tortuosidade de poros (Figuras 2.3-a e 2.4-a, Capítulo 2) e à formação de matriz de cimentícios mais densa das maiores classes de resistência, o que dificulta a difusão de $CO_2$ e de $Cl^-$, e a passagem de corrente elétrica e a migração de íons do ensaio (variável interveniente).

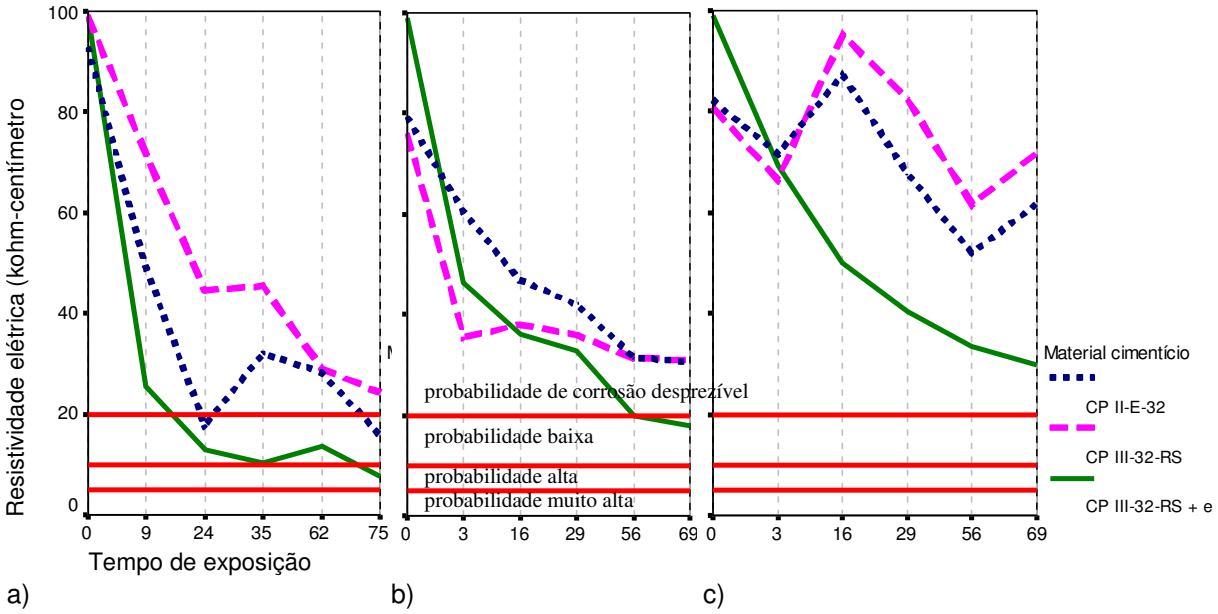
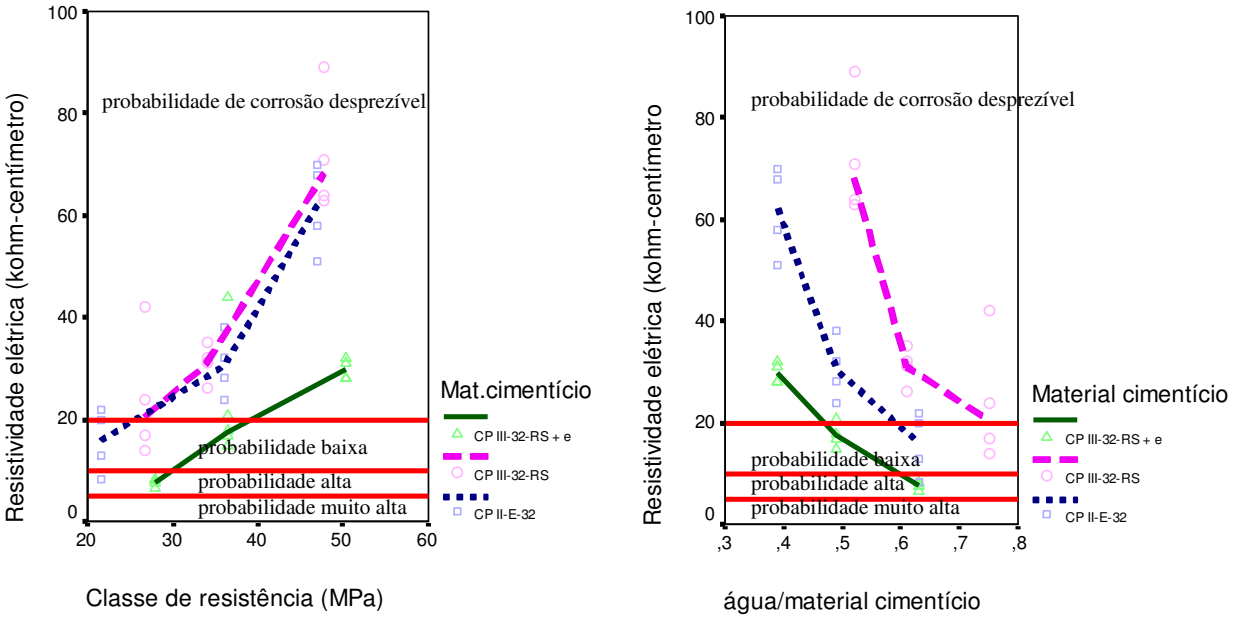



**Figura 5.21: Resistividade elétrica aparente do concreto na condição de envelhecimento acelerado em função do tempo de exposição para: a) classe C20; b) classe C30, e; c) classe C40.**

No entanto, diminuindo-se a classe de resistência, a queda na resistividade elétrica aparente do concreto é maior (Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12, Anexos E e F, e Figuras 5.21 e 5.22-a) (MISSAU et al., 2004).

Quando se observa o comportamento dos três concretos numa mesma classe de resistência ao longo do tempo de exposição, verifica-se que as menores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos em todas as classes de resistência são as do concreto com o cimento CP III-32-RS (Figuras 5.13, 5.14 e 5.15), o qual apresenta menor queda na resistividade elétrica aparente (Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12, Anexos E e F e Figuras 5.21 e 5.22-a), repetindo o mesmo comportamento isolado da profundidade de carbonatação (Figuras 5.8-a, 5.9-a, 5.13-a, 5.14-a, 5.15-a e 5.21-a) e de penetração de cloretos (Figuras 5.8-b, 5.9-b, 5.13-b, 5.14-b, 5.15-b e 5.21-b).




a) b)

**Figura 5.22: Resistividade elétrica aparente após o 5º ciclo de envelhecimento em função do tempo de exposição para as misturas com CP II-E-32, CP III-32-RS e com CP III-32-RS + e em função: a) da classe real de resistência; b) da relação água/material cimentício.**

É importante lembrar que o concreto com o cimento CP III-32-RS é o que apresenta os menores valores de absorção de água por imersão e índice de vazios, para uma mesma relação água/material cimentício (Figuras 2.2-b e 2.2-c, Capítulo 2), e que a resistividade elétrica do concreto está diretamente relacionada a essas grandezas (LIU, 1996; POLDER; PEELEN, 2002; WEE; SURYAVANSHI; TIN, 1999). É o que sofre a menor influência do ataque conjunto de carbonatação e cloretos, e mostra a menor queda na resistividade elétrica aparente, analisando-se tanto a classe de resistência quanto a relação água/material cimentício (Figuras 5.22-a e 5.22-b), conforme resultados anteriores de Polder e Peelen (2002).

O concreto com o cimento CP III-32-RS + e apresenta os menores resultados e a maior queda (taxa de diminuição) na resistividade elétrica aparente, atenuando-se ao final dos ciclos, no ataque conjunto de carbonatação e cloretos entre os concretos com os três tipos de materiais cimentícios numa mesma classe de resistência (Figura 5.21). Os resultados mais baixos na resistividade elétrica aparente coincidem com os maiores valores de carbonatação no envelhecimento acelerado, principalmente para resistência à compressão abaixo de 27 MPa, e nas relações água/material cimentício acima de 0,52 (Tabela 5.8, Anexo D, Figuras 5.6, 5.8-a, 5.9-a, 5.10-a, 5.10-b, 5.11-a, 5.11-b, 5.12-a, 5.12-b, 5.14-a, 5-15-a e 5.21).

O concreto de classe C40 com o cimento CP II-E-32 e o com o CP III-32-RS + e foram os que apresentaram a mesma absorção de água por imersão, a mesma altura de ascensão capilar

(Figuras 2.2-b e 2.4-b, Capítulo 2), e os que tiveram o mesmo traço, diferindo apenas no teor de escória (Quadro 4.19, Capítulo 4). O de maior teor de escória teve maior profundidade de carbonatação (Figura 5.9 e comparando-se as Figuras 5.10-a e 5.12-a) por causa do maior volume de pasta com maior teor de escória, proveniente do maior consumo de materiais cimentícios (C) (BAUER, 1995; JAU; TSAY, 1998).

Provavelmente, a modificação da porosidade do concreto com o cimento CP III-32-RS + e e a desestabilização das fases devida à perda alcalina causada pela carbonatação produziram eletrólito, o qual contribuiu para a queda na resistividade. Essa desestabilização de fases pode incluir o $CaCO_3$, quando o ataque de cloretos for mais agressivo (BURLION; BERNARD; CHEN, 2006; CHEN; THOMAS; JENNINGS, 2006), e AFm e cloroaluminato, quando o grau de carbonatação for mais agressivo (GLASS; BUENFELD, 2000; KURDOWSKI, 2004; GOÑI; GUERRERO, 2003).

A profundidade de cloretos era medida no concreto recém-carbonatado e mais seco, mas a resistividade era medida após a passagem pela névoa salina, portanto, no concreto mais úmido. Houve boa fixação de cloretos no concreto com o cimento CP III-32-RS + e, mas quando se media a resistividade, logo após a passagem pela névoa salina, poderia haver cloretos livres, e também poderia haver desestabilização de fases no concreto fortemente carbonatado, cuja estabilidade depende de pH suficientemente alcalino, o que poderia liberar íons na solução de poro, daí o registro de queda na resistividade (GLASS; BUENFELD, 2000; KURDOWSKI, 2004; PRUCKNER; GJØRV, 2004). Apesar dessa queda, esse concreto manteve, ao final dos ciclos, probabilidade desprezível de corrosão (Figura 5.21-c).

Mas não se sabe ao certo a causa da queda observada na resistividade do concreto com alto teor de escória, CP III-32-RS + e, comparando-se a condição natural com a condição de envelhecimento acelerado (Figuras 5.19, 5.20, 5.21). Mais estudos são necessários para explicá-la. Pode-se admitir que houve boa fixação de cloretos no concreto com o cimento CP III-32-RS + e na classe C40, pois a frente de carbonatação é a que prevaleceu (comparem-se as Figuras 5.10-a e 5.12-a).

A queda da resistividade provavelmente também ficou ligada à formação de microfissuras, por causa da retração proveniente da carbonatação, do ataque de cloretos e da secagem (HOUST; WITTMANN, 2002; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994; KANNA; OLSON; JENNINGS, 1998; MINDESS; YOUNG, 1981 apud HELENE, 1993; RICHARDSON, 1998).

Apesar de saber-se que a presença de íons (cloretos) e a maior taxa de fluxo pela porosidade diminuem a resistividade elétrica aparente do concreto, que os maiores teores de escória o protegem melhor do ataque de cloretos, e que a difusão de cloretos na interface aço-concreto é limitada pelo concreto denso (ANDRADE, 1993; BASHEER et al., 2002; HELENE, 1993; HONG; HOOTON, 1999), verifica-se, relativamente, que o concreto com o cimento CP III-32-RS + e apresenta maiores profundidades de penetração de cloretos que o concreto com o cimento CP III-32-RS (Tabela 5.9, Anexo D, Figuras 5.7, 5.8-b, 5.9-b, 5.13-b, 5.14-b).

Neste estudo, na maioria das vezes, a capacidade de proteção do cobrimento quanto à carbonatação e à penetração de cloretos no concreto com o cimento CP II-E-32 e no com o cimento CP III-32-RS + e é mais semelhante, porque seus consumos de materiais cimentícios (C) e relações água/materiais cimentícios são próximos. O que muda radicalmente entre as duas dosagens é a proporção de escória/consumo de material cimentício (C). Ambas as dosagens produziram esses concretos com porosidade mais semelhante do que a do concreto com o cimento CP III-32-RS (Figuras 2.2, 2.3 e 2.4, Capítulo 2).

Dependendo do volume de pasta, da resistência à compressão, da relação água/material cimentício e da condição de exposição, a porosidade resultante pode favorecer a penetração de agentes agressivos. Para o concreto com o cimento CP II-E-32, isso se deve à maior ascensão capilar (principalmente para resistência à compressão abaixo de 27 MPa e relação água/material cimentício acima de 0,52 – Tabela 5.5, Anexo B, Figuras 2.3 e 2.4, Capítulo 2), o que facilita a penetração de cloretos, que é controlada pelo teor de escória e pela reserva alcalina (baixo teor de escória e/ou pH mais baixo dificultam a fixação). Já para o concreto com o cimento CP III-32-RS + e, deve-se à maior absorção de água por imersão e maior índice de vazios (Figuras 2.2-b, 2.2-c, Capítulo 2), o que propicia mais espaço para o mecanismo e deposição da carbonatação (Figuras 5.8 e 5.9).

Existem poucos estudos sobre as alterações microestruturais causadas pelo ataque conjunto de carbonatação e de cloretos no concreto; mas a maior queda verificada na resistividade elétrica aparente para o concreto com o cimento CP III-32-RS + e sugere que, com o progresso dos ataques, ocorre a formação de poros grandes e comunicáveis, e/ou a liberação de íons, ao menos em alguma espessura de cobrimento, que faz registrar a baixa resistividade elétrica aparente em relação aos demais concretos para uma mesma resistência. Pode-se atribuir a formação de poros grandes e comunicáveis no concreto carbonatado às prováveis alterações microestruturais causadas pela carbonatação no concreto com o maior teor de escória de alto-

forno deste estudo (88%) (BAUER, 1995; CASTRO, 2003; ÇOPUROĞLU; FRAAIJ; BIJEN, 2006; NEVILLE, 1997).

Há três causas prováveis para a alta concentração de íons. A primeira se deve provavelmente à instabilidade de cloroaluminatos eventualmente fixados, liberando cloretos na solução de poro com o baixo pH causado pela carbonatação (GLASS; BUENFELD, 2000; KURDOWSKI, 2004; PRUCKNER; GJØRV, 2004). A segunda se refere ao aumento de eletrólito devido à liberação de água produzida pelas reações de carbonatação (Equações 2.13 e 2.14, Capítulo 2), que é maior nos concretos com escória, ou devido à taxa de secagem mais lenta em concretos de estrutura de poro mais densa (BAUER, 1995; HONG; HOOTON, 1999) ou, ainda, devido a ambas as causas concomitantemente. E a terceira tem haver com o relativo maior consumo de materiais cimentícios (C), que produz maior volume de pasta, e, conseqüentemente, maior volume de fases desestabilizáveis, além de maior teor de escória que tem compostos de enxofre (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.11, Capítulo 4) (BAUER, 1995; CHRISP et al., 2002; GÜNEYISI; ÖZTURAN; GESOĐLU, 2005; POLDER; PEELEN, 2002; YEAU; KIM, 2005).

A soma dos teores de $Al_2O_3$ e $Fe_2O_3$ sobre a massa total de materiais cimentícios, é maior no concreto com o cimento CP III-32-RS + e (Quadros 4.11, 4.12, 4.15, Capítulo 4). Isso pode propiciar a fixação de cloretos nesse concreto. Isaia (1995) encontrou boa correlação entre a fixação de cloretos e tais teores ao estudar pozolanas. Porém, cloretos antes fixados podem ser liberados na solução de poro, devido à queda no pH, causando conseqüente queda na resistividade do concreto (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001; GLASS; BUENFELD, 2000; PRUCKNER; GJØRV, 2004).

Além disso, os corpos-de-prova passam pela carbonatação e seguem para a névoa salina antes das medidas de resistividade e do potencial de corrosão, o que pode influir também na formação de eletrólito. O concreto com capacidade de absorção e fixação de cloretos superior atinge relação $Cl^-/OH^-$ crítica em menor tempo (BAUER, 1995).

Certamente, estudos precisam ser conduzidos para comprovar a primeira causa: a liberação de íons devido à instabilidade de cloroaluminatos no ataque conjunto de carbonatação e de cloretos, até porque a espessura de cobrimento na qual ocorre a liberação de cloretos, devido à carbonatação, depende da espessura da camada carbonatada e de seu grau de carbonatação.

Sob a influência de uma solução agressiva, se houver reações de hidrólise e lixiviação, poderá haver transporte por difusão de agentes agressivos presentes no ambiente para o interior do

concreto, e de produtos dissolvidos no interior do concreto para o ambiente. Esse mecanismo causa aumento no número de poros grandes e comunicáveis na pasta de cimento hidratada (BURLION; BERNARD; CHEN, 2006; CHEN; THOMAS; JENNINGS, 2006).

## 5.7 Potencial de corrosão na condição natural

As Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 mostram a evolução do potencial de corrosão ao longo do tempo para a classe C20; as Figuras 5.26, 5.27 e 5.28, para a classe C30; e as Figuras 5.29, 5.30 e 5.31, para a classe C40.

Observa-se que há uma leve tendência de os potenciais tornarem-se mais positivos com o aumento da classe de resistência, e que a classe de menor resistência, C20, é a que passiva mais tardiamente as armaduras, comparada às demais classes deste estudo.

Na exposição em ambiente natural, as condições que podem interferir na medida do potencial de corrosão (carbonatação, cloretos, concreto muito seco, concreto de alta resistividade, temperatura, concentração de eletrólito, entre outros) (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997) são mais estáveis e dão maior segurança à interpretação dos resultados.

