

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE  
REPARO NO COMBATE À INICIAÇÃO E À  
PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO DO AÇO  
INDUZIDA POR CLORETOS**

ANTONIO EDUARDO BEZERRA CABRAL

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Co-orientador: Elton Bauer

PORTO ALEGRE

2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE  
REPARO NO COMBATE À INICIAÇÃO E À  
PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO DO AÇO  
INDUZIDA POR CLORETOS**

ANTONIO EDUARDO BEZERRA CABRAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Co-orientador: Elton Bauer

PORTO ALEGRE

2000

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

---

Prof<sup>a</sup>. Denise C. C. Dal Molin  
Orientadora

---

Prof. Elton Bauer  
Orientador

---

Prof. Francisco P. S. L. Gastal  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

Banca Examinadora:

- Prof. Washington Almeida Moura  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
  
- Profa. Iduvirges Lourdes Müller  
Dra. pela Universidade Nacional de Rosario
  
- Prof. Luís Carlos Pinto da Silva Filho  
Ph.D. pela Universidade de Leeds

Nosso dia vai chegar, teremos nossa vez.

Não é pedir demais: quero justiça!

Quero trabalhar em paz, não é muito o que lhe peço.

Eu quero um trabalho honesto, em vez de escravidão...

Deve haver algum lugar,

Onde o mais forte não consegue escravizar

Quem não tem chance.

(Renato Russo)

**À Deus**

**Aos meus pais**

**Aos meus irmãos**

**Aos meus amigos**

**À Juliana**

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, à Deus.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Aos professores do NORIE pelos conhecimentos adquiridos no período.

À professora Denise Dal Molin, pela paciência e estímulo, e ao professor Elton Bauer pela orientação e apoio na execução dos ensaios.

Aos laboratoristas da UnB (Severo e Xavier) e ao bolsista Daniel pela ajuda na execução dos ensaios.

Aos colegas mestrandos e doutorandos da UnB: Jonathan, Aleide, Rodolfo, Nélvio, Islen, Jorge, Anne, Lisandra, Miguel, Pedrão, Gilberto, Gustavo, Ieda, Silvana, Jorge, Jamaci, Baiano, Rato, Rayol ...

Meu agradecimento especial ao meu grande colega Lourival Júnior.

A todos que fizeram e aos que ainda fazem a "Família NORIE": Mônica, Thaís, Patrícia Pedrozo, Graziella, Martha, Jô, Alessandra, Keller, Washington, Eduardo Hilbk, André, Adriano, Adriane, Águida, Carlos Eduardo, Carlos Alberto Rocha, Marcelo Costella, Marcelo Kipper, Márcia Sperb, Alberto, Márcio Santana, Márcio Barata, Ricardo Tessari, Luis Fernando, Barros Neto & Andrea, Patrícia Tzortzopoulus, Roberto, Valéria, Maki, Anelise, Ângela Masuero, Fernanda, Marlova, Fabiano, Daniel, Gustavo, Maurício ...

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação em Estruturas e em Metalurgia da UFRGS.

Meu agradecimento especial aos meus "irmãos" da 24 de outubro (Fábio, João e Jairo) pelos dois anos de convívio, aprendizagem e amizade.

Aos meus familiares, pelo incentivo e apoio.

À Juliana, pela paciência, perseverança e amor.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XX</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XXII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 FORMULAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA .....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	3
1.3 OBJETIVO .....	5
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	6
<b>2 A CORROSÃO DAS ARMADURAS</b> .....	<b>7</b>
2.1 GENERALIDADES.....	7
2.2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL .....	9
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CORROSÃO DAS ARMADURAS .....	10
2.3.1 Características do concreto .....	10
2.3.2 Meio ambiente .....	12
2.3.3 Carbonatação.....	14
2.3.4 Presença de íons cloreto.....	16
2.3.4.1 Valor limite de cloretos para despassivar .....	19

<b>3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CORROSÃO.....</b>	<b>23</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIOS .....	23
3.2 MÉTODOS ELETROQUÍMICOS .....	24
3.2.1 Resistência de polarização .....	26
3.2.2 Outros métodos eletroquímicos .....	31
3.2.2.1 Resistência Elétrica.....	32
3.2.2.2 Potenciais de Corrosão.....	33
3.2.2.3 Curvas de Polarização.....	33
3.2.2.4 Impedância Eletroquímica .....	34
3.2.2.5 Ruído Eletroquímico.....	35
3.3 OUTROS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO.....	35
3.3.1 Difusão e migração de cloretos.....	36
3.3.2 Determinação do teor de cloretos.....	38
3.3.3 Determinação da espessura de carbonatação .....	39
<b>4 SISTEMAS DE REPARO .....</b>	<b>41</b>
4.1 GENERALIDADES.....	41
4.2 CLASSIFICAÇÃO .....	43
4.3 SISTEMAS DE REPARO QUE ATUAM SOBRE A ARMADURA.....	45
4.3.1 Proteção catódica .....	45
4.3.2 Proteção por barreira.....	46
4.4 SISTEMAS DE REPARO QUE ATUAM SOBRE O CONCRETO .....	47

	x
4.4.1 Sistemas de reparo por repassivação.....	47
4.4.2 Sistema de reparo com adição de polímeros.....	49
4.4.3 Sistema de reparo por inibição.....	51
4.4.4 Sistema de reparo por proteção por barreira.....	53
4.5 SISTEMAS DE REPARO QUE UTILIZAM MÉTODOS ELETROQUÍMICOS.....	53
4.5.1 Realcalinização.....	53
4.5.2 Dessalinização.....	55
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>57</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	57
5.1.1 Cimento.....	57
5.1.2 Agregado miúdo.....	58
5.1.3 Sílica ativa.....	59
5.1.4 Inibidor de corrosão.....	60
5.1.5 Polímero.....	60
5.1.6 Aditivo.....	61
5.1.7 Armadura.....	61
5.1.8 Pintura de zinco.....	61
5.1.9 Água de amassamento.....	61
5.1.10 Outros.....	61
5.2 SISTEMAS DE REPARO ESTUDADOS.....	61
5.3 CORPOS-DE-PROVA.....	64

5.4 ENSAIOS REALIZADOS .....	66
5.4.1 Ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos .....	66
5.4.2 Ensaios complementares .....	73
5.4.2.1 Ensaios de relacionados com a durabilidade.....	73
5.4.2.1.1 Absorção por imersão .....	73
5.4.2.1.2 Absorção por capilaridade .....	73
5.4.2.1.3 Difusão de cloretos .....	74
5.4.2.1.4 Determinação do teor de cloretos livres nas argamassas .....	76
5.4.2.2 Ensaios mecânicos .....	77
5.4.2.2.1 Resistência à compressão.....	77
5.4.2.2.2 Módulo de deformação .....	78
<b>6 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
6.1 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS .....	79
6.1.1 Sistema de reparo de referência .....	79
6.1.2 Sistema de reparo com adição de sílica ativa.....	82
6.1.3 Sistema de reparo com adição de nitrito de sódio.....	85
6.1.4 Sistema de reparo com adição de estireno-butadieno .....	88
6.1.5 Sistema de reparo com pintura de zinco nas barras .....	91
6.1.6 Comparação entre os sistemas de reparo com relação ao desempenho .....	94
6.2 ENSAIOS COMPLEMENTARES .....	100
6.2.1 Ensaios de relacionados com a durabilidade.....	101

6.2.1.1 Absorção por imersão .....	101
6.2.1.2 Absorção por capilaridade .....	102
6.2.1.3 Difusão de cloretos .....	104
6.2.1.4 Determinação do teor de cloretos nas argamassas .....	107
6.2.2 Ensaio mecânicos .....	108
6.2.2.1 Resistência à compressão.....	108
6.2.2.2 Módulo de deformação .....	112
6.2.3 Perda de massa gravimétrica.....	114
6.3 ANÁLISE DE CUSTOS .....	115
6.4 COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DOS DIVERSOS ENSAIOS .....	117
6.4.1 Relação entre a taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) .....	117
6.4.2 Relação entre a taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e a resistência ôhmica ( $R_{\text{ohm}}$ ).....	119
6.4.3 Comparações gerais .....	120
6.5 PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DAS ARGAMASSAS DE REPARO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS .....	123
6.5.1 Introdução .....	123
6.5.2 Procedimento .....	125
6.5.3 Tratamento dos dados coletados para uma previsão da vida útil.....	127
6.5.4 Resultados.....	128
6.5.4.1 Etapa de iniciação .....	128
6.5.4.2 Etapa de Propagação .....	129

<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	<b>131</b>
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	131
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	133
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>134</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>143</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>144</b>
Procedimento descrito pela <i>ASTM G1-90</i> para a limpeza das barras de aço	
<b>ANEXO B</b> .....	<b>147</b>
Acompanhamento da temperatura e da umidade durante a cura dos corpos de prova	
<b>ANEXO C</b> .....	<b>149</b>
Procedimento adotado para determinar a concentração de cloretos na solução da câmara positiva do ensaio de difusão de cloretos	
<b>ANEXO D</b> .....	<b>151</b>
Procedimento adotado para determinar o teor de cloretos nas argamassas dos sistemas de reparo	
<b>ANEXO E</b> .....	<b>153</b>
Evolução do potencial de corrosão médio ( $E_{\text{corr}}$ ) e da taxa de corrosão média ( $i_{\text{corr}}$ ), para cada revestimento, dos sistemas de reparo	
<b>ANEXO F</b> .....	<b>159</b>
Perda de massa gravimétrica das barras imersas nos corpos-de-prova	
<b>ANEXO G</b> .....	<b>163</b>
Resultados brutos dos ensaios realizados	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo de vida útil de TUUTTI (1980).....	10
Figura 2.2 Grau de carbonatação em função da umidade relativa do meio ambiente.....	15
Figura 2.3 Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade relativa do ambiente (CEB, 1992). ....	22
Figura 3.1 Diagrama de Evans.....	27
Figura 3.2 Curva de polarização anódica e catódica.....	28
Figura 3.3 Comparação entre as taxas de corrosão de diversos autores (BROOMFIELD, 1991 citado por GONZÁLEZ et alli, 1996a). ....	30
Figura 4.1 Procedimento lógico para correção de obras deterioradas segundo a <i>EN 1504</i> (KEY & WYATT, 1997). ....	42
Figura 4.2 Tipos de sistemas de reparo que atuam na proteção das armaduras.....	45
Figura 5.1 Curva granulométrica do agregado miúdo. ....	59
Figura 5.2 Corpo-de-prova do ensaio de corrosão acelerada. (a) Perspectiva do corpo-de-prova; (b) Vista superior do corpo-de-prova; (c) Corte A’A. Cotas em milímetros.....	66
Figura 5.3 Pesagem das barras.....	67
Figura 5.4 Isolamento da área das barras que não sofreram corrosão.....	67
Figura 5.5 Fôrma dos corpos-de-prova prismáticos desmontada.....	67
Figura 5.6 Vista superior da fôrma dos corpos-de-prova prismáticos montada. ....	68
Figura 5.7 Adensamento dos corpos-de-prova prismáticos utilizando-se a mesa vibratória...68	
Figura 5.8 Conexão de fios nas barras e isolamento do fundo e do topo com epóxi.....	69
Figura 5.9 Potenciostato utilizado para se obter $E_{corr}$ , $R_{ohm}$ e $i_{corr}$ .....	70
Figura 5.10 Eletrodo de referência de calomelano saturado posicionado na região central da face do CP e contra-eletrodo de inox posicionado nas laterais do CP.....	71

Figura 5.11 Secagem dos CP's do ensaio de corrosão em estufa a 50 °C durante 05 dias (cada semi-ciclo). .....	72
Figura 5.12 Umedecimento dos CP's do ensaio de corrosão através de imersão parcial (até a metade das barras) em solução com 3,5% de NaCl por 02 dias (cada semi-ciclo).....	72
Figura 5.13 Adensamento dos corpos-de-prova dos ensaios complementares. ....	73
Figura 5.14 Aparato utilizado no ensaio de difusão de cloretos. ....	74
Figura 5.15 Câmara positiva utilizada no ensaio. ....	75
Figura 5.16 Vedação da câmara positiva com silicone. ....	75
Figura 5.17 Células de difusão formadas por quatro câmaras positivas e uma câmara negativa .....	76
Figura 5.18 Coleta de amostra dos corpos-de-prova para determinação do teor de cloretos..	77
Figura 5.19 Prensa hidráulica da marca Amsler. ....	77
Figura 5.20 Leitura das deformações dos corpos-de-prova, através de extensômetros mecânicos.....	78
Figura 6.1 Evolução do $E_{corr}$ e da $i_{corr}$ , para o revestimento de 5mm, do sistema de reparo de referência.....	80
Figura 6.2 Evolução do $E_{corr}$ e da $i_{corr}$ , para o revestimento de 10mm, do sistema de reparo de referência.....	80
Figura 6.3 Evolução da $R_{ohm}$ do sistema de reparo de referência .....	81
Figura 6.4 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo de referência.....	81
Figura 6.5 Evolução do $E_{corr}$ e da $i_{corr}$ , para o revestimento de 5mm, do sistema de reparo com adição de sílica ativa .....	82
Figura 6.6 Evolução do $E_{corr}$ e da $i_{corr}$ , para o revestimento de 10mm, do sistema de reparo com adição de sílica ativa .....	83
Figura 6.7 Evolução da $R_{ohm}$ do sistema de reparo com adição de sílica ativa.....	83

Figura 6.8 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo com adição de sílica ativa .....	84
Figura 6.9 Evolução do $E_{\text{corr}}$ e da $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 5mm, do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio .....	85
Figura 6.10 Evolução do $E_{\text{corr}}$ e da $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 10mm, do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio .....	86
Figura 6.11 Evolução da $R_{\text{ohm}}$ do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio.....	86
Figura 6.12 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo com inibidor de corrosão (nitrito de sódio) .....	87
Figura 6.13 Evolução do $E_{\text{corr}}$ e da $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 5mm, do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno.....	88
Figura 6.14 Evolução do $E_{\text{corr}}$ e da $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 10mm, do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno.....	89
Figura 6.15 Evolução da $R_{\text{ohm}}$ do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno .....	89
Figura 6.16 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno.....	90
Figura 6.17 Evolução do $E_{\text{corr}}$ e da $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 5mm, do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras.....	91
Figura 6.18 Evolução do $E_{\text{corr}}$ e da $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 10mm, do sistema de reparo com com pintura de zinco nas barras .....	92
Figura 6.19 Evolução da $R_{\text{ohm}}$ do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras .....	92
Figura 6.20 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo onde as barras são pintadas com um primer rico em zinco .....	93
Figura 6.21 Evolução comparativa do $E_{\text{corr}}$ para 5mm de cobrimento.....	94
Figura 6.22 Evolução comparativa da $i_{\text{corr}}$ para 5mm de cobrimento .....	95
Figura 6.23 Evolução comparativa da $R_{\text{ohm}}$ para 5mm de cobrimento .....	95
Figura 6.24 Evolução comparativa do $E_{\text{corr}}$ para 10mm de cobrimento.....	96

Figura 6.25	Evolução comparativa da $R_{ohm}$ para 10mm de cobrimento .....	96
Figura 6.26	Evolução comparativa da $i_{corr}$ para 10mm de cobrimento .....	97
Figura 6.27	Evolução da média da variação de massa dos corpos-de-prova dos sistemas de reparo estudados.....	97
Figura 6.28	Duração da fase de iniciação da corrosão das barras imersas nos corpos-de-prova, para o cobrimento de 5mm .....	99
Figura 6.29	Duração da fase de iniciação da corrosão das barras imersas nos corpos-de-prova, para o cobrimento de 10mm .....	99
Figura 6.30	Coeficiente de absorção por imersão das argamassas dos sistemas de reparo ...	101
Figura 6.31	Coeficiente de absorção por capilaridade das argamassas ( $g/cm^2$ ).....	103
Figura 6.32	Evolução da concentração de cloretos com o tempo para a argamassa de referência: (a) amostra 1 e (b) amostra 2 .....	104
Figura 6.33	Evolução da concentração de cloretos com o tempo para a argamassa com adição de sílica ativa: (a) amostra 1 e (b) amostra 2 .....	104
Figura 6.34	Evolução da concentração de cloretos com o tempo para a argamassa com adição de nitrito de sódio: (a) amostra 1 e (b) amostra 2 .....	105
Figura 6.35	Evolução da concentração de cloretos com o tempo para a argamassa com adição de SBR: (a) amostra 1 e (b) amostra 2.....	105
Figura 6.36	Coeficientes de difusão das argamassas ( $cm^2/s \cdot 10^{-8}$ ) .....	105
Figura 6.37	Evolução da resistência à compressão das argamassas dos sistemas de reparo .	109
Figura 6.38	Módulo de deformação médio das argamassas dos sistemas de reparo (GPa), aos 28 dias de idade.....	112
Figura 6.39	Comparação entre a perda de massa gravimétrica e a eletroquímica .....	114
Figura 6.40	Corrosão na barra sob a fita.....	115
Figura 6.41	Barra de aço com corrosão por pites.....	115
Figura 6.42	Relação entre taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) e potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) para: (a)	

sistema de referência; (b) sistema com sílica ativa; (c) sistema com nitrito de sódio; (d) sistema com SBR e (e) sistema com pintura de Zn nas barras. ....	119
Figura 6.40 Relação entre taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e resistência ôhmica ( $R_{\text{ohm}}$ ) para: (a) sistema de referência; (b) sistema com sílica ativa; (c) sistema com nitrito de sódio; (d) sistema com SBR e (e) sistema com pintura de Zn nas barras. ....	120
Figura 6.41 Estimativa da vida residual de armaduras de 10mm e 20mm de diâmetro em função da velocidade de corrosão (CASCUDO, 1997). ....	125
Figura 6.42 Evolução da concentração de cloretos em função da profundidade nas argamassas de reparo, para 15 dias e 1 ano de exposição.....	128
Figura 6.43 Evolução da concentração de cloretos nas argamassas de reparo em função do tempo de exposição ao sal, para uma profundidade de 1,5 cm.....	129
Figura A.1 Imersão das barras em solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5% de hexametilenotetramina para remoção dos óxidos.....	145
Figura A.2 Lavagem das barras em água corrente para remoção da solução.....	145
Figura A.3 Escovação das barras para a remoção final dos óxidos .....	146
Figura A.4 Imersão das barras em acetona para eliminação da água.....	146
Figura A.5 Secagem das barras com jato de ar quente .....	146
Figura C.1 Materiais utilizados na preparação da solução com cloretos para determinação da concentração dos mesmos, através do eletrodo de íon seletivo .....	150
Figura C.2 Medição da concentração de cloretos através do eletrodo de íon seletivo.....	150
Figura E.1 Evolução do $E_{\text{corr}}$ do sistema de reparo de referência .....	154
Figura E.2 Evolução da $i_{\text{corr}}$ do sistema de reparo de referência.....	154
Figura E.3 Evolução do $E_{\text{corr}}$ do sistema de reparo com adição de sílica ativa.....	155
Figura E.4 Evolução do $i_{\text{corr}}$ do sistema de reparo com adição de sílica ativa .....	155
Figura E.5 Evolução do $E_{\text{corr}}$ do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio.....	156
Figura E.6 Evolução do $i_{\text{corr}}$ do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio .....	156

Figura E.7 Evolução do $E_{\text{corr}}$ do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno .....	157
Figura E.8 Evolução do $i_{\text{corr}}$ do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno.....	157
Figura E.9 Evolução do $E_{\text{corr}}$ do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras .....	158
Figura E.10 Evolução do $i_{\text{corr}}$ do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras.....	158

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 Classificação do grau de agressividade do meio ambiente com base na umidade relativa (CEB, 1992, modificado por HELENE, 1993). .....	13
Tabela 2.2 Valores críticos de cloretos sugeridos por diversos autores (ALONSO et alli, 1997; GLASS & BUENFELD, 1997).....	21
Tabela 3.1 Metodologias e métodos de ensaio para avaliação da corrosão em armaduras de concreto armado (HELENE, 1993).....	24
Tabela 3.2 Probabilidade de corrosão através do $E_{corr}$ , segundo a ASTM C 876 (1991).....	33
Tabela 5.1 Características químicas do cimento (fornecido pelo fabricante). .....	58
Tabela 5.2 Características físicas e mecânicas do cimento (fornecido pelo fabricante). .....	58
Tabela 5.3 Análise granulométrica do agregado miúdo.....	59
Tabela 5.4 Propriedades físicas do agregado miúdo.....	59
Tabela 5.5 Composição química e características da sílica ativa (fornecido pelo fabricante). ..	60
Tabela 5.6 Composição química do nitrito de sódio ( $NaNO_2$ ) (fornecido pelo fabricante). ...	60
Tabela 5.7 Características e propriedades físicas do SBR (fornecido pelo fabricante). .....	60
Tabela 5.8 Propriedades físicas do primer rico em zinco à 25 °C (fornecido pelo fabricante). .....	61
Tabela 5.9 Quantidade de corpos-de-prova dos ensaios complementares e de corrosão acelerada para cada sistema de reparo. *	65
Tabela 6.1 Resultados da ANOVA para os coeficientes de absorção por imersão.....	101
Tabela 6.2 Resultados da ANOVA para os coeficientes de absorção por capilaridade.....	103
Tabela 6.3 Resultados da ANOVA para o coeficiente de difusão das argamassas.....	106
Tabela 6.4 Teor de cloretos livres nas argamassas, em relação à massa de cimento.....	107
Tabela 6.5 Resultados da ANOVA para os valores da resistência à compressão.....	109

Tabela 6.6 Resultados da ANOVA para os valores do módulo de deformação .....	112
Tabela 6.7 Comparação de custos dos materiais dos sistemas de reparo para produção de 1m <sup>3</sup> .....	116
Tabela 6.8 Índices de desempenho dos sistemas de reparo .....	116
Tabela G.1 Ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos .....	164
Tabela G.2 Ensaio complementares - absorção por imersão - argamassa de referência .....	164
Tabela G.3 Ensaio complementares - absorção por imersão - argamassa com sílica ativa..	164
Tabela G.4 Ensaio complementares - absorção por imersão - argamassa com inibidor de corrosão.....	164
Tabela G.5 Ensaio complementares - absorção por imersão - argamassa com SBR .....	164
Tabela G.6 Ensaio complementares - absorção por capilaridade - argamassa de referência	164
Tabela G.7 Ensaio complementares - absorção por capilaridade - argamassa com sílica ativa .....	164
Tabela G.8 Ensaio complementares - absorção por capilaridade - argamassa com inibidor de corrosão.....	164
Tabela G.9 Ensaio complementares - absorção por capilaridade - argamassa com SBR.....	164
Tabela G.10 Ensaio complementares - difusão de cloretos.....	164
Tabela G.11 Ensaio complementares - resistência à compressão .....	164
Tabela G.12 Ensaio complementares - módulo de deformação da argamassa de referência .....	164
Tabela G.13 Ensaio complementares - módulo de deformação da argamassa com sílica ativa .....	165
Tabela G.14 Ensaio complementares - módulo de deformação da argamassa com inibidor de corrosão.....	165
Tabela G.15 Ensaio complementares - módulo de deformação da argamassa com SBR ....	200

## RESUMO

O presente trabalho avaliou a eficiência de cinco sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço por cloretos, os quais são: sistemas de reparo formados com argamassa e barras de aço sem pintura e um sistema de reparo formado com argamassa 1:3 a/c=0,5 com pintura de zinco nas barras de aço. A avaliação se deu através de ensaios de corrosão acelerada, usando ciclos de umedecimento e secagem, em corpos de prova prismáticos (45x80x90mm) confeccionados com as argamassas dos sistemas de reparo a serem testados, possuindo no seu interior duas séries de duas barras de 5mm de diâmetro distantes 5mm e 10mm das faces. Foram efetuados também ensaios complementares nas argamassas, classificados em ensaios de durabilidade: absorção por imersão (NBR 9778/87), absorção por capilaridade (NBR 9779/95), difusão de cloretos (usando fatias de 10mm de espessura de corpos de prova cilíndricos de 5mm de diâmetro) e determinação do teor de cloretos na argamassa, e ensaios mecânicos: módulo de elasticidade (NBR 8522/84) e resistência à compressão (NBR 5739/93). Além dos ensaios supracitados, elaborou-se uma análise do custo/benefício da utilização dos sistemas de reparo em estudo. Todos os corpos de prova (cilíndricos e prismáticos) foram curados em câmara úmida por 7 dias e posteriormente em ambiente de laboratório até completarem 28 dias, idade onde se iniciou todos os ensaios. Os resultados apontam uma superioridade, no ensaio de corrosão acelerada e nos ensaios complementares de durabilidade, do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno (SBR) seguido em ordem decrescente, do sistema com adição de sílica ativa, do sistema com adição de nitrito de sódio e do sistema com pintura de zinco nas barras. Nos ensaios complementares mecânicos, o sistema de reparo com adição de sílica ativa apresentou os melhores resultados, seguido do sistema de reparo com adição do inibidor de corrosão. A análise custo/benefício aponta o sistema de reparo com adição de sílica ativa como o mais viável economicamente, seguido, em ordem decrescente de desempenho, dos sistemas com adição de nitrito de sódio, com adição de estireno-butadieno e com pintura de zinco nas barras.

## ABSTRACT

The present work evaluated the efficiency of five systems of repair to minimize the initiation and propagation of corrosion rebars attacked by chlorides ions. These systems consist in 5 types of mortars with a w/c ratio of 0,50 and cement:sand proportion of 1:3 and one with iron bars covered with a zinc primer. The attack evaluation was made by accelerated corrosion experiments in cycles of humidity and drying of prisms samples (45x80x90cm). These samples had two 5 mm diameter iron bars inside that were 5 and 10 mm far from the border. The accomplished rehearsals were modulus of elasticity (NBR 8522, 1984) and compressive strength (NBR 5739, 1993). Some durability experiments were also carried out: immersion absorption (NBR 9778, 1987), capillary absorption (NBR 9779, 1995), chlorides diffusion and determination of chlorides content in mortars. At the end, it was made an economic analysis of each system. The mortar samples used to measure mechanical and durability properties were cured in a humid chamber during 7 days and later on in laboratory atmosphere until to complete 28 days. The results achieved point out a considerable increasing in compressive strength and modulus of elasticity of the mortar with addition of silica fume. The addition of styrene-butadiene (SBR) didn't modify the compressive strength of the mortar significantly, although it has turned it more deformable. Also, the sodium nitrite did not check significant modifications in these properties. In the durability point of view, the system of repair modified of styrene-butadiene polymer (SBR) showed the best performance, followed in a decreasing way by silica fume, sodium nitrite and zinc primer. The economic analysis indicate that the silica fume system of repair is the best one.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 FORMULAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA

O concreto oferece um ambiente propício à durabilidade do aço nele imerso, devido à sua compatibilidade química com o mesmo. A alta alcalinidade do concreto, que mantém o aço em seu estado passivo, é devida ao hidróxido de cálcio, produzido nas reações de hidratação, e aos hidróxidos de potássio e sódio, originários dos álcalis (ANDRADE, 1992). Este tipo de proteção se dá enquanto o concreto preservar sua boa qualidade, não fissurar e não tiver suas características físico-químicas ou mecânicas alteradas devido à ação de agentes agressivos externos. O concreto que reveste o aço tem também um outro aspecto de proteção ao mesmo. Esta proteção é do tipo física, comumente chamada de proteção por barreira, e é dada pelo cobrimento de concreto à armadura (GONZÁLEZ et alli, 1998).

A corrosão da armadura do concreto é uma forma de corrosão metálica que provoca a deterioração da estrutura podendo afetar sua estabilidade e durabilidade, sendo a causa mais comum de falhas nas estruturas de concreto (ROSENBERG et alli, 1989). As duas fontes principais desta deterioração são a carbonatação (a perda da alcalinidade do concreto) e o ataque por cloretos (GONZÁLEZ et alli, 1998), que na presença de umidade e oxigênio podem levar à corrosão da armadura e aos produtos de corrosão. Uma vez destruída a passividade das armaduras, é a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio que controlam a taxa de corrosão. Deve ser ressaltado que as fontes comuns de cloretos no concreto são aditivos, agregados contaminados por sais e a penetração de soluções ácidas ou água do mar (MEHTA & MONTEIRO, 1994). O volume ocupado pelos produtos de corrosão é cerca de oito vezes maior que o volume da armadura inicial e as forças de expansão são suficientes para provocar fissuras e até o lascamento do concreto (PARKER, 1997).

Na Espanha, em um estudo estatístico dos danos causados pelas manifestações patológicas em pontes de concreto armado, CHAMOSA & ORTIZ (1985), citados por NEPOMUCENO (1992), encontraram que os danos causados pela corrosão de armaduras representam 7,3% dos 586 casos estudados.

Segundo pesquisa realizada por DAL MOLIN (1988), em levantamento de manifestações patológicas do período compreendido de 1977 a 1986, em 275 edificações correntes, ou seja, casas, edifícios, prédios escolares, pavilhões industriais e outros, desconsiderando-se obras de grandes portes como pontes e barragens, verificou-se que a corrosão de armaduras é a responsável por 11,89% das fissuras presentes nas edificações do Estado do Rio Grande do Sul. Entretanto a corrosão de armaduras corresponde a 40% das manifestações patológicas, quando analisada segundo a gravidade e implicações na segurança estrutural.

Já ARANHA (1994) encontrou que a corrosão de armaduras em estruturas de concreto é a mais frequente manifestação patológica encontrada em 348 obras inspecionadas no período de 1976 a 1993, na região amazônica, correspondendo a 42,68% do total das manifestações patológicas encontradas. ANDRADE (1997), em uma pesquisa similar em 189 obras no período de 1978 a 1996 no Estado de Pernambuco, constatou que 64% das manifestações patológicas eram decorrentes de corrosão de armaduras. NINCE (1996), através do estudo de 401 obras localizadas na região Centro-Oeste do Brasil, com registro de inspeção entre 1972 e 1995, verificou que a corrosão é a manifestação patológica que se torna notória em 30,1% dos casos.

Em um trabalho mais amplo, CARMONA & MAREGA (1988) citados por HELENE (1993), analisando 700 relatórios técnicos de casos de manifestações patológicas em diferentes regiões do país, encontraram que a incidência a corrosão de armaduras em 27% do total dos casos.

A baixa qualidade do concreto empregado nas edificações, caracterizada por deficiência nas fases de dosagem, transporte, adensamento e cura, originando elevada porosidade, segregações, ninhos de pedra, dentre outros, é apontada como uma das principais causas facilitadoras do processo de iniciação da corrosão. Outra causa, a qual independe da qualidade do concreto mas depende, e muito, do processo de execução são as pequenas espessuras de cobertura adotadas, as quais aumentam o risco de corrosão das armaduras e, conseqüentemente, o aparecimento precoce de danos estruturais resultando em um envelhecimento prematuro das estruturas.

Conforme ANDRADE (1997), as etapas do processo construtivo denominadas de planejamento/projeto e execução são responsáveis por 43% e 42%, respectivamente, das manifestações patológicas encontradas em todos os tipos de edificações pesquisadas. São nestas etapas que são definidos o  $f_{ck}$  e a dosagem do concreto, as espessuras de cobertura e são tomados os cuidados com os procedimentos relativos à execução do próprio concreto, como mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura.

Além destes fatores, deve-se levar em consideração que algumas das grandes cidades brasileiras encontram-se ao longo da orla marítima, ou próximas a ela, estando assim sujeitas à ação da névoa salina e à contaminação dos materiais de construção pelos sais. Outro fator agravante seria as altas temperaturas ali observadas, as quais funcionam como um catalisador do processo de corrosão.

Exemplificando tal fato, em 1992 uma equipe formada por profissionais da Universidade Federal do Ceará (UFC) e da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC) apresentou dados obtidos através da mensuração mensal dos teores de cloreto, sulfato e partículas sedimentares coletadas de quatro estações de monitoramento da corrosão, que constata a agressividade atmosférica da cidade de Fortaleza. Foram

encontrados como valores máximos: 3.502 mg de cloretos/m<sup>2</sup>.dia, 0,706 mg de sulfatos/cm<sup>2</sup>.dia e 6,3 g de partículas sedimentáveis/m<sup>2</sup>.dia, constatando que a agressividade da cidade de Fortaleza é predominantemente marítima. Para exemplificar quão agressivo é este meio, na praia da Cofeco, onde há uma estação de monitoramento, a corrosão chega a destruir postes de concreto armado utilizados na sustentação de cabos elétricos, em até dois anos de uso, enquanto que há postes que duram até mais de 45 anos em outras localidades (FORTES, 1995). Segundo a NBR 8541/85, os postes devem ter vida média mínima de 35 anos.

Pode-se acrescentar a esta problemática, os gases emitidos pelas fábricas, usinas, veículos automotores, entre outros, geralmente presentes em larga escala nas grandes cidades, gases estes que contêm substâncias deletérias, as quais penetram no concreto poroso rompendo o filme passivo das armaduras.

Existem várias alternativas de reparo e medidas terapêuticas para processos corrosivos já instalados e iniciados em estruturas de concreto, sendo a grande maioria onerosa, exigindo mão de obra qualificada e equipamentos especializados. Dentre todas, a técnica de reparos localizados parece ser a mais empregada (FIGUEIREDO, 1994). Resumidamente, os passos básicos para a execução de reparos localizados de estruturas com corrosão são: remoção do concreto contaminado, tratamento das superfícies das armaduras, reconstituição da peça estrutural através de argamassa ou concreto e tratamento da superfície reparada (RILEM, 1994).

ANDRADE (1997) verificou que a maioria dos problemas patológicos apresentados no Estado de Pernambuco são corrigidos com o emprego de sistemas de reparo (83%), seguido do emprego de técnicas de reforço estrutural (13%) e de reforço de fundação (4%).

Um ponto crítico na seleção da estratégia de reparo mais apropriada para uma estrutura de concreto comprometida é a determinação do *status* da corrosão das armaduras, isto porque devida à complexidade do processo de corrosão, é prudente envolver profissionais experientes no assunto. O engenheiro especialista em corrosão pode aplicar uma variedade de ferramentas para ajudar a determinar as causas e condições atuais da corrosão. Dentre elas, os métodos eletroquímicos são usados para avaliar a atividade da corrosão da armadura. O entendimento de seus princípios e suas limitações são necessárias para se obter resultados significativos. Em adição, o entendimento dos fatores envolvidos na corrosão do aço no concreto é essencial na interpretação dos dados obtidos nestes tipos de métodos (CARINO, 1998).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A corrosão das armaduras das estruturas de concreto causa extremo desconforto em toda a comunidade técnico-científica mundial, pois é assustador o número de obras civis e

públicas deterioradas devido à corrosão, tornando-se este, um problema que abrange questões econômicas, técnicas, sociais e jurídicas.

São gastos bilhões de dólares em recuperações e reparos em todo o mundo, somente devido à corrosão das armaduras das estruturas de concreto armado. Aproximadamente 253.000 tabuleiros de pontes da rede rodoviária dos Estados Unidos estão em vários estágios de deterioração e aproximadamente 35.000 são adicionados a esta lista todos os anos. O custo de reparação e reabilitação desses tabuleiros está estimado em US\$ 50 bilhões, e o custo de reparo ou reposição das estruturas de concreto está estimado em US\$ 200 bilhões (MEHTA, 1993).

Na Espanha, segundo SEGUI (1992) citado por FIGUEIREDO (1994), os gastos podem atingir 1,5 bilhões de dólares somente com os trabalhos de reparo e substituição de estruturas afetadas pelos problemas estrutural e de durabilidade, entre eles a corrosão, devido à má utilização do cimento aluminoso na Catalúnia.

No Brasil, CARMONA & MAREGA (1988) citados por ARANHA (1994), indicam a cifra de US\$ 28 milhões aplicados em obras de reparação e reforço estrutural no ano de 1987.

De modo crescente, os custos de reparos e substituições em estruturas devido a falhas nos materiais têm se tornado parte substancial do orçamento total das construções. Por exemplo, em países industrialmente desenvolvidos estima-se que acima de 40% do total dos recursos da indústria de construção sejam aplicados no reparo e manutenção de estruturas já existentes, e menos de 60% em novas instalações (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Atualmente, está ao nosso alcance uma grande quantidade de materiais especificados para reparar e proteger as estruturas de concreto atacadas pela corrosão da armadura, no entanto, na maioria das vezes, as informações comerciais sobre esses materiais apresentam resultados de ensaios de caracterização dos produtos, porém, praticamente nenhuma informação é dada sobre seu desempenho na proteção da armadura contra a corrosão. A maioria das informações técnicas disponíveis restringem-se às dadas pelos fabricantes. Desta forma, quando os profissionais necessitam eleger os produtos mais indicados para uma determinada situação, não encontram as informações necessárias para o julgamento (FIGUEIREDO, 1994; SCHULER, 1998).

Tem-se estudado separadamente sistemas de reparo formados com materiais que dificultam a iniciação e a propagação da corrosão, como inibidores de corrosão (LIMA, 1996), sílica ativa (KULAKOWSKI, 1994; SCHULER, 1998), polímeros de base látex (OHAMA, 1987) e revestimentos de armaduras (FIGUEIREDO, 1994), mas pouco se sabe sobre a eficácia desses sistemas quando comparados entre si. Portanto este trabalho se propõe a preencher esta lacuna ainda presente no conhecimento científico sobre os sistemas de reparo.

A grande maioria das publicações apontam experimentos em sistemas de reparo para estruturas atacadas por cloretos, com origem dos cloretos proveniente da água de amassamento ou agregados contaminados, ou por uso de aditivos, ou seja, os íons cloreto são inseridos na mistura. Devido ao esclarecimento da comunidade técnico-científica sobre a origem desses agentes agressivos, sabe-se que este tipo de ingresso atualmente é pouco frequente frente à penetração deste pelos vazios do concreto de cobertura (RODRÍGUEZ et alli, 1994). Portanto, se faz necessário um estudo sobre o comportamento dos sistemas de reparo quando os íons cloreto provém do meio ambiente.

### 1.3 OBJETIVO

A presente dissertação tem como objetivo avaliar a eficiência de alguns sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço por cloretos, sendo estes cloretos oriundos do meio exterior.

Os sistemas de reparo são formados por argamassas de reparo e pintura nas armaduras. As argamassas de reparo estudadas foram: argamassa padrão (sem modificações) e argamassas modificadas por inibidor de corrosão (nitrito de sódio), por adições minerais (sílica ativa) e por polímeros (estireno butadieno). O *primer* utilizado nas barras foi uma pintura a base de zinco.

O programa experimental conta com ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos através de ciclos de umedecimento e secagem, utilizando a técnica de resistência de polarização ( $R_p$ ) e ensaios complementares, subdivididos em ensaios de durabilidade (absorção por imersão – NBR 9778/87, absorção por capilaridade – NBR 9779/95 e migração de cloretos) e ensaios mecânicos (resistência a compressão – NBR 5739/93 e módulo de elasticidade – NBR 8522/84). Durante o ensaio acelerado de corrosão induzido por cloretos avaliou-se também o desempenho do método de Resistência de Polarização como instrumento de análise dos sistemas de reparo.

### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O segundo, terceiro e quarto capítulos contêm uma ampla revisão bibliográfica enfocando a corrosão de armaduras; os métodos de avaliação e monitoramento do processo de corrosão; e tipos de sistema de reparo empregados nas estruturas danificadas pela corrosão, respectivamente.

No quinto capítulo é descrito toda a parte experimental, com a caracterização dos materiais empregados e detalhamento dos ensaios realizados.

Tem-se no sexto capítulo a apresentação e discussão dos resultados obtidos, com uma análise fundamentada teoricamente, elegendo-se as principais causas dos sucessos ou falhas

dos sistemas de reparo estudados.

No sétimo capítulo faz-se uma avaliação final, comentando-se sobre a eficiência do método de pesquisa, se os objetivos foram alcançados e são feitas recomendações para trabalhos futuros.

O oitavo capítulo contém as referências bibliográficas, conforme as normas.

## 1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Vários são os fatores que têm influência no desempenho de um sistema de reparo quando estes são avaliados (tipos de materiais utilizados, métodos de ensaio, condições de ensaio, dentre outros). Alguns fatores tiveram que ser fixados, tais como os traços que são baseados em estudos anteriores, e próprio tempo de ensaio, limitado pelos prazos estabelecidos para a realização do trabalho. Definidos os contornos, além dos já mencionados, pode-se citar como limitações do trabalho o que se segue.

a) indefinição da área afetada pela corrosão, em virtude do método utilizado (Resistência de Polarização), já que o fenômeno de corrosão é tipificado como localizado, influenciando diretamente a taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) e conseqüentemente na perda de massa eletroquímica;

b) dificuldade na determinação precisa do desempenho de sistemas que utilizam a proteção catódica, em virtude da ineficiência na remoção dos pigmentos da proteção aderidos à barra, na determinação da perda de massa gravimétrica;

c) inexistência de estudo da retração por secagem dos corpos-de-prova, a qual influencia diretamente no desempenho dos sistemas de reparo avaliados;

d) inexistência de estudo da aderência das argamassas a diferentes substratos, a qual influencia diretamente no desempenho dos sistemas de reparo avaliados;

e) inexistência de um processo padronizado de avaliação de sistemas de reparo, criando dificuldades nas comparações dos resultados obtidos;

## 2 A CORROSÃO DAS ARMADURAS

Numerosos trabalhos nacionais já abordaram com profundidade o problema da corrosão das armaduras do concreto armado (CASCUDO, 1991; NEPOMUCENO, 1992; HELENE, 1993; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995; FORTES, 1995; MONTEIRO, 1996; TEIXEIRA, 1998), sendo que há ampla referência bibliográfica específica sobre tal assunto. Portanto esta parte da revisão bibliográfica tem somente o intuito de familiarizar o leitor sobre os principais aspectos da corrosão das armaduras no concreto.

### 2.1 GENERALIDADES

Pode-se definir corrosão, em um aspecto mais amplo, como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 1996).

No contexto da engenharia civil, a corrosão da armadura se aplica na deterioração do aço imerso no concreto, provocando, com o tempo, perda da aderência aço-concreto e redução da seção transversal da armadura, podendo levar a estrutura ao colapso. Faz-se necessário algumas considerações para entender-se o processo da corrosão do mesmo.

É importante distinguir os dois processos de corrosão. O primeiro seria a oxidação do aço quando este, após sua fabricação, entra em contato com o ar atmosférico. Isto provoca a formação de uma película pouco permeável em torno do aço, denominada de carepa de laminação, que de certa forma até o protege contra a corrosão úmida durante o transporte e o armazenamento deste. O segundo processo seria a corrosão eletroquímica, a qual está relacionada com a formação de cátodos e ânodos devido à existência de uma diferença de potencial entre eles, com condução elétrica através de um metal, e a presença de um eletrólito, que no caso é a solução aquosa contida nos poros do concreto onde a armadura está inserida. Este processo é controlado pelo acesso de oxigênio e de água à superfície do aço (HELENE, 1993).

O ferro utilizado na construção civil é obtido através da redução térmica do minério de ferro, exigindo um consumo de carbono. O produto final encontra-se, portanto, em um nível energético maior do que a sua matéria-prima, devido ao processo de fabricação. Então, o processo corrosivo nada mais é do que a perda desta energia, com um conseqüente retorno do produto metalúrgico a seu estado inicial como matéria-prima. Isto explica portanto, termodinamicamente, a espontaneidade das reações de corrosão (GENTIL, 1996).

Os efeitos da corrosão das armaduras sobre a estrutura de concreto armado atingem três pontos importantes: a própria armadura, provocando uma perda de seção e um decréscimo de sua resistência mecânica; o concreto, provocando o aparecimento de manchas de corrosão,

fissuração e até o total lascamento do mesmo; e a interface aço/concreto, inabilitando a transferência de tensões entre eles. Tudo isto prejudica a perfeita funcionalidade da estrutura, comprometendo assim sua durabilidade (ROSENBERG et alli, 1989; GONZÁLEZ et alli, 1996a).

A transformação do aço em seus produtos de corrosão (óxidos e hidróxidos) dentro do concreto gera tensões no mesmo, pois tais produtos de corrosão possuem volume bem superior ao inicial. Como consequência aparecem fissuras podendo chegar, em casos mais extremos, a lascas o concreto, deixando assim as armaduras totalmente expostas ao ambiente. Porém, há casos onde o concreto no qual as armaduras estão inseridas é muito poroso, podendo não ocorrer fissuras e lascamentos, e os produtos de corrosão podem lixiviar através do mesmo aparecendo na superfície como manchas, geralmente de cor marrom-avermelhada.

A diferença de potencial eletroquímico pode ter origem em heterogeneidades no ambiente do concreto, como por exemplo, quando uma parte está permanentemente imersa em água e a outra parte está exposta à secagem e molhagem alternadas ou quando há significativa diferença de espessura de revestimento em barras conectadas eletricamente. Células ou pilhas de corrosão podem ainda se formar devido a diferenças de concentração salina nas águas dos poros ou devido ao acesso não uniforme de oxigênio ou ainda devido diferença de tensão no aço ou no concreto. Correntes de fuga e a formação de pares galvânicos também são capazes de originar células de corrosão eletroquímica (NEVILLE, 1997).

As macropilhas de corrosão são pilhas formadas basicamente entre duas áreas de caráter distinto, geralmente devido à existência de áreas ativas, ou seja, região onde ocorre a corrosão (ânodo), em contato com áreas passivas (cátodo). FIGUEIREDO (1994) atribui o surgimento das macropilhas à diferença de concentração de sais (geralmente íons cloreto), diferença de pH, presença de fissuras, aeração diferencial e pilhas galvânicas. A formação destas macropilhas é, portanto, um fator importante quando se faz reparos pois, no caso de reparações em estruturas de concreto armado, podem surgir macropilhas de corrosão devido à substituição do material original por materiais de características distintas, como por exemplo, distintos pH, distintos coeficientes de permeabilidade e diferentes concentrações de sais.

Seria de se esperar que corrosão devido à formação da macropilha somada à ação das micropilhas aumentasse a velocidade da corrosão, entretanto alguns autores (FIGUEIREDO, 1994; CASTANHEIRA, 1997; GONZÁLEZ et alli, 1996b; ANDRADE et alli, 1992) mostram que a contribuição das macropilhas para a corrosão é relativamente pequena em comparação com a contribuição das micropilhas, e a corrosão em concreto armado é mantida principalmente por estas, pois aquelas não aumentam a taxa de corrosão em proporções significativas. Experimentalmente, estes supracitados autores comprovaram que as macropilhas galvânicas têm um efeito de polarização desprezível nas áreas anódicas em concretos úmidos, sendo assim o potencial influenciado em apenas alguns milivolts.

A despassivação das armaduras pode ocorrer principalmente devido aos seguintes fatores: queda do pH do concreto que reveste a barra devido à penetração de CO<sub>2</sub> (carbonatação) e devido à presença de substâncias ativas que degeneram o aço, tais como os íons cloreto, existindo ainda a possibilidade de uma sinergia entre estes fatores (ENEVOLDSEN et alii, 1994; GONZÁLEZ et alii, 1998). O CEB (1992) cita a lixiviação dos álcalis do concreto devido a águas que lavam a superfície do concreto como uma outra causa que poderia reduzir a alcalinidade do mesmo. Na prática, isto pode acontecer nas regiões consideradas como pontos fracos da estrutura, tais como juntas de construção mal vedadas, grandes fissuras, entre outras, construídas com concreto de baixa qualidade.

Há, ainda, fatores que influenciam o desenvolvimento da corrosão das armaduras, dentre os quais pode-se citar a quantidade de cloretos presente na massa do concreto; a ação das macropilhas, ainda que possuem uma reduzida participação, conforme já foi comentado; o grau de saturação dos poros, o qual controla a resistividade elétrica do concreto e o acesso de oxigênio; e a temperatura (ANDRADE et alii, 1998).

Portanto, a corrosão das armaduras é um fenômeno extremamente complexo e importante pois a durabilidade das estruturas de concreto depende diretamente do grau de corrosão em que se encontram as armaduras.

## 2.2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

Segundo SILVA FILHO (1994), “durabilidade pode ser entendida como a capacidade de um produto de satisfazer, durante um período de tempo previsto na sua concepção, as exigências a ele impostas, sejam estas de origem técnica ou subjetiva (satisfação do usuário), quando exposto a um meio ambiente previamente determinado”.

Já a vida útil pode ser entendida como o período de tempo em que a estrutura atende a estas exigências, ou seja, onde a partir do qual a mesma deve ser submetida a uma intervenção ou reparo. O tempo de vida útil dependerá do critério estabelecido para se determinar o grau de deterioração máximo aceitável, e este varia com a função que a estrutura desempenha. Dentre estes possíveis critérios, pode-se citar o grau de fissuração do concreto, a perda de aderência entre a armadura e o concreto e a queda da capacidade estrutural, em virtude da perda de seção da armadura devido à corrosão da mesma. Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), uma longa vida útil é considerada sinônimo de durabilidade.

TUUTTI (1980) modelou, de forma esquemática e qualitativa, o processo de corrosão do aço no concreto (Figura 2.1). Este pode ser dividido em duas fases bem distintas. Na primeira, denominada período de iniciação, ocorre a penetração dos agentes agressivos até que estes atinjam a armadura, sem a perda de funcionalidade da estrutura. Na segunda, denominada período de propagação, os agentes de degradação atuam de maneira efetiva, degenerando a estrutura, tanto na condição de estabilidade estrutural quanto no seu aspecto

visual.

Segundo SILVA (1998), é no período de propagação que ocorre a perda de seção, a perda de aderência, a fissuração produzida pelos produtos de corrosão e a fragilização. A perda de seção do aço e a aparição dos produtos de corrosão podem manifestar-se alterando o comportamento à flexão, ao cortante, contribuindo para uma redução da aderência, e um aumento da fissuração e da deformabilidade da estrutura.

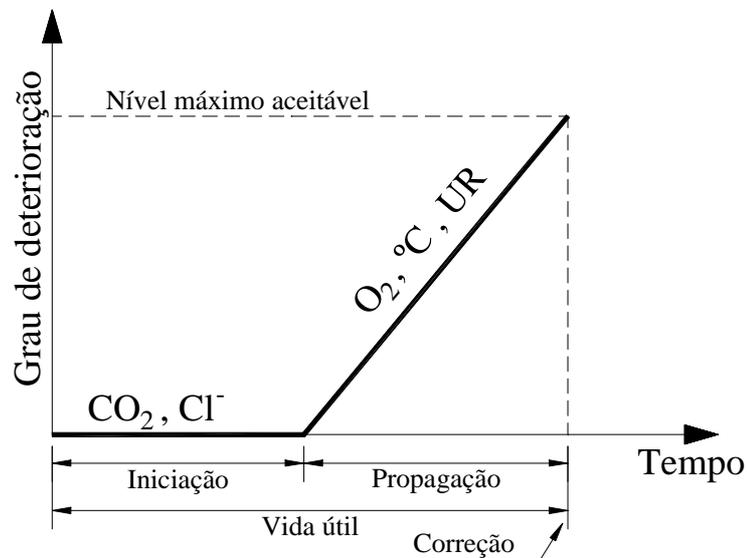


Figura 2.1 Modelo de vida útil de TUUTTI (1980).

HELENE (1993) classifica a vida útil, considerando a corrosão, de acordo com três situações: vida útil de projeto, que corresponde ao tempo que vai até a despassivação da armadura; vida útil de serviço ou de utilização, que corresponde ao tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície, ou ocorre fissuração ou lascamento do concreto; e ainda a vida útil total, que corresponde ao período de tempo que vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura.

## 2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CORROSÃO DAS ARMADURAS

Há diversos fatores que exercem influência sobre a durabilidade do concreto, dentre os quais pode-se citar as características do concreto empregado, podendo tais características serem definidas na etapa de projeto da estrutura (espessura de cobrimento,  $f_{ck}$  do concreto), como podem ser consequência do tratamento dado à estrutura após a concretagem (cura do concreto). O meio ambiente ao qual a estrutura está inserida e o uso da mesma são também fatores relevantes no processo de corrosão das armaduras.

### 2.3.1 Características do concreto

Uma vez que a água, o oxigênio e os agentes agressivos que penetram no concreto desempenham papéis importantes na corrosão das armaduras e na fissuração do concreto, a

porosidade do concreto parece ser a chave para controlar os vários processos envolvidos no fenômeno. A qualidade do concreto está diretamente relacionada com os materiais utilizados na fabricação do mesmo, como o tipo de cimento; com parâmetros de dosagem, como a relação água/cimento; com parâmetros de projeto, como a espessura de cobrimento; e com o tipo de adensamento e cura, dentre outros aspectos que influenciam a porosidade do concreto.

Uma característica notória do concreto é o alto pH que possui, em torno de 13, que mantém o filme passivo envolvente à barra. Esta passividade ocorre quando os produtos de corrosão são insolúveis e aderentes à barra, formando uma fina película protetora que reveste a superfície do metal e se manterá enquanto houver condições ambientais que mantenham o filme estável. Isto não significa que no estado passivo não há corrosão, mas esta ocorre a taxas ínfimas de aproximadamente  $0,1 \mu\text{m}/\text{ano}$ , a qual é desprezível em termos de expectativa de vida útil, nas estruturas de concreto (ROSENBERG et alli, 1989).

Além disso, o próprio cobrimento de concreto sobre a armadura age como uma barreira física contra a penetração de agentes agressivos. Entretanto, o concreto é dotado de uma rede de poros, com diâmetro variando desde alguns ângstrons podendo chegar até alguns milímetros, que quando intercomunicados, propiciam a penetração dos agentes agressivos, podendo vir a romper o filme passivo. Dentre outros motivos, estes poros surgem devido ao excesso de água utilizado para facilitar a mistura (GONZÁLEZ et alli, 1998). Portanto, quanto menos permeável e mais espesso o cobrimento de concreto, maior será o tempo demandado para que a corrosão aconteça e, conseqüentemente, maior será a vida útil da estrutura (GONZÁLEZ et alli, 1996a).

Conforme o trabalho de LÓPEZ et alli (1991), em barras de aço imersas em corpos de prova de argamassa curados sob diferentes condições, o tipo de cura proporcionou o aparecimento de níveis de velocidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) bem diferenciados, apresentando diferenças na ordem de grandeza de até 10 vezes. Este comportamento é ratificado através dos diagramas de impedância eletroquímica realizados na interface aço/argamassa, confirmando estados de corrosão bem distintos entre as amostras.

A resistividade elétrica do concreto ou argamassas é outro fator controlador da taxa de corrosão, tanto que para argamassas secas, a resistividade das mesmas é um obstáculo maior para a corrosão do que a camada passivante que envolve as barras. Diversos autores (NEPOMUCENO, 1992; GONZÁLEZ et alli, 1993; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995) têm estudado a relação entre a resistividade do concreto e a taxa de corrosão das armaduras, encontrando uma relação inversamente proporcional entre estes dois parâmetros, embora haja resultados onde não se constate esta relação (VASCONCELOS, 1997). A resistividade do concreto é influenciada pela proporção dos materiais da mistura (traço), sendo importante considerar a umidade relativa do ambiente no qual o concreto está inserido (ENEVOLDSEN et alli, 1994), ou seja, deve-se considerar as condições de saturação dos poros do concreto no

momento do ensaio. É dependente também, só que em menor extensão, do grau de hidratação da pasta de cimento (tempo de cura) e da presença de sais dissolvidos na fase aquosa do concreto. Para exemplificar a dependência deste último, na corrosão devida a cloretos, há um aumento da concentração dos mesmos nas áreas anódicas, ocasionando um gradual aumento da taxa de corrosão (LÓPEZ & GONZÁLEZ, 1993). Este aumento de cloretos é atribuído a um contra-balanceamento ao excesso de carga positiva devido aos íons  $\text{Fe}^{2+}$  (LÓPEZ et alli, 1991; GONZÁLEZ et alli, 1996a).

Quando grandes quantidades de cloretos estão presentes na massa, o concreto tende a conservar mais umidade, o que também aumenta o risco da corrosão do aço pela diminuição da resistividade elétrica do concreto. LÓPEZ & GONZÁLEZ (1993) observaram que para baixos valores de saturação dos poros de argamassas contaminadas com 2% de  $\text{Cl}^-$ , têm-se valores de  $i_{\text{corr}}$  (velocidade ou taxa de corrosão) duas ordens de magnitude menores, obtendo-se coerência com a inversão de proporcionalidade entre resistividade e  $i_{\text{corr}}$ .

### 2.3.2 Meio ambiente

Sabe-se que as ações do meio ambiente influenciam no comportamento das estruturas. Uma alta porcentagem dos danos das estruturas é causada por projetos deficientes, estimativas errôneas das ações ambientais e má execução das mesmas. Como conseqüência, muitas dessas estruturas defeituosas necessitam de reparos devido à corrosão das armaduras (RILEM, 1994).