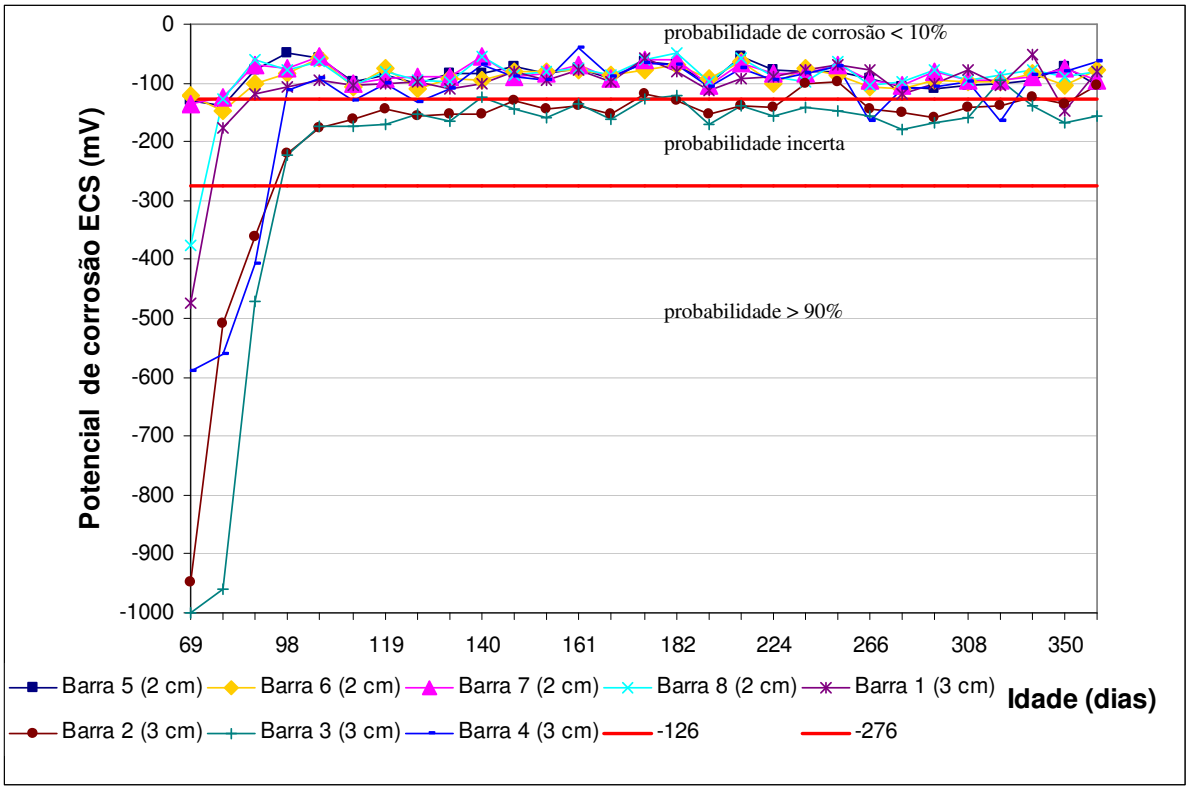



**Figura 5.23: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C20 com o cimento CP II-E-32, na condição natural.**

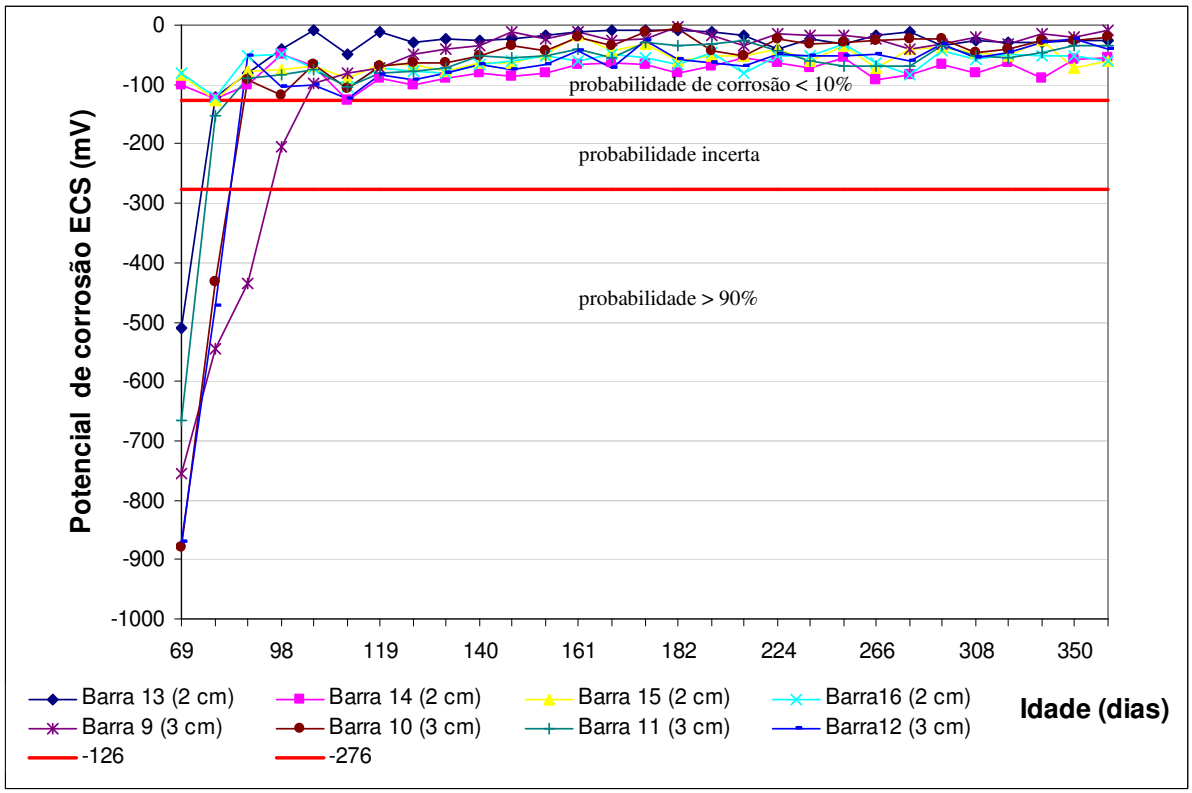



**Figura 5.24: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C20 com o cimento CP III-32-RS, na condição natural.**

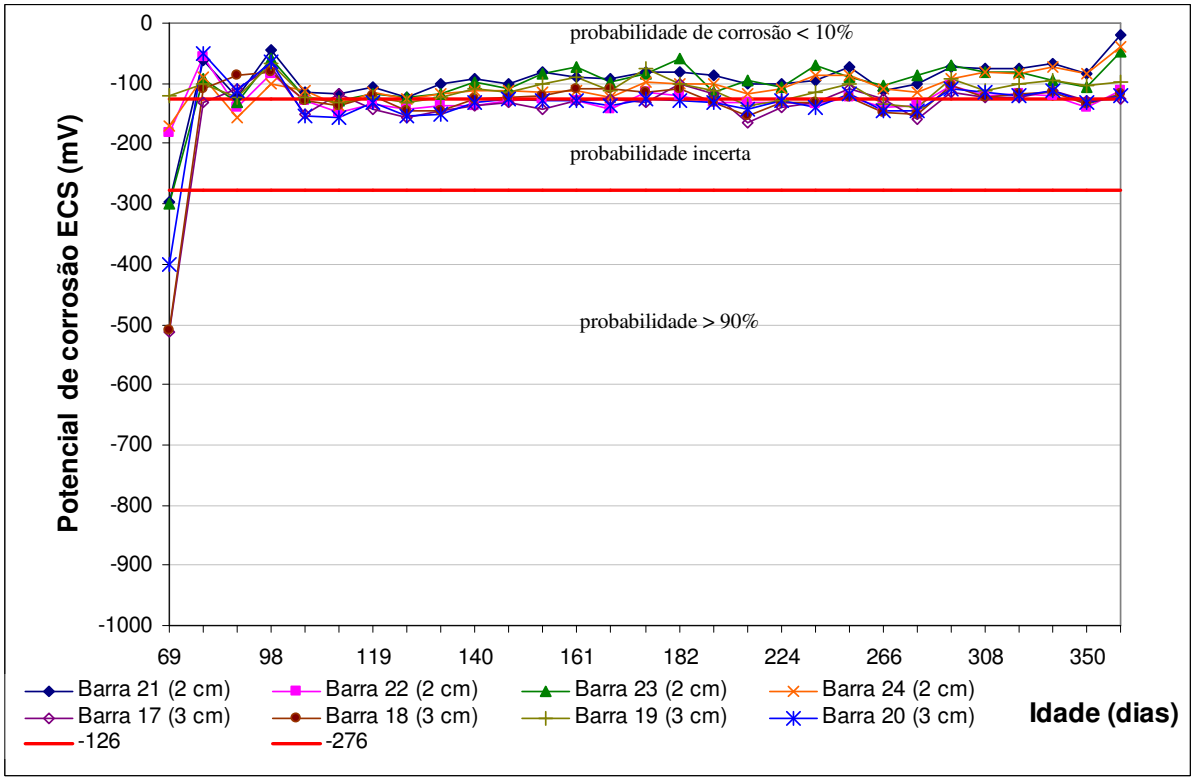



**Figura 5.25: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C20 com o cimento CP III-32-RS + e, na condição natural.**

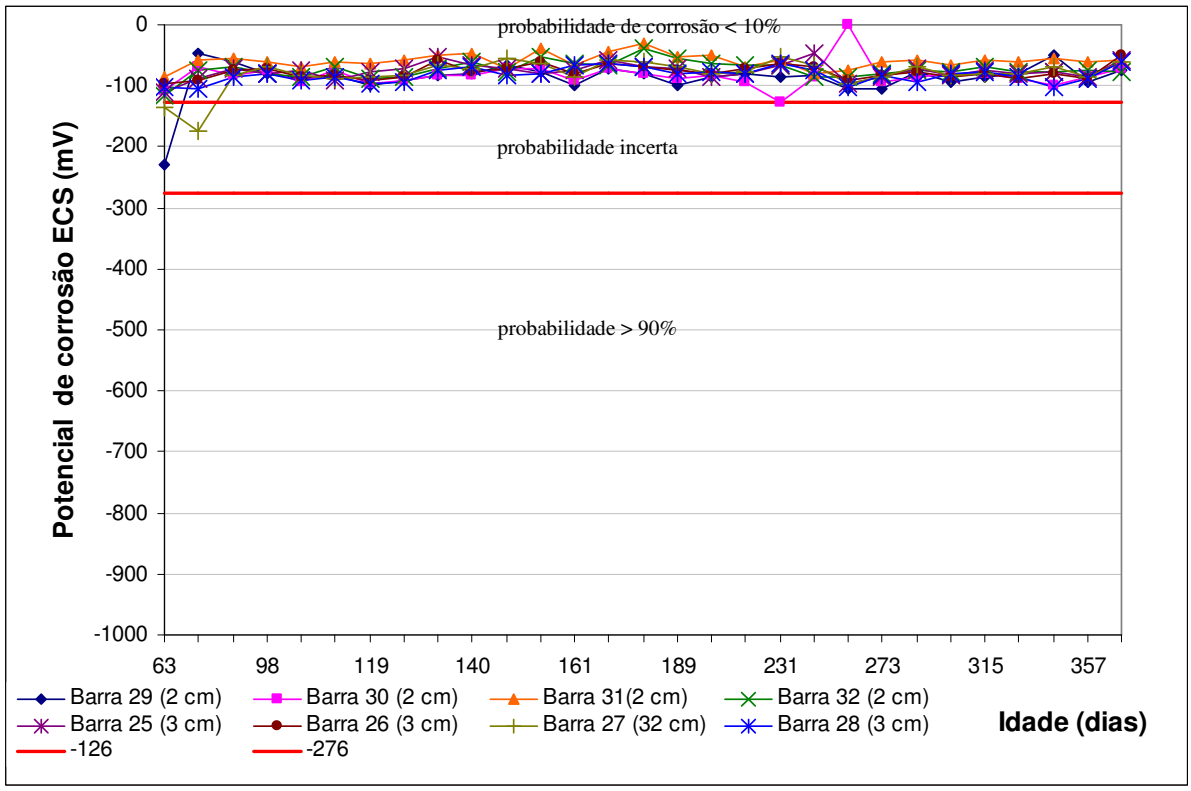



**Figura 5.26: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C30 com o cimento CP II-E-32, na condição natural.**

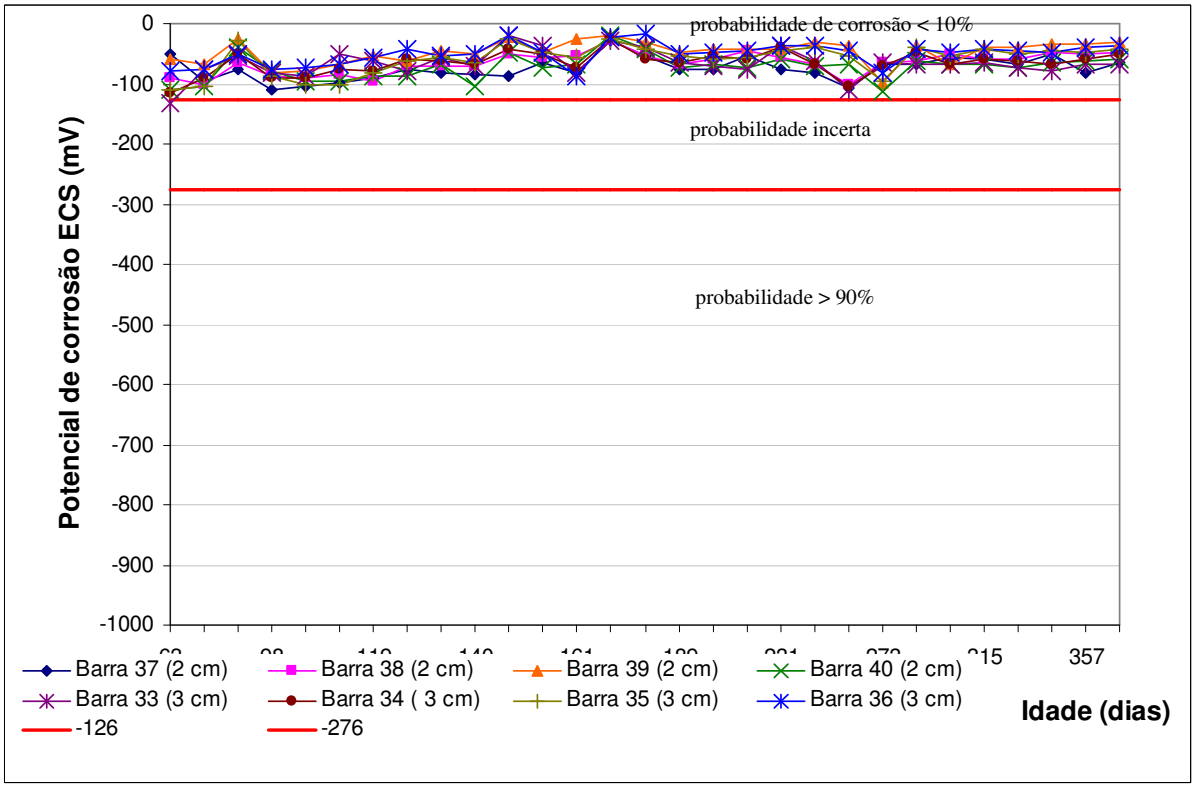



**Figura 5.27: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C30 com o cimento CP III-32-RS, na condição natural.**

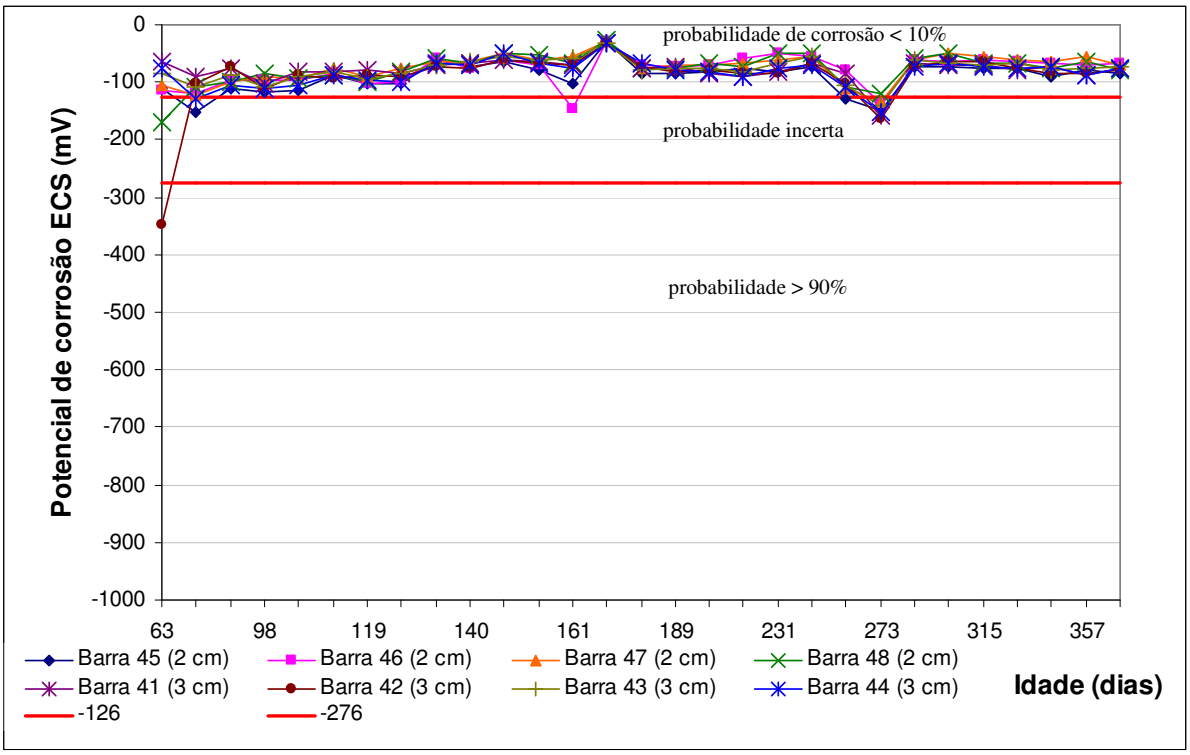



**Figura 5.28: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C30 com o cimento CP III-32-RS + e, na condição natural.**

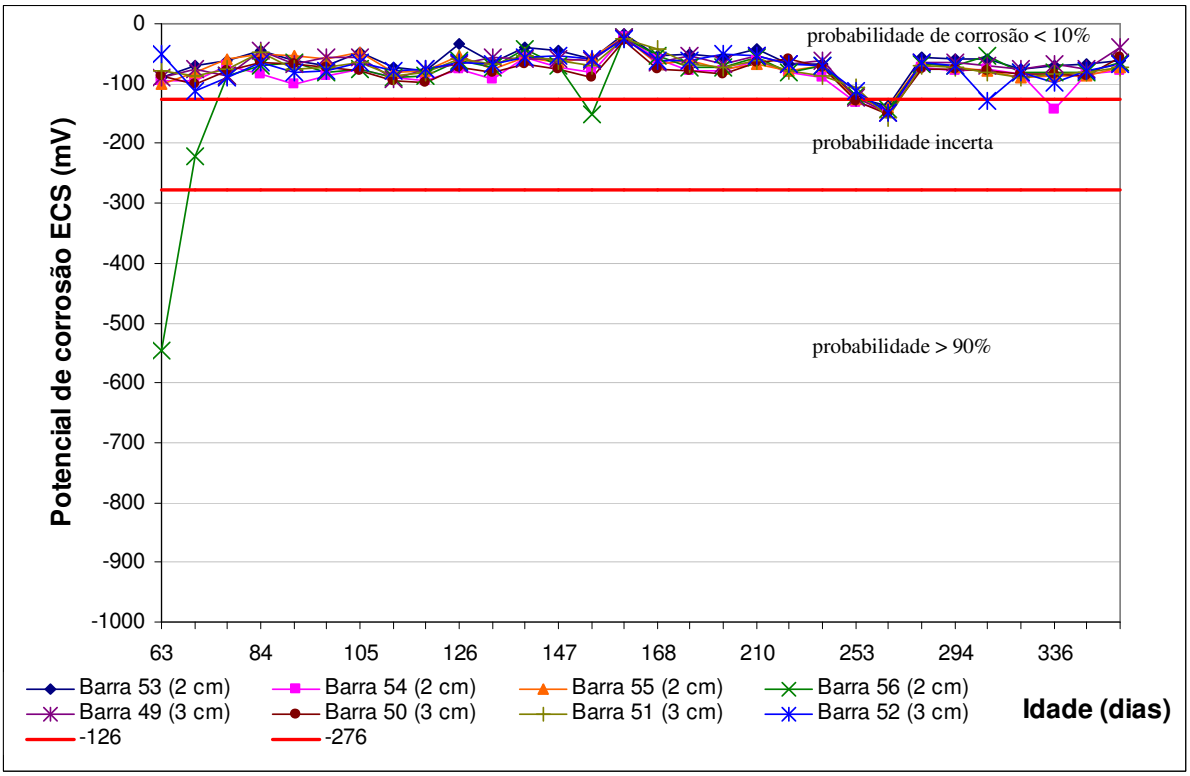



**Figura 5.29: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C40 com o cimento CP II-E-32, na condição natural.**

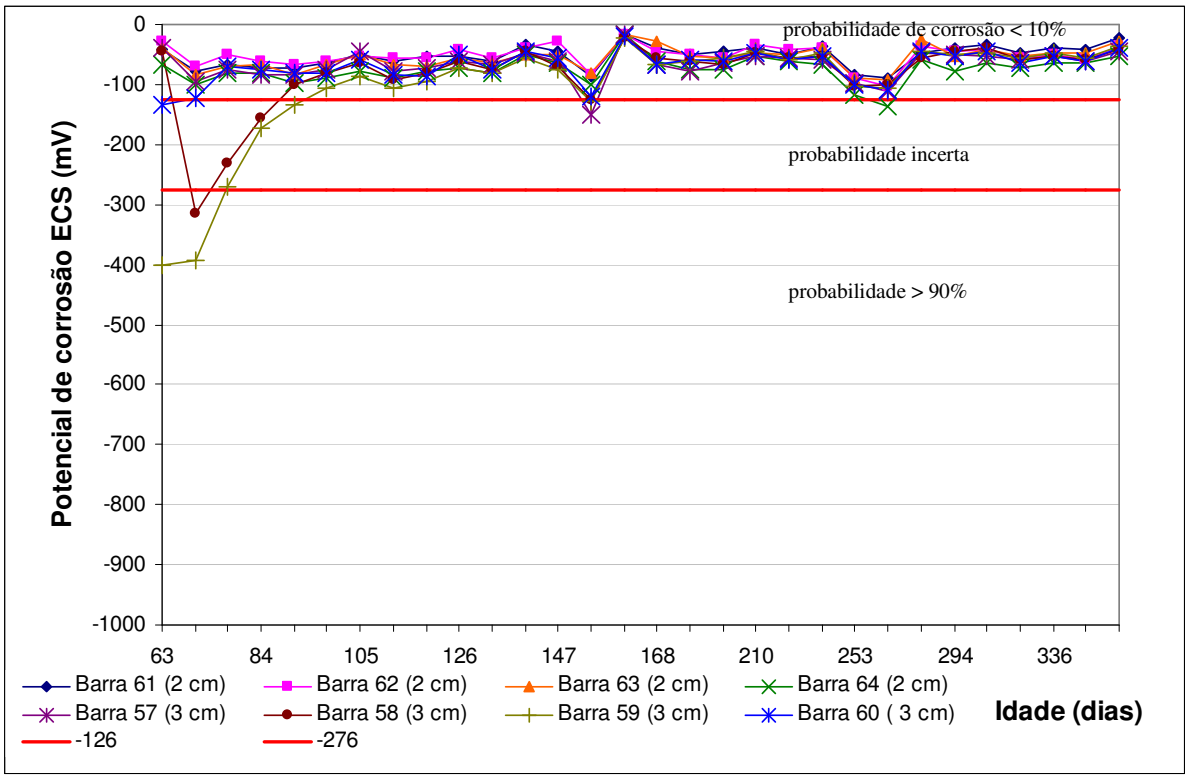



**Figura 5.30: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C40 com o cimento CP III-32-RS, na condição natural.**

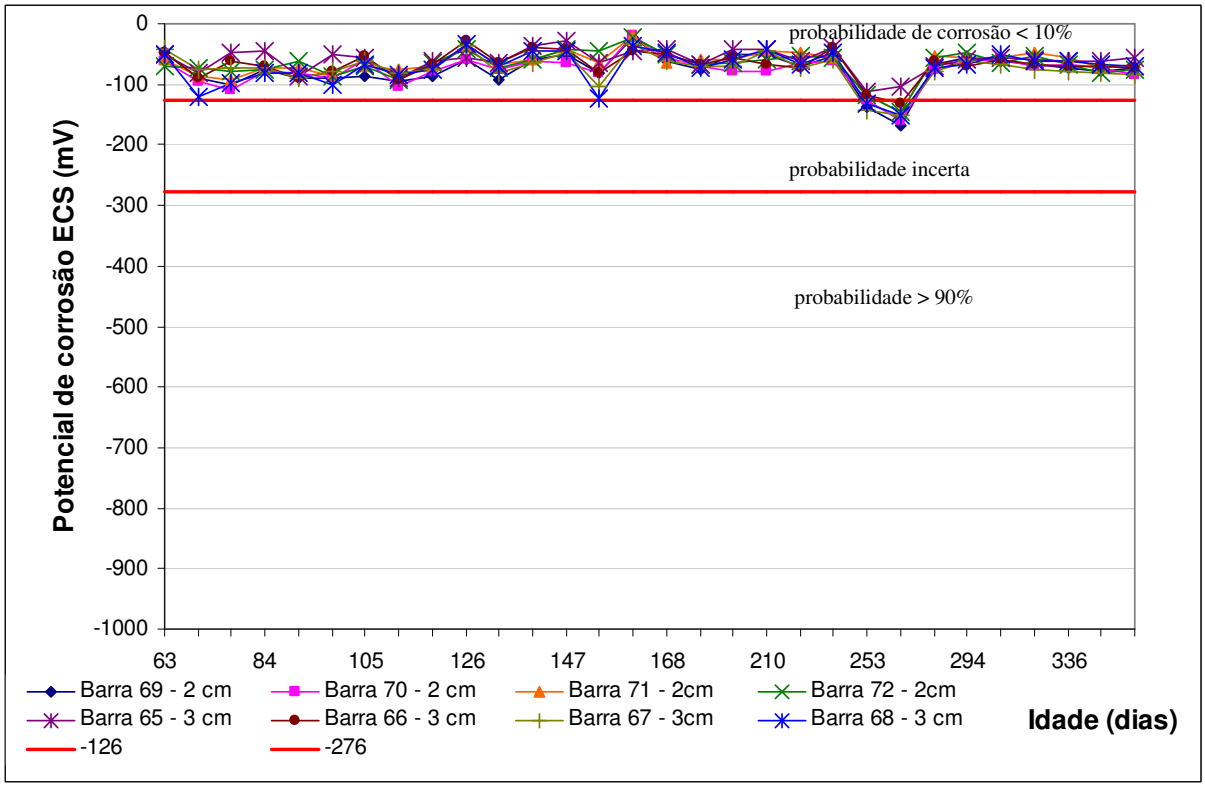



**Figura 5.31: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para concreto classe C40 com o cimento CP III-32-RS + e, na condição natural.**

## 5.8 Potencial de corrosão na condição de envelhecimento acelerado

Observa-se maior capacidade de proteção do concreto de cobrimento na espessura de 30 mm para todos os teores de escória e classes de resistência, tendo em vista os valores de potencial de corrosão mais positivos (Tabelas 5.13, 5.14, 5.15, Anexos F e G, Figuras 5.32, 5.33 e 5.34).

Tomando-se como base as faixas de probabilidade de corrosão da ASTM C 876:1999 (Quadro 3.2, Capítulo 3), observa-se que o tempo necessário para que as armaduras apresentem maior probabilidade de corrosão (> 90%) é menor para o cobrimento de 20 mm e para a classe C20 (Figuras 5.32, 5.33 e 5.34). A menor proteção física do cobrimento de 20 mm favorece a chegada dos agentes agressivos até as armaduras em menor tempo.

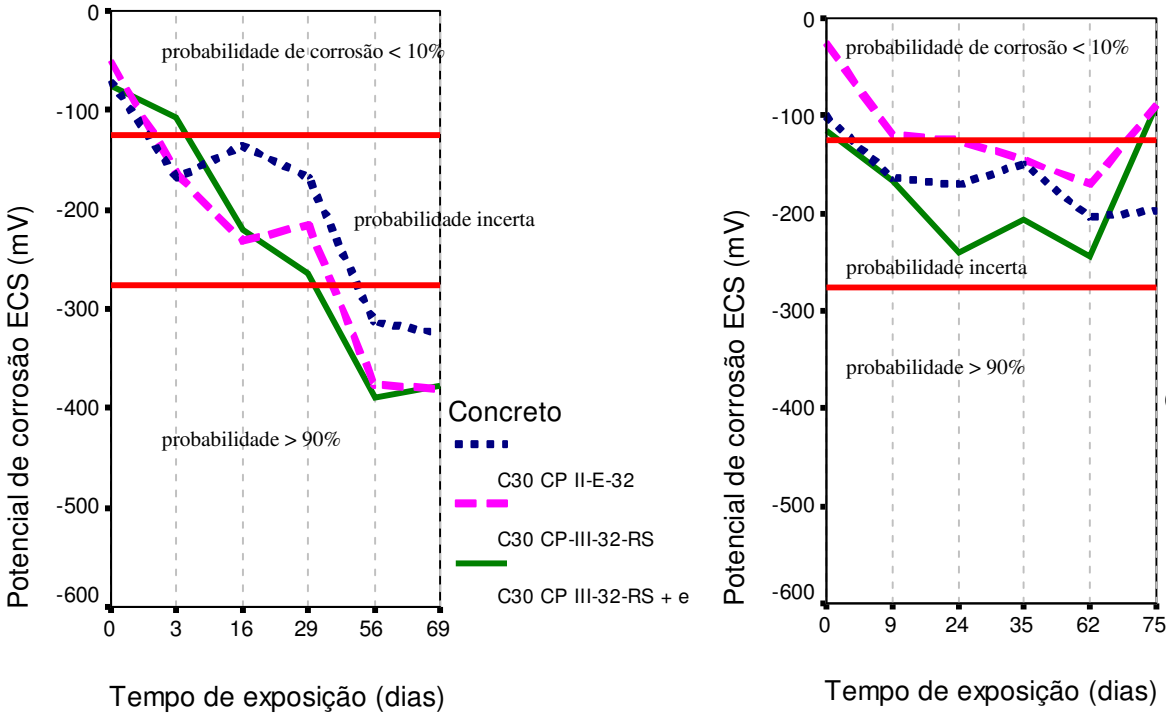
Estudos experimentais de Moon e Shin (2006), em corpos-de-prova de concreto feitos com 50% de escória de alto-forno em massa de materiais cimentícios, com cobrimentos de 10 mm e de 20 mm, submetidos a ciclos de molhagem e secagem em água salgada, corroboram esses resultados. Ou seja, cobrimentos maiores protegem mais as armaduras contra o ataque de cloretos.

Anteriormente, Bauer (1995) obteve conclusões semelhantes, estudando corpos-de-prova feitos com argamassa com dois tipos de materiais cimentícios, um com cimento Portland comum e outro com cimento com adição de escória em teor de 24%, relação água/cimento variando entre 0,30 e 0,70, e cobrimentos de 12,5 mm e 25 mm.

Na comparação das classes de resistência, observa-se que a maior relação água/material cimentício e o menor consumo de materiais cimentícios (C) da classe C20 deste estudo (Quadro 4.19, Capítulo 4) são a causa das maiores absorções de água por imersão medidas (Figura 2.2-b, Capítulo 2). Os ciclos repetidos deste trabalho, ao lado dos altos valores de absorção de água por imersão, são condições que facilitam a penetração e o acúmulo de agentes agressivos ($CO_2$ e $Cl^-$), o que forma eletrólito com potenciais de corrosão mais negativos.

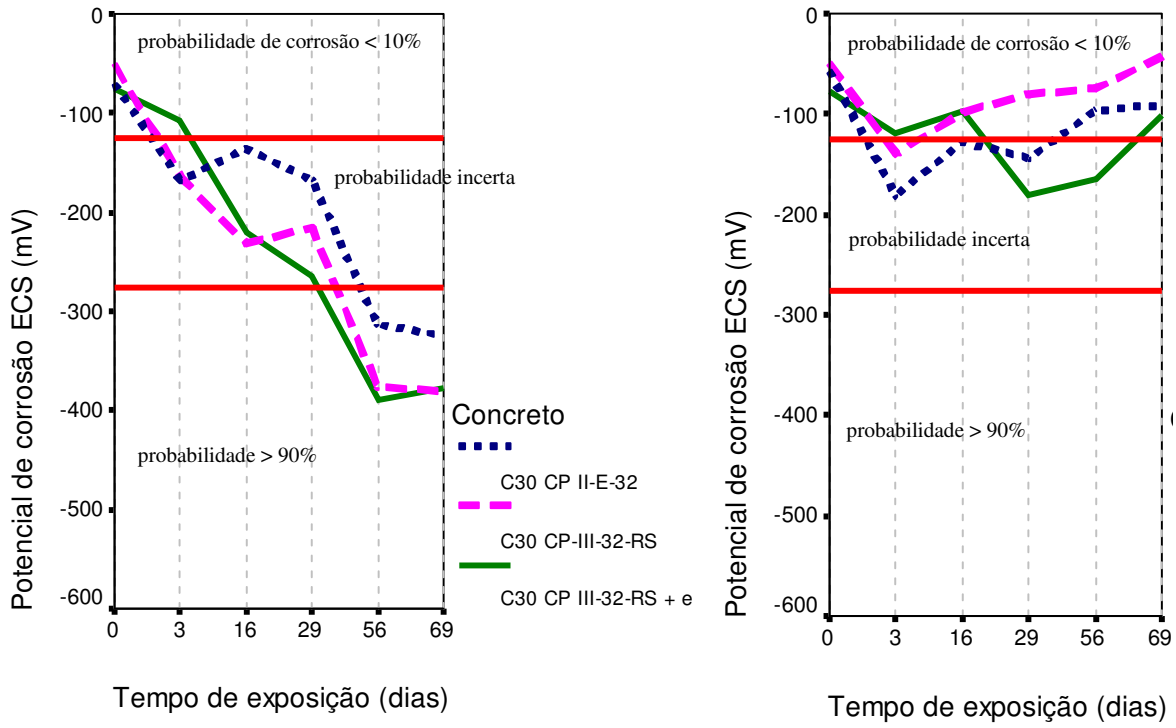
Ao final do envelhecimento acelerado, todos os concretos das classes C20 (75 dias) e C30 (69 dias) e no cobrimento de 20 mm, apresentam valores de potencial de corrosão inferiores a -276 mV (Figuras 5.32-a e 5.33-a), correspondentes a uma probabilidade maior que 90% para ocorrência da corrosão das armaduras (Quadro 3.2, Capítulo 3). Com exceção do concreto com o cimento CP II-E-32 e classe C20, percebe-se que, para o cobrimento de 30 mm, os demais concretos, em todas as classes de resistência, apresentam valores de potencial de

corrosão superiores a -126 mV – probabilidade menor do que 10% para ocorrência da corrosão das armaduras (Figuras 5.32-b, 5.33-b e 5.34-b).




a) 20 mm b) 30 mm

**Figura 5.32: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para a classe C20 na condição de envelhecimento acelerado para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm.**




a) 20 mm b) 30 mm

**Figura 5.33: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para a classe C30 na condição de envelhecimento acelerado para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm.**

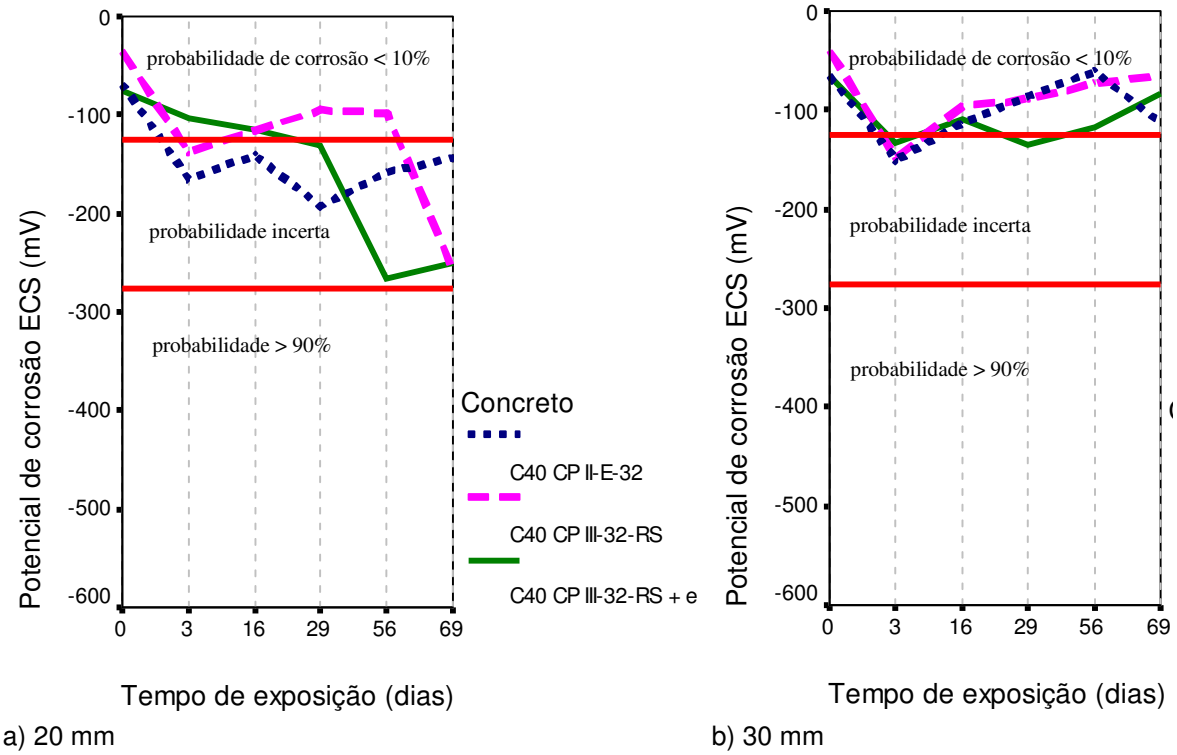



**Figura 5.34: Potencial de corrosão em função do tempo de exposição para a classe C40 na condição de envelhecimento acelerado para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm.**

Na classe C40 e no cobrimento de 20 mm, os potenciais de corrosão são mais positivos, entre -126 mV e -276 mV (Figura 5.34-a), de maneira que a probabilidade de corrosão é incerta.

Nota-se que, após o período de bancada (por volta dos 3º e 4º ciclos), principalmente nos concretos com barras que ainda não estão despassivadas, alguns valores de potencial de corrosão conseguem ter uma recuperação, tornando-se mais positivos (Figuras 5.32, 5.33 e 5.34). A passagem pela estufa, por duas vezes sucessivas, entre os 3º e 4º ciclos, pode ter diminuído a quantidade de eletrólito devido à alta temperatura, o que levou à desaceleração periódica da queda de resistividade de alguns concretos (Figura 5.21, seção 5.7) e, conseqüentemente, ao aumento do potencial de corrosão. Deve-se acrescentar a isso o efeito da carbonatação

As características da dosagem que podem influenciar nos valores de potencial de corrosão são o consumo de material cimentício (C), a relação água/material cimentício e o teor de escória de alto-forno. O que facilita a entrada de agentes agressivos e água no concreto até as armaduras são as características físicas da sua porosidade e de seu cobrimento. As respostas eletroquímicas das etapas de carbonatação, cloretos e secagem em estufa serão diferentes dependendo do estado de saturação da porosidade no momento da entrada nas câmaras de carbonatação e de névoa salina, e no momento das medições de resistividade e potencial de

corrosão. Por sua vez, os valores das medidas de potencial de corrosão também dependem da espessura de cobrimento e da reserva alcalina.

O maior consumo de material cimentício (C) e o conseqüente maior volume total de poros do concreto com o cimento CP III-32-RS + e em relação ao com o cimento CP III-32-RS podem diferenciar a umidade final após a etapa de secagem em estufa. Com isso, ainda fica eletrólito entranhado nos microporos desse concreto, o qual absorve maior quantidade de água da névoa salina, e pior, com cloretos, o que faz caírem os valores de potencial de corrosão, principalmente no cobrimento de 20 mm.

Aumentando-se o consumo de material cimentício (C), aumenta-se o volume de pasta e, assim, a porosidade total, a superfície de fixação de cloretos, a absorção capilar e, conseqüentemente, a penetração de cloretos. Com capacidade de absorção e de fixação de cloretos superiores, atinge-se uma relação $Cl^-/OH^-$ crítica em menor tempo (BAUER, 1995). Isso pode ser notado no concreto com o CP III-32-RS + e, classes C20 e C30 e cobrimento de 20 mm (Figuras 5.32-a e 5.33-a).