HELENE (1993) classifica o meio ambiente, onde as estruturas podem estar inseridas, de acordo com o grau de agressividade da atmosfera do mesmo. Na classificação sugerida pelo supracitado autor, tem-se: a *atmosfera rural*, que são regiões à grande distância de fontes poluidoras de ar, com um baixo teor de poluentes; a *atmosfera urbana*, que são regiões dentro de centros populacionais importantes, que contêm, normalmente, impurezas em forma de óxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), fuligem ácida e outros agentes agressivos, tais como,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ , dentre outros; a *atmosfera marinha*, que são regiões sobre o mar ou próximas da orla marítima, contendo cloretos, tanto na forma de cristais como dissolvidos em gotículas de água arrastadas pelo vento; e a *atmosfera industrial*, que são regiões em zonas industriais contaminadas por gases e cinzas extremamente agressivos, onde os mais frequentes são o  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ .

A umidade relativa do meio ambiente possui grande importância no comportamento da armadura do concreto armado. Primeiramente, durante a cura do concreto, pois irá influenciar no grau de hidratação do cimento e, subsequentemente, na porosidade do concreto. Posteriormente, a umidade relativa influenciará no grau de saturação dos poros do concreto, o qual controla a resistividade elétrica do mesmo, sendo este um fator limitante na transferência de cargas elétricas entre áreas catódicas e anódicas do aço, quando há um processo de corrosão ativo (ENEVOLDSEN et alli, 1994).

Através de relações entre a taxa de corrosão, com a resistividade e com o grau de saturação dos poros, LÓPEZ & GONZÁLEZ (1993) definiram três tipos de valores críticos, permitindo uma melhor caracterização do processo de corrosão das armaduras do concreto. O limite superior, corresponde a um grau de saturação de aproximadamente 70%, onde para este valor têm-se as maiores taxas de corrosão. Para graus de saturação abaixo deste, inicia-se o controle da corrosão pela resistividade, e para valores acima, há um decréscimo da velocidade de corrosão devido à falta de oxigênio, pois a transferência de  $O_2$  através dos poros do concreto até a armadura será executada exclusivamente através da difusão na água dos poros, a qual é consideravelmente menor que no ar, resultando em baixas taxas de corrosão ( $i_{corr}$ ). A partir de um grau de saturação de 45-50%, inicia-se o desenvolvimento de taxas de corrosão inaceitáveis, vindo a estrutura a apresentar problemas de durabilidade no futuro. Para valores inferiores a este, há riscos desprezíveis de corrosão, em casos práticos, correspondendo a valores de  $i_{corr}$  da ordem de 0,1 a 0,2  $\mu A/cm^2$ . Por fim, o limite inferior, abaixo do qual a corrosão para completamente, corresponde a 35%. Isto se deve devido à falta de água nos poros para desenvolver a corrosão, inexistindo, portanto, o eletrólito.

Ratificando os limites acima considerados, GONZÁLEZ et alli (1993) encontraram a máxima velocidade de corrosão em barras imersas em corpos de prova de argamassa com cloretos para um grau de saturação dos poros da argamassa de aproximadamente 60%. Para valores acima e abaixo deste, a taxa de corrosão encontrada foi menor, devido ao controle catódico promovido pela falta de oxigênio necessário para a reação catódica, e devido ao aumento da resistividade, respectivamente, conforme explicitado anteriormente (LÓPEZ & GONZÁLEZ, 1993; TUUTTI, 1980).

Uma outra classificação do meio ambiente em relação a sua agressividade, só que considerando a umidade relativa do mesmo, está exposta na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Classificação do grau de agressividade do meio ambiente com base na umidade relativa (CEB, 1992, modificado por HELENE, 1993).

Umidade Relativa	Carbonatação	Ataque químico	Penetração de cloretos	Corrosão das armaduras	
				Concreto carbonatado	Concreto com cloretos
Muito Baixa $\leq 45\%$	risco leve	risco insignificante	risco insignificante	risco insignificante	risco insignificante
Baixa 45 a 65%	alto risco	risco insignificante	risco leve	risco leve	risco leve
Média 65 a 85%	risco médio	risco insignificante	risco leve	alto risco	alto risco
Alta 85 a 98%	risco leve	risco leve	risco médio	risco médio	alto risco
Saturada $\geq 98\%$	risco insignificante	alto risco	alto risco	risco leve	risco leve

Outro fator essencial para o desenvolvimento da corrosão é a temperatura ambiente

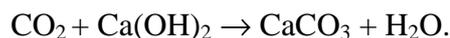
onde o concreto se encontra, pois o aumento da mesma, combinado com uma alta umidade relativa, significa maior mobilidade de moléculas e, conseqüentemente, o transporte de substâncias é facilitado, podendo aumentar a velocidade de corrosão das armaduras (TUUTTI, 1980; LÓPEZ et alli, 1993; RILEM, 1994).

Em um estudo sobre a influência da temperatura em diversos parâmetros do concreto, tais como a condutividade, a resistividade, o conteúdo de oxigênio dissolvido nos poros, o pH da solução dos poros, a relação Cl/OH<sup>-</sup>, o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) e a intensidade de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ), ANDRADE et alli (1998) determinaram que o aumento da temperatura influi sobre tais parâmetros de maneira a facilitar a iniciação e a propagação do processo de corrosão. Segundo o CEB (1992), um aumento de temperatura de 10 °C dobra a taxa de reação da corrosão.

Entretanto, segundo LÓPEZ et alli (1993), em geral, para ambientes secos, a expectativa de vida das estruturas aumenta com o aumento da temperatura devido à perda do eletrólito, dificultando a corrosão em grande extensão que é propiciada pela temperatura. Portanto, o efeito da temperatura não pode ser considerado isoladamente, tendo que relacioná-la com a umidade relativa do meio ambiente e o grau de saturação dos poros do concreto.

### 2.3.3 Carbonatação

O processo de carbonatação em concretos com cimento Portland ocorre devido à reação do dióxido de carbono dissolvido em um filme de água no interior dos poros, com os hidróxidos presentes no concreto. Esta reação ocorre principalmente com o hidróxido de cálcio, resultando no carbonato de cálcio, de acordo com a seguinte reação:



Em concretos com adições de pozolanas também é possível carbonatar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) formando não somente o carbonato de cálcio mas também, simultaneamente, o gel de sílica, o qual possui poros grandes, facilitando a carbonatação subsequente (NEVILLE, 1997).

Uma vez que a pasta hidratada contém álcalis e aproximadamente 20% da massa é constituída de hidróxido de cálcio, sendo este produzido na hidratação do silicato de cálcio presente no clínquer do cimento, normalmente há alcalinidade para manter o pH acima de 12 (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Como o processo de carbonatação consome o  $\text{Ca(OH)}_2$ , e ainda produz o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que possui pH de precipitação entre 8,3 e 9, o pH do concreto na vizinhança das barras baixa para valores menores que 11, obtendo-se assim um ambiente propício para que haja corrosão. Outros gases ácidos como o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) também podem contribuir para a redução do pH da solução presente nos poros do concreto (HELENE, 1993).

Segundo TUUTTI (1980) e PARKER (1997), os fatores que influenciam a taxa de carbonatação são a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente; a umidade relativa do ambiente, que está relacionada com a possível absorção de  $\text{CO}_2$  pelo concreto devido à saturação dos poros; e a resistência do concreto à penetração do  $\text{CO}_2$ , que é função da qualidade do concreto e do nível de deterioração do mesmo. A concentração normal de  $\text{CO}_2$  na atmosfera é de 0,032%, sendo que nos grandes centros urbanos, esta pode chegar a valores de 0,1%, e excepcionalmente até 1%. A penetração de  $\text{CO}_2$  depende do volume e da estrutura dos poros, e ainda, do grau de saturação dos mesmos pois quando estes estão saturados, a carbonatação é reduzida devido à diminuição da difusão do  $\text{CO}_2$ , que é quatro ordens de grandeza mais lenta na água do que no ar. Por outro lado, se os poros estiverem secos, não haverá água para dissolver o  $\text{CO}_2$ , não havendo portanto reação com o cimento hidratado. Tem-se, portanto, que a velocidade máxima de carbonatação ocorre para umidades relativas entre 50 e 70%, conforme pode ser visto na Figura 2.2 (ROSENBERG et alli, 1989; NEPOMUCENO, 1992; BAUER, 1995; NEVILLE, 1997).

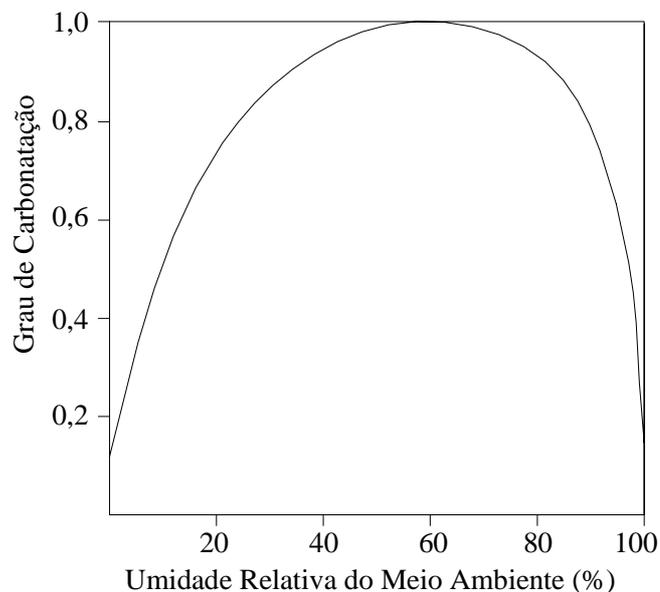


Figura 2.2 Grau de carbonatação em função da umidade relativa do meio ambiente.

Igual importância tem a água contida nos poros do concreto carbonatado sobre a corrosão das armaduras, pois por um lado, quando saturados, bloqueiam a difusão de oxigênio no cátodo, e por outro propiciam a formação do eletrólito do processo de corrosão. Então, a corrosão em concretos carbonatados é máxima para umidade relativa em torno de 90%, e extremamente lenta para umidade abaixo de 50%. Para casos de saturação, tanto a corrosão quanto a carbonatação são reduzidas devido ao bloqueio da difusão do gás (PAPADAKIS et alli, 1992). O processo de corrosão devido à carbonatação ocorre de maneira generalizada e homogênea em torno de toda a área da barra em contato com o concreto carbonatado.

A evolução do processo de carbonatação no tempo depende de certos parâmetros de dosagem do concreto, assim como da espessura do cobrimento, da composição química e

mineralógica do cimento e as relações água/cimento e agregado/cimento do concreto, os quais determinarão a qualidade do mesmo. Depende também, como já mencionado, de certos fatores ambientais onde o concreto se encontra, tais como concentração de CO<sub>2</sub>, umidade relativa, e para o concreto aparente, dos ciclos de sol e chuva (PAPADAKIS et alli, 1992). Embora não seja válido para todos os casos, a carbonatação pode ser modelada por uma equação parabólica, onde a profundidade de carbonatação é aproximadamente proporcional à raiz quadrada do tempo de exposição à frente agressiva, conforme a Equação 2.1, duplicando assim, a profundidade entre um e quatro anos. (ROSENBERG et alli, 1989; PARKER, 1997).

$$e_{CO_2} = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad (2.1)$$

Onde:

$e_{CO_2}$  = espessura ou profundidade carbonatada, geralmente em mm;

$k_{CO_2}$  = constante de proporcionalidade, geralmente em mm/ano<sup>0,5</sup>;

$t$  = tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>, geralmente em anos.

A carbonatação pode ser evitada se o dióxido de carbono for impedido de entrar no concreto ou se sua taxa de entrada for limitada. Concretos de boa qualidade, bem compactados são uma boa barreira contra o CO<sub>2</sub> e isto pode ser aumentado mais ainda com o uso de pinturas de baixa permeabilidade ao gás. Outros meios de limitar a carbonatação seriam a saturação ou a secagem do concreto (PARKER, 1997).

Como o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) é insolúvel, observa-se um fenômeno de refinamento dos poros de concretos carbonatados, pois este precipita entre os vazios, dificultando a penetração do CO<sub>2</sub>, podendo assim, interromper o processo naturalmente (KULAKOWSKI, 1994).

### 2.3.4 Presença de íons cloreto

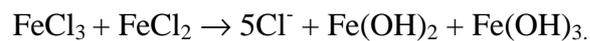
Existem três teorias que tentam explicar o efeito dos cloretos sobre a corrosão do aço imerso no concreto (ACI *Committee* 222, 1991).

a) Teoria do filme óxido – segundo esta teoria, os íons cloreto conseguem penetrar através dos poros e defeitos do filme óxido passivante muito mais facilmente que outros agentes agressivos, tais como SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, em função do seu pequeno raio atômico, e conseguem dispersar coloidalmente este filme, facilitando a penetração de outros íons.

b) Teoria da adsorção – esta teoria postula que os íons cloreto são adsorvidos na

superfície do metal em competição com o oxigênio dissolvido e com os íons hidroxila. Os íons cloreto promovem a hidratação do metal, facilitando, assim, a sua dissolução em íons.

c) Teoria do complexo transitório – de acordo com esta teoria, os íons cloreto competem com as hidroxilas pelos íons de ferro, produzidos pelo processo de corrosão, para a formação de compostos de corrosão solúveis, denominados de complexos transitórios. No concreto adjacente à área anódica, a concentração de cátions de ferro ( $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ) aumenta, isto é, o pH cai, enquanto que a produção de íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) ocorre na vizinhança das áreas catódicas do aço. Devido à queda local do pH no ânodo, um complexo solúvel de cloretos e ferro ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_2$ ) é formado. Estes complexos difundem-se a partir do ânodo para outras regiões, permitindo que a corrosão continue. Distante do eletrodo (armadura), onde ambos o pH e a concentração de oxigênio dissolvido são altas, o complexo quebra, precipitando hidróxido de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), liberando o íon cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) para reagir posteriormente com outros íons de ferro no ânodo (ROSENBERG et alli, 1989). As equações a seguir resumem simplificadaamente o fenômeno.



Portanto, a corrosão das armaduras devido aos cloretos é mais preocupante que a corrosão devido à carbonatação pois os cloretos não são consumidos nas reações, ficando novamente livres após as mesmas (THANGAVEL & RENGASWAMY, 1998).

Ao contrário do que se imagina, somente a presença de cloretos não é suficiente para iniciar o processo de corrosão do aço no estado passivo. Para que a corrosão inicie é necessário também a presença de oxigênio que penetra através de fissuras ou através da porosidade do concreto, e o acesso deste, como já mencionado, está relacionado com o grau de saturação dos poros do concreto. O processo se inicia, geralmente, como resultado de uma gradual acidificação localizada devido aos íons cloreto, até que a camada passivante seja destruída (GONZÁLEZ et alli, 1996a).

Os íons cloreto quebram o filme passivo e ativam a superfície do aço formando o ânodo, que no caso da corrosão localizada também é denominado de pite, sendo o cátodo a superfície passivada. A destruição do metal aumenta com o aumento da concentração de cloretos. Quando se tratar de armaduras já em início de corrosão, esses íons aceleram o processo, aumentando a taxa de corrosão. A solução de dentro dos pites possui uma concentração salina maior e um pH menor que a solução exterior aos mesmos. Portanto, nas intervenções em estruturas que apresentam corrosão, HELENE (1993) considera fundamental a limpeza das cavidades dos pites pois caso isto não seja feito, o novo material envolvente, mesmo com pH elevado, não será suficiente para repassar a armadura.

A tipologia, segundo a forma de corrosão apresentada, quando o íon cloreto é o agente iniciante é denominada de corrosão localizada ou corrosão por pites. Esta se caracteriza pela formação de micropilhas, onde a profundidade de corrosão é muito superior à largura (GALVELE, 1979). Em estruturas atacadas por cloretos, onde há uma debilitação da capacidade mecânica dos elementos estruturais em virtude da perda de seção da armadura, a profundidade máxima alcançada pela corrosão tem mais importância que o próprio valor médio de penetração. Mas, como a determinação da profundidade do pite de corrosão tem importantes dificuldades experimentais, geralmente considera-se outros parâmetros, tal como a taxa de corrosão, para inferir a respeito do processo de corrosão (GONZÁLEZ et alli, 1995).

A presença de íons cloreto no concreto tanto pode ter origem no momento da produção do concreto quanto por penetração no mesmo depois de endurecido. Para o primeiro caso, as formas de incorporação dos cloretos no concreto são o uso indevido de agregados contaminados, tal como a areia do mar, de aditivos aceleradores de pega com cloretos, de alguns aditivos redutores de água ou plastificantes (cujo o efeito retardador é compensado com adição de  $\text{CaCl}_2$  em sua composição) e também através de água contaminada. Já no segundo caso (penetração de cloretos quando o concreto já se encontra endurecido), os cloretos são provenientes de fontes externas tais como águas do mar, atmosferas marinhas, através da névoa salina, lavagem de pisos e fachadas com ácido muriático e sais de degelo, nos países onde o uso destes se faz necessário, penetrando através do cobrimento de concreto das barras. O tempo necessário para esses íons alcançarem as barras depende, primeiro do mecanismo de penetração e segundo, da concentração externa dos cloretos e da microestrutura do concreto (RODRÍGUEZ et alli, 1994; PARKER, 1997; THANGAVEL & RENGASWAMY, 1998).

Por conta do esclarecimento da comunidade científica mundial sobre os males provocados pelos cloretos e ao surgimento de aceleradores sem cloretos, o primeiro caso de contaminação é pouco provável que aconteça atualmente, sendo a maioria dos problemas devido ao ingresso de íons provenientes do meio ambiente (ANDRADE, 1993; HELENE, 1993).

Como cristal sólido, os cloretos não oferecem elevado risco à durabilidade das estruturas devido à dificuldade de penetração pois a dimensão dos poros do concreto é bem menor que a dos cristais. O problema reside quando estes cristais, que estão depositados na superfície do concreto, são dissolvidos pela água das chuvas e carreados para o interior do concreto.

Os cloretos penetram no concreto pela movimentação da água que os contém, bem como por difusão de íons na água e por absorção (NEVILLE, 1997). HELENE (1993) considera que os cloretos podem penetrar no concreto endurecido através dos mecanismos clássicos de penetração de água e transporte de íons, quais sejam: *absorção capilar*, onde a

penetração é função do diâmetro e da intercomunicação dos poros; *difusão*, quando há uma elevada diferença de concentração dos íons cloretos; *permeabilidade*, quando existe um gradiente de pressão e *migração de íons*, por ação de um campo elétrico.

Quando o concreto está completamente saturado d'água, os cloretos penetram puramente por difusão, devido às diferenças de concentração. Entretanto, quando o concreto está parcialmente saturado, os cloretos podem penetrar por absorção e por força de capilaridade (ANDRADE, 1993). Segundo ROSENBERG et alli (1989), a forma mais rápida de penetração da água em concretos razoavelmente secos é a sucção capilar. Através deste mecanismo, a água contaminada pode penetrar vários milímetros em apenas poucas horas.

Os cloretos podem ser encontrados no concreto em três formas: quimicamente ligados com as fases alumino-ferríticas formando cloroaluminatos, fisicamente adsorvidos nas paredes dos poros através do C-S-H e livres, dos quais somente os livres provocam a quebra da película passivante do aço (TUUTTI, 1980).

A fixação dos cloretos ocorre através da reação do  $C_3A$  com os mesmos, formando os cloroaluminatos de cálcio ou Sais de Friedel. Estes sais são estáveis em ambientes alcalinos, sendo que uma redução do pH, devido à carbonatação, por exemplo, pode quebrar estes cloroaluminatos, liberando os íons cloreto. O ataque por sulfatos pode resultar na decomposição dos cloroaluminatos, formando-se, então, o sulfoaluminato de cálcio, tornando alguns íons cloreto disponíveis para a corrosão. O uso de adições, como a escória de alto forno, por exemplo, propicia um aumento da quantidade de aluminatos, proporcionando um maior teor de cloretos fixos (BAUER, 1995; NEVILLE, 1997). Há um equilíbrio químico entre cloretos livres e combinados, de tal maneira que a maior quantidade de cloretos no concreto implica em mais cloretos fixados. Quando o concreto não consegue mais fixar os cloretos, uma maior quantidade de cloretos totais implica em maior quantidade de cloretos livres (ALONSO et alli, 1997; GLASS & BUENFELD, 1997).

#### 2.3.4.1 Valor limite de cloretos para despassivar

A quantidade de cloretos necessária para despassivar o aço imerso no concreto contaminado pelos mesmos, não é um valor único e depende de vários fatores tais como a dosagem, tipo de adensamento e cura do concreto, presença de adições no concreto, características ambientais (temperatura e umidade relativa), o pH da solução dos poros, a proporção de cloretos solúveis, a quantidade de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) no cimento, a fonte dos cloretos e também das condições superficiais e metalúrgicas do aço atacado. No concreto, a quantidade de cloretos para despassivar o aço pode ser diferente da quantidade exigida nas argamassas devido à sua capacidade de fixar os cloretos, à alcalinidade da solução de seus poros e à sua propriedade de barreira (ALONSO et alli, 1997).

Observa-se também uma dependência do tipo de sal onde o cloreto foi originado, pois

o valor limite é maior no caso de cloretos provenientes do  $\text{CaCl}_2$  do que quando provenientes do  $\text{NaCl}$  ou  $\text{KCl}$  (HELENE, 1993). Segundo GOÑI et alli (1989), citados por FIGUEIREDO (1994), o uso de  $\text{CaCl}_2$  provoca uma maior redução do pH e uma maior relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  quando comparado com o  $\text{NaCl}$ . Entretanto ALONSO et alli (1997) encontraram relações  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  e um teor de cloretos livres menores para corpos de prova atacados por  $\text{CaCl}_2$  do que para os atacados por  $\text{NaCl}$ , embora a quantidade de cloretos totais para ambos fosse a mesma. Segundo NEVILLE (1997), para uma dada quantidade de íons cloretos na mistura, encontram-se muito mais íons cloretos livres com  $\text{NaCl}$  do que com  $\text{CaCl}_2$ . Nota-se, portanto, que ainda há um certo descenso a respeito da influência do tipo de sal na corrosão das armaduras, sendo que explicações para tais fatos ainda estão sendo buscadas pela comunidade científica.

A relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  é o parâmetro mais aceito para se prever o início do processo de corrosão das armaduras em concreto (ALONSO et alli, 1997), embora THANGAVEL & RENGASWAMY (1998) afirmem que somente esta relação não é um índice apropriado para prever a corrosão, sugerindo-se considerar o papel do teor de cloretos inicial na mistura, as condições de exposição do elemento estrutural e a difusão de oxigênio como outros parâmetros determinantes. Como há uma certa dificuldade em medir proporções de  $\text{OH}^-$  no concreto, também são utilizados outros parâmetros para expressar o risco da corrosão, como a quantidade de cloretos totais ou livres em relação à massa de cimento ou concreto, ou ainda em relação à água de amassamento, devido à grande vantagem e facilidade destes métodos, sendo que algumas Normas já expressam seus valores limites em função destes parâmetros (GLASS & BUENFELD, 1997).

TUUTTI (1980) afirma que somente a concentração de cloretos livres interessa para a iniciação da corrosão, entretanto é conveniente determinar os cloretos totais pois parte dos cloretos combinados com a fase hidratada do cimento podem vir a ficar disponíveis em reações deletérias devido a fenômenos de carbonatação ou elevação de temperatura (ANDRADE, 1992; HELENE, 1993). Segundo GLASS & BUENFELD (1997), das representações correntes, a que melhor apresenta o nível limite de cloretos para que não haja corrosão é o conteúdo total de cloretos expresso em relação à massa de cimento, pois esta representação pode ser vista como o conteúdo potencial total do íon agressivo expresso relativamente ao conteúdo potencial total inibidor. Para tal autor, a melhor maneira de se representar o risco de corrosão seria expressar o conteúdo total de cloretos em relação à alcalinidade total do concreto.

Os teores de cloretos críticos determinados por diversos autores são sumarizados nos trabalhos de ALONSO et alli (1997) e GLASS & BUENFELD (1997), os quais estão compilados na Tabela 2.2. A grande variabilidade dos valores apresentados nesta tabela é consequência da variação dos fatores que possivelmente influenciam a corrosão das armaduras, os quais já foram explicitados anteriormente.

Para o CEB (1992), o teor crítico de cloretos não é um valor fixo, sendo dependente da

qualidade do concreto e da umidade relativa do meio ambiente onde a estrutura está inserida. Se o concreto não estiver carbonatado, 0,05% de cloretos em relação à massa do concreto, ou 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento (para um consumo de  $300 \text{ kg/m}^3$ ) é um bom critério para determinar danos incipientes devido à corrosão, conforme a Figura 2.3. Como o aço para protensão é mais sensível à corrosão, um limite inferior de 0,025% de cloretos em relação à massa de concreto, ou 0,2% em relação à massa do cimento (para um consumo de  $300 \text{ kg/m}^3$ ), é recomendado para estruturas protendidas.

Tabela 2.2 Valores críticos de cloretos sugeridos por diversos autores (ALONSO et alli, 1997; GLASS & BUENFELD, 1997).

Referência	Condições de exposição	Amostra	Valores ou intervalos		
			Cloretos totais (% massa cim.)	Cloretos livres (% massa cim.)	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>
Stratful et alli	ao ar livre	estrutura	0,17-1,4	0,45-1,15	0,22 3,0
Vassie	ao ar livre	estrutura	0,2-1,5		
M. Thomas	ao ar livre	concreto	0,5-0,7		
Elsener e Böhni	laboratório	argamassa	0,25-0,5		
Henriksen	ao ar livre	estrutura	0,3-0,7		
Treadway et alli	ao ar livre	concreto	0,32-1,9		
Page et alli	laboratório	pasta	0,4		
	ao ar livre	concreto			
Kayyali	laboratório	concreto			
Hansson e Sorensen	laboratório	argamassa	0,4-1,6		
Schiessl e Raupach	laboratório	concreto	0,5-2		
Thomas et alli	ao ar livre	concreto	0,5		
Tuutti	laboratório	concreto	0,5-1,4		
Locke e Siman	laboratório	concreto	0,6		
Labert et alli	laboratório	concreto	1,6-2,5		
Lukas	ao ar livre	estrutura	1,8-2,2		
Pettersson	laboratório	pasta/arg.			
Goni e Andrade	laboratório	solução			
Diamond	laboratório	pasta/solução			
Hausmann	laboratório	solução			
Yonezawa et alli	laboratório	arg./solução			
Hussain et alli	laboratório	concreto			

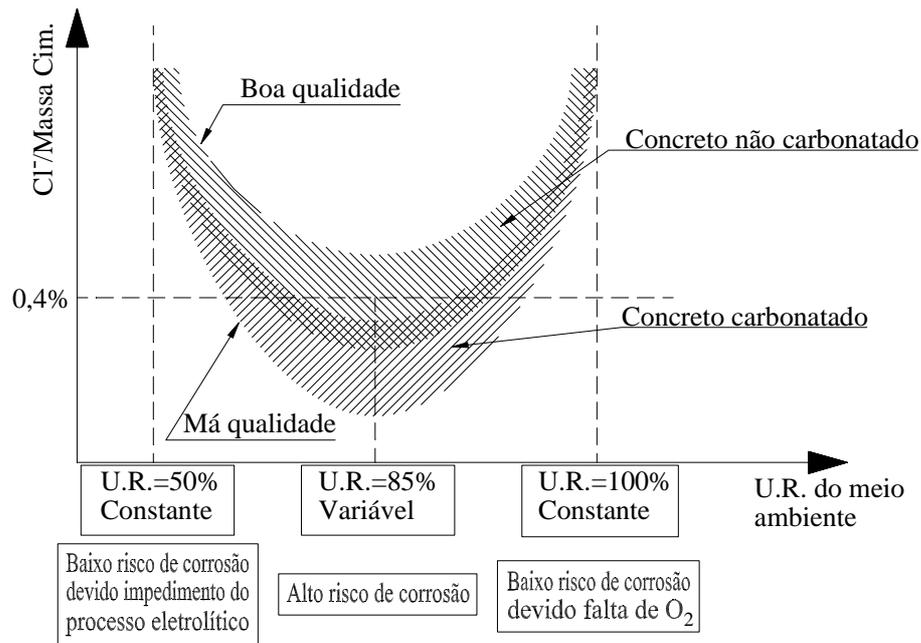


Figura 2.3 Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade relativa do ambiente (CEB, 1992).

A dubiedade do valor crítico de cloretos transcende para as normas de diversos países, as quais possuem os mais variados valores limites de cloretos, expressados das mais variadas formas, conforme pode ser visto no trabalho de HELENE (1993). Em particular, a norma brasileira NBR 6118 limita o teor máximo de cloretos em relação à água de amassamento, a um valor de 500 mg/l. Este não é um bom parâmetro para expressar o valor limite pois a fixação do teor de cloretos em função da massa de água de amassamento significaria que é possível adicionar mais cloretos em concretos de elevada relação a/c, ou seja, quanto mais água, mais cloretos são permitidos, o que obviamente é incoerente.

Conforme a revisão bibliográfica dos trabalhos mais atuais (THANGAVEL & RENGASWAMY, 1998; GLASS & BUENFELD, 1997; ALONSO et alli, 1997) ainda não se chegou a um consenso à respeito do valor limite de cloretos que pode ser incorporado à massa do concreto para que não haja corrosão. Realmente o estudo é complexo pois muitas variáveis influenciam a instalação do processo corrosivo, entretanto nota-se uma falta de padronização dos métodos de ensaio, pois utiliza-se as mais diversas técnicas de determinação dos teores de cloreto nas misturas, usando uma diversidade de materiais em ambientes de características das mais variadas, dentre outras variáveis, que são de extrema relevância na determinação deste teor.

### 3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CORROSÃO

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIOS

Devido à complexidade do fenômeno corrosivo e à dificuldade de determinação da resistência à corrosão das estruturas em virtude do grande número de variáveis de difícil controle que interferem significativamente no processo de corrosão, existem poucos métodos de ensaio padrão de avaliação de estruturas corroídas normalizados por entidades nacionais e internacionais (HELENE, 1993).

Entretanto, os métodos disponíveis consideram aspectos muito importantes já mencionados no item 2.3: variáveis determinantes da iniciação do processo corrosivo, quando se faz uma abordagem termodinâmica, ou seja, considerando a existência ou não de condições indispensáveis para que a corrosão ocorra; e variáveis determinantes da propagação do processo corrosivo, abordando assim a cinética da corrosão, ou seja, considerando a existência de condições que acelerem ou atrasem as reações, modificando a taxa de corrosão no tempo.

A Tabela 3.1 mostra o agrupamento de métodos e metodologias de ensaio proposto por HELENE (1993) segundo as variáveis: concreto como meio protetor e passivante, na iniciação, e como eletrólito, na propagação; armadura como condutor elétrico e eventual pilha de corrosão eletroquímica; e sistema concreto-armadura-meio ambiente, como componente estrutural.

RODRÍGUEZ et alli (1994) e CASCUDO (1997), no que diz respeito à identificação e quantificação da corrosão em estruturas de concreto armado, mencionam basicamente três métodos de avaliação: o método gravimétrico, o visual e os eletroquímicos.

O método gravimétrico, apesar de sua utilidade sob determinadas circunstâncias, falha ao encontrar exigências mínimas para um monitoramento adequado da corrosão devido à sua característica destrutiva, pois o parâmetro de avaliação é a perda gravimétrica, e também devido aos longos períodos exigidos para se obter resultados significantes. Por estes motivos, este método é utilizado somente em estudos laboratoriais. Como vantagem tem-se a elevada confiabilidade, daí a sua importância quando feito a comparação com métodos que também indicam a perda de massa das armaduras corroídas, tais como os métodos eletroquímicos.

O método visual é comumente utilizado para dar uma primeira avaliação do grau de degradação da estrutura, sendo este muito subjetivo, dependente do grau de conhecimento do avaliador. É um método não-destrutivo, entretanto tem uma pequena velocidade de resposta a mudanças no processo de corrosão. Ainda que as observações possam ser feitas instantaneamente, a detecção de mudanças em sistemas com alta resistência à corrosão levam muito tempo. Em adição, devido à não acessibilidade direta das armaduras, a mera observação

dos sintomas visíveis, tais como manchas, fissuras, dentre outros, pode se tornar um problema pois o tempo demandado para que estes sintomas se tornem aparentes (visíveis) pode comprometer a estabilidade e segurança da estrutura, pois a corrosão já pode ter alcançado consideráveis extensões até então.

Os métodos eletroquímicos dão respostas rápidas, além de possuírem sensibilidade similar à do método gravimétrico. Além disso, alguns métodos eletroquímicos ainda possuem a vantagem de não destruírem a estrutura em estudo. Por tais motivos, estes métodos são os mais estudados e utilizados no monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado.

Tabela 3.1 Metodologias e métodos de ensaio para avaliação da corrosão em armaduras de concreto armado (HELENE, 1993)

Estágio da corrosão	Iniciação	Propagação
Fenômeno	Termodinâmica da Corrosão	Cinética da Corrosão
Significado	Viabilidade da Corrosão	Taxa de Corrosão
Avaliação do Concreto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidade de carbonatação</li> <li>- Teor de umidade de equilíbrio</li> <li>- pH da solução presente nos poros do concreto</li> <li>- Concentração de cloretos e hidroxilas</li> <li>- Teor de cloretos</li> <li>- Difusão de cloretos</li> <li>- Retenção de cloretos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistividade elétrica</li> <li>- Penetração de cloretos</li> <li>- Migração de cloretos</li> <li>- Difusão de oxigênio</li> <li>- Teor de sais solúveis</li> </ul>
Avaliação da Armadura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bitola e tipo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composição química</li> <li>- Perda de massa</li> <li>- Observação visual e microscópica</li> </ul>
Avaliação do Sistema Concreto/ Armadura/Meio Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heterogeneidades</li> <li>- Meio ambiente</li> <li>- Potencial do eletrodo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heterogeneidades</li> <li>- Meio ambiente</li> <li>- Macrocélula</li> <li>- Corrente/tensão impressa</li> <li>- Resistência de polarização</li> <li>- Curvas de polarização</li> <li>- Resistência elétrica</li> <li>- Impedância eletroquímica</li> <li>- Ruídos eletroquímicos</li> </ul>

### 3.2 MÉTODOS ELETROQUÍMICOS

Em ausência de perturbações externas, os sistemas se corroem no potencial de corrosão livre ( $E_{\text{corr}}$ ), com a exigência de uma estrita equivalência entre as intensidades dos processos parciais anódicos ( $I_a$ ) e catódicos ( $I_c$ ). A corrosão acontece, graças à formação e ao movimento de partículas com cargas elétricas e aos processos parciais anódicos e catódicos

que correspondem à uma intensidade proporcional à velocidade do fenômeno. Graças a esta situação é possível estimar a velocidade de corrosão medindo-se magnitudes elétricas (GONZÁLEZ, 1989).

O equilíbrio elétrico existente no potencial de corrosão livre, expresso pela Equação 3.1, impede a determinação direta de  $i_{\text{corr}}$ . Quando se rompe este equilíbrio, impondo-se uma polarização ao eletrodo de trabalho, tem-se como resposta uma corrente externa ( $I_{\text{ext}}$ ), que é medida instrumentalmente. Esta corrente externa é a diferença entre as duas taxas, a anódica ( $I_a$ ) e a catódica ( $I_c$ ) (Equação 3.2) (STERN & GEARY, 1957).

$$I_t = I_a + I_c = 0 \quad (3.1)$$

$$|I_a| - |I_c| = |I_{\text{ext}}| \quad (3.2)$$

Uma grande vantagem dos métodos eletroquímicos está na sua sensibilidade. Enquanto nos métodos gravimétricos é necessário, pelo menos, variações em massa da ordem de  $mg$ , nos eletroquímicos, com a instrumentação eletrônica atual, é possível detectar intensidades da ordem de  $nA$  ( $10^{-9}A$ ), permitindo avaliar ataques muito inferiores aos admitidos frequentemente na prática. Outra vantagem destes métodos é a possibilidade da obtenção, a qualquer momento, da velocidade de corrosão instantânea, enquanto que os procedimentos clássicos de perda ou ganho de massa dão resultados integrais, proporcionando somente uma velocidade média de ataque, relativo ao espaço de tempo que durou a experiência, sem indicação alguma sobre a evolução do ataque nesse tempo (GONZÁLEZ, 1989).

Pode-se reproduzir, através dos ensaios acelerados de corrosão, uma grande quantidade de sistemas metal/meio, em suas condições de serviços, e em virtude da extrema sensibilidade de tais métodos, consegue-se resultados sem falsear o mecanismo do processo de corrosão em estudo. Talvez, a principal vantagem resida em que, enquanto os ensaios gravimétricos exigem longas determinações com os materiais que exibem elevadas resistências à corrosão, eletroquimicamente se pode chegar a uma estimativa da velocidade do ataque em tempos muito curtos. Isto animou os pesquisadores a estudar numerosos novos sistemas e contribuiu para o desenvolvimento da ciência da corrosão (GONZÁLEZ, 1989).

A maioria dos resultados obtidos através dos métodos eletroquímicos que se têm hoje foram alcançados em testes laboratoriais utilizando-se corpos-de-prova confeccionados com argamassa ou concreto com barras de aço neles imersas. Tais corpos-de-prova são utilizados no estudo do efeito dos fatores de corrosão inerentes ao concreto, à armadura e ao meio onde estão inseridos, onde estes são submetidos a condições similares à real, estimado-se a taxa de corrosão através de métodos eletroquímicos (GONZÁLEZ et alli, 1996a). Entretanto, todos os métodos de monitoramento da corrosão, dentre eles os eletroquímicos, apresentam certas dificuldades, seja nas medições dos parâmetros de avaliação ou na interpretação dos

resultados obtidos (RODRÍGUEZ et alii, 1994).

Mas, como já mencionado anteriormente, há necessidade de acelerar o processo de corrosão nos ensaios laboratoriais em virtude da demanda de tempo que o aço exige para desenvolver o processo de corrosão em alguns materiais. Portanto utiliza-se câmaras contendo  $\text{CO}_2$  para acelerar o processo de carbonatação, onde os teores de  $\text{CO}_2$  variam significativamente conforme o estudo desenvolvido, tendo pesquisadores que utilizam até 100% (NEPOMUCENO, 1992; BAUER, 1995; MONTEIRO, 1996; VASCONCELOS, 1997). Caso se deseje simular ataque por íons cloreto, os métodos mais utilizados são os ciclos de umedecimento e secagem, utilizando a câmara de névoa salina (NEPOMUCENO, 1992) ou ciclos de imersão dos corpos-de-prova em soluções de  $\text{NaCl}$  ou  $\text{CaCl}_2$  (CASCUDO, 1991; MONTEIRO, 1996; VASCONCELOS, 1997) e secagem dos mesmos em estufa.

Durante o período de molhagem, a água penetrará no concreto devido à sucção capilar juntamente com os cloretos nela contidos. No período de secagem, a água sai do concreto, permanecendo os cloretos. Este processo, portanto, causa um enriquecimento do teor de cloretos nas zonas de umedecimento e secagem do concreto (CEB, 1992).

No caso de molhagem da superfície do concreto, os mecanismos de transporte de água são de grande importância. Devido à sucção capilar, a saturação será rapidamente alcançada pois a água absorvida pelo concreto através deste mecanismo de transporte possui uma velocidade consideravelmente maior que a evaporação da mesma (CEB, 1992). Portanto, quando se utiliza ciclos de umedecimento e secagem, o período de secagem deve ser maior que o de umedecimento, para uma efetiva aceleração do ataque.

### **3.2.1 Resistência de polarização**

O método de Resistência de Polarização foi originalmente desenvolvido por Stern e colaboradores, entre os anos de 1957 e 1959. No entanto, somente nos anos 70, Andrade e González introduziram o método para determinar a velocidade de corrosão de armaduras em argamassas e concretos (RODRÍGUEZ et alii, 1994; CASCUDO, 1997).

O princípio do método consiste em aplicar um pequeno sinal (polarização) na armadura em análise, em torno do potencial livre do aço ( $E_{\text{corr}}$ ), o qual é medido em relação ao eletrodo de referência (ver item 3.2.2.2), para se determinar a resistência de polarização ( $R_p$ ) do sistema.

Polarização nada mais é que a indução de uma variação do potencial ( $\Delta E$ ) em torno do potencial de corrosão. Na presente técnica, esta polarização é geralmente de 10 a 20mV, registrando-se a variação da corrente ( $\Delta I$ ), estes denominados de métodos potenciostáticos ou potenciodinâmicos. O caminho inverso, ou seja, variar a corrente e registrar a variação do potencial também é utilizado, sendo denominado de método galvanostático. O valor de  $R_p$

será, por definição, o quociente entre as variações de potencial e corrente, desde que  $\Delta E$  e  $\Delta I$  sejam suficientemente pequenos (Equação 3.3).

$$R_p = \lim_{\Delta E, \Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (3.3)$$

Quanto maior for a  $R_p$ , menos intensas serão as taxas de corrosão encontradas, sendo que no caso de sistemas com altos valores de  $R_p$ , como as armaduras passivas em concreto, os índices de corrosão são desprezíveis (CASCUDO, 1997). Deve-se ter cuidado ao aplicar as polarizações pois se estas forem demasiadamente grandes, pode-se modificar a superfície do eletrodo, inabilitando o mesmo para futuras determinações.

Quando se impõe esta pequena polarização, faz-se uma extrapolação das curvas anódicas e catódicas. Como estas curvas são semi-logarítmicas, nas proximidades do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), a relação entre o potencial e a soma algébrica das pequenas correntes anódica e catódica é considerada linear, daí também a denominação do método de polarização linear. A corrente externa resultante da polarização é medida através da diferença entre as duas taxas, a anódica e a catódica (STERN & GEARY, 1957). Isto está sumarizado no diagrama de Evans (Figura 3.1), onde é plotada a curva de polarização catódica para o processo de redução e a curva de polarização anódica para o processo de dissolução do metal.

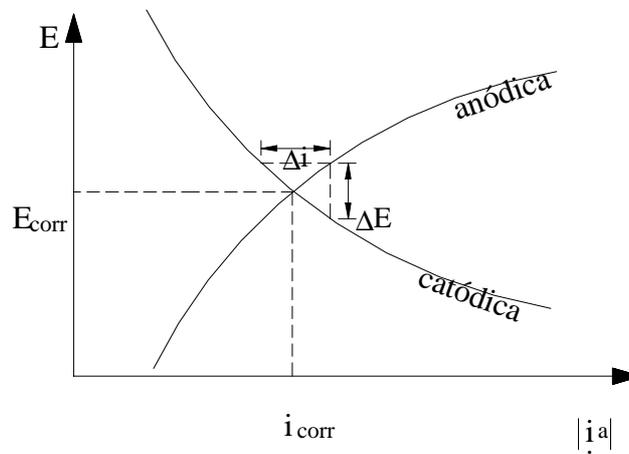


Figura 3.1 Diagrama de Evans

Mas para inferir de forma quantitativa sobre o processo de corrosão, utiliza-se a fórmula de STERN & GEARY (1957), onde para um dado sistema, as tangentes de Tafel das semi-reações anódica ( $b_a$ ) e catódica ( $b_c$ ) podem ser consideradas constantes (Figura 3.2). Sendo assim, a fórmula se resume às Equações 3.4 e 3.5.

$$I_{corr} = B \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad (3.4)$$

$$B = \frac{b_a \cdot b_c}{2,3 \cdot (b_a + b_c)} \quad (3.5)$$

Onde:

$I_{\text{corr}} \Rightarrow$  intensidade de corrosão ( $\mu\text{A}$ );

$b_a \Rightarrow$  constante de Tafel anódica (mV);

$b_c \Rightarrow$  constante de Tafel catódica (mV).

$\Delta I \Rightarrow$  variação de corrente ( $\mu\text{A}$ );

$\Delta E \Rightarrow$  variação de potencial (mV);

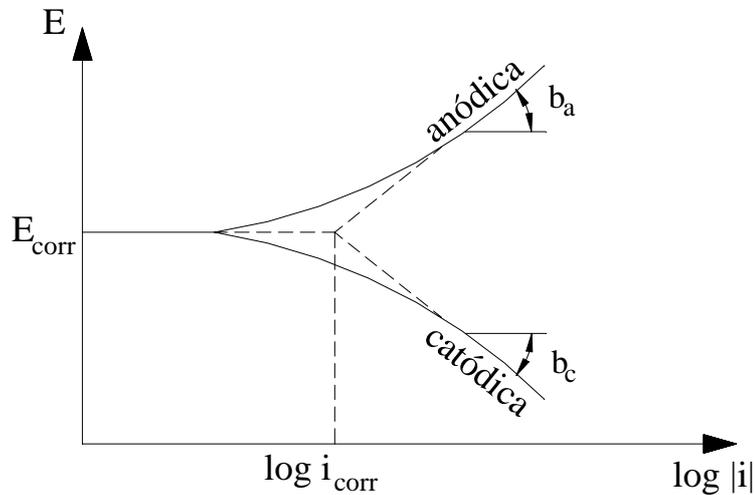


Figura 3.2 Curva de polarização anódica e catódica

O valor de  $B$  pode ser determinado por vários procedimentos, sendo o mais imediato e convincente, a obtenção experimental de  $b_a$  e  $b_c$  a partir das curvas de polarização, utilizando-se posteriormente a Equação 3.5. O inconveniente deste método são as altas polarizações impostas, tornando os eletrodos de trabalho inadequados para se fazer outras medidas, caracterizando assim a destrutibilidade do método.

Os valores de  $B$  também podem ser determinados em função do estado da armadura no interior do concreto. ANDRADE & GONZÁLEZ (1978), citados por NEPOMUCENO (1992), encontraram uma relação quantitativa aceitável entre as estimativas eletroquímicas e gravimétricas, utilizando 26 mV, para a armadura no estado ativo de corrosão, e 52 mV, para a armadura no estado passivo de corrosão, como valores da constante  $B$ . A partir de então, diversos pesquisadores (CASCUDO, 1991; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995; MONTEIRO, 1996; CASTANHEIRA, 1997; VASCONCELOS, 1997; TEIXEIRA, 1998; ANDRADE & ALONSO, 1990; LÓPEZ & GONZÁLEZ, 1993; dentre outros) utilizaram tais valores, sempre apresentando boa correlação quando comparados com ensaios gravimétricos realizados simultaneamente.

Uma maneira de se determinar a validade dos valores de  $B$  adotados é através de ensaios gravimétricos realizados simultaneamente aos eletroquímicos. Para tanto deve-se comparar a perda de massa gravimétrica, que é considerada como a mais exata, com a perda de massa eletroquímica, determinada através da lei de Faraday. A Equação 3.6 calcula a taxa de corrosão total ( $i_T$ ) através das taxas de corrosão instantâneas medidas a cada intervalo de tempo (a cada ciclo de umedecimento e secagem ( $t_f - t_i$ ), por exemplo), a qual é utilizada no cálculo da perda de massa eletroquímica, usando a Equação 3.7.

$$i_T = \sum \frac{i_f + i_i}{2} \cdot (t_f - t_i) = \int_{t_i}^{t_f} i_{corr} \cdot dt \quad (3.6)$$

$$\Delta M_e = \frac{M_a}{z \cdot F} i_T = 0,025 \cdot i_T \quad (3.7)$$

Onde:

$i_T \Rightarrow$  taxa de corrosão total ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2 \cdot \text{dia}$ );  $F \Rightarrow$  constante de Faraday (1116,9 mA.dia/eq);

$\Delta M_e \Rightarrow$  perda de massa eletroquímica ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ );  $z \Rightarrow$  valência, que para o ferro é igual a 2.

$M_a \Rightarrow$  massa atômica, que para o ferro é igual a 56g;

De posse do valor de  $R_p$  e de  $B$ , determina-se a taxa ou velocidade de corrosão instantânea da armadura ( $i_{corr}$ ), simplesmente dividindo o valor de  $I_{corr}$  pela área da armadura previamente determinada a ser corroída.

BROOMFIELD (1991), citado por GONZÁLEZ et alli (1996a), comparou os valores limites obtidos por diversos autores, para as taxas de corrosão, no que diz respeito ao processo de corrosão, encontrando critérios de avaliação diferenciados. A Figura 3.3 compila estes valores obtidos com diversos instrumentos, aplicados a diferentes estruturas sob circunstâncias diferenciadas. Nota-se que há uma certa discordância entre os autores, a respeito de que valor de velocidade de corrosão o processo corrosivo torna-se preocupante. É claro que deve-se fixar o grau máximo de corrosão aceitável, de acordo com o propósito para o qual a estrutura foi projetada. Dentre todos, os mais utilizados são os propostos por Andrade.

Taxas de corrosão acima de  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , as quais facilmente são alcançadas em presença de cloretos e umidade, irão demandar menos de 10 anos para exaurir a vida útil das estruturas,

o que é muito pouco tempo quando comparado com as previsões tidas na etapa de projeto das estruturas de concreto armado, e portanto, estas devem ser consideradas como altamente perigosas (GONZÁLEZ et alli, 1998).

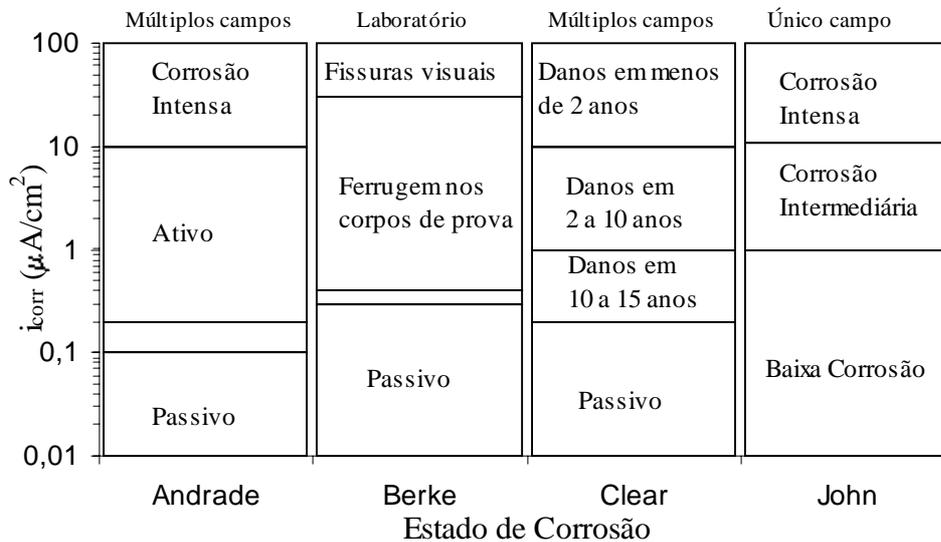


Figura 3.3 Comparação entre as taxas de corrosão de diversos autores (BROOMFIELD, 1991 citado por GONZÁLEZ et alli, 1996a).

GONZÁLEZ (1989) tece algumas críticas a respeito da técnica de Resistência de Polarização quando utilizada para determinar a velocidade de corrosão em aços imersos em concretos ou argamassas, as quais são citadas a seguir.

- Inexatidão do método, pois a relação  $\Delta E/\Delta I$  é uma aproximação linear da diferença entre funções exponenciais;
- Suposição de constância das tangentes de Tafel, o que equivale a supor  $B$  invariável, o que evidentemente não é o caso de alguns sistemas reais;
- Pode ocorrer uma queda ôhmica devido às capas dos produtos de corrosão que eventualmente podem recobrir o eletrodo ou devido ao eletrólito (resistividade do meio);
- A instabilidade de  $E_{\text{corr}}$  representa, na prática, uma limitação tão importante que pode resultar na inaplicabilidade do método;
- Como no cálculo da  $i_{\text{corr}}$ , a área da armadura já está predeterminada, para fenômenos de corrosão localizada, a informação sumistrada pelo método de resistência de polarização pode induzir erros graves pois não se saberia a fração da superfície afetada, no entanto, não se pode desprezar a técnica em tais circunstâncias, pois esta pode informar perfeitamente sobre o momento em que se inicia tal ataque, detectado por variações de  $R_p$  de uma a várias ordens de magnitude; e

- A proximidade entre  $E_{\text{corr}}$  e os potenciais de equilíbrio (potenciais reversíveis das semi-reações anódica e catódica) seria um outro problema, para não se dizer o principal, pois isto nos dá uma informação global sobre todos os processos redox do sistema, sejam estes de corrosão da armadura ou não.

Descartando esta última, todas as demais restrições ao método são corrigíveis em maior ou menor grau, sendo portanto insuficientes para invalidar a aplicação do método na determinação da taxa de corrosão de armaduras em concretos. Em muitos casos, sobretudo quando se desconhece o valor da constante  $B$ , deve-se prescindir de excessivas pretensões de exatidão, e isto não é preocupante, pois na maioria das aplicações práticas, a seleção de materiais se baseia em grandes diferenças na resistência à corrosão. Além disso, tais discrepâncias são atenuadas ao introduzir-se um fator de erro de 100%, para mais e para menos, sendo tal erro pequeno em comparação com a diferença de valores de  $i_{\text{corr}}$  que ocorrem nos processos reais (GOLZÁLEZ, 1989; BAUER, 1995).

A vantagem essencial do método de Resistência de Polarização reside em que só se requer a aplicação de polarizações tão pequenas que, na grande maioria dos casos, não se altera praticamente o eletrodo de trabalho durante o processo de medida e um mesmo corpo-de-prova permite inúmeras determinações de  $i_{\text{corr}}$  com o tempo (GONZÁLEZ, 1989; CASCUDO, 1997).

GONZÁLEZ (1989) considera o método de resistência de polarização um procedimento extraordinariamente sensível, rápido, quantitativo, não destrutivo e de confiabilidade comparável aos métodos gravimétricos clássicos de medida direta da corrosão nas armaduras de aço galvanizado ou não, em argamassas com ou sem cloretos, carbonatados ou não carbonatados, em condições de imersão parcial ou submetidos a atmosferas de diferentes umidades relativas.

Em uma ponderação imparcial, as vantagens do método superam largamente seus inconvenientes. O melhor aval desta técnica constitui em inúmeros trabalhos realizados por pesquisadores brasileiros (NEPOMUCENO, 1992; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995; MONTEIRO, 1996; LIMA, 1996; CASTANHEIRA, 1997; VASCONCELOS, 1997; TEIXEIRA, 1998; entre outros) e estrangeiros (CHIN, 1987; ANDRADE & ALONSO, 1990; LÓPEZ et alli, 1991; LÓPEZ & GONZÁLEZ, 1993; ENEVOLDSEN et alli, 1994; ALONSO et alli, 1997; ANDRADE et alli, 1998, GONZÁLEZ et alli, 1998, entre outros) que a utilizaram e seguem utilizando desde sua implantação, incluindo numerosas modificações propostas para reduzir os efeitos das limitações.

### 3.2.2 Outros métodos eletroquímicos

Existem outros métodos eletroquímicos de avaliação do processo de corrosão. Dentre todos, os principais são Resistência Elétrica, Potenciais de Corrosão, Ruído Eletroquímico,

Curvas de Polarização e Impedância Eletroquímica. Os dois primeiros são métodos qualitativos, ou seja, podem dar uma idéia do grau de corrosão. Os demais são métodos que abordam quantitativamente o processo de corrosão, visando a cinética da corrosão. Diversos autores (HELENE, 1993; DEVALAPURA et alli, 1994; FIGUEIREDO, 1994; CASCUDO, 1997; TEIXEIRA, 1998; entre outros) versam a respeito de tais métodos, tendo-se, a seguir, somente as informações gerais e alguns comentários sobre cada.

### 3.2.2.1 Resistência Elétrica

A aplicação da técnica de resistência elétrica no estudo e avaliação da corrosão de armaduras de concreto iniciou nos anos 70 mas não alcançou destaque devido ao número limitado de informações que ela fornece a respeito do processo de corrosão, associado aos inconvenientes proporcionado pela utilização de sondas metálicas embutidas no concreto, as quais inferem no comportamento da armadura quanto à corrosão, sendo que estas sondas devem ser previamente previstas no projeto estrutural (CASCUDO, 1997).

O princípio do método consiste que a resistência elétrica do material, no caso são chapas ou fios metálicos (sondas metálicas), é inversamente proporcional à sua área de seção transversal. Então, quando a corrosão ocorre, a chapa ou fio torna-se mais fino, diminuindo assim a área de sua seção transversal, aumentando a resistência elétrica, conforme Equação 3.8 (DEVALAPURA et alli, 1994). Estas sondas são produzidas com o mesmo material das armaduras, sendo colocadas o mais próximo possível destas, em posições de maior vulnerabilidade à corrosão.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (3.8)$$

Onde:

$R \Rightarrow$  resistência elétrica da peça metálica (ohm);

$L \Rightarrow$  comprimento da peça metálica (m);

$\rho \Rightarrow$  resistividade elétrica da peça metálica (ohm.m);

$A \Rightarrow$  área da seção transversal da peça metálica (m<sup>2</sup>).

Através do aumento da resistência elétrica com o tempo, pode-se estimar indiretamente o que está realmente ocorrendo com a armadura, embora a técnica tenha as suas ressalvas para a corrosão do tipo localizada, restringindo sua aplicação à corrosão generalizada.

### 3.2.2.2 Potenciais de Corrosão

Devido à sua simplicidade e rapidez, este método tem sido muito utilizado para avaliar qualitativamente o processo de corrosão em estruturas de concreto armado, através de mapas de potencial da estrutura em estudo, os quais revelam as áreas mais prováveis onde o processo de corrosão está ativo, no entanto, sem indicar a velocidade do mesmo (RODRÍGUEZ et ali, 1994).

O princípio do método consiste em medir a diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho, que no caso são as armaduras, e um eletrodo de referência, sendo que os mais usados são o de calomelano saturado (ECS), o de cobre-sulfato de cobre (ESC) e o de prata-cloreto de prata (ECP), através de um voltímetro de alta impedância (DEVALAPURA et ali, 1994).

O critério de avaliação dos resultados das medidas de potencial em armaduras de concreto armado, segundo a *ASTM C 876* (1991), utilizando-se o eletrodo de cobre-sulfato de cobre (ESC), é dado na Tabela 3.2. A maior desvantagem do método seria a falta de informação a respeito da velocidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e a exigência da continuidade do contato elétrico sobre toda a área a ser investigada.

Tabela 3.2 Probabilidade de corrosão através do  $E_{\text{corr}}$ , segundo a *ASTM C 876* (1991).

Potencial de Corrosão (ESC)	Probabilidade de corrosão
$E_{\text{corr}} > -200 \text{ mV}$	< 10%
$-200 \text{ mV} < E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV}$	Incerta
$E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV}$	> 90%

### 3.2.2.3 Curvas de Polarização

Curvas de polarização são representações gráficas das relações entre corrente e potencial de um sistema de corrosão. Este foi um dos primeiros métodos eletroquímicos a ser efetivamente usado no estudo da corrosão de armaduras, em laboratório, utilizando barras de aço imersas em corpos-de-prova de concreto (CASCUDO, 1997).

O princípio do método consiste em aplicar uma sobre-tensão, seja no sentido anódico, com valores de potencial mais positivos que o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ), ou no sentido catódico, com valores de potenciais mais negativos que  $E_{\text{corr}}$ , registrando as alterações da corrente. Pode-se também aplicar uma sobre-corrente, registrando as alterações no potencial.

Os equipamentos básicos necessários para a obtenção dos dados são um potenciostato, quando se quer variar o potencial, ou galvanostato, quando se quer variar a corrente, um eletrodo de referência, responsável pela medição do potencial de corrosão, um eletrodo auxiliar (contra-eletrodo), o qual serve para completar a célula eletroquímica e um eletrodo de trabalho (armadura), além de um aquisitor de dados. É conveniente que o potenciostato ou galvanostato disponha de um dispositivo de compensação de queda ôhmica (ver item 2.2.2.1)

ou que esta seja feita matematicamente, pois tal inconveniente gera curvas de polarização distorcidas.

Através das curvas de polarização pode-se inferir a respeito da morfologia do ataque (corrosão generalizada ou localizada), bem como tem-se informações a respeito da cinética da corrosão, através da taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ). Como desvantagem tem-se o caráter destrutivo do método, devido às altas polarizações, restringindo a sua aplicação a estudos laboratoriais, não permitindo a reutilização dos corpos-de-prova em outros ensaios.

#### 3.2.2.4 Impedância Eletroquímica

Este método tem provado ser uma poderosa ferramenta na investigação do processo de corrosão, pois fornece informações a respeito do estado da armadura (se passiva ou ativa), além de dados sobre a velocidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e sobre a morfologia do ataque, bem como sobre o mecanismo de controle eletroquímico (cinético ou difusional).

O método consiste em aplicar ao eletrodo de trabalho, que no caso é a armadura em estudo, um sinal senoidal de pequena amplitude, que pode ser de potencial ( $\Delta E$ ) ou de corrente ( $\Delta I$ ), em um amplo intervalo de frequências, tipicamente de 100kHz a 1mHz. Como resposta do sistema, tem-se outro sinal senoidal, que pode ser uma corrente ( $\Delta I$ ) ou um potencial ( $\Delta E$ ), o qual se distingue do aplicado, através dos valores de amplitude e ângulo de fase, para cada frequência. A relação entre ambos os sinais é chamada de impedância ( $Z$ ). Os equipamentos demandados para realização dos ensaios são idênticos aos dos métodos de Curvas de Polarização e Resistência de Polarização, com adição de um analisador de resposta de frequência (DEVALAPURA et alli, 1994).

A forma mais utilizada para expressar os resultados é através do diagrama de Nyquist que consiste de uma série de pontos, onde cada um representa a grandeza e a direção do vetor impedância, em cada frequência. Tem-se também o diagrama de Bode, que representa o ângulo de fase ou o módulo de impedância, em relação ao logaritmo da frequência, sendo que este é menos comum de ser encontrado em trabalhos técnicos envolvendo concreto (CASCUDO, 1997).

Algumas restrições são atribuídas ao método, tais como a dificuldade na interpretação dos resultados, a exigência de instrumentos mais caros e tempos de medida mais longos, particularmente em pequenas taxas de corrosão, as quais exigem frequências muito baixas, e a sua inaplicabilidade *in situ* devido à distribuição não uniforme da corrente ao longo das barras, principalmente quando o sinal enviado for de alta frequência (RODRÍGUEZ et alli, 1994).

### 3.2.2.5 Ruído Eletroquímico

Este método analisa variações na corrente e/ou no potencial que ocorrem naturalmente, denominados de ruídos, em torno de um estado estacionário, durante o processo de corrosão. Tais mudanças variam tipicamente de alguns microvolts ou milivolts e poucos nanoamperes ou microamperes, para o potencial e para a corrente, respectivamente.

O princípio do método consiste em registrar estas pequenas flutuações do potencial e da corrente, obtendo-se o desvio padrão do ruído do potencial ( $\sigma_E$ ) e o desvio padrão do ruído da corrente ( $\sigma_i$ ), calculando-se a resistência ao ruído ( $R_n$ ), através da Equação 3.9, a qual está relacionada à resistência de polarização do sistema, de onde pode-se extrair informações a respeito da cinética do processo, através do cálculo da velocidade de corrosão do sistema.

$$R_n = \frac{\sigma_E}{\sigma_i} \quad (3.9)$$

Os equipamentos demandados para realizar a aquisição dos dados são similares aos utilizados no método de potenciais de corrosão, porém o voltímetro deve ter uma impedância maior que 10 G $\Omega$  e, para mensurar as flutuações de corrente, necessita-se de um amperímetro de resistência nula de alta resolução.

A apresentação dos resultados é feita através do registro dos ruídos no tempo (para potencial ou corrente) ou pelo registro da amplitude do ruído em função da frequência. Através da análise dos resultados pode-se diferenciar os sistemas passivos dos ativos, bem como obter informações a respeito da morfologia do ataque às armaduras, distinguindo entre corrosão generalizada e localizada, podendo distinguir a forma de corrosão localizada, além de se ter uma indicação da velocidade de corrosão dos sistemas ativos em análise.

Entretanto, ainda que o método forneça estimativas quantitativas satisfatórias para o sistema concreto-armadura, este possui algumas consideráveis desvantagens pois as estruturas podem atuar como antenas, capturando ruídos não corrosivos, que podem vir a mascarar os efeitos reais da corrosão. Em adição, a obtenção e a subsequente análise dos dados demandam muito tempo e alguma experiência é exigida para uma correta interpretação dos resultados (RODRÍGUEZ et alli, 1994).

## 3.3 OUTROS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Dentre outros métodos que podem dar uma idéia do comportamento do processo de corrosão, os ensaios de difusão e migração de cloretos, determinação do teor de cloretos na argamassa ou no concreto e determinação da profundidade de carbonatação são os que dão uma resposta mais rápida e segura. Portanto, tais métodos serão discutidos a seguir.

### 3.3.1 Difusão e migração de cloretos

Como visto anteriormente, pode-se avaliar o desempenho do concreto ou argamassa quanto à proteção da armadura. O coeficiente de difusão de cloretos é um parâmetro utilizado para caracterizar o concreto de maneira a prever sua durabilidade, ou seja, sua resistência à penetração de íons.

O método ideal para se determinar este coeficiente seria o caso da pura difusão onde se colocaria uma fatia do corpo-de-prova a ser ensaiado entre duas câmaras contendo soluções com grande diferença de concentração de íons cloreto. Este aparato é comumente chamado de célula de difusão.

Usa-se a primeira lei de Fick para calcular o coeficiente efetivo de difusão ( $D_{\text{eff}}$ ), para o fluxo no estado estacionário, e a segunda lei de Fick para calcular o coeficiente aparente de difusão ( $D_a$ ), para fluxos não estacionários. Este método demanda um tempo demasiadamente longo para se obter algum resultado. Daí a necessidade de se impor uma diferença de potencial elétrico, acelerando a taxa de penetração dos íons cloreto, quando se deseja resultados rápidos (ANDRADE, 1993).

No teste de migração de cloretos, o fluxo de cloretos é acelerado por meio de um campo elétrico aplicado entre as duas câmaras da célula de difusão, com o auxílio de dois eletrodos metálicos. Os únicos métodos normalizados são *ASSHTO T 277-83 Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete* e *ASTM C 1202 Test Method for Electrician Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* que utilizam duas câmaras, onde uma contém uma solução de Cloreto de Sódio 3% e a outra Hidróxido de Sódio 0,1 M. A diferença de potencial aplicada é de 60 Volts e é medido a quantidade de Coulombs durante 6 horas de teste. O teste assume uma direta relação entre a quantidade de Coulombs e o fluxo de cloretos, ou seja, uma grande quantidade de Coulombs representa uma grande "permeabilidade" do concreto aos cloretos (ANDRADE et alli, 1994).

Estes métodos têm sofrido diversas críticas, as quais são abordadas a seguir.

O valor da diferença de potencial adotado pelos ensaios (60 V) da *ASSHTO* e *ASTM* é considerado extremamente alto, provocando um aquecimento das soluções e do corpo-de-prova (efeito Joule), o qual influencia a mobilidade dos íons, interferindo na velocidade do fluxo de íons, prejudicando assim a obtenção de resultados concisos (PAGE et alli, 1981, ANDRADE, 1993).

GUTIÉRREZ & GUTIÉRREZ (1996) em uma pesquisa sobre migração de cloretos, aplicando diferença de potencial de 5, 12, 25, 37,5 e 60 Volts em discos de argamassa de 10mm, notaram que para voltagens superiores a 25 V ocorria borbulhamento de gases e um

aumento de temperatura na solução anódica (solução isenta de  $\text{Cl}^-$ ) da célula de difusão, chegando a 38 °C para a diferença de potencial de 25 V, 46 °C para 37,5 V e 78 °C para 60 V.

Outro ponto polêmico é quando o disco de concreto é introduzido na célula. Antes que qualquer campo elétrico seja induzido, produz-se difusão principalmente pelos íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) devido sua alta mobilidade iônica. Esta difusão, devido à diferença de concentração dos distintos íons, pode ser mantida durante todo o experimento. E ainda quando o campo elétrico é aplicado, a migração de todos os íons ocorre para o eletrodo de sinal oposto, tendo-se assim difusão e migração ocorrendo simultaneamente. Não somente os íons cloreto se movem, mas todos os íons, e o total da corrente medida inclui todos estes íons. Como a condutividade iônica da hidroxila ( $198,5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{eq}^{-1}$ ) é maior que a do íon cloreto ( $76,34 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{eq}^{-1}$ ), isto significa que a maior proporção da corrente se deve aos íons  $\text{OH}^-$  e não aos  $\text{Cl}^-$ . Portanto se se calculasse a provável taxa de transferência de cloretos teria-se um valor de corrente mais confiável, o que não é realizado nos ensaios rápidos pois estes consideram o valor total da corrente medida. Em adição, quando passam através do concreto, os cloretos podem reagir com o  $\text{C}_3\text{A}$  e assim um fluxo estacionário não poderia ser alcançado até que toda a reação se completasse (ANDRADE, 1993).

ANDRADE (1993) sugeriu um método para obter, não a “permeabilidade”, mas o coeficiente de difusão a partir de medidas elétricas similares às propostas pela *ASSHTO* e *ASTM*. Portanto, algumas mudanças foram promovidas e pressupostos foram tomados como verdadeiros nos ensaios normalizados a fim de se obter resultados mais satisfatórios. Tais mudanças são discutidas a seguir.

Relembrando, o coeficiente de difusão é o parâmetro que se deseja mensurar e seu cálculo, a partir de medidas elétricas, está baseado nos processos fundamentais de transporte em eletrólitos. Então aceitou-se que não ocorre convecção dentro do concreto dos corpos-de-prova e que o processo de difusão é desprezível comparável à migração quando campos de tensão maiores que 10 Volts são empregados, podendo-se assim usar as equações de transporte de massa de Nernst-Planck e Nernst-Einstein para calcular os movimentos iônicos. Portanto deve-se aplicar uma diferença de potencial alta o suficiente para promover uma rápida migração de íons e pequena o suficiente para evitar o superaquecimento das soluções. É recomendável então usar uma tensão de 10 a 15 Volts.

Outra recomendação é que os discos de concreto sejam finos o suficiente para permitir um estado de fluxo constante em pouco tempo, o que em parte significa que todo o  $\text{C}_3\text{A}$  do corpo-de-prova será saturado em poucas horas e posteriormente um fluxo linear de cloretos ao longo do tempo será estabelecido.

Há pesquisadores que utilizam discos das mais variadas espessuras, das quais pode-se citar: SUGIYAMA et alli (1996) com discos de 50mm de espessura, BUENFELD et alli (1998), BAUER (1995) e ANDRADE et alli (1994) com discos de 10mm e PAGE et alli

(1981) com 3mm de espessura.

Por fim, a concentração de cloretos em uma câmara deverá ser muito maior do que na outra, sendo ideal que a concentração de cloretos no cátodo seja alta enquanto que no ânodo, zero.

Feitas estas considerações, pode-se afirmar que o coeficiente de difusão efetivo ( $D_{\text{eff}}$ ) é dado pela expressão simplificada de Nernst-Plank (Equação 3.10).

$$D = \frac{J.R.T.\ell}{z.F.C.\Delta E} \quad (3.10)$$

Onde:

$D \Rightarrow$ coeficiente efetivo de difusão ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );	$z \Rightarrow$ carga elétrica (para cloretos igual a 1);
$T \Rightarrow$ temperatura (Kelvin);	$F \Rightarrow$ constante de Faraday (23063 cal/volt/eq);
$R \Rightarrow$ constante dos gases (1,9872 cal/mol/Kelvin);	$C \Rightarrow$ atividade inicial dos íons cloreto ( $\text{mol}/\text{cm}^2$ ) e;
$\ell \Rightarrow$ espessura do corpo-de-prova (cm);	$\Delta E \Rightarrow$ diferença de potencial (volt)
$J \Rightarrow$ fluxo de íons ( $\text{mol}/\text{s}/\text{cm}^2$ );	

Para se determinar o valor de  $J$ , plota-se o gráfico da concentração de íons cloreto no ânodo *versus* o tempo de ensaio. Quando o estado estacionário for atingido, a concentração dos cloretos através do tempo seguirá uma tendência linear, onde a inclinação da reta dada pelo gráfico (tangente) é o fluxo de íons ( $J$ ).

Uma outra maneira de calcular  $D_{\text{eff}}$  é utilizando-se o valor da intensidade de corrente medida durante o experimento pois esta estabelece que o fluxo de migração dos íons também é proporcional à intensidade total.

### 3.3.2 Determinação do teor de cloretos

Este método consiste em perfurar pequenos orifícios no concreto, preferivelmente até o nível das armaduras, coletando amostras do concreto ou argamassa em forma de pó, ou retirando pequenos pedaços do material a ser analisado, os quais devem ser moídos, para posteriormente serem analisados em laboratório, a fim de determinar o teor de cloretos, sejam

estes cloretos totais (solúveis em ácido) ou livres (solúveis em água). O teor limite de cloretos no concreto para desencadear o processo de corrosão não é um valor único, sendo dependente de vários fatores (ver item 2.3.4.1).

O número de determinações, bem como a escolha do local de extração das amostras fica a critério do engenheiro responsável. Inspeções visuais com a detecção dos locais de maior risco é recomendado antes da coleta das amostras.

Existem vários métodos para se determinar o teor de cloretos em concretos ou argamassas, dos quais pode-se citar o método de Volhard, *Quantab test*, RCT (*Rapid Chloride Test*), método de Mohr e análise através do eletrodo de íon seletivo sensível aos íons cloreto (GRAN, 1992). Existem também os métodos de ensaio sugeridos pelas normas *ASTM C 1411-92 Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixes in Graded Aggregate Road Mixes* e *ASTM C 1152-92 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete* (ANDRADE, 1992; HELENE, 1993).

Em um estudo utilizando três técnicas de análise (*Quantab Test*, titulação por Volhard e eletrodo de íon seletivo) do teor de cloretos totais em concretos com três diferentes teores de cloretos (0,025%, 0,1% e 0,5% sobre a massa do concreto) adicionados no amassamento, com ensaios realizados em cinco laboratórios diferentes, GRAN (1992) concluiu que a concentração de cloretos e o método de determinação destes influem na precisão e na variabilidade da análise, pois para o teor de 0,5%, todos os métodos apresentaram resultados satisfatórios, para 0,1%, somente Volhard e o eletrodo de íon seletivo apresentaram-se satisfatórios e para o teor de 0,025%, somente o método que utiliza o eletrodo de íon seletivo apresentou resultados aceitáveis.

Em um estudo similar, utilizando as mesmas técnicas usadas por GRAN (1992), só que em soluções aquosas contaminadas por nove distintos teores de cloretos, DHIR et alli (1990) concluíram que o método que utiliza o eletrodo de íon seletivo se mostra o mais conveniente, com desempenho superior aos demais. Portanto, parece que dentre todos, o método do eletrodo de íon seletivo é o que apresenta resultados mais seguros.

### **3.3.3 Determinação da espessura de carbonatação**

As técnicas de laboratório que podem ser usadas para determinar a profundidade de carbonatação incluem análise química, difração de raios X, espectroscopia por infravermelho e análise termogravimétrica (NEVILLE, 1997). Entretanto, o método mais difundido consiste em uma análise qualitativa através da aspensão de indicadores químicos na superfície do concreto. Os reagentes que podem ser empregados são a timolftaleína ou a fenolftaleína, no teor de 1%, em diluições em solução 1:1 de água e álcool etílico.

O procedimento utilizado no ensaio consiste em fraturar o revestimento de concreto, na

direção ortogonal à superfície do componente estrutural em estudo, de preferência até as armaduras, para se determinar também a espessura de cobrimento. Imediatamente após a fratura deve-se pulverizar a solução indicadora sobre a superfície do concreto, aguardando de um a dois minutos para que o indicador altere a sua cor (ANDRADE, 1992). Se não é possível fraturar o próprio concreto em estudo, pode-se obter amostras de pó perfurando o concreto até diversas profundidades, submetendo-as ao ensaio com o indicador químico. É necessário cuidado pois, se a cal livre de uma parte não carbonatada contaminar uma amostra, esta se tornará colorida, dando a impressão de ausência de carbonatação (NEVILLE, 1997).

Para um pH de 8,3 a 10, a fenolftaleína apresenta uma coloração vermelho-carmim, sendo incolor abaixo desta faixa. Já a timolftaleína apresenta um pH de modificação de 8,3 a 10,5, onde acima desta faixa tem coloração azul escuro, não apresentando cor para valores abaixo da faixa (HELENE, 1993). Então, a parte que permanecer incolor indica a acidificação do meio, mostrando o avanço da frente de carbonatação, e a parte que apresentar coloração, indica que a alcalinidade do meio está preservada.

A parte incolor, ou seja, a espessura de carbonatação, deve ser medida, recomendando-se medir em certas regiões críticas tais como cantos, ao redor dos agregados graúdos e outros pontos onde se esperam profundidades maiores de carbonatação. O número ideal de determinações a serem realizadas depende da agressividade ambiental, das condições de exposição do elemento e da área exposta do mesmo. Considerando tais critérios, o profissional decide a quantidade adequada de leituras necessárias para cada condição em particular. A principal informação que se pretende com esta medida é saber se a frente de carbonatação atingiu a armadura ou não, se ela provocou ou contribuiu à deterioração da estrutura (ANDRADE, 1992).

## 4 SISTEMAS DE REPARO

### 4.1 GENERALIDADES

A estratégia de intervenção em uma edificação deve abranger uma reavaliação da capacidade estrutural da mesma, ou pelo menos, uma estimativa da segurança estrutural e da funcionalidade antes, durante e depois do reparo. Os principais passos a serem tomados antes da intervenção na edificação consistem em fazer um levantamento das condições da estrutura, incluindo uma avaliação das prováveis causas dos danos ou da perda de proteção, o grau e a quantidade dos danos, a expectativa de progressão dos danos no tempo e os efeitos dos danos no desempenho estrutural e na funcionalidade da estrutura. Com base neste levantamento, são tomadas as medidas de intervenção para reparar ou reforçar estruturas de concreto danificadas pela corrosão de armaduras (RILEM, 1994).

O objetivo básico do reparo deve ser parar, ou pelo menos reduzir, o processo de corrosão através da anulação/redução do processo anódico ou do processo catódico ou do processo de condução eletrolítica, os quais são os responsáveis pela formação da célula de corrosão. De forma a alcançar um desses efeitos, reparos de diferentes princípios podem ser utilizados (RILEM, 1994).

Segundo o RILEM (1994), as estratégias de intervenção podem ser resumidas em quatro grandes grupos: *substituição ou reconstrução parcial de componentes danificados*, utilizada quando o dano é restringido a elementos mais expostos, que podem ser substituídos facilmente; *intervenções inibidoras do processo de corrosão*, onde o fortalecimento das zonas afetadas na armadura e a substituição do concreto danificado são partes integrantes da estratégia; *não intervir no processo de corrosão* como um todo, adotando medidas paliativas como eventuais reparos em intervalos regulares, monitorando a estrutura continuamente, até que seu uso se torne inconveniente; e *provisão de sistema estrutural alternativo*, desprezando o existente.

Modelo semelhante segue a norma européia *EN 1504 – Produtos e Sistemas para a Proteção e Reparo de Estruturas de Concreto: Definições, Exigências, Controle de Qualidade e Avaliação da Conformidade*, a qual utiliza o procedimento descrito na Figura 4.1. A avaliação das obras deterioradas, segundo as exigências desta norma, é bem mais criteriosa do que a avaliação comumente utilizada, pois para tal, além de incluir a investigação usual da condição presente da obra, também exige considerações sobre a semelhança com o projeto original, as condições de exposição, condições da obra durante a construção, a história da estrutura, as condições de uso e exigência para usos futuros. Tal avaliação conduz a uma estimativa da extensão e da taxa de aumento dos defeitos e de quando a vida útil da estrutura chegará ao fim, caso o reparo não seja executado (KEY & WYATT, 1997).

Seguindo a avaliação, existem algumas opções especificadas pela norma, dentre as quais pode-se citar: não fazer nada, deixando a obra degradar; tomar medidas para prevenir ou reduzir futuras deteriorações; reforçar ou reparar; demolir toda ou parte da estrutura e reconstruir toda ou parte da estrutura. Uma vez que a causa dos defeitos esteja determinada e a opção de ação selecionada, um satisfatório princípio de proteção e reparo deve ser escolhido, como por exemplo, restaurar o concreto à sua forma e função original. Para cada princípio, existe um número satisfatório de métodos de proteção ou reparo, como por exemplo, para o princípio anteriormente citado, tem-se o método de aplicação de argamassa de reparo. Especificações dos materiais para cada método não são dados em detalhes pela norma, mas valores aceitáveis de certas propriedades são eventualmente especificados. Os princípios e, conseqüentemente, os métodos, seguem a classificação de ANDRADE & GONZÁLEZ (1988), ou seja, os que atuam sobre o aço e os que atuam sobre o concreto (KEY & WYATT, 1997).

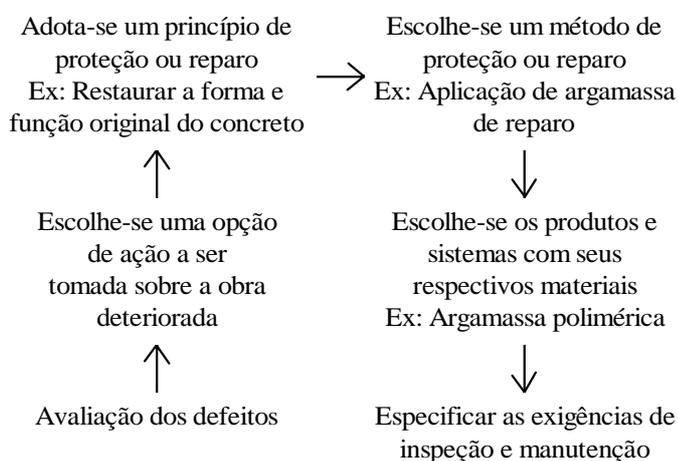


Figura 4.1 Procedimento lógico para correção de obras deterioradas segundo a *EN 1504* (KEY & WYATT, 1997).

Algumas propriedades dos materiais utilizados nos reparos devem ser consideradas para selecioná-los, com o intuito de verificar se o material é ou não adequado ao meio onde vai ser empregado, considerando-se tanto as condições ambientais quanto a compatibilidade com o substrato. MAILVAGANAM (1992) aponta a estabilidade dimensional, o coeficiente de dilatação térmica, o módulo de elasticidade, a permeabilidade, a compatibilidade química com o substrato, as propriedades elétricas e as condições de serviço do material na aplicação como propriedades que devem ser observadas na escolha do material de reparo, para que se obtenha reparos duráveis.

Para assegurar a correta escolha do sistema de reparo, é essencial estar atento às diferentes opções de reparo e às exigências básicas de cada, as quais devem ser rigorosamente cumpridas. Diferentes estratégias de reparo podem ser combinadas, fornecendo uma proteção em multi-estágios, onde o uso desta for apropriada. A determinação da causa do processo corrosivo (carbonatação, cloretos ou ambos, dentre outros) é um outro ponto relevante, pois os

materiais dos sistema de reparo são escolhidos também em função da causa do problema (RILEM, 1994).

#### 4.2 CLASSIFICAÇÃO

Não existe um consenso a respeito da classificação dos mecanismos utilizados na reabilitação de estruturas de concreto onde a armadura encontra-se em processo de corrosão. A grande maioria das classificações dos sistemas de reparo se confunde com a classificação dos materiais ou produtos utilizados nesses sistemas. As classificações sugeridas por alguns autores encontram-se descritas a seguir.

ARANHA (1994) classifica os processos utilizados na reabilitação das estruturas danificadas, segundo a forma de utilização dos materiais nas mesmas, subdividindo-os em três grandes grupos: os sistemas de reparo, os reforços estruturais e os reforços empregados nas fundações.

ANDRADE & GONZÁLEZ (1988) classificam os métodos de proteção das armaduras em métodos que atuam sobre a própria armadura (proteção catódica, recobrimentos metálicos galvanizados e pinturas epóxicas) e métodos que atuam sobre o concreto que reveste a armadura (aditivos inibidores de corrosão e pinturas epóxicas).

HELENE (1993) classifica os sistemas de reparo conforme o mecanismo de proteção, dividindo-os em cinco tipos: sistema de reparo por passivação (argamassas ou concretos de base cimento Portland), sistema de reparo por barreira sobre a armadura (argamassas de base epóxi ou poliéster, os primers e tintas de base epóxi), sistema de reparo por barreira sobre o concreto (vernizes de base epóxi, acrílica ou poliuretana e tintas de mesma natureza), sistema de reparo por inibição (inibidores químicos e orgânicos à base de nitritos e benzoatos) e sistema de reparo por proteção catódica (primers de base zinco, o próprio metal zinco ou alumínio).

Já o GEHO, citado por FIGUEIREDO (1994), e ANDRADE (1992) classificam os sistemas de reparo de acordo com a natureza química dos materiais, ou seja, materiais onde o aglomerante é de natureza *inorgânica* (cimento Portland com ou sem adições minerais), cuja a função é restaurar o meio alcalino que permita a passivação da armadura; materiais onde o aglomerante é de natureza *orgânica* (polímeros e pigmentos especiais), cuja função é atuar como barreira contra a penetração de O<sub>2</sub>, umidade, CO<sub>2</sub> ou íons cloreto; e materiais *mistos*, cuja a função é atuar tanto por barreira como por passivação.

Segundo KULAKOWSKI (1994), os sistemas de reparo seguem a classificação dos materiais por eles utilizados, podendo ser enquadrados nos quatro grupos a seguir.

- *Materiais para reconstituição da seção*, podendo ser um reparo em uma área

bastante limitada (reparo localizado) ou utilizado em grandes extensões. Pode-se utilizar concretos, concreto projetado, grautes e argamassas de reparo. Estes materiais podem ser modificados através da adição de outros componentes tais como as adições minerais, polímeros, dentre outros, que corroborem na melhoria de alguma propriedade.

- *Materiais para revestimento do concreto*, os quais protegem superficialmente o concreto no sentido de reduzir ou impedir (ação de barreira) a penetração dos agentes que contribuem no processo de corrosão das armaduras. Dentre esses materiais pode-se citar selantes, sistemas de pinturas, vernizes, revestimentos de elevada espessura ou pastas de cimento modificadas ou não.

- *Materiais para revestimento da armadura*, sendo os que atuam em contato direto com a armadura. Estes materiais podem receber algum pigmento especial, podendo apresentar assim diversos mecanismos de proteção, tais como proteção por passivação, proteção catódica e proteção por inibição.

- *Sistemas especiais de reparo de corrosão de armaduras*, sendo estes sistemas considerados como não tradicionais, onde pode-se citar a proteção catódica e os métodos eletroquímicos de extração de cloretos e de realcalinização do concreto.

Então, de uma maneira geral, pode-se dizer que os sistemas de reparo classificam-se segundo o local de intervenção no processo de corrosão da armadura (intervenção diretamente sobre a armadura ou sobre o concreto que a reveste) e, também, classificam-se segundo o tipo de material utilizado nos reparos. A revisão bibliográfica apresentada a seguir sobre os sistemas de reparo mais utilizados segue, portanto, estas duas classificações.

É conveniente esclarecer que em virtude da tipologia das manifestações patológicas, sejam estas patologias do concreto ou da armadura, esta classificação é empregada nos sistemas que visam somente a proteção da armadura contra a corrosão, embora existam sistemas que concomitantemente protegem também o concreto.

Assim, para proteção da armadura, intervindo sobre a mesma, tem-se a proteção catódica e a proteção por barreira. Para a proteção da armadura, intervindo sobre o concreto, tem-se os sistemas de reparo que utilizam polímeros, os sistemas de reparo por inibição e, os sistemas de reparo por passivação, que de acordo com o material utilizado para reconstituir a seção de concreto danificada pode-se sub-classificar em argamassa de base cimentícia modificada ou não, através de adições minerais (sílica ativa, metacaulim, escórias de alto-forno, dentre outros) e, tem-se ainda, o sistema de reparo por barreira, onde o revestimento é aplicado diretamente sobre o concreto (vernizes e pinturas). Finalmente, tem-se os sistemas de reparo que utilizam métodos eletroquímicos, tais como a realcalinização e a dessalinização (extração de cloretos). A Figura 4.2 mostra, esquematicamente, a classificação dos sistemas de reparo existentes que atuam para a proteção da armadura do concreto.

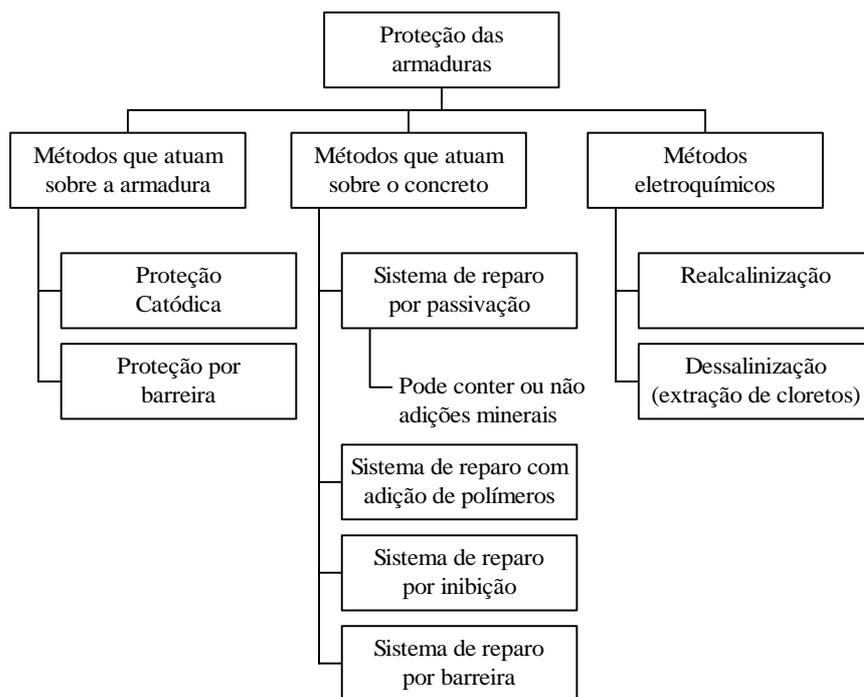


Figura 4.2 Tipos de sistemas de reparo que atuam na proteção das armaduras.

### 4.3 SISTEMAS DE REPARO QUE ATUAM SOBRE A ARMADURA

#### 4.3.1 Proteção catódica

Existem dois tipos de proteção catódica: proteção catódica galvânica e proteção catódica por corrente impressa. Esta técnica parece ser a única capaz de interromper por completo o processo corrosivo após este ter iniciado, em ambiente úmidos, carbonatados ou altamente contaminado por cloretos (GONZÁLEZ et alli, 1996b; PAUL, 1998; PÉREZ et alli, 1999). Em geral, a proteção catódica é mais usada quando os sistemas de reparo por passivação não são efetivos, estando isto associado a altos níveis de cloretos nos concretos (RILEM, 1994).

A *proteção catódica galvânica* tem sido usada desde os anos trinta na proteção das armaduras do concreto (GONZÁLEZ et alli, 1996b). Esta técnica consiste em introduzir um ânodo de sacrifício composto por um material menos nobre, isto é, com o potencial mais negativo que o ferro, tal como o zinco, por exemplo, modificando a célula de corrosão, ou seja, transformando o aço que antes corroía (ânodo), em cátodo. O processo funciona enquanto existir zinco para ser consumido. Após o término desse último, o aço volta a ser corroído.

Segundo ROSENBERG et alli (1989), o pH da solução dos poros e a espessura da camada de zinco aplicada nas barras são os fatores decisivos para determinar a eficiência ou não da proteção. Além desses fatores, a composição do aço e o processo de galvanização são outros pontos importantes. Na presença de cloretos, a camada de proteção de zinco

recomendada deve estar entre 8 e 10  $\mu\text{m}$ .

Segundo GONZÁLEZ et alli (1996b), a pintura de zinco nas barras tem apresentado bons resultados quando a corrosão é consequência do processo de carbonatação, ou ainda, em concretos contendo concentrações moderadas de cloretos. Ainda segundo tais autores, em estruturas com substanciais quantidades de cloretos, a proteção complementar dada pelo zinco parece somente atrasar os efeitos da corrosão.

Mas, segundo FELIU et alli (1989), FRAGATA et alli (1986), ONTIVEROS & McDOWELL (1992) citados por FIGUEIREDO (1994), além da proteção galvânica, o zinco promove ainda, posteriormente, uma proteção por barreira, pois à medida que as partículas de zinco corroem, os produtos de corrosão vão preenchendo os poros do revestimento, promovendo, assim, a formação de uma densa película em torno da armadura.

A *proteção catódica por corrente impressa* consiste na aplicação de uma corrente elétrica permanente entre a armadura a ser protegida (cátodo) e um ânodo interno ou externo, promovendo uma troca no potencial do aço, reduzindo ou extinguindo a atividade de corrosão (PARKER, 1997).

Os cobrimentos de concreto dificultam bastante a distribuição uniforme da corrente protetora (GONZÁLEZ et alli, 1996b). Um meio de aplicar a corrente elétrica uniformemente na armadura a ser protegida consiste no revestimento da superfície do concreto com um metal eletricamente condutivo, tal como uma pintura de zinco ou ligas de alumínio-zinco ou ainda pinturas condutivas orgânicas, completando o circuito com uma conexão elétrica entre o revestimento e as armaduras (STONEMAN, 1994). Outro tipo de ânodo utilizado são as malhas ajustadas para encaixar à forma da superfície das estruturas e arames ou cintas colocadas em furos ou fendas, os quais são posteriormente revestidos por camadas cimentícias de baixa resistividade. Pinturas epóxicas na barras devem ser evitadas pois impedem o fluxo da corrente (RILEM, 1994).

Uma vantagem dos sistemas de proteção catódica por ânodos galvânicos ou de sacrifício é que estes não exigem uma fonte para imprimir corrente, o que aliado ao seu reduzido custo de manutenção, o converte em um sistema muito atrativo para a proteção das estruturas de concreto (PÉREZ et alli, 1999).

#### **4.3.2 Proteção por barreira**

O princípio deste sistema de reparo consiste no impedimento da dissolução metálica da armadura através do isolamento da superfície da mesma com o eletrólito, geralmente utilizando-se pinturas de baixíssima permeabilidade. Essas pinturas devem atuar como uma barreira física entre a armadura e a argamassa ou concreto de reparo, já que esses últimos podem não garantir uma durável repassivação (ver item 2.3.2.1) (RILEM, 1994).

Ao se aplicar o revestimento, especial atenção deve ser dada às armaduras de canto, às juntapostas sobre outras barras e à superfície atrás das barras pois toda a extensão da armadura deve ser revestida para que o sistema de reparo seja eficiente.

Segundo o RILEM (1994), as pinturas orgânicas, dentre elas as de base epóxi, são as preferencialmente utilizadas. No Reino Unido, as pinturas epóxicas ganharam popularidade devido sua excelente aderência ao concreto e ao aço e sua baixa permeabilidade aos íons cloretos. Por outro lado, estas são bastante caras, sendo que sua durabilidade ainda é questionável devido à falta de ensaios de longa duração (GONZÁLEZ et alli, 1996b). Entretanto, NEPOMUCENO (1992) e CASTANHEIRA (1997) apontam que as pinturas epóxicas não são convenientes quando a causa do processo corrosivo são os íons cloreto pois estas perdem sua eficiência em ambientes úmidos, umidade esta, geralmente incrementada pela alta higroscopicidade dos íons cloreto.

#### 4.4 SISTEMAS DE REPARO QUE ATUAM SOBRE O CONCRETO

##### 4.4.1 Sistemas de reparo por repassivação

Considera-se como sistema de reparo por repassivação, aquele que tem como princípio básico a aplicação de argamassa ou concreto de reparo a base de cimento. Existe ainda o método eletroquímico de repassivação, o qual é abordado no item 4.5.1 (RILEM, 1994).

Estes sistemas de reparo são mais utilizados quando o agente iniciante da corrosão é a carbonatação pois, como já mencionado, o desempenho de tais sistemas é insatisfatório quando o nível de contaminação do concreto por cloretos é alto.

Entretanto, o RILEM (1994) sugere como um dos métodos de reparo, a total substituição do revestimento de concreto que envolve as armaduras nos locais onde os teores de cloreto são altos, por argamassas ou concretos de reparo, independentemente se a frente de cloretos atingiu a armadura. Neste caso, espera-se que ocorra uma redistribuição dos cloretos e que os teores dos mesmos nas proximidades das armaduras sejam inferiores aos pressupostos para que o processo de corrosão se desencadeie. Se os cloretos forem originários do meio-ambiente, convém que se faça uma pintura na superfície do concreto são e do reparo, evitando futuras penetrações, embora se saiba que independentemente da fonte dos cloretos, este método servirá, na maioria dos casos, como uma solução meramente paliativa.

A sistemática do tratamento de uma estrutura deteriorada, com este sistema de reparo, consiste na remoção total ou parcial do concreto contaminado que envolve as armaduras, seguida da remoção dos produtos de corrosão aderidos às armaduras através de jato de areia ou por escovação manual, sendo posteriormente o substrato limpo através de jato de ar ou água.

Caso a perda da seção da armadura seja superior a 15%<sup>1</sup> da seção inicial, há necessidade de se adicionar uma nova barra a fim de que o elemento estrutural tenha condições de suportar os esforços solicitantes. O passo seguinte seria a recomposição da seção em tratamento com argamassa ou concreto de reparo a base de cimento (SOUZA & RIPPER, 1998).

Uma prática também bastante utilizada é a incorporação das adições minerais nas argamassas e concretos de reparo pois estas melhoram as propriedades mecânicas e de durabilidade das mesmas, tendo uma reflexão direta em seu desempenho como material de reparo.

As adições minerais são conhecidas como ativas quando reagem quimicamente com os compostos hidratados do cimento e inertes quando provocam apenas efeitos físicos, tal como o efeito microfíler (FORNASIER, 1995). MEHTA & MONTEIRO (1994) dividem as principais adições ativas em quatro grupos: as cimentantes e pozolânicas (escória granulada de alto-forno, cinza volante com alto teor de cálcio); as pozolanas pouco reativas (escória de alto-forno resfriada lentamente, cinza de casca de arroz queimada em campo); as pozolanas comuns (cinza volante com baixo teor de cálcio e materiais naturais que contém quartzo, feldspato e mica); e as pozolanas altamente reativas (sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz).

Dentre todas as adições minerais, a sílica ativa parece ser a mais utilizada. Vários trabalhos, já abordaram o desempenho da sílica ativa como adição mineral, tanto em aspectos mecânicos quanto com relação à durabilidade. Exemplificando, pode-se citar o trabalho de FERREIRA et alli (1998), o qual apresenta resultados do ensaio acelerado de migração de íons cloreto (*ASTM C 1202 -91*) em concretos com adição de sílica ativa e concretos com adição de cinza de casca de arroz, onde mostram que a utilização das adições estudadas constituem um fator positivo na redução da penetração dos íons; e o trabalho de RODOLPHO & ISA (1999), que em ensaios acelerados de carbonatação, conseguiram reduzir a profundidade carbonatada em 60,9%, 62,3% e 74,9%, após 24 horas de ensaio, em argamassas com teores de 5%, 8% e 10%, respectivamente, de adição de sílica ativa. Após 30 horas de ensaio, as reduções foram de 68,9%, 69,3% e 78,9%, para os respectivos teores de adição.

Existem ainda trabalhos (KULAKOWSKI, 1994; SCHULER, 1998) que abordam o desempenho da sílica ativa em sistemas de reparo, dos quais obtêm-se resultados satisfatórios.

---

<sup>1</sup> Este limite é discutível, entretanto, o boletim 162 do CEB (ANDRADE, 1992; HELENE, 1993) sugere que para uma redução de seção de 10% da seção original, a estrutura deverá sofrer intervenção dentre 1 a 2 anos, e para uma redução de seção de 25%, a estrutura deverá sofrer intervenção imediata. Portanto, o valor de 15% parece ser bastante razoável.

#### 4.4.2 Sistema de reparo com adição de polímeros

O polímero pode ser utilizado nas argamassas e concretos através de três maneiras (STORTE & TEZUKA, 1992; MEHTA & MONTEIRO, 1994; CHODOUNSKY & BINA, 1997). Como único aglomerante, onde a argamassa (argamassa de polímero) é formada polimerizando-se uma mistura de monômero e agregados, realizada a temperatura ambiente com auxílio de catalizadores ou agentes de cura. Pode ser usado como material de impregnação, quando o polímero é inserido na argamassa endurecida de cimento Portland através de saturação em solução polimérica ou sob pressão, sendo que a polimerização do monômero ocorre “in loco” (argamassa impregnada de polímeros). Pode ser usado também como modificador das argamassas de cimento Portland e agregados convencionalmente usados, simplesmente adicionando o polímero à mistura (argamassa modificada com polímeros).

Devido ao alto custo do material e à dificuldade de produção, quando comparada às argamassas convencionais, o uso da argamassa de polímero e da argamassa impregnada com polímero é bastante limitado. Por possuir os mesmos materiais e a mesma tecnologia de produção das argamassas convencionais, o uso da argamassa modificada com polímeros é mais difundido.

O uso de polímeros como modificadores de argamassas têm sido amplamente difundido devido a sua capacidade de aderir fortemente ao concreto antigo e de resistir à entrada de água e de soluções agressivas. Em particular, eles têm recentemente alcançado muita atenção como materiais de reparo em estruturas de concreto danificadas devido a sua capacidade de retardar o processo de iniciação da corrosão (AFRIDI et alli, 1994a).

MAILVAGANAM (1992) classifica os polímeros, baseado no comportamento destes sob a variação de temperatura, em *termoplásticos*, os quais deformam sob altas temperaturas, retomando novamente sua forma sólida ou elástica após o resfriamento; e *termoestáveis*, os quais se deformam quando submetidos a altas temperaturas, não recuperando sua forma original após o resfriamento. Dentre os primeiros pode-se citar as resinas acrílicas, acrilamidas, estireno, acetato de polivinila e estireno-butadieno. No segundo grupo tem-se as resinas epóxi, os poliuretanos e as resinas poliéster.

A argamassa modificada com polímero é um produto da associação de um composto inorgânico (cimento) e um composto orgânico (polímero) e tem uma estrutura definida que consiste no gel do cimento e as microfibras do polímero (CHODOUNSKY & BINA, 1997). Muitos tipos de polímeros (poliéster, epóxi, acrílicos, látex, dentre outros) têm sido utilizados como aditivos do concreto ou argamassa com o objetivo de se alcançar facilmente uma reação de polimerização, incrementando algumas das propriedades do concreto ou da argamassa resultante (RINCÓN et alli, 1996).

A seleção do polímero adequado depende das condições de serviço e do meio ambiente, considerando outros fatores tais como custos, durabilidade sob determinadas condições, adesão aos agregados, propriedades que se referem ao tempo de aplicação e à manutenção do material, dentre outras (RINCÓN et alli, 1996), sendo que o polímero mais utilizado em argamassa e em concreto modificado por polímero é o látex. Existe uma grande variedade de formulações de látex utilizados para modificar as argamassas, tais como o acetato de polivinila (PVA), copolímeros estireno-acrílico, copolímeros acetato de vinila-acrílico, copolímeros acetato de vinila-estileno (VAE), copolímeros estireno-butadieno (SBR), látex de resina epóxi, copolímeros acrílicos (metil metacrilato), dentre outros. Os látexes apresentam-se sob forma de partículas esféricas muito pequenas, da ordem de 0,05  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  de diâmetro, mantidas em suspensão na água pelo uso de agentes de superfície (CHODOUNSKY & BINA, 1997).

Segundo OHAMA (1987), o princípio de modificação das argamassas pela adição do látex ocorre em três etapas, conforme o modelo descrito a seguir.

a) Primeira etapa: quando o látex é misturado à argamassa, as partículas do polímero são uniformemente dispersadas na pasta de cimento. Na pasta de cimento-polímero, o gel é gradualmente formado devido à hidratação do cimento e a fase aquosa é saturada com hidróxido de cálcio formado durante a hidratação, enquanto que as partículas de polímero se depositam parcialmente na superfície das misturas de gel de cimento com partículas de cimento não hidratado.

b) Segunda etapa: com a drenagem da água em excesso (não consumida na reação de hidratação do cimento) pela evaporação e devido ao desenvolvimento da estrutura de gel de cimento, as partículas de polímero são gradualmente confinadas nos poros capilares. À medida que a hidratação do cimento prossegue, as partículas de polímero floculam formando uma camada polimérica contínua e compacta na superfície das misturas de gel de cimento com partículas de cimento não hidratado e na superfície dos agregados.

c) Terceira etapa: por fim, com a retirada completa da água, como descrito na etapa anterior, as partículas poliméricas coalescem em um filme ou membrana contínua ligando o cimento hidratado, formando uma rede monolítica em que a fase polimérica interpenetra na fase de cimento hidratado. Tal estrutura atua como uma matriz para argamassas modificadas por polímeros, onde os agregados são envolvidos por esta matriz.

A combinação das partículas do polímero com a camada de silicato de cálcio é irreversível, pois as partículas de látex não podem ser removidas por ataque de solução de ácido ou água, o que comprova que existe aderência química das partículas (STORTE & TEZUKA, 1992).

Outro polímero muito utilizado no meio técnico, com determinadas particularidades, é

o epóxi. Argamassas epóxi são geralmente sistemas pré-preparados contendo resinas aglomerantes compostas por dois componentes, que são adicionados a uma mistura de agregados selecionados, os quais já podem estar contidos nos sistemas pré-preparados ou são adquiridos separadamente (MAILVAGANAM, 1992).

A significativa diferença entre o coeficiente de dilatação da argamassa epóxi e do concreto, torna o uso da argamassa epóxi restrito a apenas aplicações de delgadas camadas. Outro fator que vem a colaborar com o uso limitado da mesma é o seu custo, que é alto quando comparado às demais argamassas poliméricas (MAILVAGANAM, 1992).

Como resultado de sua pesquisa, RINCÓN et alli (1996) afirma que a argamassa epóxi é um produto não recomendado como material de reparo de estruturas em meios agressivos. Embora este diminua o processo corrosivo, ele não previne a deterioração do aço. Além disso é um produto caro.

Diversos trabalhos (OHAMA, 1987; FERREIRA & LIBÓRIO, 1993; AFRIDI et alli, 1994a; AFRIDI et alli, 1994b; RAY & GUPTA, 1995; OLIVEIRA, 1999; GODOY & BARROS, 1999; ROSSIGNOLO & AGNESINI, 1999) comprovam a superioridade das argamassas modificadas pelos polímeros, tanto em alguns aspectos mecânicos quanto em aspectos de durabilidade, quando comparadas a argamassas convencionais.

#### **4.4.3 Sistema de reparo por inibição**

Inibidores de corrosão são substâncias que, quando adicionadas a um meio corrosivo em concentrações adequadas, promovem mudanças locais na interface metal-eletrólito, resultando em uma redução da taxa de corrosão. Muitas dessas substâncias cuja a função é inibir a corrosão do aço em vários ambientes têm sido descobertas, e muitas têm sido consideradas como possíveis componentes de sistemas de reparo de concreto onde as armaduras têm sofrido despassivação, como consequência da carbonatação ou da presença de cloretos (RILEM, 1994).

Desde o seu uso em canalizações de gás no ano de 1940, aplicações específicas dos inibidores têm sido desenvolvidas. O uso deste no controle da corrosão da armadura do concreto foi primeiramente investigado no final dos anos 60, sendo que sua primeira aplicação comercial surgiu somente após uma década (FADAYOMI, 1997).

Existem diversas classificações para os inibidores, dentre as quais, as mais conhecidas são: inibidores seguros e perigosos, que consideram as consequências da utilização dos inibidores em diferentes concentrações; inibidores oxidantes e não-oxidantes, que levam em conta a necessidade de oxigênio dissolvido para a existência de reações de proteção; inibidores orgânicos e inorgânicos, que levam em conta a natureza do agente inibidor; e inibidores anódicos, catódicos e mistos, que são classificados de acordo com a direção de

deslocamento do potencial de corrosão. Dentre todas as classificações, a última é a mais referenciada e indicada com a principal (VASCONCELOS, 1997; LIMA, 1998).

A natureza química e os mecanismos de ação dos inibidores são variados, assim como sua eficiência quando usados em diferentes concentrações em contato com a superfície do aço sob condições iniciais variáveis, em soluções aquosas de diferentes temperaturas, teores de oxigênio, valores de pH, concentração de íon agressivo, dentre outros. Ou seja, para que eles protejam a armadura ou retardem a corrosão da mesma, estes devem estar presentes na massa do concreto em determinados teores ótimos, os quais foram e ainda estão sendo alvo de muitas pesquisas. Quando a concentração do inibidor não estiver em níveis satisfatórios, se o inibidor for do tipo perigoso, este, além de não fornecer uma adequada proteção, sob circunstâncias adversas, pode ainda estimular um intenso ataque localizado na armadura (RILEM, 1994).

Geralmente os inibidores de corrosão são adicionados à massa do concreto durante o amassamento dos mesmos mas, recentemente, uma nova geração de produtos têm sido introduzida no mercado. Estes são aplicados na superfície do concreto de onde migram até as armaduras, protegendo-as contra corrosões futuras. Testes já indicam a eficiência desses produtos, reduzindo as taxas de corrosão em armaduras de concretos contaminados por cloretos (PAUL, 1998).

Segundo GONZÁLEZ et alli (1996b), GONZÁLEZ et alli (1998) e VILLEMUR & BARBOSA (1998), o mais eficiente inibidor utilizado para a prevenção da corrosão da armadura é o íon nitrito. Mas permanece ainda não esclarecido, entretanto, se o efeito protetor é preservado quando ocorre a lixiviação do inibidor. O nitrito de cálcio tem sido utilizado nos Estados Unidos e na Rússia desde que muitos dos efeitos maléficis dos sais de degelo têm sido evitados, enquanto que o nitrito de sódio tem sido usado com uma aparente eficiência na Europa (ROSENBERG et alli, 1989). Pesquisas envolvendo este último inibidor apontam que teores de 1% a 2% são eficientes no combate à corrosão (LIMA, 1996; VASCONCELOS, 1997; VILLEMUR & BARBOSA, 1998; LIMA et alli, 1999).

Quando o  $\text{NO}_2^-$  é adicionado à água de mistura com os cloretos, o ataque progride ou não dependendo da relação  $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ . Relações  $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$  menores que 1 não são eficazes em ambientes onde há fatores que podem diminuir as propriedades passivadoras naturais do concreto, tais como alta umidade relativa, resultando em uma baixa resistividade do concreto e um fácil progresso do processo corrosivo. Para se obter total inibição do avanço da corrosão, sugere-se uma relação  $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^- \geq 1,5$  (ANDRADE et alli, 1995).

Na maioria dos casos, os inibidores devem ser usados como parte de um amplo sistema de proteção e reparo, incluindo aplicação de revestimentos sobre o concreto ou impregnação hidrofóbica. Sendo corretamente usados, os inibidores de corrosão podem se apresentar como uma valiosa contribuição para o desenvolvimento de reparos duráveis em

concreto e para a estratégia de manutenção dos mesmos (FADAYOMI, 1997).

#### **4.4.4 Sistema de reparo por proteção por barreira**

Este tipo de sistema de reparo geralmente é utilizado complementarmente a outro, fornecendo uma proteção a mais contra o ingresso de agentes agressivos.

A penetração de agentes agressivos no concreto, principalmente o dióxido de carbono e os íons cloreto, pode ser evitada ou reduzida ao se utilizarem concretos de boa qualidade, pois estes funcionam como uma barreira física contra o ingresso dos mesmos. Esta barreira pode ser aumentada através do uso de pinturas (revestimentos) de baixa permeabilidade, feitas sobre a superfície do concreto (PARKER, 1997).

Uma grande variedade de revestimentos orgânicos e inorgânicos, tais como pinturas betuminosas, resinas de poliéster, resinas acrílicas, resinas epóxi, uretanos e neoprenes, tem sido usado contra a penetração de íons cloreto e de CO<sub>2</sub>. Dentre os que promovem uma maior proteção, estão as pinturas epóxicas (MAILVAGANAM, 1992).

Deve ser enfatizado que estes revestimentos fornecem proteção contra o ataque de cloretos somente se são aplicados em concretos são (sem cloretos) ou se são aplicados em toda a superfície de concreto da estrutura, impedindo o acesso de oxigênio. Para a proteção contra a carbonatação, por outro lado, tem sido visto que revestir concretos parcialmente carbonatados, habilita a difusão de hidróxidos do interior da estrutura para regiões carbonatadas, promovendo, assim, a repassivação do aço. Em todos os casos deve-se fazer manutenções periódicas na camada protetora, sob pena de reativação do processo de degradação (ROSENBERG et alli, 1989).

### **4.5 SISTEMAS DE REPARO QUE UTILIZAM MÉTODOS ELETROQUÍMICOS**

#### **4.5.1 Realcalinização**

A finalidade da realcalinização eletroquímica é recuperar o alto pH do concreto, com o intuito de restaurar a proteção anti-corrosiva propiciada por este, nos casos onde a despassivação ocorreu devido à carbonatação do concreto, sem que para isto seja necessário a remoção do concreto. Porém, áreas com concreto de cobrimento danificado, destacado ou com fissuras, devem ser prévia e adequadamente reparadas (RILEM, 1994).

Existem três mecanismos para reestabelecer a alcalinidade do concreto: a difusão e adsorção de uma solução alcalina por ação capilar e de forças hidráulicas, a produção de íons hidroxila através de reação catódica na superfície das armaduras e o transporte de uma solução alcalina para o interior dos poros capilares do concreto através de um fluxo eletro-osmótico. Este fluxo promove o transporte de um líquido através dos poros capilares com a aplicação de

um campo elétrico (RILEM, 1994; EGGERS & OLIVEIRA, 1997).