Deve-se considerar o efeito da secagem, da temperatura e da carbonatação no aumento do potencial de corrosão (BAUER, 1995; LÓPEZ; GONZÁLEZ; ANDRADE, 1993; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002). Esse aumento é mais bem percebido em cobrimentos maiores, pois o aumento dos valores de potencial de corrosão é mais possível quando os agentes agressivos ainda não atingiram as armaduras (Figuras 5.32-b, 5.33-b, 5.34-b) (YONEZAWA et al., 1988 apud SOYLEV; FRANÇOIS, 2003).

Às vezes, constatam-se comportamentos não muito claros no potencial de corrosão (JUNG; YOON; SOHN, 2003). Oscilações de valores do potencial de corrosão são comuns em investigações semelhantes e podem estar relacionadas com o mecanismo de repassivação das áreas corroídas das armaduras (GIRÈIENË et al., 2005). Condições de aeração altamente modificadas na câmara de carbonatação e de névoa salina e modificações na umidade e na resistividade do concreto podem causar leituras confusas do potencial de corrosão com erros de até 50 mV (MIETZ; LSECKE, 1996) (Figuras 5.32, 5.33 e 5.34). Além disso, concretos e argamassas com escória sofrem maiores amplitudes do que sem esse co-produto (BAUER, 1995; CHRISP et al., 2002).

Por outro lado, a duração da fase de iniciação induzida pela carbonatação depende da combinação de vários fatores, principalmente do consumo de material cimentício (C), da porosidade e da composição da fase aquosa, e não apenas de um fator dominante – deve-se

considerar, ainda, que a dissolução do $Ca(OH)_2$ depende do teor de álcalis (BAUER, 1995). Assim, materiais cimentícios com maior teor de álcalis produzem concretos que apresentarão maior duração na fase de iniciação, dependendo obviamente da porosidade.

Depois da despassivação das armaduras, também podem ocorrer variações nos valores de potencial de corrosão. Como o potencial de corrosão medido se refere ao potencial misto entre ânodos e cátodos, variações nos valores do potencial do eletrodo de ânodos e cátodos, ou seja, concentração de íons ferro, de oxigênio e pH, também varia o valor medido do potencial eletroquímico.

O comportamento do potencial de corrosão da classe C20 para o cobrimento de 20 mm (Figura 5.32-a) concorda com os resultados de profundidade de carbonatação, nos quais os valores de potencial de corrosão abaixo de -276 mV (probabilidade superior a 90% de corrosão) correspondem às maiores profundidades de carbonatação (Tabela 5.7, Anexo C, e Figura 5.13-a).

A classe C20 possui os maiores resultados de absorção capilar e altura de ascensão capilar (Figuras 2.3-a e 2.4-a, Capítulo 2, Tabela 5.5, Anexo B), indicando concreto com diâmetros de poros mais variados, mais bem distribuídos e comunicáveis. Essas condições facilitam a difusão de $CO_2$ e de $Cl^-$, o mecanismo de carbonatação, a instalação de eletrólito, e levam, assim, à detecção de potenciais mais negativos.

Nota-se que as variáveis espessura de cobrimento, classe de resistência (Figura 5.35) e relação água/material cimentício (Figura 5.36) influenciam os valores de potencial de corrosão. O potencial de corrosão diminui ao mesmo tempo em que a espessura de cobrimento é menor, a relação água/material cimentício torna-se maior, e o número de ciclos aumenta. Isso também foi verificado em estudos anteriores por outros autores (POLDER; PEELEN, 2002; YEAU; KIM, 2005).

O aumento da espessura de cobrimento, de 20 mm para 30 mm, corresponde a valores de potencial de corrosão mais positivos graças a uma maior proteção física (Figura 5.36) que estende o tempo para que os agentes agressivos ($CO_2$ e $Cl^-$) cheguem até as armaduras.

Percebe-se que o aumento da relação água/material cimentício dos concretos corresponde a valores de potencial de corrosão mais negativos (Figura 5.36). A maior relação água/material cimentício corresponde a maiores valores de absorção de água por imersão, índices de vazios, absorção por capilaridade e ascensão capilar (Figuras 2.2-b, 2.2-c, 2.3-b e 2.4-b, Capítulo 2), de maneira a facilitar a penetração por absorção, por capilaridade e a difusão de agentes

agressivos ($CO_2$ e $Cl^-$) e a instalação de eletrólito que possa desencadear e/ou alimentar o mecanismo da corrosão.

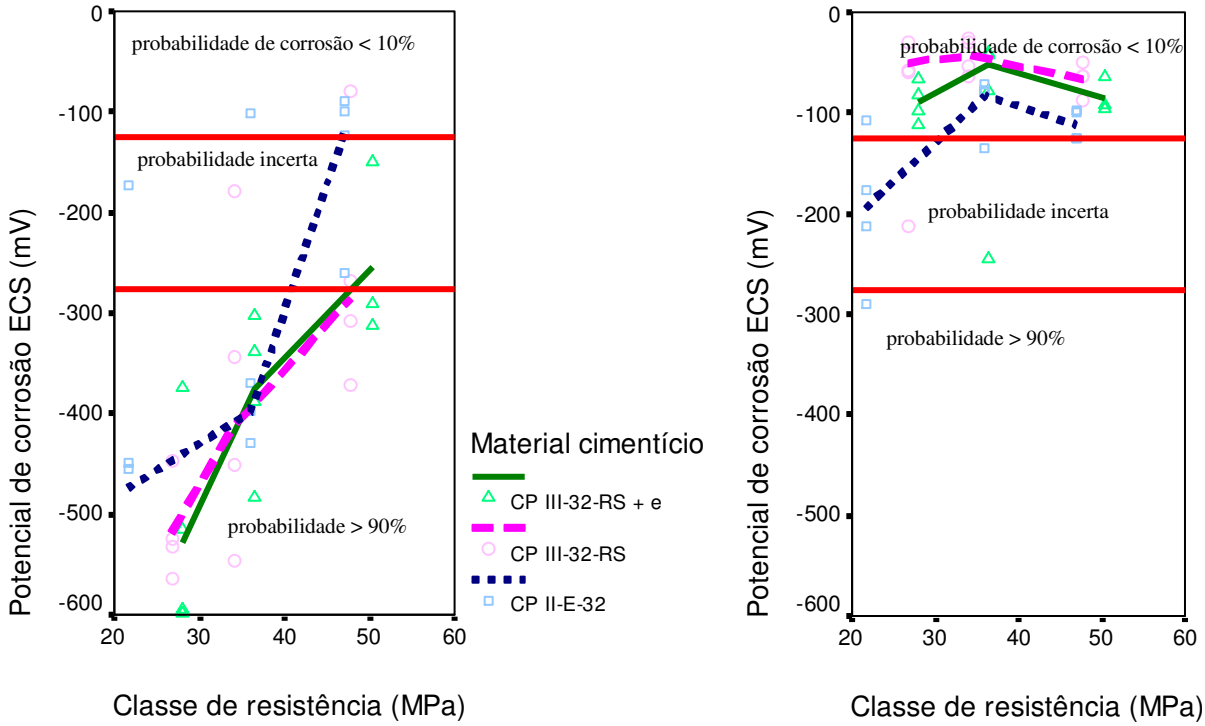



**Figura 5.35: Potencial de corrosão após o 5º ciclo de envelhecimento em função da classe de resistência para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm.**

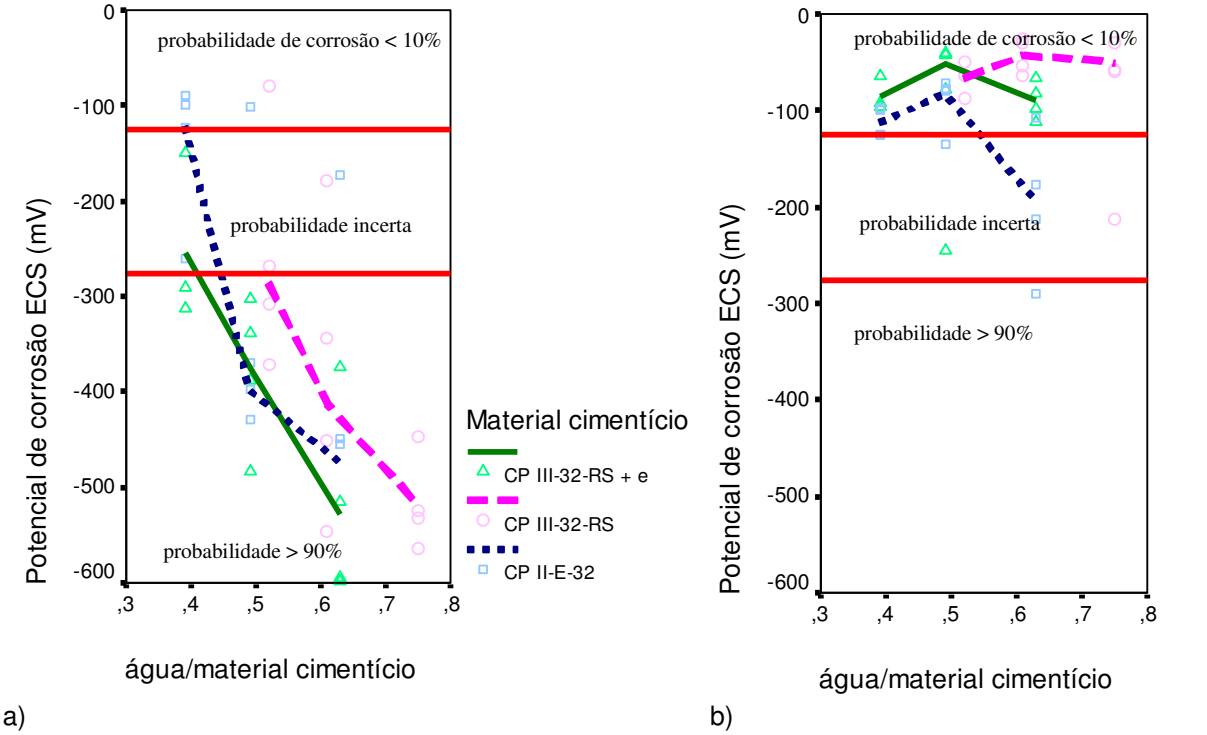



**Figura 5.36: Potencial de corrosão após o 5º ciclo de envelhecimento em função da relação água/material cimentício para os cobrimentos: a) 20 mm; b) 30 mm.**

Para a maioria das classes analisadas, percebe-se uma leve tendência de o concreto com o cimento CP III-32-RS + e apresentar os menores valores de potencial de corrosão, e de o concreto com o cimento CP III-32-RS apresentar os valores mais positivos (Figuras 5.32, 5.33 e 5.34).

## 5.9 Considerações finais

Neste estudo, para análise da capacidade de proteção do cobrimento para vigas e pilares de concreto armado, consideraram-se duas espessuras de cobrimento: 20 mm, especificada pela NB 1:1978 quando revestidos com argamassa e expostos a ambiente externo, e 30 mm (mínimo – descontada a tolerância $\Delta c$), especificada pela NBR 6118:2003 quando expostos a ambiente externo de agressividade ambiental do tipo III.

A fim de se investigar a capacidade de proteção frente à corrosão das armaduras nos cobrimentos estudados, foram embutidas armaduras CA-50 de 10 mm de diâmetro em corpos-de-prova apropriados. Para tanto, foram empregados concretos com teores de escória de alto-forno em massa total de materiais cimentícios de: 30%, utilizando-se o cimento CP II-E-32; 66%, com o CP III-32-RS; e 83%, por meio do emprego de 50% do cimento CP III-32-RS e 50% de escória granulada de alto-forno moída. As resistências à compressão analisadas desses concretos foram 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa.

Os concretos estudados foram monitorados nas idades entre 63 e 365 dias quanto à resistividade elétrica aparente do concreto e potencial de corrosão na condição natural. Depois de 365 dias, eles passaram por 5 ciclos de envelhecimento acelerado, nos quais se monitoravam a profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos e as medidas de resistividade elétrica do concreto e de potencial de corrosão das armaduras embutidas.

A NBR 6118:2003 estabelece uma classe de resistência não inferior a 30 MPa, e uma relação água/cimento não menor do que 0,55 para concreto de cobrimento mínimo de 30 mm em elementos estruturais viga e pilar, para a agressividade ambiental correspondente ao clima de região marinha e industrial da cidade de Vitória e adjacências.

Para a resistência à compressão superior a 30 MPa encontraram-se os mais baixos valores de absorção capilar e altura de ascensão capilar aos 63 dias (Figuras 2.3-a e 2.4-a, Capítulo 2), e para a relação água/material cimentício menor do que 0,55 foram encontrados os mais baixos valores de absorção de água por imersão, de índice de vazios e de absorção capilar aos 63 dias (Figuras 2.2-b, 2.2-c e 2.3-b, Capítulo 2).

A baixa absorção de água por imersão está relacionada, após os ciclos, às menores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos para a resistência à compressão superior a 30 MPa (Figuras 5.6-a, 5.6-c, 5.6-e, 5.7-a, 5.7-c, 5.7-e, 5.9, 5.14 e 5.15, Tabelas 5.8 e 5.9, Anexo D), aos maiores valores de resistividade elétrica aparente do concreto (Figuras 5.21-b, 5.21-c e 5.22-a, Tabelas 5.11 e 5.12, Anexos E e F) e aos maiores valores de potencial de corrosão (Figuras 5.33, 5.34 e 5.35, Tabelas 5.14 e 5.15, Anexo G).

Também como conseqüência da baixa absorção de água por imersão, baixa absorção capilar e altura de ascensão capilar, após os ciclos foram obtidos as menores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos para relações água/material cimentício inferiores a 0,55 (Figuras 5.6-b, 5.6-d, 5.6-f, 5.7-b, 5.7-d, 5.7-f e 5.8), os maiores valores de resistividade elétrica aparente do concreto (Figura 5.22-b e Tabelas 5.11 e 5.12, Anexos E e F) e maiores valores de potencial de corrosão (Figura 5.36, Tabelas 5.14, 5.15, Anexo G).

Com o aumento da classe de resistência e com a diminuição da relação água/material cimentício, a absorção capilar, a altura de ascensão capilar e as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos tenderam a diminuir. Neste estudo, os concretos com teores de escória de 83%, mas com resistência à compressão aos 28 dias superior a 40 MPa (Tabela 5.1, Anexo A), e relação água/material cimentício inferior a 0,50, indicaram maior proteção às armaduras e retardo do tempo para despassivação.

Esta dissertação limitou-se à resistência à compressão menor que 40 MPa. Entretanto, Vaghetti, Muller e Isaia (2005) constataram que, com vistas à durabilidade, o concreto com adições minerais deve ter resistência à compressão superior a 40 MPa e relação água/material cimentício inferior a 0,50. Nos concretos com escória de alto-forno, o aumento da profundidade de carbonatação é compensado pela alta capacidade de fixação de cloretos. Com isso, os benefícios da adição da escória superam os aspectos negativos relacionados à corrosão das armaduras (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997).

Concretos com adição de escória de alto-forno e com relação água/material cimentício inferior a 0,50 têm boa capacidade de fixação de cloretos (BAUER, 1995). Em relação ao estudo de carbonatação sob análise por classe de resistência, entende-se que a utilização de adição de escória de alto-forno só é vantajosa em concretos com baixa relação água/material cimentício (CASTRO et al., 2004).

Assim, para atender à vida útil especificada nos projetos das estruturas de concreto armado com alto teor de escória (83%), deve-se optar por concretos com resistências à compressão

superiores a 40 MPa e relações água/material cimentício inferiores a 0,50. A fim de dar maior garantia de proteção pelo cobrimento, deve-se adotar cobrimento mínimo não inferior a 30 mm em estruturas sujeitas à agressividade ambiental do tipo III.

No envelhecimento acelerado e na classe C20, apenas os concretos com o cimento CP II-E-32 e com o cimento CP III-32-RS + e mostraram profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos superiores ao cobrimento de 20 mm. As profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos de nenhuma classe ou teor de escória de alto-forno ultrapassaram o cobrimento mínimo de 30 mm.

O tempo para iniciação da corrosão supostamente ativa, quando o $E_{corr}$ atinge valores menores que -276 mV, foi mais curto para concretos com maior relação água/material cimentício, menor espessura de cobrimento e menor classe de resistência.

Os resultados demonstraram que os concretos deste estudo, com teores entre 30% e 83%, classe de resistência superior a 30 MPa e relação água/material cimentício inferior a 0,5, apresentaram adequada capacidade de proteção do cobrimento para a agressividade ambiental do tipo III, prescrito pela NBR 6118:2003 da ABNT.

Neste estudo, o cobrimento mínimo de 30 mm, especificado pela NBR 6118:2003, tem melhor capacidade de proteção do que o cobrimento de 20 mm, especificado pela NB 1:1978, em concretos atacados pela ação conjunta de cloretos e carbonatação.

Os teores de escória de alto-forno deste trabalho e suas condições não aumentaram a probabilidade de corrosão das armaduras quando se verificaram as menores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos nos concretos com baixa relação água/material cimentício (< 0,5) e com resistência à compressão não inferior a 30 MPa.

# CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

## 6.1. Resistência à carbonatação e à penetração de cloretos

Os resultados médios de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos (e demais precipitados brancos)[1] obtidos nos concretos estudados, tanto na condição natural quanto na condição de envelhecimento acelerado, mostraram que as maiores profundidades seguiram a ordem: classe C20 > classe C30 > classe C40. Isto é, um aumento na resistência à compressão correspondeu a uma diminuição na profundidade de carbonatação para todos os concretos deste estudo – efeito da diminuição da absorção e do índice de vazios que dificultaram a difusão do $CO_2$ e $Cl^-$ pelo concreto.

### 6.1.1. Condição natural

Na condição natural verificou-se que uma diminuição na relação água/material cimentício correspondeu a uma diminuição na profundidade de carbonatação e na penetração de cloretos. Isso também se deveu à diminuição da absorção de água por imersão e do índice de vazios nos concretos com menor relação água/material cimentício, o que dificultou a difusão do $CO_2$ e $Cl^-$ pelo concreto.

Observou-se que, na condição natural, a profundidade média de carbonatação não atingiu mais do que 6,3 mm, e a máxima não mais que 9,6 mm. Essas profundidades foram constatadas nos concretos com o cimento CP II-E-32 e com o cimento CP III-32-RS + e, ambos na classe C20, cuja maior profundidade deveu-se a uma maior absorção e a um maior índice de vazios que corresponderam, provavelmente, a poros comunicáveis e de maior volume, favorecendo a difusão de $CO_2$. Portanto, ambos os cobrimentos de 20 mm e 30 mm[2] protegeram as armaduras na condição natural, durante o período de 365 dias de monitoramento.

Analisando-se a capacidade de proteção do concreto de cobrimento quanto à classe de resistência, notou-se que os valores de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos seguiram a ordem: C20 > C30 > C40.

---

[1] Neste Capítulo, quando se fizer referência à penetração de íons cloreto, deduz-se que também existem outros precipitados brancos que são mostrados no ensaio com a solução de nitrato de prata.

[2] Quanto à referência ao cobrimento de 30 mm, deve-se entender que se trata do cobrimento mínimo (cobrimento nominal diminuído da tolerância de execução $\Delta c$) especificado pela NBR 6118:2003 para os elementos viga e pilar expostos ao ambiente de agressividade ambiental do tipo III.

As maiores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos foram as do concreto com o cimento CP II-E-32. Já a presença da escória de alto-forno teve menor influência nas classes de resistência menores ou iguais a 20 MPa, pois o concreto com o maior teor de escória (mistura CP III-32-RS + e) não apresentou menores profundidades, conforme constatações de BAUER (1995). A influência da classe de resistência, dentro da faixa analisada neste estudo, sobrepôs-se à do teor de escória para a maior capacidade de proteção do concreto de cobrimento contra as frentes de carbonatação e de penetração de cloretos.