O princípio da realcalinização consiste na aplicação de um campo elétrico, gerenciado por uma unidade retificadora controlada por computador, entre a armadura do concreto e um ânodo inserido em uma solução alcalina, montada externamente à superfície do concreto. O ânodo usualmente utilizado é uma malha de aço ou, em alguns casos, um material inerte tal como o titânio ativado. O eletrólito é usualmente uma solução aquosa de carbonato de sódio a 1 molar. Sob condições atmosféricas normais, 12% de uma solução de 1 molar de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  à 20 °C, irá se converter em bicarbonato de sódio, com um pH de equilíbrio de 10,4. Durante o tratamento, a solução alcalina é transportada para o interior do concreto carbonatado pelo efeito do fluxo eletro-osmótico. Simultaneamente, por eletrólise, íons hidroxila são formados na superfície das barras de aço, os quais irão reagir com os íons sódio provenientes da própria matriz do concreto ou do meio exterior para formar hidróxido de sódio que, por sua vez, reagirá com o dióxido de carbono, formando carbonato de sódio. Uma vez adquirida esta condição, a estrutura readquire a propriedade de passivação das barras de aço nela imersa (RILEM, 1994; PARKER, 1997; EGGERS & OLIVEIRA, 1997).

Após o tratamento, o ânodo é removido e a superfície do concreto é limpa. Uma pintura de proteção geralmente é necessária para garantir a manutenção das novas condições obtidas, melhorando ainda a estética da superfície do concreto (RILEM, 1994; EGGERS & OLIVEIRA, 1997).

Os parâmetros de avaliação do sistema de reparo são a densidade de corrente e o tempo de tratamento. A quantidade de hidroxilas gerada é determinada pela carga total que passa entre a armadura e o ânodo. A densidade de corrente de projeto típica está entre 0,5 e 2  $\text{A/m}^2$  de área de superfície de concreto (RILEM, 1994). O tempo de aplicação da corrente ainda não é consenso dentre os pesquisadores (PARKER, 1997; EGGERS & OLIVEIRA, 1997), variando de poucos dias a algumas semanas, e depende da profundidade de carbonatação, espessura de cobrimento do concreto, qualidade do concreto, distribuição das armaduras e da densidade e distribuição da corrente (RILEM, 1994).

Durante o tratamento é conveniente acompanhar a mudança do pH do concreto, por exemplo, através da pulverização de um indicador químico (ver item 2.2.3.3). Além disso, um monitoramento da densidade de corrente e da voltagem desenvolvidas pode ajudar a determinar o progresso do tratamento (RILEM, 1994).

Podem existir, entretanto, algumas dificuldades na distribuição da corrente devido à baixa continuidade elétrica apresentada pelas armaduras (PARKER, 1997) e podem ainda surgir alguns efeitos adversos devido à realcalinização, onde as maiores causas dizem respeito às reações álcali-agregado, especialmente devido à alta concentração de íons sódio introduzidos no concreto e à redução da aderência entre o aço e o concreto e à evolução do hidrogênio, desenvolvendo altas pressões, fissurando o concreto. Devido a poucas

informações práticas disponíveis sobre estes aspectos, a realcalinização não é recomendada em casos onde a reação álcali-agregado está presente, para estruturas protendidas ou onde a aderência entre o concreto e a armadura é crítica por razões estruturais (RILEM, 1994).

#### 4.5.2 Dessalinização

O propósito da dessalinização ou extração eletroquímica de cloretos é a remoção dos íons cloreto do concreto contaminado, de forma que a concentração residual destes íons alcancem valores baixos suficientes para que o processo de corrosão se reduza a níveis insignificantes (RILEM, 1994).

Para se aplicar esta técnica, é necessário preparar a estrutura, através da limpeza da superfície do concreto, selando as fissuras, para que o fluxo de corrente não seja impedido e a eficiência da remoção não seja diminuída (RILEM, 1994). Os íons cloreto são transportados para fora do concreto por migração, através da aplicação de um campo elétrico, gerenciado por uma unidade retificadora controlada por computador, entre as armaduras no interior do concreto e um eletrodo constituído por uma malha metálica fixada externamente à superfície do concreto e colocada no interior de um reservatório eletrolítico. Muitos eletrólitos foram avaliados durante a evolução da técnica, sendo que a água tratada fornecida para uso doméstico e soluções de hidróxido de cálcio saturado mostraram-se os mais eficientes. Durante o tratamento ocorre migração de cátions para as armaduras e de ânions ( $\text{Cl}^-$ ) para o eletrodo externo (malha metálica), ocorrendo também a produção de íons hidroxila na superfície das armaduras como consequência da reação catódica, havendo, assim, um aumento do pH (PARKER, 1997; EGGERS & OLIVEIRA, 1997).

A quantidade de cloretos removidos é determinada pela carga total passante entre a armadura e o ânodo. Esta carga total é determinada pela integral da corrente multiplicada pelo tempo de aplicação. A densidade de corrente tipicamente utilizada é de 0,5 a 2  $\text{A/m}^2$  de área de superfície do concreto (RILEM, 1994). Deve-se ter especial atenção aos cloretos contidos no concreto sob a forma de cloroaluminatos, pois durante a dessalinização os cloretos livres são rapidamente removidos, ficando os cloroaluminatos instáveis em decorrência da baixa concentração de cloretos livres e ainda devido à dissipação do elevado pH gerado. Os dois fatos levam ao desprendimento dos cloretos mais confinados e aderidos. EGGERS & OLIVEIRA (1997) sugerem o desligamento da corrente por algum tempo após o início do tratamento, reativando-a posteriormente, conseguindo-se obter uma extração adicional de cloretos. Segundo tais autores, o procedimento que tem-se mostrado adequado é efetuar duas semanas de tratamento seguidas de uma semana de interrupção. Esta sequência é repetida até que o tratamento seja concluído.

O tempo demandado encontra-se tipicamente entre poucas semanas e alguns meses, dependendo de alguns fatores, dentre os quais pode-se citar a quantidade inicial e a distribuição dos cloretos no concreto, a fonte dos cloretos, tipo de sal, a qualidade do

concreto, a espessura de carbonatação, a temperatura, a distribuição da armadura no concreto e a distribuição da corrente na estrutura (RILEM, 1994; PARKER, 1997; EGGERS & OLIVEIRA, 1997).

Durante o tratamento, é conveniente fazer um monitoramento da estrutura, através de análises regulares do teor de cloretos para que se possa avaliar o progresso do uso da técnica (ver item 2.2.3.2). (RILEM, 1994).

Similarmente à realcalinização, após o tratamento o ânodo é removido e a superfície do concreto é limpa. Uma pintura de proteção geralmente é necessária para garantir a manutenção das novas condições obtidas, melhorando ainda a estética da superfície do concreto (RILEM, 1994; EGGERS & OLIVEIRA, 1997).

Por usar o mesmo princípio da realcalinização, esta técnica possui os mesmos inconvenientes da mesma, tais como problemas na distribuição da corrente devido à baixa continuidade elétrica apresentada por certas armaduras, existindo ainda alguns efeitos adversos em virtude das reações álcali-agregado e da redução da aderência entre armadura e concreto. Portanto, esta técnica não é recomendada para estruturas onde há reações álcali-agregado, estruturas protendidas ou em estruturas onde a avaliação estrutural mostrou que a aderência entre concreto e armaduras externas é crítica para a estabilidade estrutural da mesma (RILEM, 1994; PARKER, 1997).

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolvido engloba os temas abordados na revisão bibliográfica (corrosão das armaduras, métodos eletroquímicos de avaliação do processo de corrosão e sistemas de reparo) objetivando avaliar a eficiência de alguns sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão induzida por íons cloreto. Complementarmente à esta avaliação, averiguou-se o desempenho do método eletroquímico de Resistência de Polarização como instrumento de análise dos sistemas de reparo.

Avaliou-se sistemas de reparo formados por argamassas com ou sem adições, com ou sem revestimento das armaduras. As argamassas de reparo estudadas foram: argamassa de referência (sem modificações) e argamassas modificadas por inibidor de corrosão (nitrito de sódio), por adições minerais (sílica ativa) e por polímeros (estireno-butadieno). Avaliou-se ainda, o desempenho de um *primer* rico em zinco como revestimento das barras de aço imersas nos corpos-de-prova de corrosão.

Este capítulo descreve os procedimentos adotados durante todos os ensaios realizados, os quais podem ser divididos em um ensaio principal (ensaio acelerado de corrosão devido ataque induzido por cloretos) e ensaios complementares, que podem ser de durabilidade (absorção por imersão-NBR 9778/87, absorção por capilaridade-NBR 9779/95, teor de cloretos nas argamassas e difusão de cloretos) ou mecânicos (resistência à compressão-NBR 5739/93 e módulo de deformação-NBR 8522/84), bem como os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 5.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento Portland composto, com adição de filler calcário (CP II F-32), comercialmente utilizado na região de Brasília. O cimento foi fornecido em sacos de 50 kg provenientes de um mesmo lote.

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam as características químicas e características físicas e mecânicas, respectivamente, do cimento utilizado. Os dados foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 5.1 Características químicas do cimento (fornecido pelo fabricante).

<b>Composição química do clínquer</b>	<b>Teores (%)</b>
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	20,20
Óxido de cálcio total (CaO)	57,51
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,25
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,35
Óxido de magnésio (MgO)	5,23
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	1,85
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,21
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,74
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,45
Perda ao fogo	6,26
Resíduo insolúvel	2,16
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	0,70
Adição – calcário	9,50

Tabela 5.2 Características físicas e mecânicas do cimento (fornecido pelo fabricante).

<b>Ensaio</b>		<b>Resultado</b>
Área específica		364 m <sup>2</sup> /kg
Massa unitária		1,12 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica		3,10 g/cm <sup>3</sup>
Finura		1,30 %
Tempo de pega	Início	3 h 9 min
	Fim	4 h 43 min
Expansibilidade a frio		1,2 mm
Resistência à compressão	1 dia	12,6 MPa
	3 dias	24,9 MPa
	7 dias	30,4 MPa
	28 dias	35,4 MPa

### 5.1.2 Agregado miúdo

A areia utilizada é proveniente do rio Corumbá (GO), distante cerca de 220 quilômetros de Brasília. O material apresentou distribuição granulométrica com frações que atenderam aos limites da Tabela 1 da NBR 7211/83.

No preparo dos corpos-de-prova retirou-se as partículas da areia que possuíam diâmetro maior que 6,3mm. Os resultados dos ensaios realizados com uma amostra da mesma encontra-se nas Tabelas 5.3 e 5.4. A curva granulométrica do agregado miúdo encontra-se na Figura 5.1.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB).

Tabela 5.3 Análise granulométrica do agregado miúdo.

Peneira (mm)	% Retida	% Acumulada	Limites NBR 7211/83 - Zona 3
6,3	1,3	1	0 a 7
4,8	1,9	3	0 a 11
2,4	7,1	10	0 a 25
1,2	9,5	20	10 a 45
0,6	21,9	42	41 a 65
0,3	36,2	78	70 a 92
0,15	17,1	95	90 a 100
0,075	3,5	99	-
Fundo	1,4	100	-

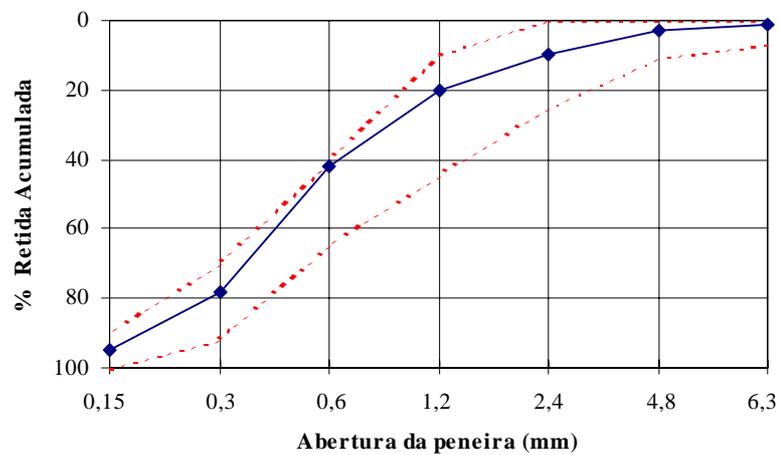


Figura 5.1 Curva granulométrica do agregado miúdo.

Tabela 5.4 Propriedades físicas do agregado miúdo

Ensaio realizado	Resultado	Norma de ensaio
Módulo de finura	2,48	NBR 7217/87
Dimensão máxima característica	4,8mm	NBR 7217/87
Graduação (zona)	3 (média)	NBR 7211/83
Massa específica	2,62 g/cm <sup>3</sup>	NBR 9776/87
Massa unitária	1,43 g/cm <sup>3</sup>	NBR 7251/82
Teor de materiais pulverulentos	1,9%	NBR 7219/87

### 5.1.3 Sílica ativa

Utilizou-se sílica ativa de origem nacional, do tipo não densificada, oriunda de um único lote, armazenada em sacos de papel *craft* com 15 kg cada.

A Tabela 5.5 apresenta a composição química da sílica ativa, bem como algumas características da mesma. Os ensaios foram realizados no laboratório de análises química de concreto, em Furnas Centrais Elétricas S.A.

Tabela 5.5 Composição química e características da sílica ativa (fornecido pelo fabricante).

Componentes químicos	Teores (%)	Propriedades	Resultados
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	91,05	Perda ao fogo	3,62%
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	-	Resíduo insolúvel	-
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,62	Massa específica	2,18 g/cm <sup>3</sup>
Óxido de magnésio (MgO)	0,62	Área específica	16,20 m <sup>2</sup> /g
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,31	Teor de umidade	0,94%
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,17		
Óxido de cálcio (CaO)	1,32		
Óxido de cálcio livre (CaO)	-		
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,21		
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	0,62		

#### 5.1.4 Inibidor de corrosão

Utilizou-se o nitrito de sódio (NaNO<sub>2</sub>) como inibidor de corrosão. Tal inibidor é do tipo anódico, estando sua composição química disposta na Tabela 5.6. Os dados foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 5.6 Composição química do nitrito de sódio (NaNO<sub>2</sub>) (fornecido pelo fabricante).

Peso Molecular	68,99
Dosagem	97%
Impurezas	Teor máximo
Insolúveis	0,01%
Cloreto	0,05%
Cálcio	0,01%
Ferro	0,001%
Metais pesados	0,001%

#### 5.1.5 Polímero

Utilizou-se o polímero estireno-butadieno (SBR) como modificador das argamassas de reparo.

As características e propriedades físicas do polímero, as quais foram fornecidas pelo fabricante, encontram-se na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Características e propriedades físicas do SBR (fornecido pelo fabricante).

Características	SBR	Propriedades	SBR
Teor de sólidos (%)	50±1	Aspecto	Líquido, branco, leitoso
pH	7,5±0,5	Densidade (g/ml)	1,02±0,02
Viscosidade Brookfield (mPa.s)	75±25	Tensão superficial (mN/m)	35±2
(RVT/50rpm/23 °C)		Diâmetro das partículas (µm)	0,16

### 5.1.6 Aditivo

Foi utilizado um aditivo superplastificante de pega normal, à base de melamina, normalmente utilizado na produção de concretos de alto desempenho. Tal aditivo não contém cloretos ou quaisquer elementos corrosivos ou incrustantes. A dosagem do aditivo manteve-se dentro da faixa recomendada pelo fabricante (de 0,6 a 3% sobre a massa de cimento) até que as argamassas atingissem uma consistência de  $220 \pm 20$  mm.

### 5.1.7 Armadura

As armaduras utilizadas no ensaio acelerado de corrosão foram de classe CA 60A, com 5mm de diâmetro.

### 5.1.8 Pintura de zinco

A fim de promover uma maior proteção a algumas barras de aço, utilizou-se um primer rico em zinco especialmente formulado para proteção catódica galvânica. Esta pintura protege a armadura contra a corrosão, aumentando assim o tempo de iniciação do processo corrosivo. As informações sobre as propriedades físicas do primer, fornecidas pelo fabricante, encontram-se na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 Propriedades físicas do primer rico em zinco à 25 °C (fornecido pelo fabricante).

Massa Específica	2,0 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura	Tempo de secagem - totalmente seco
20 °C	30 a 45 min
35 °C	15 a 20 min

### 5.1.9 Água de amassamento

Utilizou-se água potável proveniente da rede pública de distribuição.

### 5.1.10 Outros

Utilizou-se de um adesivo estrutural à base de resina epóxi bi-componente para impermeabilização das laterais dos corpos-de-prova do ensaio de migração de cloretos e de uma borracha de silicone comercializada em pasta para impermeabilizar as conexões da câmara positiva.

## 5.2 SISTEMAS DE REPARO ESTUDADOS

Para definir os proporcionamentos dos sistemas de reparo selecionados para o estudo

experimental, foi realizada uma pesquisa bibliográfica identificando os melhores resultados obtidos por pesquisadores que avaliaram os teores ótimos dos materiais componentes de cada um dos sistemas, dando preferência aos trabalhos que utilizaram insumos nacionais.

Definiu-se como o sistema de reparo de referência aquele formado por uma *argamassa de referência de cimento e areia, traço 1:3, em massa, a/c=0,5, com barras de aço sem pintura*. A partir desta, utilizou-se os teores ótimos dos materiais pesquisados, conforme descreve-se a seguir.

*a) Sistema de reparo formado com argamassa de cimento e areia, traço 1:3, em massa, a/c=0,5, com adição de 10% de sílica ativa em relação à massa do cimento, com barras de aço sem pintura.*

Justifica-se a utilização deste sistema de reparo, através das pesquisas de:

- KULAKOWSKI (1994), a qual utilizando ensaios relacionados com a durabilidade, em vários traços de argamassas de reparo estrutural, com variados teores de adição de sílica ativa sobre a massa do cimento, combinadas com superplastificantes, obteve os melhores resultados com argamassa de traço 1:3 e adição de 10% de sílica ativa sobre a massa de cimento e relação água/aglomerante igual a 0,45;

- SILVA FILHO (1994), o qual através de ensaios de penetração de água sobre pressão e avaliação da durabilidade através de exposição a sulfatos por via de imersão, em concretos com e sem adição de sílica ativa, encontrou bons resultados para o teor de 10% de adição e;

- SCHULER (1998), que em um amplo estudo sobre argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado, avaliando aspectos mecânicos, de durabilidade e de custos, concluiu que a argamassa de traço 1:3, com relação água/aglomerante 0,55 e um teor de 10% de adição de sílica ativa é a mais adequada ao emprego como material de reparo.

Para este sistema de reparo, adicionou-se água até que a relação água/aglomerante ficasse em 0,5.

*b) Sistema de reparo formado com argamassa de cimento e areia, traço 1:3, em massa, a/c=0,5, com adição de 2% de inibidor de corrosão (nitrito de sódio) em relação à massa do cimento, com barras de aço sem pintura.*

Justifica-se o emprego deste inibidor de corrosão, neste teor, baseando-se nas pesquisas de:

- VILLEMUR & BARBOSA (1998), os quais através dos resultados obtidos utilizando

diferentes técnicas eletroquímicas, mostram que o nitrito de sódio é capaz de contrapor à agressividade do íon cloreto em relação à corrosão de armaduras, existindo uma relação entre este efeito e a concentração do inibidor na pasta de cimento;

- LIMA (1996), a qual avaliou a eficiência de alguns inibidores frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos, verificando, em uma análise global, que os teores de 1 a 2% de nitrito de sódio, referentes à massa do cimento, parecem não modificar significativamente as propriedades dos concretos, argamassas e pastas onde são incorporados, comportando-se uniformemente para todas as propriedades analisadas, não apresentando variações com a evolução da idade, recomendando-se portanto a utilização desses teores, com a finalidade de prevenir a corrosão de armaduras na presença de cloretos;

- VASCONCELOS (1997), o qual avaliou diversos inibidores de corrosão (inibidores à base de amônia, à base de aminoálcool e à base de aminas), dentre eles o nitrito de sódio, no teor de 2% em relação à massa do cimento, sendo que este apresentou uma melhor capacidade de proteção das armaduras, tanto frente à ação dos íons cloretos quanto à carbonatação e;

- LIMA (1998) e LIMA et alli (1999), os quais corroboram com os resultados do supracitado autor, encontrando para armaduras imersas em concretos contaminados por cloretos reparadas com argamassas com adição de 1% e 2% de nitrito de sódio, referentes à massa do cimento, os melhores resultados dentre os inibidores pesquisados (nitrito de sódio, molibdato de sódio e benzoato de sódio).

*c) Sistema de reparo formado com argamassa de cimento e areia, traço 1:3, em massa, a/c=0,5, com adição de 20% do polímero estireno-butadieno (SBR) em relação à massa do cimento, com barras de aço sem pintura.*

Justifica-se o emprego deste polímero, neste teor, baseando-se nas pesquisas de:

- OHAMA (1987), o qual pesquisou a influência de vários teores de adição de polímeros à base de látex nas propriedades das argamassas, dentre eles o estireno-butadieno (SBR), onde constatou a influência positiva da adição deste nas propriedades relacionadas à durabilidade (resistência à penetração de cloretos, à carbonatação e impermeabilidade). Dos teores pesquisados, o de 20% de adição de sólidos do estireno-butadieno em relação à massa do cimento foi o que apresentou um melhor resultado para as propriedades acima citadas;

- AFRIDI et alli (1994a), que em um amplo estudo sobre argamassas modificadas por polímeros, utilizando adições dos mesmos em forma de pó e diluídos em água, dentre eles o SBR, pesquisaram a influência destas adições na resistência à carbonatação e na estrutura de poros das argamassas. Para tanto, utilizaram corpos-de-prova de 100x100x200mm feitos com argamassa 1:3, com os teores de 0, 5, 10, 15 e 20% de adição de polímeros em relação à massa de cimento, fixando a consistência em  $170 \pm 5$ mm, deixando-os carbonatar por 14, 28 e

91 dias em câmara de carbonatação com 5% de CO<sub>2</sub>. Os resultados indicam um aumento da capacidade de resistência à carbonatação das argamassas modificadas com o SBR, em relação às não modificadas. Observou-se também a melhoria do desempenho de tais argamassas conforme aumentava-se o teor de SBR, até o valor de 20% em relação à massa do cimento. Esta alta resistência à carbonatação é atribuída à presença de um filme pouquíssimo permeável filme polimérico, uma distribuição do tamanho dos poros e do decréscimo do volume total de poros. Através da porosimetria realizada na argamassa de referência (não modificada) e na argamassa com adição de 20% de SBR, antes de ser submetida à carbonatação, observou-se que houve uma redução de 25,65% no volume total de poros. Também através desta, observou-se uma modificação na distribuição dos tamanhos dos poros, sendo que a maior quantidade de poros na argamassa não modificada encontrava-se nos poros de raio entre 7500 e 4300 angstroms. Já na argamassa com 20% de SBR, estes encontravam-se nos de raio entre 340 e 240 angstroms, evidenciando assim a diminuição da tortuosidade e intercomunicação da rede porosa.

*d) Sistema de reparo formado com argamassa de cimento e areia, traço 1:3, em massa, a/c=0,5, com pintura de zinco nas barras de aço.*

Justifica-se o emprego deste sistema de reparo, baseando-se nas pesquisas de vários autores (FIGUEIREDO, 1994; STONEMAN, 1994; WALTER et alli, 1998, dentre outros), os quais obtiveram resultados satisfatórios. Aliado a isso, a proteção das armaduras, utilizando a proteção catódica, do tipo galvânica, tem sido um tipo de sistema de reparo bastante difundido, exigindo da comunidade científica, maiores informações a respeito de seu desempenho.

### 5.3 CORPOS-DE-PROVA

Para a realização dos ensaios confeccionou-se corpos-de-prova de dois tipos, para cada sistema de reparo, sendo um prismático, destinado ao ensaio de corrosão acelerada, e o outro cilíndrico, destinado aos demais ensaios. Tais corpos-de-prova prismáticos foram desenvolvidos e utilizados em pesquisas anteriores realizadas no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB).

Os corpos-de-prova prismáticos possuem dimensões de 45x80x90mm, sendo portanto similares aos utilizados por NEPOMUCENO (1992); FIGUEIREDO (1994); BAUER (1995); MONTEIRO (1996), VASCONCELOS (1997), dentre outros. Para cada sistema de reparo foram confeccionados dois corpos-de-prova prismáticos com duas barras de 5mm de diâmetro em cada face, distantes de 5 e 10mm da mesma, e um corpo-de-prova prismático sem nenhuma barra, sendo este usado para determinar a quantidade de cloretos nas profundidades das barras (5 e 10mm). As barras possuem 100mm de comprimento, sendo que somente 50mm estão expostos à corrosão, estando o restante protegido com fita PVC (Figura 5.2).

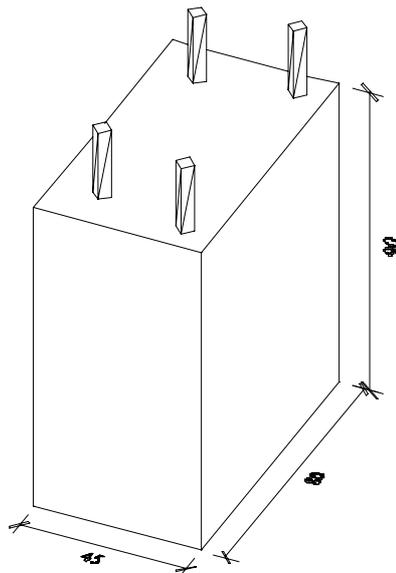
Os corpos-de-prova cilíndricos utilizados são os normalmente adotados nos ensaios de compressão axial, tendo 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Foram confeccionados 23 corpos-de-prova, conforme NBR 7215/96, sendo assim distribuídos: 3 para o ensaio de absorção por imersão, 3 para o ensaio de absorção por capilaridade, 2 para o ensaio de difusão de cloretos, 3 para a determinação do módulo de deformação e 12 para a determinação da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias (4 corpos-de-prova para cada idade).

Convém ressaltar que a quantidade de corpos-de-prova supracitada é para cada argamassa em estudo, sendo feita uma exceção para o sistema de reparo composto por argamassa de referência e barras pintadas com zinco, pois este possui apenas os corpos-de-prova destinados ao ensaio de corrosão acelerada. A Tabela 5.9 apresenta a quantidade e para que se destina cada corpo-de-prova.

Tabela 5.9 Quantidade de corpos-de-prova dos ensaios complementares e de corrosão acelerada para cada sistema de reparo.\*

Ensaio	Corpos-de-prova		
	Prism. com barras	Prism. sem barras	Cilíndrico
Corrosão acelerada	2	1	-
Absorção por imersão	-	-	3
Absorção por capilaridade	-	-	3
Difusão de cloretos	-	-	2
Resistência à compressão	-	-	12
Módulo de deformação	-	-	3

\* O sistema de reparo composto por argamassa de referência e barras pintadas com zinco possui somente os corpos-de-prova para o ensaio de corrosão acelerada.



(a)

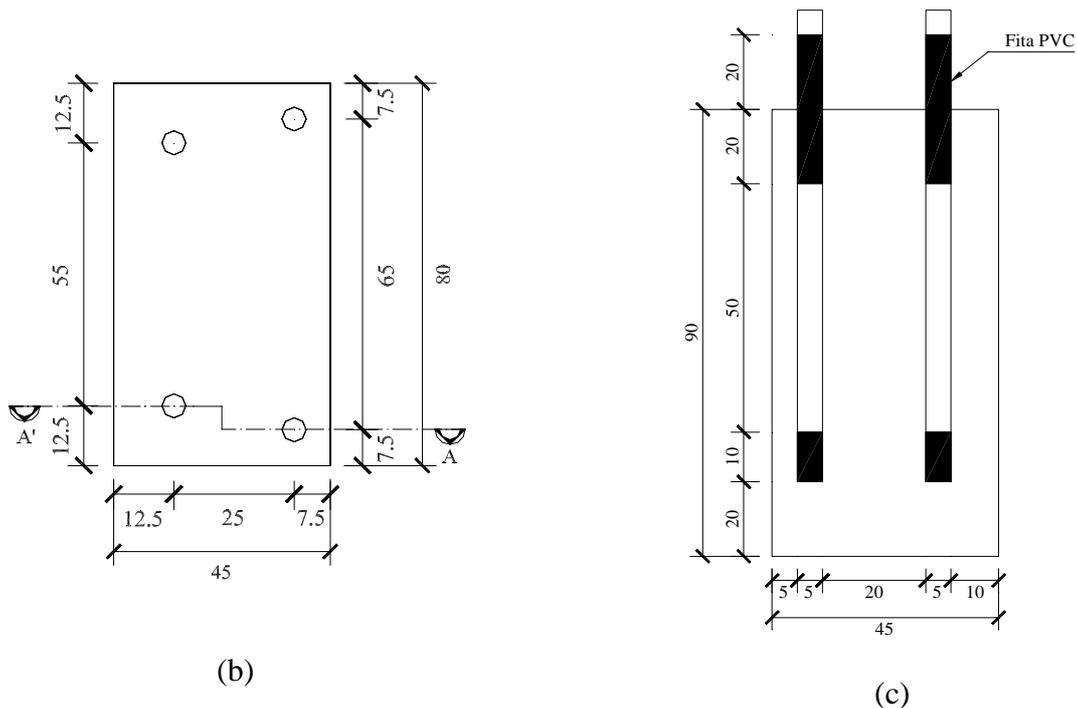


Figura 5.2 Corpo-de-prova do ensaio de corrosão acelerada. (a) Perspectiva do corpo-de-prova; (b) Vista superior do corpo-de-prova; (c) Corte A'A. Cotas em milímetros.

#### 5.4 ENSAIOS REALIZADOS

Como já mencionado anteriormente, o programa experimental conta com ensaios acelerados de corrosão devido ataque por cloretos e os seguintes ensaios complementares: absorção por imersão (NBR 9778/87), absorção por capilaridade (NBR 9779/95), difusão de cloretos, teor de cloretos nas argamassas, resistência à compressão (NBR 5739/93) e módulo de deformação (NBR 8522/84).

##### 5.4.1 Ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos

Consiste em submeter os corpos-de-prova prismáticos ao ingresso acelerado de cloretos, através de ciclos de umedecimento e secagem. Este método tem sido amplamente empregado por diversos pesquisadores (NEPOMUCENO, 1992; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995; MONTEIRO, 1996; LIMA, 1996; CASTANHEIRA, 1997; VASCONCELOS, 1997), tendo-se obtido resultados satisfatórios.

Antes da moldagem dos corpos-de-prova prismáticos, as barras foram limpas conforme procedimento descrito na *ASTM G1-90*, o qual encontra-se no Anexo A.

Após a limpeza das barras, as mesmas foram pesadas (Figura 5.3) em balanças de precisão de décimo do milésimo do grama (0,0001 g), pois a massa inicial das armaduras foi utilizada para calcular a perda de massa gravimétrica após o término dos ensaios e, posteriormente, isolou-se com fita PVC a área das barras que não sofreriam corrosão (Figura

5.4). A área exposta à corrosão foi de  $7,85 \text{ cm}^2$ . O processo de limpeza das barras foi novamente efetuado após o término do ensaio para a remoção dos óxidos de corrosão formados devido ao ensaio.

Utilizou-se uma fôrma de madeira (Figuras 5.5 e 5.6) como molde para os corpos-de-prova, sendo o adensamento feito através de mesa vibratória (Figura 5.7) em duas camadas, conforme procedimento padrão do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB).



Figura 5.3 Pesagem das barras.



Figura 5.4 Isolamento da área das barras que não sofreram corrosão.



Figura 5.5 Fôrma dos corpos-de-prova prismáticos desmontada.

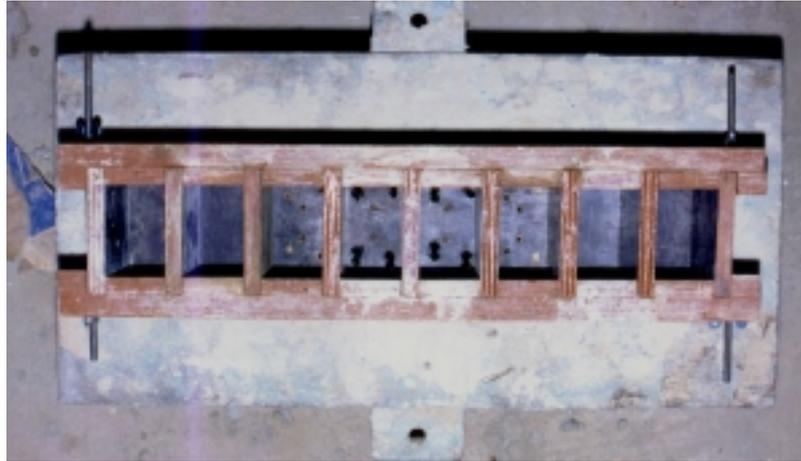


Figura 5.6 Vista superior da fôrma dos corpos-de-prova prismáticos montada.



Figura 5.7 Adensamento dos corpos-de-prova prismáticos utilizando-se a mesa vibratória.

Após moldados, estes corpos-de-prova prismáticos foram levados à câmara úmida, sendo desmoldados em 24 horas. Foram curados por mais 6 dias em câmara úmida e 21 dias ao ar, em ambiente de laboratório. Encontra-se no Anexo B as temperaturas e as umidades relativas apresentadas durante todos os dias de cura.

Segundo HAQUE (1998), uma apropriada e adequada cura é essencial para a melhoria da qualidade do cobrimento de concreto, da durabilidade e da resistência. Na prática, a maioria das estruturas de concreto não recebem uma cura adequada. Interrupções e descontinuidades nos primeiros dias do processo de cura, se acidental ou deliberada, prejudicam o processo de hidratação. Então o propósito de se deixar curar em câmara úmida somente até os 7 dias visa justamente tentar expressar a realidade que ocorre nos canteiros de obra, ou seja, uma cura deficiente e inadequada (NEPOMUCENO, 1992).

Posteriormente conectou-se mecanicamente os fios elétricos às barras, simplesmente amarrando-os às mesmas. Impermeabilizou-se o topo e o fundo dos corpos-de-prova com epóxi pois desejava-se que a penetração dos cloretos ocorresse somente pela lateral do corpo-de-prova (Figura 5.8). Após a secagem do epóxi, os corpos-de-prova foram saturados em água

até a constância de massa. Por fim, foram submetidos aos ciclos de umedecimento e secagem, iniciando-se o ciclo pelo semi-ciclo de secagem.

Como estava-se trabalhando com argamassas de microestruturas diferentes, devido às adições, o estado final, com relação ao teor de água no interior das mesmas após os 21 dias de cura ao ar, provavelmente era diferenciado entre todas, portanto a etapa de saturação até constância de massa visa conceder um estado inicial padronizado para todos os corpos-de-prova prismáticos. Além disso, o ciclo ideal de umedecimento e secagem para esses corpos-de-prova de distintas argamassas são diferentes, pois as argamassas menos porosas demandarão um ciclo maior e as argamassas mais porosas, um ciclo menor. Então resolveu-se aplicar o ciclo de cinco dias de secagem em estufa a 50 °C e dois dias de umedecimento em solução de 3,5% de NaCl, com imersão parcial dos corpos-de-prova (até a metade das barras), pois o mesmo já havia sido utilizado por MONTEIRO (1996), VASCONCELOS (1997) e TESSARI & DAL MOLIN (1998), em corpos-de-prova similares, com resultados bastante satisfatórios.



Figura 5.8 Conexão de fios nas barras e isolamento do fundo e do topo com epóxi.

GERDES et alli (1995) afirmam que o processo de secagem de argamassas e concretos é pelo menos, aproximadamente, duas ordens de grandeza mais lentos que o processo de sucção capilar. Para exemplificar tal fato, citam vigas de concreto de 20cm de espessura, que após um ano de secagem, ainda apresentavam 80% de sua água inicial. Portanto, é razoável a adoção do tempo de secagem maior do que o tempo de umedecimento.

Conforme HELENE (1993), os mecanismos clássicos de penetração do íon cloreto no concreto endurecido são: absorção capilar de água contaminada, difusão de íons, permeabilidade ou migração de íons por ação de um campo elétrico. A condição de imersão parcial em solução de NaCl 3,5% foi escolhida por ser a que propicia uma maior penetração destes agentes agressivos (tanto por absorção capilar como por difusão) (MONTEIRO, 1996; BAUER, 1995).

Um outro fator deletério dos ciclos de molhagem e secagem seria a cristalização dos

sais no interior do concreto, propiciando pressões de expansão de até 60 MPa, valor mais que suficiente para romper o concreto. Entretanto, a penetração dos sais é superficial e é necessária uma elevada concentração para permitir a recristalização desses sais, que só é viável nos primeiros milímetros superficiais (HELENE, 1993).

As variáveis potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ), intensidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e resistência ôhmica da argamassa ( $R_{\text{ohm}}$ ) foram medidas a cada semi-ciclo, através de um potenciostato (Figura 5.9) com compensação de queda ôhmica, desenvolvido e fabricado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB) por MONTALVÃO (1992) e BAUER (1995), já de amplo uso no laboratório. Utilizou-se o eletrodo de calomelano saturado (ECS) como eletrodo de referência e chapas de inox como contra-eletrodo (Figura 5.10).



Figura 5.9 Potenciostato utilizado para se obter  $E_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e  $i_{\text{corr}}$ .

O eletrodo de referência sempre foi colocado no mesmo lugar (no meio do corpo-de-prova) durante todas as leituras. Para se fazer as medições das variáveis localizadas na face oposta dos corpos-de-prova, os mesmos eram virados, também posicionando-se o eletrodo de referência na região central desta face (ver Figura 5.10). Utilizou-se de uma esponja úmida com água destilada para melhorar o contato entre o eletrodo de referência e o corpo-de-prova, e entre as chapas de aço inox (contra-eletrodos) e o corpo-de-prova.

A técnica eletroquímica de Resistência de Polarização ( $R_p$ ) foi utilizada para se obter a taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ), utilizando-se uma polarização anódica de 10mV, em relação ao potencial de corrosão, com uma velocidade de varredura de 10mV/minuto. A resistência ôhmica foi determinada através da compensação da queda ôhmica, no momento da medida da resistência de polarização ( $R_p$ ).

A variação de massa dos corpos-de-prova (VM) também foi mensurada a cada semi-ciclo, usando-se uma balança eletrônica com uma precisão de décimo do grama. Tais variáveis são utilizadas na avaliação do processo de corrosão.

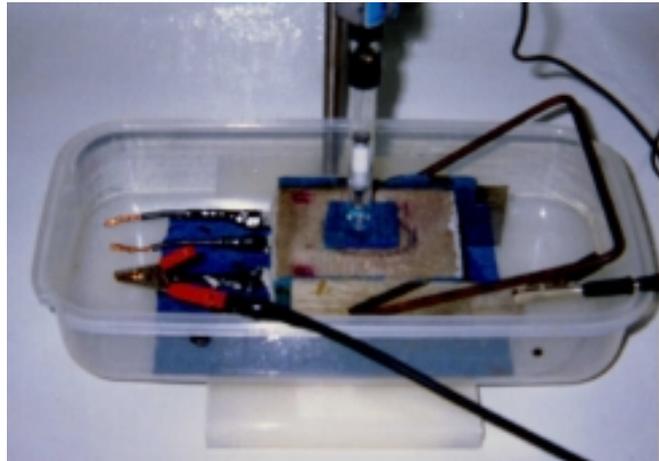


Figura 5.10 Eletrodo de referência de calomelano saturado posicionado na região central da face do CP e contra-eletrodo de inox posicionado nas laterais do CP.

Resumindo, o ensaio acelerado de corrosão ocorre de acordo com a sequência abaixo:

- Confeção dos corpos-de-prova;
- Cura em câmara úmida por 7 dias;
- Cura ao ar, em ambiente de laboratório, por mais 21 dias;
- Medição das variáveis:  $E_{\text{corr}}$ ,  $i_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e VM;
- Saturação em água até a constância de massa;
- Medição das variáveis:  $E_{\text{corr}}$ ,  $i_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e VM;
- Secagem em estufa a 50 °C durante 05 dias (Figura 5.11);
- Medição das variáveis:  $E_{\text{corr}}$ ,  $i_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e VM;
- Imersão parcial (até a metade das barras) dos corpos-de-prova em solução com 3,5% de NaCl por 02 dias (Figura 5.12);
- Medição das variáveis:  $E_{\text{corr}}$ ,  $i_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e VM;
- Secagem em estufa a 50 °C durante 05 dias;
- Repete-se o processo até que se obtenha dados satisfatórios para se avaliar os sistemas de reparo, que no caso foi até o 12º ciclo, onde as barras de todos os

sistemas de reparo já apresentavam valores de  $i_{\text{corr}}$  e  $E_{\text{corr}}$  acima dos permitidos.



Figura 5.11 Secagem dos CP's do ensaio de corrosão em estufa a 50 °C durante 05 dias (cada semi-ciclo).



Figura 5.12 Umedecimento dos CP's do ensaio de corrosão através de imersão parcial (até a metade das barras) em solução com 3,5% de NaCl por 02 dias (cada semi-ciclo).

Em virtude da demanda de ensaios atribuída ao potenciostato do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB), visto que este equipamento atende a outras pesquisas, foi necessário interromper os ciclos de aceleração da corrosão no 11º semi-ciclo, no estado seco, para o sistema de reparo de referência e o sistema de reparo com sílica ativa e no 10º semi-ciclo, no estado seco, para os sistemas de reparo com inibidor de corrosão e com adição de polímero e o sistema de reparo com pintura nas barras. Durante este período (64 dias), os corpos-de-prova foram mantidos em um recipiente com sílica gel hermeticamente fechado, para que não adquirissem umidade. A eficiência de tal procedimento

foi constatada através da continuidade da tendência dos resultados, exceto para o sistema de reparo com SBR, além da boa relação adquirida entre a perda de massa gravimétrica e a perda de massa eletroquímica (item 6.2.3).

A apresentação, análise e discussão dos resultados desse ensaio encontram-se no item 6.1.

#### 5.4.2 Ensaio complementares

Os corpos-de-prova cilíndricos ( $\varnothing=5\text{cm}$  e  $h=10\text{cm}$ ) utilizados nos ensaios complementares foram moldados simultaneamente com os corpos-de-prova prismáticos seguindo as recomendações da NBR 7215/95, fazendo-se o adensamento em duas etapas através de uma mesa vibratória (Figura 5.13). A cura destes corpos-de-prova foi idêntica à usada para os corpos-de-prova prismáticos. A apresentação, análise e discussão dos resultados desses ensaios encontram-se no item 6.2.



Figura 5.13 Adensamento dos corpos-de-prova dos ensaios complementares.

##### 5.4.2.1 Ensaio de relacionados com a durabilidade

###### 5.4.2.1.1 Absorção por imersão

O ensaio de absorção por imersão dos corpos-de-prova das argamassa usadas nos sistemas de reparo foi efetuado segundo a NBR 9778/87. Foram ensaiados três corpos-de-prova de cada argamassa de reparo, conforme o procedimento descrito em norma.

###### 5.4.2.1.2 Absorção por capilaridade

O ensaio foi realizado em três corpos-de-prova para cada argamassa dos sistemas de reparo, conforme NBR 9779/95. O ensaio foi realizado em corpos-de-prova cilíndricos, com idade de 28 dias, conforme procedimento descrito na norma.

#### 5.4.2.1.3 Difusão de cloretos

Através do ensaio de difusão de cloretos determina-se o coeficiente de difusão efetivo de cloretos, e este pode ser usado como parâmetro que caracterizará a argamassa de modo que se possa avaliar sua durabilidade, no caso, sua resistência à penetração de íons.

Este ensaio consiste em submeter uma fina fatia de argamassa ou concreto (pastilha) entre duas câmaras com diferentes concentrações de cloretos, denominadas de célula de difusão, e imprimir uma diferença de potencial entre as duas câmaras.

Utilizou-se fatias de 10mm de espessura retiradas da região central de cada corpo-de-prova cilíndrico. Usou-se um total de duas fatias para cada sistema de reparo. As pastilhas foram revestidas com epóxi nas bordas e posteriormente foram colocadas entre as duas câmaras. As soluções utilizadas foram água destilada, na câmara positiva, e uma solução de NaCl 0,5 M, na câmara negativa (ANDRADE, 1993). Para se imprimir a diferença de potencial, utilizou-se de uma fonte de 10V, onde os eletrodos usados foram barras de aço de 25,4mm, nas câmaras positivas, e uma chapa de aço inox, na câmara negativa. A Figura 5.14 mostra esquematicamente o aparato utilizado, o qual foi desenvolvido por BAUER (1995).

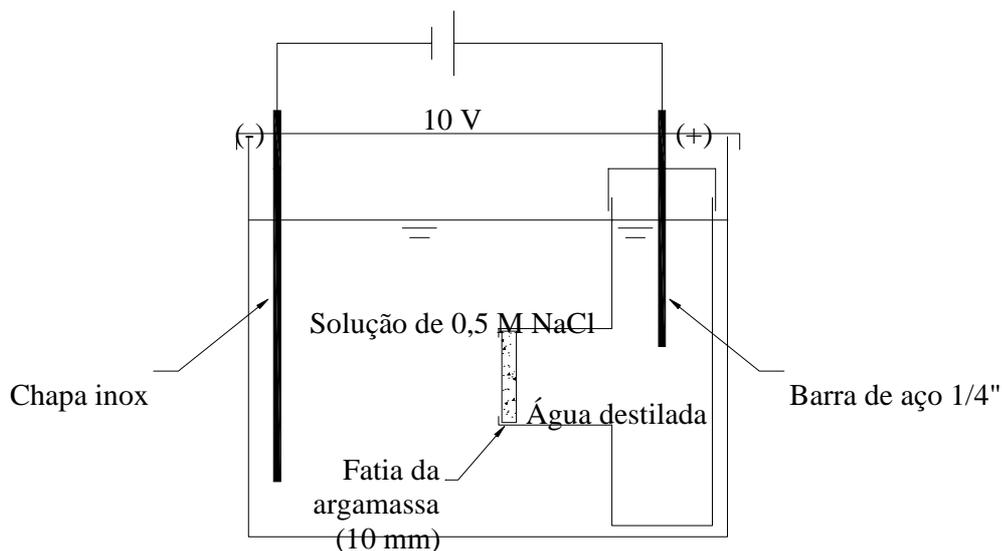


Figura 5.14 Aparato utilizado no ensaio de difusão de cloretos.

A câmara positiva utilizada no ensaio foi desenvolvida no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB), a qual é formada por conexões rosqueadas de tubo PVC de 100mm de diâmetro, onde a pastilha é colocada entre a solução rica em cloretos e a solução isenta destes (Figura 5.15). A vedação das roscas e a fixação do corpo-de-prova na câmara positiva são garantidas mediante o uso de adesivo a base de silicone (Figura 5.16), impedindo assim qualquer troca de íons entre as câmaras que não seja

pela área exposta da fatia de argamassa.



Figura 5.15 Câmara positiva utilizada no ensaio.



Figura 5.16 Vedação da câmara positiva com silicone.

A vantagem de usar esta câmara positiva é que a célula de difusão permite ensaiar várias amostras ao mesmo tempo, ou seja, permite o uso de várias câmaras positivas utilizando uma mesma fonte e uma mesma câmara negativa, tendo-se uma economia de tempo e material (Figura 5.17). Durante o ensaio monitorou-se a concentração da câmara negativa, sendo que esta sempre apresentou valores em torno de 0,5 M.

Resistências ôhmicas de  $1\Omega$  foram conectadas aos fios que interligavam a fonte às câmaras positivas, com a finalidade de se determinar os valores da corrente elétrica. O monitoramento da corrente elétrica foi utilizado somente para dar um indicativo do aumento

da quantidade de íons cloreto na solução anódica, pois quanto maior a corrente elétrica, maior a concentração de íons.



Figura 5.17 Células de difusão formadas por quatro câmaras positivas e uma câmara negativa

Foi coletado em torno de 1,5ml de solução de cada câmara positiva, uma vez por dia, durante os três primeiros dias, e duas vezes por dia, a partir de então, até o término do ensaio. Devido ao pequeno volume retirado das amostras, desconsiderou-se a alteração de concentração provocada pela diminuição deste.

O procedimento adotado para determinar a concentração de cloretos na solução da câmara positiva é descrito no Anexo C.

Este procedimento experimental visa determinar, no tempo, o fluxo de íons ( $J$ ) que passa através da pastilha de argamassa. Utiliza-se este valor de  $J$  na Equação de Nernst-Plank (Equação 3.10) para se determinar o valor do coeficiente efetivo de difusão ( $D$ ). Convém ressaltar que a Equação 3.10 é válida somente para condições em estado estacionário, ou seja,  $J$  deve ser constante (ANDRADE, 1993).

#### 5.4.2.1.4 Determinação do teor de cloretos livres nas argamassas

Os corpos-de-prova prismáticos que não possuíam barras, conforme citado anteriormente, foram usados para se determinar o teor de cloretos nas argamassas, no quarto e oitavo ciclo, para as profundidades de 5 e 10mm, traçando-se assim um perfil da penetração dos íons nas argamassas em estudo.

A coleta das amostras se deu através da perfuração dos corpos-de-prova até as profundidades desejadas, utilizando-se uma furadeira de eixo vertical fixo e uma broca de diâmetro de 6mm (Figura 5.18). Utilizou-se ambas as faces dos corpos-de-prova na coleta das amostras fazendo-se furos distintos para as duas profundidades, onde posteriormente, estes foram preenchidos com uma resina epóxi.



Figura 5.18 Coleta de amostra dos corpos-de-prova para determinação do teor de cloretos.

O material coletado foi analisado no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) através do método de potenciometria direta. Para determinar o teor de cloretos nas argamassas utilizou-se o procedimento descrito no Anexo D.

#### 5.4.2.2 Ensaios mecânicos

##### 5.4.2.2.1 Resistência à compressão

Este ensaio foi realizado seguindo as instruções da NBR 7215/91. As resistências à compressão das argamassas utilizadas nos sistemas de reparo foram obtidas aos 3, 7 e 28 dias, utilizando-se quatro corpos-de-prova para cada idade. Para o rompimento dos corpos-de-prova foi utilizada uma prensa hidráulica da marca Amsler (Figura 5.19), executando-se os ensaios no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB).



Figura 5.19 Prensa hidráulica da marca Amsler.

#### 5.4.2.2.2 Módulo de deformação

Não há, dentre as normas brasileiras, uma que seja específica para a determinação do módulo de deformação de argamassas. Seguiu-se, portanto, as prescrições da NBR 8522/84 para o plano de carga número três, utilizando-se três corpos-de-prova cilíndricos ( $\varnothing=5\text{cm}$  e  $h=10\text{cm}$ ) para cada argamassa de reparo, aos 28 dias de idade.

Utilizou-se quatro pastilhas de aço, as quais foram coladas, duas de cada lado, nos corpos-de-prova. As mesmas serviram de base para fixação dos extensômetros mecânicos (Figura 5.20), os quais mediam os deslocamentos dos corpos-de-prova, em milésimo de milímetro, de acordo com o aumento das cargas. Essa metodologia já havia sido utilizada anteriormente em outras pesquisas (OLIVEIRA, 1998, dentre outros) do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB) obtendo-se bons resultados.



Figura 5.20 Leitura das deformações dos corpos-de-prova, através de extensômetros mecânicos.

## 6 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS

A seguir, apresenta-se, para cada sistema de reparo em estudo, a evolução do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ), da taxa de intensidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e da resistência ôhmica ( $R_{\text{ohm}}$ ), para ambos os cobrimentos adotados. A média foi calculada a partir dos quatro valores existentes para as variáveis em estudo, para cada cobrimento, por sistema de reparo. No cálculo da média, retirou-se os valores considerados espúrios.

O critério de avaliação dos resultados das medidas de potencial, utilizando-se o eletrodo de cobre-sulfato de cobre (ESC), segundo a *ASTM C 876-91*, encontra-se na Tabela 3.2. Os valores de -200 mV e -350mV correspondem à -157mV e -275mV, respectivamente, quando usado o eletrodo de calomelano saturado (ECS).

A técnica eletroquímica de Resistência de Polarização ( $R_p$ ) foi utilizada para se obter a taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ), onde o valor de B utilizado foi de 26mV, quando a barra apresentava corrosão, ou seja, quando o potencial de corrosão medido pelo eletrodo de referência era mais negativo que -275mV (ECS). Para valores mais positivos que -275mV (ECS), ou seja, quando a barra ainda apresentava passividade, utilizou-se B=52mV (ANDRADE & ALONSO, 1990; BAUER, 1995; NEPOMUCENO, 1992; MONTEIRO, 1996).

No Anexo E encontra-se um comparativo da evolução do potencial de corrosão médio e da taxa de corrosão média por cobrimento, para cada sistema de reparo.

#### 6.1.1 Sistema de reparo de referência

As Figuras 6.1 a 6.3 mostram a evolução do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ), da taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e da resistência ôhmica ( $R_{\text{ohm}}$ ) do sistema de reparo de referência (argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa, a/c=0,5), para cada cobrimento. A Figura 6.4 mostra o comportamento da variação da massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo em análise.

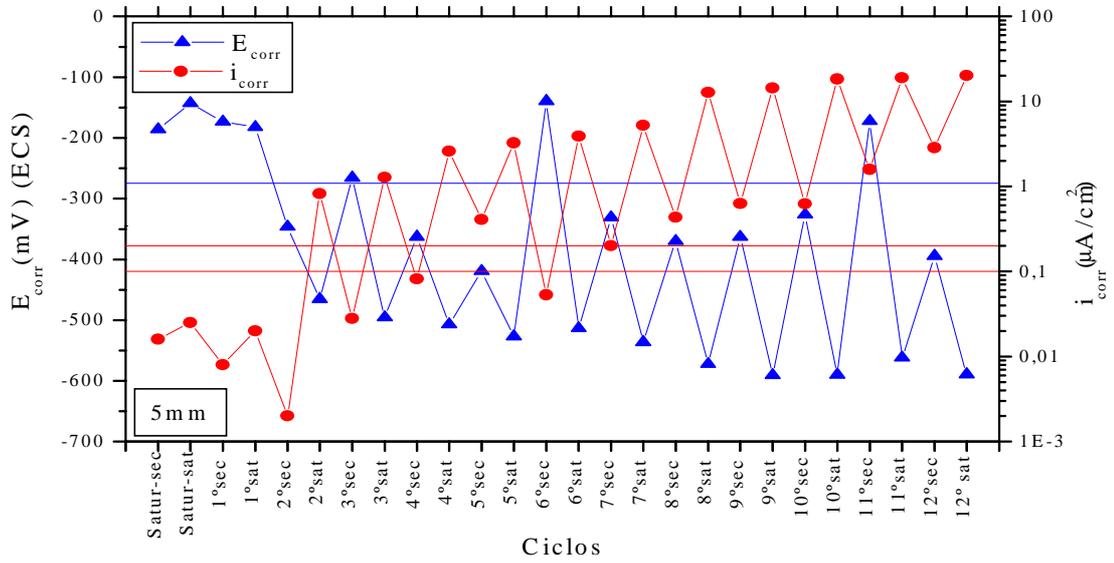


Figura 6.1 Evolução do  $E_{corr}$  e da  $i_{corr}$ , para o cobrimento de 5mm, do sistema de reparo de referência

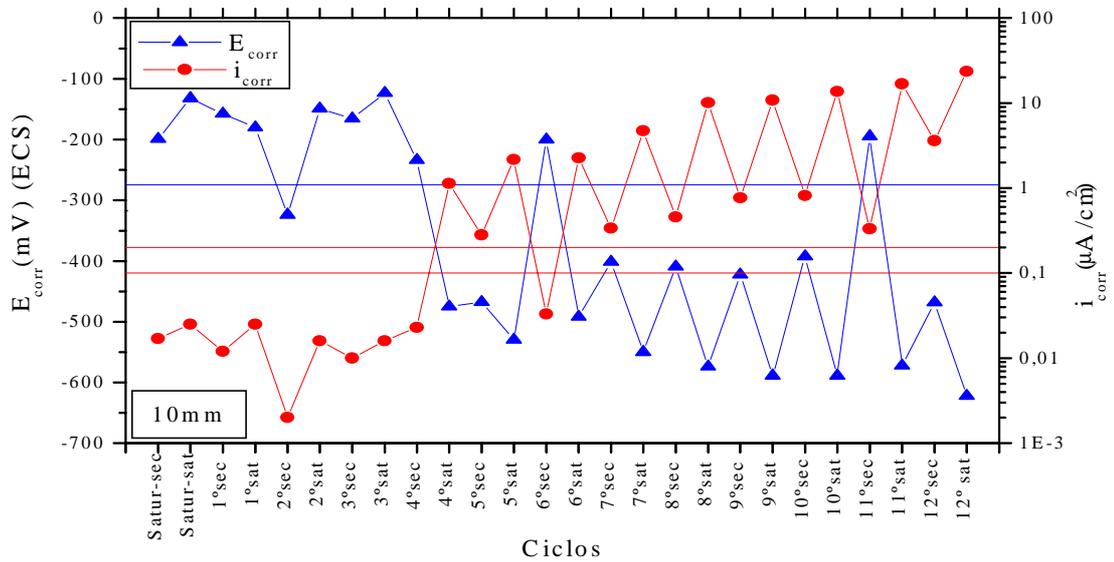


Figura 6.2 Evolução do  $E_{corr}$  e da  $i_{corr}$ , para o cobrimento de 10mm, do sistema de reparo de referência

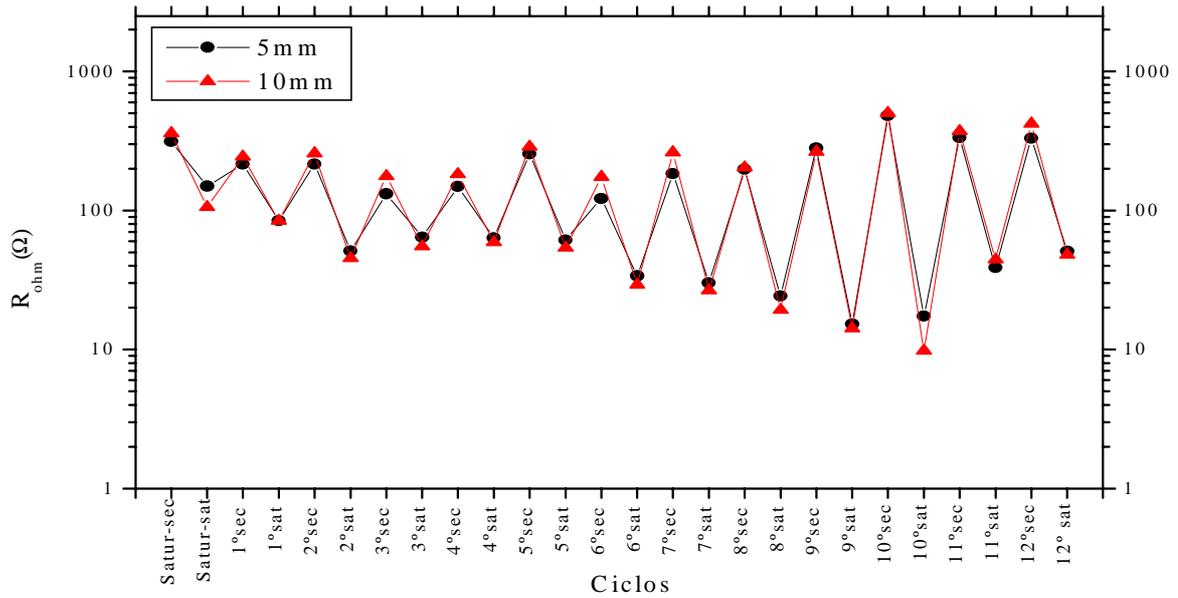


Figura 6.3 Evolução da  $R_{ohm}$  do sistema de reparo de referência

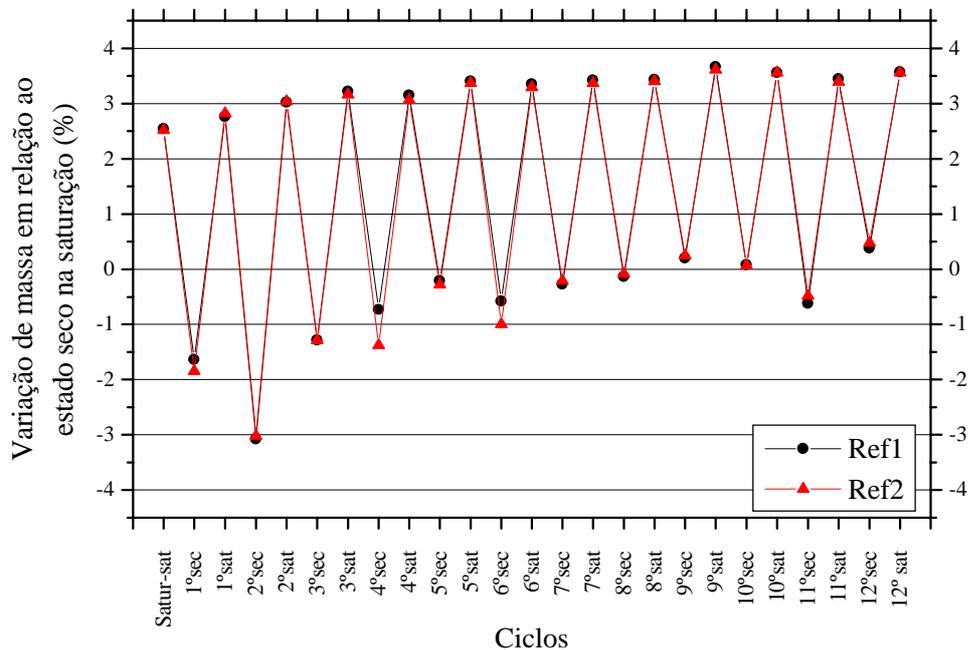


Figura 6.4 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo de referência

Para o sistema de reparo de referência, observa-se que as barras com cobertura de 5mm ultrapassaram, no segundo ciclo, estado saturado, os valores limites a partir dos quais considera-se que a barra está corroendo. Este valores são: para o potencial de corrosão, -275 mV quando se utiliza o eletrodo de calomelano saturado (ASTM C 876, 1991) e para a taxa de corrosão, 0,1 a 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  (ALONSO & ANDRADE, 1990). As barras com 10mm de

cobrimento romperam esta barreira somente no quarto ciclo, estado saturado. Este acréscimo no tempo de iniciação da corrosão devido ao uso de um cobrimento maior é um resultado coerente com a literatura (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; entre outros), onde encontra-se que o cobrimento age como uma barreira física dificultando a penetração de agentes agressivos.

A resistência ôhmica oscilou seus valores de acordo com os ciclos, obtendo os menores valores para os semi-ciclos úmidos e os maiores valores para os semi-ciclos secos. O valor máximo encontrado para a resistência ôhmica foi em torno de 500  $\Omega$ , para ambos os cobrimentos.

Observa-se uma grande amplitude na variação da massa dos corpos-de-prova, o que significa que estes absorvem e perdem muita água comparativamente aos demais, em função de uma maior porosidade de sua argamassa. A tendência de ganho de massa dos corpos-de-prova é resultado de uma perda na eficiência da secagem aliado a uma maior higroscopicidade resultante do aumento do teor de cloretos na massa dos corpos-de-prova ao longo dos ciclos.

### 6.1.2 Sistema de reparo com adição de sílica ativa

As figuras 6.5 a 6.7 mostram a evolução do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ), da taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e da resistência ôhmica ( $R_{\text{ohm}}$ ) do sistema de reparo com adição de sílica ativa (argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa,  $a/c=0,5$ , com adição de 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento), para cada cobrimento. A Figura 6.8 mostra o comportamento da variação da massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo em análise.

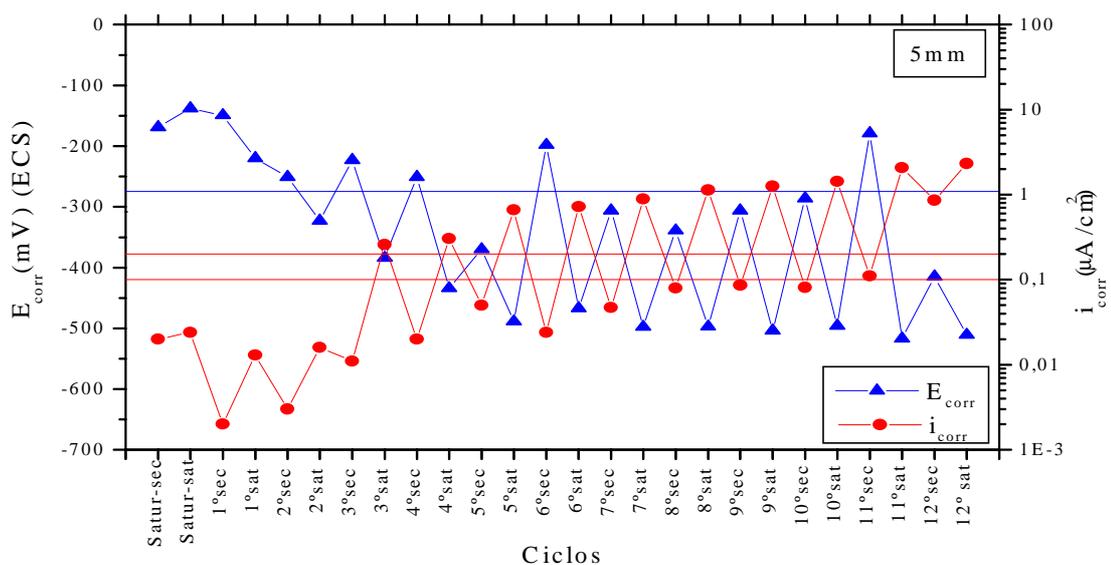


Figura 6.5 Evolução do  $E_{\text{corr}}$  e da  $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 5mm, do sistema de reparo com adição de sílica ativa

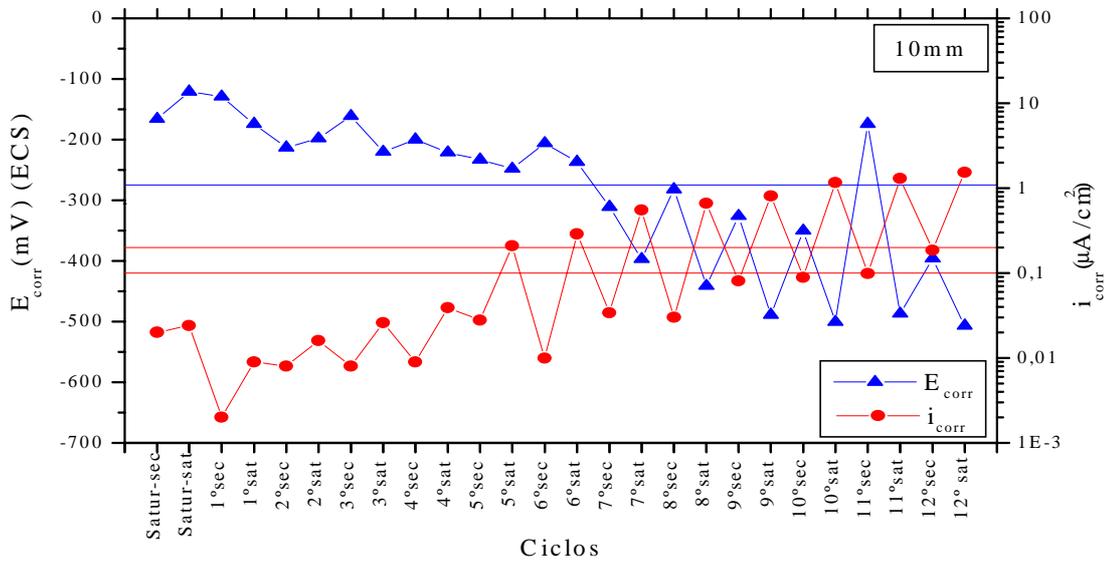


Figura 6.6 Evolução do  $E_{\text{corr}}$  e da  $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 10mm, do sistema de reparo com adição de sílica ativa

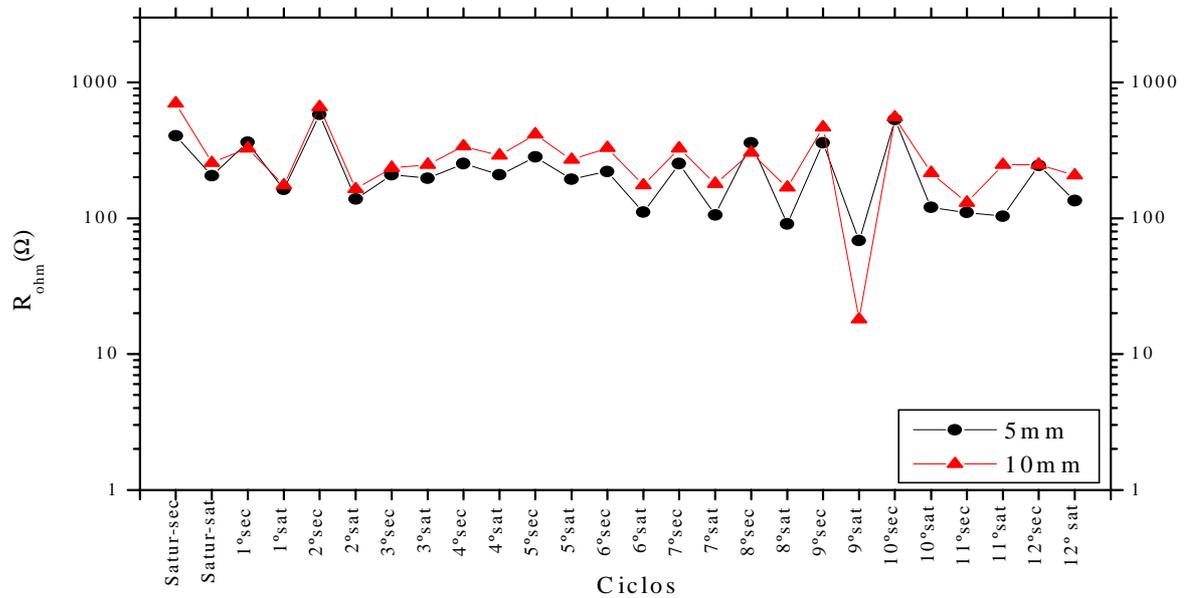


Figura 6.7 Evolução da  $R_{\text{ohm}}$  do sistema de reparo com adição de sílica ativa

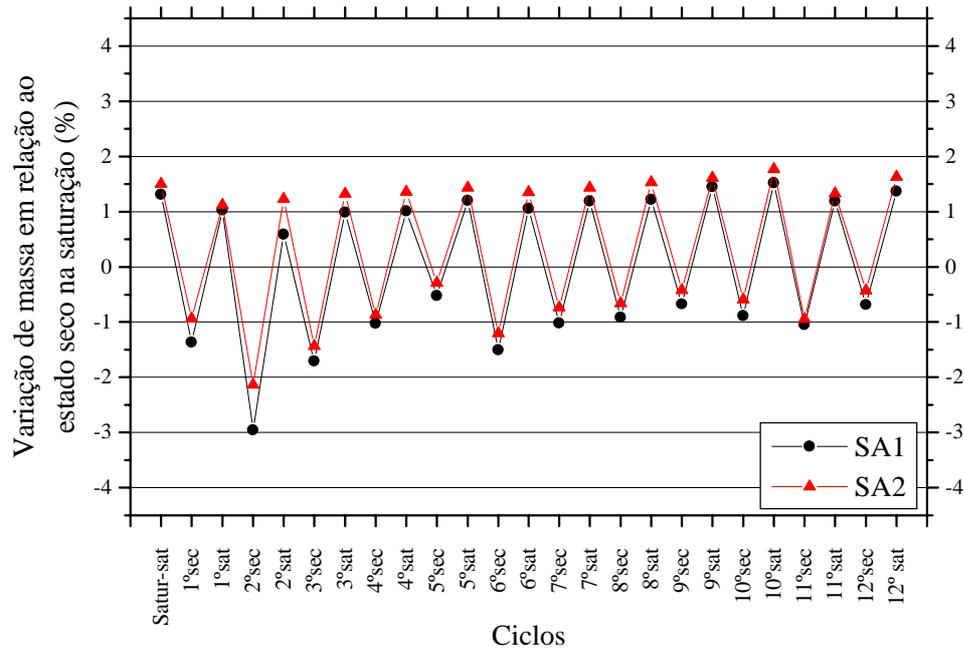


Figura 6.8 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo com adição de sílica ativa

A adição de sílica ativa proporcionou uma melhora do sistema de reparo pois, para as barras com 5mm de cobrimento, observou-se variações entre os valores limites do potencial de corrosão a partir do segundo ciclo, estado saturado, sendo que a taxa de corrosão somente ultrapassou a zona limítrofe no terceiro ciclo, estado saturado. Para as barras com 10mm de cobrimento, a despassivação provavelmente ocorreu no quinto ciclo.

Este aumento do tempo de penetração dos íons cloreto, quando comparados com o sistema de referência, pode ser atribuído principalmente à uma mudança microestrutural na argamassa de reparo, em virtude do depósito dos grãos de sílica (tamanho médio de aproximadamente  $0,1\mu\text{m}$ ) entre os poros da mesma (efeito microfíler), proporcionando um refinamento dos poros da argamassa. Uma outra justificativa para a diminuição da porosidade seria o refinamento dos poros proporcionado pelo efeito pozolânico, já que os corpos-de-prova foram ensaiados aos 28 dias. Esta diminuição da porosidade é refletida diretamente na variação de massa dos corpos-de-prova, onde a amplitude de variação da massa é menor que a da argamassa de referência.

FIGUEIREDO (1998), ao avaliar o desempenho de argamassas de reparo de traço 1:2, modificadas com a adição de sílica ativa, no teor de 6% sobre a massa do cimento, encontrou valores para a intensidade de corrosão 52% inferiores que os encontrados para as argamassas sem modificações, aumentando a fase de iniciação em 60%, em média. Segundo a autora, isto indica que a capacidade de redução do ingresso de cloretos foi maior nas argamassas que contém sílica ativa, pois provavelmente a quantidade de cloretos que chegou até as armaduras foi menor.

Segundo pesquisa realizada por MONTEIRO (1996) utilizando três tipos de cimentos disponíveis no mercado nacional (CPII-F 32, CPIII-32 e CPV-ARI-RS-MS), onde este último possui um teor de 25% de escória de alto-forno e 5% de sílica ativa, e o penúltimo possui um teor de 37,7% de escória de alto-forno, o desempenho das argamassas, quanto ao ensaio de resistência à corrosão por cloretos, que utilizaram estes dois últimos supracitados cimentos foi superior ao desempenho das argamassas que utilizaram o cimento com adição de fíler (CPII-F 32), ratificando as justificativas anteriormente propostas para um incremento no desempenho, com relação à durabilidade, de argamassas que utilizaram a sílica ativa (pozolana) ou outras adições.

Nota-se um pequeno aumento da resistência ôhmica da argamassa com adição de sílica ativa devido a uma maior compactidade proporcionada pelos efeitos já acima mencionados. Esta maior compactidade dificulta a penetração de água, proporcionando, assim, maiores valores para a resistência ôhmica da argamassa. Os valores máximos obtidos foram em torno de 600  $\Omega$ , para ambos os cobrimentos.

### 6.1.3 Sistema de reparo com adição de nitrito de sódio

As Figuras 6.9 a 6.11 mostram a evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), da taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) e da resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ) do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio (argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa,  $a/c=0,5$ , com adição de 2% de nitrito de sódio em relação à massa de cimento), para cada cobrimento. A Figura 6.12 mostra o comportamento da variação da massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo em análise.

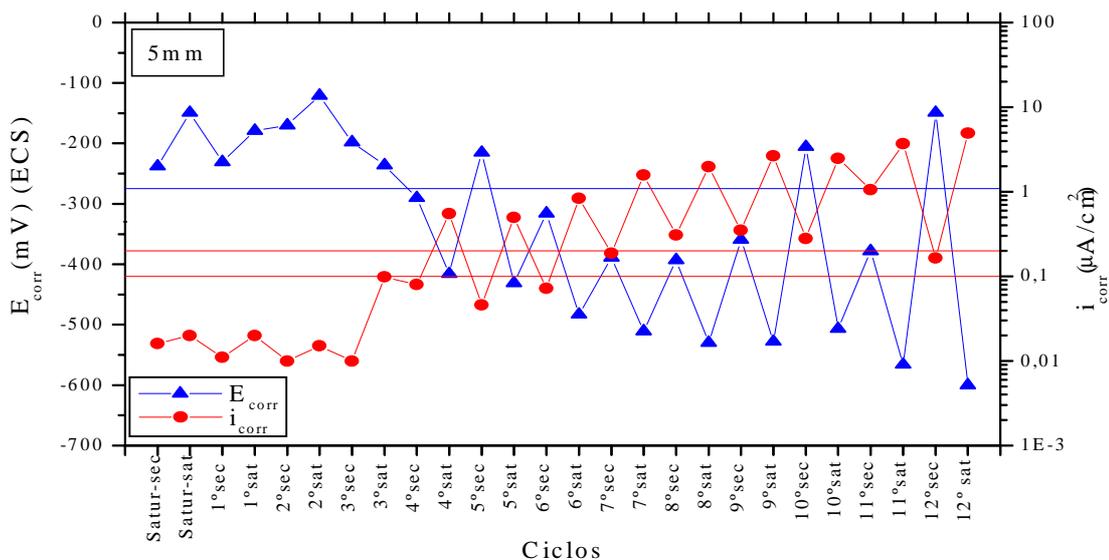


Figura 6.9 Evolução do  $E_{corr}$  e da  $i_{corr}$ , para o cobrimento de 5mm, do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio

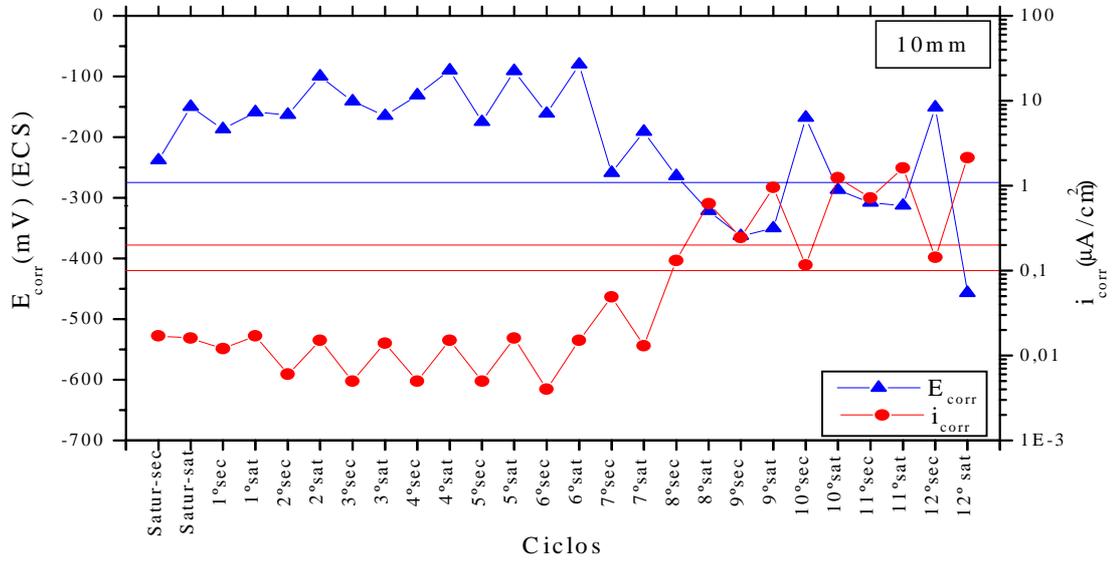


Figura 6.10 Evolução do  $E_{corr}$  e da  $i_{corr}$ , para o cobrimento de 10mm, do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio

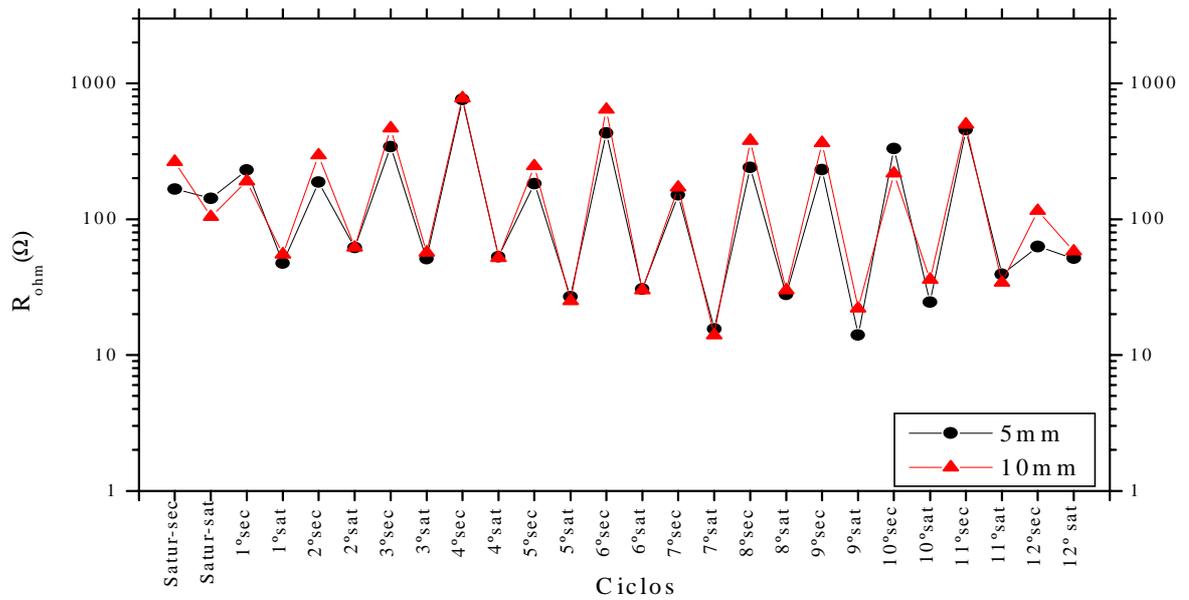


Figura 6.11 Evolução da  $R_{ohm}$  do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio

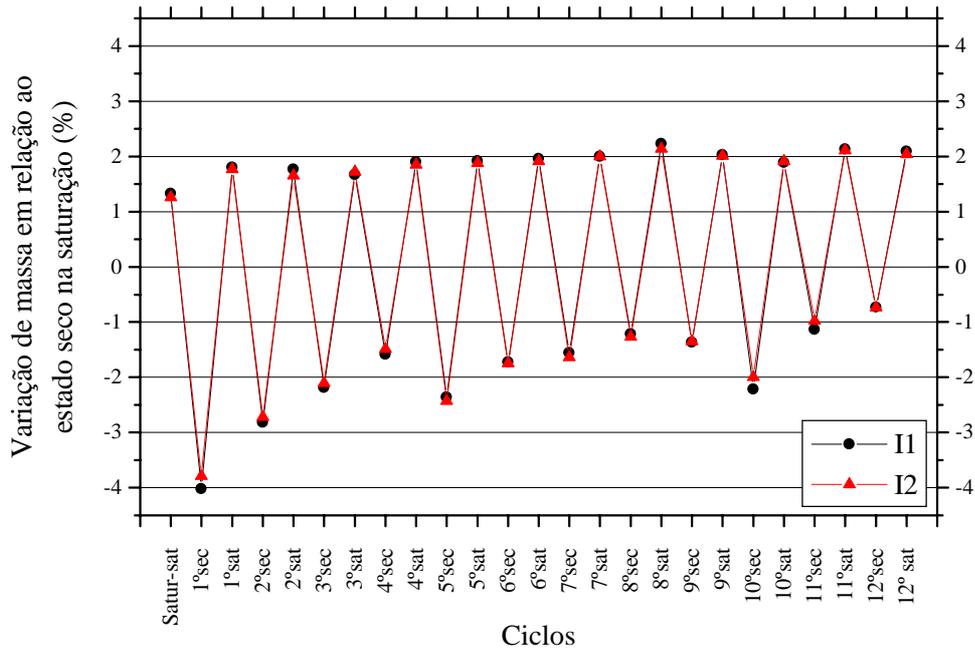


Figura 6.12 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo com inibidor de corrosão (nitrito de sódio)

Para as barras com 5mm de cobrimento do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio, o semi-ciclo número quatro, saturado, foi o estágio onde provavelmente as barras despassivaram. Para o cobrimento de 10mm, observou-se a superação dos valores limítrofes tanto do potencial quanto da taxa de corrosão somente no oitavo ciclo.

A adição do nitrito de sódio tem como objetivo principal combater a corrosão de armaduras, induzindo um efeito inibidor contra a ação dos cloretos e da carbonatação, reduzindo assim, significativamente, a taxa de corrosão (ANDRADE & ALONSO, 1990). Esta inibição, no caso específico da corrosão por íons de ácidos fortes, onde dentre eles estão os íons cloreto, justifica-se devido ao combate da acidificação localizada provocada pelos agentes agressivos, já que os nitritos reagem consumindo muitos prótons, inabilitando assim a formação dos pites (GALVELE, 1979). Segundo VILLEMUR & BARBOSA (1998), a capacidade protetora do nitrito de sódio pode associar-se a sua participação no desenvolvimento da película passivante que se forma sobre o aço, através da indução da formação de óxidos e hidróxidos sobre a superfície do metal.

Os resultados encontrados são coerentes aos trabalhos de LIMA et alli (1999) e VASCONCELOS (1997), que reduziram a velocidade de corrosão das barras, aumentando o período de iniciação da corrosão somente ao se adicionar nitrito de sódio à mistura, no teor de 2%, em relação à massa do cimento, quando comparados com as argamassas de referência (argamassas com cloretos).

Provavelmente além de inibir a corrosão, o nitrito de sódio altera a microestrutura das argamassas e concretos, tornando-a menos porosa. Isto é notado através do comportamento

apresentado pela massa dos corpos-de-prova, onde percebe-se que a amplitude alcançada é inferior à amplitude da variação da massa dos corpos-de-prova sem inibidor, o que caracteriza que o corpo-de-prova esta absorvendo menos água que o de referência.

Evidenciando tal efeito, LIMA (1996), avaliando a absorção de água em concretos modificados com adições de nitrito de sódio nos teores de 2 e 4%, obteve 2,82 e 5,24%, respectivamente, de redução no coeficiente de absorção por imersão. Em ensaios de avaliação do índice de vazios em concretos com adições de 2 e 4% do mesmo inibidor, obteve redução de 2,78 e 3,89% nos índices, respectivamente. Este fato vem a justificar o aumento do valor médio da resistência ôhmica da argamassa com nitrito, em relação à argamassa de referência, obtendo valores de até 700  $\Omega$  para ambos os cobrimentos, obtendo-se coerência com o resultado apresentado por LIMA et alli (1999), os quais encontraram resistências ôhmicas maiores para as argamassas com adição de nitrito de sódio, quando comparadas com a argamassa de referência.

Entretanto, observa-se que no decorrer do ensaio, a partir do sétimo ciclo, os valores da resistência ôhmica diminuem, provavelmente devido a um aumento da concentração de cloretos na argamassa, facilitando a higroscopicidade da mesma, e um conseqüente aumento de massa dos corpos de prova.

#### 6.1.4 Sistema de reparo com adição de estireno-butadieno

As Figuras 6.13 a 6.15 mostram a evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), da taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) e da resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ) do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno (argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa,  $a/c=0,5$ , com adição de 20% de estireno-butadieno em relação à massa de cimento), para cada cobrimento. A Figura 6.16 mostra o comportamento da variação da massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo em análise.

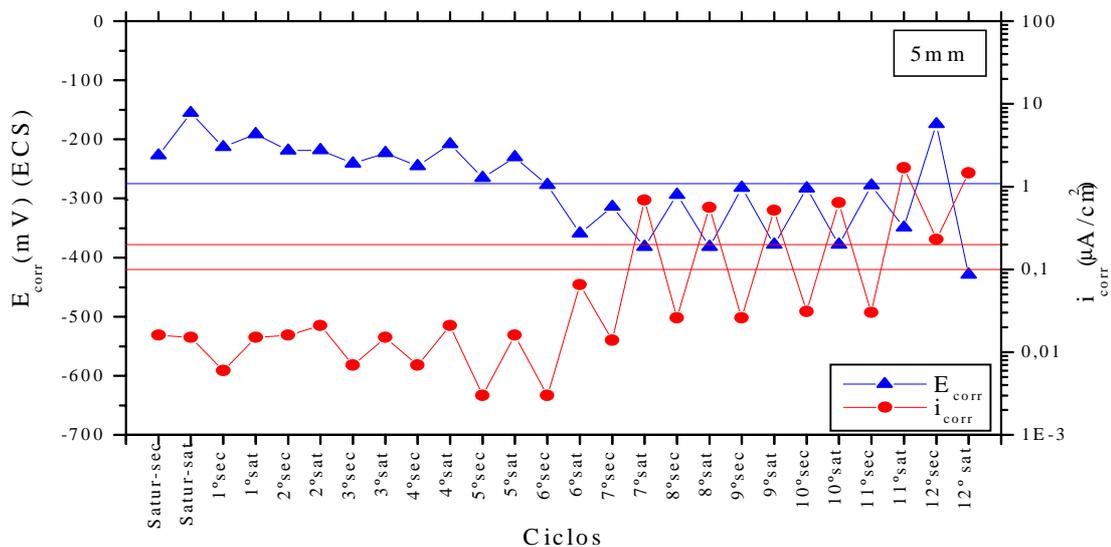


Figura 6.13 Evolução do  $E_{corr}$  e da  $i_{corr}$ , para o cobrimento de 5mm, do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno

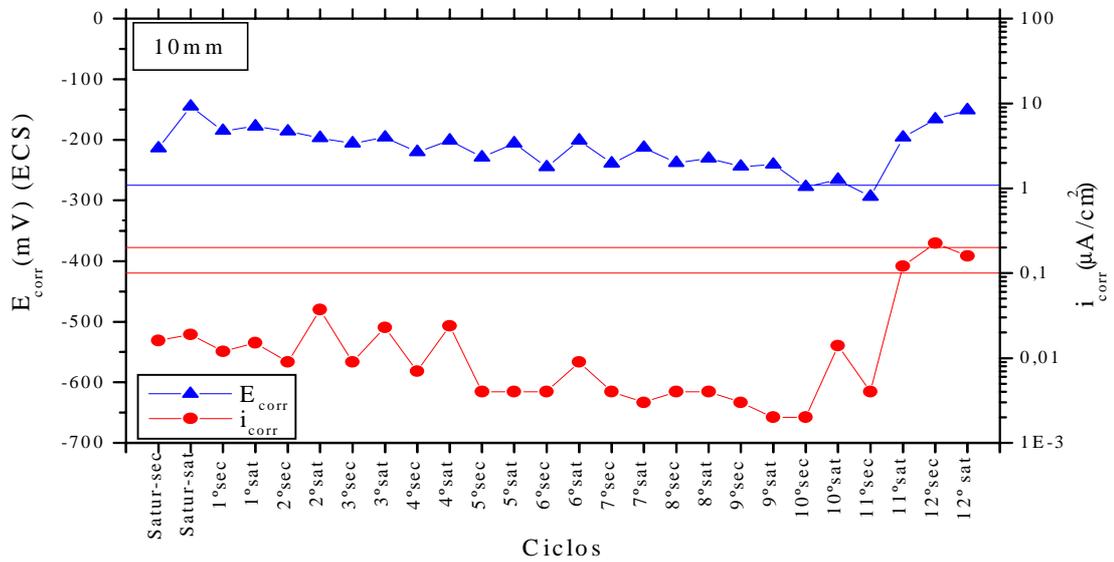


Figura 6.14 Evolução do  $E_{\text{corr}}$  e da  $i_{\text{corr}}$ , para o cobrimento de 10mm, do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno

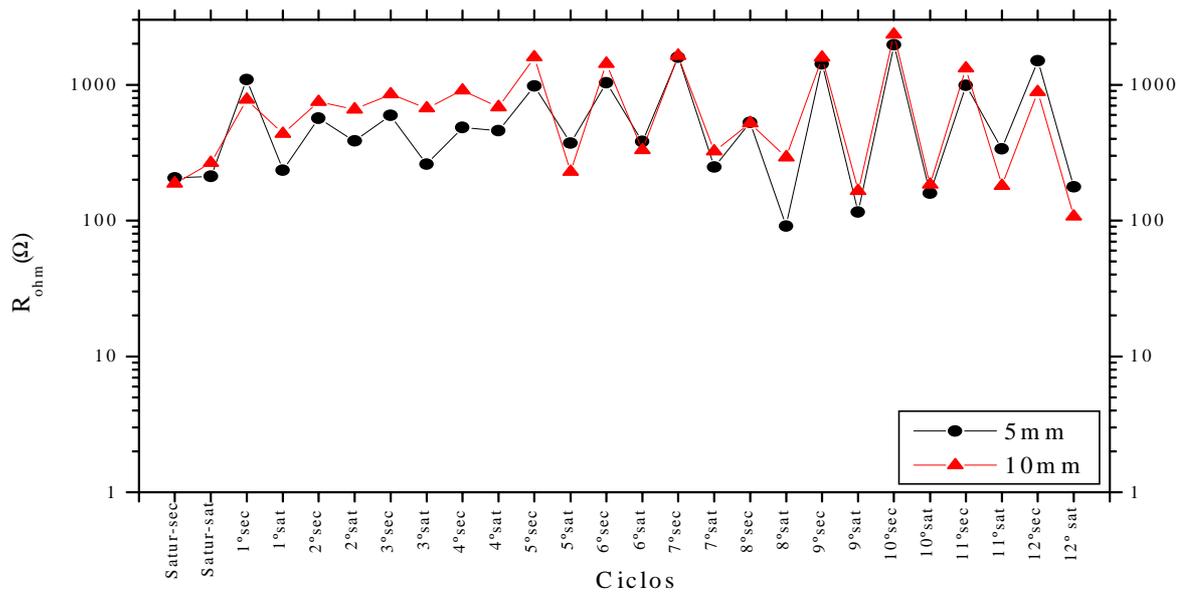


Figura 6.15 Evolução da  $R_{\text{ohm}}$  do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno

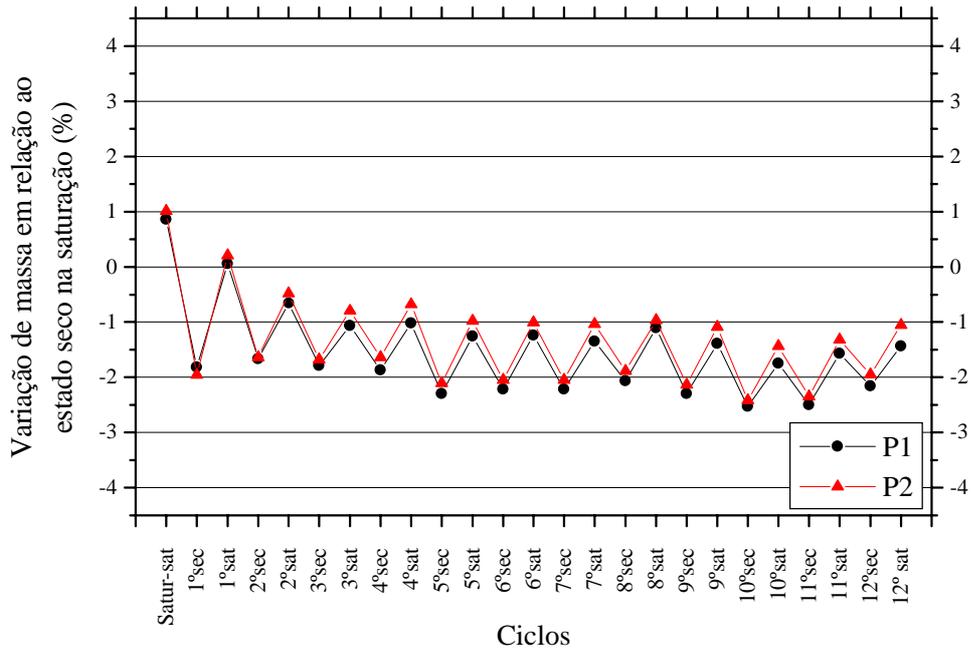


Figura 6.16 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno

Resultado bem superior aos demais foi obtido pelo sistema de reparo com adição do polímero estireno-butadieno, onde para as barras com 5mm de revestimento, o potencial médio atingiu o limite de despassivação no ciclo seis e a velocidade de corrosão somente ultrapassou os valores limites no sétimo semi-ciclo saturado. Para o revestimento de 10mm, não se observou a superação dos valores limítrofes do potencial de corrosão embora a taxa de corrosão tenha superado tais valores no décimo primeiro semi-ciclo, no estado saturado, observando-se uma incoerência entre os valores apresentados após este ciclo. Isto provavelmente ocorre devido a perturbações introduzidas no sistema, em virtude do período em que os corpos-de-prova ficaram no recipiente com sílica gel.

A superioridade do sistema de reparo com adição de polímero SBR provavelmente se justifica devido a uma tendência de se formar uma matriz monolítica, pois os poros que não foram ocupados pelos produtos de hidratação do cimento tendem a ser preenchidos pelo polímero, com uma interpenetração da matriz de cimento com o polímero, envolvendo os agregados.

Através da amplitude da variação da massa dos corpos-de-prova nota-se que a argamassa do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno é a menos permeável, pois o ganho e a perda de massa devido aos ciclos de umedecimento e secagem são os menores obtidos. Em convergência aos resultados obtidos, OHAMA (1987) afirma que a absorção de água e a permeabilidade de argamassas e concretos modificados com polímeros de base látex, como é o caso do SBR, decresce quando comparados às argamassas sem adições, pois o total

de poros e o volume dos mesmos decresce com o uso do polímero. Exemplificando essa afirmação, tal pesquisador diminuiu a absorção de água das argamassas, no período de 48 horas, em 39, 57 e 66%, somente adicionando 5, 10 e 20% de SBR sobre a massa do cimento, respectivamente. Pode-se observar que há um decréscimo na massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo em análise. Isto pode ser explicado devido ao critério de saturar os corpos-de-prova adotado no início de todos os ensaios. Possivelmente o ciclo de umedecimento e secagem adotado não é o conveniente para este sistema de reparo pois este, primeiramente, perde toda a água excedente para posteriormente aumentar sua massa conforme os ciclos.

Provavelmente, em virtude da maior compactidade da argamassa com adição de SBR, obteve-se os maiores valores de resistência ôhmica, chegando a 2350  $\Omega$  para o cobrimento de 10mm e 2000  $\Omega$  para o cobrimento de 5mm.

### 6.1.5 Sistema de reparo com pintura de zinco nas barras

As Figuras 6.17 a 6.19 mostram a evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), da taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) e da resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ) do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras (argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa, a/c=0,5, com pintura de zinco nas barras), para cada cobrimento. A Figura 6.20 mostra o comportamento da variação da massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo em análise.

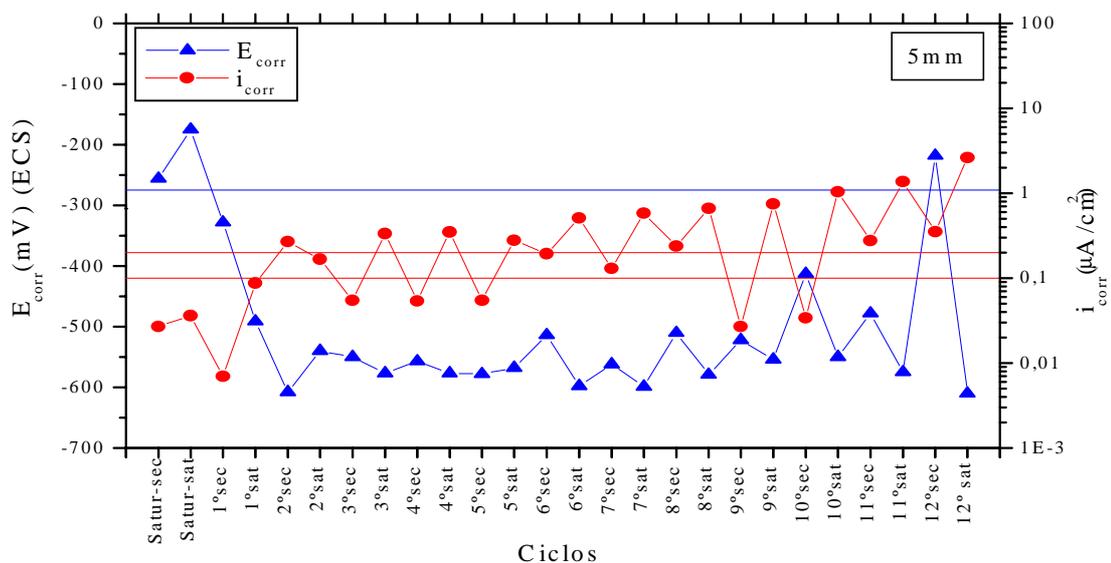


Figura 6.17 Evolução do  $E_{corr}$  e da  $i_{corr}$ , para o cobrimento de 5mm, do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras

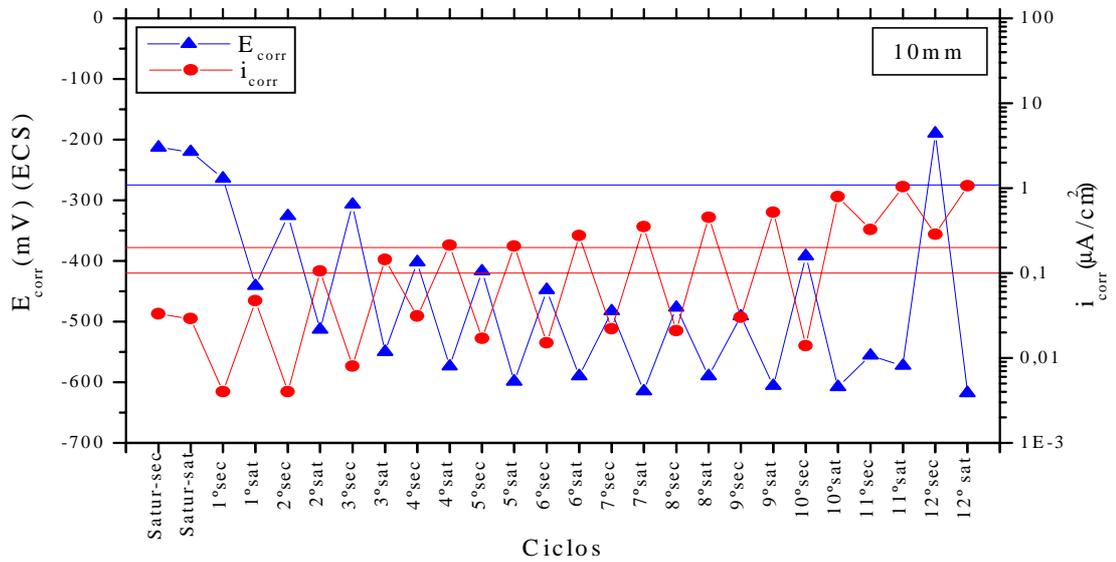


Figura 6.18 Evolução do  $E_{corr}$  e da  $i_{corr}$ , para o cobrimento de 10mm, do sistema de reparo com com pintura de zinco nas barras

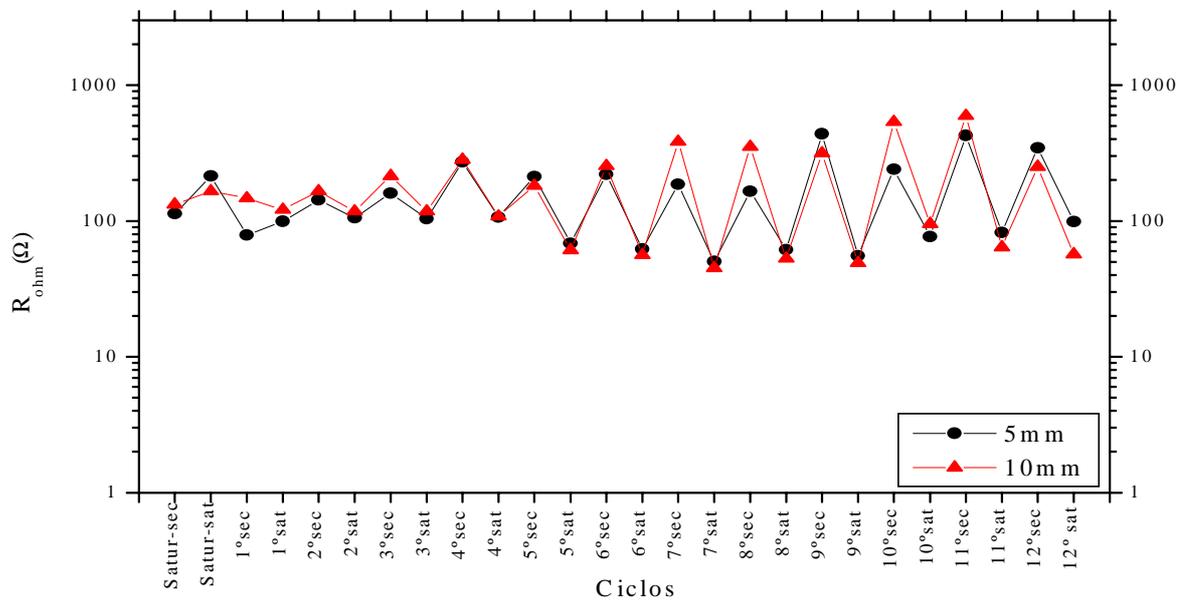


Figura 6.19 Evolução da  $R_{ohm}$  do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras

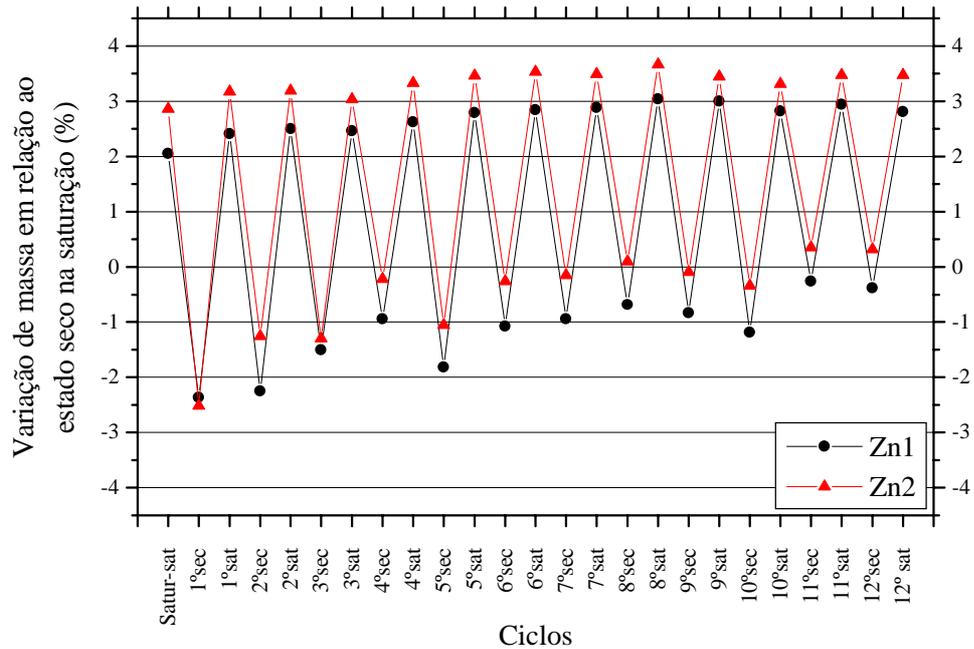


Figura 6.20 Evolução da variação de massa dos corpos-de-prova do sistema de reparo onde as barras são pintadas com um primer rico em zinco

O potencial de corrosão do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras apresentou o pior resultado dentre todos, pois obteve valores abaixo do valor limite, já no primeiro ciclo, para ambos os cobrimentos. Entretanto, a taxa de corrosão não apresentou o mesmo comportamento do potencial, ultrapassando os valores limites no segundo ciclo, para o cobrimento de 5mm, e no terceiro ciclo, para 10mm de cobrimento.

Os altos valores do potencial e da taxa de corrosão logo nas primeiras idades podem ser explicados devido à corrosão do zinco, o que significa que ele está efetivamente protegendo galvanicamente a armadura. Este fato pode ser comprovado através da perda de massa gravimétrica das barras que mostram, conforme apresentado no item 6.2.3 e Anexo F, que as barras revestidas com zinco obtiveram uma perda real de massa (descontando a corrosão do revestimento de zinco) pouco significativa, em comparação à perda de massa das barras dos demais sistemas.

FIGUEIREDO (1994), em sua pesquisa sobre revestimentos aplicados sobre as armaduras, observou comportamento similar ao aqui apresentado, para o revestimento rico em zinco, tendo obtido para este revestimento potenciais mais negativos dentre todos os estudados, em torno de  $-690\text{mV}$  (ECS), valores próximos aos aqui encontrados e aos encontrados por PÉREZ et alli (1999). Resultado similar obtiveram MORRIS et alli (1998), para revestimentos de pintura epóxica rica em zinco e com zinco projetado, alcançando potenciais cerca de  $300\text{mV}$  mais negativos que os registrados pelas barras de referência.

Os valores da resistência ôhmica da argamassa deste sistema de reparo deram valores similares aos encontrados para a argamassa de referência, assim como a amplitude da variação

de massa dos corpos-de-prova, havendo portanto coerência no resultado, já que as argamassas são idênticas.

### 6.1.6 Comparação entre os sistemas de reparo com relação ao desempenho

As Figuras 6.21 a 6.26 mostram, comparativamente, os valores de  $E_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e  $i_{\text{corr}}$  de todos os sistemas de reparo estudados, para os cobrimentos de 5 e 10mm, e a Figura 6.27 mostra o comportamento da variação de massa dos corpos-de-massa dos sistemas de reparo aos longo dos ciclos, onde:

- **Ref:** argamassa de referência de cimento e areia, traço 1:3,  $a/c=0,5$ ;
- **SA:** argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa,  $a/c=0,5$ , com adição de 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento;
- **I:** argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa,  $a/c=0,5$ , com adição de 2% de nitrito de sódio em relação à massa de cimento;
- **P:** argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa,  $a/c=0,5$ , com adição de 20% de estireno-butadieno em relação à massa de cimento e;
- **Zn:** argamassa de cimento e areia, traço 1:3 em massa,  $a/c=0,5$ , com pintura de zinco nas barras de aço.