Para cloretos, as maiores penetrações na condição natural também se encontraram na classe C20, e também foram devidas à maior absorção de água por imersão e ao maior índice de vazios que correspondem, normalmente, a poros comunicáveis e de maior volume, que favoreceram a difusão de $Cl^-$. Essas penetrações médias não foram superiores a 5,6 mm de espessura e a máxima não atingiu mais que 11,7 mm.

O maior coeficiente de variação constatado na classe C40, para ambos agentes agressivos (Tabelas 5.6 e 5.7, Anexo C), foi resultado da menor homogeneidade dos concretos, por causa da menor relação água/material cimentício e do maior consumo de material cimentício (C) em relação às demais classes deste estudo.

Verificou-se que, na condição natural, a frente de carbonatação antecedeu a frente de cloretos para todos os materiais cimentícios e classes deste estudo (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5, Capítulo 5).

### 6.1.2. Condição de envelhecimento acelerado

Na condição de envelhecimento acelerado, verificou-se que um aumento na relação água/material cimentício correspondeu a um aumento na profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos – conseqüência da maior absorção de água por imersão e índice de vazios em concretos com maior relação água/material cimentício.

Nessa condição, nenhum dos concretos apresentou profundidade média de carbonatação e de penetração de cloretos superior a 30 mm, e apenas a classe C20 apresentou profundidade superior a 20 mm. Constatou-se melhor capacidade de proteção do cobrimento de 30 mm em relação ao cobrimento de 20 mm.

Observou-se também que as velocidades da frente de carbonatação e da frente de cloretos seguiram a ordem: classe C20 > classe C30 > classe C40. Tanto o resultado de profundidades maiores após os ciclos quanto a maior velocidade das frentes na classe C20 foram explicados pela maior absorção de água por imersão e maior índice de vazios. Inversamente, as menores

profundidades encontradas na classe C40 deveram-se ao menor índice de vazios e à menor absorção de água por imersão, conseqüentes de classe de resistência maior.

Quando se analisaram a classe de resistência e os três tipos de materiais cimentícios, a capacidade de proteção do concreto de cobrimento contra as frentes de carbonatação e de penetração de cloretos foi maior no concreto com o cimento CP III-32-RS. Isso significou que, em ataques mais severos, o equilíbrio na dosagem entre a relação água/material cimentício, resistência à compressão, consumo de material cimentício (C) e teor de escória foi mais eficaz para a proteção do cobrimento às frentes de carbonatação e de penetração de cloretos.

Nos concretos de menor teor de escória, os com o cimento CP II-E-32, as maiores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos se deveram à maior absorção de água por imersão e maior índice de vazios, conseqüentes, provavelmente, da formação de poros de maior volume e comunicáveis, que facilitaram a difusão de $CO_2$ e $Cl^-$.

A fixação de cloretos foi boa no concreto da classe C40 e com o cimento CP III-32-RS + e, pois a espessura da camada carbonatada foi mais superficial, não tendo atingido as armaduras. A carbonatação causa diminuição na reserva alcalina, produz água e modifica a porosidade, o que traz como conseqüência a desestabilização das fases alumino-ferríticas, principalmente nos concretos com maior consumo de materiais cimentícios (C) e maior teor de escória, que por sua vez, liberam íons na água de poro, sendo que esses podem ter sido alguns dos fatores causadores da queda nos valores de resistividade aparente. Apesar disso, os valores de resistividade permaneceram na faixa de probabilidade desprezível de corrosão nessa classe e nesse material cimentício.

A frente de carbonatação e de cloretos foram levemente invertidas com o aumento da classe de resistência, com a diminuição da relação água/material cimentício e com o aumento do teor de escória: para classe C20, a frente de cloretos antecedeu suavemente a frente de carbonatação; enquanto que, para a classe C40, a frente de carbonatação antecedeu suavemente a de cloretos; na classe C30, ocorreu uma tênue transição (Figuras 5.10 a 5.12). Para relações água/materiais cimentícios maiores que 0,62 e classe C20, a frente de cloretos antecedeu levemente a de carbonatação, enquanto que para relações água/materiais cimentícios menores que 0,62, a carbonatação ficou suavemente à frente.

Esse efeito pode ser devido à influência do teor de escória combinado com o consumo de materiais cimentícios (C), que respondeu diferentemente conforme a classe de resistência, a

relação água/material cimentício e o agente agressivo: na resistência à carbonatação, os concretos com menores teores de escória (CP II-E-32) tiveram maior influência, enquanto que na resistência à penetração de cloretos tiveram menor influência. O inverso é verdadeiro: concretos com maiores teores de escória (CP III-32-RS + e) tiveram menor influência na proteção contra a carbonatação, mas tiveram maior influência na proteção à penetração de cloretos.

Notou-se uma menor influência na proteção contra a carbonatação e a penetração de cloretos dos traços equivalentes (concretos com os cimentos CP II-E-32 e CP III-32-RS + e que possuem relação água/material cimentício e consumo de material cimentício (C) equivalentes) em menor resistência à compressão e em maior relação água/material cimentício. Essas inflexões nas velocidades das frentes de carbonatação e de cloretos já foram constatadas em outros estudos (CASTRO; MORENO; GENESCÁ, 2000; MUKHERJEE, 2004).

Como a frente de cloretos antecedeu suavemente a de carbonatação no concreto com o cimento CP II-E-32, parece que o ensaio com a solução de nitrato de prata ainda pode ser confiável, pois ele reage preferencialmente com cloretos livres; do contrário, cloretos não estariam à frente (maior profundidade no cobrimento). Porém, há que se considerar que o pH de 11,5, o limite no qual as armaduras já começam a sofrer despassivação, não é indicado pela solução de fenolftaleína, cujo pH de viragem é de 8,3 a 10, o que significa que a frente de carbonatação pode estar mais profunda. Portanto, essa questão precisa ser mais bem explicada por meio de mais pesquisas.

## 6.2. Resistividade elétrica aparente do concreto

### 6.2.1. Condição natural

Quanto à resistividade elétrica aparente, perceberam-se perturbações nos seus valores, na condição natural, por volta dos 150 dias, quando os grãos de escória ainda anidros começaram a reagir, confirmando trabalhos anteriores (JUNG; YOON; SOHN, 2003; RAJAOKARIVONY-ANDRIAMBOLONA, 1990 apud SILVA, 1998). Nessa condição, todos os valores de resistividade elétrica aparente para todos os concretos e classes de resistência permaneceram na faixa de probabilidade desprezível de corrosão.

### 6.2.2. Condição de envelhecimento acelerado

Na condição de envelhecimento acelerado, concretos com maiores teores de escória também mostraram maior profundidade de carbonatação. No entanto, diferentemente da condição natural, exibiram maior queda na resistividade elétrica aparente.

Nessa condição, a queda da resistividade elétrica aparente do concreto com o maior teor de escória (CP III-32-RS + e) pode ter tido duas causas intervenientes principais: a redistribuição da porosidade com formação de poros de maior volume em concretos com maiores teores de escória; e a maior formação de íons na solução de poro em relação aos demais materiais cimentícios. Contudo, são necessários mais estudos para que isso se confirme.

A maior formação de íons deveu-se à queda no pH e à conseqüente desestabilização de cloroaluminatos (GLASS; BUENFELD, 2000; KURDOWSKI, 2004; PRUCKNER; GJØRV, 2004); à água proveniente do produto das reações de carbonatação, que é maior em concretos com maiores teores de escória, ou à água retida em virtude da taxa de secagem que é mais lenta em rede de poros mais refinados (maior capilaridade) (BAUER, 1995; HONG; HOOTON, 1999); e ao maior consumo de materiais cimentícios (C) (Tabela 4.5, Capítulo 4), que produz maior volume de pasta e conseqüente maior volume de fases desestabilizáveis, principalmente com maiores teores de escória que têm compostos com enxofre (comparando-se as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.11, Capítulo 4) (BAUER, 1995; CHRISP et al., 2002; ELSENER, 2002; GÜNEYISI; ÖZTURAN; GESOĐLU, 2005; POLDER; PEELEN, 2002; YEAU; KIM, 2005).

Pode ter havido retenção de água para o eletrólito, principalmente após passar pela névoa salina que, além de água, disponibilizou cloretos. Não se pode deixar de considerar a água produzida pelas reações de carbonatação.

Na classe C40, a queda na resistividade elétrica aparente do concreto com maior teor de escória (CP III-32-RS + e) não atingiu nem sequer a faixa de probabilidade de corrosão baixa (entre 10 e 20 kΩ.cm), permanecendo na faixa de probabilidade de corrosão desprezível (> 20 kΩ.cm). Apesar da queda (taxa de diminuição) na resistividade, nessa classe e nesse tipo de material cimentício, observou-se que, com o passar do tempo de exposição na condição de envelhecimento acelerado, ocorreu uma diminuição na taxa de queda da resistividade elétrica, com tendência a estabilizar-se na faixa de probabilidade desprezível de corrosão. Os valores de resistividade dessa classe foram sempre superiores aos das demais.

Evidências de que o maior teor de escória tem boa influência em classes de resistência maiores.

Analisando-se a classe de resistência no envelhecimento acelerado, observou-se que as maiores profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos corresponderam aos menores valores de resistividade elétrica. As maiores profundidades e os menores valores de resistividade elétrica aparente foram mostrados na classe C20. Com o mesmo comportamento, as menores profundidades e os maiores valores de resistividade elétrica aparente ficaram na classe C40.

Assim, analisando-se a classe de resistência, notou-se que os valores de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos e de condutividade (inverso da resistividade elétrica) seguiram a ordem: C20 > C30 > C40.

No envelhecimento acelerado, com o aumento da classe de resistência e com a diminuição da relação água/material cimentício, os valores de resistividade elétrica aparente seguiram a ordem CP III-32-RS > CP II-E-32 > CP III-32-RS + e, apesar de as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos terem se apresentado nesta: CP II-E-32 > CP III-32-RS > CP III-32-RS + e.

## 6.3. Potencial de corrosão

### 6.3.1. Condição natural

Tomando-se como base os valores de potencial de corrosão, os concretos com os diferentes materiais cimentícios das classes C30 e C40, provavelmente, passivaram mais rapidamente as armaduras.

Verificou-se que a grande maioria das barras em todos os materiais cimentícios apresentou valores de potencial de corrosão na faixa de probabilidade de corrosão menor do que 10%, na condição natural.

### 6.3.2. Condição de envelhecimento acelerado

No envelhecimento acelerado, os valores mais negativos do potencial de corrosão tiveram relação com as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos encontradas.

Ao final dos ciclos, a probabilidade de corrosão foi menor do que 10% (mais positivo do que -126 mV) no cobrimento de 30 mm, para a maioria dos traços nos três tipos de materiais cimentícios e em todas as classes de resistência (Figuras 5.32-b, 5.33-b e 5.34-b, Capítulo 5).

A exceção verificou-se somente no concreto com o cimento CP II-E-32 na classe C20, que apresentou probabilidade de corrosão incerta (entre -126 mV e -276 mV) (Figura 5.32-b, Capítulo 5). Esta foi a classe de resistência e aquele foi o material cimentício em que as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos mostraram os maiores valores: 27,1 mm e 29,6 mm, respectivamente.

Esse comportamento denotou coerência, pois quanto maiores são as profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos e menor a espessura de cobrimento, maiores são as chances de corrosão das armaduras, por causa da queda no pH da solução de poro e da despassivação, que por sua vez se deve à concentração de cloretos próxima às armaduras.

Ao final dos ciclos, no cobrimento de 20 mm e nas classes C20 e C30, os valores de potencial de corrosão, para todos os materiais cimentícios, foram mais negativos do que -276 mV, indicando probabilidade de corrosão maior do que 90%; enquanto que, na classe C40, os valores de potencial de corrosão ficaram na faixa incerta (entre -126 mV e -276 mV) para todos os materiais cimentícios.

A seqüência normal foi esta: o aumento nas profundidades atingidas por carbonatação e penetração de cloretos diminuiu (tornou mais negativos) os valores de potencial de corrosão e de resistividade elétrica aparente, o que aumentou as chances de corrosão das armaduras.

## 6.4. Apreciação integrada das questões da pesquisa

O Quadro 6.1 apresenta as tendências de comportamento das variáveis estudadas. As variáveis intervenientes com a relação água/material cimentício e com o teor de escória foram analisadas comparando-se o comportamento dos dois traços equivalentes, nos quais, durante a dosagem, foi obtida a mesma classe de resistência à compressão, com consumo de material cimentício (C) e relação água/material cimentício praticamente equivalentes (Quadro 4.19, Capítulo 4), apesar do aumento da proporção de escória sobre a massa total de materiais cimentícios (de 30% para 83%). Esses traços foram os concretos com o cimento CP II-E-32 e com o cimento CP III-32-RS + e. Notou-se que a massa específica não seguiu uma relação linear com as variáveis analisadas.

Quanto à resistência à compressão, para ambas as condições de exposição, natural e de envelhecimento acelerado, foram verificadas as mesmas tendências. Assim, aumentando-se a resistência à compressão, diminuem a absorção de água por imersão, o índice de vazios (Tabela 5.3, Anexo A), a absorção capilar (Figura 2.3-a, Capítulo 2), a altura de ascensão

capilar (Figura 2.4-a, Capítulo 2), a profundidade de carbonatação (Figura 5.2-a e 5.9-a, Capítulo 5) e de penetração de cloretos (Figuras 5.2-b e 5.9-b, Capítulo 5).

Enquanto que, com o aumento da resistência à compressão, a resistividade também aumenta (comparando as Figuras 5.19-a e 5.19-c, 5.19-d e 5.19-f, 5.20-a e 5.20-c; e Figura 5.22-a, Capítulo 5). Visto de forma geral, existe uma tendência de aumento do potencial de corrosão com o aumento da resistência à compressão. O tempo para passivação das armaduras mostrou tendência a diminuir com o aumento da resistência à compressão (comparando Figuras 5.23-5.31 e 5.35, Capítulo 5).

**Quadro 6.1: Tendências de comportamento das propriedades em função da resistência à compressão, relação água/material cimentício e teor de escória de alto-forno.**

| Condição de exposição | Propriedades | ⇑ resistência à compressão aos 28 dias | ⇑ relação água/material cimentício | ⇑ teor de escória |
|---|---|---|---|---|
| Natural | Absorção de água por imersão | ↓ | ↑ | ↓ |
| | Índice de vazios | ↓ | ↑ | ↓ |
| | Absorção capilar | ↓ | ↑ | ↓ |
| | Altura de ascensão capilar | ↓ | ↑ | ↓ |
| | Profundidade de carbonatação | ↓ | ↑ | ↑ |
| | Profundidade de penetração de $Cl^-$ | ↓ | ↑ | ↑ |
| Envelhecimento acelerado | Profundidade de carbonatação | ↓ | ↑ | ↑ |
| | Profundidade de penetração de $Cl^-$ | ↓ | ↑ | ↑ |
| Natural | Resistividade | ↑ | ↓ | ↑ |
| | Potencial de corrosão | ↑ | ↓ | ↑ |
| Envelhecimento acelerado | Resistividade | ↑ | ↓ | ↓ |
| | Potencial de corrosão para cobrimento de 30 mm | ↑ | ↓ | ↑ |

Tendência: ↑ aumento de
↓ diminuição de

Para análise da relação água/material cimentício, verificou-se que a tendência de comportamento das variáveis foi o mesmo, tanto para a condição natural quanto para a condição de envelhecimento acelerado.

Aumentando-se a relação água/material cimentício, aumentam a absorção de água por imersão (Figura 2.2-b, Capítulo 2, e Tabela 5.3, Anexo A), o índice de vazios (Figura 2.2-c,

Capítulo 2, e Tabela 5.3, Anexo A), a absorção capilar (Figura 2.3-b, Capítulo 2, e Tabela 5.5, Anexo B), a altura de ascensão capilar (Figura 2.4-b, Capítulo 2, e Tabela 5.5, Anexo B), a profundidade de carbonatação (Figuras 5.1-a e 5.8-a, Capítulo 5, e Tabelas 5.6 e 5.8, Anexos C e D) e de penetração de cloretos (Figura 5.1-b e 5.8-b, Capítulo 5, e Tabelas 5.7 e 5.9, Anexos C e D).

Por outro lado, com o aumento da relação água/material cimentício diminuem a resistividade (Figuras 5.19, 5.20, 5.22-b e Tabelas 5.10- 5.11 e 5.12, Anexos E e F) e o potencial de corrosão (Figuras 5.36 e Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15, Anexos F e G).

Aumentando-se o teor de escória, diminuem a absorção de água por imersão (Figura 2.2-b, Capítulo 2) e o índice de vazios (Figura 2.2-c, Capítulo 2); a absorção capilar (Figura 2.3, Capítulo 2) e a altura de ascensão capilar (Figura 2.4, Capítulo 2) diminuem para resistência à compressão maior que 27 MPa e relação água/material cimentício menor que 0,39 (Tabela 5.5, Anexo B); e aumenta a profundidade de carbonatação (Figura 5.1-a, 5.2-a, 5.8-a, 5.9-a, Capítulo 5).

A profundidade de penetração de cloretos e a resistividade tiveram comportamentos diferentes nas condições de exposição analisadas: com o aumento do teor de escória, na condição natural aumentam a profundidade de penetração de cloretos (Figuras 5.1-b e 5.2-b, Capítulo 5) – por causa, entre outros fatores, da absorção capilar do concreto com maior teor de escória – e aumenta a resistividade (comparem-se Figuras 5.19-a e 5.19-c, 5.19-d e 5.19-f, 5.20-a e 5.20-c, Capítulo 5); já na condição de envelhecimento acelerado, diminuem a profundidade de penetração de cloretos (Figura 5.8-b e 5.9-b, Capítulo 5) e a resistividade (Figura 5.22, Capítulo 5).

Ainda, com o aumento do teor de escória o potencial de corrosão aumenta e o tempo para passivação das armaduras diminui na condição natural (comparem-se as Figuras 5.23-5.31, Capítulo 5). Já na condição de envelhecimento acelerado, o potencial de corrosão, de maneira geral, aumenta para armadura provavelmente passivada (valores maiores do que -126 mV) no cobrimento de 30 mm, não aparentando uma tendência clara para armadura provavelmente despassivada no cobrimento de 20 mm (Figura 5.35, Capítulo 5).

## 6.5. Capacidade de proteção do cobrimento

Com relação à normalização nacional, percebeu-se que, comparada à NB 1:1978, a NBR 6118:2003 fornece melhores diretrizes para se especificar a durabilidade do concreto, por relacionar a classe de agressividade ambiental com a qualidade do concreto.

De acordo com a tabela 7.1 da NBR 6118:2003, a relação água/cimento para a classe III deve ser menor ou igual a 0,55 e a classe de resistência deve ser maior ou igual a 30 MPa para concreto armado. A NBR 6118:2003 também é mais detalhada que a NB 1:1978 ao relacionar a classe de agressividade ambiental à espessura de cobrimento.

Neste estudo, os resultados de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos sugeriram que o alto teor de escória de alto-forno (83%) é o mais efetivo na proteção contra a corrosão das armaduras, considerando-se que, nas modelagens de vida útil, as taxas de carbonatação e de difusão de cloretos diminuem com o tempo na condição natural (a mais provável de se encontrar na agressividade ambiental de Vitória).

Os resultados deste trabalho indicaram que, com a utilização da escória de alto-forno em concretos com teores de escória variando de 66% e 83%, resistência à compressão superior a 30 MPa e relação água/material cimentício inferior a 0,50, é possível obter-se concreto durável em ambiente de agressividade ambiental classificada como do tipo III pela NBR 6118:2003.

Para a proteção das armaduras ao ataque conjunto de carbonatação e cloretos, o cobrimento de 30 mm prescrito pela NBR 6118:2003 teve capacidade superior ao de espessura de 20 mm prescrito pela NB 1:1978, mostrando-se mais apropriado para a agressividade ambiental do tipo III. Isso foi observado tanto na condição natural quanto na condição de envelhecimento acelerado.