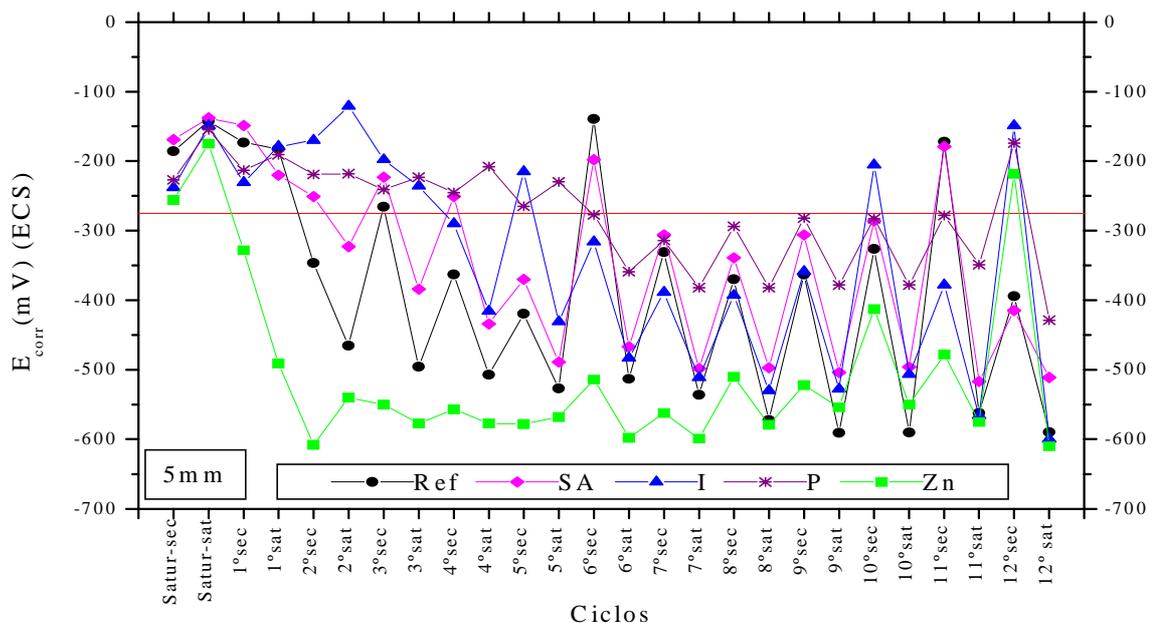


Figura 6.21 Evolução comparativa do  $E_{\text{corr}}$  para 5mm de cobertura

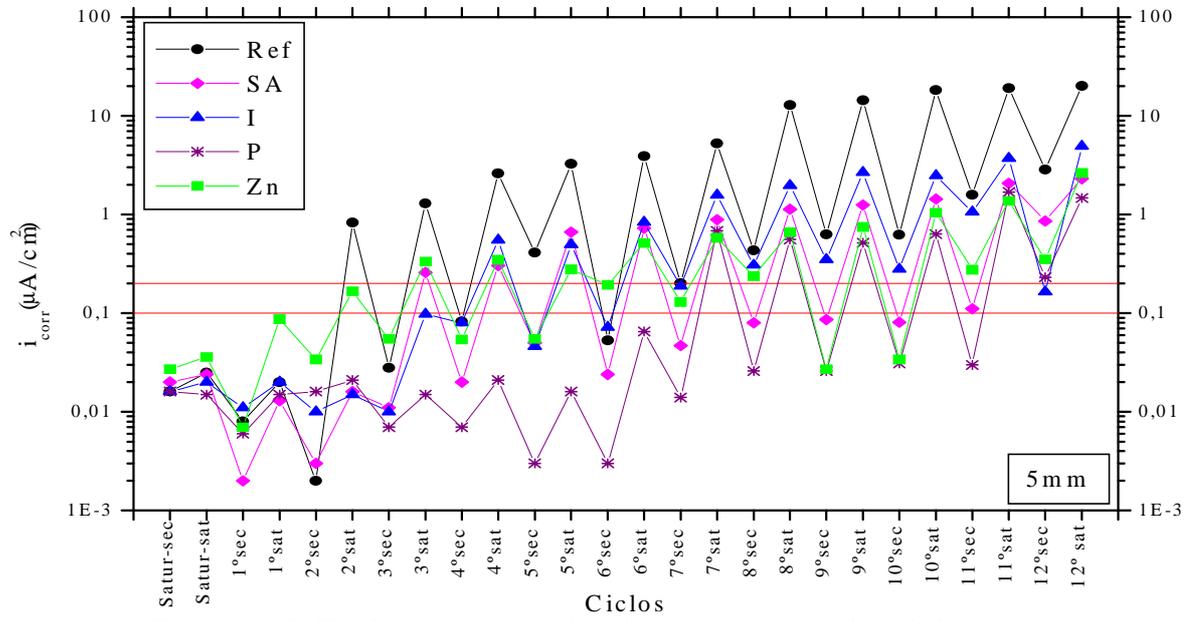


Figura 6.22 Evolução comparativa da  $i_{corr}$  para 5mm de cobrimento

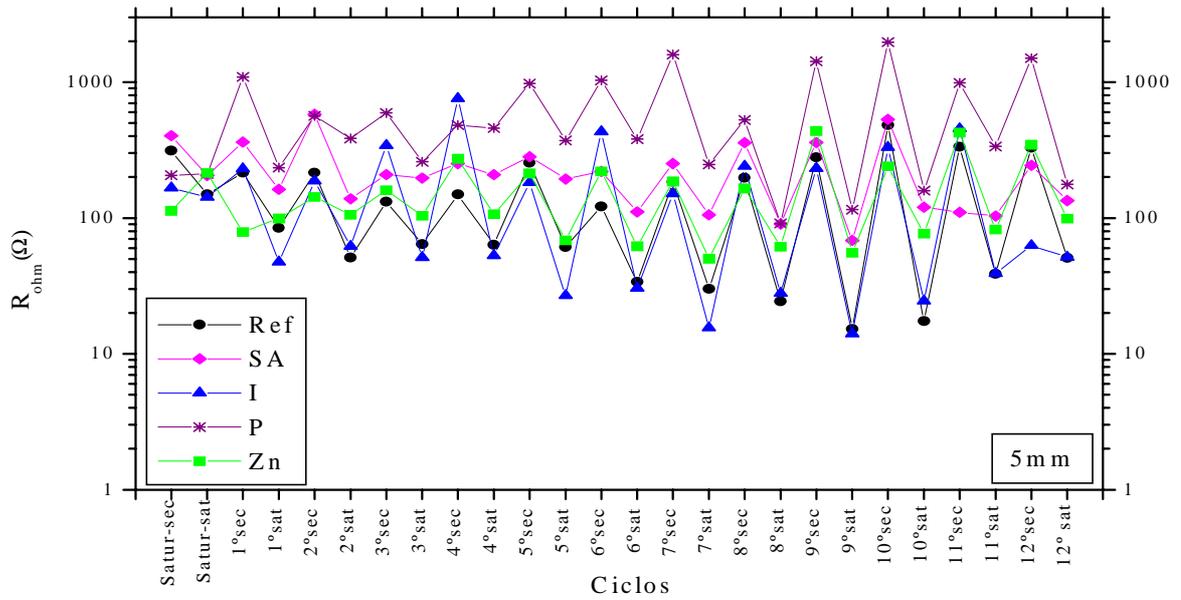
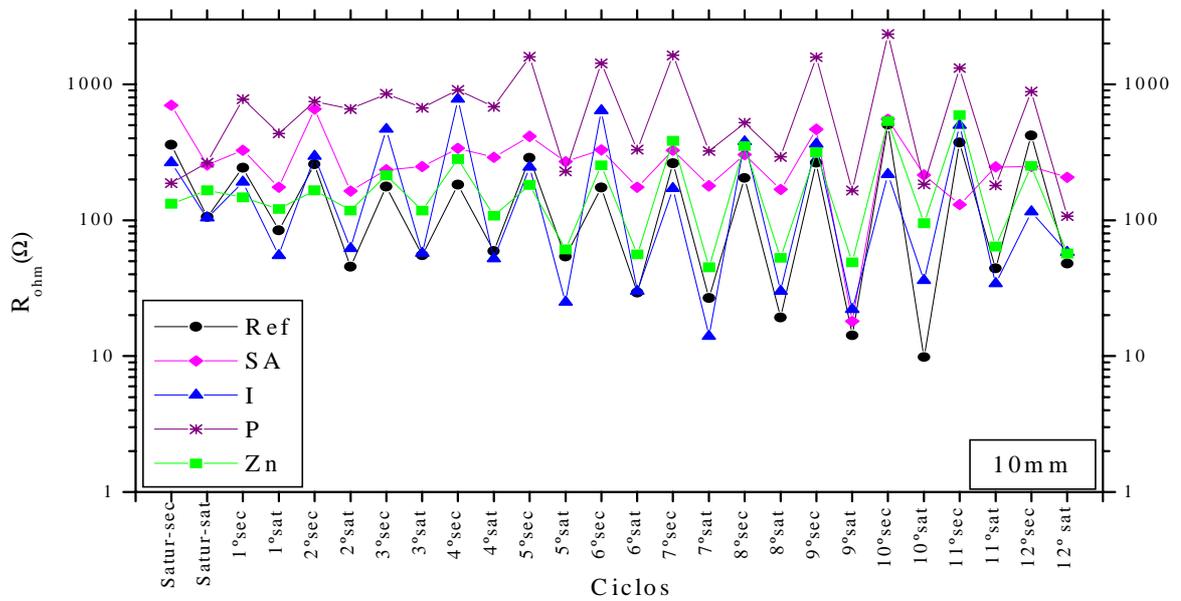
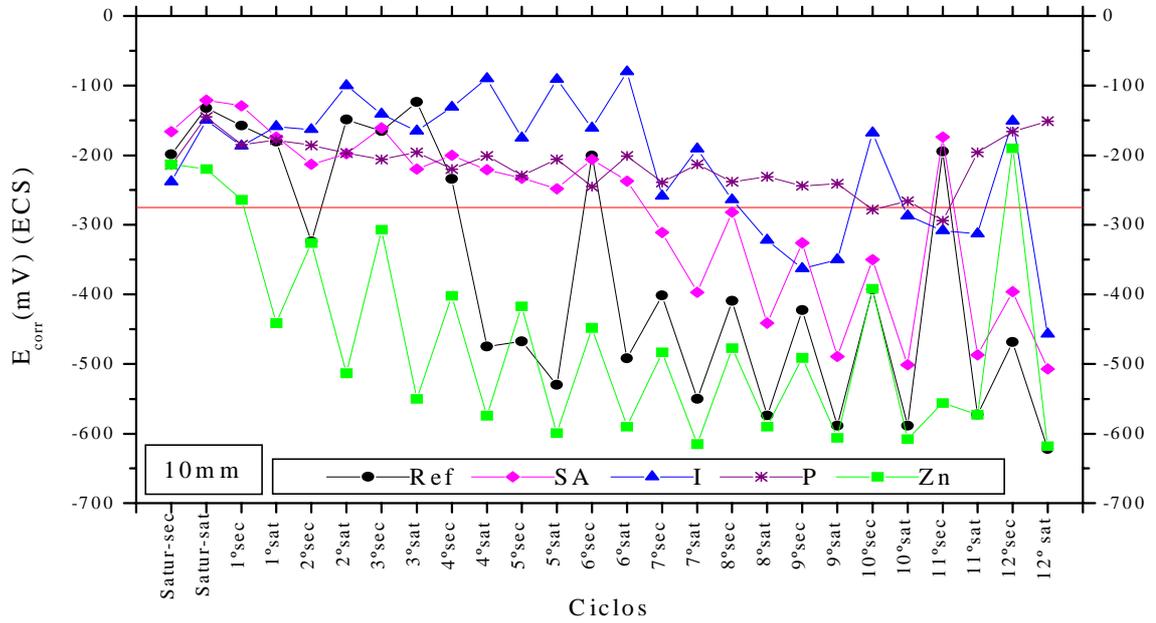


Figura 6.23 Evolução comparativa da  $R_{ohm}$  para 5mm de cobrimento



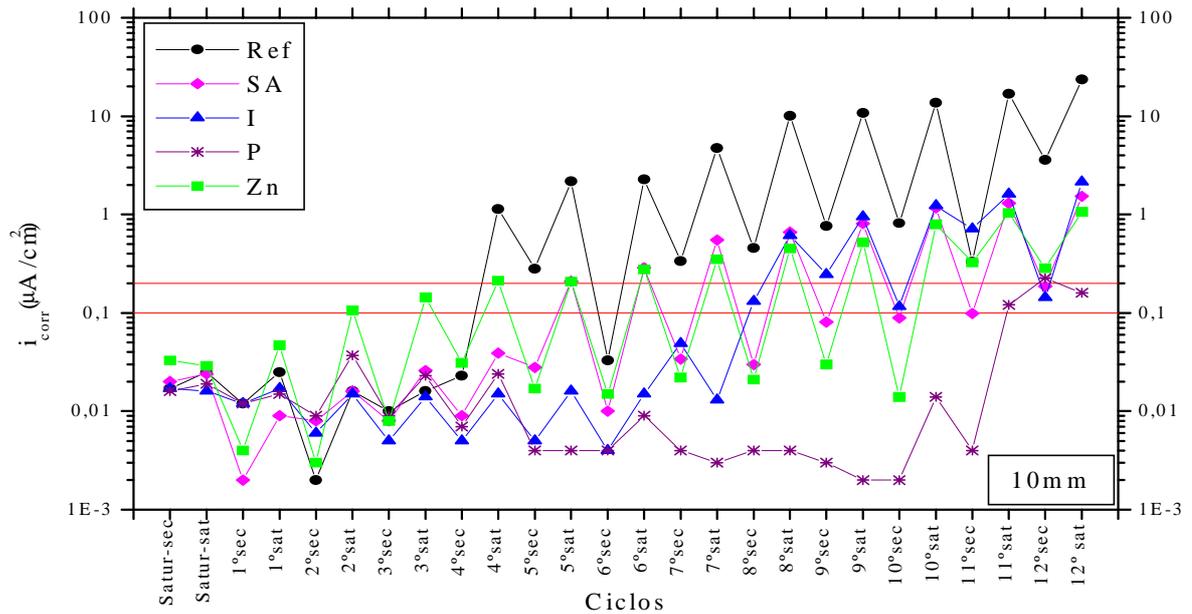


Figura 6.26 Evolução comparativa da  $i_{\text{corr}}$  para 10mm de cobrimento

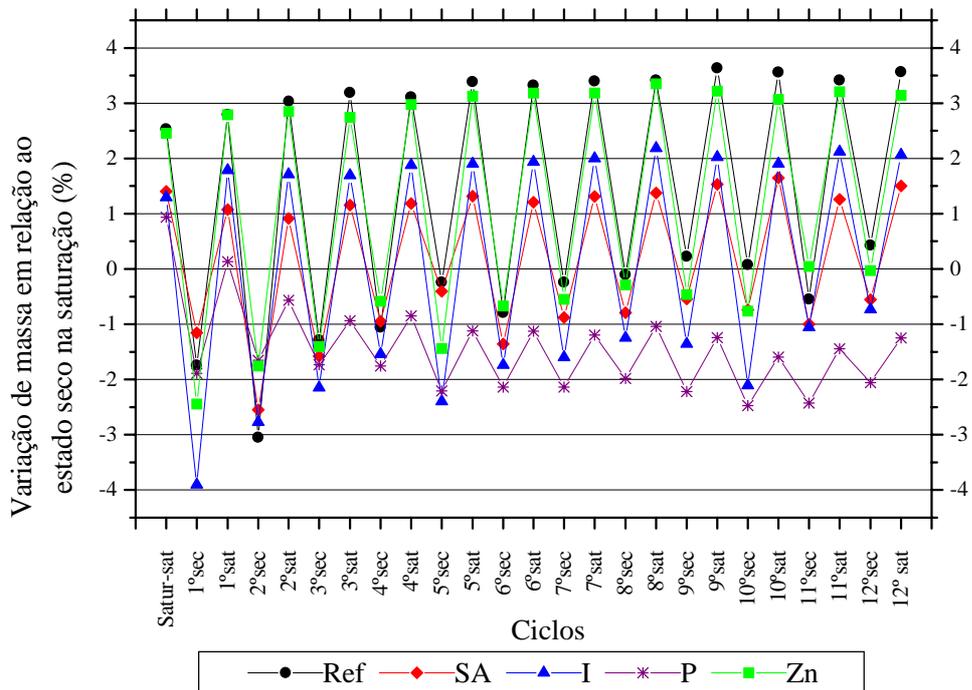


Figura 6.27 Evolução da média da variação de massa dos corpos-de-prova dos sistemas de reparo estudados

Nota-se que tanto o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) quanto a taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) das barras de 5mm de cobrimento ultrapassam, antes das barras de 10mm de cobrimento, em todos os sistemas de reparo, seus respectivos valores limites. Este fato só vem confirmar o

avanço da frente de cloretos através do cobrimento, ratificando a importância do mesmo como agente fundamental no combate à iniciação da corrosão.

Outro aspecto importante é a coerência entre os valores do potencial de corrosão e da taxa de corrosão, pois na grande maioria dos resultados, tem-se que um incremento de potencial no sentido mais negativo implica em um incremento da taxa no seu sentido mais positivo, ou seja, quando o potencial diminui, a taxa aumenta, e vice-versa. Novamente, outro fato que vem a confirmar esta coerência, é a coincidência dos semi-ciclos onde os valores de potencial e taxa de corrosão das barras ultrapassam os valores limites para a iniciação da corrosão, para os dois cobrimentos, em alguns dos sistemas de reparo.

Quando a armadura imersa no concreto está corroendo, a cinética da corrosão aumenta exponencialmente com o aumento da saturação dos poros, pois reduz-se a resistividade elétrica do concreto, fazendo com que a transferência de carga se torne mais fácil, aumentando, assim, a velocidade de corrosão (ENEVOLDSEN et alli, 1994; GONZÁLEZ et alli, 1996b). Isto explica, portanto, porque os valores de  $i_{corr}$ , para os semi-ciclos saturados, são maiores que os valores quando a argamassa está seca.

De acordo com as amplitudes da variação de massa apresentadas na Figura 6.27 pode-se dizer que a argamassa dos sistemas de referência e com pintura de zinco, a argamassa com adição de inibidor de corrosão, a argamassa com adição de sílica ativa e a argamassa modificada por polímeros apresentaram, nesta ordem decrescente, uma maior absorção de água.

Comparados ao sistema de reparo de referência, utilizando a taxa de corrosão como variável determinante do período de iniciação da corrosão e considerando que os valores da taxa de corrosão do sistema de reparo que utiliza uma pintura rica em zinco aderida às barras refere-se à corrosão do zinco e não da barra de aço, todos os sistemas de reparo estudados foram eficientes no combate à iniciação da corrosão pois, em ambos os cobrimentos, nota-se uma longevidade do estado passivo das barras imersas nestes sistemas. As Figuras 6.28 e 6.29 apresentam a duração da fase de iniciação<sup>2</sup> da corrosão para cada sistema de reparo.

Observa-se que o sistema de reparo com adição de estireno-butadieno (SBR) proporcionou um significativo incremento na duração da fase de iniciação em relação ao sistema de referência, aumentando a mesma em 250%, para o cobrimento de 5mm, e em 175% para a espessura de cobrimento de 10mm. Já o sistema de reparo com adição de nitrito de sódio aumentou o tempo de despassivação em 100%, para ambos os cobrimentos. O

---

<sup>2</sup> O período avaliado foi computado a partir do término do período de saturação dos corpos-de-prova, utilizando a taxa de corrosão como parâmetro de avaliação.

sistema de reparo com adição de sílica ativa aumentou em 50% e 25% a duração da fase de iniciação da corrosão, para o cobrimento de 5mm e 10mm, respectivamente.

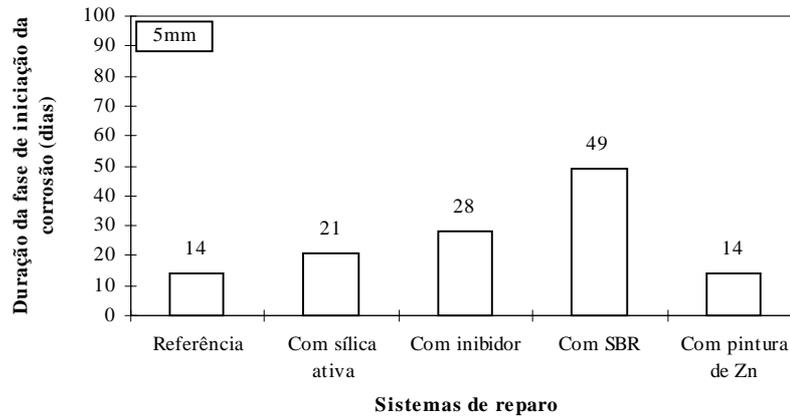


Figura 6.28 Duração da fase de iniciação da corrosão das barras imersas nos corpos-de-prova, para o cobrimento de 5mm

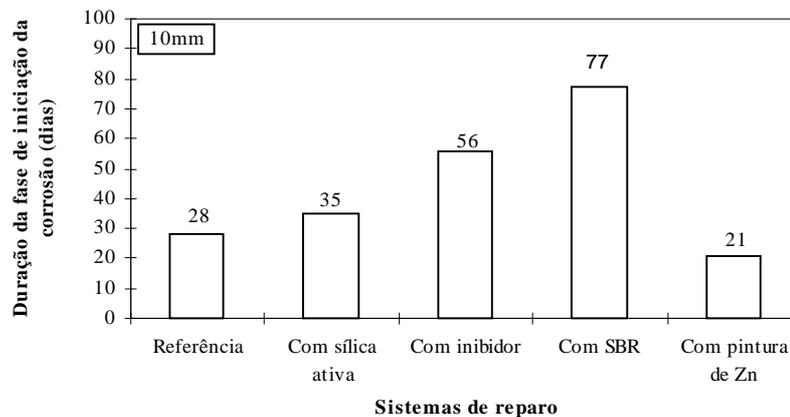


Figura 6.29 Duração da fase de iniciação da corrosão das barras imersas nos corpos-de-prova, para o cobrimento de 10mm

Para o sistema de reparo com pintura de zinco nas barras, considerando  $i_{\text{corr}}$  o parâmetro de avaliação, a duração do período de iniciação da corrosão não se modificou para o cobrimento de 5mm, quando comparados ao sistema de reparo de referência, enquanto que para o cobrimento de 10mm, este obteve um período de iniciação menor que o de referência. Isto significa que os cloretos chegaram primeiro na barra com pintura de zinco do que na barra do sistema de reparo de referência, ativando assim a proteção catódica fornecida pelo zinco. Entretanto, o sistema de reparo com pintura de zinco apresenta valores de  $E_{\text{corr}}$  e  $i_{\text{corr}}$  bastante diferenciados dos demais mas, como já mencionado anteriormente, tais valores são intrínsecos do tipo de proteção proporcionado por este sistema (proteção galvânica), portanto, diante dos valores apresentados, o sistema com pintura de zinco nas barras parece que protegeu eficazmente as barras contra corrosão das mesmas. Nota-se que se deve ter cuidado com a avaliação deste sistema de reparo quando se considera somente as medidas eletroquímicas.

Com relação à resistência ôhmica das argamassas, a argamassa do sistema P apresentou os maiores valores, seguida das argamassas dos sistemas I, SA, Zn e referência.

Observa-se também que o cobrimento apresenta pouca interferência nos valores obtidos para as resistências ôhmicas.

Os resultados encontrados são coerentes com os apresentados por HELENE & MONTEIRO (1994), os quais submeteram lajes de pequenas dimensões (15x15x60cm) a um ano de semi-imersão em solução de cloreto de sódio. Os sistemas de reparo utilizados por tais pesquisadores são formados por argamassas e modificações, tais como pinturas epóxi e poliméricas nas armaduras e adições de inibidor de corrosão (nitrito de cálcio) e sílica ativa às argamassas. Esses sistemas foram avaliados através do monitoramento do potencial de corrosão, da profundidade de carbonatação, do teor de cloretos e da perda de massa, além de observações visuais. Como resultado, os sistemas de reparo contendo sílica ativa e inibidores de corrosão apresentaram menores penetrações de cloretos que o sistema de referência, tendo assim, um melhor desempenho que os demais, em todos os itens observados.

O trabalho de HELENE & MONTEIRO (1994) só vem a confirmar a melhoria do desempenho dos sistemas de reparo que utilizam adições, visando modificar microestruturalmente as argamassas e concretos.

## 6.2 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Com o intuito de se compreender melhor o comportamento apresentado pelos sistemas de reparo no ensaio acelerado de corrosão por cloretos, realizou-se alguns ensaios de caráter complementar.

De posse dos resultados desses ensaios, procedeu-se uma análise estatística dos mesmos com o objetivo de avaliar o efeito das variáveis no desempenho das propriedades estudadas. Para tanto, utilizou-se a análise de variância (ANOVA), obtida através de um *software* estatístico (Statistica, versão 4.3), que permite comparar grupos de valores considerando a variabilidade das médias entre os grupos e variabilidades das observações dentro dos grupos, baseando-se na distribuição de Fischer (F), com um determinado nível de significância (que neste caso foi de 95%), para verificar a significância das variáveis.

A variável em estudo é considerada estatisticamente significativa quando o valor da função de Fischer calculado pelo *software* ( $F_{calc}$ ) é menor que o valor de Fischer tabelado, para um grau de insignificância de 5% ( $F_{0,05}$ ). Existe uma relação direta entre a diferença dos valores da função de Fischer calculado e tabelado, com o grau de significância da variável em estudo, ou seja, quanto maior esta diferença, maior a significância da variável (RIBEIRO, 1995).

Quando necessário, realizou-se também uma comparação múltipla de médias das variáveis em estudo, através do método de Duncan (RIBEIRO, 1995), a fim de se determinar, estatisticamente, o grau de correlação entre as variáveis.

## 6.2.1 Ensaios de relacionados com a durabilidade

### 6.2.1.1 Absorção por imersão

Tem-se a seguir, na Figura 6.30, os valores dos coeficientes de absorção de água por imersão das argamassas utilizadas nos sistemas de reparo, obtidos conforme a NBR 9778/87. A Tabela 6.1 contém os resultados da ANOVA para o coeficiente de absorção por imersão das argamassas.

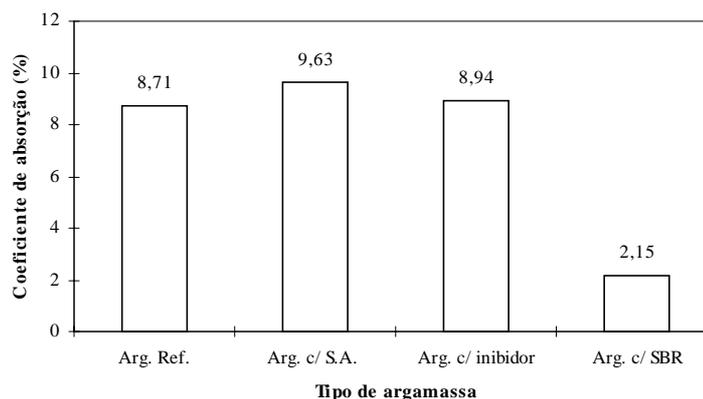


Figura 6.30 Coeficiente de absorção por imersão das argamassas dos sistemas de reparo

Tabela 6.1 Resultados da ANOVA para os coeficientes de absorção por imersão

Variável	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância
Argamassa	3	36,642	1426,951	4,07	Significativo
Erro	8	0,026	-	-	-

Através dos resultados da Tabela 6.1 verifica-se que o tipo de argamassa é uma variável significativa quanto aos coeficientes de absorção por imersão. Entretanto, fez-se uma comparação múltipla de médias de cada tipo de argamassa, pelo método de Duncan (RIBEIRO, 1995), utilizando-se os resultados da Tabela 6.1, onde determinou-se que o coeficiente de absorção por imersão da argamassa com adição de inibidor de corrosão não difere significativamente do coeficiente de absorção por imersão da argamassa de referência. Contudo, os coeficientes de absorção por imersão das argamassas com adição de sílica ativa e com adição de SBR diferem significativamente entre si e entre as demais.

A adição de sílica ativa aumentou o coeficiente de absorção por imersão da argamassa em 10,6%, resultado este contraditório ao esperado. Uma provável justificativa para tal fenômeno seria o refinamento da porosidade promovido pela sílica ativa, e como a determinação da absorção por imersão destina-se a uma avaliação do volume total de poros, pode ser que a adição de sílica ativa tenha diminuído o volume de poros grandes e

aumentado o volume de poros pequenos, ocasionando um aumento no volume total de poros, obtendo-se assim uma maior absorção. Este efeito foi encontrado por BAUER (1995) em todas as situações nas quais se utilizou o cimento com adição da escória de alto-forno e por SILVA FILHO (1994), para altas relações a/c, na utilização de sílica ativa no teor de até 10%. Entretanto, este resultado é contraditório ao de FORNASIER (1995), que para corpos-de-prova de concreto com alta relação água/aglomerante, secos a 105 °C, a utilização de sílica ativa estatisticamente não alterou a absorção, e ao de FIGUEIREDO (1998), que encontrou uma menor absorção quando se adicionou sílica ativa à mistura.

Parece que a diminuição da absorção das argamassas e concretos com adições minerais está intimamente relacionada com a relação água/aglomerante utilizada, como se pode observar nos trabalhos de BAUER (1995), FORNASIER (1995) e SILVA FILHO (1994). Segundo estes dois últimos autores, a adição de sílica ativa produz resultados mais efetivos para baixas relações água/aglomerante e a presença da sílica ativa em altas relações água/aglomerante pode causar problemas de absorção, em função do refinamento dos poros.

A adição do nitrito de sódio praticamente não alterou a absorção da argamassa modificada, tanto que, como já mencionado, o coeficiente de absorção por imersão desta argamassa não difere significativamente do coeficiente da argamassa de referência, sendo estes dois valores estatisticamente iguais. LIMA (1996) em estudos similares obteve 2,82% de redução no coeficiente de absorção por imersão para teores de 2% de adição de nitrito de sódio, o que não difere, em muito, dos resultados aqui encontrados.

O coeficiente de absorção da argamassa modificada pelo SBR apresentou uma redução de 75,3% em relação à argamassa de referência, apresentando coerência com os resultados obtidos por FERREIRA & LIBORIO (1993) que encontraram uma redução de 48,2% para argamassas de composições similares. O valor menor da redução encontrado por estes pesquisadores é justificado pelo tipo de cura adotado: 28 dias em câmara úmida para a argamassa de referência (sem adições) e 2 dias em câmara úmida e 26 dias de cura ao ar para a argamassa modificada com SBR, pois assim, maximiza-se o grau de hidratação do cimento, promovendo uma menor porosidade da pasta. RAY et alli (1995) obtiveram uma redução na quantidade de água absorvida de 61,1%, em média, através do uso de argamassas com adição de 20% de SBR. Já OHAMA (1987), em argamassas com adição de 20% de SBR, conseguiu um decréscimo de 60,9% na quantidade de água absorvida, em 48 horas de ensaio. Entretanto OLIVEIRA (1999) obteve uma redução média de 24,3% na absorção das argamassas mistas, somente com a adição de 20% de estireno-butadieno. STORTE & TEZUKA (1992) afirmam que a adição de estireno-butadieno em concretos chega a diminuir a absorção de água por imersão em até 500% quando comparados com concretos sem adição.

#### 6.2.1.2 Absorção por capilaridade

Tem-se, na figura 6.31, os coeficientes de absorção de água por capilaridade das

argamassas dos sistemas de reparo estudados, obtidos através do método de ensaio prescrito pela NBR 9779/95. A Tabela 6.2 contém os resultados da ANOVA para o coeficiente de absorção por capilaridade das argamassas.

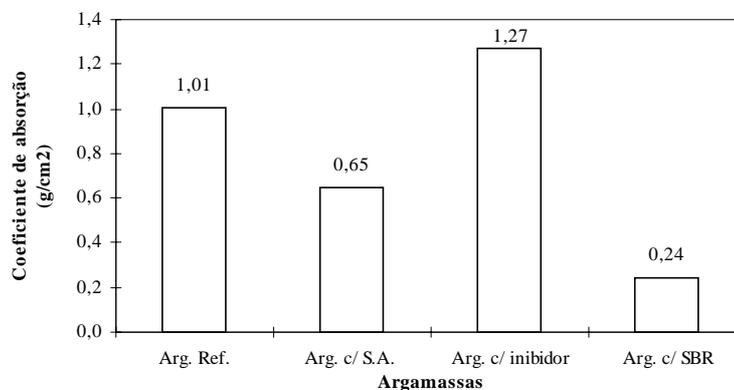


Figura 6.31 Coeficiente de absorção por capilaridade das argamassas ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )

Tabela 6.2 Resultados da ANOVA para os coeficientes de absorção por capilaridade

Variável	Graus de Liberdade	Média Quadrada	$F_{\text{calc}}$	$F_{0,05}$	Significância
Argamassa	3	0,596	143,846	4,07	Significativo
Erro	8	0,004	-	-	-

Através dos resultados da Tabela 6.2 verifica-se que o tipo de argamassa é uma variável significativa quanto aos coeficientes de absorção por capilaridade. Entretanto, fez-se uma comparação múltipla de médias de cada tipo de argamassa, pelo método de Duncan (RIBEIRO, 1995), utilizando-se os resultados da Tabela 6.2, onde determinou-se que todos os coeficientes de absorção por imersão das argamassas diferem significativamente entre si.

Confirma-se, novamente, um melhor desempenho da argamassa modificada com o polímero, com uma redução de 76,2% no coeficiente de absorção. Este resultado é coerente com os resultados alcançados por GODOY & BARROS (1999), onde a adição de 5% e 10% de estireno-butadieno, em argamassas de traço 1:3, proporcionou uma considerável diminuição na absorção capilar das argamassas modificadas.

Geralmente, a absorção de água e a permeabilidade das argamassas e concretos reduzem consideravelmente quando se adiciona polímeros na mistura, pois estes modificam a microestrutura daqueles, sendo os grandes poros ocupados pelas partículas poliméricas ou selados pelas membranas poliméricas (OHAMA, 1987).

A argamassa modificada com sílica ativa apresentou uma redução de 35,6% no coeficiente de absorção, resultado este coerente ao encontrado por FIGUEIREDO (1998) que encontrou uma redução na ordem de 45%, para a argamassa traço 1:2,5, com a adição de 10% de sílica ativa, submetida ao mesmo processo de cura. Já HERNÁNDEZ et alli (1999),

utilizando 10% de sílica ativa, conseguiu uma redução do coeficiente de absorção capilar dos concretos, em torno 70%. Esta redução da capilaridade é consequência da quebra da intercomunicação dos poros, proporcionada pela adição da sílica, através dos efeitos microfíler e pozolânico.

Nota-se que a argamassa com inibidor teve um resultado inferior que a de referência, resultado este confrontante com o obtido por VASCONCELOS (1997), que obteve absorções capilares inferiores para argamassas modificadas no mesmo teor (2%). Isto pode ter ocorrido devido à exsudação no adensamento dos corpos-de-prova provocada pela adição do inibidor, já que este tem ação fluidificante/plastificante (LIMA, 1996), embora não tenha refletido na absorção por imersão.

### 6.2.1.3 Difusão de cloretos

A evolução do teor de cloretos com o tempo nas câmaras positivas das argamassas estudadas encontra-se nos gráficos a seguir ( Figuras 6.32 a 6.35).

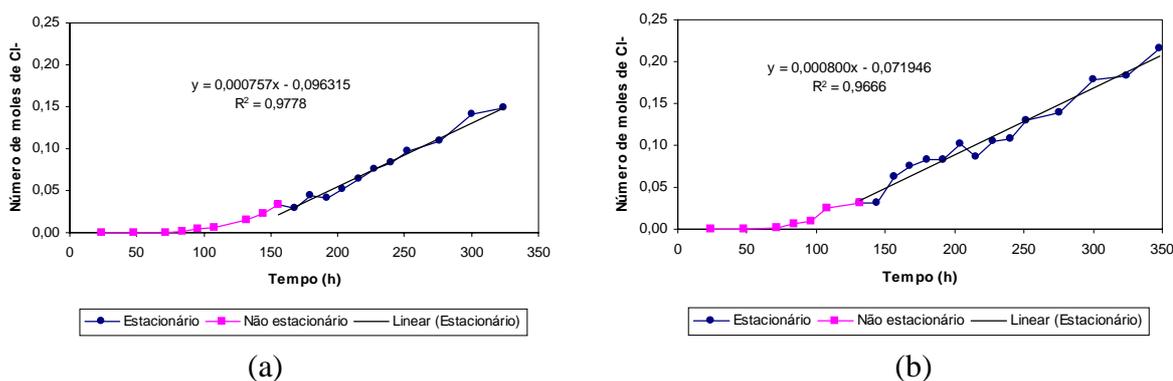


Figura 6.32 Evolução da concentração de cloretos com o tempo para a argamassa de referência: (a) amostra 1 e (b) amostra 2

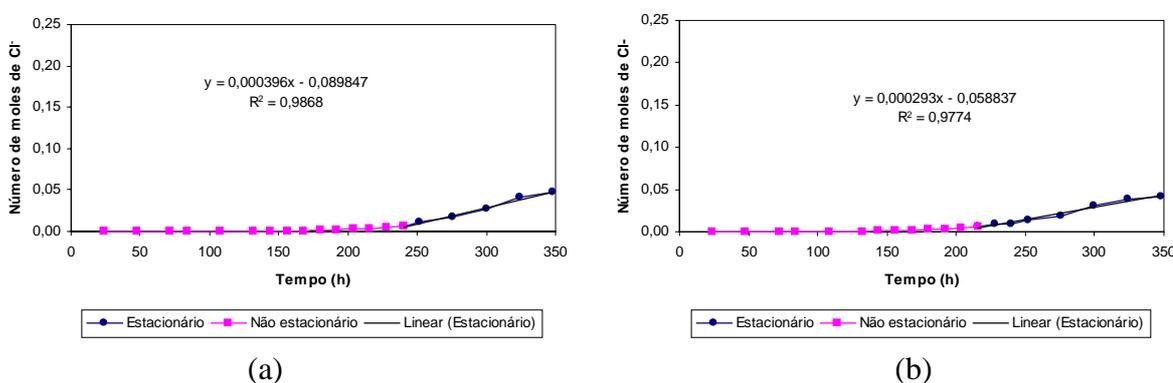


Figura 6.33 Evolução da concentração de cloretos com o tempo para a argamassa com adição de sílica ativa: (a) amostra 1 e (b) amostra 2

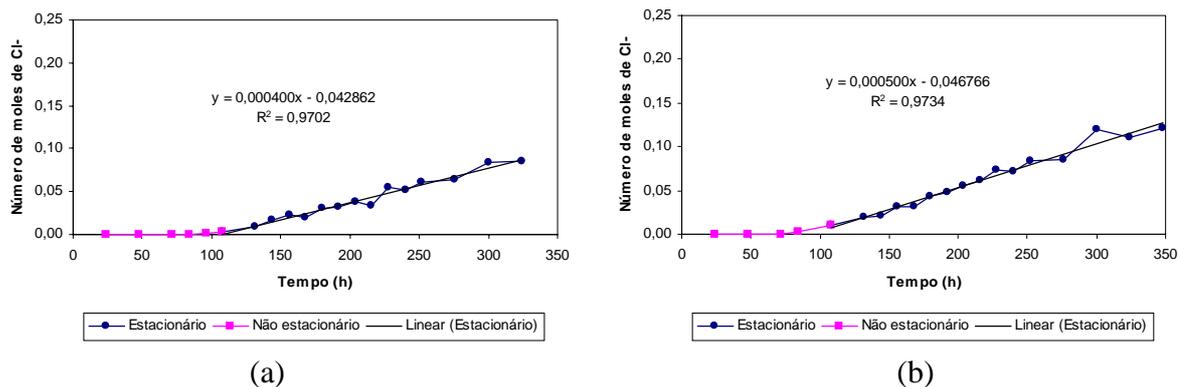


Figura 6.34 Evolução da concentração de cloretos com o tempo para a argamassa com adição de nitrito de sódio: (a) amostra 1 e (b) amostra 2

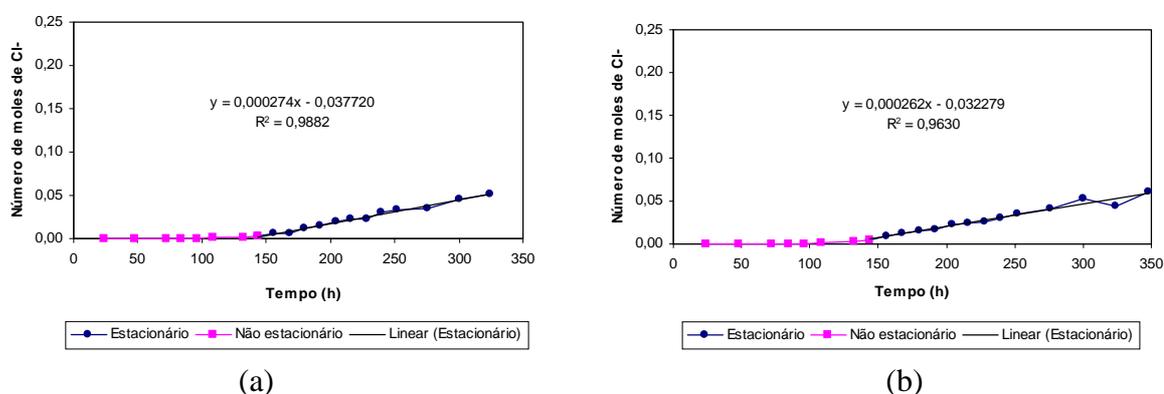


Figura 6.35 Evolução da concentração de cloretos com o tempo para a argamassa com adição de SBR: (a) amostra 1 e (b) amostra 2

O valor do fluxo de íons ( $J$ ), que nada mais é do que a tangente da reta de regressão que interpola os pontos no estado estacionário, é mostrado para cada amostra. De posse do valor de  $J$ , utiliza-se a equação (3.8) para calcular o valor do coeficiente de difusão das argamassas, efetuando as devidas transformações das unidades. Os valores dos coeficientes de difusão são mostrados na Figura 6.36.

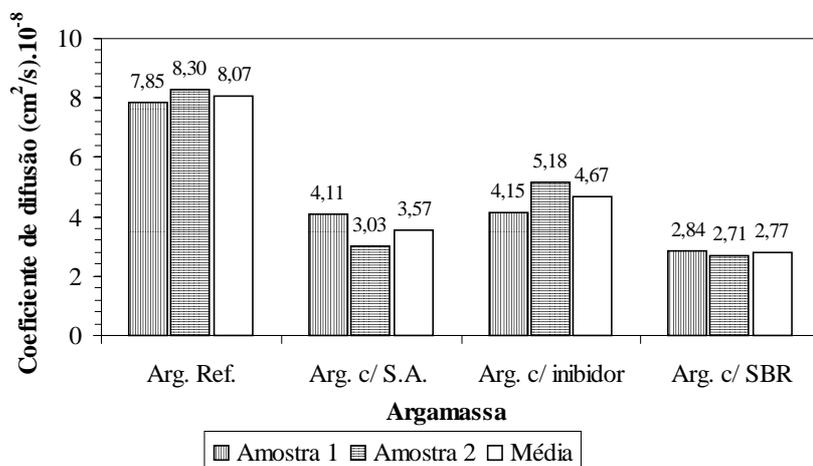


Figura 6.36 Coeficientes de difusão das argamassas ( $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-8}$ )

A Tabela 6.3 contém os resultados da ANOVA para o coeficiente de difusão das argamassas.

Tabela 6.3 Resultados da ANOVA para o coeficiente de difusão das argamassas

Variável	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância
Argamassa	3	10,883	35,616	6,59	Significativo
Erro	4	0,306	-	-	-

Através dos resultados da Tabela 6.3 verifica-se que o tipo de argamassa é uma variável significativa com relação ao coeficiente de difusão. Entretanto, fez-se uma comparação múltipla de médias de cada tipo de argamassa, utilizando-se os resultados da Tabela 6.3, onde determinou-se que o coeficiente de difusão da argamassa com adição do inibidor de corrosão não difere significativamente do coeficiente de difusão da argamassa com adição de sílica ativa, e este último não difere significativamente do coeficiente de difusão da argamassa modificada pelo SBR. Contudo, o coeficiente de difusão da argamassa com adição do inibidor de corrosão difere significativamente do coeficiente de difusão da argamassa modificada pelo polímero. O coeficiente de difusão da argamassa de referência difere significativamente dos coeficientes de difusão das demais argamassas.

Como era de se esperar, as adições diminuíram a difusibilidade das argamassas modificadas em relação à penetração do íon cloreto. A adição de 10% de sílica ativa minimizou o coeficiente de difusão em 55,9%, resultado convergente com SUGIYUAMA et alli (1996), que utilizou adições de sílica ativa nos teores de 5 e 10% em argamassas similares às ensaiadas, conseguindo reduzir a permeabilidade das mesmas ao ingresso de íons. Novamente, o efeito microfíler e a pozolanicidade da sílica ativa são apontados com responsáveis pelos resultados.

Utilizando a sílica ativa, diversos autores conseguiram reduzir a carga total passante nas amostras submetidas ao ensaio acelerado de difusão de cloretos, prescrito pela *ASTM C 1202-91*. Dentre estes autores pode-se citar FERREIRA et alli (1998), FORNASIER (1995), KULAKOWSKI (1994) e RODOLPHO & ISA (1999), que conseguiram uma redução média de 60,7%, 78,7%, 79,3% e 94,5%, respectivamente, para a adição de 10% de sílica ativa em suas misturas.

Os resultados apresentados pelas argamassas com adições de estireno-butadieno (SBR) apresentaram coeficientes de difusão 65,67% inferiores aos da argamassa de referência. Novamente, a provável formação de uma matriz monolítica, dificultando a penetração dos cloretos, é a responsável pela redução dos coeficientes. Comprova-se tais afirmações quando OHAMA (1987) consegue reduzir em 39,1% e 57,7% os coeficientes de difusão de argamassas e concretos, respectivamente, para uma adição de 20% de SBR.

Com a adição do inibidor de corrosão (nitrito de sódio) obteve-se uma diminuição do coeficiente de difusão na ordem de 42,1%.

#### 6.2.1.4 Determinação do teor de cloretos nas argamassas

Os resultados da determinação do teor de cloretos livres nas argamassas dos sistemas de reparo, obtidos ao final do 4º e 8º ciclo, encontram-se na Tabela 6.4.

Observa-se que os menores teores de cloretos livres encontram-se na argamassa modificada pelo estireno-butadieno, com uma redução média na quantidade de cloretos de 55,4%, quando comparado com a argamassa de referência. Este resultado é coerente com o esperado já que a adição do polímero torna a matriz da argamassa mais densa, tornando-a menos porosa, conseqüentemente, menos cloretos irão penetrar.

Tabela 6.4 Teor de cloretos livres nas argamassas, em relação à massa de cimento

Argamassa	Teor de cloretos livres				$\Delta^3$ (%)			
	Profundidade				Profundidade			
	5mm		10mm		5mm		10mm	
	4º ciclo	8º ciclo	4º ciclo	8º ciclo	4º ciclo	8º ciclo	4º ciclo	8º ciclo
Referência	3,03%	5,29%	2,87%	4,58%	100	100	100	100
Com sílica ativa	1,75%	3,42%	2,24%	4,04%	57,8	64,7	78,0	88,2
Com inibidor	2,82%	3,67%	2,68%	3,97%	93,1	69,4	93,4	86,7
Com polímero	1,71%	2,75%	0,91%	1,76%	56,4	52,0	31,7	38,4

A argamassa com adição de sílica ativa reduziu a quantidade de cloretos em 27,8%, em média, em relação à argamassa de referência. Entretanto, observou-se que a quantidade de cloretos encontrada para a profundidade de 10mm, nos dois ciclos, foi maior que a quantidade de cloretos determinada para a profundidade de 5mm.

Este comportamento também foi encontrado no experimento de KULAKOWSKI (1994), ao realizar ensaios em argamassas de traço 1:3 com adição de 10% de sílica ativa, no de HERNÁNDEZ et alli (1999), ensaiando argamassas de reparo com adição de 10% de sílica ativa, e no de EPERJESI et alli (1998), ao determinar a profundidade de penetração de cloretos em concretos com substituição de 30% do cimento por escória de alto forno. Isto provavelmente ocorre porque há um acúmulo de cloretos que ingressam na superfície das amostras, devido a menor velocidade de difusão, como consequência do refinamento e segmentação de poros que se produz na microestrutura da matriz ao se inserir a adição na mistura. Entretanto, para maiores profundidades, a concentração de cloretos nestas amostras cai drasticamente, conforme os próprios trabalhos dos supracitados autores.

<sup>3</sup> Percentual de cloretos livres em relação ao teor de cloretos encontrado na argamassa de referência.

Então, para se verificar a eficiência da sílica ativa quanto à redução da penetração dos íons cloreto na argamassa por ela modificada, seria necessário determinar o teor de cloretos para maiores profundidades. Mas ainda assim, nota-se uma considerável redução no teor de cloretos incorporados quando comparado com a argamassa de referência.

A argamassa com nitrito de sódio teve o teor de cloretos reduzido em 14,4%, em média, com relação à argamassa de referência possivelmente devido a alterações na microestrutura, embora não se tenha observado reduções nos coeficientes de absorção por imersão e por capilaridade, conforme itens 6.2.1.1 e 6.2.1.2. Entretanto o coeficiente de difusão desta argamassa sofreu uma redução da ordem de 42% comparado à argamassa de referência (item 6.2.1.3), o que leva a crer que existe realmente um refinamento na estrutura interna.

No oitavo ciclo, repetiu-se o fenômeno observado para a adição de sílica ativa, ou seja, o teor de cloretos para a maior profundidade (10mm) foi superior ao teor da menor profundidade (5mm). Contudo, observa-se que, para esta argamassa, os teores em ambas as profundidades, para ambos os ciclos, são bastante próximos.

## **6.2.2 Ensaios mecânicos**

Em todos ensaios utilizou-se mais de uma amostra, sendo assim calculada a média e o coeficiente de variação. PAPADAKIS & VENUAT (1969) afirmam que um coeficiente de variação entre 5 e 10%, para ensaios mecânicos realizados em concretos e argamassas, é considerado muito bom, sendo aqui adotado como um coeficiente de variação satisfatório aquele com valor igual ou inferior a 10%. Quando este esteve em valores maiores que 10%, excluiu-se o valor mais distante da média, calculando-se novamente média e coeficiente de variação.

### **6.2.2.1 Resistência à compressão**

Tem-se, na Figura 6.37, os valores da resistência à compressão das argamassas dos sistemas de reparo aos 3, 7 e 28 dias.

A Tabela 6.5 contém os resultados da ANOVA para a resistência à compressão.

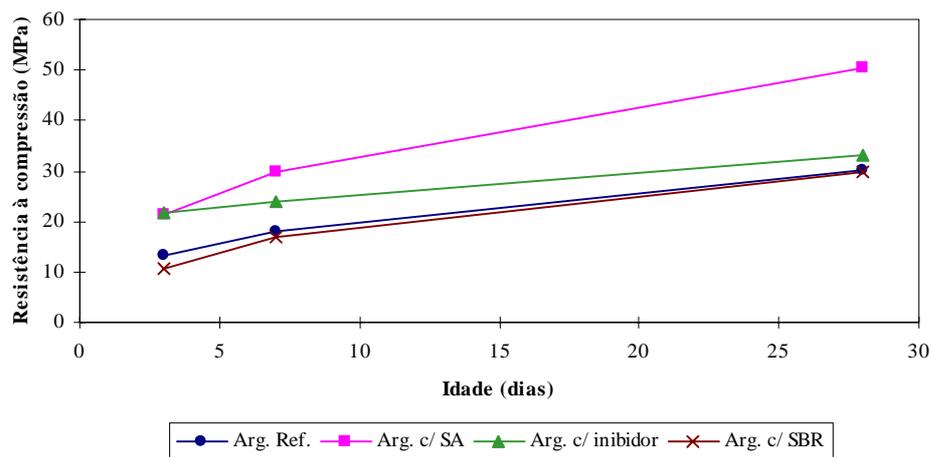


Figura 6.37 Evolução da resistência à compressão das argamassas dos sistemas de reparo

Tabela 6.5 Resultados da ANOVA para os valores da resistência à compressão

Variável	Graus de Liberdade	Média Quadrada	$F_{calc}$	$F_{0,05}$	Significância
Argamassa	3	405,351	98,083	2,92	Significativo
Idade	2	1313,494	317,827	3,32	Significativo
Argamassa+Idade	6	42,988	10,402	2,42	Significativo
Erro	30	4,133	-	-	-

Através dos resultados da Tabela 6.5 verifica-se que o tipo de argamassa e a idade são variáveis significativas quanto à resistência à compressão. Entretanto, fez-se uma comparação múltipla de médias de cada tipo de argamassa para cada idade, utilizando-se os resultados das análises de variância (ANOVA) para cada idade, onde determinou-se que:

1. para a idade de 3 dias, os valores de resistência à compressão das argamassas com adição de sílica ativa e de inibidor não diferem significativamente entre si. As demais diferem significativamente destas e entre elas.
2. Para a idade de 7 dias, os valores de resistência à compressão da argamassa com adição de estireno-butadieno e da argamassa de referência não diferem significativamente entre si. As demais diferem significativamente destas e entre elas.
3. Para a idade de 28 dias, os valores de resistência à compressão das argamassas com adição de estireno-butadieno e de inibidor de corrosão e da argamassa de referência não diferem significativamente entre si. A argamassa com adição de sílica ativa difere significativamente destas.

Tem-se que, aos 3 dias de idade, a argamassa com adição sílica ativa apresenta uma resistência à compressão 61,3% superior à argamassa de referência. Para as próximas idades, observa-se que a argamassa com sílica ativa mantém o ganho de resistência, apresentando resultados 67,6% e 66,6% superiores à argamassa de referência, para 7 e 28 dias,

respectivamente. Este ganho de resistência pode ter sido ocasionado por uma ligeira aceleração na hidratação do cimento e também à reação pozolânica, que ocasiona um refinamento dos poros, juntamente com o efeito microfíler, substituindo o constituinte mais fraco (hidróxido de cálcio) por um mais forte (silicato de cálcio hidratado), formando uma zona interfacial entre a pasta e o agregado menos porosa, proporcionando uma melhor aderência entre eles (MEHTA & MONTEIRO, 1994; TOUTANJI & EL-KORCHI, 1995).

Diversos trabalhos (HERNÁNDEZ et alli, 1999; FORNASIER, 1995; SILVA FILHO, 1994) apontam o aumento da resistência à compressão com o emprego de sílica ativa na mistura. FIGUEIREDO (1998), através de ensaios realizados em argamassas com e sem adição de sílica ativa, nos traços 1:2 e 1:2,5, obteve um ganho médio de 50% na resistência à compressão das argamassas aos 28 dias ao empregar 10% de sílica ativa. TOUTANJI & EL-KORCHI (1995), utilizando teores de 16% e 25% de adição de sílica ativa em argamassas, obtiveram um aumento médio na resistência à compressão de 11,8% e 19,2%, respectivamente, quando comparado às resistências da argamassa sem adição. Já KULAKOWSKI (1994) e SCHULER (1998) obtiveram um acréscimo da resistência à compressão aos 28 dias de apenas 6,7% e 4,2%, respectivamente, quando adicionaram 10% de sílica ativa às argamassas de traço similar. A justificativa dada pelas autoras para acréscimos tão baixos foi uma possível ineficiência da sílica ativa em misturas compostas somente por agregado miúdo e cimento, pois no concreto, a sílica atua principalmente na zona de transição pasta-agregado, que é o elo fraco da resistência do concreto. Nas argamassas esta zona de transição limita-se ao entorno dos agregados miúdos, e portanto o efeito da adição restringe-se a estas pequenas regiões. Entretanto, sabe-se que o tipo adensamento é um fator de grande relevância na obtenção das resistências. A forma de adensamento utilizado pelas supracitadas autoras foi feito de maneira manual, através de soquete, e provavelmente devido à grande coesão da mistura proporcionada pela adição de sílica, o adensamento manual não foi eficiente na retirada do ar incorporado, deixando grande porosidade na argamassa.

Para a argamassa com adição de inibidor de corrosão tem-se uma resistência à compressão 64,1% superior à argamassa de referência, para 3 dias de idade, entretanto, nas outras idades, observa-se um decréscimo no ganho de resistência, apresentando uma resistência à compressão 33,6% e 9,3% superior à argamassa de referência, para 7 e 28 dias, respectivamente, sendo considerado estatisticamente igual para 28 dias. Este ganho de resistência da argamassa com nitrito de sódio nas primeiras idades é também verificado no trabalho de LIMA (1996) e, possivelmente pode ser atribuído à aceleração da pega e do endurecimento propiciado pelo inibidor, além das modificações microestruturais induzidas pelo mesmo. Por outro lado, VASCONCELOS (1997) encontrou valores para resistência à compressão aos 28 dias 27,8% inferiores, em média, para a argamassa com adição de 2% de nitrito de sódio, quando comparados aos da argamassa sem nitrito. Mas, aos 90 dias, os valores da resistência encontrados atingiram uma diferença insignificante com relação à série de referência, ratificando que, para maiores idades, a argamassa com nitrito adquire uma

resistência similar à argamassa de referência. Entretanto, segundo CRAIG & WOOD (1970), citados por LIMA (1996), o aumento dos teores da adição de nitrito de sódio à argamassa causa decréscimo na resistência à compressão da mesma.

A argamassa modificada com polímeros apresentou uma resistência 19,5% inferior à argamassa de referência, para 3 dias de idade, entretanto, obteve um acréscimo para as demais idades mas, ainda assim, apresentou uma resistência 4,3% e 1,5% inferior à de referência, para 7 e 28 dias, respectivamente, sendo considerado estatisticamente igual para as duas últimas idades. Os resultados apresentam comportamento similar aos encontrados por FERREIRA & LIBORIO (1993) e RAY et alli (1995), que encontraram resistências à compressão ligeiramente inferiores para argamassas similares às estudadas, quando comparadas às argamassas de referência. Segundo OHAMA (1987), em geral, argamassas e concretos modificados com látex apresentam notórios aumentos na resistência à tração e à flexão mas nenhum aumento na resistência à compressão quando comparados às argamassas e concretos convencionais. Portanto, parece que a adição do SBR praticamente não altera a resistência à compressão da argamassa modificada.

Mas, ainda não existe um consenso sobre a influência do estireno-butadieno na resistência à compressão das argamassa. Há trabalhos que apresentam um acréscimo na resistência à compressão ao se adicionar o estireno-butadieno à mistura, dentre os quais pode-se citar o de GODOY & BARROS (1999), que estudaram a influência da adição dos teores de 5% e 10% de SBR em dois traços de argamassa (1:3 e 1:5), o de RISSIGNOLO & AGNESINI (1999), que estudaram a influência da adição de 15% de SBR sobre três traços de argamassas e o de AFRIDI et alli (1994b), que em um amplo estudo sobre argamassas, de traço 1:3 em massa, modificadas pelo SBR, nos teores de 0, 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de cimento, obtiveram um aumento na resistência à compressão das argamassas proporcional ao aumento no teor de SBR. Entretanto, como estes mesmos justificam, o aumento pode ser atribuído principalmente à redução da relação a/c, que ocorre com o aumento do teor de polímero. Sabe-se que a relação a/c afeta diretamente a relação gel/vazios, causando assim a redução da porosidade capilar e, conseqüentemente, aumento na resistência à compressão.

OHAMA (1987) afirma que os principais fatores que influem nas propriedades relacionadas com a resistência de argamassas e concretos modificados por polímeros de base látex são: a natureza dos materiais utilizados, tais como os látex, cimentos e agregados; os teores das misturas tais como o teor de polímero utilizado, relação água/cimento, razão pasta/vazios; métodos de cura e métodos de avaliação. Para tal pesquisador, a resistência à compressão ótima em argamassas ou concretos modificados com polímeros de base látex é obtida alcançando um grau de hidratação de cimento razoável sob condições úmidas nas primeiras idades, seguida de condições secas, no intuito de promover a formação do filme polimérico devido à coalescência dos polímeros látex.

### 6.2.2.2 Módulo de deformação

Tem-se na Figura 6.38 os valores do módulo de deformação das argamassas dos sistemas de reparo, aos 28 dias de idade. A Tabela 6.6 contém os resultados da análise de variância (ANOVA) para o módulo de deformação.

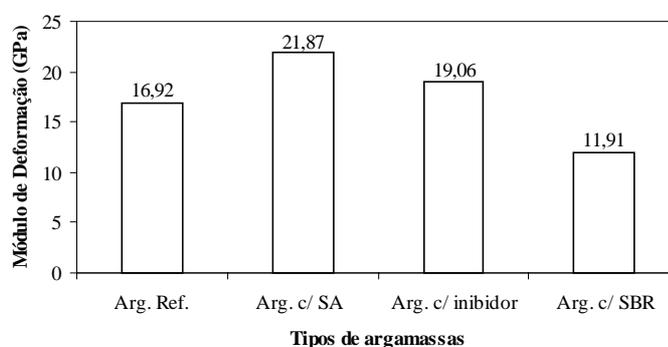


Figura 6.38 Módulo de deformação médio das argamassas dos sistemas de reparo (GPa), aos 28 dias de idade.

Tabela 6.6 Resultados da ANOVA para os valores do módulo de deformação

Variável	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância
Argamassa	3	95,485	6,194	3,13	Significativo
Erro	19	15,416	-	-	-

Através dos resultados da Tabela 6.6 verifica-se que o tipo de argamassa é uma variável significativa quanto ao módulo de deformação. Entretanto, fez-se uma comparação múltipla de médias de cada tipo de argamassa, utilizando-se os resultados da Tabela 6.6, onde determinou-se que o módulo de deformação da argamassa com adição de sílica ativa não difere significativamente do módulo da argamassa com adição do inibidor de corrosão, e este último não difere significativamente do módulo da argamassa de referência. Contudo, o módulo da argamassa de referência difere significativamente do módulo da argamassa com adição de sílica ativa. O módulo de deformação da argamassa com estireno-butadieno difere significativamente do módulo das demais argamassas.

Observa-se que a adição de sílica ativa deixou a argamassa com a deformação específica de ruptura menor, apresentando um módulo de deformação 29,3% maior que o da argamassa de referência. Este comportamento pode ser creditado ao efeito pozolânico e principalmente ao efeito fíler promovidos pela sílica ativa, que através do preenchimento dos vazios com materiais sólidos reduz a capacidade de deformação da argamassa.

O resultado apresentado é coerente com os resultados obtidos por FIGUEIREDO (1998), onde se percebeu uma tendência de aumento do módulo quando se adiciona sílica ativa à argamassa. Segundo tal autora, ocorre um aumento de 21,4% e de 28,3% no módulo de deformação das argamassas ao adicionar-se 6% e 10% de sílica ativa, respectivamente, para as

misturas com relação cimento/areia 1:2. Para a relação cimento/areia 1:2,5, o aumento para as respectivas adições foi de 30,3% e 43,9%, respectivamente. Entretanto, o resultado apresentado é contraditório ao obtido por SCHULER (1998), a qual apresentou, para argamassas similares com adição de 10% de sílica ativa, um módulo de deformação praticamente igual (5,8% inferior) ao da argamassa sem adição. Isso pode ter ocorrido, possivelmente, em virtude do procedimento de adensamento adotado pela autora, conforme comentado anteriormente.

A argamassa modificada pelo inibidor de corrosão apresenta um módulo de deformação 12,6% superior ao módulo da argamassa de referência. O resultado é coerente com os valores encontrados para a resistência à compressão pois o módulo de deformação aumenta com a resistência, embora não exista um consenso sobre a forma exata dessa dependência (NEVILLE, 1997).

A adição do SBR tornou a argamassa com a deformação específica de ruptura maior, com um módulo de deformação 29,6% menor que o de referência. Este comportamento pode ser atribuído ao menor módulo de deformação do polímero quando comparado aos produtos de hidratação do cimento, tornando o comportamento conjunto menos frágil. Este resultado é coerente com o obtido por FERREIRA & LIBORIO (1993) que obtiveram uma redução de aproximadamente 29% para o mesmo teor de adição em argamassa similar. RISSIGNOLO & AGNESINI (1999) obtiveram uma redução média de 34% no módulo de deformação tangente inicial, estudando três traços de argamassas, somente com a adição de 15% de SBR. RAY et alli (1995) observaram que com o aumento do teor de SBR adicionado na argamassa, a deformabilidade das mesmas aumentava, obtendo, assim, uma redução de 83,18% no módulo inicial tangente com a adição de 20% de SBR. Já OLIVEIRA (1999), para argamassas mistas, obteve uma redução contínua do módulo de deformação, à medida que se aumentava o teor de SBR, chegando a uma redução de 80% para o teor de 20% de adição. Portanto, tudo indica que a adição de estireno-butadieno nas argamassas as torna mais deformável, e isto ocorre provavelmente, segundo AFRIDI et alli (1994b), porque a adição do polímero promove uma modificação estrutural na argamassa devido à presença de regiões com características semelhantes à borracha (látex) ou devido à presença de filmes poliméricos capazes de deter o avanço das fissuras. Segundo STORTE & TEZUKA (1992), a microestrutura do concreto com adição de polímeros apresenta microfibras de polímeros, que formam pontes através das microfissuras, restringindo a sua propagação e simultaneamente verifica-se uma forte ligação entre a matriz aglomerante e os agregados.

Entretanto, GODOY & BARROS (1999) indicam um aumento do módulo de deformação das argamassas modificadas com estireno-butadieno, quando comparados aos das argamassas não modificadas. Este aumento, provavelmente se justifica devido à contribuição do filme polimérico formado no aumento da resistência à compressão da argamassa, podendo este elevar o módulo de deformação.

Então, similarmente à resistência à compressão, ainda não existe um consenso sobre a influência do estireno-butadieno no módulo de deformação da argamassa, apresentando-se assim, uma tendência de redução do módulo de deformação, à medida que se adiciona SBR.

### 6.2.3 Perda de massa gravimétrica

Após o término dos ensaios acelerados de corrosão por cloretos, retirou-se as barras dos corpos-de-prova, limpando-as através do procedimento descrito no Anexo B. A diferença entre a massa da barra antes e depois do ensaio é denominado de perda de massa gravimétrica. Os valores das massas das barras imersas nos corpos-de-prova, antes e depois dos ensaios, estão expostos no Anexo F. A perda de massa eletroquímica foi calculada através da equação (3.5). Comparou-se as duas perdas de massa, onde um fator de erro de 2 é aceito como satisfatório (GONZÁLEZ, 1989). Os resultados encontram-se dispostos na Figura 6.39.

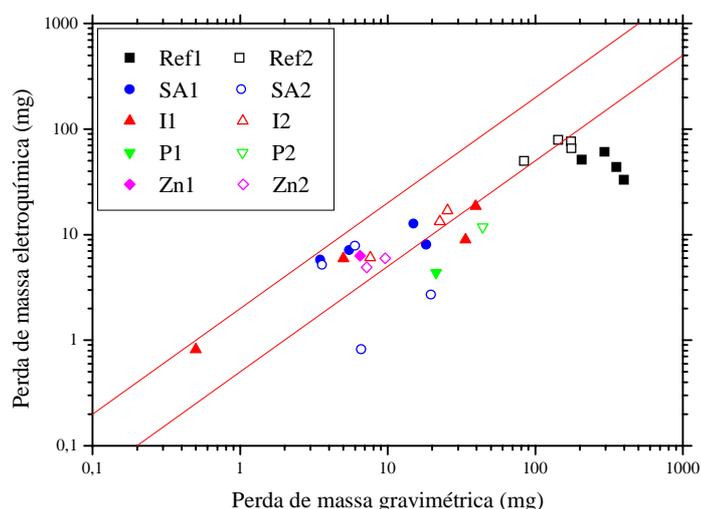


Figura 6.39 Comparação entre a perda de massa gravimétrica e a eletroquímica

Conforme o gráfico acima pode-se notar que em algumas barras a perda de massa gravimétrica foi maior que a perda de massa eletroquímica. Este fato pode ser justificado devido à corrosão que ocorreu sob a fita que delimitava a área a corroer, sendo esta ineficiente na proteção da referida área. A Figura 6.40 mostra o estado de uma das barras que apresentou corrosão sob a fita. Como algumas barras apresentaram pequenas perdas eletroquímicas, com valores abaixo de 10mg, houve dificuldade em remover apenas os produtos de corrosão, sendo que em algumas barras, parte do metal também foi retirado, contribuindo, assim, para o aumento da perda de massa gravimétrica.



Figura 6.40 Corrosão na barra sob a fita

A tipologia do ataque encontrado, segundo a forma, foi a corrosão localizada, conforme pode se observar através da Figura 6.41. Este resultado é coerente ao encontrado por GONZÁLEZ et alli (1995), que examinando a superfície de armaduras imersas em argamassas após ensaios acelerados de corrosão por cloretos, verificou que a corrosão se manifestou de maneira desigual, com áreas não corroídas e outras intensamente atacadas, apresentando pites com grandes profundidades (até 2,15mm). Segundo tais autores, a profundidade máxima do ataque localizado excede entre 4 a 8 vezes a penetração média geral estimada a partir da perda de massa obtida depois do tempo de exposição.



Figura 6.41 Barra de aço com corrosão por pites

Houve dificuldade na remoção dos óxidos e outros produtos aderidos às barras dos sistemas de reparo com adição de SBR e com o revestimento de zinco. Esta dificuldade refletiu-se na determinação da perda de massa gravimétrica, pois algumas barras apresentaram uma maior massa após os ensaios, inviabilizando a determinação da perda de massa gravimétrica.

### 6.3 ANÁLISE DE CUSTOS

A escolha do sistema de reparo a ser utilizado não está relacionada somente com a causa do problema. Existem diversos e diferentes sistemas de reparo que podem ser satisfatórios, e parâmetros únicos das estruturas podem vir a fazer com que um sistema seja mais atrativo que o outro. Certos fatores, tais como probabilidade de falha, aspectos estéticos (aparência do reparo), compatibilidade com o substrato, durabilidade e desempenho dos sistemas, dentre outros, devem ser levados em conta quando feita a seleção (PAUL, 1998). Um fator muito importante, que sempre deve ser levado em conta, é o parâmetro custo (custos iniciais e de manutenção), devendo-se fazer um estudo da viabilidade econômica do mesmo, além de se considerar os demais aspectos anteriormente citados.

Fez-se, portanto, um levantamento de custos dos materiais utilizados nos sistemas de reparo estudados, excluindo-se os custos devido à mão de obra e depreciação dos equipamentos, a fim de se fazer uma simples comparação de custos entre os sistemas. Os

valores, em moeda nacional, referem-se a cotações realizadas no mês de março de 2000, na cidade de Fortaleza/CE. A variação cambial apresentada neste período apontava que, em média, R\$1,00 = US\$0,57. A Tabela 6.7 resume os resultados obtidos para 1 m<sup>3</sup> de cada sistema de reparo avaliado.

Tabela 6.7 Comparação de custos dos materiais dos sistemas de reparo para produção de 1m<sup>3</sup>

Sistema de Reparo	Custo dos Materiais (R\$)
Sistema de reparo de referência	149,02
Sistema de reparo com adição de sílica ativa	151,99
Sistema de reparo com adição de nitrito de sódio	325,23
Sistema de reparo com adição de estireno-butadieno	813,71
Sistema de reparo com pintura de Zn nas barras	243,42 <sup>4</sup>

Através dos dados da Tabela 6.7, nota-se que o sistema de reparo com adição de estireno-butadieno é o de custo mais alto, apresentando um aumento de 446%, em relação ao sistema de referência. Em seguida, tem-se o sistema de reparo com adição de inibidor de corrosão, o sistema de reparo com pintura rica em zinco e o sistema de reparo com adição de sílica ativa, com um acréscimo de 118%, 63,3% e 2%, respectivamente.

A análise isolada do custo de um material pode levar a interpretações equivocadas sobre a viabilidade de sua utilização. Convém, então, que se faça uma análise dos custos do material, mão-de-obra e equipamentos, aliada ao desempenho do material em estudo, onde os índices de desempenho apresentados sejam ferramentas facilitadoras do processo de escolha do sistema de reparo mais indicado.

Com o intuito de estimar, a relação custo/benefício, classificou-se os sistemas de reparo através de uma variável denominada *índice de desempenho*. Essa variável expressa a relação do custo do sistema de reparo em análise com os resultados de um determinado ensaio em questão, sempre relativamente ao sistema de reparo de referência. Foram escolhidos dois índices de desempenho: um que espelhasse o comportamento dos sistemas com relação à durabilidade, sendo representado pelo período de iniciação da corrosão nas barras com 10mm de cobrimento, e outro que espelhasse o desempenho dos sistemas de reparo no aspecto mecânico, sendo este representado pela resistência à compressão aos 28 dias das argamassas dos sistemas de reparo. Tais índices são apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 Índices de desempenho dos sistemas de reparo

Sistema de reparo	Índice de desempenho	
	Período de iniciação da corrosão para 10mm de cobrimento	Resistência à compressão aos 28 dias
Referência	1,00	1,00

<sup>4</sup> Considerou-se uma taxa de armadura de 60 kg/m<sup>3</sup> de concreto, sendo a armadura de Ø=12,5mm.

Com Sílica Ativa	0,82	0,61
Com Inibidor	1,09	2,00
Com Polímero	1,99	5,54
Com pintura de Zn nas barras	2,18	-

De acordo com os dados da Tabela 6.8, observa-se que o sistema de reparo com adição de sílica ativa apresenta a melhor relação custo/benefício para a resistência à compressão, pois a adição de sílica ativa proporcionou um aumento no custo do sistema de reparo de somente 1,99%, enquanto que a resistência à compressão da argamassa do sistema de reparo aumentou em 66,6%, resultando em um índice de desempenho de 0,61, ou seja, para o sistema de reparo com adição de sílica ativa, gasta-se aproximadamente 39% menos para se obter a mesma resistência da argamassa do sistema de referência.

Seguindo essa linha de raciocínio, tem-se que o sistema de reparo com adição de inibidor de corrosão e o sistema de reparo com adição de polímero gastam aproximadamente 100% e 454% a mais, respectivamente, para obter o mesmo resultado de resistência à compressão da argamassa do sistema de reparo de referência.

A adição da sílica ativa também proporciona uma melhor relação custo/benefício para o período de iniciação, gastando-se em torno de 18% a menos para se obter o mesmo resultado do sistema de referência, ou seja, um período de iniciação de 14 dias. Os índices de desempenho para o período de iniciação da corrosão dos sistemas de reparo são 9%, 99% e 118% superiores aos do índice do sistema de referência, para os sistemas de reparo com adição de inibidor, sistema de reparo com adição de polímero e sistema de reparo com pintura de zinco nas barras, respectivamente.

Convém ressaltar que os aspectos mecânicos são importantes na escolha de um sistema de reparo, entretanto são considerados como complementares, pois o objetivo do reparo é conformar a estrutura à uma durabilidade considerada satisfatória. Portanto, tais índices de desempenho devem ser utilizados como ferramentas facilitadoras durante o processo de escolha de um sistema de reparo.

#### 6.4 COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DOS DIVERSOS ENSAIOS

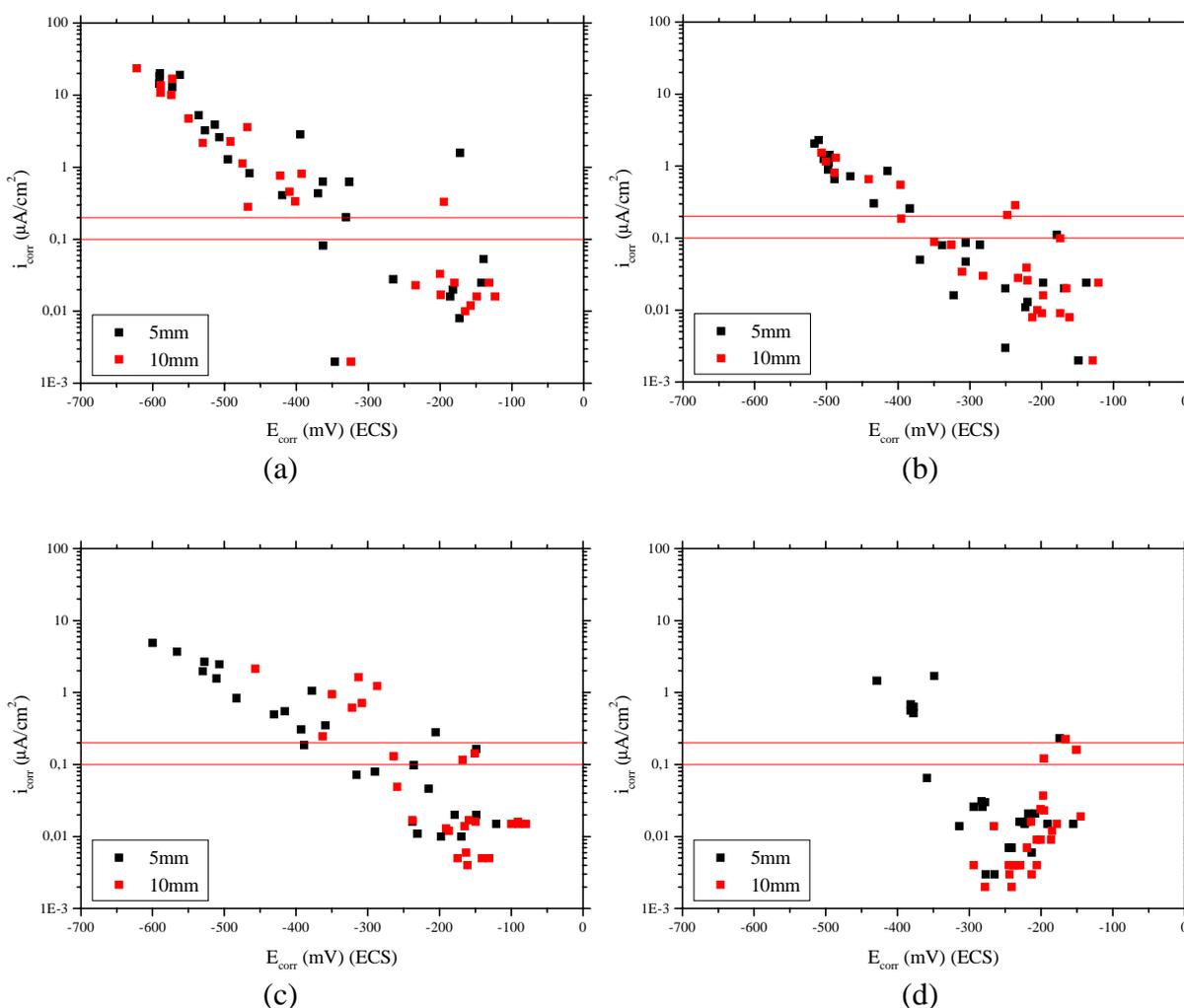
De posse dos resultados do ensaio acelerado de corrosão, juntamente com os resultados dos ensaios complementares e da análise de custos, pode-se fazer comparações entre os sistemas de reparo estudados, correlacionando os resultados, de forma a quantificar e melhor entender certos parâmetros que influem no desempenho dos mesmos.

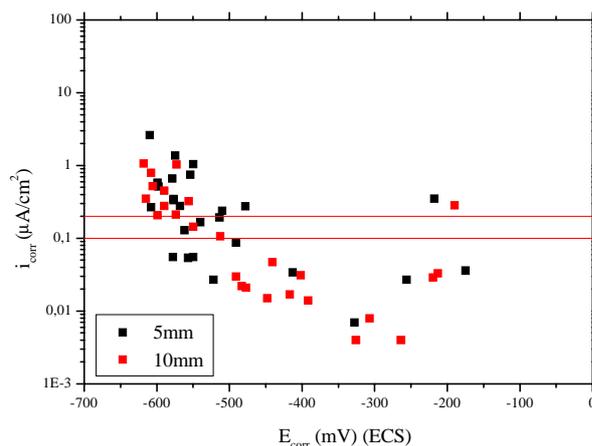
##### 6.4.1 Relação entre a taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ )

Conforme o esperado, a relação entre o potencial de corrosão e a taxa de corrosão

apresentou um comportamento semi-logarítmico, para valores de  $i_{\text{corr}}$  superiores a  $0,1-0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , de acordo com a Figura 6.42, apresentando similaridade com os resultados apresentados por outros autores (NEPOMUCENO, 1992; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995; MONTEIRO, 1996; FIGUEIREDO, 1998; TEIXEIRA, 1998; VASCONCELOS, 1998, dentre outros). Para valores de  $i_{\text{corr}}$  inferiores a  $0,1-0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , nota-se certa dispersão entre os resultados, não sendo possível estabelecer uma correlação entre  $i_{\text{corr}}$  e  $E_{\text{corr}}$  (Figura 6.42-d).

Através da mesma figura, pode-se observar que a quantidade de leituras que apresentaram valores de taxa de corrosão maiores que  $0,1-0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  vai diminuindo gradativamente para os sistemas de reparo com adição de sílica ativa e com adição de nitrito de sódio, chegando a quase não se observar correlação entre as variáveis para o sistema de reparo com adição de estireno-butadieno. A baixa correlação pode ser atribuída à imprecisão dos valores de  $i_{\text{corr}}$  quando o aço está passivo. Isto evidencia a dificuldade de penetração do agente agressivo através da argamassa, confirmando a baixa difusibilidade da mesma, tanto à água (Figura 6.30 e 6.31) quanto a cloretos (Figura 6.36 e Tabela 6.4), e ressalta a eficiência dos sistemas de reparo avaliados.





(e)

Figura 6.42 Relação entre taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) para: (a) sistema de referência; (b) sistema com sílica ativa; (c) sistema com nitrito de sódio; (d) sistema com SBR e (e) sistema com pintura de Zn nas barras.

#### 6.4.2 Relação entre a taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e a resistência ôhmica ( $R_{\text{ohm}}$ )

A velocidade de corrosão não se comportou inversamente proporcional à resistência ôhmica (Figura 6.43), não apresentando uma relação linear entre o logaritmo de  $i_{\text{corr}}$  e a  $R_{\text{ohm}}$ , conforme observado em outros trabalhos (ENEVOLDSEN et alli, 1994; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995; CASTANHEIRA, 1997; ANDRADE et alli, 1998, dentre outros). Entretanto, este resultado é coerente ao apresentado por VASCONCELOS (1998).

É notável, principalmente para o sistema de reparo de referência (Figura 6.40-a), que os resultados são dispostos em dois grupos, sendo valores relativos à secagem e valores relativos à imersão parcial. Observa-se no sistema de reparo de referência que, mesmo quando a resistência ôhmica apresentou grandes valores, a taxa de corrosão, que deveria ter se reduzido, ainda mostrou-se acima dos valores limites. Especificamente neste caso, não há um controle da corrosão pela resistência ôhmica da argamassa pois, conforme visto pela perda de massa gravimétrica e pelas taxas de corrosão alcançadas, o grau de deterioração das barras imersas neste sistema são elevados o que confirma que, na presença de cloretos, o controle nunca somente é resistivo.

Entretanto, a resistência ôhmica deve ser considerada simplesmente como um parâmetro físico, não se podendo inferir a respeito do desempenho dos sistemas de reparo considerando-se somente tal parâmetro.

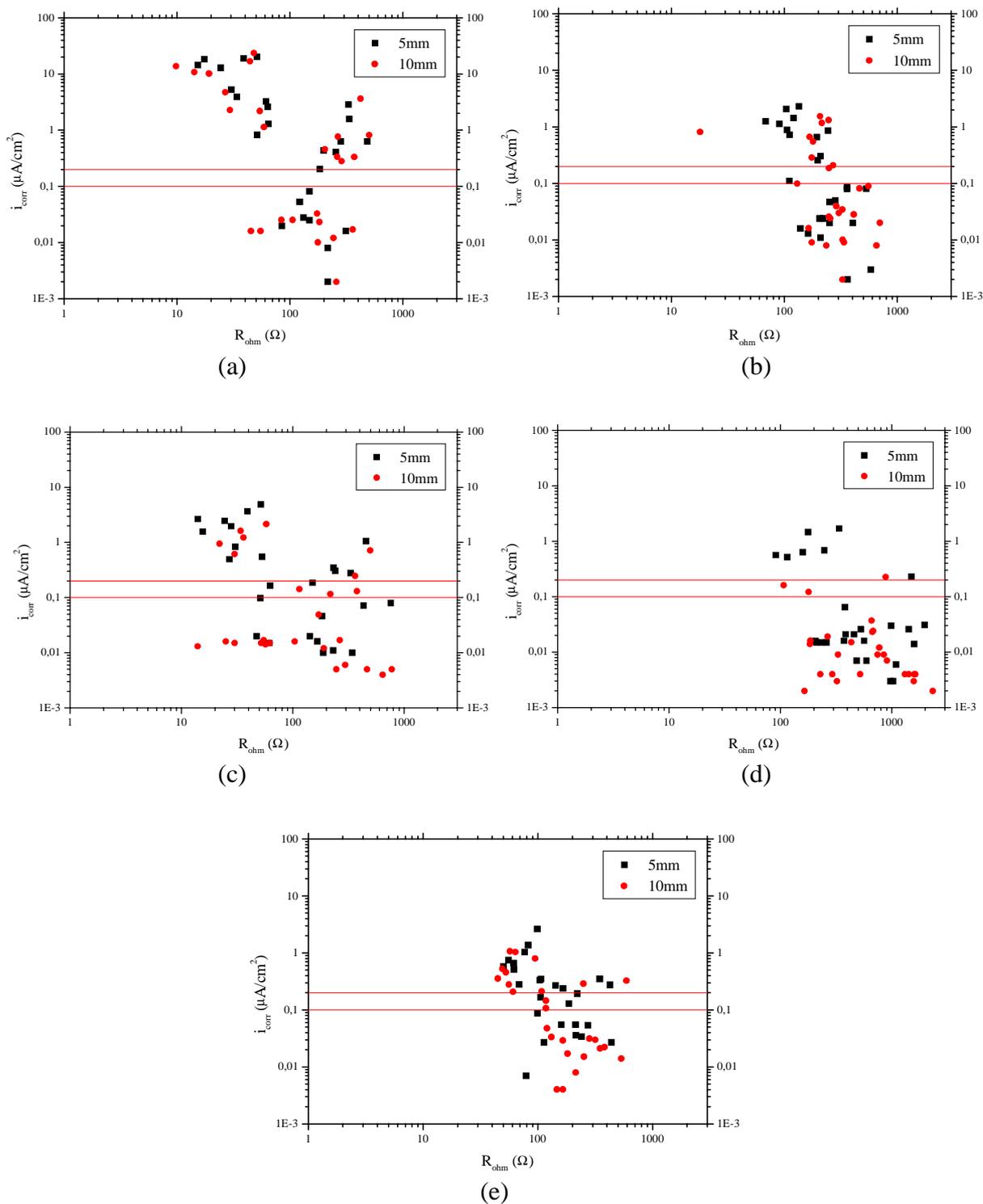


Figura 6.40 Relação entre taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e resistência ôhmica ( $R_{\text{ohm}}$ ) para: (a) sistema de referência; (b) sistema com sílica ativa; (c) sistema com nitrito de sódio; (d) sistema com SBR e (e) sistema com pintura de Zn nas barras.

### 6.4.3 Comparações gerais

A adição de sílica ativa propiciou um aumento médio de 37,5% na fase de iniciação da corrosão (item 6.1.7) quando comparado com a argamassa de referência, apresentando um

acréscimo no custo de somente 2,3%, obtendo-se assim os melhores valores para os índices de desempenho. Entretanto, a absorção total da argamassa aumentou com a adição da sílica ativa, embora tenha-se observado um incremento na resistência à compressão e uma redução na absorção por capilaridade. Estes resultados coadunam com os obtidos por SILVA FILHO (1994), que obteve uma maior absorção por imersão nas amostras com adições de sílica ativa, entretanto, ao confrontar com os dados obtidos no ensaio de penetração sob pressão, encontrou uma forte redução na entrada de água para as amostras com adição de 10% de sílica ativa. Desta forma, mesmo que se tenha um volume total de poros maior, ao se ter maior volume de poros pequenos, tanto a absorção capilar como a velocidade do fluxo de água são menores (BAUER, 1995). Portanto, pode-se justificar o aumento do tempo de despassivação observando-se os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade e de difusão de cloretos, onde conseguiu-se diminuir os coeficientes em 35,6% e 55,9%, respectivamente. Desta forma, os cloretos demoram mais para atingir a armadura, não obstante, o teor de cloretos encontrado na argamassa com sílica ativa apresentou uma redução média de 27,8% em relação a argamassa de referência. A intercomunicação dos poros, além de participar de forma muito significativa nos ensaios acelerados de corrosão, onde a mesma atua na fase de imersão parcial em solução rica em cloretos, ainda exerce influência sobre as propriedades físicas das argamassas dos sistemas de reparo. No caso da argamassa com adição de sílica ativa, a adição da mesma reduz a porosidade capilar, aumentando consideravelmente a resistência à compressão da argamassa. Ao aumentar a resistência mecânica da argamassa, a sílica ativa deixou a mesma menos deformável. Tais resultados são coerentes aos encontrados por HERNÁNDEZ et alii (1999), os quais analisando os resultados dos ensaios físico-mecânicos (resistência à compressão, porosidade efetiva e absorção capilar, difusão de cloretos), observaram que o uso da sílica ativa melhora as propriedades das misturas em relação às amostras sem adições.

A adição do nitrito de sódio à mistura onerou o sistema de reparo em 118%, em relação ao de referência, além de aumentar os índices de desempenho de resistência à compressão e do período de iniciação da corrosão em 100% e 9%, respectivamente, ambos em relação ao sistema de referência. Entretanto, a adição do nitrito de sódio proporcionou o dobro do tempo do período de iniciação da corrosão. O prolongamento deste período é possivelmente resultado, além da ação inibidora do nitrito de sódio, das modificações microestruturais implementadas pelo inibidor na argamassa onde foi adicionado, proporcionando uma redução de até 42,1% no coeficiente de difusão da argamassa. Ressalta-se a importante redução do teor de cloretos encontrada nas argamassas modificadas pelo nitrito (14,4%). Tais modificações microestruturais, juntamente com uma suposta redução do tempo de pega e de endurecimento, ambos propiciados pela adição do inibidor, levaram a argamassa a um incremento na resistência à compressão nos primeiros dias (64,1%, para 3 dias, 33,6%, para 7 dias, não apresentando diferenças estatisticamente significativas para 28 dias). Como o ensaio de módulo de deformação foi realizado aos 28 dias, e já que para esta idade, a resistência à compressão não apresentou diferenças estatisticamente significativas,

este também não apresentou diferenças estatisticamente significativas.

Já a adição do estireno-butadieno na argamassa do sistema de reparo propiciou um excelente desempenho quanto às propriedades relacionadas com a durabilidade (absorção, difusão de íons, teor de cloretos na argamassa, entre outros). Dentre os ensaios complementares relacionados com a durabilidade do sistema de reparo, todos os índices de desempenho mensurados (coeficientes) apresentaram os melhores resultados. Esta baixa difusibilidade, apresentada pela argamassa modificada pelo SBR é refletida através do incremento de 250% no tempo de iniciação da corrosão, para as barras com 5mm de cobertura, e 175% para a espessura de cobertura de 10mm. Mas esta melhoria na microestrutura da argamassa não se espelha em um incremento nas propriedades mecânicas da argamassa pois como o polímero (estireno-butadieno) é à base de látex (borracha), a argamassa apresenta uma maior deformabilidade acompanhada de uma menor resistência à compressão. O custo deste sistema de reparo é consideravelmente superior aos demais, apresentado índices de desempenho 454% e 99% (resistência a compressão e período de iniciação da corrosão, respectivamente) superiores aos de referência, cabendo ao engenheiro responsável pelo reparo decidir sobre sua viabilidade.

O sistema de reparo que utiliza uma pintura rica em zinco nas barras apresentou um desempenho insatisfatório do ponto de vista eletroquímico pois o tempo de iniciação da corrosão foi idêntico ao obtido para a barra com sistema de reparo de referência, o qual, teoricamente, seria o mais ineficiente, e o custo deste sistema de reparo é 63,3%<sup>5</sup> superior, apresentado assim um índice de desempenho 63% superior ao índice do sistema de referência. Entretanto, deve-se considerar que o potencial e a taxa de corrosão medidos referem-se principalmente à corrosão do zinco, devendo-se tomar cuidado com as conclusões a respeito deste sistema de reparo ao se considerar somente as medidas eletroquímicas. Cabe salientar ainda que, se por um lado está ocorrendo a corrosão do zinco, este sistema está sendo eficiente pois está protegendo galvanicamente o aço. Por outro lado, a proporção que o zinco é consumido nas reações, este sistema tem sua vida útil minimizada, perdendo sua função quando o zinco não mais existir, neste caso a corrosão passará para o aço. Talvez, ao se utilizar uma argamassa menos permeável, a proteção designada ao zinco se torne viável, pois a quantidade de agentes agressivos disponíveis em contato com a barra seja menor, propiciando melhores condições para o zinco proteger a barra galvanicamente por mais tempo.

---

<sup>5</sup> Considerou-se uma taxa de armadura de 60 kg/m<sup>3</sup> de concreto, sendo a armadura de Ø=12,5mm.

## 6.5 PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DAS ARGAMASSAS DE REPARO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS

Embora não fizesse parte dos objetivos iniciais deste trabalho prever vida útil através de modelos, em virtude da disponibilidade dos dados resultantes da pesquisa, aliado à uma linha de estudo em desenvolvimento neste Núcleo de Pesquisa, utilizou-se modelos matemáticos de previsão de vida útil já identificados por ANDRADE (2000) para prever a vida útil dos sistemas de reparo estudados sob determinadas condições de agressividade.

### 6.5.1 Introdução

Predizer a vida útil de uma estrutura, obviamente é uma tarefa complexa, entre outras razões porque a tolerância da extensão dos danos pode variar com as pretensões de uso da estrutura e seu uso como um todo. Como exemplo, pode-se mencionar os vários tipos de vida útil citados por HELENE (1993), conforme visto no item 2.2.

Segundo SILVA (1998), existem essencialmente dois grupos de modelos desenvolvidos para representar a degradação das estruturas: um grupo relativo à *corrosão das armaduras* e um outro, à *deterioração do concreto*. Entre os processos de degradação, os que mais se tem investigado com a finalidade de desenvolver modelos matemáticos, justamente devido à importância do tema, são aqueles referentes à corrosão de armaduras, sendo que o ataque por cloretos, a carbonatação do concreto e o processo de corrosão são os fenômenos que mais têm recebido atenção. Estes modelos seguem a proposta de TUUTTI (1980) para o estudo da vida útil, dividindo-a em período de iniciação da corrosão, o qual é definido pelo tempo em que os agentes agressivos levam até atingirem a armadura, sem comprometer a funcionalidade da estrutura, e em um segundo período, denominado de propagação da corrosão, onde os fenômenos de degradação agem de maneira efetiva sobre a estrutura, comprometendo-a, tanto em sua estabilidade estrutural quanto em seu aspecto visual.

Assumindo que período de propagação da corrosão foi iniciado, a vida residual da estrutura pode ser estimada, principalmente através da taxa de corrosão medida, ou esta pode ser calculada utilizando-se dados previamente medidos, tais como potencial de corrosão, resistividade elétrica, teor de cloretos, intensidade de corrosão, dentre outros, sendo que o nível inaceitável de deterioração varia com o uso pretendido do elemento e sua função na estrutura. Convém destacar que estas predições de vida útil baseadas em dados da taxa de corrosão, inclui a influência de somente alguns potenciais fatores de corrosão (umidade relativa, grau de saturação dos poros, temperatura, dentre outros), sendo que apenas a durabilidade das armaduras é considerada. Pode existir casos onde a vida útil da estrutura é regida pela durabilidade do concreto.

Com o intuito de se obter uma predição quantitativa, os efeitos da corrosão (redução da seção transversal da armadura, aparecimento de manchas, fissuras, entre outros) devem ser

transformados em algum expoente numérico, com uma estimativa final da influência desses efeitos sobre o comportamento estrutural (LÓPEZ et alli, 1993). A Figura 6.41 implementa os conceitos acima citados no modelo de vida útil de TUUTTI (1980) para armaduras de 10mm e 20mm de diâmetro, apresentando um conjunto de possíveis valores de  $i_{corr}$  para as armaduras, onde, segundo o referido autor, o decréscimo de 10% na seção transversal da armadura é adotado como o nível máximo aceitável de deterioração.

Existe uma grande variedade de modelos de predição de vida útil considerando tanto o fenômeno da carbonatação, quanto a deterioração por efeito dos cloretos. Tais modelos podem ser classificados em função da forma que foram desenvolvidos, segundo *modelos empíricos* e *modelos analíticos*. Os modelos empíricos têm como base a utilização de dados provenientes de ensaios laboratoriais ou dados reais provenientes de inspeções, os quais são utilizados nas condições de contorno. Já os modelos analíticos estão baseados no ajuste de equações, em função de dados obtidos em inspeções. Os modelos analíticos se baseiam, em sua grande maioria, na segunda lei de difusão de Fick, a qual, através de certas hipóteses adicionais, pode ser empregada na forma de equação matemática (SILVA, 1998).

Como já mencionado anteriormente, estes modelos subdividem-se quanto ao período de ação dos agentes agressivos, na iniciação e na propagação da corrosão. Segundo ANDRADE (2000), dentre os modelos que consideram a carbonatação, na iniciação da corrosão, pode-se citar aqueles propostos por Smolczik (1969), Schiessl (1976), Tuutti (1982), Sitter (1982), Vesikari (1988), Morinaga (1990), Bob & Bob (1991), Papadakis et alli (1992), Andrade et alli (1993) e Alonso & Andrade (1993), dentre outros, todos citados por SILVA (1998). Em relação aos cloretos, os modelos propostos para a penetração de íons provenientes do ambiente são os que despertam maior interesse. Para o período de iniciação, há os modelos de Clear & Hay (1973), Sitter (1982), Babaei (1986), Morinaga (1990) e Bob (1996), dentre outros, todos citados por SILVA (1998), onde a maioria se baseia na segunda lei de Fick. São escassos os modelos propostos para o período de propagação da corrosão. Ainda assim, pode-se citar o modelo de Andrade et alli (1989) para a carbonatação, e o modelo de Morinaga (1990) para a carbonatação e cloretos, todos citados por SILVA (1998).

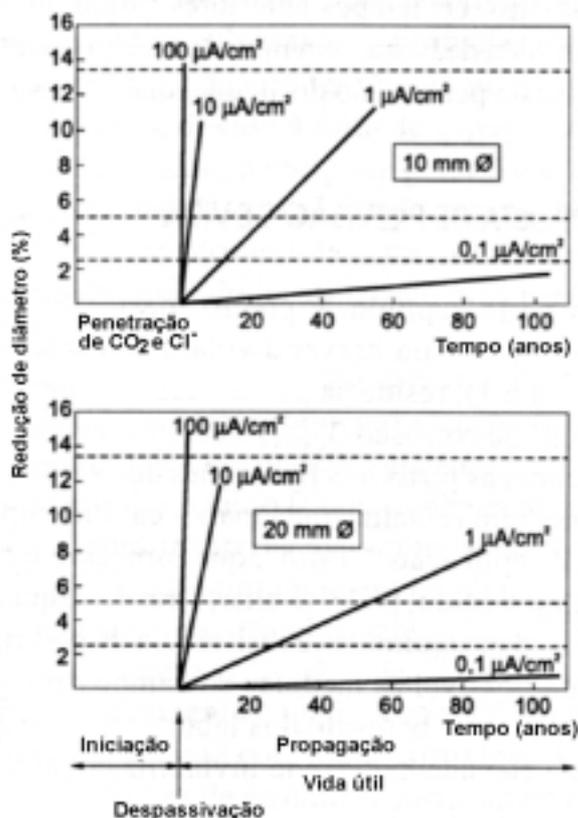


Figura 6.41 Estimativa da vida residual de armaduras de 10mm e 20mm de diâmetro em função da velocidade de corrosão (CASCUDO, 1997).

Devido à dinâmica do processo de corrosão das armaduras no concreto, é importante que o modelo seja também dependente do tempo, além de outras variáveis intrinsecamente relacionadas à corrosão. LIU (1996) apresenta um modelo matemático de regressão não-linear que leva em conta não somente dados relacionados diretamente ao grau de corrosão, como taxa de corrosão, mas também baseia-se na variação da temperatura, no tempo de exposição aos agentes agressivos, na resistência ôhmica do concreto e no teor de cloretos encontrado nas proximidades da barra.

### 6.5.2 Procedimento

Com a constatação da grande quantidade de danos ocasionados pela corrosão de armaduras, um novo nicho de mercado está em franca expansão: o da reabilitação de estruturas. Diversos materiais são utilizados no reparo de estruturas, sem se ter conhecimento sobre a durabilidade dos mesmos e qual a vida útil que estes proporcionam à estrutura. Na maioria das vezes, as informações comerciais disponíveis apresentam resultados de ensaios de caracterização dos produtos, que em sua grande maioria restringem-se àquelas fornecidas pelos fabricantes. Contudo, praticamente nenhuma informação é apresentada sobre seu desempenho na proteção da armadura contra a corrosão e sobre sua durabilidade. Desta forma, quando os profissionais necessitam eleger os produtos mais indicados para uma determinada situação, não encontram as informações consideradas necessárias para uma correta prescrição.

Com o objetivo de minimizar esta lacuna, utilizou-se de dados obtidos em laboratório para se determinar o desempenho das quatro argamassas de reparo estudadas, através da segunda lei de Fick, para a etapa de iniciação, e do modelo de previsão de vida útil proposto por LIU (1996), para a etapa de propagação.

A segunda lei de Fick, que representa uma condição transiente, não estacionária, pode ser escrita em função do tempo de exposição aos cloretos e a sua solução, considerando a concentração superficial do íon na solução externa constante, é dada pela Equação 6.1.

$$\frac{C_x - C_o}{C_s - C_o} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{ef} \cdot t}}\right) \quad (6.1)$$

Onde:

$C_x$   $\Rightarrow$  concentração dos cloretos na profundidade  $x$ , no tempo  $t$ ;

$x$   $\Rightarrow$  profundidade considerada;

$C_o$   $\Rightarrow$  concentração inicial de cloretos no interior do concreto;

$D_{ef}$   $\Rightarrow$  coeficiente efetivo de difusão;

$t$   $\Rightarrow$  duração de tempo considerado; e

$C_s$   $\Rightarrow$  concentração de cloretos na superfície do concreto, admitida constante;

$\operatorname{erf}$   $\Rightarrow$  função erro de Gauss.

Pode-se utilizar esta lei para prever a vida útil de um elemento de concreto armado, pois conhecendo-se os parâmetros  $C_x$ ,  $C_o$ ,  $C_s$  e  $D_{ef}$ , é possível estimar em quanto tempo ( $t$ ) os agentes agressivos alcançarão a armadura localizada a uma certa profundidade ( $x$ ). Outra informação importante que pode ser obtida é o tempo ( $t$ ) necessário para que a concentração de cloretos ( $C_x$ ), na profundidade ( $x$ ) onde as armaduras estão localizadas, alcance a concentração limite para que haja corrosão.

Apesar de já existirem outras formulações mais recentes para se modelar a penetração de agentes agressivos para o interior do concreto, a segunda lei de Fick é empregada em função da sua extrema simplicidade de resolução matemática e pela sua consagração quando comparada às demais formulações propostas, que ainda necessitam de validações mais consistentes.

Já para o caso da etapa de propagação do processo corrosivo, LIU (1996) apresenta uma equação geral (Equação 6.2) que leva em consideração tanto aspectos do concreto quanto variáveis relacionadas à condição ambiental para determinação da taxa de corrosão no decorrer do tempo.

$$\ln(i) = A + B \ln(Cl^-) + \frac{C}{T} + D.R_c + E.t^{-0,215} \quad (6.2)$$

Onde:

$i$  = taxa de corrosão;

$t$  = duração de tempo considerado;

$Cl^-$  = concentração de cloretos no interior do concreto ou da argamassa;

$T$  = temperatura do concreto ou da argamassa; e

$R_c$  = resistência ôhmica do concreto ou argamassa;

$A, B, C, D, E$  = incógnitas que dependem do material.

A fim de que tal relação represente uma condição específica, os valores das incógnitas devem ser determinados para cada material, através dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

### 6.5.3 Tratamento dos dados coletados para uma previsão da vida útil

De posse das variáveis necessárias para se utilizar os dois modelos escolhidos (segunda lei de Fick, para a iniciação da corrosão e o modelo de LIU (1996), para o período de propagação da corrosão), fez-se algumas considerações que são necessárias serem explicitadas.

Para se utilizar a segunda lei de Fick como um modelo matemático onde se possa prever a vida útil dos sistemas de reparo estudados, primeiramente resolveu-se através de um *software* matemático a equação 6.1, determinando-se a concentração de cloretos na superfície do concreto ( $C_s$ ). Para tanto, utilizou-se os teores de cloretos obtidos nos ciclos de número 4 ( $t=28$  dias) e 8 ( $t=56$  dias), para as profundidades ( $x$ ) de 5mm e 10mm e o coeficiente efetivo de difusão ( $D_{ef}$ ) das argamassas, obtidos nos ensaios acelerados. Já que não se adicionou cloretos à mistura, a concentração inicial de cloretos no interior do concreto ( $C_o$ ) é zero.

Desta maneira, obteve-se vários valores para a concentração de cloretos na superfície do concreto, onde o valor adotado foi a média dos quatro valores obtidos no oitavo ciclo, à profundidade de 10mm, pois estes já não sofrem interferências devido a imperfeições adquiridas na moldagem e no manuseio dos corpos-de-prova. O valor de  $C_s$  adotado foi de 1,6% de cloretos livres em relação à massa do cimento. Novamente, através da segunda lei de Fick, só que agora utilizando-se o valor de  $C_s$  obtido no procedimento anterior, tem-se os respectivos tempos de penetração para várias profundidades arbitradas, possibilitando assim plotar os gráficos de previsão de vida útil dispostos no item 6.5.4.1.

Já para a etapa de propagação do processo corrosivo, empregou-se a formulação

proposta por LIU (1996), exposta na Equação 6.2, onde os valores da resistividade, temperatura e taxa de corrosão utilizados foram mensurados ao longo do ensaio acelerado de corrosão por cloretos. Os valores do teor de cloretos, os quais só foram mensurados em dois ciclos, foram complementados através dos valores adquiridos pela resolução da segunda lei de Fick. De posse de todos os dados, determinou-se os valores dos coeficientes através da solução de um sistema linear de cinco equações e cinco incógnitas. Com os valores dos coeficientes, estabeleceu-se as equações, as quais estão apresentadas no item 6.5.4.2. Convém salientar que embora o modelo proposto por LIU (1996) seja para concretos, a utilização do mesmo em argamassas não é inviável, pois as variáveis consideradas (temperatura, resistência ôhmica, taxa de corrosão e teor de cloretos) também agem efetivamente sobre as mesmas.

## 6.5.4 Resultados

### 6.5.4.1 Etapa de iniciação

Na Figura 6.42 estão expressos os perfis de penetração de cloretos para o interior dos corpos-de-prova modelados através da segunda lei de Fick, para um período de 15 dias e de 1 ano, considerando todas as argamassas de reparo analisadas.

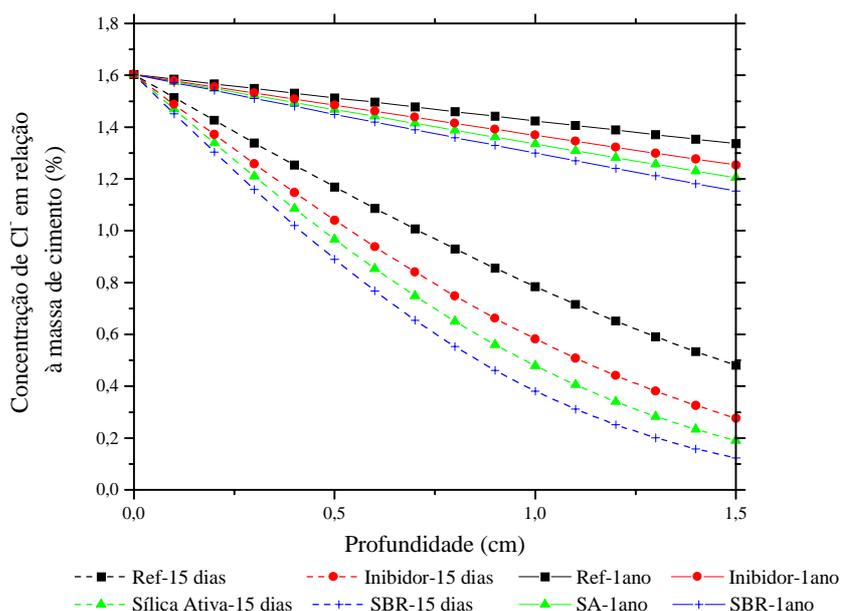


Figura 6.42 Evolução da concentração de cloretos em função da profundidade nas argamassas de reparo, para 15 dias e 1 ano de exposição

Observa-se que, tanto para 15 dias quanto para 1 ano, o desempenho apresentado pelas argamassas na modelagem segue, de uma forma geral, o mesmo comportamento apresentado nos ensaios de durabilidade, podendo classificar as argamassas, na seguinte ordem crescente de desempenho: argamassa de referência, argamassa com nitrito de sódio, argamassa com sílica ativa e argamassa com adição de estireno-butadieno. As modificações propiciadas pelas adições às argamassas, já discutidas anteriormente, também servem como justificativa para o desempenho das mesmas.

Já na Figura 6.43 está expressada a variação da concentração de cloretos no decorrer do tempo em uma profundidade pré-determinada (1,5 cm) para as argamassas empregadas. O comportamento apresentado pelas argamassas ratificam as considerações apresentadas anteriormente.

Observa-se que, dentro de uma análise comparativa, a argamassa de referência teria a menor vida útil, onde a penetração de cloretos atingiria o valor crítico, qualquer que fosse este valor, mais rapidamente que as demais. Por outro lado, a argamassa modificada com polímero apresentou uma maior vida útil que os sistemas analisados. Desta forma, baseando-se na Figura 6.43, pode-se prescrever a argamassa de reparo mais adequada à situação explicitada, com uma vida útil que pode ser estimada com um razoável grau de confiabilidade.

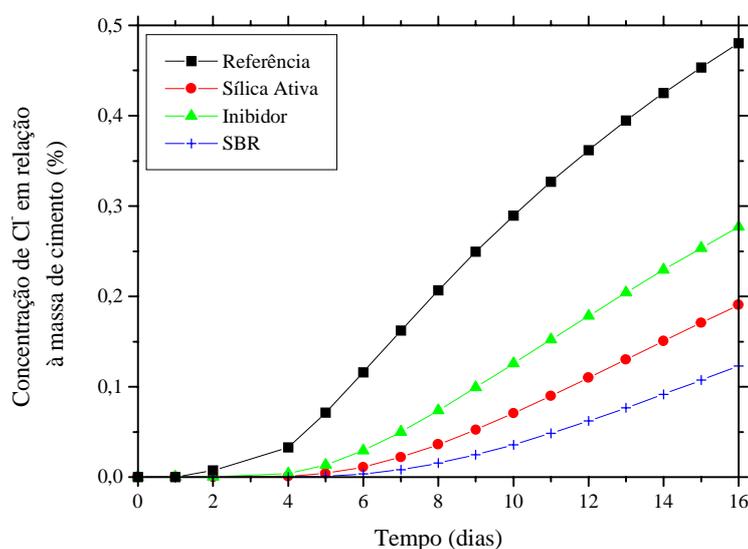


Figura 6.43 Evolução da concentração de cloretos nas argamassas de reparo em função do tempo de exposição ao sal, para uma profundidade de 1,5 cm

#### 6.5.4.2 Etapa de Propagação

Empregando-se a formulação geral apresentada pela Equação 6.2, e resolvendo um sistema linear para determinação dos valores das incógnitas para os diversos tipos de materiais empregados, obteve-se as equações que relacionam a intensidade de corrosão em função do tempo. Em tais formulações leva-se em conta o efeito sinérgico provocado pela ação da temperatura, da concentração de cloretos, e da resistência ôhmica do concreto. As relações determinadas para a argamassa de referência, para a argamassa de sílica ativa, para a argamassa modificada com inibidor e com polímero estão respectivamente explicitadas nas equações 6.3 a 6.6.

$$(\ln i)_{\text{referência}} = -34,227 + 4,267 \cdot \ln Cl + 9,74 \cdot 10^3/T + 1,152 \cdot 10^{-6} Rc - 2,418 \cdot t^{-0,215} \quad (6.3)$$

$$(\ln i)_{\text{sílica}} = -4,294 + 9,219 \cdot \ln Cl - 1,271 \cdot 10^3/T + 1,596 \cdot 10^{-4} Rc - 31,542 \cdot t^{-0,215} \quad (6.4)$$

$$(\ln i)_{\text{inibidor}} = 19,544 - 10,522 \cdot \ln Cl + 1,079 \cdot 10^4 / T - 6,235 \cdot 10^{-7} Rc - 64,056 \cdot t^{-0,215} \quad (6.5)$$

$$(\ln i)_{\text{polímero}} = 103,379 - 9,885 \cdot \ln Cl - 702,386 / T + 2,476 \cdot 10^{-5} Rc - 213,124 \cdot t^{-0,215} \quad (6.6)$$

Desta forma, pode-se verificar qual a intensidade de corrosão observada em um instante do tempo para os materiais analisados. Tal informação é de suma importância, pois possibilita ao engenheiro responsável pelos trabalhos de reabilitação saber qual o material que, após a despassivação da armadura, apresentará uma maior vida útil para determinadas condições de uso.

## 7 CONCLUSÕES

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos nos ensaios complementares de natureza mecânica, pode-se concluir que:

- para o sistema de reparo com adição de 10% de sílica ativa, sobre a massa do cimento, obteve-se consideráveis acréscimos na resistência à compressão, aonde para 3, 7 e 28 dias de idade, os incrementos de resistência correspondem a 61,3%, 67,6% e 66,6%, respectivamente, enquanto que no módulo de deformação, aos 28 dias, o acréscimo encontrado foi de 29,3%, todos referentes ao sistema de reparo de referência;

- para o sistema de reparo com adição de 2% de nitrito de sódio, sobre a massa do cimento, observou-se consideráveis acréscimos na resistência à compressão somente nas primeiras idades (64,1%, 33,6% e 9,3% de acréscimo para 3, 7 e 28 dias de idade, respectivamente), enquanto que no módulo de deformação, aos 28 dias, o acréscimo encontrado foi de 12,6%, todos referentes ao sistema de reparo de referência;

- o sistema de reparo com adição de 20% de estireno-butadieno, sobre a massa do cimento, obteve decréscimos na resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade de 19,5%, 4,3% e 1,5%, respectivamente, enquanto que no módulo de deformação, aos 28 dias, o decréscimo encontrado foi de 29,6%, todos referentes ao sistema de reparo de referência;

- a argamassa do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras possui as mesmas características da argamassa do sistema de reparo de referência, tendo-se obtido 13,3 MPa, 17,9 MPa e 30,2 MPa para a resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade, respectivamente, enquanto que para o módulo de deformação, aos 28 dias, o valor obtido foi de 16,9 GPa.

Com relação aos ensaios complementares de durabilidade pode-se concluir que:

- a adição da sílica ativa, no teor de 10% sobre a massa do cimento, proporcionou uma redução do coeficientes de absorção por capilaridade, do coeficiente de difusão e do teor de cloretos em 35,6%, 55,9% e 27,8%, respectivamente, contudo, o coeficiente de absorção por imersão cresceu em 10,6%, todos referentes ao sistema de reparo de referência;

- a adição do nitrito de sódio, no teor de 2% sobre a massa do cimento, proporcionou uma redução do coeficiente de difusão e do teor de cloretos em 42,3% e 14,4%, respectivamente, enquanto que o coeficiente de absorção apresentou um acréscimo não significativo de 2,6% e o coeficiente de absorção por capilaridade cresceu de 25,7%, todos

referentes ao sistema de reparo de referência;

- a adição do estireno-butadieno, no teor de 20% sobre a massa do cimento, proporcionou uma redução do coeficiente de absorção por imersão, do coeficiente de absorção por capilaridade, do coeficiente de difusão e do teor de cloretos em 75,3%, 76,2%, 65,7% e 55,4%, respectivamente, sendo todos referentes ao sistema de reparo de referência.

- a argamassa do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras possui as mesmas características da argamassa do sistema de reparo de referência, tendo-se obtido como coeficiente de absorção por imersão, como coeficiente de absorção por capilaridade, como coeficiente de difusão e como o teor médio de cloretos, os valores de 8,71%,  $1,01\text{g/cm}^2$ ,  $8,07 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$  e 3,94%, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos no ensaio acelerado de corrosão por cloretos, para os sistemas de reparo em estudo, é conveniente que se considere principalmente os dados coletados para as barras dispostas com 10mm de cobrimento, pois as barras com 5mm de cobrimento estão mais susceptíveis a interferências provenientes de imperfeições adquiridas na moldagem e no manuseio dos corpos de prova. Portanto, conforme os resultados do ensaio acelerado de corrosão por cloretos, conclui-se que:

- a utilização da sílica ativa, no teor de 10% sobre a massa do cimento, reduziu a penetração dos cloretos, aumentando em 50% a duração da fase de iniciação da corrosão, para as armaduras com cobrimento de 5mm, e em 25%, para as armaduras com cobrimento de 10mm;

- o nitrito de sódio, no teor de 2% sobre a massa do cimento, agiu de maneira eficaz, pois houve um acréscimo de 100% no período de iniciação da corrosão;

- o sistema de reparo com adição de 20% de estireno-butadieno, sobre a massa do cimento, proporcionou um significativo incremento na duração da fase de iniciação da corrosão, aumentando-a em 250%, para o cobrimento de 5mm, e em 175%, para o cobrimento de 10mm;

- o sistema de reparo com uma pintura de zinco nas barras apresentou a mesma duração da fase de iniciação da corrosão do sistema de reparo de referência para as armaduras de 5mm de cobrimento, apresentando um período de iniciação 25% inferior ao do sistema de referência, para as armaduras com 10mm de cobrimento. Convém salientar que os altos valores iniciais do potencial de corrosão e os baixos valores iniciais da intensidade de corrosão medidos são referentes à corrosão do zinco, em virtude do tipo de proteção (proteção galvânica) proporcionado por este sistema.

Através da análise custo/benefício realizada, considerando os índices de desempenho

encontrados, em relação ao sistema de reparo de referência, para os sistemas de reparo em estudo, conclui-se que:

- o sistema de reparo com adição de 10% de sílica ativa sobre a massa do cimento possui os melhores índices de desempenho, gastando-se 28,5% menos, em média, para se obter o mesmo desempenho do sistema de reparo de referência;

- de acordo com os índices de desempenho encontrados para o sistema de reparo com adição de 2% de nitrito de sódio sobre a massa do cimento, gasta-se 54,5% mais, em média, para se obter o mesmo desempenho do sistema de reparo de referência;

- conforme os índices de desempenho encontrados para o sistema de reparo com adição de 20% de estireno-butadieno sobre a massa do cimento, gasta-se 276,5% mais, em média, para se obter o mesmo desempenho do sistema de reparo de referência;

- para o sistema de reparo com pintura de zinco nas barras, o índice de desempenho do período de iniciação da corrosão para 10mm de cobrimento, indica que se gasta 118% a mais para se obter o mesmo desempenho do sistema de reparo de referência.

De acordo com comportamento apresentado pelas variáveis taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ), potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ) para os sistemas de reparo em estudo pode-se concluir que o desempenho apresentado pela técnica Resistência de Polarização foi bastante satisfatório, ratificando o método como uma das melhores ferramentas para avaliação do processo de corrosão.

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do presente tema, convém que haja continuidade do estudo sobre os assuntos aqui abordados, dos quais algumas sugestões são feitas abaixo.

- avaliar o desempenho do sistema de reparo que utiliza epóxi;
- estender este estudo para outros sistemas de reparo formados a partir dos teores ótimos de suas pozolanas ou fileres, tais como escória de alto forno, escória de aciaria, escória de cobre, metacaulim, dentre outros;
- utilizar outras técnicas eletroquímicas na avaliação dos sistemas de reparo;
- avaliar os sistemas de reparo no seu desempenho quanto à carbonatação;
- desenvolvimento de um método de avaliação de desempenho de sistemas de reparo.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, C. J. Corrosion-free concrete structures with stainless steel. **Concrete**, Vol. 31, Nº 5, 1997. p. 28-32.
- AFRIDI, M. U. K.; CHAUDHARY, Z. U.; OHAMA, Y.; DEMURA, K.; IQBAL, M. Z. Carbonation resistance of powdered and aqueous polymer-modified mortars and effects of carbonation of their pore structures. In: International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. July, 1994a. **Proceedings**. Edited by R. N. Swamy. University of Sheffield.
- AFRIDI, M. U. K.; CHAUDHARY, Z. U.; OHAMA, Y.; DEMURA, K.; IQBAL, M. Z. Strength and elastic properties of powdered and aqueous polymer-modified mortars. **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, Nº 7, p. 1199-1213, 1994b.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C. Effect of nitrite as a corrosion inhibitor in contaminated and chloride-free carbonated mortars. **ACI Materials Journal**, Vol. 87, nº2, mar/apr, 1990.
- ALONSO, C. ANDRADE, C. CASTELLOTE, M. CASTRO, P. Valores críticos de cloruros para despassivar aceros de refuerzo embebidos en un mortero estandarizado de cemento portland. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções (CONPAT 97). **Anais**, Vol. 2, p. 555-562, 1997.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222. **ACI manual of concrete practice**. Detroit, 1991. V.1: Corrosion of metals in concrete.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for preparing, cleaning and evaluating test specimens. **ASTM G1-90**. Philadelphia, 1990. (Reapproved 1994).
- \_\_\_\_\_. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. **ASTM C 876-91**. Philadelphia, 1991.
- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação: Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Ed. PINI, 1992.
- ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, pp. 724-742, 1993.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C.; ACHA, M. Chloride diffusion coefficient of concrete containing fly ash calculated from migration tests. In: Swamy, R.N. Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. **Proceedings**. Sheffield, 1994. p. 783-793.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C.; GONZÁLEZ, J.A.  $\text{NaNO}_2$ : um inibidor da corrosão nas armaduras. Tradução e adaptação: Antonio Carmona e Paulo Helene. **Revista Técnica**, maio/junho, Nº16, p. 20-23, 1995.

- ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SARRÍA, J. Influencia de la humedad relativa y la temperatura en las velocidades de corrosión de estructuras de hormigón. **Materiales de Construcción**, Vol. 48, Nº 251, 1998. p. 5-17.
- ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras. **Informes de la Construcción**, Vol. 40, nº 398, nov/dec, 1988.
- ANDRADE, C.; MARIBONA, I. R.; FELIU, S.; GONZÁLEZ, J. A.; FELIU JR., S. The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements. **Corrosion Science**. Vol. 33, Nº 7, 1992. p. 237-249.
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Porto Alegre-RS, 1997. 148 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Porto Alegre-RS, 2000. 112 p. Relatório de qualificação (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. Porto Alegre-RS, 1994. 120 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado para concreto. **NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_\_. Cimento Portland – determinação da resistência à compressão. **NBR 7215**. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. Argamassa e concretos endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. **NBR 9778**. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_\_. Argamassa e concretos endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. **NBR 9779**. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. **NBR 5739**. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. Concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. **NBR 8522**. Rio de Janeiro, 1984.
- BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo-SP, 1995. 236 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.
- CARINO, N. J. Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structures. 40º Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto (REIBRAC). **Anais**. 1998.

- CASCUDO, O. **Contribuição ao estudo e emprego de técnicas eletroquímicas no controle da corrosão de armaduras em concreto armado.** São Paulo-SP, 1991. 230 p. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto - inspeção e técnicas eletroquímicas.** Co-edição, São Paulo: Ed. PINI, Goiânia: Ed. UFG, 1997.
- CASTANHEIRA, A. P. A. **Estudo de um sistema de reparo mais eficaz para uma estrutura de concreto armado contaminada por cloretos.** Brasília-DF, 1997. 146 p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **Durable Concrete Structures. Design Guide.** Lausanne, Thomas Telford, 1992.
- CHIN, D. A calcium nitrite-based, non-corrosive, non-chloride accelerator. In: ACI Publication (SP-102). Steel Corrosion in Concrete: Causes and Restraints, **Proceedings.** 1987.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre-RS, 1988. 196 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DEVALAPURA, K. R.; KAMEL, M. R.; ARUMUGASAAMY, P. Nondestructive techniques for corrosion evaluation of steel in concrete. In: International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. July, 1994. **Proceedings.** Edited by R. N. Swamy. University of Sheffield.
- DHIR, R. K.; JONES, M. R.; AHMED, H. E. H. Determination of total and soluble chlorides in concrete. **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, Nº 4, p. 579-590, 1990.
- EGGERS, M.; OLIVEIRA, P. S. F. de. Novas técnicas eletroquímicas de recuperação de estruturas de concreto: realcalinização e dessalinização (extração de cloretos). In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções (CONPAT 97). **Anais**, Vol. 2, p. 215-222, 1997.
- ENEVOLDSEN, J. N.; HANSSON, C. M.; HOPE, B. B. The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion steel embedded in concrete and mortar. **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, Nº 7, p. 1373-1382, 1994.
- EPERJESI, L.; RTAVESA, L.; GIOVAMBATTISTA, A.; BARBOSA, M.; GASSA, L.; VETERE, F.; SOTA, J. Difusion de cloruros en hormigones com adiciones minerales activas. In: 1st International Congress of Concrete Technology, Buenos Aires, June 1-4, 1998. **Anais.** p. 491-499.
- FADAYOMI, J. Corrosion Inhibitors. **Concrete**, Vol. 31, Nº 8, 1997. p. 21-22.

- FERREIRA, A. A.; STOLFO, R. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da penetração de íons cloreto em concreto com adições minerais. In: 1<sup>st</sup> International Congress of Concrete Technology, Buenos Aires, June 1-4, 1998. **Anais**. p. 351-364.
- FERREIRA, O. P.; LIBORIO, J. B. L. Propriedades da argamassa armada modificada com adição de látex de estireno-butadieno. In: Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Montevideo, 1993. **Anais**. p. 233-244.
- FIGUEIREDO, C. R. **Contribuição ao estudo da capacidade de proteção de argamassas com sílica ativa para reparos estruturais**. Brasília-DF, 1998. 156 p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.
- FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas - contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. São Paulo-SP, 1994. 423 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.
- FORTES, L. R. **Corrosão na armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial do eletrodo**. Fortaleza-CE, 1995. 214 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará.
- GALVELE, J. R. **Corrosion**. Departamento de Materiales. Comisión Nacional de Energia Atómica. Buenos Aires, 1979.
- GAVILÁN, G. A. M. **Contribuição ao estudo do comportamento da aderência concreto-armadura resultante da adição de sílica ativa e da corrosão da armadura em presença de cloretos**. Porto Alegre-RS, 2000. 135 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- GERDES, A.; MAYER, G.; WITTMANN, F.H. Application of reactor theory to investigate migration of reactive ions into concrete. In: Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components – Models and Characterisation of Transfer Properties. **Proceedings**. Paris, 1995.
- GLASS, G. K.; BUENFEL, N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, Vol. 39, Nº 5, p. 1001-1013, 1997.
- GODOY, E. P. P.; BARROS, M. M. S.B. Contribuição ao estudo da influência do teor de polímero nas propriedades das argamassas de cimento portland. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Vitória/ES. **Anais**. Volume 1, 1999. p. 249-265.
- GONZÁLEZ, J. A. **Control de la corrosion: estudio y medida por tecnicas electroquímicas**. Ed. CSIC. Madrid, 1989. Capitulo V.
- GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; FELIU, S. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, Nº 2, p. 257-264, 1995.

- GONZÁLEZ, J.A.; LÓPEZ, W.; RODRÍGUEZ, P. Effects os moisture availability on corrosion kinetics of steel embedded in concrete. **Corrosion**, Vol. 49, Nº 12, 1993. p. 1004-1010.
- GONZÁLEZ, J. A.; FELIÚ, S.; RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**. Vol. 29 January-February, 1996a, p. 40-46.
- GONZÁLEZ, J. A.; FELIÚ, S.; RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part II: corrosion mechanism and monitoring, service life prediction and protection methods. **Materials and Structures**. Vol. 29, March, 1996b, p. 97-104.
- GONZÁLEZ, J. A.; OTERO, E.; FELIU, S.; BAUTISTA, A.; RAMÍREZ, E. RODRÍGUEZ, P.; LÓPEZ, W. Some considerations on the effect of chloride ions on the corrosion of steel reinforcements embedded in concrete structures. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 50, Nº 3, p. 189-199, 1998.
- GRAN, H. C. **Measurement of chlorides in concrete: an evaluation of three different analysis techniques**. Norwegian Building Research Institute (NBI), 21 p., 1992.
- GUTIÉRREZ, R. M.; GUTIÉRREZ, C. Ensayo modificado de permeación a cloruros en materiales cementicios. In: 2<sup>nd</sup> NACE Latin American Region Corrosion Congress, LA 96067, **Anais**. September, 1996.
- HAQUE, M. N. Give it a week: 7 days initial curing. **Concrete International**, Vol. 20, Nº 9, 1998. p. 45-48.
- HERNÁNDEZ, Y.; RINCÓN, O. de; FERNÁNDEZ, R. Estudio de mezclas especiales com ceniza volante y microsíllica en ambientes marinos. In: V Congresso Iberoamericano de Patología de las Construciones (CONPAT 99), Montevideo. **Anais**. Volume 1, Octubre, 1999. p. 279-287.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo-SP, 1993. 231 p. Tese (Livre Docência). Universidade de São Paulo.
- HELENE, P. R. L. ; MONTEIRO, P. J. M. Can local repairs be durable solutions for steel corrosion in concretes structures? In: International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. 24-28 July, 1994. **Proceedings**. University of Sheffield.
- KAY, T.; WYATT, B. European standards for protection and repair. **Concrete**, Vol. 31, Nº 8, 1997. p. 11 – 17.
- KULAKOWSKI, M. P. **Argamassa com adição de microssíllica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos**. Porto Alegre-RS, 1994. 106 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- LEWIS, A. Stainless steel - a case to be considered. **Concrete**, Vol. 32, Nº 8, 1998. p. 8.
- LIMA, M. G. **Inibidores de corrosão: avaliação da eficiência frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos**. São Paulo-SP, 1996. 174 p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.
- LIMA, R. C. de **Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em sistemas de reparo**. São Paulo-SP, 1998. 73 p. Exame de qualificação (Mestrado), Universidade de São Paulo.
- LIMA, R. C.; LIMA, M. G.; HELENE, P. R. L. Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em sistemas de reparo. In: V Congresso Iberoamericano de Patología de las Construciones (CONPAT 99), Montevideo. **Anais**. Octubre, 1999. p. 1549-1556.
- LIU, Y. **Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures**. Blacksburg, Virginia, 1996. PhD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- LÓPEZ, W.; FELIU, S.; GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C. La importancia del curado en el comportamiento posterior frente a la corrosión de las estructuras de hormigón armado. **Materiales de Construcción**, Vol. 41, Nº 223, 1991. p. 5-17.
- LÓPEZ, W.; GONZÁLEZ, J. A. Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, p. 368-376, 1993.
- LÓPEZ, W.; GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C. Influence of temperature on the service life of rebars. **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, Nº 5, p. 1130-1140, 1993.
- MAILVAGANAM, N. P. **Repair and Protection of Concrete Structures**. Institute for Research in Construction. National Research Council of Canada. Ottawa, Ontario, 1992.
- MEHTA, P. K. Durability of concrete - fifty years of progress? In: Seminário sobre qualidade e durabilidade das estruturas de concreto. **Anexo Anais**. Porto Alegre, 1993.
- MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo, Ed. PINI, 1994.
- MONTALVÃO, L. G. **Sistema e metodologia para a avaliação polarográfica da corrosão das armaduras em estruturas de concreto**. Brasília-DF, 1992. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília.
- MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos**. Brasília-DF, 1996. 138 p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.
- MORRIS, W.; VAZQUEZ, M.; ROSSO, S.; SAGUÉS, A. Evaluación de esquemas de recubrimiento de armaduras empleados en la reparación de estructuras de hormigón

armado afectadas por corrosión. In: 1<sup>st</sup> International Congress of Concrete Technology, Buenos Aires, June 1-4, 1998. **Anais**. p. 295-305.

NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los morteros de reparación frente a la carbonatación y a la penetración de cloruros en estructuras de hormigón armado dañadas por corrosión de armaduras - Estudio mediante la técnica de resistencia de polarización**. Madrid-España, 1992. 371 p. Tesis (Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2<sup>a</sup> ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997.

NINCE, A. A. **Levantamento de dados sobre a deterioração de estruturas na região centro-oeste**. Brasília, 1996. 176p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.

OHAMA, Y. Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes. **ACI Materials Journal**, p. 511-518, November/December, 1987.

OLIVEIRA, J. A. C. **Contribuição ao estudo do comportamento mecânico dos sistemas de revestimentos à base de argamassa modificados com polímeros de base látex**. Brasília-DF, 1999. 163 p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. Diffusion of chlorides ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Vol. 11, p. 395-406, 1981.

PARKER, J. Carbonation and chlorides in concrete. **Concrete**, Vol. 31, N° 8, 1997, p. 18-20.

PAPADAKIS, M.; VENUAT, M. **Manuel du Laboratoire d'essais des ciments, mortiers, bétons**. Paris: Editeur Eyrolles, 1969.

PAPADAKIS, V. C.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime coating on concrete carbonation. **Materials and Structures**, 1992, 25, p. 293-304.

PÉREZ, J. T.; TALAVERA, M. A.; CASTRO, P.; GENESCÁ, J. Protección catódica del acero de refuerzo en concreto mediante zinc aplicado por rociado térmico. In: V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones (CONPAT 99), Montevideo. **Anais**. Volume 3, Octubre, 1999. p. 1533-1540.

PAUL, J. H. Extending the life of concrete repairs. **Concrete International**. Vol. 20, N° 3, 1998. p. 62-66.

RAY, I.; GUPTA, A. P.; BISWAS, M. Effect of latex and superplasticiser on portland cement mortar in the hardened state. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 17, N° 1, 1995.

RIBEIRO, J. L. D. **Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos**. Porto Alegre, PPGEP/UFRGS, 1995. Notas de aula.

- RILEM DRAFT RECOMMENDATION. Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion. **Materials and Structures**, 1994, Vol. 27, N° 171, 415-436.
- RINCÓN, O.; RINCÓN, A.; MÓRON, O.; VILLASMIL, M.; FERNÁNDEZ, R. Use of epoxy portland cement mortars to repair reinforced concrete structures. **Materials Performance**, Vol. 35, N° 10, p. 55-59, 1996.
- RISSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Propriedades da argamassa de cimento portland modificada com látex estireno-butadieno para revestimento de fachadas-estudo de caso. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Vitória/ES. **Anais**. Volume 1, 1999. p. 267-279.
- RODOLPHO, P. M.; ISA, M. M. A influência da resistência à penetração de cloretos e da carbonatação na durabilidade das construções de microconcreto. In: V Congresso Iberoamericano de Patología de las Construciones (CONPAT 99), Montevideo. **Anais**. Volume 1, Octubre, 1999. p. 313-320.
- RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; GONZÁLEZ, J. A. Methods for studying corrosion in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 46, N° 167, 1994. p. 81-90.
- ROSENBERG, A.; GRACE, W. R.; HANSSON, C. M.; ANDRADE, C. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. **Materials Science of Concrete**, 1989. P. 285-313.
- SCHULER, A. **Caracterização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado**. Porto Alegre-RS, 1998. 142 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Porto Alegre-RS, 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA, T. J. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. Barcelona-España, 1998. Tesis (Doctoral). Universidad Politecnica de Catalunya.
- SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. São Paulo: Editora PINI, 1998.
- STERN, M.; GEARY, A. L. Electrochemical polarization I: a theoretical analysis of the shape of polarization curves. **Journal of the electrochemical society**, Vol. 104, N°1, 1957. p. 56-63.
- STONEMAN, A. M. A performance evaluation of sprayed zinc and zinc-aluminium alloy for use as anodes on concrete. In: International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. 24-28 July, 1994. **Proceedings**. University of Sheffield.

- SUGIYAMA, T., TSUJI, Y., BREMNER, T. W., HASHIMOTO, C. Determination of chloride diffusion coefficient of high-performance concrete by electrical potential technique. In: 3<sup>o</sup> CANMET/ACI - Performance of Concrete in Marine Environment (SP-163), **Proceedings**. 1996. p. 339-354.
- TEIXEIRA, M. P. **Metodologias auxiliares para diagnóstico de patologias de corrosão em estruturas de concreto**. Brasília-DF, 1998. 169p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.
- TESSARI, R.; DAL MOLIN, D. C. C. Otimização das qualidades do concreto armado frente à corrosão das armaduras- escolha do tipo de cimento. 40<sup>o</sup> Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto (REIBRAC). **Anais**. 1998.
- THANGAVEL, K.; RENGASWAMY, N. S. Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete. **Cement and Concrete Composites**, 20, p. 283-292, 1998.
- TOUTANJI, H. A.; EL-KORCHI, T. The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**. Vol. 25, N<sup>o</sup> 7, 1995. p. 1591-1602.
- TUUTTI, K. Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel. In: ACI Publication (SP-65). International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment. **Proceedings**. August, 1980.
- VASCONCELOS, K. L. **Avaliação comparativa da eficiência de inibidores de corrosão em armaduras de estruturas de concreto**. Brasília-DF, 1997. 120 p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.
- VILLEMUR, O. M.; BARBOSA, M. R. Efecto del NaNO<sub>2</sub> sobre la corrosión del acero de armaduras en pasta de cemento. In: 1<sup>st</sup> International Congress of Concrete Technology, Buenos Aires, June 1-4, 1998. **Anais**. p. 281-293.

# **ANEXOS**

# ANEXO A

Procedimento descrito pela *ASTM G1-90* para a limpeza das barras de aço

O procedimento descrito pela *ASTM G1-90* para a limpeza das barras de aço determina: imersão da barra em solução de ácido clorídrico 1:1 e 3,5 g/l de hexametenotetramina por 15 minutos; lavagem em água corrente e escovação com escova de cerdas plásticas para remoção final dos óxidos; imersão das barras em acetona por 2 minutos e secagem das barras em jato de ar quente. Esta limpeza visa remover todos os óxidos originalmente presentes na barra. O procedimento de limpeza é mostrado nas figuras A.1 a A.5.



Figura A.1 Imersão das barras em solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5% de hexametenotetramina para remoção dos óxidos



Figura A.2 Lavagem das barras em água corrente para remoção da solução



Figura A.3 Escovação das barras para a remoção final dos óxidos



Figura A.4 Imersão das barras em acetona para eliminação da água



Figura A.5 Secagem das barras com jato de ar quente

# **ANEXO B**

Acompanhamento da temperatura e da umidade durante  
a cura dos corpos de prova

<b>Dia</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade relativa do ar (%)</b>
11/03/99	25,9	68,4
12/03/99	25,5	66,1
13/03/99	SÁBADO	SÁBADO
14/03/99	DOMINGO	DOMINGO
15/03/99	23,3	78,3
16/03/99	25,7	67,3
17/03/99	24,5	70,6
18/03/99	24,6	71,3
19/03/99	24,8	64,3
20/03/99	SÁBADO	SÁBADO
21/03/99	DOMINGO	DOMINGO
22/03/99	25,7	61,7
23/03/99	25,0	59,1
24/03/99	25,0	58,0
25/03/99	25,0	59,4
26/03/99	26,2	54,5
27/03/99	SÁBADO	SÁBADO
28/03/99	DOMINGO	DOMINGO
29/03/99	26,0	56,8
30/03/99	26,1	56,7
31/03/99	26,4	57,1
01/04/99	26,0	50,2
02/04/99	26,6	53,3
03/04/99	26,3	58,2
04/04/99	DOMINGO	DOMINGO
05/04/99	27,4	56,5
06/04/99	27,0	56,7
07/04/99	-	-
08/04/99	25,9	57,1
09/04/99	26,9	55,6

# **ANEXO C**

Procedimento adotado para determinar a concentração de cloretos na solução da câmara positiva do ensaio de difusão de cloretos

O procedimento adotado para determinar a concentração de cloretos na solução da câmara positiva do ensaio de migração de cloretos é descrito a seguir.

O volume coletado era medido em uma proveta de 10ml. Tomava-se nota desse volume e completava-se a proveta com água destilada até o enchimento da mesma. Posteriormente despejava-se este volume em uma proveta de 50ml, completando o volume total desta com água destilada. Em seguida, despejava-se os 50ml da amostra diluída em água destilada em um becker de 100ml e pipetava-se neste, 1ml de solução ajustadora de força iônica (ISA). A Figura C.1 mostra os materiais utilizados no procedimento descrito acima.



Figura C.1 Materiais utilizados na preparação da solução com cloretos para determinação da concentração dos mesmos, através do eletrodo de íon seletivo

Esta solução final era homogeneizada em um misturador eletromagnético e, em seguida, determinava-se, através de um eletrodo de íon seletivo (Figura C.2), a concentração de íons cloreto na solução de 50ml. De posse do volume da amostra, determinava-se a concentração de cloretos das câmaras positivas, para aquele instante do ensaio.

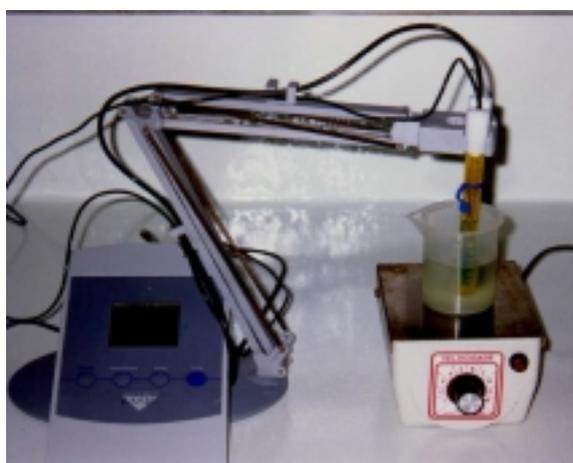


Figura C.2 Medição da concentração de cloretos através do eletrodo de íon seletivo

# **ANEXO D**

Procedimento adotado para determinar o teor de cloretos  
nas argamassas dos sistemas de reparo

O método utilizado para a análise de cloretos é a potenciometria direta. O procedimento para determinação do teor de cloretos nas argamassas consiste em:

1. Diluir a amostra de argamassa retirada (aproximadamente 5g) em um frasco Erlenmeyer até 100ml de água deionizada à 80 °C. Arrolhar e agitar continuamente durante aproximadamente 10 minutos;
2. Filtrar a solução com papel filtro médio, passando para um balão volumétrico de 500ml;
3. Lavar o Erlenmeyer e o papel filtro passando o líquido da lavagem para o balão;
4. Deixar a solução esfriar à temperatura ambiente;
5. Diluir a solução a 500ml;
6. Adicionar para cada 100ml de solução, 1ml da solução de nitrato de sódio 5M e 1ml de solução de ácido nítrico 5M, para baixar o pH do meio, pois possíveis interferentes na amostra só trazem problemas em soluções muito alcalinas. Esta solução servirá também de ajustador da força iônica.

A solução final será analisada baseando-se na medida do potencial de uma célula galvânica composta por dois eletrodos, um eletrodo íon-seletivo sensível ao íon cloreto e um eletrodo de referência, que é diretamente relacionado com a concentração de cloretos. É um método rápido, prático e confiável.

# ANEXO E

Evolução do potencial de corrosão médio ( $E_{\text{corr}}$ ) e da taxa de corrosão média ( $i_{\text{corr}}$ ), para cada revestimento, dos sistemas de reparo

Tem-se a seguir, na Figura E.1 a Figura E.10, os gráficos comparativos da evolução do potencial de corrosão médio ( $E_{\text{corr}}$ ) e da taxa de corrosão média ( $i_{\text{corr}}$ ), por cobrimento, para cada sistema de reparo.

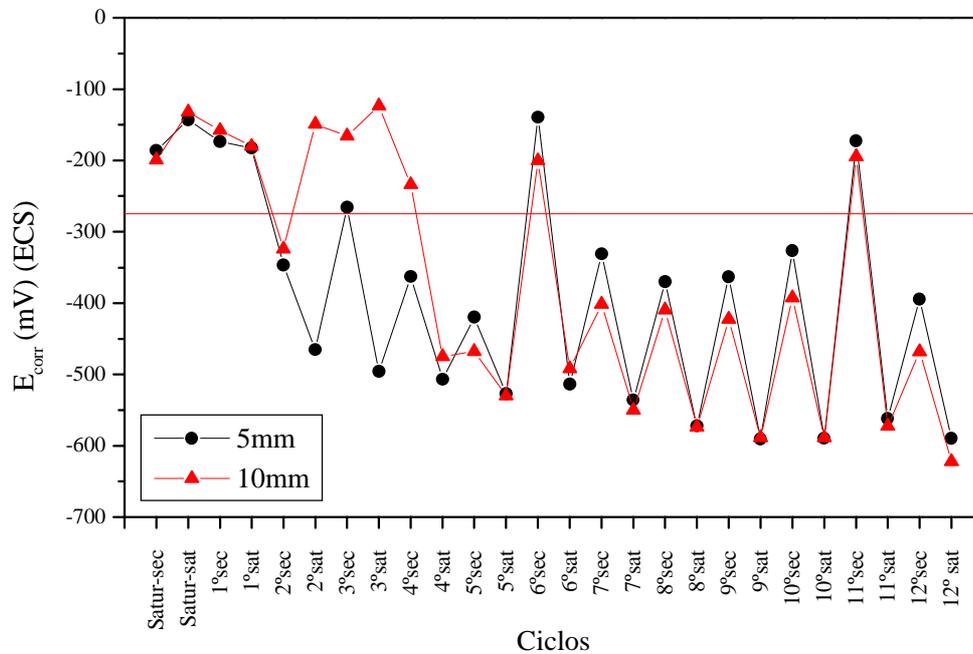


Figura E.1 Evolução do  $E_{\text{corr}}$  do sistema de reparo de referência

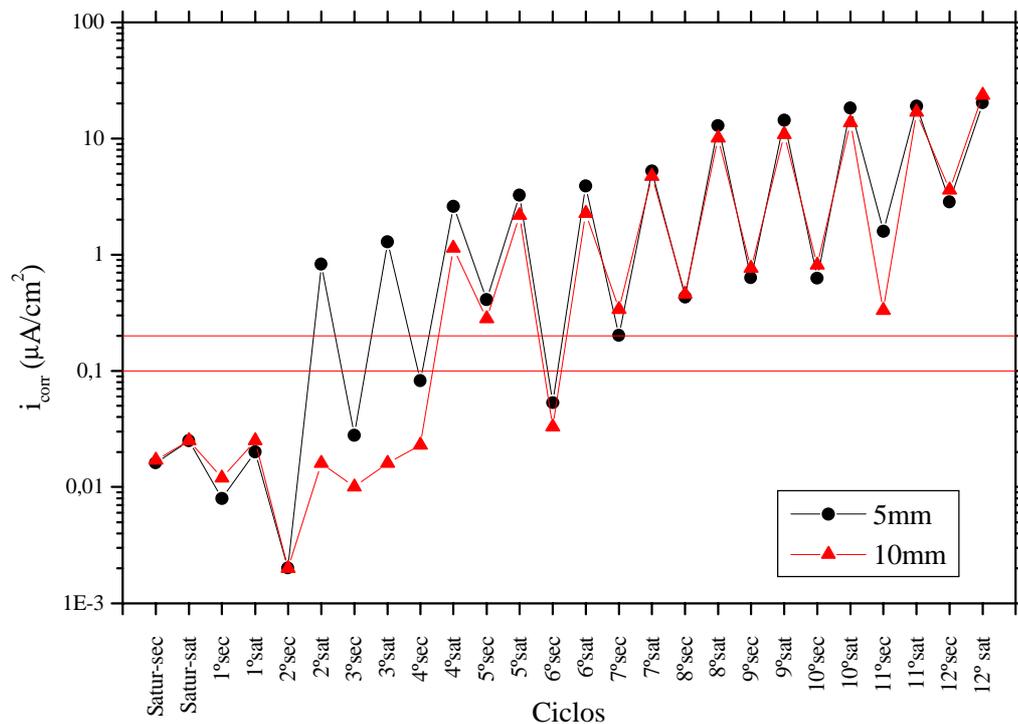


Figura E.2 Evolução da  $i_{\text{corr}}$  do sistema de reparo de referência

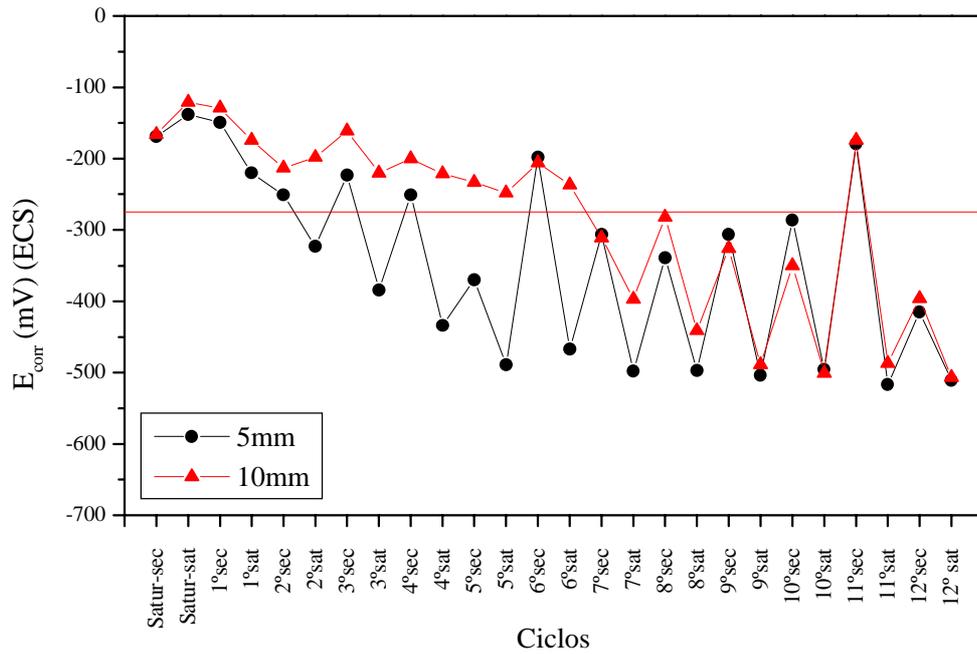


Figura E.3 Evolução do  $E_{corr}$  do sistema de reparo com adição de sílica ativa

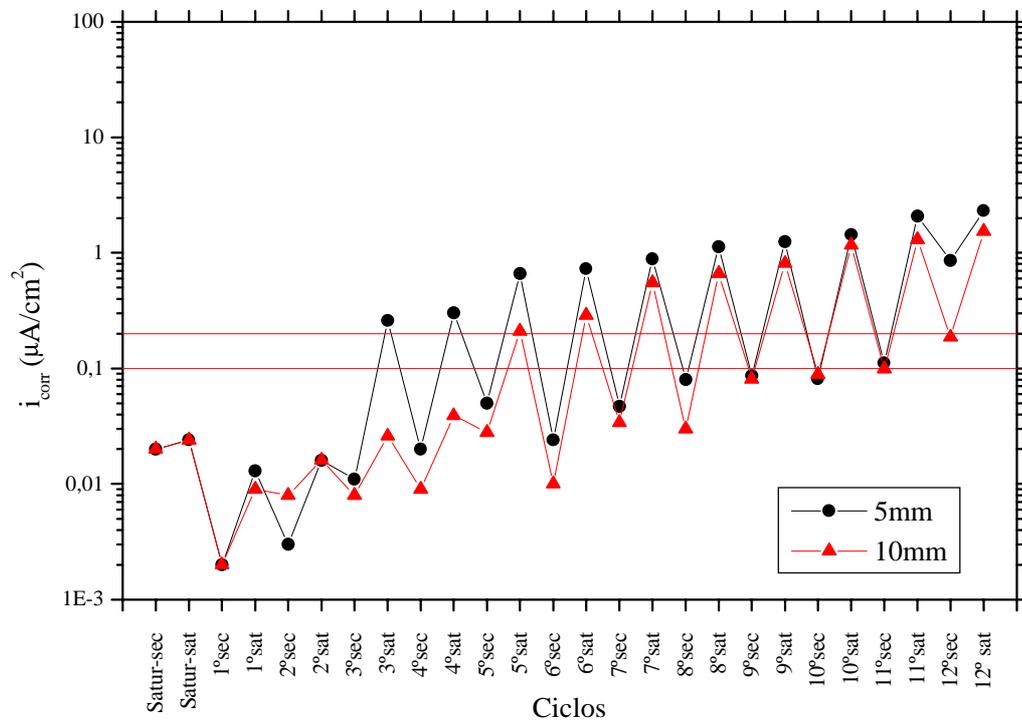


Figura E.4 Evolução do  $i_{corr}$  do sistema de reparo com adição de sílica ativa

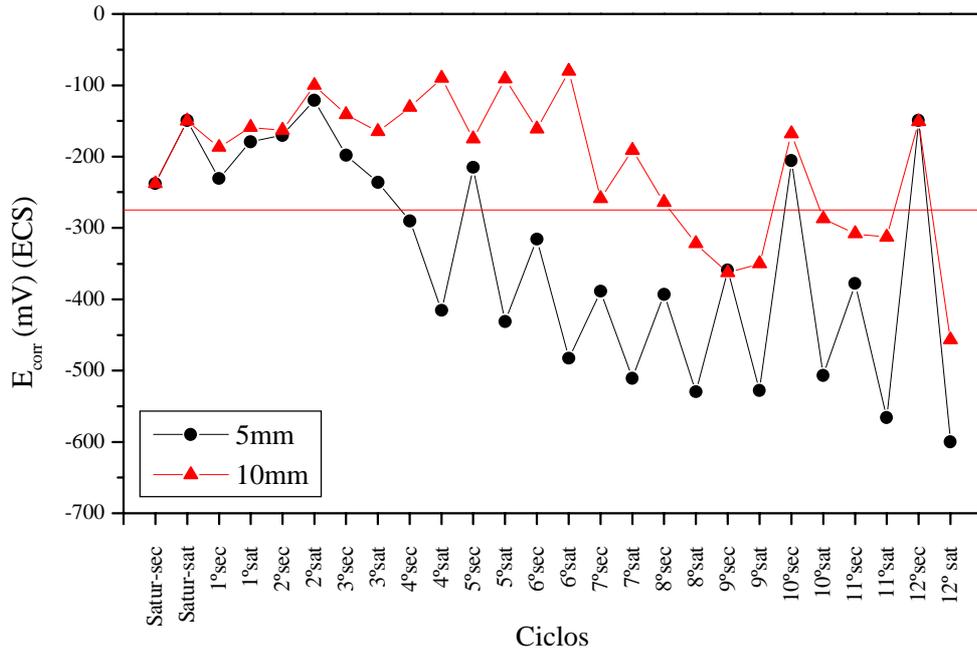


Figura E.5 Evolução do  $E_{corr}$  do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio

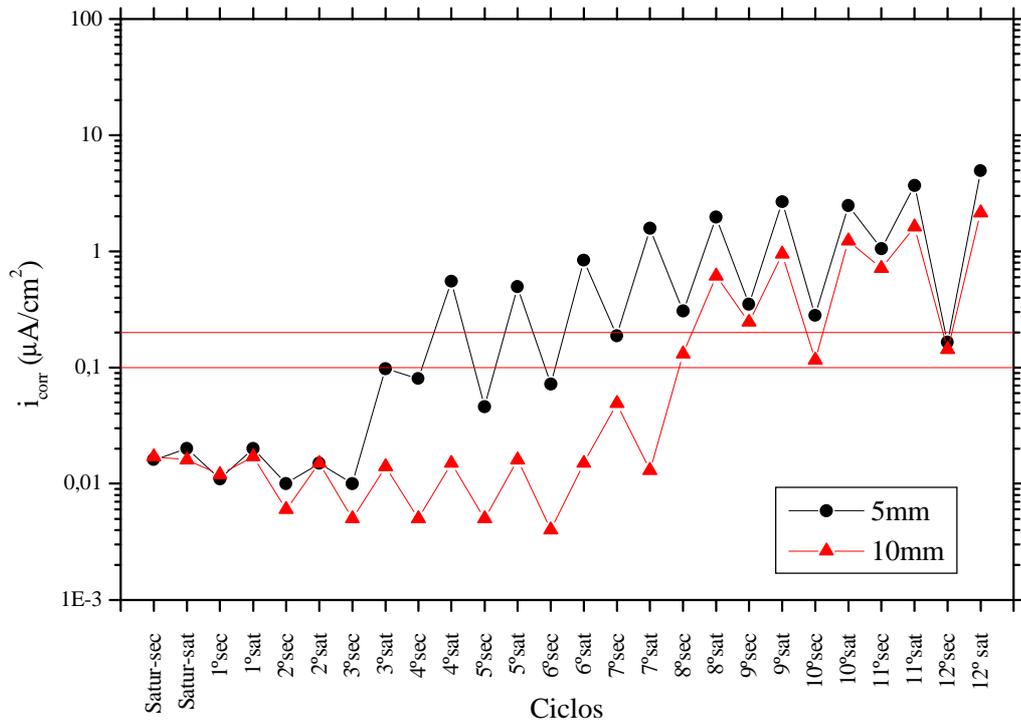


Figura E.6 Evolução do  $i_{corr}$  do sistema de reparo com adição de nitrito de sódio

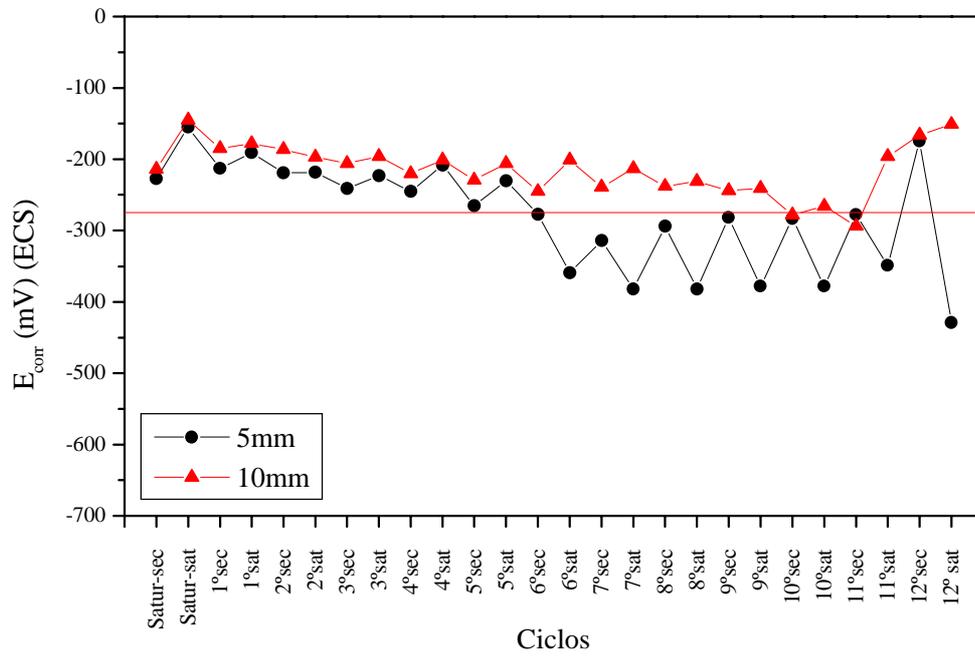


Figura E.7 Evolução do  $E_{corr}$  do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno

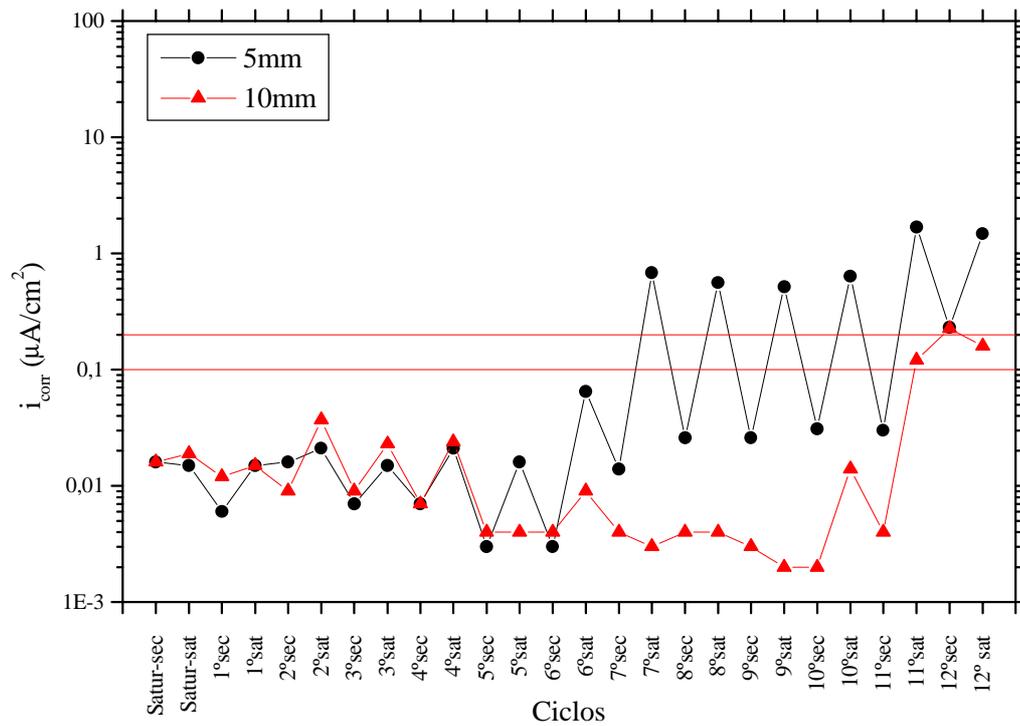


Figura E.8 Evolução do  $i_{corr}$  do sistema de reparo com adição de estireno-butadieno

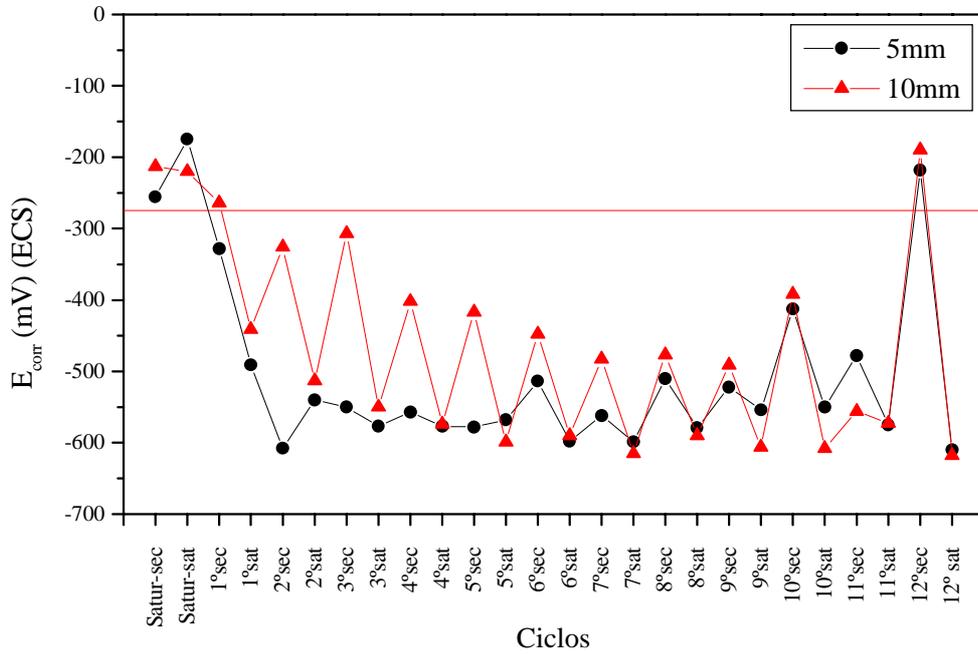


Figura E.9 Evolução do E<sub>corr</sub> do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras

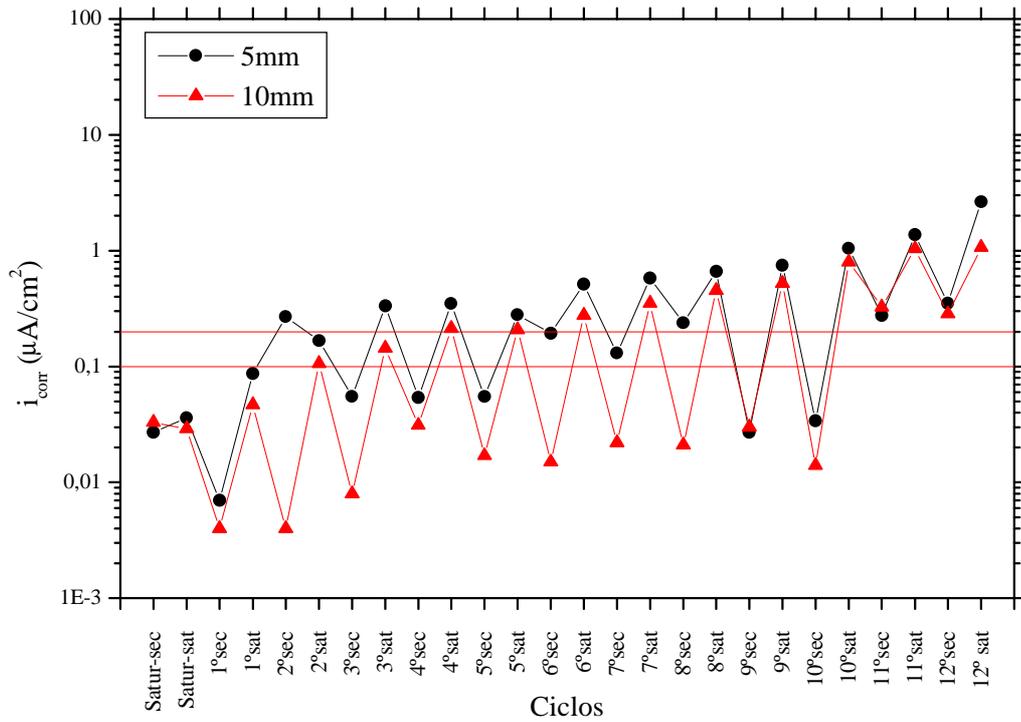


Figura E.10 Evolução do i<sub>corr</sub> do sistema de reparo com pintura de zinco nas barras

# ANEXO F

Perda de massa gravimétrica das barras imersas nos corpos-de-prova

Cada sistema de reparo possui dois corpos de prova com quatro barras de aço em cada corpo de prova. A identificação das barras se dá através da seguinte convenção:

- A primeira inicial identifica qual o tipo de sistema de reparo no qual a barra está inserida.
  - ⇒ Sistema de reparo de referência com barras sem pintura - **C**
  - ⇒ Sistema de reparo de argamassa com sílica ativa e barras sem pintura - **SA**
  - ⇒ Sistema de reparo de argamassa com inibidor e barras sem pintura - **I**
  - ⇒ Sistema de reparo de argamassa com polímero e barras sem pintura - **P**
  - ⇒ Sistema de reparo de argamassa convencional e barras com pintura de zinco - **Zn**
  
- O primeiro número identifica qual o corpo de prova.
  - ⇒ Corpo de prova número um - **1**
  - ⇒ Corpo de prova número dois - **2**
  
- A segunda letra identifica qual o lado que a barra está contida.
  - ⇒ Lado A - **A**
  - ⇒ Lado B - **B**
  
- O segundo número identifica qual o revestimento da barra.
  - ⇒ Revestimento de 5mm - **5**
  - ⇒ Revestimento de 10mm - **10**

A seguir, tem-se a massa inicial e final das barras após os processos de limpeza inicial e final, para os sistemas de reparo C, SA, I e P.

Corpo-de-prova	Barra	Massa antes (g)	Massa depois (g)	Perda de massa (g)
C1	C1A5	14,0421	13,7486	0,2935
	C1A10	14,4640	14,1104	0,3536
	C1B5	13,7096	13,5040	0,2056
	C1B10	14,6181	14,2210	0,3971
SA1	SA1A5	13,9052	13,9017	0,0035
	SA1A10	14,1208	14,1026	0,0182
	SA1B5	14,0896	14,0746	0,0150
	SA1B10	14,0954	14,0899	0,0055
I1	I1A5	14,3742	14,3406	0,0336
	I1A10	14,4599	14,4549	0,0050
	I1B5	13,6003	13,5609	0,0394
	I1B10	14,3297	14,3292	0,0005
P1	P1A5	14,2916	14,2704	0,0212
	P1A10	14,3187	14,3456	-0,0269
	P1B5	14,5238	14,5517	-0,0279
	P1B10	14,1667	14,1974	-0,0307
C2	C2A5	14,3387	14,1642	0,1745
	C2A10	14,2972	14,2136	0,0836
	C2B5	14,2916	14,1158	0,1758
	C2B10	14,3681	14,2253	0,1428
Corpo-de-prova	Barra	Massa antes (g)	Massa depois (g)	Perda de massa (g)
SA2	SA2A5	13,8284	13,8224	0,0060
	SA2A10	14,1312	14,1116	0,0196
	SA2B5	14,1915	14,1879	0,0036
	SA2B10	14,2022	14,1956	0,0066
I2	I2A5	14,0611	14,0357	0,0254
	I2A10	13,9913	13,9688	0,0225
	I2B5	14,5830	14,5754	0,0076
	I2B10	14,0736	14,0770	-0,0034
P2	P2A5	14,1688	14,1248	0,0440
	P2A10	14,4340	14,4495	-0,0155
	P2B5	14,0789	14,0956	-0,0167
	P2B10	14,4781	14,4957	-0,0176

Para o sistema de reparo Zn, tem-se:

Corpo de prova	Barra	Massa antes (g)	Massa pintada (g)	Massa depois (g)	Perda de massa (g)
Zn1	Zn1A5	14,2647	14,3658	14,0966	0,1681
	Zn1A10	14,4274	14,6017	14,4532	-0,0258
	Zn1B5	14,0730	14,1699	14,0665	0,0065
	Zn1B10	14,5005	14,6644	14,5010	-0,0005
Zn2	Zn2A5	14,3369	14,4356	14,3273	0,0096
	Zn2A10	14,0532	14,1542	14,0460	0,0072
	Zn2B5	14,2572	14,4378	14,2827	-0,0255
	Zn2B10	14,2477	14,4344	14,2775	-0,0298

Houve dificuldade na remoção dos óxidos e outros produtos aderidos às barras dos sistemas de reparo com adição de SBR e com o revestimento de zinco. Esta dificuldade refletiu-se na determinação da perda de massa gravimétrica, pois algumas barras apresentaram uma maior massa após os ensaios, inviabilizando a determinação da perda de massa gravimétrica.

Os valores de  $E_{\text{corr}}$ ,  $i_{\text{corr}}$  e  $R_{\text{ohm}}$  determinados para a barra Zn1A5 foram desprezados no cálculo das médias pois constatou-se uma grande fissura na proximidade da barra, onde, através desta, os agentes agressivos ingressavam com uma maior facilidade.

# **ANEXO G**

Resultados brutos dos ensaios realizados

Tabela G.1 Ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos

Tabela G.2 Ensaio complementares - absorção por imersão - argamassa de referência

Tabela G.3 Ensaio complementares - absorção por imersão - argamassa com sílica ativa

Tabela G.4 Ensaio complementares - absorção por imersão - argamassa com inibidor de corrosão

Tabela G.5 Ensaio complementares - absorção por imersão - argamassa com SBR

Tabela G.6 Ensaio complementares - absorção por capilaridade - argamassa de referência

Tabela G.7 Ensaio complementares - absorção por capilaridade - argamassa com sílica ativa

Tabela G.8 Ensaio complementares - absorção por capilaridade - argamassa com inibidor de corrosão

Tabela G.9 Ensaio complementares - absorção por capilaridade - argamassa com SBR

Tabela G.10 Ensaio complementares - difusão de cloretos

Tabela G.11 Ensaio complementares - resistência à compressão

Tabela G.12 Ensaio complementares - módulo de deformação da argamassa de referência

Tabela G.13 Ensaio complementares - módulo de deformação da argamassa com sílica ativa

Tabela G.14 Ensaio complementares - módulo de deformação da argamassa com inibidor de corrosão

Tabela G.15 Ensaio complementares - módulo de deformação da argamassa com adição de SBR