Aumentando-se a classe de resistência, observou-se uma ampliação da eficiência na capacidade de proteção do concreto de cobrimento com alto teor de escória de alto-forno para todas as variáveis relacionadas à durabilidade analisadas: carbonatação, cloretos, resistividade elétrica e potencial de corrosão.

## 6.6. Propostas para futuros trabalhos

Durante a realização desta dissertação, verificou-se que ainda restam dúvidas quanto aos efeitos da interação conjunta de carbonatação e de penetração de cloretos no concreto. Relacionam-se abaixo alguns estudos que poderiam esclarecer melhor esse tema.

- Estudo da capacidade de proteção do cobrimento ao ataque conjunto de carbonatação e de cloretos em concretos com resistência superior a 50 MPa e com altos teores de escória, inclusive ternários com cal hidratada ou resíduos e co-produtos com boa basicidade, como metacaulim ou resíduo do corte de rocha.

- Comparação dos resultados de Análise Térmica Diferencial e de concentração de carbonatos e de cloretos com a profundidade de carbonatação (obtida de indicadores de pH) e de penetração de cloretos (obtida com o reagente nitrato de prata); e verificação do ponto em que carbonatos reagem com nitrato de prata e interferem na reação com cloretos.
- Estudo da microestrutura (por técnica de Difração de raios X) de concreto atacado pela ação conjunta de carbonatação e cloretos em diferentes classes de resistência à compressão axial e diferentes teores de escória de alto-forno e verificação e comparação da concentração de íons, do pH e da resistividade elétrica. Comparação da microscopia com a profundidade de carbonatação, profundidade de penetração de cloretos, resultados de ensaios de difusão de oxigênio, difusão de cloretos, técnicas de espectrofotometria, intrusão de mercúrio, absorção por imersão e capilar e água de poro.
- Comparação das mudanças microestruturais, à mesma profundidade de carbonatação, de testemunhos carbonatados ao natural e corpos-de-prova de mesmo traço reconstituído de concretos carbonatados aceleradamente em laboratório (com teor de $CO_2$ de 10% e temperatura média do período de vida da estrutura).
- Marcação dos perfis das frentes de cloretos e de carbonatação espaçados de 1 cm, e exame de cada camada por meio do MEV, da difração de raios X, e da Análise Térmica Diferencial. O intuito é a análise por camada e por grau de carbonatação da interação de cloretos e de carbonatação, além da verificação das diferenças no ataque por camada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


AHMAD, Shamsad. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 459-471, 2003.

ALDASORO, Juan C. Extraccción y processamiento de escórias. In: MEMÓRIA TÉCNICA DE LAS PRIMERAS JORNADAS TÉCNICAS DE ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS, 1985, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: SOMISA – Sociedad Mixta Siderurgia Argentina, 1985, p. 33-37.

AL-KADHIMI et al. An acelerated carbonation procedure for studies on concrete. **Advances in Cement Research**, v. 8, n. 30, p. 47-59, 1995.

AL-TAYYIB, ABDUL-HAMID J.; KHAN, MOHAMMAD SHAMIM. Corrosion rate measurements of reinforcing steel in concrete by electrochemical techniques. **ACI Material Journal**, may-june, 1988.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 222 R**: Corrosion of Metals in Concrete. American Concrete Institute, Michigan, USA, 1996.

_____. **ACI 308.** Standard Practice for Curing Concrete. Michigan, USA, 1992.

_____. **ACI 233 R 03**: Slag Cement in concrete and Mortar. Detroit, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 1202**: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. West Conshohocken, PA, 1997.

_____. **ASTM C 595**: Standard specification for blended hydraulic cements. West Conshohocken, PA, 2003.

_____. **ASTM C 876**: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. West Conshohocken, PA., 1991 (Reapproved 1999).

_____. **ASTM C 989**: Standard specification for ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars. West Conshohocken, PA, 2004.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research.** v. 23, p. 724-742, 1993.

ANDRADE, J. J. de Oliveira. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: Isaia, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, p. 923-951, vol. 2.

ANSTICE, D. J.; PAGE, C. L.; PAGE, M. M. The pore solution phase of carbonated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 377-383, 2005.

ARAÚJO, J. L. de; BARBOSA, N. P.; SANTOS, S. B. dos; REGIS, P. de A. Concreto auto-adensável com materiais locais no nordeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., 2003, Vitória. **Anais…** Vitória: IBRACON, 2003.

ARCELOR DÁ LARGADA PARA AMPLIAR PRODUÇÃO. **A Tribuna**, Vitória, p. 24, 24 jul. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12655**: Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118 NB 1**: Projeto e execução de obras de concreto armado (Válida até 29.03.2004). Rio de Janeiro, 1978.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7117:** Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner). Rio de Janeiro, 1981.

_____. **NBR 7211**: Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 7251**: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 9202**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325). Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR NM 12**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 14**: Cimento Portland – Análise química – Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 15**. Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 16**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 19**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 20**: Cimento Portland e suas matérias-primas – Análise química – Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 49**. Agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52**. Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 76**: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NM 17**: Cimento Portland – Análise química – Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NM 44**. Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NM 49**. Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

BABU, K. Ganesh; KUMAR, V. Sree Rama. Efficiency of GGBS in concrete**. Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1031-1036, 2000.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J.G.; CHENG, Y. B. Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1277-1283, 2001.

BASHEER, Lulu; KROPP, U. JOERG; CLELAND, DAVID J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 93-103, 2001.

BASHEER, P. A. M.; GILLEECE, P. R. V.; LONG, A. E. ; MC CARTER, W. J.. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement & Concrete Composites**, v. 24, p. 437-449, 2002.

BAUER, Elton. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. 1995. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BAUER, Elton; HELENE, Paulo R. L. Investigação da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras em concreto armado. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais ...** 1993, São Paulo. v. 1, p. 85-96.

BAUER, Elton; NEPOMUCENO, Antônio; LINS, Vanessa de Freitas Cunha. Emprego de técnicas eletroquímicas no estudo da corrosão das armaduras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1999.

BELIE, Nele De; VERSELDER, Hans Jurgen; BLAERE, Benny De; NIEUWENBURG, Dirk Van and VERSCHOORE, Reinhart. Influence of the cement type on the resistance of concrete to feed acids. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 11, p. 1717-1725, 1996.

BIRNIN-YAURI, U. A.; GLASSER, F. P. Friedel's salt, $Ca_2Al(OH)_6(Cl,OH)\bullet 2H_2O$: its solid solutions and their role in chloride binding. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 12, p. 1713-1723, 1998.

BOURGUIGNON, Kátia**. Influência da resistência na profundidade de carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno.** 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

BROWN, Michael Carey. **Corrosion protection service life of epoxy coated reinforcing steel in Virginia bridge decks**. 2002. 269 f. Dissertation. (Doctor of Philosophy in Civil & Environmental Engineering) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2002.

BROWN, Paul; BOTHE Jr., James. The system $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}CaCl_2\text{-}H_2O$ at 23±2°C and the mechanisms of chloride binding in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1549-1553, 2004.

BRÜHWILER, Eugen; DENARIÉ, Emmanuel; CONCIATORI, David. Simulation of the corrosion behaviour of concrete elements reinforced with high performance steel. In: FIB SYMPOSIUM "CONCRETE AND ENVIRONMENT", 2001, Berlin. **Proceedings…** Berlin, Oct., 2001.

BURLION, Nicolas; BERNARD, Dominique; CHEN, Da. X-ray microtomography: application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 346-357, 2006.

CAIRNS, John; MELVILLE, Colin. The effect of concrete surface treatments on electrical measurements of corrosion activity. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. 301-309, 2003.

CAMARINI, Gladis. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: IBRACON, 1999.

CANTARELLI, Gustavo M.; ISAÍA, Geraldo; GASTALDINI, Luís; TERNUS, Carlise. Estudo da absorção capilar da camada de cobrimento em protótipos de concreto com elevados teores de escória e cinza volante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: IBRACON, 2005, p. V698-708. Volume V – Inovações Tecnológicas para o Concreto, Trabalho 47CBC0205.

CASCUDO, Osvaldo. **Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problema de corrosão da armadura.** In: Isaia, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, p. 1071-1108, vol. 2.

_____. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto – Inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997. 237 p.

CASTRO, Alexandre de. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação.** 2003. 215 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CASTRO, Alexandre de; FERREIRA, Ricardo; LOPES, Anne Neiry M.; CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena. Durabilidade de concretos com adições minerais frente à carbonatação e ao ataque por cloretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2004. p. VI. 662 - VI. 680, Volume VI – Projeto de Estruturas de Concreto – Trabalho CBC0334 - ISBN: 85-98576-02-6 VI. 662.

CASTRO, P.; MORENO, E.I.; GENESCA, J. Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1565-1571, 2000.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO, Camaçari, v. 7, n. 3, set./dez., 1992, p. 91-102. Boletim Técnico do CEPED.

CHANG, Cheng-Feng; CHEN, Jing-Wen The experimental investigation of concrete carbonation depth. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1760-1767, 2006.

CHEN, Jeffrey J.; THOMAS, Jeffrey J.; JENNINGS. Hamlin M. Decalcification shrinkage of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 801- 809, 2006.

CHRISP, T. M.; MCCARTER, W. J.; STARRS, G.; BASHEER; P. A. M.; BLEWETT, J. Depth-related variation in conductivity to study cover-zone concrete during wetting and drying. **Cement & Concrete Composites,** v. 24, p. 415-426, 2002.

CIVJAN, Scott A.; LAFAVE, James M.; TRYBULSKI, Joanna; LOVETT, Daniel; LIMA, Jose; PFEIFER, Donald W. Effectiveness of corrosion inhibiting admixture combinations in structural concrete**. Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 688-703, 2005.

COCHRAN, W. **Sampling techniques**. Wiley, 3. ed., New York, 1997.

COELHO, Maria Antonina Magalhães. **Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno**. 2002. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

COLLEPARDI, M.; MARCIALLA, A.; TURRIZIANI, R. La cinetica de la penetrazione degli ione cloruro nel cacestruzzo. **Il Cemento**, n. 4, p. 157-164, 1970.

CONCIATORI, David. Influence of microclimate on the probability of initiation of chloride induced corrosion in reinforced concrete. In: INTERNATIONAL PHD SYMPOSIUM IN CIVIL ENGINEERING, 4., 2002, Munich. **Proceeding.** Munich, Sept. 2002.

ÇOPUROĞLU, O.; FRAAIJ, A. L. A.; BIJEN, J. M. J. M.. Effect of sodium monofluorophosphate treatment on microstructure and frost salt scaling durability of slag cement paste. **Cement and Concrete Research**, v.36, p. 1475-1482, 2006.

COSTA, Paulo Edgar F.; GASTALDINI, Antônio Luiz G.; ISAIA, Geraldo C. Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores e finuras de escória granulada de alto forno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Fortaleza. **Anais…** Fortaleza: IBRACON, 2002.

COUTO, Adriane Borges de Paula. **Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos.** 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Área de Concentração Estruturas e Materiais) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2003.

DEHWAH, H. A. F.; MASLEHUDDIN, M.; AUSTIN, S. A. Long-term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes. **Cement & Concrete Composites,** v. 24, p.17-25, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Ministério dos Transportes. **Manual de Inspeção de Obras de Arte**, 1994. 48 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1045-1**: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Berlin, 2001.

_____. **DIN EN 206-1**: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Berlin, 2000.

DHIR, R.K., EL-MOHR, M.A.K.; DYER, T.D. Chloride binding in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research,** v. 26, n. 12, p. 1767-1773, 1996.

DIAS, W. P. S. Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation**. Cement and Concrete Research,** v. 30, p. 1255-1261, 2000.

DUFFÓ, G. S.; MORRIS, W.; RASPINI, I.; SARAGOVI, C. A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years. **Corrosion Science**, v. 46, p. 2143-2157, 2004.

ELSENER, B. Corrosion rate of steel in concrete – Measurements beyond the Tafel law. Corrosion Science, v. 47, p. 3019-3033, 2005.

ELSENER, B.; KLINGHOFFER, O.; FROLUND, T.; RISLUND, E.; SCHIEGG, Y.; BÖHNI, H.. Assessment of reinforcement corrosion by means of galvanostatic pulse technique. In: INTERNATIONAL CONFERENCE REPAIR OF CONCRETE STRUCTURES, 1997. Svolvær, Norway. **Proceedings…** Svolvær, Norway, 1997

ERDOĞDU, S.; KONDRATOV, I. L. ; BREMNER, T. W. Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 603-609, 2004.

FERREIRA JÚNIOR, Epaminondas. Luiz. **Avaliação de propriedades de concreto de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2003.

FERREIRA, Ricardo Barbosa. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. 2003. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Área de concentração Estruturas e Materiais) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2003.

FERREIRA, Ricardo; CASTRO, Alexandre de; COUTO, Adriane Paula; BRAUN, Victor; CASCUDO, Oswaldo. Avaliação da resistência à compressão, módulo de deformação e absorção de água de concretos contendo adições minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais**… Florianópolis: IBRACON, 2004, p. VI.367 - VI.383. Volume VI – Projeto de Estruturas de Concreto – Trabalho CBC0318.

FIGUEIREDO, Chenia Rocha; NEPOMUCENO, Antonio Alberto. Influência da absorção na carbonatação de estruturas de concreto *in loco*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO

CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais**… Florianópolis: IBRACON, 2003, p. II.1042-II.1051. Volume II – Construções em Concreto – Trabalho CBC0276.

FIGUEIREDO, Enio Pazine. **Efeito da carbonatação e de cloretos no concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed.). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, p. 793-827, vol. 2.

FRANKE, Lutz ; SISOMPHON, Kritsada. A new chemical method for analyzing free calcium hydroxide content in cementing material. **Cement and Concrete Research,** v. 34, p. 1161-1165, 2004.

FRIZZO, Benildo Tocchetto; ISAIA, Geraldo Cechella; GASTALDINI, Antonio Luiz Guerra. Influência da finura e de altos teores de pozolanas na absorção capilar de água em concreto estrutural: estudo preliminar. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais…** Foz do Iguaçu: ENTAC, 2002.

GAIDIS, James M. Chemistry of corrosion inhibitors. **Cement & Concrete Composites**, n. 26, p. 181-189, 2004.

GASTALDINI, Antonio Luiz Guerra; ISAIA, Geraldo Cechella. Efeito de misturas compostas de pozolanas e escória na permeabilidade a cloreto. In: ENCONTRO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: ENTAC, 2000.

GASTALDINI, Antonio Luiz Guerra; ISAIA, Geraldo Cechella; ZANELLA, Renato. Composição da solução aquosa de pastas com adições minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: IBRACON, 1999. p. 189.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

GEYER, Rejane M. T.; DAL MOLIN, Denise C. C.; VILELA, Antonio C. F. Caracterização e aplicações das escórias siderúrgicas na indústria da construção civil. In: ENCONTRO REGIONAL MEIO AMBIENTE NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA, 5., 1995, Vitória. **Anais**... Vitória, 1995. p. ST V-1/1-1/2.

GIRÈIENË, Olga; SAMULEVIÈIENË, Meilutë; SUDAVIÈIUS, Aloyzas; RAMANAUSKAS., Rimantas Efficiency of steel corrosion inhibitor calcium nitrite in alkaline solutions and concrete structures. **Chemija**. v. 16, ed. 3/4, p. 1-6, 2005.

GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete. **Corrosion Science**, v. 42, p. 329-344, 2000.

GOÑI; S.; GUERRERO, A.. Accelerated carbonation of Friedel's salt in calcium aluminate cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 21-26, 2003.

GONZÁLEZ, J. A.; MIRANDA, J. M.; FELIU, S. Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete. **Corrosion Science**, v. 46, p. 2467-2485, 2004.

GRIGOLI, A. S.; HELENE, P. Comportamento das adições minerais inertes em poros e zona de transição em concretos. In: ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA DE MARINGÁ, 2., 2001, Maringá. **Anais...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá – Departamento de Engenharia Civil, 2001. p. 02-08, v. 1.

GRUBE, Horst; KERKHOFF, Beatrix. The new German concrete standards DIN EN 206-1 and DIN EN 1045-2 as basis for the design of durable constructions. In: CONCRETE

TECHNOLOGY REPORTS 2001-2003, German Cement Works Association Düsseldorf: Verl. Bau Technik, 2004, p. 19-28, ISBN 3-7640-0461-4-0.

GÜNEYISI, Erhan; ÖZTURAN, Turan; GESOĞLU, Mehmet. A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 449-461, 2005.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto. In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES, 2., 2004, Porto Alegre, **Anais...** Porto Alegre, 2004, 24 p.

_____. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, Paulo Roberto do Lago; MITIDIERI FILHO, C. V.; THOMAS, E. Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto. REUNIÃO ANUAL DO IBRACON. **Anais**... São Paulo. 1995, p. 169-182.

HELENE, Paulo Roberto do Lago; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo. Pini. 1 ed. 1993. 349 p.

HEUKAMP, F. H.; ULM, F. J.; GERMAINE, J. T. Mechanical properties of calcium-leached cement pastes: triaxial stress states and the influence of the pore pressures. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 767-774, 2001.

HOGAN, Frank; MEUSEL, Jerry; SPELLMAN, Lou. Breathing easier with blast furnace slag. **Cement Americas**, Jul. 1, 2001.

HONG, K.; HOOTON, R. D. Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1379-1386, 1999.

HOPPE FO, Juarez; ISAIA, Geraldo Cechella; GASTALDINI, Antônio L. Guerra. Durabilidade frente a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de água de concreto com altos teores de adições minerais e incorporação de cal hidratada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Brasília. **Anais…** Brasília: IBRACON, 2002.

HOU, Wei-Ming; CHANG, Ping-Kun; HWANG, Chao-Lung. A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 615-622, 2004.

HOUST, Yves F.; WITTMANN, Folker H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1923-1930, 2002.

IHEKWAHA, N. M.; HOPE, B. B.; HANSSON, C. M. Carbonation and electrochemical chloride extraction from concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 1095-1107, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURIA. **Estatísticas**. Disponível em: <http://www.ibs.org.br/estatisticas_marco_2008.asp>. Acesso em: 16 maio 2008.

INSTITUTO DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA E EXTENSÃO RURAL. **Boletim Agroclimático de Vitória.** Atualizado em fevereiro de 2006. Resenhas Agroclimáticas/Vitória. Disponível em: <http://www.incaper.es.gov.br/clima/vitoria.htm>. Acesso em: 12 mar. 2006.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A. GASTALDINI, A. L. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz de Iguaçu. **Anais...** Foz de Iguaçu: IBRACON, 2001.

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

JAU, W. C.; TSAY, D. S.. A study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to seawater corrosion. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 10, p. 1363-1371, 1998.

JOHN, Vanderley M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 189 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JONES, M.R.; MACPHEEB, D.E.; CHUDEKC, J.A.; HUNTERC, G.; LANNEGRANDB, R.; TALEROD, R.; SCRIMGEOUR, S.N. Studies using $^{27}$Al MAS NMR of AFm and AFt phases and the formation of Friedel's salt. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 177-182, 2003.

JOUKOSKI, Alex; PORTELLA, Kleber Franke; GARCIA, Carlos Mario; NOGUEIRA, José Ricardo Gonçalves; BARON, Orlando; CANTÃO, Mauricio Pereira; AZEVEDO, Vasco Antonio Libório. Desempenho elétrico de concreto armado com cimento Portland composto com pozolana, CPII-Z 32, em função do envelhecimento por íons cloreto. Parte I, estudo da corrosão da armadura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001.

JUCÁ, Tatiana Renata Pereira. **Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. 2002. 142 f. Dissertação (Mestrado em Durabilidade das Estruturas de Concreto) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2002.

JUNG, Woo-Yong; YOON, Young-Soo; SOHN, Young-Moo. Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion. **Cement and Concrete Research,** v. 33 p. 663-677, 2003.

KANNA, V.; OLSON, R.A.; JENNINGS, H. M. Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars. **Cement and Concrete Research,** v. 28, n. 10, p. 1467-1477, 1998.

KAUSHIK, S. K.; ISLAM, S. Suitability of Sea Water for Mixing Structural Concrete Exposed to a Marine Environment. **Cement & Concrete Composites**, v. 17, p. 177-185, 1995.

KOCH, Gerhardus H.; BRONGERS, Michiel P.H.; THOMPSON, Neil G.; VIRMANI, Y. Paul; PAYER, J. H. Corrosion costs and preventive strategies in the United States. **Materials Performance**, July, 2002. Supplement. Publication n. FHWA-RD-01-156.

KRIZAN, Darko; ZIVANOVIC, Branislav. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1181-1188, 2002.

KULAKOWSKI, M. P.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da relação entre a carbonatação medida em concretos e argamassas empregando-se sílica ativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais…** Florianópolis: IBRACON, 2004.

KURDOWSKI, Wieslaw The protective layer and decalcification of C-S-H in the mechanism of chloride corrosion of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1555-1559, 2004.

LARA. Patrícia Lopes de Oliveira. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras**. 2003. 154 f.. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

LENG, Faguang; FENG, Naiqian; LU, Xinying. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. **Cement and Concrete Research,** v. 30, p. 989-992, 2000.

LIMA, M. G.; LIMA, R. C.; HELENE, P. R. L. Proposta de metodologia para limpeza de barras para utilização em ensaios laboratoriais de avaliação de corrosão das armaduras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO. 19., 1999, Rio de Janeiro. **Anais…** Rio de Janeiro: ABRACO, 1999.

LITTLE Ltd., Arthur D.; SETEPLA, Tecnometal Engenharia Ltda. Estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas no Brasil e em outros oito países. **Sumário Executivo preparado para Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS e Empresas Siderúrgicas Associadas**, 1999.

LIU, Youping. **Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures**. 1996. 117 f. Dissertation (partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1996.

LONGO. A. Escoria granulada de altos hornos. In: MEMÓRIA TÉCNICA DE LAS PRIMERAS JORNADAS TÉCNICAS DE ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS. 1985, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: SOMISA – Sociedad Mixta Siderurgia Argentina, 1985. p. 38-45.

LÓPEZ, W.; GONZÁILEZ, J. A.; ANDRADE, C. Influence of temperature on the service life of rebars**. Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 1130-1140, 1993.

LUO, Rui, CAI, Yuebo; WANG, Changyi; HUANG, Xiaoming. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1-7, 2003.

LUPING, Tang. Calibration of the electrochemical methods for the corrosion rate measurement of steel in concrete. NORDTEST Project n. 1531-01, SP, Swedish National Testing and Research Institute – **Building Technology**, p. 1-54, SP REPORT 25, 2002.

MANCIO, M.; ZHANG, J.; MONTEIRO, P. J. M. Nondestructive surface measurement of corrosion of reinforcing steel in concrete. **Canadian Civil Engineer**, v. 21, n. 2, May 2004, p. 12-14, 18.

MECK, E.; SIRIVIVATNANON, V. Field indicator of chloride penetration depth. **Cement and Concrete Research,** v. 33, p. 1113-1117, 2003.

MEDEIROS, Marcelo H. F. de. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. **Revista do Centro de Engenharia Civil – Universidade do Minho – Portugal.** n. 12, p. 55-64, 2001.

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

MEHTA, P. Kumar. High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT

AND CONCRETE TECHNOLOGY, 2004. Beijing. **Proceedings…** Beijing, May 20-21, 2004.

MIETZ, Jiirgen; LSECKE, Bernd. Monitoring of concrete structures with respect to rebar corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 361-313, 1996.

MISSAU, Fabiano; GASTALDINI, Antonio Luiz G.; ISAIA, Geraldo C.; HOPPE, Tiago F.. Resistividade elétrica de concretos compostos com adições minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2004. p. II.1600 - II.1611, v. II – Construções em Concreto – Trabalho CBC0396.

MONTEIRO, E. C. B.; NEPOMUCENO, A. A. Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras, sob a ação conjunta de $CO_2$ e íons cloreto: Influência da Relação água/cimento. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ROCHA, 1996. p. 379-389.

MONTEIRO, Eliana Barreto; NEPOMUCENO, Antônio Alberto; BARKOKÉBAS Junior, Béda. A influência do tipo de cimento na capacidade de proteção em relação à fase de iniciação da corrosão de armaduras sob ação dos íons cloreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO (CBC), 5., 1999, Salvador. **Anais…** Salvador, 1999.

MONTGOMERY, Douglas C. Design and Analysis of Experiments. New York: John Wiley & Sons, 1991.

MOON, Han Young; SHIN, Kook Jae. Evaluation on steel bar corrosion embedded in antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 521-529, 2006.

MORENO, M.; MORRIS, W.; ALVAREZ, M. G.; DUFFÓ, G. S. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions Effect of carbonation and chloride content. **Corrosion Science**, v. 46, p. 2681-2699, 2004.

MORRIS, W; VICO, A.; VASQUEZ, M.; SANCHEZ, S. R. Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements. **Corrosion Science**, v. 44, p. 81-99, 2002.

MUKHERJEE, P. K.. Preliminary Slag Scoping Study for EcoSmart™ Concrete. EcoSmart™ Concrete Project 504-999 Canada Place, Vancouver, BC, Canada V6C 3E1, 2004, Insaar Services Report Number: IN-0226-1103.

NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismo de transporte de fluidos no concreto.** In: Isaia, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, p. 793-827, vol. 2.

NEPOMUCENO, Antonio Alberto; PESSOA, Patricia Oliveira Américo. Influência da reserva alcalina na corrosão de armaduras em peças de argamassas com diferentes relações água/cimento sujeitas à carbonatação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2004. p. II.1084-II.1096, v. II – Construções em Concreto – Trabalho CBC0461.

NEVILLE, Adam Mathew. **Propriedades do concreto**. Trad. Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L. Effects of carbonation on pore structure and diffusion properties of hydrated cements pastes. **Cement and concrete Research**, v. 27, n. 67, p. 995-1007, 1997.

NUNES, Fabíola L. **Influência da dosagem na carbonatação dos concretos**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

OH, Byung Hwan; CHA, Soo Won; JANG, Bong Seok; JANG, Seung Yup. Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration**. Nuclear Engineering and Design,** v. 212, p. 221-231, 2002.

OSS, Hendrik G. Van. USGS. Iron and Steel Slag. **Minerals Usgs**. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/> Acesso em: 11 ago. 2006.

OZYILDIRIM, Celik. Laboratory investigation of low-permeability concretes containing slag and silica fume. **ACI Material Journal**, Technical paper, title n. 91-M20. Mar.-Apr. 1994.

PAL, S. C. ; MUKHERJEE, A. ; PATHAK, S. R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1481-1486, 2003.

PAPADAKI, Vagelis G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 291-299, 2000.

PECH-CANUL, M. A.; CASTRO, P. Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere. **Cement and Concrete Research** , v.32, p. 491-498, 2002.

PEREIRA, Lucia de Fátima L. da Costa; CINCOTTO, Maria Alba. Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2001, ISSN 0103-9830 BT/PCC/294.

PO-GT 6021/97 – Carvão/óleo/matéria-prima/resíduos – Espectrometria de absorção atômica – Determinação de elementos.

POLDER, Rob B.; PEELEN, Willy H. A.. Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement & Concrete Composites**, v. 24, p. 427-435, 2002.

PRUCKNER, F.; GJØRV, O. E. Effect of $CaCl_2$ and NaCl additions on concrete corrosivity. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1209-1217, 2004.

RAJAMANE, N. P.; PETER, J. ANNIE; DATTATREYA, J. K.; NEELAMEGAM, M.; GOPALAKRISHNAN, S. Improvement in properties of high performance concrete with partial replacement of cement by ground granulated blast furnace slag. **IE (I) Journal.CV**, v. 84, May, 2003.

RAJAOKARIVONY-ANDRIAMBOLONA, Z.; BAILLIF, P. THOMASSIN, J. H.; TOURAY, J. C. Experimental hydration of two synthetic glassy blast furnace slag in water and alkaline solutions (sodium hydroxide and potassium hydroxide) at 40°C: Structure, Composition and origin of the hydrated layer. **Journal of Materials Science**, v. 25, n. 5, p. 2399-2410, 1990.

REGATTIERI, Carlos Eduardo X. **Contribuição ao estudo da influência da dosagem do concreto na absorção capilar e penetração de íons cloreto**. 1998, 237 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

RICHARDSON, David N. Strength and Durability Characteristics of a 70% Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) Concrete Mix. University of Missouri-Rolla. Organizational Results Research Report. FINAL REPORT, Feb. 2006, RI99-035/RI99-035B.

SAETTA, Anna V.; VITALIANI, Renato V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part II. Practical applications. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 958-967, 2005.

SAGÜÉS, A. A.; PECH-CANUL, M. A.; AL-MANSUR, A. K. M. SHAHID. Corrosion macrocell behavior of reinforcing steel in partially submerged concrete columns. **Corrosion Science**, v. 45, p. 7-32, 2003.

SAKR, K. Effect of cement type on the corrosion of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical technique. **Cement and Concrete Research**, v. xx, n. xxx–xxx, 2004.

SAMET, Basma; CHAABOUNI, Moncef. Characterization of the Tunisian blast-furnace slag and its application in the formulation of a cement. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1153-1159, 2004.

SANDBERG, P.; LARSSON, J. Chloride binding in cement pastes in equilibrium with synthetic pore solutions. In: L.-O. Nilsson (Chalmers Tekniska Hogskola, Göteborg) (Ed.). Chloride Penetration in Concrete Structures. Nordic Miniseminar, Göteborg, Jan. 1993, p. 98.

SATO, Neide Matiko Nakata. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SCHMIDT, M., et al. **Blended Cements (Chapter 9.2).** In: J. I. Bhatty, F. M. Miller, Kosmatka (Ed.). Innovations in Portland cement manufacturing. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2004, p. 1404.

SILVA, Maristela Gomes da. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória.** 1998. 232 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SILVA, Maristela Gomes da; SILVA, Vanessa Gomes da; RODRIGUES, Gisele L. C.; POLESE, Marina de O. Propriedades, normalização e tendência na adição de escória de alto-forno em cimentos e concretos. **NEXES – Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas** – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – 2006a.

SILVA, Maristela Gomes da; ZANDONADE, E.; FERREIRA, E. J.; SOUZA, F. L. S.; BOURGUIGNON, K. M. B. G.; COSTA JR., M. P.; SILVA, M. R.; MORAES, S. M. P.; MORAES, S. G. Concreto de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno: estratégia para consolidar e ampliar o mercado da escória de alto-forno – Projeto Desempenho. **CONVÊNIO: FINEP, UFES, CST**, 2006b.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Venda de cimento – resultados preliminares de abril.** Disponível em: <http://www.snic.org.br>. Acesso em: 20 maio 2008.

SIVASUNDARAM, V.; MALHOTRA, V. M. Properties of concrete incorporating low quality of cement and Hot volume of ground granulated slag. **ACI Material Journal**, title n. 89-M61, p. 554-563, Nov./Dec., 1992.

SONG, Guangling. Theoretical analysis of the measurement of polarization resistance in reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 407-415, 2000.

SOUZA, Fernando Lordêllo dos Santos. **Concreto de alta resistência com cimento Portland de alto-forno**. 1992. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

SOYLEV, T.A.; FRANÇOIS, R. Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1407-1415, 2003.

SPOT, Michel de; WOJTAROWICZ, Maggie. Study of GS-CEM and other slag-based products. A contribution to the environment for EcoSmartTM Concrete. EcoSmartTM Concrete Project Canada Place, Vancouver, BC, Canada, Sept. 2004.

STANISH, K.; HOOTON, R.D.; THOMAS, M.D.A. A novel method for describing chloride ion transport due to an electrical gradient in concrete: Part 1. Theoretical description. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 43-49, 2004.

STEFFENS, Alexander; DINKLER, Dieter; AHRENS, Hermann. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 935-941, 2002.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **SHRP-S-324**: Condition evaluation of concrete bridges relative to reinforcement corrosion – method for measuring the corrosion rate of reinforcing steel, Washington, 1993, v. 2.

SUN, Wei; ZHANG, Yunsheng; LIU, Sifeng; ZHANG, Yanmei. The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion of steel bars in green high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1781-1785, 2004.

SURYAVANSHI, A. K.; NARAYAN SWAMY, R. Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 5, p. 729-741, 1996.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. New York: Academic Press, 1992, 167 p.

THANGAVEL, K.; RENGASWAMY, N. S. Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 283-292, 1998.

UZEDA, Jorge D. L. O potencial de eletrodo como controle do processo corrosivo em estruturas de concreto armado e protendido. In: DAMSTRUC, 1998, Niterói. **Anais...** Niterói, 1998. 10 p.

VAGHETTI, Marcos Alberto Oss; MULLER, I. L; ISAIA, G. C. Corrosão do aço em concretos com adições minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: IBRACON, 2005.

WAELKENS, Gerardo S., CARMINE, Cláudio O. del. La elaboración del arrabio y del acero. Las escórias siderúrgicas, su generación y propiedades. Niveles de producción. In: MEMÓRIA TÉCNICA DE LAS PRIMERAS JORNADAS TÉCNICAS DE ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS, 1985, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: SOMISA – Sociedad Mixta Siderurgia Argentina, 1985. p. 1-31.

WAELKENS, Gerardo S.; CARMINE, Cláudio O. Generacion y propiedades de las escorias siderurgicas. In: MEMÓRIA TÉCNICA DE LAS PRIMERAS JORNADAS TÉCNICAS DE ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS, 1985, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: SOMISA – Sociedad Mixta Siderurgia Argentina, 1985. p. 1-31.

WEE, T.H.; SURYAVANSHI, ARVIND K.; TIN, SAN SAN. Influence of aggregate fraction in the mix on the reliability of the rapid chloride permeability test. **Cement and Concrete Composites**, v. 21 p. 59-72, 1999.

WEGNER, Dalton; GASTALDINI, Antônio L. G.; ISAIA, Geraldo C.; SCHNEIDER, Jonas A. Resistividade elétrica de concretos compostos com escória de alto forno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: IBRACON, 2005. p. V1179-1190, Volume V – Inovações Tecnológicas para o Concreto, Trabalho 47CBC0190.

XU. Y. The influence of sulphates on chloride binding and pore solution chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 12, p. 1841-1850, 1997.

YALQYN, H.; ERGUN, M. The prediction of corrosion rates of reinforcing steels in concrete**. Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 10, p. 1593-1599, 1996.

YEAU, Kyong Yun; KIM, Eun Kyum. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1391-1399, 2005.

ZIVICA, Vladimír. Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbon dioxide. Indian Academy of Sciences – Institute of Construction and Architecture of the Slovak Academy of Sciences. **Bulletin Material Science**, v. 26, n. 6, p. 605-608, Oct. 2003.

# ANEXO A - Resistência à compressão aos 28 dias, massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios.

**Tabela 5.1: Resistência à compressão aos 28 dias (média e desvio-padrão) dos concretos estudados.**

| traço | material cimentício | resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa) | |
|---|---|---|---|
| | | Média | Desvio-padrão |
| T1 | C20 CP II-E-32 | 23,1 | 0,90 |
| T2 | C20 CP III-32-RS | 28,4 | 1,02 |
| T3 | C20 CP III-32-RS + e | 29,3 | 0,82 |
| T4 | C30 CP II-E-32 | 37,0 | 0,58 |
| T5 | C30 CP III-32-RS | 37,4 | 2,08 |
| T6 | C30 CP III-32-RS + e | 38,5 | 1,25 |
| T7 | C40 CP II-E-32 | 48,8 | 1,06 |
| T8 | C40 CP III-32-RS | 51,8 | 2,44 |
| T9 | C40 CP III-32-RS + e | 53,7 | 2,02 |

**Tabela 5.2: ANOVA e teste *a posteriori* de Duncan para a variável resistência à compressão aos 28 dias com fator de variação material cimentício (n=4).**

| classe de resistência | F | p-valor | diferenças estatísticas (fator-material cimentício) |
|---|---|---|---|
| C20 | 52,780 | 0,000 | C20 CP II-E-32 < (C20 CP III-32-RS ≈ C20 CP III-32-RS + e) |
| C30 | 1,206 | 0,344 | Todos semelhantes (≈) |
| C40 | 6,554 | 0,018 | (C40 CP II-E-32 ≈ C40 CP III-32-RS) < C40 CP III-32-RS + e |

**Tabela 5.3: Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios (média e desvio-padrão) dos concretos estudados (SILVA et al., 2006b)**

| traço | denominação | água/material cimentício | massa específica (kg/dm³) | DP* (kg/dm³) | absorção (%) | DP* (%) | índice de vazios (%) | DP* (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | C20 CP II-E-32 | 0,63 | 2,62 | 0,01 | 6,13 | 0,09 | 13,82 | 0,16 |
| T2 | C20 CP III-32-RS | 0,75 | 2,57 | 0,02 | 5,91 | 0,47 | 13,17 | 0,99 |
| T3 | C20 CP III-32-RS + e | 0,63 | 2,59 | 0,01 | 5,61 | 0,40 | 12,70 | 0,84 |
| T4 | C30 CP II-E-32 | 0,49 | 2,63 | 0,00 | 5,91 | 0,17 | 13,46 | 0,34 |
| T5 | C30 CP III-32-RS | 0,61 | 2,55 | 0,02 | 4,78 | 0,44 | 10,88 | 0,94 |
| T6 | C30 CP III-32-RS + e | 0,49 | 2,59 | 0,01 | 4,96 | 0,30 | 11,37 | 0,68 |
| T7 | C40 CP II-E-32 | 0,39 | 2,62 | 0,01 | 4,81 | 0,63 | 11,16 | 1,30 |
| T8 | C40 CP III-32-RS | 0,52 | 2,57 | 0,02 | 4,81 | 0,42 | 11,00 | 0,94 |
| T9 | C40 CP III-32-RS + e | 0,39 | 2,61 | 0,01 | 4,79 | 0,29 | 11,09 | 0,64 |

* Desvio-padrão

# ANEXO B - ANOVA e teste *a posteriori* de Duncan para massa específica, absorção de água por imersão, índice de vazios, absorção por capilaridade e altura de ascensão capilar.

**Tabela 5.4: ANOVA e teste *a posteriori* de Duncan para a variável massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios com fator de variação material cimentício (n=3) (SILVA et al., 2006b).**

| variável | classe de resistência | F | p-valor | diferenças estatísticas para o fator material cimentício |
|---|---|---|---|---|
| massa específica | C20 | 12,905 | 0,020 | C20 CP III-32-RS < C20 CP III-32-RS + e < C20 CP II-E-32 |
| | C30 | 41,388 | 0,000 | C30 CP III-32-RS < C30 CP III-32-RS + e < C30 CP II-E-32 |
| | C40 | 10,014 | 0,050 | C40 CP III-32-RS < (C40 CP III-32-RS + e ≈ C40 CP II-E-32) |
| absorção | C20 | 2,120 | 0,176 | Todos semelhantes (≈) |
| | C30 | 14,175 | 0,002 | (C30 CP-III-32-RS ≈ C30 CP-III-32-RS + e) < C30 CPII-E-32 |
| | C40 | 0,002 | 0,998 | Todos semelhantes (≈) |
| índice de vazios | C20 | 2,246 | 0,162 | Todos semelhantes (≈) |
| | C30 | 15,471 | 0,001 | (C30 CP III-32-RS ≈ C30 CP III-32-RS + e) < C30 CP II-E-32 |
| | C40 | 0,024 | 0,976 | Todos semelhantes (≈) |

**Tabela 5.5: Absorção por capilaridade e altura de ascensão capilar aos 63 dias de idade (média e desvio-padrão) para os concretos estudados (SILVA et al., 2006b).**

| traço | material cimentício | água/material cimentício | $f_{c28}$ (MPa) | absorção por capilaridade aos 63 dias (g/cm²) | desvio-padrão (g/cm²) | altura capilar (cm) | desvio-padrão (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | C20 CP II-E-32 | 0,63 | 22,8 | 1,21 | 0,15 | 12,1 | 1,17 |
| T2 | C20 CP III-32-RS | 0,75 | 27,0 | 1,11 | 0,13 | 10,62 | 0,92 |
| T3 | C20 CP III-32-RS + e | 0,63 | 24,7 | 1,66 | 0,23 | 13,9 | 1,11 |
| T4 | C30 CP II-E-32 | 0,49 | 27,4 | 0,77 | 0,08 | 8,1 | 1,18 |
| T5 | C30 CP III-32-RS | 0,61 | 29,0 | 0,8 | 0,05 | 8,71 | 0,63 |
| T6 | C30 CP III-32-RS + e | 0,49 | 27,0 | 0,81 | 0,06 | 9,38 | 0,64 |
| T7 | C40 CP II-E-32 | 0,39 | 43,4 | 0,68 | 0,06 | 7,06 | 65 |
| T8 | C40 CP III-32-RS | 0,52 | 40,4 | 0,82 | 0,06 | 9,18 | 0,23 |
| T9 | C40 CP III-32-RS + e | 0,39 | 34,2 | 0,54 | 0,08 | 6,4 | 0,85 |

# ANEXO C - Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos na condição natural.

**Tabela 5.6: Profundidade de carbonatação na condição natural.**

| classe | material cimentício | mínimo (mm) | máximo (mm) | média (mm) | desvio-padrão (mm) | *coeficiente de variação (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | CP II E-32 | 3,6 | 9,6 | 6,3 | 1,7 | 26,9 |
| | CP III-32-RS | 1,3 | 7,2 | 5,4 | 1,0 | 19,1 |
| | CP III-32-RS + e | 4,5 | 8,6 | 6,3 | 1,1 | 17,7 |
| 30 | CP II E-32 | 0,0 | 4,4 | 2,2 | 0,8 | 38,5 |
| | CP III-32-RS | 1,2 | 6,0 | 3,0 | 1,1 | 35,7 |
| | CP III-32-RS + e | 2,1 | 7,0 | 3,9 | 1,1 | 27,4 |
| 40 | CP II E-32 | 0,0 | 5,0 | 0,8 | 1,1 | 136,0 |
| | CP III-32-RS | 0,1 | 6,5 | 1,2 | 1,2 | 98,9 |
| | CP III-32-RS + e | 0,5 | 4,0 | 1,3 | 0,7 | 54,7 |

* O coeficiente de variação indica a dispersão das medidas em torno do desvio-padrão.

**Tabela 5.7: Profundidade de penetração de cloretos na condição natural.**

| classe | material cimentício | mínimo (mm) | máximo (mm) | média (mm) | desvio-padrão (mm) | *coeficiente de variação (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | CP II E-32 | 0,0 | 10,6 | 5,6 | 2,1 | 37,6 |
| | CP III-32-RS | 1,7 | 11,7 | 5,6 | 1,9 | 34,1 |
| | CP III-32-RS + e | 3,3 | 8,6 | 5,5 | 1,1 | 19,5 |
| 30 | CP II E-32 | 0,1 | 3,1 | 1,4 | 0,8 | 52,5 |
| | CP III-32-RS | 1,1 | 4,6 | 2,3 | 0,8 | 35,8 |
| | CP III-32-RS + e | 0,9 | 5,6 | 3,0 | 1,1 | 36,2 |
| 40 | CP II E-32 | 1,1 | 2,2 | 0,4 | 0,5 | 116,3 |
| | CP III-32-RS | 0,1 | 1,2 | 0,5 | 0,3 | 57,7 |
| | CP III-32-RS + e | 0,3 | 1,5 | 0,9 | 0,4 | 43,3 |

* O coeficiente de variação indica a dispersão das medidas em torno do desvio-padrão.

# ANEXO D - Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos na condição de envelhecimento acelerado.

**Tabela 5.8: Profundidade de carbonatação na condição de envelhecimento acelerado.**

| traço | concreto | resistência à compressão (MPa)** | a./ mat. cim. | profundidade carbonatação acelerada (10%) (mm) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1º ciclo | DP* | 2º ciclo | DP | 3º ciclo | DP | 4º ciclo | DP | 5º ciclo | DP |
| T1 | C20 CP II-E-32 | 23,10 | 0,63 | 12,1 | 2,3 | 17,0 | 1,9 | 19,8 | 2,9 | 22,6 | 2,5 | 27,1 | 4,9 |
| T2 | C20 CP III-32-RS | 28,40 | 0,75 | 7,9 | 1,8 | 12,0 | 2,0 | 16,2 | 2,3 | 14,4 | 2,0 | 18,8 | 2,3 |
| T3 | C20 CP III-32-RS + e | 29,31 | 0,63 | 12,2 | 2,0 | 15,8 | 1,8 | 17,3 | 2,5 | 20,6 | 1,8 | 24,0 | 3,2 |
| T4 | C30 CP II-E-32 | 36,97 | 0,49 | 7,3 | 1,9 | 9,6 | 1,9 | 10,9 | 1,9 | 12,3 | 2,2 | 14,3 | 2,2 |
| T5 | C30 CP III-32-RS | 37,44 | 0,61 | 5,7 | 1,2 | 8,1 | 1,6 | 8,0 | 1,7 | 10,5 | 1,8 | 10,5 | 1,9 |
| T6 | C30 CP III-32-RS + e | 38,52 | 0,49 | 8,3 | 1,7 | 11,8 | 1,3 | 13,4 | 2,1 | 15,4 | 2,0 | 16,7 | 1,6 |
| T7 | C40 CP II-E-32 | 48,75 | 0,39 | 3,0 | 1,4 | 4,9 | 1,3 | 5,3 | 1,0 | 5,9 | 1,3 | 7,3 | 1,6 |
| T8 | C40 CP III-32-RS | 51,78 | 0,52 | 2,2 | 1,3 | 4,3 | 1,3 | 4,1 | 0,8 | 4,8 | 1,1 | 6,9 | 1,4 |
| T9 | C40 CP III-32-RS + e | 53,66 | 0,39 | 5,9 | 1,4 | 6,8 | 0,8 | 6,2 | 0,7 | 8,6 | 1,2 | 9,9 | 1,2 |

*D.P. – Desvio-padrão; ** 28 dias

**Tabela 5.9: Profundidade de penetração de cloretos na condição de envelhecimento acelerado.**

| traço | concreto | resistência à compressão (MPa)** | a./ mat. cim. | profundidade carbonatação acelerada (10%) (mm) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1º ciclo | DP* | 2º ciclo | DP | 3º ciclo | DP | 4º ciclo | DP | 5º ciclo | DP |
| T1 | C20 CP II-E-32 | 23,10 | 0,63 | 11,7 | 1,7 | 17,4 | 2,4 | 20,7 | 2,7 | 22,0 | 2,1 | 29,6 | 4,5 |
| T2 | C20 CP III-32-RS | 28,40 | 0,75 | 4,4 | 0,8 | 3,9 | 1,3 | 11,1 | 2,5 | 12,3 | 2,3 | 16,3 | 4,2 |
| T3 | C20 CP III-32-RS + e | 29,31 | 0,63 | 4,1 | 0,7 | 6,9 | 3,2 | 14,0 | 2,6 | 17,0 | 2,6 | 20,4 | 1,8 |
| T4 | C30 CP II-E-32 | 36,97 | 0,49 | 7,2 | 1,6 | 10,2 | 1,8 | 11,9 | 1,9 | 13,7 | 2,0 | 16,7 | 2,0 |
| T5 | C30 CP III-32-RS | 37,44 | 0,61 | 2,2 | 0,9 | 3,7 | 1,2 | 6,1 | 1,8 | 9,3 | 2,3 | 10,8 | 1,5 |
| T6 | C30 CP III-32-RS + e | 38,52 | 0,49 | 3,3 | 1,0 | 4,9 | 1,7 | 10,1 | 2,0 | 11,9 | 2,3 | 13,3 | 1,8 |
| T7 | C40 CP II-E-32 | 48,75 | 0,39 | 2,0 | 0,9 | 5,5 | 1,2 | 5,3 | 1,0 | 8,5 | 2,2 | 10,3 | 1,8 |
| T8 | C40 CP III-32-RS | 51,78 | 0,52 | 0,9 | 0,3 | 3,0 | 1,3 | 3,9 | 0,8 | 6,4 | 1,0 | 6,4 | 1,5 |
| T9 | C40 CP III-32-RS + e | 53,66 | 0,39 | 1,1 | 0,5 | 3,3 | 1,6 | 4,6 | 1,0 | 9,8 | 1,3 | 8,7 | 1,5 |

*D.P. – Desvio-padrão; ** 28 dias

# ANEXO E - Influência dos diferentes teores de escória e da espessura de cobrimento na resistividade elétrica aparente dos concretos classe C20 e classe C30 na condição de envelhecimento acelerado.

**Tabela 5.10: Resistividade elétrica aparente (média e desvio-padrão) dos concretos classe C20.**

| traço | concreto | resistência à compressão média (MPa) | água/material cimentício | idade (dias) | resistividade elétrica (média e desvio-padrão) (kΩ.cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| T1 | CP II-E-32 | 23,10 | 0,63 | 0* | 93,00 (2,00) |
| | | | | 9 | 48,75 (35,84) |
| | | | | 24 | 17,75 (5,56) |
| | | | | 35 | 32,00 (6,78) |
| | | | | 62 | 28,25 (8,57) |
| | | | | 75 | 15,83 (6,32) |
| T2 | CP III-32-RS | 28,40 | 0,75 | 0* | 99,00 (0,00) |
| | | | | 9 | 71,25 (30,98) |
| | | | | 24 | 44,50 (33,96) |
| | | | | 35 | 45,50 (26,13) |
| | | | | 62 | 29,00 (8,67) |
| | | | | 75 | 24,25 (12,55) |
| T3 | CP III-32-RS + e | 29,31 | 0,63 | 0* | 99,00 (0,00) |
| | | | | 9 | 25,50 (4,12) |
| | | | | 24 | 13,00 (4,08) |
| | | | | 35 | 10,37 (2,51) |
| | | | | 62 | 13,50 (3,10) |
| | | | | 75 | 7,73 (0,75) |

*Corresponde às medidas na idade de 365 dias antes de iniciar os ciclos acelerados; o desvio-padrão está entre parênteses.

**Tabela 5.11: Resistividade elétrica aparente (média e desvio-padrão) dos concretos classe C30.**

| traço | concreto | resistência à compressão média (MPa) | água/material cimentício | idade (dias) | resistividade elétrica (média e desvio-padrão) (kΩ.cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| T4 | CP II-E-32 | 36,97 | 0,49 | 0* | 79,25 (6,70) |
| | | | | 3 | 60,25 (8,80) |
| | | | | 16 | 46,75 (5,56) |
| | | | | 29 | 42,00 (6,78) |
| | | | | 56 | 31,50 (2,88) |
| | | | | 69 | 30,50 (5,97) |
| T5 | CP III-32-RS | 37,44 | 0,61 | 0* | 76,00 (15,57) |
| | | | | 3 | 35,50 (10,97) |
| | | | | 16 | 38,00 (13,14) |
| | | | | 29 | 36,00 (8,40) |
| | | | | 56 | 31,25 (7,41) |
| | | | | 69 | 31,00 (3,74) |
| T6 | CP III-32-RS + e | 38,52 | 0,49 | 0* | 99,00 (0,00) |
| | | | | 3 | 46,25 (12,50) |
| | | | | 16 | 36,00 (5,71) |
| | | | | 29 | 32,75 (6,70) |
| | | | | 56 | 19,75 (1,70) |
| | | | | 69 | 17,75 (2,50) |

*Corresponde às medidas na idade de 365 dias antes de iniciar os ciclos acelerados; o desvio-padrão está entre parênteses.

# ANEXO F - Influência dos diferentes teores de escória e da espessura de cobrimento na resistividade elétrica do concreto classe C40 e no potencial de corrosão do concreto classe C20, na condição de envelhecimento acelerado.

**Tabela 5.12: Resistividade elétrica aparente (média e desvio-padrão) dos concretos classe C40.**

| traço | concreto | resistência à compressão média (MPa) | água/material cimentício | idade (dias) | resistividade elétrica (média e desvio-padrão) (kΩ.cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| T7 | CP II-E-32 | 48,75 | 0,39 | 0* | 82,25 (0,95) |
| | | | | 3 | 71,50 (11,21) |
| | | | | 16 | 87,25 (7,13) |
| | | | | 29 | 67,75 (9,43) |
| | | | | 56 | 52,00 (4,24) |
| | | | | 69 | 61,75 (8,88) |
| T8 | CP III-32-RS | 51,78 | 0,52 | 0* | 80,75 (13,20) |
| | | | | 3 | 66,50 (8,22) |
| | | | | 16 | 95,25 (7,50) |
| | | | | 29 | 82,50 (13,69) |
| | | | | 56 | 61,50 (7,54) |
| | | | | 69 | 71,75 (12,03) |
| T9 | CP III-32-RS + e | 53,66 | 0,39 | 0* | 99,00 (0,00) |
| | | | | 3 | 69,25 (18,06) |
| | | | | 16 | 50,00 (5,71) |
| | | | | 29 | 40,50 (6,02) |
| | | | | 56 | 33,50 (3,87) |
| | | | | 69 | 29,75 (2,06) |

*Corresponde às medidas na idade de 365 dias antes de iniciar os ciclos acelerados; o desvio-padrão está entre parênteses.

**Tabela 5.13: Potencial de corrosão (média e desvio-padrão) dos concretos classe C20.**

| traço | material cimentício | resistência à compressão média aos 28 dias (MPa) | água/material cimentício | idade (dias) | potencial de corrosão (-mV) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | espessura de cobrimento | |
| | | | | | 20 mm | 30 mm |
| T1 | CP II-E-32 | 23,10 | 0,63 | 0* | 89,75 (11,95) | 100,5 (40,46) |
| | | | | 9 | 187,5 (81,79) | 163,75 (39,37) |
| | | | | 24 | 223,25 (99,62) | 170,75 (33,35) |
| | | | | 35 | 287,25 (155,72) | 149,5 (17,07) |
| | | | | 62 | 285,25 (219,01) | 204,25 (56,97) |
| | | | | 75 | 422,75 (183,19) | 197,00 (76,27 |
| T2 | CP III-32-RS | 28,40 | 0,75 | 0* | 51,50 (16,14) | 26,00 (13,08) |
| | | | | 9 | 104,00 (26,87) | 119,25 (64,14) |
| | | | | 24 | 189,25 (91,59) | 125,25 (69,34) |
| | | | | 35 | 315,25 (167,90) | 145,50 (108,44) |
| | | | | 62 | 519,75 (81,66) | 170,00 (94,49) |
| | | | | 75 | 517,50 (49,29) | 90,00 (82,47) |
| T3 | CP III-32-RS + e | 29,31 | 0,63 | 0* | 54,75 (39,99) | 115,00 (12,56) |
| | | | | 9 | 120,50 (16,62) | 166,00 (36,94) |
| | | | | 24 | 172,00 (74,98) | 240,25 (80,44) |
| | | | | 35 | 274,25 (198,43) | 206,25 (96,08) |
| | | | | 62 | 390,00 (250,10) | 244,25 (97,29) |
| | | | | 75 | 520 (104,74) | 89,25 (19,75) |

*Corresponde às medidas na idade de 365 dias antes de introduzir os corpos-de-prova aos ciclos acelerados; desvio-padrão entre parênteses.

# ANEXO G - Potencial de corrosão nos diferentes teores de escória nos concretos classe C30 e classe C40.

**Tabela 5.14: Potencial de corrosão (média e desvio-padrão) dos concretos classe C30.**

| traço | material cimentício | resistência à compressão média aos 28 dias (MPa) | água/material cimentício | idade (dias) | potencial de corrosão (-mV) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | espessura de cobrimento | |
| | | | | | 20 mm | 30 mm |
| T4 | CP II-E-32 | 36,97 | 0,49 | 0* | 70,50 (9,25) | 57,75 (5,67) |
| | | | | 3 | 168,00 (33,42) | 180,75 (69,74) |
| | | | | 16 | 136,00 (29,13) | 128,00 (30,39) |
| | | | | 29 | 167,50 (87,72) | 144,00 (27,76) |
| | | | | 56 | 313,25 (141,43) | 96,50 (23,01) |
| | | | | 69 | 324,50 (150,34) | 91,00 (30,14) |
| T5 | CP III-32-RS | 37,44 | 0,61 | 0* | 51,00 (14,76) | 49,50 (13,22) |
| | | | | 3 | 164,00 (74,83) | 139,50 (83,38) |
| | | | | 16 | 231,75 (117,23) | 99,00 (20,01) |
| | | | | 29 | 215,75 (129,66) | 79,75 (19,61) |
| | | | | 56 | 376,75 (121,92) | 74,75 (13,22) |
| | | | | 69 | 380,25 (157,71) | 43,00 (17,87) |
| T6 | CP III-32-RS + e | 38,52 | 0,49 | 0* | 75,00 (8,12) | 76,50 (2,88) |
| | | | | 3 | 106,75 (14,12) | 120,00 (24,31) |
| | | | | 16 | 221,50 (80,28) | 97,25 (8,88) |
| | | | | 29 | 263,75 (111,06) | 181,00 (192,02) |
| | | | | 56 | 389,00 (74,07) | 165,50 (153,08) |
| | | | | 69 | 377,25 (79,02) | 100,75 (97,12) |

*Corresponde às medidas na idade de 365 dias antes de introduzir os corpos-de-prova aos ciclos acelerados; desvio-padrão entre parênteses.

**Tabela 5.15: Potencial de corrosão (média e desvio-padrão) dos concretos classe C40.**

| traço | material cimentício | resistência à compressão média aos 28 dias (MPa) | água/material cimentício | idade (dias) | potencial de corrosão (-mV) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | espessura de cobrimento | |
| | | | | | 20 mm | 30 mm |
| T7 | CP II-E-32 | 48,75 | 0,39 | 0* | 69,00 (7,52) | 66,00 (6,97) |
| | | | | 3 | 164,75 (59,20) | 150,25 (35,27) |
| | | | | 16 | 141,00 (22,84) | 113,50 (12,01) |
| | | | | 29 | 192,50 (158,86) | 85,50 (9,14) |
| | | | | 56 | 158,50 (125,14) | 61,25 (26,09) |
| | | | | 69 | 143,50 (79,68) | 112,25 (15,32) |
| T8 | CP III-32-RS | 51,78 | 0,52 | 0* | 35,75 (13,45) | 40,50 (2,88) |
| | | | | 3 | 137,75 (43,78) | 148,00 (64,85) |
| | | | | 16 | 116,25 (20,80) | 96,00 (12,64) |
| | | | | 29 | 95,00 (9,20) | 89,00 (23,59) |
| | | | | 56 | 98,00 (43,34) | 73,25 (33,09) |
| | | | | 69 | 256,50 (125,09) | 66,25 (15,32 |
| T9 | CP III-32-RS e | 53,66 | 0,39 | 0* | 75,00 (6,27) | 70,25 (12,31) |
| | | | | 3 | 128,00 (51,34) | 187,50 (108,54) |
| | | | | 16 | 111,75 (9,14) | 108,00 (12,57) |
| | | | | 29 | 117,50 (71,17) | 122,25 (102,47) |
| | | | | 56 | 216,75 (107,85) | 104,75 (87,60) |
| | | | | 75 | 520 (104,74) | 89,25 (19,75) |

*Corresponde às medidas na idade de 365 dias antes de introduzir os corpos-de-prova aos ciclos acelerados; desvio-padrão entre parênteses.

# Livros Grátis

( http://www.livrosgratis.com.br )

Milhares de Livros para Download:


Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo