

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

RAPHAEL JAQUES DE CASTRO RIBEIRO DUARTE

**Influência da ponte de aderência epoxídica e limpeza da
armadura no desempenho do reparo localizado em
estruturas com problemas de corrosão por íons cloreto**

Goiânia

2007

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

RAPHAEL JAQUES DE CASTRO RIBEIRO DUARTE

**Influência da ponte de aderência epoxídica e limpeza da
armadura no desempenho do reparo localizado em
estruturas com problemas de corrosão por íons cloreto**

Dissertação apresentada ao curso de
Mestrado em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Goiás para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Área de Concentração:

Estruturas e Materiais de Construção

Orientador:

Prof. Dr. Enio J. Pazini Figueiredo

Goiânia

2007

RAPHAEL JAQUES DE CASTRO RIBEIRO DUARTE

**Influência da ponte de aderência epoxídica e limpeza da
armadura no desempenho do reparo localizado em
estruturas com problemas de corrosão por íons cloreto**

Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Goiás, para a obtenção do grau de mestre, aprovada em 20 de setembro de 2007, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Enio J. Pazini Figueiredo (Orientador)

Prof. Dr. Edgar Bacarji (Examinador interno)

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene (Examinador Externo)

Dedico aos meus pais, Eberth e Marianilza (in memorian),
por sempre ter dedicado suas vidas aos seus filhos.

Obrigado.

AGRADECIMENTOS

Para meus agradecimentos inicio fazendo uma pergunta: Como seria a conquista dos nossos objetivos, a realização dos nossos sonhos, enfim como seria a continuidade das nossas vidas se não tivéssemos apoio divino, de nossos familiares e amigos?

Parando para pensar nesta questão observo o quanto são importantes estas poucas páginas, onde dedicarei meus agradecimentos, ao meio de tantas outras páginas desta dissertação, podendo considerá-la como uma das partes mais importantes deste trabalho.

Primeiramente agradeço a Deus, que iluminou os meus caminhos para vencer os desafios que surgiram ao longo de minha vida e da conquista deste sonho. Obrigado Senhor.

Agradeço a quem são as pessoas mais importantes da minha vida, quem me trouxe a vida, quem me ajudou a crescer, quem me apoiou nos momentos mais difíceis, quem sempre esteve ao meu lado, quem sempre me protegeu, quem sempre pude considerar como meus verdadeiros e eternos amigos, quem me educou, quem me ensinou como é a vida, quem sempre me mostrou a importância de sempre adquirir mais conhecimentos, quem me ensinou o quanto é importante ser honesto, ser digno, sempre me mostrando quais são as verdadeiras riquezas para tornar-me um grande homem, quem sempre me amou, meu pai e minha mãe (in memoriam), serei eternamente grato. Muito obrigado pai por ter participado diretamente da conquista deste objetivo. Amo você demais. Tenho certeza que minha mãe sempre esteve olhando por nós.

Agradeço a minha segunda mãe, Margareth, por sempre ter me dado apoio, amor, atenção, sempre se preocupando e cuidando de mim. Obrigado sua pebinha!

Agradeço aos meus avós, Bartolomeu e Maria Ilza, por também sempre ter me dado muito amor, conhecimentos e apoio. Obrigado por terem me apoiado muito nesta etapa da minha vida. Serei eternamente grato e um grande admirador das pessoas maravilhosas e dignas que são os meus avós.

Agradeço aos meus irmãos, Matheus e Rachel, por também terem me dado muito apoio. Senti muitas saudades de vocês. Rachelzinha senti muita falta durante este período, não estar acompanhando o seu crescimento, o seu desenvolvimento, suas travessuras e tudo que vem se passando nesta sua linda infância, mas estive sempre perto de você e pensando em você. Não fica com ciúmes nariz.

Agradeço a Larissa, por ter sempre procurado me entender, me apoiar, ter sido excepcionalmente compreensível, nunca deixando de me transmitir o seu carinho. Obrigado.

Ao meu orientador e amigo, Professor Enio Pazini, que durante este importante período da minha vida sempre esteve presente, me transmitindo grandes conhecimentos, sempre estendendo a mão quando precisei, mostrando não ser só um excelente professor, um excelente orientador, mas também um grande amigo que sempre esteve presente e um grande homem. O admiro muito professor, parabéns pela pessoa extraordinária e competente que é o senhor.

Ao meu primeiro orientador, grande homem, grande profissional e grande amigo, Hênio Tinoco. Tenho certeza que se não tivesse sido meu orientador no meu trabalho de conclusão de curso no ano de 2003, eu não teria seguido o caminho do mestrado, pois não teria tido a oportunidade de conversar tanto com você sobre as maravilhas de um mestrado. Muito obrigado tio Hênio. Parabéns futuro papai. Tenho certeza que também serás um grande pai.

À Anna Paula por todo apoio, carinho, amor e atenção que tem me dedicado na fase final desta dissertação. Você se tornou muito especial para mim. Obrigado por esta companhia maravilhosa que você me proporciona e por também ter me ajudado no finalzinho desta caminhada.

Aos meus amigos do mestrado, Eliane, Janaina, Ricardo, Wesley, Andrielli, Ramon e Aline. Sentirei saudades de muitos momentos especiais.

As minhas amigas Rosana e Virginia, em especial. Muito obrigado pela atenção e carinho.

À família de Virginia, agradeço muito pelo carinho e atenção.

Aos amigos “Izelmalho” e Kekete. Obrigado pelos diversos momentos bons e ruins que passamos juntos.

Aos amigos e professores Osvaldo Valinote e André Geyer, agradeço pelos ensinamentos, conselhos e atenção. Professor Osvaldo Valinote, obrigado por sempre me dar forças com suas palavras de conforto quando mais precisei.

Aos amigos Reginaldo e Rodrigo que sempre se mostraram grandes amigos, presentes e dispostos a ajudar.

À empresa Realmix.

Ao amigo Richellier (Impercia).

À Carlos Campos que sempre incentivou à pesquisa.

Agradeço a todos os meus familiares.

Aos meus amigos de Natal, especialmente ao meu brother, Gabriel, sinto muito sua falta, falta da sua amizade e companhia. Sejam nos assuntos sérios ou nos assuntos sem futuro, muitas cachaças e farras.

À uma grande família que conheci em Goiânia, a família Shurn, bons e grandes amigos, O Leozera, O Boy, Zulu, Bob, Michels, Manfras, Vinas, Ovinho e as Boas amigas Bruninha, Camillinha, Vanvan, Vanzinha, Grazi, Ana Paula, Tyssis, Cristal e toda a galerinha, obrigado meu povo pela excelente companhia nos almoços, jantares, churrascos, baladas, farras, farras, farras e vamos dar cambota.

À grande amiga Marla Gluczak que sempre este presente se mostrando uma grande amiga.

Aos grandes amigos prestativos e profissionais Deusinha, Manoel e Aguinaldo do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Goiás. Obrigado demais por sempre poder contar com vocês.

À equipe Furnas, em especial a Nicole Hasparyk, Reynaldo Bittencourt, Álvaro, Willian e Sr. Alceu. Obrigado a todos.

À Renato Landman da Bruken Engenharia (São Paulo – SP)

Ao amigo e prestativo João do laboratório de estruturas da Universidade Federal do Goiás.

À Tancredo e Mário que sempre estiveram presentes na secretaria do mestrado nos ajudando quando necessitamos. Valeu amigos.

À empresa Pires, Giovanetti e guarda (São Paulo – SP) em especial ao arquiteto Juca Pires por ter sido muito atencioso e ajudado nesta pesquisa.

À Capes pela bolsa concedida.

"É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar, é melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver"
Martin Luther King

"Há homens que lutam um dia e são bons. Há outros que lutam um ano e são melhores. Há os que lutam muitos anos e são muito bons. Porém, há os que lutam toda a vida. Esses são os imprescindíveis."
Bertolt Brecht



Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás-UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a):	Raphael Jaques de Castro Ribeiro Duarte				
CPF:	035251514-70	E-mail:	raphaeljduarte@yahoo.com.br		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?		☒ Sim ☐ Não			
Vínculo Empregatício do autor					
Agência de fomento:	Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior			Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	Goiás	CNPJ:	00394445/0191-12
Título:	Influência da ponte de aderência epoxídica e limpeza da armadura no desempenho do reparo localizado em estruturas com problemas de corrosão por íons cloreto.				
Palavras-chave: Concreto, corrosão, reparos localizados					
Palavras-chave em outra língua: Concrete, corrosion, located repair					
Área de concentração:	Materiais				
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	20/09/2007				
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu de Engenharia Civil da Universidade Federal do Goiás				
Orientador(a):	Dr. Enio J. Pazini Figueiredo				
CPF:	63242877004	E-mail:	epazini@eec.ufg.br		

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?¹ ☒ total ☐ parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

☐ Capítulos. Especifique: _____

☐ Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do(a) autor(a)

Data: ____ / ____ / ____

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

D812i Duarte, Raphael Jaques de Castro Ribeiro.
Influência da ponte de aderência epoxídica e limpeza da armadura no desempenho do reparo localizado em estruturas com problemas de corrosão por íons cloreto / Raphael Jaques de Castro Ribeiro Duarte. – 2007.
xxvi,193f. : il., color., figs., tabs., qds.

Orientador: Prof. Dr. Enio J. Pazini Figueiredo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás.
Escola de Engenharia Civil, 2007.

Bibliografia: f. 179-193.
Inclui listas de figuras, tabelas e quadros.
Anexos.

1. Concreto 2. Corrosão 3. Concreto – Reparos localizados
I. Figueiredo, Enio J. Pazini II. Universidade Federal de Goiás.
Escola de Engenharia Civil III. Título.

CDU: 624.012:620.197

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xxiii
LISTA DE QUADROS.....	xxiv
RESUMO.....	xxv
ABSTRACT.....	xxvi
1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	27
1.2 OBJETIVOS.....	31
1.2.1 Objetivos gerais.....	31
1.2.2 Objetivos específicos.....	31
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	32
 2 PASSIVAÇÃO E DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS.....	 33
2.1 PROCESSO DE PASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS.....	33
2.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE DOS ÍONS CLORETO.....	38
2.2.1 Difusão de cloretos.....	41
2.2.2 Absorção Capilar.....	44
2.2.3 Permeabilidade.....	45
2.2.4 Migração iônica.....	46
2.3 DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS POR ÍONS CLORETO.....	47
2.3.1 Limite crítico de cloretos.....	50
2.4 FATORES INFLUENTES NA CORROSÃO POR ÍONS CLORETO.....	54
2.4.1 Composição, tipo e quantidade de cimento.....	54
2.4.2 Relação água/cimento, adensamento e cura.....	56
2.4.3 Grau de saturação dos poros e concentração de íons cloreto.....	58
2.4.4 Efeito específico do cátion que acompanha o íon cloreto.....	60
2.4.5 Fissuras.....	60
2.4.6 Carbonatação.....	61
2.4.7 Temperatura.....	62
2.4.8 Ambiente.....	63

3	REPAROS LOCALIZADOS EM ESTRUTURAS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO DAS ARMADURAS.....	65
3.1	IMPORTÂNCIA DA AVALIAÇÃO EM ESTRUTURAS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO ANTES DO PROCEDIMENTO DE REPARO LOCALIZADO.....	69
3.1.1	Inspeção preliminar.....	69
3.1.2	Inspeção detalhada.....	71
3.2	ETAPAS E PROCEDIMENTOS DO REPARO LOCALIZADO.....	74
3.2.1	Retirada do concreto contaminado e preparo da superfície.....	75
3.2.2	Limpeza das armaduras.....	77
3.2.3	Revestimento da armadura.....	78
3.2.4	Aplicação de ponte de aderência.....	81
3.2.5	Material de reparo.....	82
3.2.6	Pinturas de proteção na superfície reparada.....	86
3.2.7	Acompanhamento de uma estrutura reparada.....	88
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	89
4.1	ETAPA I: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE REPARO (PRIMEIRA PARTE).....	90
4.1.1	Materiais avaliados.....	90
4.1.1.1	Concreto referência.....	90
4.1.1.2	Microconcreto fluido.....	91
4.1.1.3	Argamassa com Inibidor.....	91
4.1.1.4	Adesivo de base epóxi.....	92
4.1.2	Corpos-de-prova utilizados na primeira etapa	92
4.1.2.1	Moldagem dos corpos-de-prova.....	92
4.1.3	Monitoramento dos corpos-de-prova por medidas eletroquímicas (GECOR6).....	94
4.1.3.1	Densidade de corrente de corrosão (i_{corr}).....	96
4.1.3.2	Potencial de corrosão (E_{corr}).....	97

4.1.4	Realização dos reparos.....	98
4.1.4.1	Monitoramento inicial da corrosão.....	98
4.1.4.2	Reparo dos corpos-de-prova corroídos.....	99
4.1.4.3	Monitoramento dos corpos-de-prova.....	105
4.1.5	Monitoramento dos corpos-de-prova na etapa 1 (primeira parte).....	106
4.1.6	Avaliação da difusão de cloretos através dos sistemas de reparo e da ponte de aderência epoxídica (segunda parte da etapa 1).....	106
4.1.6.1	Retirada das amostras pulverizadas do concreto.....	107
4.1.6.2	Determinação do teor de cloretos totais.....	110
4.2	ETAPA II: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES SISTEMAS DE LIMPEZA DAS ARMADURAS.....	115
4.2.1	Questionário e seleção dos procedimentos de limpeza.....	115
4.2.2	Armaduras a serem submetidas aos procedimentos de limpeza.....	116
4.2.3	Qualidade do ensaio e procedimento.....	118
4.2.4	Procedimentos de limpeza das armaduras avaliadas.....	118
4.2.5	Microscopia estereoscópica.....	123
4.2.6	Concretagem das armaduras após procedimentos de limpeza.....	123
4.2.7	Armazenamento dos corpos-de-prova.....	126
4.2.8	Monitoramento dos corpos-de-prova.....	127
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	129
5.1	AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE REPARO.....	130
5.1.1	Avaliação dos sistemas de reparo por meio de medidas eletroquímicas.....	130
5.1.1.1	Concretos contaminados com 1% de cloretos.....	130
5.1.1.2	Concretos contaminados com 3 % de cloretos.....	135
5.1.2	Caracterização dos materiais de reparo.....	139
5.1.2.1	Resistência à compressão.....	140
5.1.2.2	Absorção de água.....	141
5.1.2.3	Permeabilidade ao ar.....	143
5.1.2.4	Resistência à penetração de cloretos.....	145

5.1.3	Difusão dos íons cloretos.....	150
5.2	AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE LIMPEZA DAS ARMADURAS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO POR ÍONS CLORETO (ETAPA II).....	155
5.2.1	Microscopia estereoscópica.....	155
5.2.1.1	Armaduras sem limpeza (SL).....	155
5.2.1.2	Escova de aço (EA).....	157
5.2.1.3	Jateamento abrasivo de areia (JF e JQ).....	158
5.2.1.4	Hidrojateamento com alta pressão de aproximadamente 6000 psi.....	160
5.2.1.5	Análise comparativa entre os sistemas de limpeza por meio da microscopia estereoscópica.....	161
5.2.2	Avaliação dos procedimentos de limpeza por meio de medidas eletroquímicas.....	162
5.2.2.1	Avaliação da qualidade e repetitividade da qualidade dos procedimentos de sistemas de limpeza das armaduras.....	162
5.2.2.1.1	Armaduras retiradas dos corpos-de-prova com 3% de cloretos.....	162
6	CONCLUSÕES.....	175
6.1	AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE REPARO	175
6.1.1	Avaliação dos sistemas de reparo por meio de medidas eletroquímicas.....	175
6.1.2	Difusão dos íons cloreto.....	176
6.2	AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE LIMPEZA DAS ARMADURAS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO POR ÍONS CLORETO (ETAPA II).....	176
6.2.1	Avaliação por meio de microscopia estereoscópica.....	176
6.2.2	Avaliação dos procedimentos de limpeza por meio de medidas eletroquímicas.....	177
6.3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	178
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	179
	ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Figura 1.1 - Lei de evolução de custos (SITTER, 1984).....	29
--	----

CAPÍTULO II – PASSIVAÇÃO E DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS

Figura 2.1 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe – H ₂ O a 25° (Pourbaix, 1961).....	35
Figura 2.2 – Esquematização do processo de corrosão da armadura no concreto (TUUTTI, 1982).....	39
Figura 2.3 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras (HELENE, 1993).....	40
Figura 2.4 - Representação esquemática da interação entre o concreto e o ambiente agressivo às armaduras (NEPOMUCENO, 1992).....	41
Figura 2.5 – Tipos de corrosão das armaduras e fatores que os provocam (ANDRADE, 1992).....	47
Figura 2.6 – Corrosão por íons cloreto em pilar da Ponte de Igapó em Natal – RN.....	48
Figura 2.7 – Armaduras de ponte em avançado processo de corrosão iniciada por carbonatação e íons cloreto.....	48
Figura 2.8 – Pilar em ponte com manchas marrom-avermelhadas ou alaranjadas, indicando à presença de corrosão das armaduras.....	50
Figura 2.9 - Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e umidade do ambiente (CEB-FIB, Bulletin 183, 1992).....	53
Figura 2.10 – Efeito da relação a/c na penetração de cloretos (JAERGEMANN, 1990).....	57
Figura 2.11 - Efeito da cura e da relação água/cimento na profundidade de alcance dos cloretos (JAERGEMANN, 1990).....	57

Figura 2.12 – Comportamento do coeficiente de difusão com a variação do grau de saturação (ALMENAR, 2000; NIELSEN e GEIKER , 2003).....	59
Figura 2.13 – Efeito da temperatura no ingresso de cloretos em concretos de cimento portland comum (a) e resistente a sulfatos (b)(AL-KHAJA 1997).....	63

CAPÍTULO III – REPAROS LOCALIZADOS EM ESTRUTURAS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO DAS ARMADURAS

Figura 3.1 – Esquema de um sistema completo de reparo localizado (FIGUEIREDO, 1994).....	66
Figura 3.2 – Correspondência entre inspeção prévia e inspeção detalhada (ANDRADE, 1992).....	72
Figura 3.3 – Processo de hidrojateamento de alta pressão numa superfície de concreto.....	76
Figura 3.4 – Exemplo de limpeza da armadura em sua face posterior com jateamento de areia, mostrando a importância do espaço após a posição da armadura, possibilitando uma limpeza adequada.....	77

CAPÍTULO IV – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Figura 4.1 – Esquema de armação (a), dimensões e aspecto final do CP prismático (b).....	92
Figura 4.2 – Esquema contendo os tipos de corpos-de-prova empregados na primeira etapa da pesquisa (TINOCO, 2001).....	94
Figura 4.3 – Equipamento utilizado para a realização das medidas eletroquímicas.....	96
Figura 4.4 – Delimitação da região a ser reparada com disco de corte diamantado (TINOCO, 2001).....	99
Figura 4.5 – Corte e escarificação dos corpos-de-prova até exposição total da	

armadura principal (TINOCO, 2001).....	100
Figura 4.6 – Limpeza das armaduras com jateamento de areia (TINOCO,2001).....	101
Figura 4.7 - Aspecto das armaduras após o jateamento de areia (TINOCO, 2001).....	101
Figura 4.8 – Complementação da limpeza das armaduras com hidrojateamento (TINOCO, 2001).....	102
Figura 4.9 – Conclusão da limpeza das armaduras com lavagem com água quente (TINOCO, 2001).....	102
Figura 4.10 – Aplicação de adesivo epoxídico como ponte de aderência e barreira contra a difusão dos Cl^- do concreto base para o material de reparo (TINOCO, 2001).....	103
Figura 4.11 – Momento de aplicação do material de reparo (concreto referência) sobre o concreto contaminado com cloretos (TINOCO, 2001).....	104
Figura 4.12 – Rompimento de corpo-de-prova por compressão axial.....	107
Figura 4.13 – Perfuração do corpo-de-prova por meio de uma furadeira de bancada para a obtenção de amostras pulverizadas de concreto.....	108
Figura 4.14 – Marcação das camadas de diferentes profundidades a serem perfuradas para extração das amostras de concreto.....	108
Figura 4.15 – Visualização do corpo-de-prova após perfurações para retirada de amostras.....	109
Figura 4.16 – Materiais utilizados para obtenção das amostras de concreto pulverizado.....	110
Figura 4.17 – Preparo das amostras, mistura das amostras no Becker com 75 ml de água deionizada e 25 ml de ácido nítrico.....	111
Figura 4.18 – Amostras preparadas, prontas para seguirem para aquecimento e posterior filtragem.....	112
Figura 4.19 – Processo de filtragem das amostras.....	112
Figura 4.20 – Amostras preparadas para o início do processo de titulação.....	113

Figura 4.21 – Adição da solução indicadora mista.....	114
Figura 4.22 – Adição do Nitrato de mercúrio até obter a coloração azul-violeta.....	114
Figura 4.23 – Aspecto das armaduras corroídas logo após terem sido retiradas dos corpos de prova com 3 % de cloretos.....	116
Figura 4.24 – Fotografia de uma microscopia estereoscópica da superfície da armadura, apresentando avançado processo de corrosão.....	117
Figura 4.25 – Rompimento dos CP's por compressão axial para facilitar a remoção das armaduras.....	117
Figura 4.26 – Procedimento de limpeza das armaduras por meio de escova de aço.....	120
Figura 4.27 – Forma de armazenamento de todas as armaduras até momento da nova concretagem.....	120
Figura 4.28 – Jateamento de areia à seco.....	121
Figura 4.29 – Hidrojateamento, após jateamento de areia à seco.....	122
Figura 4.30 – Formas de compensado com as armaduras, prontas para serem concretadas.....	125
Figura 4.31 – Detalhe do espaçador plástico e da fita isolante na armadura, com a finalidade de manter o cobrimento e evitar uma diferença de aeração, respectivamente.....	125
Figura 4.32 – Vibração dos corpos-de-prova em mesa vibratória no Laboratório de Materiais de Construção da EEC/UFG.....	126
Figura 4.33 – Corpos-de-prova armazenados na câmara úmida do Laboratório de Materiais de Construção da EEC/UFG.....	137
Figura 4.34 – Monitoramento dos corpos-de-prova por meio do GECOR6, avaliando os sistemas de limpeza das armaduras.....	128

CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Figura 5.1 – Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo,

do concreto contaminado com 1% de cloretos, reparado com concreto referência.....	130
Figura 5.2 - Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com microconcreto.....	131
Figura 5.3 - Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com argamassa contendo inibidor de corrosão.....	131
Figura 5.4 - Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com concreto de referência.....	133
Figura 5.5 - Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com microconcreto.....	133
Figura 5.6 - Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com argamassa contendo inibidor de corrosão.....	134
Figura 5.7 – Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com concreto referência.....	135
Figura 5.8 - Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com microconcreto.....	136
Figura 5.9 - Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com argamassa contendo inibidor de corrosão.....	136
Figura 5.10 - Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com concreto referência.....	138
Figura 5.11 - Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com microconcreto.....	138
Figura 5.12 - Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com argamassa contendo inibidor de corrosão.....	139

Figura 5.13 - Resultados médios dos ensaios de absorção de água por imersão (TINOCO, 2001).....	142
Figura 5.14 – Perda de massa dos materiais ao longo do tempo (TINOCO, 2001).....	143
Figura 5.15 – Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, no concreto de referência (TINOCO, 2001).....	146
Figura 5.16 - Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, no microconcreto (TINOCO, 2001).....	146
Figura 5.17 - Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo na argamassa com inibidor (TINOCO, 2001).....	147
Figura 5.18 – Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, no concreto referência (TINOCO, 2001).....	148
Figura 5.19 – Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, do microconcreto (TINOCO, 2001).....	149
Figura 5.20 – Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, na argamassa com inibidor (TINOCO, 2001).....	149
Figura 5.21 – Gráfico do perfil de cloretos dos corpos-de-prova reparados com concreto referência com e sem a ponte de aderência epoxídica.....	151
Figura 5.22 – Gráfico do perfil de cloretos dos corpos-de-prova reparados com microconcreto com e sem a ponte de aderência epoxídica.....	151
Figura 5.23 – Gráfico do perfil de cloretos dos corpos-de-prova reparados com argamassa com inibidor com e sem a ponte de aderência epoxídica.....	152
Figura 5.24 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura sem procedimento de limpeza, apresentando avançado processo de corrosão.....	156
Figura 5.25 - Imagem estereoscópica da superfície da armadura sem procedimento de limpeza, apresentando avançado processo de corrosão.....	156
Figura 5.26 - Imagem estereoscópica da armadura após o procedimento de limpeza com escova de aço manual, apresentando produtos de corrosão e provavelmente	

contaminada pelos íons cloreto.....	157
Figura 5.27 - Imagem estereoscópica da armadura após o procedimento de limpeza com escova de aço manual. Destacado nos círculos exemplos de pites de corrosão.....	157
Figura 5.28 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura após o procedimento de jateamento abrasivo de areia.....	158
Figura 5.29 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura após o procedimento de jateamento abrasivo de areia, apresentando pites de corrosão contaminados por produtos de corrosão.....	159
Figura 5.30 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura submetida à limpeza por jateamento abrasivo de areia apresentando alguns produtos de corrosão.....	159
Figura 5.31 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura após o procedimento de limpeza com hidrojateamento de alta pressão com 6000 psi.....	160
Figura 5.32 - Imagem estereoscópica da superfície da armadura após o procedimento de limpeza com hidrojateamento de alta pressão com 6000 psi apresentando pouca eficácia na remoção dos produtos de corrosão.....	161
Figura 5.33 – Densidade de corrente de corrosão média e das três armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , sem procedimento de limpeza.....	163
Figura 5.34 – Densidade de corrente de corrosão média e das três armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , submetidas à limpeza com escova de aço manual.....	164
Figura 5.35 – Densidade de corrente de corrosão da média e das três armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , submetidas à limpeza de jateamento de areia combinada com hidrojateamento de água fria com pressão de 1600 psi.....	164
Figura 5.36 – Densidade de corrente de corrosão da média e das três armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , submetidas à limpeza com jateamento de areia combinada com hidrojateamento de água quente com pressão de 1600 psi.....	165
Figura 5.37 – Densidade de corrente de corrosão da média e das armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , após serem submetidas à limpeza com	

hidrojateamento de alta pressão com 6000 psi.....	166
Figura 5.38 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos sem procedimentos de limpeza.....	169
Figura 5.39 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos e limpas com escova de aço manual.....	169
Figura 5.40 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos limpas com jateamento abrasivo de areia e hidrojateamento de água fria com baixa pressão (1600 psi).....	170
Figura 5.41 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos e limpas com jateamento abrasivo de areia e hidrojateamento com água morna de baixa pressão (1600 psi).....	171
Figura 5.42 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos e limpas com hidrojateamento de alta pressão (6000 psi).....	171

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II – PASSIVAÇÃO E DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS

Tabela 2.1 – Teor limite de cloreto para diversas normas (FIGUEIREDO, 2005).....	52
Tabela 2.2 - Quantidade de cloretos livres em relação a diversos teores de C_3A (RASHEEDUZZAFAR et al.,1990).....	54
Tabela 2.3 - Coeficiente de difusão de cloretos, a 25°C, em pastas de cimento com a/c igual a 0,5 (MEIRA, 2004).....	55

CAPÍTULO IV – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Tabela 4.1 – Critérios de avaliação para os resultados de velocidade de corrosão (ALONSO & ANDRADE, 1990).....	97
Tabela 4.2 – Critérios de avaliação da corrosão através de medidas de potencial de corrosão, segundo a ASTM C-876 (1991).....	98
Tabela 4.3 – Sistemas de limpeza avaliados e quantidades de amostras para cada procedimento.....	119

CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos (TINOCO, 2001).....	140
Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar (TINOCO, 2001).....	144
Tabela 5.3 – Classificação qualitativa dos materiais estudados em função dos tempos de permeabilidade (TINOCO, 2001).....	145

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO II – PASSIVAÇÃO E DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS

Quadro 2.1 – Reações de equilíbrio do sistema ferro/água, relativas ao diagrama de Figura 2.1 (JÚNIOR, 2001).....	37
Quadro 2.2 – Relação entre abertura máxima de fissura e agressividade ambiental.....	61
Quadro 2.3 – Faixas de agressividade, com base na vida útil das estruturas (adaptado de MEIRA, 2004).....	64

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo fornecer melhores parâmetros técnicos a respeito do reparo localizado em estruturas com problemas de corrosão.

Para isto, buscou-se avaliar o comportamento de uma argamassa com inibidor, um microconcreto fluido e um concreto referência, juntamente a estes materiais de reparo, uma ponte de aderência epoxídica foi utilizada com a finalidade de se avaliar a difusão dos íons cloreto. Estes corpos-de-provas foram ensaiados após cinco anos dos procedimentos de reparos localizados. Estando assim próximo da realidade das estruturas reparadas por problemas de corrosão por íons cloreto. Depois de analisadas, suas armaduras serão submetidas a diferentes procedimentos de limpeza, avaliando a eficácia destes procedimentos quanto à remoção dos cloretos e aos produtos de corrosão.

Este trabalho foi dividido em três etapas. Primeiramente realizou-se um monitoramento por meio de medidas eletroquímicas (intensidade e potencial de corrosão e resistência ôhmica) nos corpos-de-provas reparados. Na segunda etapa, foram colhidas amostras de concreto pulverizado dos corpos-de-provas, em diferentes profundidades, sendo realizados ensaios para a determinação de cloretos totais das amostras, por meio do método da ASTM C 1152, obtendo um perfil do teor de cloretos e podendo observar a difusão dos íons cloreto através das barreiras epoxídicas e dos materiais de reparo. Por último, as armaduras foram submetidas a quatro diferentes sistemas de limpeza, sendo posteriormente concretadas e monitoradas por meio de medidas eletroquímicas.

Os resultados mostram que os materiais avaliados são potencialmente mais eficientes do que o concreto referência, sendo que o microconcreto fluído foi o material que apresentou os melhores resultados na primeira e na segunda etapa. Já A ponte de aderência epoxídica reduziu a difusão dos íons cloreto da área não-reparada para a área reparada, porém não evitou totalmente a penetração destes íons, mostrando que a qualidade do material de reparo (microconcreto fluido e argamassa com inibidor) foram mais eficazes. O sistema de limpeza por meio de escova de aço foi o método de limpeza menos eficaz entre os avaliados. O procedimento que se mostrou mais eficaz foi o hidrojateamento à 6000 psi, seguido do jateamento de areia à seco combinado com hidrojateamento de água quente a 1600 psi.

Abstract

The present paper has as objective to supply better technical parameters regarding the located repair in structures with corrosion problems.

In this way, the behavior of a mortar with inhibitor; a fluid micro concrete and a reference concrete was evaluated, an epoxy tack bridge was used with these other materials on the purpose to control the diffusion of chloride ions. These concrete specimens had been evaluated five years after the accomplishment of the located repairs. Being next to the reality of the structures repaired by corrosion problems caused by chloride ions. After analyzed, these reinforcements were submitted to different procedures of cleanness, evaluating the effectiveness of these procedures on the chlorides ions removal and the products of corrosion.

This paper was divided in three stages. On the first stage a monitoring of the concrete specimens by means of electrochemical measures (intensity and potential of corrosion and ohm resistance measures was done). On the second stage samples of concrete sprayed in different depths of the concrete specimens, was carried through assays for the determination of total chloride, by means of the method of ASTM C 1152, getting a profile of the chloride text. With this, the diffusion of chloride ions through the epoxy barriers and the materials of repair could be observed. At the end these reinforcement had been submitted to four different systems of cleanness and concreted again, being monitored for a long period by means of electrochemical measures.

It could be observed with the tests results that the evaluated materials are potentially more efficient than the reference concrete, and the fluid micro-concrete was the material that presented best results in the first and in the second stage. Epoxy tack bridge reduced the diffusion of chloride ions of the non repaired area for the repaired area. However it did not prevented the complete penetration of these ions, showing that the quality of the repair material (fluid micro-concrete and mortar with inhibitor) had been more efficient. The cleanness system with manual steel brush showed to be the worse procedure cleanness used. The procedure that presented the better performances was: abrasive grit blasting (6000 psi) and with high-pressure hydro blasting (1600 psi).

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Sabe-se, hoje, que nenhum material estrutural é eternamente durável devido à sua interação com o meio ambiente. No caso das estruturas de concreto armado, a partir da década de 70, foi crescente a preocupação com a deterioração das estruturas e sua durabilidade.

O concreto armado é largamente utilizado na construção civil, devido às diversas vantagens oferecidas por este material. Até pouco tempo o concreto era visto como o material utilizado na construção estrutural de maior durabilidade. A durabilidade das estruturas de concreto armado já foi considerada ilimitada, mas, com o uso crescente do concreto ao longo dos anos, essa concepção foi alterada, pois muitas estruturas começaram à apresentar diversas incidências patológicas em um período muito curto de uso. Geralmente estas manifestações patológicas são causadas pelos agentes agressivos do ambiente ao qual estão inseridas. Isto tem levado várias instituições de pesquisas que estudam o concreto a aumentarem as investigações sobre a durabilidade para se entender melhor a causa, o comportamento e a forma de se evitar e reparar essas manifestações patológicas.

É lógico que o avanço da tecnologia de produção do concreto e de seus componentes, bem como das técnicas empregadas no cálculo das estruturas, têm trazido infinitos benefícios. Ainda assim, estas tecnologias podem proporcionar sérios inconvenientes, uma vez que, na busca de dimensões mínimas seguras, os efeitos agressivos (mecânicos, físicos, químicos ou biológicos) podem ter, de acordo com Cánovas (1988), graves conseqüências, sobre as estruturas, o que possibilitaria o comprometimento da integridade do concreto, assim como da estabilidade da estrutura.

Dentre as manifestações patológicas encontradas, a corrosão das armaduras é a mais importante, devido a sua alta incidência e por ser a que apresenta a maior gravidade, o

que implica em elevados custos com reabilitação das estruturas. De acordo com Andrade e González (1988) apud Figueiredo (1994), os gastos produzidos pelas deteriorações das estruturas representa cerca de 1,25% a 3,50% do Produto Nacional Bruto (PNB) de países em desenvolvimento ou desenvolvidos. Isto explica o porque de alguns destes países estarem adotando estratégias para frear o rápido crescimento destes gastos. Outro pesquisador, Baboian, 1990 (apud CASTRO, 1998), estimou o custo da corrosão em 2 a 5% do PNB de cada país, podendo ser evitado de 15 a 25% desse valor, caso fossem aplicados métodos preventivos.

Em todas as partes do mundo estudos têm sido desenvolvidos no sentido de quantificar, identificar ou diagnosticar as doenças que acometem as estruturas de concreto. Um extenso levantamento de abrangência nacional a respeito da incidência das manifestações patológicas, realizada por Carmona e Marega (1988), analisou diversos relatórios técnicos de grandes empresas de recuperação estrutural espalhadas por todo o país. Neste levantamento, entre outros aspectos importantes, observou-se uma grande incidência de problemas de corrosão das armaduras, os quais representaram cerca de 31% do total das manifestações patológicas encontradas. Dal Molin (1988), em estudo realizado no Rio Grande do Sul, verificou que a incidência relativa em função do dano provocado nas estruturas apresenta um índice de 40% para os casos de corrosão da armadura, principalmente quando relacionada a segurança estrutural.

Os problemas de corrosão no Brasil estão associados aos efeitos de uma qualidade de projeto e execução mais baixa. A baixa qualidade do concreto armado, caracterizada por uma deficiente dosagem, transporte, adensamento e cura, levam a produção de ninhos de concretagem, segregações, exsudação, fissuras e cobrimentos inadequados. Esses problemas são, na maioria das vezes, apontados como os principais responsáveis pela origem dos processos de corrosão (FIGUEIREDO, 1994). Segundo Nepomuceno (2005), a degradação das estruturas de concreto armado se dá pela penetração de substâncias em forma de gases, vapor e líquidos através dos poros e fissuras presentes na estrutura. A umidade relativa, orientação das chuvas e ventos, concentrações de substâncias nele presentes, temperatura etc., além das características dos materiais constituintes do concreto, são fatores importantes na interação do concreto com o meio ambiente.

Figueiredo (1994), afirma que a importância da corrosão abrange razões econômicas, técnicas, sociais e jurídicas. A deterioração de inúmeras obras civis e públicas devido à corrosão das armaduras é um fato presente, que desafia de forma urgente toda a comunidade técnica científica mundial, em virtude de ser uma das manifestações patológicas mais sérias, custosas e difíceis de serem resolvidas.

Sitter (1984), que divide em quatro as etapas construtivas e de uso de uma determinada obra, demonstra, através de uma lei que leva o seu nome, que é recomendável a prevenção desde o início ou a intervenção em tempo hábil. Caso contrário, os custos diretos sofrerão um aumento significativo, crescendo segundo uma progressão geométrica de razão cinco, na medida que se vence cada período, conforme observado na Figura 1.1.

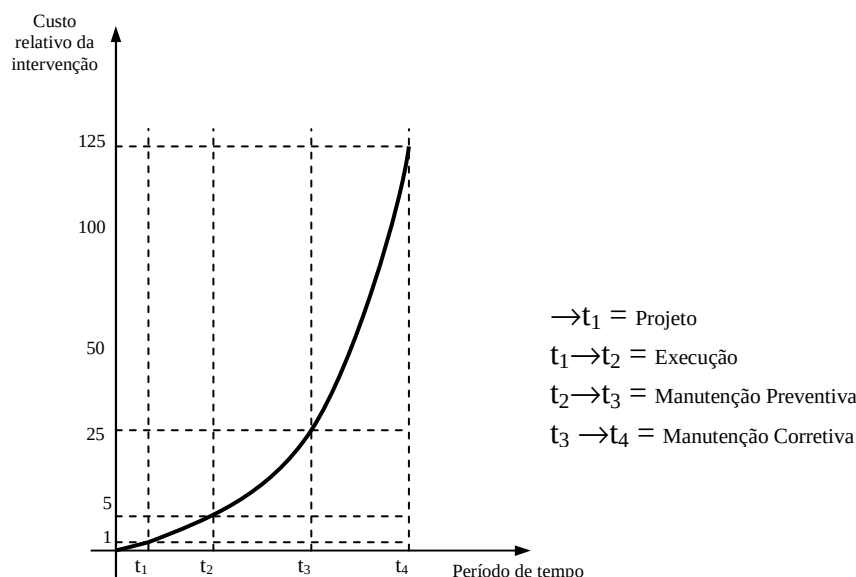


Figura 1.1 - Lei de evolução de custos (SITTER, 1984).

Para Tinoco (2001), a correção de problemas em estruturas causados pela corrosão das armaduras, deve seguir critérios técnicos e econômicos confiáveis e precisos, pois é um tanto complexo o estabelecimento de um diagnóstico correto, bem como a especificação dos materiais e técnicas a serem utilizados nos serviços de reparo, recuperação ou reforço, conforme a necessidade, de uma estrutura avariada.

Nepomuceno (1992) afirma que não existem ensaios normalizados para a caracterização dos materiais de reparo de um ponto de vista de sua eficiência. Infelizmente,

isso continua sendo uma verdade para o caso do brasileiro. Na europa, na década passada, houve grande evolução nessa área, desenvolvendo normas específicas que trazem especificações para testes que avaliam as principais propriedades dos materiais e sistemas de reparo. Apesar disso, grande parte dos ensaios disponíveis estão dirigidos, fundamentalmente, à avaliação de propriedades físicas ou à caracterização química. Sem testes normalizados, os engenheiros muitas vezes não têm outra saída a não ser confiar nas avaliações e recomendações fornecidas por fabricantes ou fornecedores. Em alguns casos, estes dados não representam características ou propriedades relevantes, principalmente no que diz respeito à durabilidade do material ou do sistema.

A grande quantidade de materiais existentes no mercado e, ainda, o surgimento crescente de novos materiais e técnicas destinados ao reparo e recuperação de estruturas, alerta o meio técnico-científico para a necessidade de uma avaliação do desempenho destes materiais e de sistemas de reparo, não só durante sua aplicação, mas também ao longo de sua vida útil. Embora inúmeras estruturas já tenham sido reparadas, a literatura que trata do desempenho ou da durabilidade das intervenções ainda é bastante limitada. Andrade et al. (1988), por exemplo, nesta época, já diziam que quando é preciso tomar decisões mais sérias, não se encontram facilmente critérios básicos para que se possa julgar a qualidade em longo prazo e escolher entre a vasta oferta de materiais de reparo disponível comercialmente.

Assim, este trabalho tem a finalidade de fornecer informações técnicas sobre alguns sistemas e técnicas de reparos para estruturas armadas em processo de corrosão, quanto a sua eficácia ligadas à durabilidade, enriquecendo o meio técnico-científico com informações sobre este assunto, o qual ainda é carente de bibliografias e pesquisas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Esta dissertação tem como objetivo geral fornecer informações ao meio técnico e científico a respeito de materiais, sistemas e técnicas para reparos localizados e recuperação de estruturas de concreto com processo de corrosão das armaduras por íons cloreto.

1.2.2 Objetivos específicos

Avaliar o desempenho de sistemas de reparo constituídos por um concreto convencional, um microconcreto fluido comercial e uma argamassa com inibidor de corrosão, podendo o sistema ter, ou não, uma ponte aderência de base epóxi. O comportamento dos sistemas de reparo são comparados com o comportamento de um sistema de referência composto por um concreto convencional de relação a/c igual a 0,55, podendo ter, ou não, uma ponte aderência de base epóxi. A ponte de aderência de base epóxi, no caso estudado, tem a função de barreira, ou seja, de impedir a difusão de íons cloreto, remanescentes no concreto antigo, para a região reparada.

Outro objetivo da presente dissertação é avaliar a influência do uso de diferentes técnicas e procedimentos de limpeza das armaduras com corrosão, devido à ação dos íons cloreto, sobre a eficiência de um reparo localizado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação é constituída por seis capítulos, onde os três primeiros apresentam uma introdução e uma revisão bibliográfica para melhor entendimento desta pesquisa, enquanto que os três últimos apresentam o programa experimental desenvolvido, seus resultados e discussões e as considerações finais.

No Capítulo 2 aborda-se o tema da passivação e despassivação das armaduras, dissertando sobre assuntos como a microestrutura do concreto, mecanismos de transporte dos íons cloreto, a despassivação das armaduras por íons cloreto, limite crítico de íons cloreto e fatores acelerantes da despassivação e propagação da corrosão.

No Capítulo 3 aborda-se a estratégia, a técnica e os materiais empregados na realização de reparos localizados em estruturas com problemas de corrosão das armaduras.

O Capítulo 4 detalha os procedimentos adotados na metodologia experimental, a fim de atingir os objetivos da dissertação.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nesta dissertação, onde também são discutidos e analisados. Os resultados apresentados seguem a seqüência apresentada no Capítulo 4.

No Capítulo 6 são expostas as conclusões relacionadas ao objetivo desta dissertação, assim como sugestões para futuras pesquisas.

2 PASSIVAÇÃO E DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS

2.1 PROCESSO DE PASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS

Uma das grandes vantagens do concreto armado em relação aos outros materiais de construção é que ele pode por natureza e desde que bem executado, proteger a armadura contra a corrosão. Essa proteção baseia-se no impedimento do início de corrosão por meio de uma barreira física e de uma proteção de natureza química.

Um bom cobrimento das armaduras, com um concreto de alta compacidade, sem ninhos de concretagem, vazios ou excesso de exsudação e com teor de argamassa adequado e homogêneo, garante, por impermeabilidade (barreira), a proteção do aço contra os ataques de agentes agressivos externos.

A proteção química, mais importante e efetiva decorre da basicidade do concreto. Como é apresentado mais à frente, no diagrama de Pourbaix, em ambientes de elevada alcalinidade a armadura se encontra no domínio da passivação (HELENE, 1993).

O concreto se apresenta como um meio altamente alcalino, com o pH variando entre 12,5 a 13,5, podendo estes valores ter uma pequena redução com a utilização de adições minerais no concreto, como a sílica ativa e a escória de alto-forno, entre outras. Esta alta alcalinidade na pasta de cimento Portland é devido aos íons provenientes do hidróxido de cálcio e da presença de grandes concentrações dos compostos alcalinos Ca^{++} , Na^+ , K^+ e OH^- . De acordo com Page e Treadaway (1982), a solução do poro, mesmo após poucas semanas de cura, já é uma solução mista de hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) originários do álcalis do cimento.

Desta forma, com a armadura em um meio de alta alcalinidade, como o concreto, ocorrerá a formação de uma película submicroscópica protetora, de caráter passivo, compacta e aderente sobre a superfície da armadura (GOUDA, 1966).

De acordo com Helene (1993), esta passivação pode ser entendida como a resistência à corrosão proporcionada por uma fina película de um filme de óxido estável e aderente formado na superfície do metal.

Essa camada passivante, de acordo com Andrade (1984), protege indefinidamente a armadura de qualquer sinal de corrosão, enquanto o concreto preserve sua boa qualidade, ou seja, não fissure e não modifique suas características físicas ou mecânicas devido à ação de agentes agressivos externos.

A teoria de filme de passivação mais aceita, de acordo com Helene (1993), é a de Sato (1978), cuja refere-se na formação de um filme transparente, fino, aderente e estável, composto por duas camadas de óxido, uma interna onde predomina o Fe_3O_4 e outra externa de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Nishimura e Sato (1984) comentam que, ainda que muitos pesquisadores tenham investigado com detalhes a estrutura, a composição e a espessura do filme passivo sobre o aço em função do pH, da natureza do ânion, do processo de formação da película, do potencial e do tempo de oxidação, estas propriedades não podem ser termodinamicamente determinadas e variam de acordo com as condições de formação do filme.

Figueiredo e Andrade (1997) verificaram em seus experimentos, que a aplicação de revestimentos de base cimento sobre a armadura, quando da realização de reparos localizados, visando à proteção por passivação, não se mostrou muito eficiente na presença de cloretos, devido ao caráter despassivante destes íons.

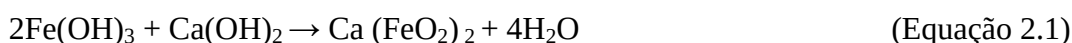
Tinoco (2001) afirma que, em casos que a corrosão é causada por carbonatação do concreto, a proteção por passivação induzida é justificada, visto que este procedimento aumenta a alcalinidade no entorno da barra, contribuindo para a formação da película, assegurando, assim, a sua integridade por um período mais longo.

Sá (2006) estudou três tipos de soluções alcalinas, com o objetivo de realcalinizar um concreto carbonatado e repassivar armaduras em processo de corrosão por carbonatação. Para isto, utilizou a técnica de realcalinização por absorção/difusão. Das soluções de carbonato de sódio (Na_2CO_3), solução de hidróxido de potássio (KOH) e uma terceira solução com estes dois componentes anteriores acrescentada de hidróxido de sódio (NaOH), chamada de solução tripla. Os resultados obtidos mostraram que, as soluções foram extremamente eficazes na realcalinização do concreto. No entanto, quanto a repassivação das armaduras não se mostraram eficazes, mesmo após 600 dias depois da realcalinização.

Em estudo realizado sobre o comportamento de diversas argamassas de reparos frente a carbonatação e penetração de cloretos em estruturas de concreto armado atacadas por corrosão de armadura, Nepomuceno (1992) identificou que os materiais mais eficazes quanto

ao processo de carbonatação, tanto em ensaio acelerado, como em ensaio de carbonatação natural, foram os que continham as maiores quantidades de álcalis em sua fase aquosa.

Basílio (1972) considera que barras de aço com início de corrosão, ao serem concretadas, podem dar origem à formação de uma película passivante espessa de ferrita de cálcio (óxido duplo de cálcio e ferro), o qual é um pó branco estável, resultante da combinação da ferrugem superficial da armadura com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, segundo a reação representada na Equação 2.1.



O diagrama de Pourbaix, mostrado na Figura 2.1, apresenta as reações que poderão estar presentes quando o equilíbrio termodinâmico e eletroquímico é alcançado em sistemas metal-água a 25° C. Pourbaix (1961) demonstrou por meio de um diagrama de potencial de corrosão (expresso em mV) versus pH de sistema ferro/água a 25° C, que, para a ordem de grandeza do pH do concreto, de aproximadamente 12,5, e para a faixa usual de potencial de corrosão da armadura do concreto, da ordem de +100mV a -400mV, em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, as reações de eletrodo verificadas são de passivação.

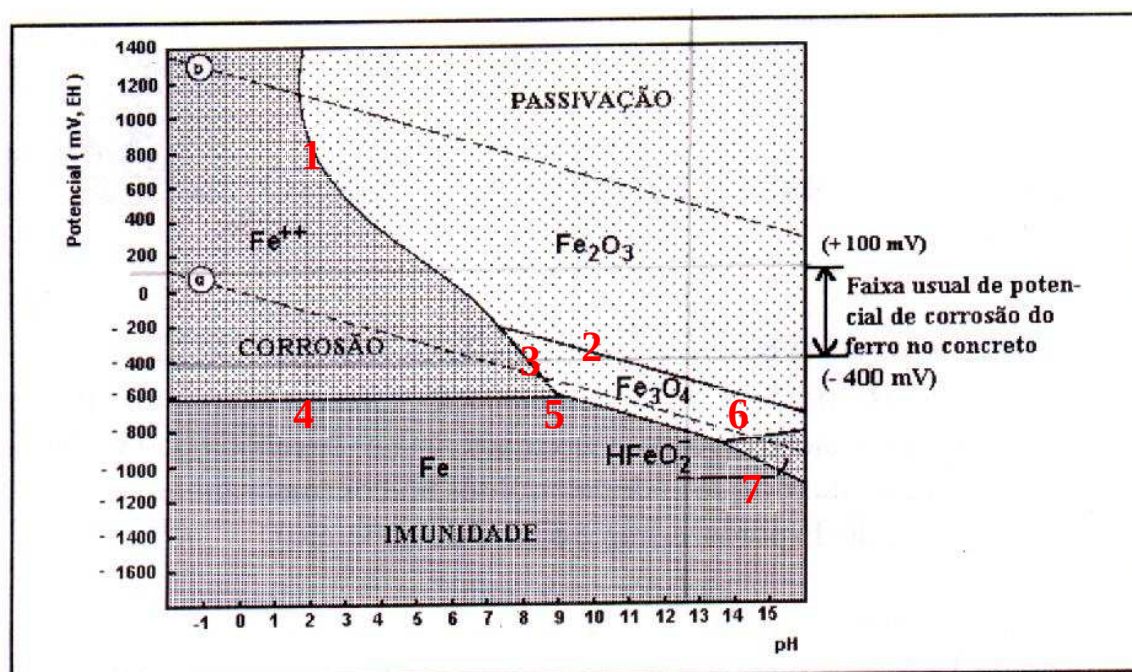
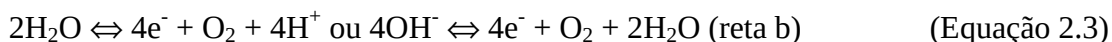


Figura 2.1 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe – H₂O a 25° (Pourbaix, 1961).

Gentil (1996) explica que as duas linhas paralelas *a* e *b* representam as condições de equilíbrio das reações eletroquímicas. Onde, abaixo da linha *a*, correspondente a $p_{H_2}=1$ atm, a água tende a se decompor por redução segundo as reações mostradas nas Equações 2.2 e 2.3.



Acima da linha *b*, correspondente a $p_{O_2} = 1$ atm, a água tende a se decompor por oxidação segundo as reações mostradas nas Equações 2.4 e 2.5.



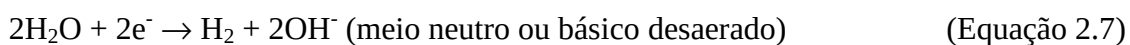
ou



Abaixo da reta “a”, a água apresenta a tendência de se decompor por redução segundo as reações mostradas nas Equações 2.6 e 2.7.



ou



A região compreendida entre as linhas *a* e *b* é o domínio da estabilidade termodinâmica da água.

As linhas cheias representam o equilíbrio entre as espécies do metal ferro. O Quadro 2.1 indica a reação de equilíbrio de cada uma dessas linhas.

Quadro 2.1 – Reações de equilíbrio do sistema ferro/água, relativas ao diagrama de Figura 2.1 (FRANCINETE Jr, 1997).

Linha 1	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$
Linha 2	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$
Linha 3	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{Fe}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$
Linha 4	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}$
Linha 5	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O}$
Linha 6	$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{HFeO}_2^- + \text{H}^+$
Linha 7	$3\text{HFeO}_2^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O}$

O deslocamento das condições de equilíbrio fará com que as reações apresentem a tendência de acontecerem num determinado sentido. Por exemplo, no caso de se ter condições de pH e potencial que façam com que o equilíbrio se situe sobre a linha 1. Desde que não ocorram mudanças das condições do sistema, esse equilíbrio tende a permanecer indefinidamente. No entanto, se houver uma diminuição do pH e o potencial for mantido fixo, haverá a tendência de formação do íon Fe^{2+} , de acordo com a reação mostrada na Equação 2.8 (SÁ, 2006):



Por outro lado, se ocorrer uma elevação do pH e o potencial não se alterar, ocorrerá à tendência para a formação do óxido Fe_2O_3 , com a reação de equilíbrio sendo deslocada para o sentido da oxidação, conforme mostra a reação da Equação 2.9.



Helene (1993) define de forma clara as três distintas regiões do diagrama de Pourbaix, como é mostrado a seguir:

1. Imunidade: É a região onde o potencial de eletrodo é menor que $-0,600V$ em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio. Nestas condições a armadura não reage com o meio qualquer que seja a sua natureza, podendo ser ácida, neutra ou alcalina.
2. Passivação: É a região pontilhada do diagrama e representa as condições em que são formadas as películas de passivação. As duas retas tracejadas paralelas e oblíquas representam a região de estabilidade da água, sendo que acima da linha “b” tem-se o domínio de oxigênio e abaixo da linha “a” o do hidrogênio.
3. Corrosão: Corresponde a região superior esquerda do diagrama (cinza claro) e representa as situações onde pode ocorrer a corrosão do aço.

2.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE DOS ÍONS CLORETO

A degradação de estruturas de concreto armado ocorre geralmente pela penetração de agentes agressivos na forma de gases, vapores e líquidos, ocorrendo através da sua rede de poros capilares e fissuras. A umidade relativa, orientação de chuvas, ventos, grau de agressividade do meio, temperatura, etc., além dos materiais constituintes do concreto e de seus poros são fatores importantes para determinar a velocidade do processo de deterioração e grau de degradação das estruturas de concreto armado, influenciando diretamente na velocidade e grau de penetração dos agentes agressivos em estruturas de concreto (NEPOMUCENO, 2005).

O ambiente em que se encontra inserida a estrutura de concreto é de fundamental importância. A velocidade de corrosão do concreto armado é de 30 a 40 vezes mais rápida em atmosfera marítima que em atmosfera rural. A intensidade do ataque na região marinha é aumentada conforme a localização da estrutura de concreto, na seguinte ordem: zona constantemente submersa, zona de névoa (maresia), zona de variação da maré e zona de respingo de maré (TAYLOR, 1992; MEHTA e MONTEIRO, 1994; HELENE, 1981).

Segundo Tuutti (1982), que propôs uma esquematização da vida útil das armaduras no concreto, como mostra a Figura 2.2, o período de iniciação é o período em que os agentes agressivos penetram no concreto até atingir a armadura, provocando a despassivação das barras de aço, e período de propagação é aquele durante o qual a corrosão se desenvolve até um nível aceitável. A soma destes dois períodos, iniciação e propagação, define a vida útil ou tempo antes do reparo.

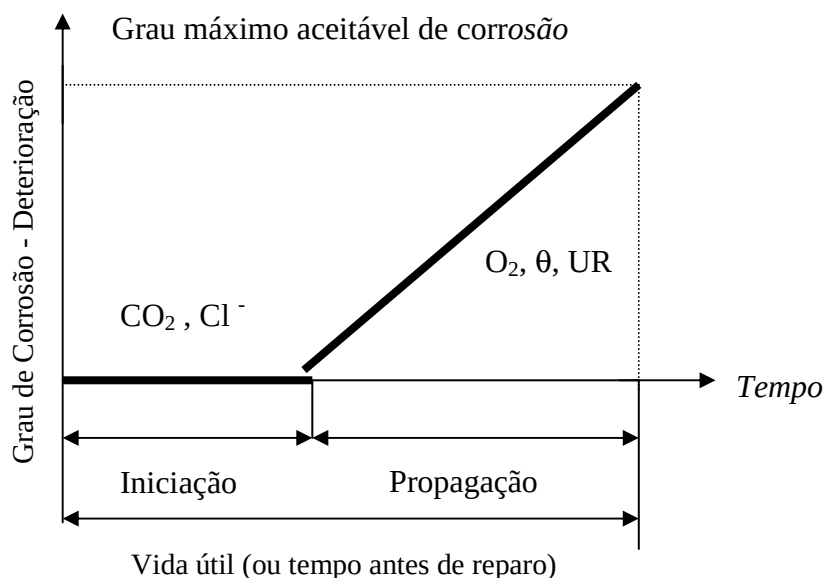


Figura 2.2 – Esquematização do processo de corrosão da armadura no concreto (TUUTTI, 1982).

A partir do modelo proposto por Tuutti (1982), Helene (1993) propôs uma nova conceituação e definição objetiva de vida útil, como mostrado na Figura 2.3, apresentando a existência de três situações e suas correspondentes vidas úteis. A proposta é baseada no fenômeno da corrosão das armaduras, mas pode esta ser aplicada aos outros mecanismos de deterioração. Ela é dividida em **vida útil de projeto**, que é o período de tempo que vai até a despassivação da armadura, **vida útil de serviço ou de utilização**, que é o período de tempo que vai até o momento em que as manchas aparecem na superfície do concreto, ou ocorre o aparecimento de fissuras ou destacamento do concreto, e **vida útil última ou total**, que é o período de tempo que vai até a ruptura, ou colapso parcial ou total da estrutura.

Além destas três vidas úteis, foi introduzida, ainda, a vida útil residual, que pode ter como prazo final, tanto o limite de projeto ou o de serviço, quanto o limite de ruptura, dando origem a três vidas úteis residuais. Portanto, a vida útil residual pode ser definida como o período de tempo em que a estrutura ainda é capaz de desempenhar as funções as quais lhe foram atribuídas, contando a partir da data de uma vistoria qualquer.

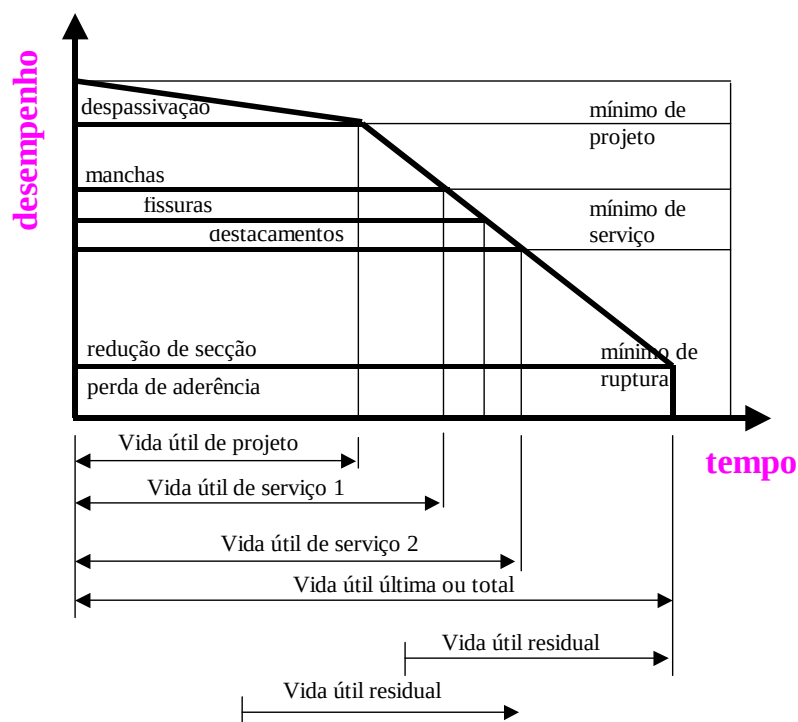


Figura 2.3- Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras (HELENE, 1993).

Tendo em vista a contaminação de cloretos a partir do ambiente externo, os meios usuais de penetração de cloretos são devidos à permeabilidade, à absorção capilar e à difusão. Na realidade, estes mecanismos, muitas vezes, costumam atuar de forma conjunta, gerando uma combinação dos mecanismos de transporte de cloretos (KROPP, 1995). Andrade (1992) afirma que, a absorção capilar e a difusão são os mecanismos mais comuns. No caso de íons cloreto, a absorção ocorre geralmente na camada superficial do concreto, geralmente onde ocorre à molhagem e secagem da superfície do concreto pela ação das intempéries ou variações da maré. Mais para o interior do concreto, onde a presença do eletrólito é mais constante, ocorre mais basicamente o mecanismo de difusão. Ollivier (1998) explica que a absorção capilar e a permeabilidade podem, em determinados casos, como por exemplo em reservatórios, ter grande importância. No entanto, estudos indicam que os íons cloretos são transportados através do concreto, principalmente, pelo mecanismo de difusão.

A Figura 2.4 representa esquematicamente a interação entre o concreto e o ambiente contaminado com agentes prejudiciais à durabilidade das armaduras.

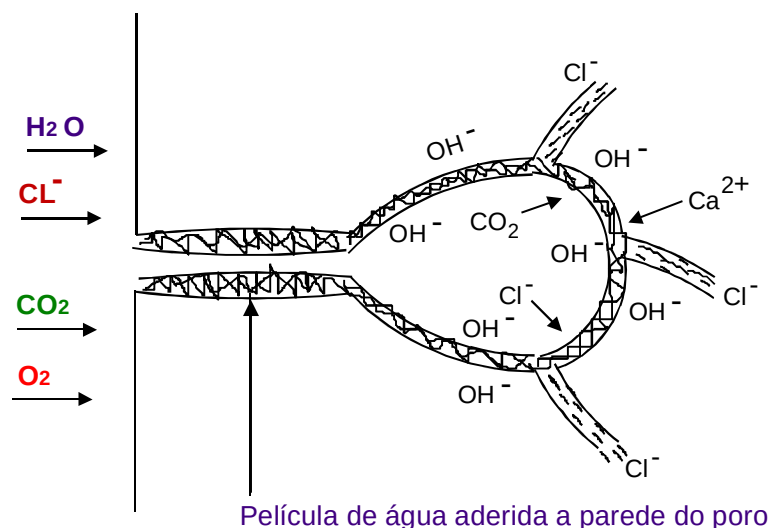


Figura 2.4 - Representação esquemática da interação entre o concreto e o ambiente agressivo às armaduras (NEPOMUCENO, 1992).

2.2.1 Difusão de cloretos

A difusão de cloretos é um dos principais mecanismos de transporte que afeta a durabilidade das estruturas de concreto armado, provocando a corrosão das armaduras. Segundo Nepomuceno (2005), a determinação do coeficiente de difusão de cloretos é, hoje, um dos maiores desafios para o meio técnico, porque dele depende a previsão de vida útil das estruturas em ambientes contaminados por cloretos. Ainda, de acordo com o mesmo autor, o fenômeno da difusão de cloretos no concreto é bastante complexo, devido às diversas possibilidades de combinações de fatores que o influenciam, tais como: a variação da concentração superficial de cloreto com o tempo, a variação da temperatura, a variação do coeficiente de íons combinado, a capacidade que o cimento tem de combinar com os íons cloreto, o que varia de acordo com o tipo de cimento, o fluxo tridimensional, a modificação da microestrutura ao longo do tempo, entre outros. O item 2.4 aborda com mais detalhes alguns fatores influentes na penetração de cloretos em estruturas de concreto.

A difusão de cloretos é um mecanismo que ocorre devido a diferentes gradientes de concentração de cloretos, ou seja, os cloretos que se encontram em regiões com maior concentração se movem para regiões de menor concentração, buscando um equilíbrio. Para que ocorra esta movimentação de cloretos pelo concreto, é necessário um meio líquido. Neste caso, a água tem fundamental importância para a ocorrência deste processo. A difusão dos

íons cloreto será tanto mais intensa quanto maior a sua concentração na solução externa. Em estruturas parcialmente submersas em água contaminada com íons cloreto, a região acima da linha d'água é a mais contaminada, devido à elevação da concentração, à medida que a água que sobe por capilaridade, levando os íons cloreto, se evapora. Sendo a difusão um fenômeno de transporte de massa por meio de um fluido, é de se esperar que seja tanto menor quanto mais compacto for o concreto (HELENE, 1986).

As expressões matemáticas que expressam este fenômeno são dadas pelas Leis de Fick da difusão (NEPOMUCENO, 1992). A expressão simplificada que considera o coeficiente de difusão e a concentração de cloretos na superfície constante é a Equação 2.10 (NEPOMUCENO, 2005).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{Equação 2.10})$$

onde D é o coeficiente de difusão (m^2/s); C é a concentração (kmol/m^3) a uma profundidade x (m) da superfície e t é o tempo (s). A solução desta equação, considerando as condições de contorno, mostradas nas Equações 2.11 e 2.12, é dada pela equação 2.13.

$$C(x,0) = 0 \rightarrow t = 0 \quad (\text{Equação 2.11})$$

$$C(0,t) = C_s \rightarrow x = 0 \quad (\text{Equação 2.12})$$

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (\text{Equação 2.13})$$

onde erf é a função de erro de Gauss, dada por tabelas matemáticas e C_s é a concentração na superfície do concreto (SANJUÁN, 1992).

Quando se considera a combinação dos íons cloretos haverá o retardamento e o fenômeno será considerado pela Equação 2.14 (TUUTI, 1982).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C_c}{\partial t} \quad (\text{Equação 2.14})$$

onde C_c é a concentração dos cloretos combinados e C é a concentração dos cloretos livres.

A relação entre os cloretos livres e combinados pode ser dada pela relação R , mostrada na Equação 2.15.

$$C_c = R.C \quad (\text{Equação 2.15})$$

Combinando as Equações 2.14 e 2.15, chega-se a Equação 2.16:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R+1} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{Equação 2.16})$$

De acordo com Halamickova et al. (1995 apud NEPOMUCENO, 2005), em estudo da difusão de cloretos em relação ao grau de hidratação e volume de agregados, verificou-se que a hidratação reduz o coeficiente de difusão e que uma maior quantidade de agregados o aumenta esse coeficiente, provavelmente, porque, neste último caso, aumenta a conectividade da zona de transição.

Nepomuceno (2005) afirma que, existem vários procedimentos adotados de ensaios para determinar o coeficiente de difusão de cloretos. Uns baseiam-se no estado estacionário, utilizando a primeira lei de Fick. Nesse caso realiza-se a determinação por meio de uma medição da concentração dos cloretos em uma solução que atravessa a amostra de concreto que divide duas câmaras. O coeficiente de difusão é determinado após o fluxo tornar-se constante, ou seja, não são considerados as influências das combinações dos íons cloreto com os compostos do cimento. Em outro procedimento, aplica-se sobre a superfície de concreto uma solução de cloretos com a concentração constante, mede-se a diversas profundidades o teor de cloretos ao longo do tempo e, empregando a segunda lei de Fick, calcula-se o coeficiente de difusão. O coeficiente de difusão pode ser também determinado retirando-se amostras do concreto ao longo do tempo em estruturas reais. Todos estes procedimentos de ensaios são demorados, necessitando de várias semanas para se obter os resultados. Por isso, vem sendo empregado pelas diversas instituições de pesquisa em todo mundo, o ensaio acelerado, onde se utiliza um campo elétrico para forçar a passagem do íon cloreto através de uma amostra para se determinar o coeficiente de difusão.

2.2.2 Absorção capilar

De acordo com Nepomuceno (1992 e 2005), um dos principais mecanismos de penetração de líquidos no concreto é o transporte por capilaridade, onde os pequenos poros presentes no concreto produzem grandes forças capilares que controlam o ingresso dos líquidos. As características do líquido que influenciam na absorção capilar são a viscosidade, a densidade e a tensão superficial, como também a microestrutura dos poros do concreto. Segundo Hall (1989 apud NEPOMUCENO, 2005), a teoria que melhor se adequou ao fenômeno de fluxo de líquidos pelos materiais de construção devido às forças capilares desenvolvidas na sua estrutura porosa, é a teoria do fluxo em solos não saturados, expressa pela lei de Darcy ampliada, a qual é mostrada na Equação 2.17.

$$q = -K(\theta) \frac{d\Psi}{dx} \quad (\text{Equação 2.17})$$

onde q é o fluxo de velocidade, K é condutividade hidráulica, ψ é o potencial capilar e ambos os três dependem do teor de água e x é a posição no material onde se mede esse fluxo.

A Equação 2.17 pode ser escrita também como a Equação 2.18:

$$q = -D(\theta) \frac{d\theta}{dx} \quad (\text{Equação 2.18})$$

onde:

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{d\Psi}{d\theta} \quad (\text{Equação 2.19})$$

Na equação 2.19, $k(\theta)$ é a difusividade hidráulica. Essas expressões são matematicamente similares à equação de difusão, embora se trate de fenômenos distintos.

No caso da contaminação de cloretos por absorção, eles necessitam estar presentes em um líquido que penetrará no concreto pelo efeito de sucção dos poros capilares secos ou com menor umidade que a região externa (KROPP et al, 1995).

2.2.3 Permeabilidade

A permeabilidade é um mecanismo de transporte de líquidos ou gases que ocorre devido a uma diferença de pressão (OLLIVIER, 1998). Tendo em conta essas características, a penetração de cloretos por permeabilidade costuma ser importante apenas em casos específicos, como é o caso de estruturas marinhas submetidas a elevadas pressões hidrostáticas (KRÖPP, 1995). Outro exemplo importante para aplicação deste mecanismo é o caso de obras hidráulicas, principalmente em obras de barragens sujeitas a grandes pressões (NEPOMUCENO, 2005). Segundo Nepomuceno (2005), a permeabilidade de um fluido pode ser descrita através da lei de Darcy, a partir da Equação 2.20:

$$V_f = \frac{K_h AH}{L} \quad \text{ou} \quad K_h = \frac{V_f L}{AH} \quad (\text{Equação 2.20})$$

onde k_h é o coeficiente de permeabilidade (cm/s), V_f é a vazão de entrada na fase linear (cm³/h), L é altura do corpo de prova (cm), A é área da seção transversal do corpo-de-prova (cm²), H é pressão manométrica de ensaio (cm.c.a).

2.2.4 Migração iônica

A migração iônica ocorre devido a existência de um campo elétrico. Neste caso, os íons no eletrólito tendem a se deslocar para a região de polaridade contrária (ARAÚJO, 2004).

No caso de estruturas reais de concreto, esse fenômeno pode ocorrer em estruturas suporte de veículos que utilizam corrente elétrica para sua movimentação, como também em estruturas de concreto com proteção catódica por corrente impressa. A maior aplicação desse princípio, ocorre em ensaios destinados a acelerar a penetração dos íons cloreto no concreto, nos quais se aplica uma diferença de potencial para forçar a sua movimentação.

2.3 DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS POR ÍONS CLORETO

A literatura sobre durabilidade das estruturas de concreto freqüentemente aponta a corrosão da armadura devido à ação dos íons cloretos como um dos mais sérios problemas das estruturas de concreto (HELENE, 1986; TREADAWAY ET AL., 1989; FUGIWARA; MINOSAKU, 1990; FIGUEIREDO et al., 1993; TINOCO, 2001; ANDRADE, 1992; RIBEIRO, 2001), sendo estes íons os principais agentes despassivadores das armaduras e os que provocam os mais severos danos em estruturas de concreto armado.

De acordo com Figueiredo (1994 e 2005), os íons cloreto chegam até o concreto por distintas formas:

- uso de aceleradores de pega que contêm CaCl_2 ;
- na forma de impureza indesejada dos agregados (areia e brita) e da água de amassamento;
- atmosfera marinha (maresia);
- água do mar (estruturas "off shore");
- uso de sais de degelo; e
- processos industriais (etapa de branqueamento de indústrias de celulose e papel, por exemplo).

Os íons cloreto podem ser encontrados no interior do concreto nas seguintes formas:

- quimicamente combinados na forma de cloroaluminatos (sal de Friedel);
- fisicamente adsorvidos na superfície dos poros capilares; e
- livres na solução aquosa dos poros do concreto.

Os cloretos livres aumentam a condutividade elétrica da água dos poros, aumentando a taxa de dissolução do aço, formando, assim, produtos de corrosão. Os íons mais agressivos serão aqueles que penetrem nas estruturas de concreto do meio externo.

Em concretos contaminados por íons cloreto, os complexos cloroaluminatos mantêm a estabilidade somente em pH elevado. Caso o pH diminua, o sal de friedel fica instável e é convertido em carbonato de cálcio, alumínio hidratado e cloreto de cálcio, liberando cloretos para a solução dos poros do concreto. A redução do pH juntamente com o

conseqüente aumento da concentração de cloretos livres, aumentaria, então, a susceptibilidade à corrosão da armadura de aço (BRE DIGEST 263, 1982).

Para os íons cloretos despассивarem à armadura das estruturas de concreto eles necessitam penetrar nos poros do concreto, juntamente com a água e o oxigênio. Ao encontrarem a capa passivadora da armadura, eles provocam acidificações localizadas que conduzem a desestabilizações pontuais da película de óxidos passivos. Essa acidificação localizada, causada pelos íons cloreto, é a que caracteriza esse tipo de corrosão, a qual denomina-se de corrosão por pite, diferindo do que ocorre devido a carbonatação, que leva a uma corrosão uniforme. A Figura 2.5 mostra um esquema dessas diferentes formas de processo de corrosão.

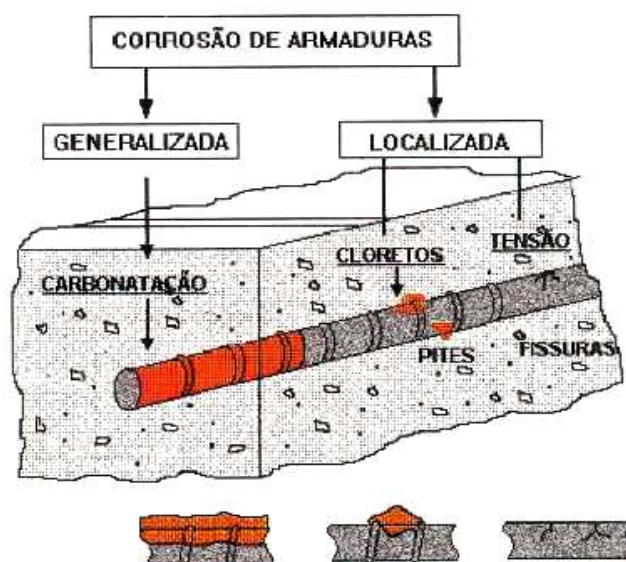


Figura 2.5 – Tipos de corrosão das armaduras e fatores que os provocam (ANDRADE, 1992).

Os pites são crateras que constituem o ânodo da pilha de corrosão, possuindo também um pH muito baixo (entorno de 3). No ânodo é onde ocorre a dissolução do aço, ficando rodeado de uma zona catódica passiva, de elevado pH (entorno de 13,5), onde ocorre a redução do oxigênio. A corrosão por pite progride em profundidade, podendo chegar a causar a ruptura pontual das barras. A Figura 2.6 mostra um caso de corrosão causada por íons cloreto na Ponte de Igapó em Natal – RN. A Figura 2.7 mostra a estrutura de uma ponte com armaduras corroídas por carbonatação e íons cloreto.



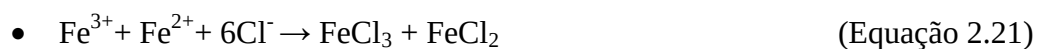
Figura 2.6 – Corrosão iniciada por íons cloreto em pilar da Ponte de Igapó em Natal – RN.



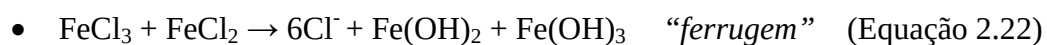
Figura 2.7 – Armaduras de ponte em avançado processo de corrosão iniciada por carbonatação e íons cloreto.

De acordo com Helene (1993), ainda não existe um consenso no meio científico sobre o mecanismo de como os cloretos despassivam o aço. Ainda, de acordo com este autor, a presença de cloretos promove uma despassivação prematura do aço, mesmo em ambientes de elevada alcalinidade. Segundo o ACI 222 (1991) citado por Helene (1993), há três teorias atuais para explicar o efeito dos cloretos na corrosão do aço:

1. Teoria do filme de óxido – segundo esta teoria os íons cloreto penetram nos defeitos do filme de óxido passivante muito mais facilmente que outros íons agressivos, além de poderem dispersar coloidalmente esse filme, permitindo o ataque do aço.
2. Teoria da adsorção – nesta e que os íons cloreto são adsorvidos na superfície do aço com hidroxila teoria admite-se e o oxigênio dissolvido, promovendo a hidratação do ferro e viabilizando sua dissolução em cátions.
3. Teoria do complexo transitório – nesta teoria os íons cloreto competem com os ânions hidroxila para a produção de compostos ferrosos de corrosão, denominados complexos transitórios, os quais difundem a partir do ânodo em direção ao cátodo permitindo que a corrosão continue. Evidências desta teoria podem ser verificadas ao romper um concreto com armadura em processo de corrosão. Produtos de corrosão de cor esverdeada, óxido complexo contendo akaganeíta e geotita, característico da corrosão por cloretos, podem ser observados. Esses complexos, também encontrados em cores escuras, em contato com oxigênio do ar, passam a ter coloração marrom-avermelhada, estável e característica da ferrugem. A Figura 2.8 apresenta um pilar com manchas características de produtos de corrosão, marrom-avermelhadas ou alaranjadas. Uma visão simplificada deste fenômeno complexo pode ser representada pelas reações das equações 2.21 e 2.22 (HELENE, 1993):



Que pelo processo de hidrólise transforma-se em:



As reações continuam sem o consumo de íons cloreto, mantendo os íons cloreto sempre presentes. Pequenas quantidades de cloretos podem, portanto, ser responsáveis por

corrosões intensas (HELENE, 1986 e 1993). Sempre que esta corrosão não for interrompida, mais ânions cloreto migram para regiões anódicas intensificando o processo de corrosão das armaduras (HELENE, 1993).



Figura 2.8 – Pilar em ponte com manchas marrom-avermelhadas ou alaranjadas, indicando à presença de corrosão das armaduras.

2.3.1 – Limite crítico de cloretos

O meio científico ainda não chegou a um consenso sobre o limite de cloretos através do qual a corrosão se inicia, devido a variáveis que envolvem a produção de concreto e ao meio em que está localizada a estrutura.

Como já foi mencionado anteriormente, os íons cloreto podem ser encontrados de duas formas no concreto, como cloretos livres, ou seja na forma de íons na água dos poros, ou como cloretos combinados, constituindo parte das fases hidratadas do cimento. Os cloretos livres são os perigosos à armadura e os cloretos combinados não são perigosos à armadura, pois já se encontram combinados com o C_3A ou C_4AF do cimento, formando os cloroaluminatos ou sal de Friedel. A soma dos livres e combinados é denominada de cloretos totais.

Ainda, de acordo com Helene (1993), para a avaliação da presença de cloretos no concreto podem ser seguidos métodos de ensaios descritos nas normas “UNE 80240” e “ASTM 1411 (1992)”, para cloretos livres ou solúveis em água, ou “ASTM C 1152 (1992)”, para cloretos totais. Importante ressaltar que, os íons cloreto totais significam todos os íons cloretos presentes no concreto e que podem ser determinados quando solúveis em ácido. Os íons cloretos livres podem ser determinados quando solúveis em água. No entanto essa determinação é muito sensível no procedimento do teste. Mesmo sendo os cloretos livres os únicos que podem provocar a despassivação das armaduras, é importante e necessário determinar os cloretos totais, pois parte dos combinados podem vir a ficar disponíveis ou livres para reações deletérias devido a fenômenos tais como a carbonatação e a elevação de temperatura (HELENE, 1993; ANDRADE, 1992).

Uma certa quantidade de íons cloreto pode ser tolerada sem risco de corrosão, uma vez que, após reagirem com os aluminatos, provenientes do clínquer, esses íons não estarão livres para atacar o filme passivante (HANSSON et. al., 1985). No entanto, existe um valor limite de concentração, no qual os íons cloreto podem romper a camada de óxidos passivantes e iniciar o processo de corrosão da armadura. Esse limite não está associado a um valor fixo (Figura 2.9), embora algumas normas ou recomendações de alguns países apresentam valores orientativos.

Como limite geral considera-se que 0,4% de cloretos totais em relação à massa do cimento ou 0,05% a 0,1% em relação à massa do concreto, são valores suficientes de cloretos para despassivar a armadura (ANDRADE, 1992). É importante ressaltar que Helene (1993) encontrou armaduras em processo de corrosão com teores inferiores a esses, assim como armaduras não corroídas com teores acima desses limites. Isto confirma que não existe um valor fixo de teor de cloretos, uma vez, que este teor depende de uma série de fatores como umidade do ambiente, qualidade do concreto, entre outros conforme mostra a Figura 2.9.

O BRE (1980) considera que um baixo risco de corrosão está associado a uma quantidade de cloretos por massa de cimento inferior a 0,4 %, um risco intermediário a quantidades de cloreto entre 0,4 % e 1,0 % e um alto risco a quantidades superiores a 1%. O ACI-COMMITTEE 222 (1985) permite um conteúdo máximo de cloretos, em relação à massa do cimento, de 0,15 % e a BSI-BS 8110 (1985) estabelece 0,4 % como o limite máximo para as estruturas correntes de concreto armado e 0,1% para estruturas de concreto protendido.

Meira (2004), em seu estudo sobre o limite crítico de cloretos, afirma que, o limite clássico de 0,4% (cloretos totais) em relação à massa de cimento é um valor conservador para

os materiais e ambientes estudados, sendo melhor estabelecer um limite em torno de 0,8% (cloretos totais), valor obtido em sua pesquisa de doutorado.

Alguns pesquisadores tem trabalhado no sentido de encontrar uma relação limite de $[Cl^-]/[OH^-]$ onde o processo de corrosão inicia. Hausmann (1967) trabalhando em solução alcalina sugeriu o valor de 0,6 para esta relação. Goni e Andrade (1990), também trabalhando em soluções alcalinas obtiveram valores críticos de $[Cl^-]/[OH^-]$ similares, de 0,3 e 0,8, dependendo do método de cálculo empregado para determinar os íons $[OH^-]$. Lambert et al. (1991) trabalhando com corpos-de-prova de concreto e uma fonte externa de cloretos, verificaram que a partir de uma relação entre $[Cl^-]/[OH^-]$ igual a 3 ocorria a despassivação da armadura. Mangat e Molloy (1992) trabalhando também em corpos-de-prova de concreto, encontraram velocidades de corrosão insignificantes com relação $[Cl^-]/[OH^-]$ igual a 11. Diante da grande variabilidade de resultados, com reflexos das particularidades de cada estudo, a tendência é que fossem adotados valores conservadores. Glass e Buenfeld (1997) sugerem o limite de 0,4% de cloretos livres em relação à massa de cimento para estruturas expostas ao clima europeu e 0,2% de cloretos livres em relação à massa de cimento para estruturas expostas a ambientes mais agressivos. Existem ainda, outros limites adotados por outros pesquisadores, como o limite $[Cl^-]/[OH^-] = 0,3$, adotado por Hussain et al (1995) e o limite de 0,4% de cloretos livres em relação a massa de cimento adotado por Cyted (1998). A Tabela 2.1 mostra limites críticos de cloretos estabelecidos por algumas normas.

Tabela 2.1 – Teor limite de cloreto para diversas normas (FIGUEIREDO, 2005).

NORMA	PAÍS	ANO	TEOR DE CLORETOS RECOMENDADO
ABNT-NBR 6118*	Brasil	2003	Não se reporta ao teor de cloretos.
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos.
			$\leq 0,3\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal.
			$\leq 1\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente seco.
			$\leq 0,06\%$ em relação à massa de cimento (concreto protendido).
CEB	Europa	1991	0,40% em relação à massa de cimento.
ENV 206	Portugal	1991	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE-SP2	Japão	1986	$\leq 0,60$ Kg/m ³ de concreto.

*A ABNT-NBR 6118:2003 não se reporta ao teor de cloretos, mas enfatiza que não é permitido utilizar aditivos contendo cloretos em sua composição, tanto em estruturas de concreto armado, quanto em protendidas.

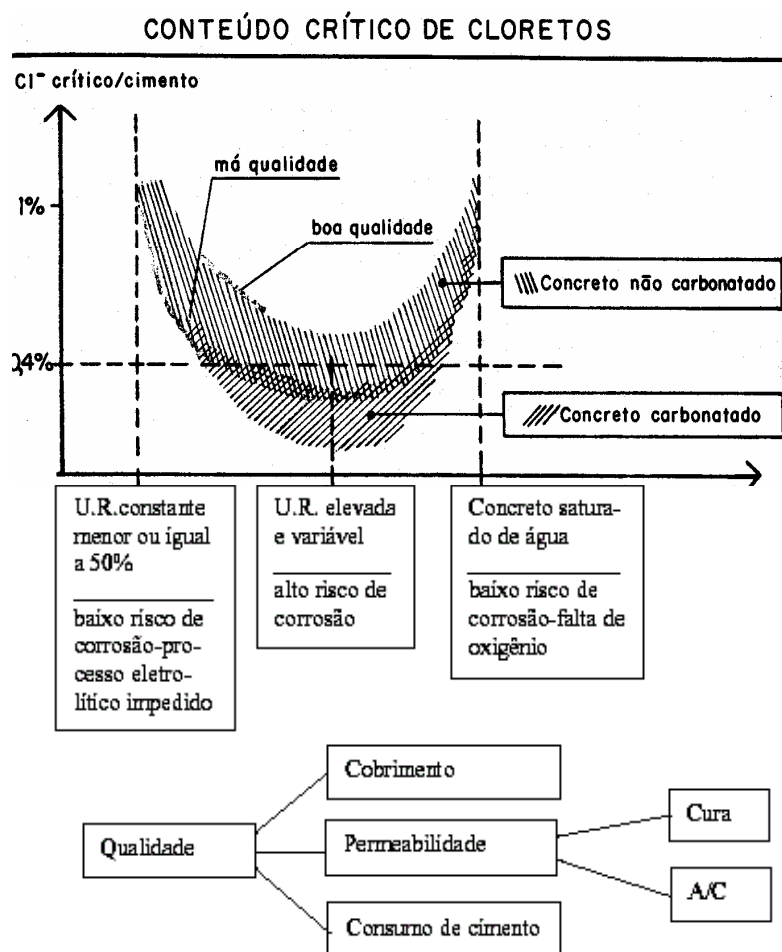


Figura 2.9 - Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e umidade do ambiente (CEB-FIB, Bulletin 183, 1992).

O mecanismo de penetração dos íons cloreto através do concreto, para que uma certa quantidade chegue até a armadura, na forma de cloretos livres, e consiga desencadear o processo de corrosão, está relacionada a uma série de fatores relacionados, por exemplo, com o tipo de cátion associado aos cloretos, tipo de acesso ao concreto (antes ou depois de endurecido), presença de outro ânion como o sulfato, tipo de cimento empregado na produção do concreto, relação água/cimento, estado de carbonatação do concreto, condições de produção e cura do concreto, umidade ambiental (condições de saturação dos poros) e quantidade de cimento por metro cúbico de concreto (FIGUEIREDO, 1994 e 2005).

2.4 FATORES INFLUENTES NA CORROSÃO POR ÍONS CLORETO

2.4.1 - Composição, tipo e quantidade do cimento

A quantidade de C_3A do cimento determina a capacidade de combinação com os íons cloreto (BAKKER, 1988). Segundo Page et al. (1986) comentam que a quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) tem grande influência na iniciação da corrosão por cloretos, visto que este componente do cimento é responsável por imobilizar os íons cloreto, através da formação de um sal complexo insolúvel, o cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel), que reduz a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto.

Schiessl (1987) afirma que, concretos com cimento Portland com pouco C_3A são, particularmente, desfavoráveis no que tange à difusão dos íons cloreto, devido à baixa capacidade de fixação de cloretos se comparados a concretos feitos com cimento Portland comum ou cimentos com adições.

Rasheeduzzafar et al. (1990), trabalhando com cimentos com diferentes teores de C_3A , verificaram que aqueles com teores mais elevados de C_3A podem ter um desempenho muito superior àqueles cimentos com baixos teores de C_3A , conforme mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Quantidade de cloretos livres em relação a diversos teores de C_3A (RASHEEDUZZAFAR et al.,1990).

Teor de C_3A	% de cloretos livres	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2%	86%	Referência
9%	58%	1,75 vezes
11%	51%	1,93 vezes
14%	33%	2,45 vezes

Nos experimentos realizados por Zhang e Gjorv (1991), a introdução de sílica ativa em argamassas de cimento reduziu a difusividade dos íons cloreto. Os autores associaram este desempenho à diminuição da porosidade total e a distribuição dos poros da

argamassa com sílica ativa. Page et al. (1986) encontraram que a adição de escória e cinza volante levava a uma diminuição da difusibilidade dos cloretos em relação ao cimento portland puro e que um cimento resistente a sulfatos (com baixo conteúdo de C_3A) apresentava um significativo aumento de difusão.

Diversos ensaios revelam que os cimentos com adições, quando submetidos aos cloretos, apresentam comportamento contrário aquele apresentado quando submetidos a carbonatação. Enquanto na carbonatação as adições parecem influir de forma negativa na capacidade de retardar o ingresso de CO_2 , na resistência à penetração dos cloretos as adições agem de forma a frear a penetração desses íons.

Segundo Bauer e Helene (1996), a escória possui um teor de aluminatos superior em relação ao clínquer, sendo que, deste modo, concretos que empregam o cimento com escória apresentam capacidade de fixação de cloretos potencialmente superior em relação ao cimento sem adição de escória.

Page et al. (1981), estudando o comportamento da difusão de cloretos em pastas de cimento elaboradas com cimento portland comum, cimento resistente a sulfatos (baixo teor de C_3A), cimento com adição de 65% de escória de alto forno e cimento com 30% de adição de cinza volanteram que a presença de adições reduz, em muito, a difusão de cloretos, o que pode ser explicado pela variação na estrutura porosa. No que se refere ao comportamento do cimento resistente a sulfatos, embora não evidenciado pelos autores, o seu baixo teor de C_3A explica o incremento no coeficiente de difusão, conforme exposto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Coeficiente de difusão de cloretos, a 25°C, em pastas de cimento com a/c igual a 0,5 (PAGE et al, 1981).

Tipo de Cimento	Coeficiente de difusão x 10^{-9} (cm²/s)
Cimento Portland	44,7
Cimento com 30% de cinza volante	14,7
Cimento com 65% de escória	4,1
Cimento resistente a sulfatos	100,0

Mangat e Molloy (1992), estudando os fatores que influenciam a corrosão da armadura devido à ação dos cloretos, concluíram que a quantidade de cimento possui uma insignificante influência sobre a despassivação.

2.4.2. Relação água/cimento, adensamento e cura

Esses parâmetros, quando bem utilizados, contribuem de uma forma ou de outra para a obtenção de um concreto mais denso (FIGUEIREDO, 2005).

Pode-se afirmar que os concretos mais bem compactados têm o coeficiente de difusão de cloreto inferior a aqueles não compactados ou mal compactados.

A relação água/cimento está intimamente ligada à quantidade e ao tamanho dos poros do concreto endurecido e às propriedades mecânicas finais, interferindo desta forma, diretamente na permeabilidade do concreto.

Segundo estudos realizados por Castro, Rincon e Pazini (2001), com corpos-de-prova cilíndricos expostos ao meio ambiente marinho em Yucatán, no México, em Maracaibo na Venezuela, e em Recife, no Brasil, o mecanismo de penetração de íons cloreto não variou com o microclima. Contudo, a concentração de íons cloreto no cobrimento do concreto, onde estariam as armaduras, decresceu em relação à distância do mar e ao aumento da relação água/cimento.

Gjorv e Vennesland (1979) estudando a difusão dos íons cloreto em concretos de diferentes relações água/cimento e diferentes tipos de cimento, verificaram que para curtos períodos de exposição o efeito da relação água/cimento foi limitado à camada superficial do concreto. Em longos períodos de exposição, o tipo de cimento apresentou uma maior influência sobre a profundidade de penetração dos cloretos que a relação água/cimento. A Figura 2.10 apresenta resultados da profundidade de penetração de cloretos em relação a diferentes relações água/cimento. Mangat e Molloy (1992) afirmam que, o consumo de cimento por m^3 de concreto, variando entre 330 a 530 Kg/m^3 , apresentou pouca influência sobre o ataque de íons cloreto sobre o concreto e observou que a relação água/cimento era um fator mais importante contra a penetração de íons cloreto e que valores de relação água/cimento menores que 0,45 são suficientes para proteger a armadura.

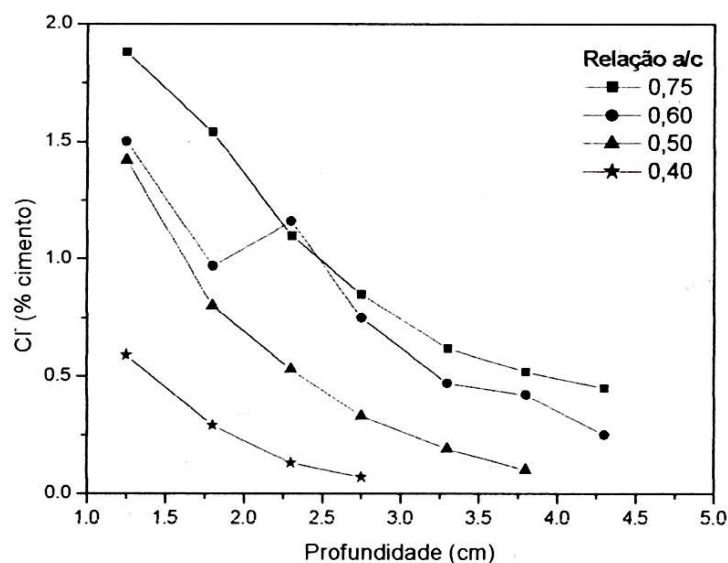


Figura 2.10 – Efeito da relação a/c na penetração de cloretos (JAERGEMANN, 1990).

Segundo Page et al. (1981), as condições de cura possuem um marcado efeito sobre as propriedades de transporte de pastas de cimento endurecidas e, por conseguinte, sobre a difusibilidade efetiva dos íons cloreto. Segundo esses pesquisadores, as condições de cura modificam a estrutura dos poros da pasta e, por conseguinte, alteram a porosidade final. Devido a isso, um concreto com um período de cura mais curto apresenta mais cloretos que um concreto com uma cura mais prolongada. No entanto, essa diferença é menos expressiva à medida que se passa para camadas mais internas, já que a difusividade interna é menos afetada pelas propriedades da pele (JAERGERMAN, 1990). A Figura 2.11 mostra o efeito da cura e da relação água/cimento na profundidade limite do concreto.

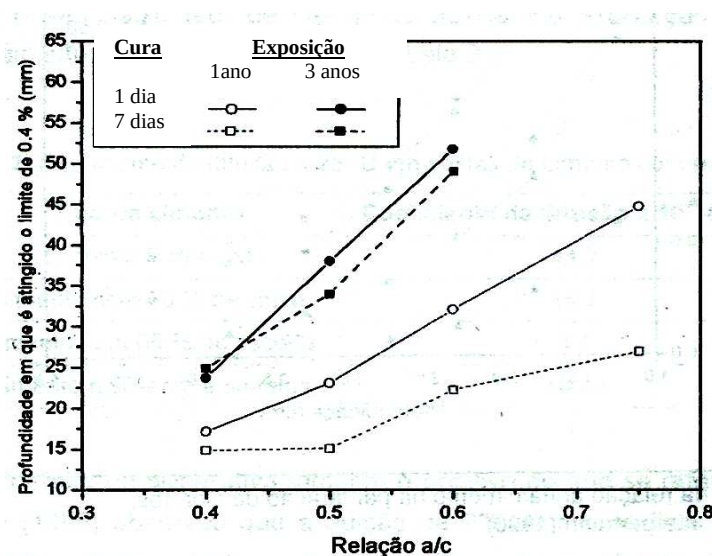


Figura 2.11 - Efeito da cura e da relação água/cimento na profundidade de alcance dos cloretos (JAERGEMANN, 1990).

2.4.3 Grau de saturação dos poros e concentração de íons cloreto

As condições ambientais influenciam a penetração dos íons cloreto de forma diferente da forma como influencia a penetração do CO_2 . O CO_2 encontra nos poros parcialmente preenchidos pela água a melhor condição para difundir e carbonatar as partes mais internas do concreto. Por outro lado, como comentado no Item 2.2, o transporte dos íons cloreto somente ocorre em presença de água. Nas situações onde a água que contém os cloretos encontra-se estagnada, a penetração ao interior do concreto ocorre através de mecanismo de difusão. Os íons cloreto também podem penetrar por sucção capilar da água que os contém. Essa última situação ocorre quando a estrutura de concreto está submetida a ciclos de umedecimento, com água que contém os íons cloreto, e posterior secagem (FIGUEIREDO, 2005). As estruturas submetidas à maré são exemplos desse tipo de situação. Nesses casos a profundidade que os íons cloreto podem atingir dependerá da duração dos períodos de secagem e umedecimento e da permeabilidade da superfície do concreto (BAKKER, 1988). Nas regiões da estrutura de concreto exposta à maré, a concentração de cloretos atinge níveis elevados devido à ascensão capilar da água do mar e sua posterior evaporação (HOLMES e BRUNDLE, 1987).

Com o aumento da quantidade de cloretos nos poros do concreto, a possibilidade de secagem do concreto é diminuída devido ao efeito higroscópico característico dos sais (FIGUEIREDO, 2005).

Lopez e González (1993) associando a saturação dos poros de corpos-de-prova de argamassa com a resistividade e velocidade de corrosão, chegaram a um valor de saturação crítico, correspondente a uma resistividade de $10^5 \Omega\text{m}$, na qual a velocidade de corrosão começou a tornar-se inaceitável e oferecer problemas relevantes de durabilidade.

Em estudos sobre a difusividade em meios não saturados, Almenar (2000), Nielsen e Geiker (2003) demonstraram a acentuada queda no coeficiente de difusão com a redução do grau de saturação. No primeiro caso, as medidas demonstraram uma redução no coeficiente de difusão de $9.92 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, em concretos com grau de saturação ao redor de 70%, para $0.21 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, em concretos com grau de saturação de 33%. No segundo caso, o coeficiente de difusão decresceu de $12.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para $2.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, variando-se as condições ambientais de saturado para 66% de grau de saturação, como apresentado na Figura 2.12.

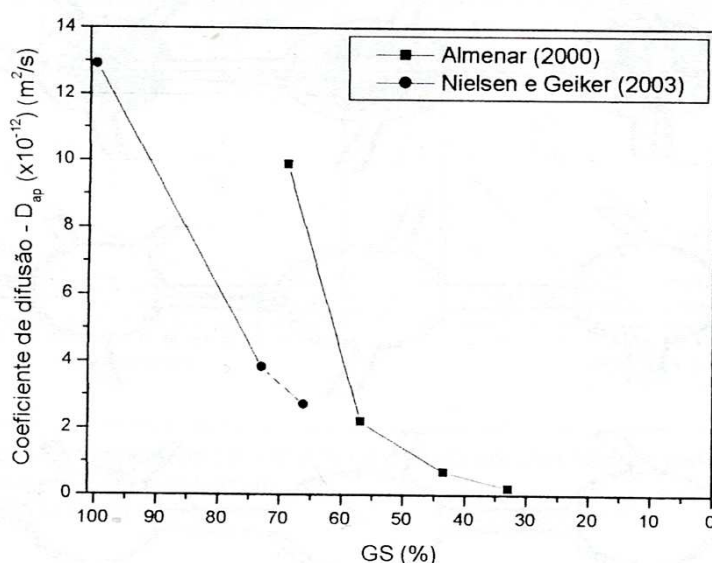


Figura 2.12 – Comportamento do coeficiente de difusão com a variação do grau de saturação (ALMENAR, 2000; NIELSEN e GEIKER, 2003).

Se os poros estão saturados de umidade, mesmo com a resistividade a menor possível, o processo de corrosão estará controlado pelo acesso de oxigênio, já que esse terá primeiramente que se dissolver na água para poder atingir a armadura. Esse é o caso de estruturas de concreto armado situadas a certa profundidade do mar. Segundo Helene (1993), a profundidade que não ocorreria corrosão na estrutura por falta de oxigênio, será quando o concreto estiver submerso sob uma pressão hidrostática superior a cerca de 0,015MPa ($\approx 1,5$ metro de coluna de água), ou seja, suficiente para superar a pressão parcial do oxigênio na atmosfera e impedir a difusão do oxigênio na solução intersticial do concreto. Nessas condições, o autor afirma que a corrosão só será possível quando a corrente de corrosão for suficiente para promover a eletrólise da água, gerando desta forma, volumes extras de oxigênio.

No caso dos poros capilares estarem secos ou conterem pouquíssima umidade, a resistividade será muito elevada e o processo de corrosão não ocorrerá ou será bastante dificultado. Nesse caso, a velocidade de corrosão será baixa, ainda que o concreto esteja contaminado de íons cloreto (ANDRADE, 1992).

Andrade (1992) afirma que as velocidades de corrosão máximas se dão em concretos com elevados teores de umidade, porém sem poros saturados. Desta forma, o oxigênio chega facilmente à armadura e a resistividade se encontrará baixa, permitindo elevadas velocidades de corrosão.

2.4.4 Efeito específico do cátion que acompanha o íon cloreto

O tipo de cátion envolvido no processo de difusão é também um fator que influi na taxa de penetração de cloretos, uma vez que a referida taxa depende da quantidade de cloretos que são fixados e este processo, por sua vez, depende do tipo do sal que contem os cloretos (KRÖPP, et al., 1995).

Andrade e Page (1986) estudaram o efeito de uma mesma quantidade de cloretos provenientes do NaCl e CaCl₂, sobre a corrosão da armadura, chegando a conclusão de que os corpos-de-prova que continham CaCl₂ foram mais afetados pela corrosão, apesar de conterem menor quantidade de cloretos livres e menor relação $[Cl^-]/[OH^-]$. Esta maior agressividade do CaCl₂, pode ser atribuída à diminuição do pH resultante nesta situação (GOÑI et al., 1989). Apesar disso, Goñi e Andrade (1990) reafirmam que a relação $[Cl^-]/[OH^-]$ é o fator mais relevante para a despassivação da armadura do concreto.

Byfors (1990 apud MEIRA, 2004), analisando o efeito do tipo de cátion na capacidade de fixação de cloretos, observou que ocorre um incremento na quantidade de cloretos combinados na presença de KCl, CaCl₂, MgCl₂, respectivamente, em comparação com a presença de NaCl.

Este comportamento se deve a influência do tipo de cátion em formar hidróxidos relativamente menos solúveis (Ca(OH)₂, Mg(OH)₂), reduzindo a concentração de OH⁻ na solução dos poros (TRITTHART, 1989). Desta forma, o tipo de cátion influencia na concentração de OH⁻, que, por sua vez, influencia na fixação de cloretos, já que esses atuam, inclusive, como concorrentes dos íons OH⁻ para serem adsorvidos (TRITTHART, 1989).

2.4.5 Fissuras

Quando uma estrutura de concreto está exposta à água, vapor ou solo que contém íons cloreto, a quantidade necessária de cloretos para que inicie o processo de corrosão, será primeiramente atingido nas regiões fissuradas. Essa situação causaria a formação de pequenas regiões anódicas no interior das fissuras e regiões catódicas maiores fora delas. A velocidade com que os íons cloreto penetram depende da abertura da fissura e da qualidade do concreto.

O Quadro 2.2 mostra a relação entre a agressividade do ambiente, incluindo os ambientes marinhos ricos em cloretos, e a abertura máxima de fissuras (NBR 6118 – ABNT, 2003).

Quadro 2.2 – Relação entre abertura máxima de fissura e agressividade ambiental.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de proteção	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	--
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação freqüente
	CAA II a CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	Combinação freqüente
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré tração com CAA I ou Pós tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação freqüente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré tração com CAA II ou Pós tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação freqüente
		ELS-D*	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D*	Combinação freqüente

Para as classes de agressividade ambiental CAA- III e IV exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de sua ancoragens.*

ELS-W é o estado limite de abertura das fissuras;

ELS-F é o estado limite de formação de fissuras;

ELS-D é o estado limite de descompressão;

ELS-DP é o estado limite de descompressão parcial;

WK é a abertura máxima característica da fissura.

2.4.6 Carbonatação

Um concreto carbonatado não possui a mesma capacidade de combinar cloretos que um concreto não-carbonatado (FIGUEIREDO, 2005).

* A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p=25$ mm. a_p é referente a distância entre a área tracionada e a bainha de proteção. Figura 3.1 – Estado limite de descompressão parcial, Item 3.2.6 (ABNT/NBR 6118:2003).

Imaginando um concreto que possui uma certa quantidade de cloretos combinados e outra livre, embora inferior à necessária para despassivar a armadura, quando esse concreto começa a carbonatar, partes dos cloretos combinados passam a condição de livres. Desta forma, a quantidade de íons livres pode atingir o limite crítico de rompimento da camada passiva da armadura com uma quantidade de cloretos totais mais baixa (TUUTTI, 1982).

Tuutti (1982), Alonso e Andrade (1988) afirmam que o concreto carbonatado não é capaz de fixar os íons cloreto como o concreto não carbonatado. Byfors (1990 apud MEIRA, 2004) esclarece ainda mais este fato dizendo que, provavelmente, isso ocorre em função da formação do composto carbo-aluminato de cálcio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$) nos concretos carbonatados, competindo com a formação dos cloroaluminatos e, conseqüentemente, facilitando o ingresso de cloretos.

Segundo Bakker (1988), essa combinação entre carbonatação e cloretos é normalmente a causa dos problemas mais severos de corrosão.

Os dados obtidos por Roper; Baweja (1989) sugerem que, para estruturas de concreto armado correntes, os efeitos da interação entre a carbonatação e os íons cloreto levam a uma aceleração da velocidade de corrosão quando comparada com a ocorrência dos dois ataques de forma independente.

2.4.7 Temperatura

O aumento da temperatura estimula a mobilidade das moléculas, favorecendo o seu transporte através da microestrutura do concreto. Por outro lado, quando a temperatura diminui, pode ocorrer condensação do concreto, ocasionando um aumento da umidade do material (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Helene (1993), um aumento de 15°C para 30°C praticamente duplica o coeficiente de difusão de cloretos.

Al-Khaja (1997) observou um aumento significativo da penetração de cloretos em corpos-de-prova de concreto, quando a temperatura de exposição subiu de 20°C para 45°C, principalmente em concretos convencionais, quando comparados com concretos de elevada resistência (Figura 2.13). Assim, a temperatura pode ser considerada um importante fator que afeta a penetração por cloretos.

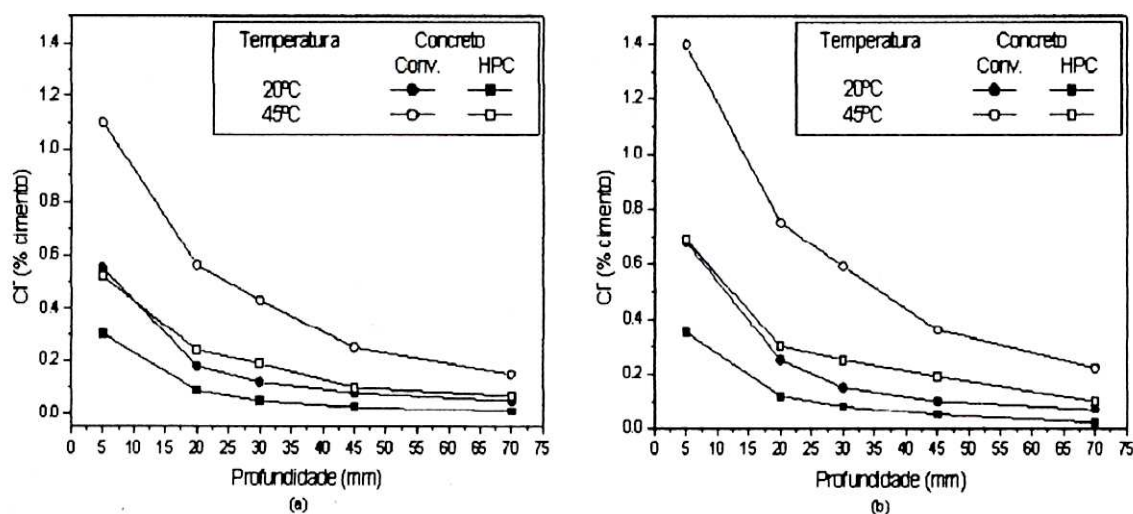


Figura 2.13 – Efeito da temperatura no ingresso de cloretos em concretos de cimento portland comum (a) e resistente a sulfatos (b)(AL-KHAJA 1997).

2.4.8 Ambiente

Seria de extrema importância, por parte dos engenheiros, o conhecimento da região ou tipo de ambiente de uma forma geral, no qual será construído ou aplicado um plano de recuperação de uma estrutura. De acordo com Lima (2005), este conhecimento permitiria que se apresentassem modelos de degradação e de previsão da vida útil mais adequados às condições climáticas onde as estruturas realmente estão inseridas.

No caso de um ambiente urbano e ao mesmo tempo litorâneo, como é o caso da maioria das principais cidades do Brasil, as estruturas se encontram em um ambiente altamente agressivo, quando considerado a principal manifestação patológica ocorrida em estruturas de concreto armado, a corrosão das armaduras. Em ambientes urbanos, o dióxido de carbono, CO_2 , é o grande causador do processo de carbonatação do concreto e conseqüente, da corrosão das armaduras. Um ambiente muito comum de ocorrer a carbonatação são as garagens subterrâneas de edifícios, devido a grande concentração de CO_2 normalmente encontrado nesses ambientes.

Em ambientes marinhos são encontrados diversos agentes agressivos às estruturas de concreto armado, um dos principais e causadores de enormes danos são os íons cloreto, responsáveis pelo tipo de corrosão mais agravante e preocupante, do ponto de vista estrutural

e econômico, para o meio técnico. Outro agravante encontrado neste ambiente, no caso da corrosão, é a alta umidade relativa do ar. Como visto anteriormente, a umidade é um dos fatores fundamentais para a ocorrência do processo de corrosão das armaduras. No Brasil, geralmente as cidades litorâneas se encontram em climas tropicais de elevada temperatura, o que favorece ao processo de difusão dos íons cloreto para o interior do concreto, como já discutido no item 2.4.7.

A quantidade de íons cloreto presentes vão diminuindo em função da distância do mar. Meira (2004), que mediu concentrações de íons cloreto a diferentes distâncias da orla, concluiu que a partir de 700m da orla ocorre uma redução significativa no ataque provocado pelos íons cloreto. O Quadro 2.3 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 2.3 – Faixas de agressividade, com base na vida útil das estruturas (adaptado de MEIRA, 2004).

Faixas de agressividade		Distâncias aproximadas** (m)
Nível de agressividade	Vida útil máxima (*) (Anos)	
Elevada	Até 3 (cob=10mm) e 17 (cob=20mm)	Até 130
Moderada	Entre 24 (cob=10mm) e 50 (cob=20mm)	Entre 130 e 700
Mínima	Superior a 24 (cob=10mm) e 50 (cob=20mm)	Acima de 700

* Para diversos cobrimentos e materiais estudados.

** Nota: Cabe aqui ressaltar que as distâncias não podem ser extrapoladas para todo o litoral brasileiro, mas servem como referência. Isso se deve aos distintos regimes de ventos, distribuição de umidades relativas e temperatura e obstáculos naturais, por exemplo.

Com a apresentação dos fatores que influenciam na degradação das estruturas, observa-se o quanto é importante um conhecimento prévio do ambiente o qual está inserida a estrutura. Sendo através de uma análise para conhecimento das características do ambiente, que se terá como diminuir o risco do surgimento de futuras incidências patológicas nas edificações. Sendo importante o conhecimento destas características a partir da etapa de projetos, indiscutivelmente.

3 REPAROS LOCALIZADOS EM ESTRUTURAS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO DAS ARMADURAS

Várias são as técnicas existentes para reabilitação de estruturas de concreto armado com problemas de corrosão, podendo-se citar a proteção catódica, a realcalinização, a remoção eletroquímica de cloretos etc. No entanto, o reparo localizado é a mais empregada, devido ao aspecto econômico e facilidade tecnológica. De acordo com Tinoco (2001), este tipo de reparo consiste em se recompor ou reparar uma determinada estrutura apenas em pontos ou regiões que apresentam problemas, não necessitando fazer intervenções em toda a estrutura, e sim em parte dela, objetivando proteger efetivamente a armadura na região reparada.

O reparo em uma estrutura de concreto armado objetiva a restauração da estética, restauração e aumento da proteção do aço contra os agentes agressivos e a garantia ou aumento da vida útil da estrutura de concreto.

Segundo Nepomuceno (1992), a metodologia completa para reparação de uma estrutura em processo de corrosão, consiste nas seguintes etapas:

- Determinação das causas da deterioração, do grau e extensão dos danos, estimativa de seu efeito no comportamento estrutural e a conseqüente vida residual da estrutura;
- Escolha do procedimento de intervenção em função do tempo disponível para atuar na disponibilidade das técnicas e materiais e dos aspectos econômicos;
- Projeto de reparação e escolha dos materiais adequados;
- Execução;
- Manutenção, por meio de um controle contínuo para conhecer a efetividade da mesma, incluindo ensaios não destrutivos e a necessidade de reparações parciais diante de possíveis falhas imprevistas.

O reparo localizado completo normalmente envolve a delimitação, corte e remoção do concreto deteriorado e contaminado, limpeza ou substituição das armaduras, a aplicação de um revestimento de proteção para a armadura, a aplicação de uma ponte de aderência entre o concreto velho e o novo material de reparo, a reconstituição da seção de concreto com o material de reparo e a proteção da superfície de concreto com um revestimento apropriado. A Figura 3.1 ilustra, esquematicamente, os materiais que fazem parte de um sistema completo de reparo localizado.

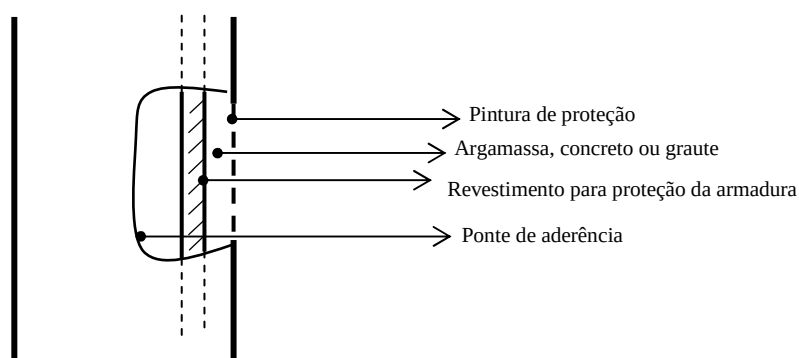


Figura 3.1 – Esquema de um sistema completo de reparo localizado (FIGUEIREDO, 1994).

A etapa de corte do concreto, de acordo com SOUZA & RIPPER (1998), é definida como uma remoção profunda de concreto degradado e tem como principal objetivo a eliminação de todo e qualquer processo nocivo à boa saúde das armaduras. Dessa maneira, o corte deverá garantir, além da remoção integral do concreto deteriorado e contaminado, a futura imersão das barras em meio alcalino. Esta atividade pode ser feita manualmente, através de ponteiros e marretas, ou mecanicamente, com a utilização de martelos rompedores pneumáticos.

A limpeza da armadura tem como objetivo remover todos os produtos de corrosão, agentes despassivadores e restos de materiais aderidos à sua superfície.

No caso de corrosão das armaduras provocada pelos cloretos, os produtos de corrosão que possuem grande quantidade destes íons, devem ser removidos completamente, evitando, assim, a formação de novas macropilhas ou micropilhas de corrosão (RILEM, 1994). Os cloretos presentes na superfície das armaduras corroídas são de difícil remoção, devido ao tipo de corrosão provocada por eles, à corrosão por pites.

Eles provocam acidificações nas superfícies das armaduras, gerando minúsculas crateras, os chamados “pites”, onde parte dos cloretos ficará armazenada, o que torna ainda mais difícil a remoção destes agentes agressivos. De acordo com a Rilem (1994), esta remoção pode ser feita com hidrojateamento de alta pressão ou com jato de areia, sendo mais eficaz a primeira técnica.

Nepomuceno (1992), Gentil (1996) citam que de uma forma genérica pode-se afirmar que intervenções em estruturas de concreto em processo de corrosão das armaduras, devem atuar eliminando ou reduzindo de forma considerável alguns dos princípios fundamentais para o processo de corrosão, os principais são:

- Deter o processo anódico, eliminando e posteriormente dificultando o contato dos agentes agressivos com a armadura;
- Impedir ou eliminar o processo catódico, dificultando o acesso de oxigênio até as armaduras;
- Eliminar ou impedir o processo eletrolítico, reduzindo a umidade interna do concreto.

Um grande risco que se corre ao se executar um reparo localizado é alterar as características elétricas das armaduras, produzindo a formação de novas áreas anódicas e catódicas, podendo formar novas células de corrosão, as chamadas macrocélulas ou macropilhas, podendo, desta forma, inverter o efeito do reparo, acentuando o processo de corrosão das armaduras. Segundo Schiessl e Raupach (1991), se somente as áreas visivelmente deterioradas são reparadas através da substituição do concreto deteriorado por um material de reparo, as armaduras próximas ao reparo, imersas no concreto contaminado, podem, em poucos meses, sofrer danos ainda maiores, após o reparo localizado for executado.

Castro et al. (2003) estudando vigas reparadas a mais de dez anos, comprovaram que o efeito da região reparada sobre as demais áreas não reparadas, e vice versa, é restrito apenas às primeiras idades, logo após a realização do reparo, e às áreas próximas do reparo, destacando-se a região de interface entre o material de reparo e o concreto original da estrutura. Portanto, a corrosão que porventura ocorrer após a execução do reparo será devido a presença de cloretos ou carbonatação remanescentes nas áreas não reparadas.

Andrade (1992) comenta que, as armaduras no local reparado podem atuar como cátodo frente às que estão nas regiões adjacentes, que não foram reparadas, e estas passarão a se deteriorarem mais rapidamente. Anteriormente se pensava que a ação destas macropilhas podia ser muito importante e inclusive atuar a metros de distância. Hoje, após os estudos de Castro et al (2003), sabe-se que isto não é possível, já que a corrosão se sustenta fundamentalmente pela ação das micropilhas. As macropilhas exercem sua função num raio muito mais limitado, sendo fundamental a existência de um eletrólito contínuo entre o ânodo e o cátodo.

Andrade et al. (1992) concluíram, ainda, que, em ambiente oxigenado, a corrosão do aço em concreto é mantido devido à atividade da micropilha. A conexão com maiores áreas passivas não aumenta significativamente a intensidade da corrosão das armaduras. No entanto, em ambientes sem oxigênio, a área anódica pode se comportar como ânodo puro e a intensificação do local do ataque pode ocorrer conectando-se mais áreas catódicas.

González et al. (1996) pesquisando em vigas de concreto, cujas metades foram contaminadas com 3% de íons cloreto por massa de cimento e as demais metades permaneceram sem contaminação, estudaram o efeito da área anódica e área catódica em macropilhas galvânicas, chegando a conclusão que a influência das macropilhas para a corrosão é relativamente pequena em comparação com a influência de micropilhas.

Castanheira (1997), através da intensidade de corrosão, utilizando-se da técnica de resistência de polarização (R_p), o qual foi o parâmetro que permitiu a melhor avaliação dos materiais e sistemas de reparo, indicou que a micropilha é a maior responsável pela deterioração das armaduras. A autora ainda verificou, pela corrente galvânica, que as armaduras da região de reparo atuaram como catódicas quando conectadas às armaduras da região contaminada, indicando que o reparo pode contribuir com o aumento da corrosão das armaduras considerada anódicas. Afirmou que, isso pode ocorrer quando não se consegue eliminar todo o cloreto da estrutura, estando algumas armaduras da região reparada ligadas às armaduras da região contaminada por meio de estribo, por exemplo.

3.1 IMPORTÂNCIA DA AVALIAÇÃO PRELIMINAR ANTES DO PROCEDIMENTO DE REPARO LOCALIZADO

No caso de estruturas com problemas de corrosão, a avaliação sistemática recomendada é a de uma inspeção preliminar e, conforme o caso, uma posterior inspeção detalhada.

A inspeção preliminar consistirá em uma análise visual para caracterizar todos os sintomas, como também, a realização de um pequeno número de ensaios que permitam avaliar o problema (ANDRADE, 1992, CASTRO; CASTILLO; CARPIO, 2001).

A inspeção detalhada, que nem sempre é necessária, tem a finalidade de quantificar a extensão da deterioração e caracterizar todos os elementos da estrutura. Seu desenvolvimento exige uma ampla campanha de ensaios (ANDRADE, 1992, CASTRO; CASTILLO; CARPIO, 2001).

3.1.1 Inspeção preliminar

A inspeção preliminar de uma estrutura em processo de corrosão constitui uma etapa muito importante para avaliar o grau de deterioração e diagnosticar as causas dos danos provocados pelo processo. A partir de um diagnóstico detalhado da estrutura a ser reparada é que poderá se realizar um plano de ação de reabilitação da estrutura com qualidade, definindo qual o método de reparo mais adequado, quais os materiais e técnicas a serem utilizadas, buscando, uma redução nos custos e o sucesso no serviço executado.

De acordo com Castro, Castillo e Carpio (2001), ao iniciar uma inspeção preliminar em uma obra, deve-se reunir todas as informações em uma ficha de antecedentes, contendo dados e características da estrutura e do meio ambiente, a qual está exposta a estrutura. Nesse sentido, devem-se obter dados relativos ao tipo de estrutura, tipo de utilização de obra, idade da estrutura, detalhes e idade de reparações prévias, idade do início dos problemas, detalhes construtivos, características do concreto (materiais, dosagem, resistências à compressão e tecnologias utilizadas em sua fabricação),

informações sobre os projetos arquitetônicos e estruturais, definir características sobre o ambiente (rural, urbano, marinho, industrial ou combinação de ambientes) e agentes agressivos presentes em solos, águas e atmosfera.

Ruano (1997), em seu estudo, concluiu que, antes de qualquer intervenção sobre uma estrutura afetada por um fenômeno de degradação, é fundamental definir o método de reparo mais adequado, por meio de uma metodologia de investigação que seja capaz de obter as informações necessárias sobre a realidade da estrutura em estudo. Sem essa estratégia o diagnóstico se tornaria caótico, desordenado, incorreto e oneroso, impossibilitando a medida de intervenção mais adequada.

De acordo com Helene (1997), devido a grande quantidade de intervenções em estruturas de concreto, sem a elaboração de um diagnóstico preciso, tem-se observado um grande número de falhas nas intervenções, principalmente quando o problema é de corrosão das armaduras. Os materiais e os procedimentos adotados para o reparo e reconstrução, nem sempre conferem à estrutura as características de durabilidade compatíveis com a importância da obra.

A inspeção visual é o primeiro passo na avaliação do problema de corrosão. Nesta inspeção serão coletadas informações qualitativas sobre o estágio da corrosão, observando-se, por exemplo a presença de manchas provenientes dos produtos de corrosão, fissuras e deslocamento do cobrimento de concreto.

Como se sabe, a corrosão das armaduras geralmente se apresenta com características bastante visíveis, como manchas de óxidos/hidróxidos na superfície do concreto, fissuras paralelas às armaduras e deslocamento do cobrimento de concreto. No entanto, é importante ressaltar, que ela pode ocorrer sem nenhum sinal visível na superfície do concreto. Desta forma, quando uma estrutura está danificada, o processo de corrosão não só existe em zonas que se apresentam deterioradas, mas também pode estar ocorrendo nas redondezas sem apresentar nenhum sinal evidente.

De acordo com Andrade (1992), a inspeção preliminar deve permitir a definição da natureza e causa do problema, incluindo:

- Exame visual de toda a estrutura, se necessário com a utilização de binóculos, realizando um levantamento fotográfico completo. Este procedimento deve ser realizado em elemento por elemento de toda a

estrutura, com a finalidade de comprovar se os sintomas e a natureza do problema são iguais em todos os elementos ou se existe mais de um tipo de manifestação patológica;

- Anotação de todos os sintomas visuais tais como as manchas de óxidos, cor das manchas, localização e tamanho das fissuras, entre outras;
- Identificação da agressividade do ambiente (suave, moderada ou agressiva); e
- Eliminação do cobrimento do concreto em alguns pontos singulares, para a observação visual direta das armaduras, fotografando as zonas de extração dos testemunhos e tomando nota da espessura do cobrimento, redução do diâmetro da armadura, por meio de um paquímetro, quantidade e cor dos óxidos e aspecto do concreto.

Os ensaios mínimos necessários para completar esta inspeção preliminar são:

- a) Profundidade de carbonatação;
- b) Presença de cloretos, determinando se o concreto já os possuía ou se eles penetraram desde o exterior; e
- c) Qualidade do concreto (pelo menos porosidade e resistência).

3.1.2 Inspeção detalhada

Nesta etapa têm-se o objetivo de determinar a extensão da deterioração de todas as partes ou elementos da estrutura. Em alguns casos após a realização da inspeção preliminar não será necessária a realização de uma inspeção detalhada.

Ao se realizar uma inspeção detalhada de uma estrutura avariada por corrosão das armaduras, é imprescindível a elaboração de um plano de trabalho a partir da informação proveniente da inspeção preliminar e das informações existentes sobre a construção da estrutura, contidas em projetos, plano de controle, resultados de ensaios e outros, como indicado na Figura 3.2 (ANDRADE, 1992).

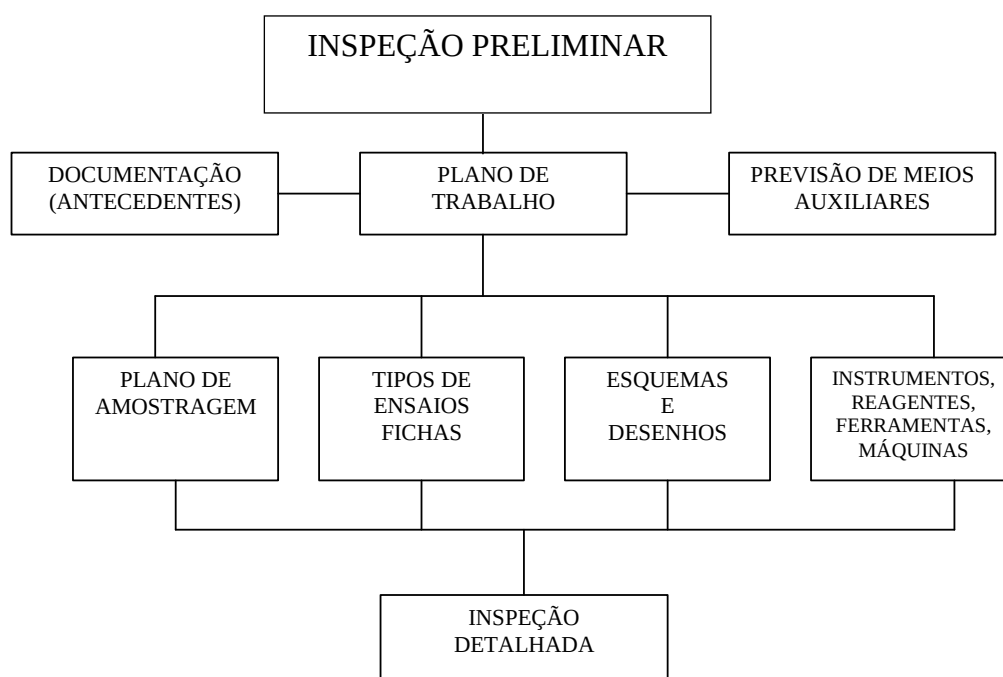


Figura 3.2 – Correspondência entre inspeção prévia e inspeção detalhada (ANDRADE, 1992).

De acordo com Andrade (1992), no plano de trabalho é necessário considerar as seguintes atuações:

- Realização de um plano de amostragem indicando os elementos da estrutura a inspecionar, sua localização e o número de ensaios a serem realizados;
- Listagem dos tipos de ensaios a se realizar em cada elemento e elaboração das fichas individuais correspondentes;
- Confecção de croquis e desenhos de cada elemento inspecionado com os detalhes dos ensaios efetuados e respectivos resultados, quando houver; e
- Detalhamento dos meios auxiliares, tais como as ferramentas, máquinas, reagentes, instrumentos e outros, com a verificação de sua colocação em condições de trabalho e calibragem prévia.

O plano de amostragem tem a função de dividir a estrutura em elementos, classificadas de acordo com certas características e condições que sejam representativas dentro de um conjunto da estrutura (CYTED, 1998).

Segundo Cyted (1998), Castro; Castillo; Carpio (2001) e Andrade (1992), as classificações das zonas devem estar baseadas nos objetivos da inspeção e orientada a facilitar a determinação das causas que originaram o processo de corrosão das armaduras. Os critérios fundamentais sobre os quais se deve basear o plano de amostragem, no caso de estruturas em processo de corrosão, são:

- Diferenciar as zonas com distintas exigências e responsabilidades estruturais;
- Determinar as características originais do concreto, ou seja, características em seu estado inicial de aplicação na obra;
- Determinar os tipos de meio ambiente agressivo em que está inserida à estrutura; e
- Estabelecer o grau de deterioração, tanto do concreto, como das armaduras.

Em uma inspeção visual detalhada a análise deve ser ampla e sistemática, tanto do concreto, como das armaduras. A inspeção externa deve ser realizada sobre todos e cada um dos elementos, anotando-se todas as anomalias encontradas, tais como manchas, umidades, eflorescências, fissuras, produtos de corrosão (cor, aspecto, extensão), morfologia do ataque (uniforme ou localizado, profundidade e extensão, se possui crateras ou não), medida de redução do diâmetro das armaduras, destacamentos do concreto, empolamento do acabamento, expansões e outros (ANDRADE, 1992).

Andrade (1992), também comenta que, além das anotações ou croquis que seja oportuno realizar de acordo com o critério do responsável pela avaliação da estrutura, é recomendável efetuar desenhos, ou fotografar, onde se possam apreciar distintos níveis de deterioração quando existam, através de cores, por exemplo. O resultado destes desenhos e fotografias seria um “Mapa de Deterioração” que pode dar uma visão do conjunto. A elaboração destes mapas poderá conter ainda os resultados de outros ensaios, como o teor de cloretos, porosidade do concreto, potencial de corrosão etc., com o fim de correlacionar os distintos parâmetros.

Em Andrade (1992) e Cyted (1998) encontra-se uma série de ensaios a serem realizados em uma inspeção detalhada. Esses autores afirmam que a identificação e escolha dos ensaios apropriados é uma parte muito importante quando se deseja obter as informações básicas necessárias, para que se possa elaborar um parecer sobre as causas que

foram responsáveis por um problema de corrosão de armaduras e sua propagação. Segundo esses autores, os principais ensaios empregados em casos de corrosão das armaduras são:

1. Resistividade elétrica do concreto;
2. Resistência mecânica do concreto (esclerometria, ultra-som, por exemplo);
3. Porosidade e massa específica do concreto;
4. Teor de cloretos;
5. Teor de sulfatos;
6. Espessura ou frente de carbonatação;
7. Teor de umidade do concreto;
8. Espessura de cobrimento;
9. Medição da velocidade de corrosão;
10. Medição do potencial de corrosão eletroquímico; e
11. Medição perda de seção da armadura.

De acordo com Andrade (1992), a determinação do teor de cloretos e da profundidade de carbonatação, são os dois únicos imprescindíveis para a determinação das causas da corrosão. O conhecimento da resistência do concreto, da porosidade e da espessura do cobrimento do concreto, fornece informações complementares que ajudam a julgar a qualidade da estrutura do concreto. A medida de potencial eletroquímico e velocidade de corrosão das armaduras ajudam a obter informações qualitativas e quantitativas sobre o processo de corrosão, se ativo ou passivo. O teor de umidade fornece os elementos para predizer a velocidade de propagação da corrosão no futuro.

3.2 ETAPAS E PROCEDIMENTOS DO REPARO LOCALIZADO

A obtenção do sucesso no reparo localizado de estruturas com problemas de corrosão dependerá de uma inspeção preliminar ou detalhada de boa qualidade, que culmine no estabelecimento de um diagnóstico preciso do caso. Desta forma, vê-se que os procedimentos de inspeção de uma estrutura com problemas de corrosão é uma das etapas mais importantes no processo. A partir do diagnóstico, poder-se-á escolher corretamente as técnicas e materiais a serem utilizados.

Uma falha durante o processo de escolha e execução da técnica de reabilitação pode comprometer todo o sucesso da intervenção. Com isto, o reparo localizado terá sua vida útil reduzida drasticamente, trazendo, com isto, um incremento aos custos para sanar o problema de corrosão de uma estrutura, devido à necessidade de se refazer os reparos em um curto intervalo de tempo, sem contar que o meio de intervenção mais adequado não precisa ser necessariamente o mais oneroso.

3.2.1 Retirada do concreto contaminado e preparo da superfície

Segundo Nepomuceno (1992), as inspeções iniciais na estrutura devem determinar os pontos onde o concreto se encontra com níveis de agressividade importantes, ou seja, com pH menor que nove, nos casos de concreto carbonatado, ou com concentrações de íons cloreto superiores a 0,4% em relação ao peso do cimento. As regiões que se encontrarem nessas condições devem ser removidas.

O corte do concreto deve ser realizado de forma manual, por meio de ponteiros e marretas, mecanicamente, com a utilização de martelos rompedores pneumáticos ou por meio de hidrojateamento de alta pressão, dando preferência ao hidrojateamento de alta pressão, devido ao fato deste último procedimento não provocar microfissuras no concreto geradas pelos impactos produzidos pelos demais métodos.

Nepomuceno (1992), ainda cita outra vantagem do hidrojateamento ou hidrodemolição. O método além de remover o concreto deteriorado e contaminado, fornece a superfície do substrato uma rugosidade necessária para aplicação do novo material. Segundo ensaios realizados por Silfwerbrand (1991 apud NEPOMUCENO, 1992), a preparação da superfície com hidrojateamento têm uma falha de 7% na aderência da junta de união do concreto antigo com o novo material, contra 31% quando utilizado o martelo mecânico e 38 % com jateamento de areia. Outro fator importante citado mais à frente, é que o hidrojateamento de alta pressão é também uma das melhores técnicas para limpeza das armaduras com problemas de corrosão devido aos cloretos. A Figura 3.3 mostra um exemplo de hidrojateamento de alta pressão.



Figura 3.3 – Processo de hidrojetamento de alta pressão numa superfície de concreto.

O corte do concreto deverá ir 2 a 3 cm além das armaduras ou até uma profundidade que permita a limpeza das armaduras em sua face posterior. Esse procedimento é imprescindível para a corrosão por cloretos. A Figura 3.4 mostra um esquema da importância dessa espessura de remoção do concreto no entorno da armadura. No caso de jateamento de areia, a Figura 3.4 mostra como os grãos limpariam a face posterior da armadura. Ainda, segundo Bijen (1989 apud NEPOMUCENO, 1992) se houver contato nas armaduras com partes contaminadas e partes não contaminadas pode surgir o risco de formação de pilhas de corrosão. Os cantos e arestas das partes removidas devem estar arredondados para facilitar a aderência do novo material de reparo.

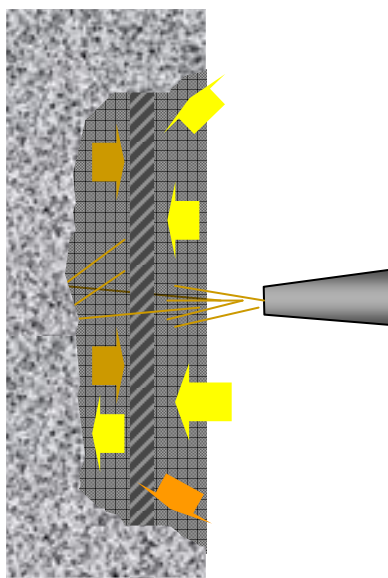


Figura 3.4 – Exemplo de limpeza da armadura em sua face posterior com jateamento de areia, mostrando a importância do espaço após a posição da armadura, possibilitando uma limpeza adequada.

3.2.2 Limpeza das armaduras

Esta etapa tem como objetivo remover todos os produtos de corrosão, agentes agressivos e restos de materiais aderidos à superfície do aço. A técnica ou procedimento de limpeza das armaduras deverá ser escolhido de acordo com o tipo de agente causador da corrosão (carbonatação ou cloretos).

No caso de carbonatação a limpeza pode ser realizada com escovas de cerdas de aço ou, para a obtenção de um resultado mais eficaz, recomenda-se um jateamento abrasivo com areia úmida. Quando há a presença de cloretos, recomenda-se além de um jateamento abrasivo, um jateamento de água fria, seguido de um jateamento de água quente para facilitar a remoção dos cloretos remanescentes no interior dos pites.

Vassie (1989) estudou a influência de três diferentes procedimentos de limpeza das armaduras, escova de aço manual, escova de aço mecânica e jateamento de areia. Os resultados mostraram que a durabilidade do reparo depende fundamentalmente do procedimento adotado na limpeza do aço e que, no caso de armadura com corrosão por pites, provocadas por cloretos, nenhum dos procedimentos de limpeza foram eficazes para

a total remoção dos cloretos e para prevenir uma corrosão futura. As Figuras 3.5 e 3.6 mostraram, que, quando as armaduras com corrosão por cloretos são limpas com escova de cerdas de aço muitos produtos de corrosão se mantêm em sua superfície e, certamente, grande quantidade de íons cloreto permanecem em contato com a armadura.

Vassie (1989) recomenda que quando houver uma grande quantidade de pites é necessária à substituição da armadura.

Caso a perda de seção seja superior a 15%, as armaduras devem ser complementadas (ANDRADE, 1992 e SOUZA E RIPPER, 1998). O Concrete Society (1986 apud NEPOMUCENO, 1992), considera que a perda de 10% de diâmetro da armadura é o limite aceitável. Portanto, perdas maiores que 10% levariam a substituição da armadura ou a necessidade de acréscimos de armadura.

As exigências e recomendações da ABNT (2003) – NBR 6118 em relação aos comprimentos e emendas de transpasse.

3.2.3 Revestimento da armadura

De acordo com Figueiredo (1994), os revestimentos de proteção da armadura são materiais aplicados diretamente sobre as superfícies das armaduras, após a realização da limpeza, durante a execução de um reparo, cuja finalidade é a de restabelecer e preservar a proteção contra a corrosão. Por ser o material mais próximo à armadura, entre todos os que fazem parte de um sistema de reparo, esses revestimentos levam consigo a maior carga de responsabilidade do desempenho dessas funções.

Segundo Pazini, Castro e Helene (2001), os possíveis mecanismos de proteção das armaduras envolvidos quando se utiliza à imprimação das armaduras são a repassivação, a inibição, a proteção catódica e o efeito barreira. Alguns destes atuam em conjunto, dependendo do tipo de pintura. Ainda, de acordo com esses autores, o mecanismo de repassivação tem como função realcalinizar a superfície da armadura, de tal forma que se formem óxidos e hidróxidos protetores. Geralmente o procedimento é realizado pintando a superfície das armaduras com argamassa de cimento ou algum tipo de material bastante alcalino. Este tipo de procedimento funciona para o caso da corrosão por carbonatação. No entanto, é possível que para o caso da corrosão por cloretos, esse tipo de

mecanismo funcione apenas durante um curto espaço de tempo. Figueiredo (1994) identificou que no caso dos íons cloreto, embora a armadura estivesse em um meio alcalino, a corrosão pode se desenvolver.

Os inibidores de corrosão podem estar presentes na argamassa de reparo e nos revestimentos para a armadura.

A inibição pode se dar antes do início de processo de corrosão, por meio da inibição de íons agressivos, ou após o início da corrosão, por meio da formação de subprodutos inibidores a partir da reação com os produtos de corrosão (PAZINI, CASTRO e HELENE, 2001). Dois exemplos destes pigmentos inibidores são os nitritos, que estimula a formação de uma camada passivante, compacta e aderente sobre a armadura, mesmo com a presença dos íons cloreto, e o chumbo, que reage com os produtos de corrosão, formando sabões que impedem o desenvolvimento da corrosão (FIGUEIREDO e ANDRADE, 1997).

Um revestimento polimérico com chumbo foi estudado por Figueiredo (1994), em uma argamassa carbonatada com armadura isenta de corrosão. O revestimento protegeu adequadamente a armadura, esta proteção mostrou estar associado ao mecanismo de barreira. No entanto, quando o revestimento foi aplicado em uma armadura oxidada devido a carbonatação, os resultados não foram positivos. Nos ensaios com cloretos, os resultados mostraram que o revestimento polimérico com chumbo conseguiu proteger as armaduras nas condições ensaiadas. Mesmo com a presença de cloretos na armadura, a velocidade de corrosão (icorr) foi diminuindo gradativamente ao longo do ensaio e a Resistência ôhmica (Rohm) foi aumentando com o passar do tempo.

O mecanismo de proteção catódica está baseado na introdução de um ânodo de sacrifício junto à armadura, fazendo com que a armadura funcione catodicamente. Esta introdução do ânodo de sacrifício é realizada através, por exemplo, da inclusão de zinco na composição do revestimento. Pelo fato do zinco ser um material mais eletronegativo que o aço, na presença de um eletrólito, ocorre a formação de uma pilha galvânica, na qual o zinco será corroído e a armadura ficará protegida (FIGUEIREDO, 1994).

Existem evidências comentadas por Pazini, Castro, Helene (2001), que após o zinco se dissolver, os produtos de corrosão preenchem a porosidade da pintura, densificando-a e incrementando o efeito barreira no seu mecanismo, dificultando, assim, a chegada de agentes agressivos na superfície das armaduras.

Segundo Figueiredo (1994 apud ONTIVEROS E MC DOWELL, 1990), para que o revestimento rico em zinco proteja galvanicamente a armadura, o potencial eletroquímico de corrosão (E_{corr}) deve manter-se próximo ao potencial do zinco ou, pelo menos mais negativo que -650 mV. Figueiredo (1994) explica que a evolução do potencial no sentido mais nobre pode indicar a diminuição ou perda da proteção galvânica. No entanto, se o sentido do deslocamento do E_{corr} para potenciais mais positivos é acompanhado por diminuição do i_{corr} e por um aumento R_{ohm} , isto pode estar indicando que o mecanismo por proteção catódica está sendo substituído pelo mecanismo de proteção por barreira.

Nos ensaios realizados por Figueiredo (1994) foram observadas as presenças dos dois mecanismos de acordo com o que foi descrito acima, em argamassa carbonatada. O E_{corr} esteve sempre ligeiramente acima de -600mV, o que pode indicar que o revestimento com zinco protegeu catodicamente a armadura durante todo o período do ensaio. No ensaio de argamassa com cloretos, os dois estágios de proteção foram observados, uma vez que foram registrados, inicialmente, elevados valores de i_{corr} e E_{corr} bastante eletronegativos. No decorrer do ensaio o i_{corr} foi diminuindo gradativamente, o E_{corr} foi ficando menos negativo e a R_{ohm} começou a aumentar, Isto indica que, no momento que a R_{ohm} começou a aumentar a proteção por barreira foi ativada, forçando a diminuição do i_{corr} .

Segundo Figueiredo (1994), atualmente é aceito por vários autores que a proteção conferida pelas pinturas ricas em zinco consiste em um curto período de proteção catódica e um longo período de proteção por barreira.

A BS 4652, citada por Figueiredo (1994), especifica para os revestimentos compostos com zinco um conteúdo mínimo de 88% de zinco, em relação à massa da película endurecida. A BRS Digest 109 é mais exigente, especificando um conteúdo mínimo de 95% de zinco, em relação à massa da película endurecida.

O mecanismo de proteção por barreira consiste em uma barreira física entre a superfície da armadura e o meio a qual estar inserida, reduzindo o acesso de oxigênio e umidade na superfície do metal e evitando que os agentes agressivos cheguem também à superfície da armadura.

Nos mecanismos de proteção por barreira, Figueiredo (1994) cita que alguns aspectos referentes aos defeitos dos revestimentos devem ser considerados. Durante o

processo de preparo dos componentes pode ocorrer à formação de bolhas de ar, dependendo das características do produto ou da energia em que se realiza a mistura. Estas bolhas podem funcionar como caminhos de acesso a agentes agressivos até a armadura. As etapas de aplicação e execução do reparo podem dar origem ao aparecimento de defeitos, podendo ser pelo baixo poder de cobertura do revestimento, dificuldade de acesso às áreas internas da armadura, má qualidade da mão-de-obra ou mesmo impactos sobre o revestimento recém aplicado ou endurecido.

Figueiredo (1994), nos oito sistemas de pinturas na superfície de armaduras avaliados em sua pesquisa, concluiu que dificilmente, um revestimento protege a armadura, ao longo de todo o tempo, através de um único mecanismo. Através da análise de seus resultados, também constatou que o efeito barreira esteve presente na maioria dos revestimentos estudados. Entre os mecanismos estudados, o revestimento polimérico de base epóxi, representou a maior barreira à difusão de oxigênio.

Ainda, com a referida pesquisa, nos ensaios de avaliação dos revestimentos aplicados sobre a superfície oxidada, tanto em argamassa carbonatada, quanto em argamassa com cloretos, o revestimento à base de epóxi com cargas especiais, protegeu a armadura durante todo o período de ensaio.

3.2.4 Aplicação de ponte de aderência

Na prática têm-se observado alguns casos em que o material de reparo se desprende do concreto velho. Para aumentar a aderência entre o substrato antigo e o novo material de reparo, o meio técnico tem utilizado materiais que servem como ponte de aderência entre o material novo e o antigo substrato.

É de fundamental importância que exista uma perfeita união entre o concreto original da estrutura e o material de reparo. Esta ponte de aderência deve ser compatível com o material de reparo e com as condições de umidade do substrato.

De acordo com Hewlett (1984), ensaios físicos devem ser feitos para evitar incompatibilidade entre o material de reparo e o substrato, evitando o surgimento de fissuras na interface dos materiais. Esses ensaios devem ser realizados cuidadosamente, principalmente, quando a temperatura ou cura a estiverem sendo testados.

Os materiais mais comumente encontrados no mercado para este fim são os de base epóxi, P.V.A e acrílico, sendo mais utilizados os de base epóxi.

Segundo López (1995), o adesivo epóxi possui uma aderência muito alta em virtude de seu caráter polar. A aplicação requer cuidados especiais, principalmente no que diz respeito à limpeza e condições do substrato.

É importante lembrar que uma ponte de aderência epóxi sendo mal executada acaba funcionando como um excelente separador. A aplicação de um material epóxi requer conhecimentos de materiais, mistura, aplicação, controle de tempo em aberto ou de aplicação (*time Life*), etc. Cuidados especiais são requeridos diante de algumas dificuldades operacionais, tais como reparos com elevada densidade de armaduras, grandes áreas de aplicação, locais de difícil acesso, necessidade do uso de fôrmas, requerendo elevados tempos de aplicação. Tais situações podem colocar em risco a eficácia do material e o sucesso da intervenção.

Observa-se, atualmente, no meio técnico, uma forte tendência de, sempre que possível, dispensar o uso de pontes de aderência, quer seja de base epóxi ou acrílica, justamente pelos riscos de não se encontrar mão-de-obra qualificada para a sua correta utilização e, também, porque se percebeu que num substrato de concreto e aço bem preparado e utilizando-se os novos materiais de reparo existentes no mercado (argamassas e grautes de base cimentícia), é possível obter um adequado desempenho apenas com a preparação adequada do substrato. Para tanto, recomenda-se a remoção de todos os contaminantes, utilizando técnicas de limpeza que também aumentem a porosidade do substrato, e a saturação adequada do substrato com água, geralmente na condição de superfície saturada e seca, dependendo do tipo de material de reparo a ser utilizado.

3.2.5 Material de reparo

A escolha do material a ser utilizado na reconstituição da seção do concreto deve ser criteriosa, uma vez que a oferta de materiais de reparo no mercado é muito extensa e a situação de cada intervenção é muito particular e dependente de uma série de fatores, tais como a trabalhabilidade, resistências mecânicas, estabilidade dimensional, capacidade de proteção das armaduras e durabilidade. Os reparos localizados são,

geralmente, realizados com argamassas modificadas com polímeros e aditivos, grautes, microconcretos e concretos com características especiais.

No caso de estruturas com problemas de corrosão, os objetivos mais importantes que os materiais de reparo devem atingir são os de restaurar o ambiente alcalino, dificultar o acesso de oxigênio e umidade na superfície da armadura.

É importante lembrar que, de acordo com suas características ou composição, o material de reparo pode proteger as armaduras por meio dos mecanismos de proteção barreira, repassivação, proteção catódica, inibição ou por uma junção desses mecanismos de proteção, similarmente com os discutidos nos mecanismos de proteção dos revestimentos aplicados diretamente sobre as armaduras, descritos no Item 3.1.2.3.

Quase todos os materiais de reparo podem ser agrupados em três famílias: a) materiais de base cimento (tradicionais e não tradicionais); b) materiais com aglomerante misto composto por cimento Portland e polímeros termoplásticos; c) materiais cujo aglomerante é unicamente orgânico e à base de polímeros termoestáveis (ANDRADE, 1992).

Os materiais tradicionais possuem como base o cimento Portland. Os não tradicionais possuem a mesma composição dos anteriores, porém são melhorados pela adição de aditivos especiais ou adições minerais especiais, tal como a sílica ativa. Os materiais mistos são formados por argamassa de cimento Portland e polímeros (FIGUEIREDO, 1994).

Basicamente estes materiais tradicionais são empregados na forma de nata de cimento, como ponte de aderência ou revestimento protetor temporário da armadura, e de argamassa, microconcreto, concreto convencional e projetado.

Para a utilização destes materiais tradicionais deve-se assegurar que os mesmos tenham uma boa aderência ao antigo substrato, mínima retração e melhor comportamento aos agentes agressivos que provocaram a deterioração do concreto da estrutura. Para tanto, normalmente estes materiais são empregados conjuntamente com aditivos superplastificantes, expansores, retardadores ou aceleradores para que possa melhorar suas propriedades e durabilidade.

A Concrete Society em sua Technical Report N° 26, citado por Nepomuceno (1992), recomenda que a aplicação de materiais tradicionais tenha um mínimo de 25 a 30

mm de espessura. No entanto, o Boletim N°04 do GHEO recomenda uma espessura de 12 a 25 mm, dependendo da extensão da área a ser reparada. A espessura do recobrimento é importante devido às possibilidades de retrações, influenciando na durabilidade da intervenção, principalmente onde há elevada densidade das armaduras.

Os materiais não tradicionais são aqueles cujo aglomerante é a base de cimento Portland acrescidos de agentes que modificam ou melhoram determinadas propriedade, tais como o tempo de pega, a retração, as resistências mecânicas a baixas idades e a microestrutura (FIGUEIREDO e ANDRADE, 1995).

Entre os cimentos mais empregados para produzir argamassas e concretos com retração compensada, encontra-se o cimento Portland modificado com agentes expansores, como o pó de zinco. Outros agentes como a microsilica ou óxido de ferro também são empregados para melhorar as propriedades do concreto, modificando sua microestrutura. São também encontrados materiais não tradicionais com adições de fibras poliméricas ou metálicas a fim de aumentar a resistência à tração e minimizar a retração (FIGUEIREDO e ANDRADE, 1995).

Outros materiais de base cimento não tradicionais, são os concretos e argamassas com cimento de fosfato de magnésio, os quais apresentam boas resistências nas primeiras horas. Segundo El-Jazairi (1984 apud NEPOMUCENO, 2002), com esses materiais, se tem encontrado resistências de 34 MPa com 3 horas de idade e 41 MPa com 24 horas.

O látex tem sido empregado para melhorar algumas propriedades das argamassas tradicionais, tais como a aderência, a impermeabilidade a agentes agressivos, como os cloretos e a umidade, e, ao mesmo tempo, mantendo suas características, tais como a alcalinidade e propriedades físicas, como a deformação e coeficiente de dilatação deixando-os mais compatíveis com o substrato do concreto.(NEPOMUCENO, 1992).

Segundo Figueiredo (1994), o componente polimérico dos materiais mistos pode ser o látex termoplástico, látex termoestável ou uma emulsão de polímero em pó.

Os polímeros termoplásticos mais empregados são a resina acrílica e o estireno-butadieno. Apesar disso, o látex termoestável de base epóxi vem sendo bastante empregado nos últimos anos (FIGUEIREDO, 1994).

Concretos e argamassas poliméricas estão constituídos por um ligante formado por um líquido de base orgânica que se solidifica por reação de seus componentes para formar um polímero termoestável, que depois de endurecido não pode ser fundido, nem diluído sem sofrer alteração química (GEHO, 1989). Os ligantes orgânicos termoestáveis mais utilizados são as resinas epóxi, os poliuretanos e os poliésteres não saturados que normalmente apresentam boa aderência, boa resistência mecânica e bom poder umectante (OHAMA, 1984; GEHO, 1989).

Segundo Ohama (1984), quando a argamassa ou o concreto modificada com látex são preparados, misturando-se o polímero ou monômero em pó e dispersando-o em líquido ocorre um processo de formação de uma película do polímero, que se dá em três etapas, que resultam na formação de uma rede de moléculas de polímeros, que se distribuem na fase de cimento hidratado, formando uma estrutura monolítica. A película de polímero preenche principalmente os poros maiores. As microfissuras também podem serem reduzidas pela capacidade de união da película polimérica.

Os revestimentos mistos e os poliméricos podem conter pigmentos especiais como o zinco ou o chumbo, ou inibidores de corrosão, como os nitritos (FIGUEIREDO, 1994).

As propriedades dos concretos e argamassas modificadas com látex variam de acordo com a relação polímero/cimento, com a quantidade de cimento, com a relação água/cimento, com o tipo de polímero etc (WALTERS, 1990; OHAMA, 1984).

Kobayashi e Shuttoh (1991) estudando o coeficiente de difusão do oxigênio em argamassas de cimento Portland, verificaram que as argamassas modificadas com estireno butadieno e com acrílico, ensaiadas em ambiente com humidade de 60%, tiveram um coeficiente de difusão 1/10 inferior ao coeficiente da argamassa não modificada.

Com relação à capacidade de absorção, as argamassas modificadas com látex, são geralmente menos absorventes que as argamassas tradicionais (NEPOMUCENO, 1992).

Nepomuceno (1992) analisou o comportamento das armaduras colocadas na interface do material de reparo e do concreto antigo. Quatro diferentes materiais de reparo puderam ser comparados com um concreto feito com cimento Portland de alta resistência. Neste estudo, observou-se que os materiais tradicionais feitos com cimento Portland de alta resistência apresentaram fissuras apreciáveis, porém com aberturas inferiores às

observadas na argamassa de cimento com retração compensada. O material que apresentou menor abertura na junta do reparo foi à argamassa de cimento Portland modificada com látex estireno butadieno, em cuja interface com o concreto aplicou-se uma ponte de aderência. Para argamassa à base cimento de fosfato de magnésio, adição que é empregada nos materiais com a finalidade de obter elevadas resistências em baixas idades, observou-se retração nos corpos-de-prova com recobrimento de 30 mm, não encontrando, porém, retração naqueles com 15 mm.

Coote et al. (1986), em avaliações de sistemas de reparos expostos em ambiente marinho, sugeriram que nenhum dos três sistemas usando argamassa epoxídica era conveniente para as condições de umidade contínua, pois alguns dos produtos da resina curada são afetados pela elevada alcalinidade do concreto. Na maioria dos prismas, a aderência entre o reparo e o substrato permaneceu intacta. Contudo, sistemas reparados com cimento de pega rápida, desenvolveram fissuras devido à expansão desse material de reparo.

3.2.6 Pinturas de proteção na superfície reparada

A superfície reparada pode exigir um acabamento uniforme, necessitando, desta forma, a utilização de pinturas. No entanto, estas pinturas podem ter também outras funções, como a de complementar a eficácia do material de reparo aplicado, contribuindo ao processo catódico, uma vez que diminui a penetração do oxigênio e impede a penetração de água, ou ao processo anódico, impedindo a penetração de agentes agressivos. Cuidados especiais devem ser tomados quanto à aplicação e manutenção destas pinturas, já que sua eficiência varia de acordo com cada tipo de produto (NEPOMUCENO, 1992).

A consideração principal a ser feita em relação aos revestimentos e pinturas de proteção contra corrosão de armaduras é quanto à permeabilidade a água, aos cloretos, ao CO₂ e ao oxigênio (ANDRADE, 1992).

Segundo Kazmierczak (2005), um bom sistema de proteção deve impedir a penetração de água, que pode funcionar como um veículo para a penetração de íons agressivos. Porém, deve possuir uma elevada permeabilidade ao vapor d'água, permitindo

a troca do vapor de água com o meio externo, sem prejudicar a adesão do sistema com o substrato.

Os revestimentos hidrófugos, alteram as propriedades dos poros capilares, tornando-os hidrorrepelentes, enquanto os revestimentos impermeabilizantes formadores de películas protegem o concreto pela constituição de uma barreira superficial que diminui ou impede a penetração de líquidos e gases.

Os principais produtos hidrofugantes existentes no mercado são formulados a partir de polímeros de silicone, silanos e siloxanos, podendo ser solubilizados por água ou por solventes próprios. Apresentam elevada resistência ao calor e à ação dos raios ultravioleta, elevada repelência à água, não conferem cor ao substrato e são de baixo custo (KAZMIERCZAK, 1995).

Os revestimentos impermeabilizantes formadores de película formam, após a sua cura, uma película contínua, semiflexível e de baixa permeabilidade. Devido à formação da película, impedem ou minimizam o contato de elementos agressivos com a superfície do concreto, sendo utilizados na proteção contra a carbonatação, à penetração de cloretos e o ataque ácido, entre outros (KAZMIERCZAK, 2005).

Os sistemas formadores de película mais utilizados, no Brasil, são os látex PVA, látex acrílico estirenado, látex acrílico, poliuretano alifático, resina epóxi e borracha clorada (KAZMIERCZAK, 2005).

Kazmierczak (2005) conclui que, a especificação de um sistema de proteção superficial para o concreto é um assunto complexo, em função da contínua modificação na formulação dos produtos disponíveis no mercado e da grande diversidade de características que o concreto apresenta. A especificação deve levar em consideração as condições de exposição a que o concreto e o sistema de proteção estarão submetidos, as características do concreto, as características do sistema de proteção superficial, a exigência na qualidade de aplicação do produto, a vida útil do sistema de proteção e a vida útil especificada para o concreto.

3.2.7 Acompanhamento de uma estrutura reparada

Segundo Andrade (1992), após a realização de um reparo de uma estrutura deteriorada por corrosão de armaduras, principalmente quando a causa tenha sido os cloretos, é muito conveniente um acompanhamento da evolução e do comportamento do reparo por um período de tempo. A probabilidade do retorno do processo de corrosão é grande, tanto pela penetração de novos cloretos, quanto pela progressão do processo nas áreas não reparadas.

No entanto, existe uma grande dificuldade de realizar a avaliação do desempenho do reparo devido ao tempo necessário para o monitoramento, análises e observações, além da grande falta de compreensão por parte do meio técnico. Devido a isto, normalmente são feitos ensaios em laboratório que simulam as condições de uso dos sistemas de reparo em um determinado ambiente.

4 *METODOLOGIA EXPERIMENTAL*

Com o objetivo de obter maiores informações sobre o comportamento de materiais, sistemas e técnicas de reparo e de estruturas de concreto armado deterioradas pela corrosão das armaduras por íons cloreto, procurou-se, no presente trabalho, desenvolver uma metodologia experimental capaz de avaliar o desempenho diferentes tipos de materiais, sistemas e técnicas utilizadas em reparos localizados, disponíveis no mercado, baseada em ensaios de caracterização e de desempenho que simulam situações reais.

O programa experimental foi dividido em **duas etapas** com objetivos diferentes. A primeira etapa foi dividida em duas partes. A primeira parte da primeira etapa consistiu em realizar uma nova análise nos corpos-de-prova utilizados na pesquisa de Tinoco (2001), moldados com 1% e 3% de cloretos, após um período de aproximadamente, cinco anos após a realização dos reparos. A referida análise baseou-se nas medidas eletroquímicas de potencial de corrosão (E_{corr}) e velocidade de corrosão (i_{corr}), procurando obter uma resposta mais aprofundada do desempenho dos sistemas de reparo utilizados pelo citado autor. Na segunda parte da primeira etapa da pesquisa foram retiradas amostras do concreto dos corpos-de-prova moldados com 3% de cloretos nas regiões reparadas e não reparadas, em diferentes profundidades, a fim de determinar o perfil do teor de cloretos x profundidade nos corpos-de-prova, avaliando, desta forma, à eficácia, de uma ponte de aderência de base epoxídica como barreira contra a difusão dos íons cloreto remanescentes do concreto contaminado para a região reparada, como também a eficácia dos materiais de reparo no controle da difusão dos íons cloreto.

Na segunda etapa foram avaliadas diferentes técnicas de limpeza de armaduras em processo de corrosão por íons cloreto, verificando qual ou quais das técnicas foram as mais eficazes na remoção destes agentes agressivos e dos produtos de corrosão.

4.1 ETAPA I: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE REPARO (PRIMEIRA PARTE)

4.1.1. Materiais avaliados

4.1.1.1 Concreto referência

O concreto que serviu como referência foi confeccionado com materiais da região. O traço unitário (em massa) do concreto de referência utilizado por Tinoco (2001), para um consumo de cimento de 400 kg por m³, foi de 1: 1,434: 2,683: 0,55 (cimento: areia: brita: água). A relação água/cimento adotada foi de 0,55, com o intuito de se aproximar dos concretos executados com maior frequência nas obras convencionais.

A mistura foi feita mecanicamente em uma betoneira com capacidade para 120 litros.

A consistência do concreto foi medida pelo método da determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT - NBR 7223/1992). A consistência foi fixada, para fins de trabalhabilidade, em 80 ± 10 mm. O valor medido foi de 85 mm.

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP II – F – 32, segundo denominação da ABNT - NBR 11578/1991 (Cimento Portland Composto). As propriedades físicas e químicas do cimento utilizado foram determinadas pelo Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

A areia utilizada foi do tipo média, de origem natural (areia de rio), encontrada em abundância na região. Sua caracterização foi feita pela realização dos ensaios de Massa unitária (ABNT - NBR 7251/1982), Módulo de finura e Diâmetro máximo (ABNT - NBR 7217/1987), Massa específica (ABNT - NBR 9776/1986) e Inchamento (ABNT - NBR 6467/87).

O agregado gráudo utilizado foi do tipo “1” (19mm), de origem natural e também de fácil obtenção na região. Os ensaios para caracterização deste material foram os mesmos realizados para o agregado miúdo, sendo a massa específica determinada pelo *método do picnômetro*.

A água utilizada foi a disponível na rede de abastecimento local.

4.1.1.2 Microconcreto fluido

Trata-se de um material à base de cimento, indicado para reparo e reforço de estruturas de concreto. É industrializado e necessita apenas de uma adição correta de água limpa.

É constituído por cimento Portland, agregados graduados com $D_{\text{máx}}$ igual a 12,5 mm e aditivos que objetivam controlar a expansão no estado plástico e reduzir a demanda de água.

O material é indicado para o reparo de grandes seções de concreto armado e também para locais menores onde o acesso à região do reparo é restrito ou existe congestionamento de armaduras, uma vez que sua consistência é bastante fluida. Seu uso é recomendado para aplicações com até 300 mm de espessura.

O *Anexo A* deste trabalho apresenta as especificações técnicas do microconcreto fornecidas pelo fabricante.

4.1.1.3 Argamassa com inibidor

É um material bastante fluido, à base de cimento e indicado para reparos de concreto. É industrializado e necessita apenas a adição especificada de água limpa.

É constituído por cimento Portland, agregados selecionados, aditivos redutores de água e anticorrosivos, o que pode conferir uma proteção por inibição à armadura do concreto contra a corrosão eletroquímica. A composição também objetiva proporcionar uma expansão controlada no estado plástico e, ainda, reduzir a demanda de água, o que pode gerar um rápido ganho de resistência, baixa permeabilidade e boa durabilidade.

O material é indicado para reparar seções de concreto atacadas pela corrosão, principalmente em locais onde o acesso à região de reparo é restrito ou existe congestionamento de armaduras. Seu uso é recomendado para aplicações com até 60 mm de espessura.

Constam no *Anexo A* deste trabalho, segundo as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante, as características deste material.

4.1.1.4 Adesivo de base epóxi

É um produto utilizado como ponte de aderência, isto é, para colagem de concreto novo ou materiais à base de cimento ao concreto existente. Possui elevadas resistências mecânicas e pode servir de barreira contra agentes agressivos, devido à sua baixa permeabilidade.

O adesivo é bicomponente, de alta viscosidade, à base de epóxi sem solvente, sendo fornecido pré-dosado, pronto para mistura e uso na obra.

Mais detalhes podem ser encontrados no *Anexo A* deste trabalho, segundo as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

4.1.2 Corpos-de-prova utilizados na primeira etapa

4.1.2.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Foram produzidos 12 corpos-de-prova (CP's) prismáticos, com seção retangular de 15cm x 20cm e 40 cm de comprimento, contendo quatro barras de aço CA-50, com diâmetro de 10 mm e três estribos de 4,2 mm dobrados em forma de losango, de modo que as quatro barras ficassem centradas nas quatro faces e não nas arestas como normalmente estão dispostas nas estruturas, conforme ilustrado na Figura 4.1. Esta disposição facilita a realização das medidas eletroquímicas realizada pelo equipamento GECOR 6.

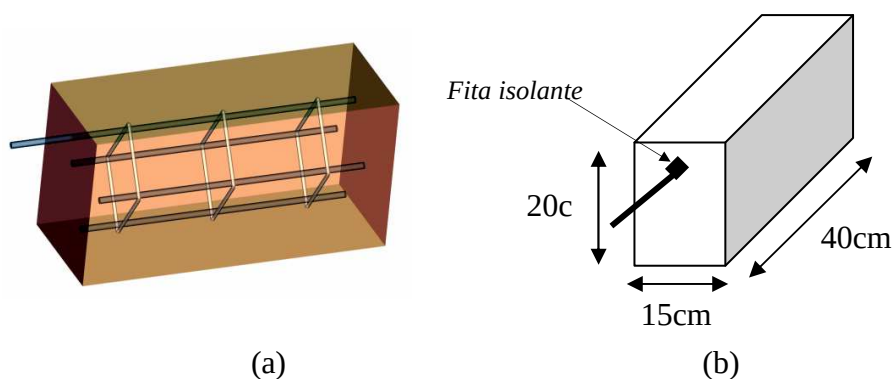


Figura 4.1 – Esquema de armação (a), dimensões e aspecto final do CP prismático (b).

O cobrimento adotado foi de 2,5 cm em todas as faces, levando-se em conta a recomendação do Item 6.3.3.1- b da ABNT - NBR 6118/1978 para estruturas de concreto aparente. Embora esta mesma norma também recomende 4,0 cm de cobrimento para concreto em meio fortemente agressivo, ela não especificava o grau e o tipo de agressividade, bem como a qualidade do material que constitui o cobrimento, diferentemente do que ocorre com a versão atualizada desta norma, a ABNT - NBR 6118:2003 que especifica, no Item 6.4, parâmetros sobre a agressividade do ambiente e, no Item 7.4.7.7, relaciona a espessura de cobrimento do concreto em relação ao ambiente em que se encontra a estrutura. No entanto, adotou-se, na época, o valor de 2,5 cm para que os agentes despassivadores chegassem mais rapidamente à armadura, acelerando, assim, o processo corrosivo. Para obter uniformidade do cobrimento foram utilizados espaçadores plásticos.

As faces onde foram realizadas as medidas eletroquímicas foram aquelas de 20cm de largura, em função das dimensões do equipamento utilizado, o qual possui um sensor de diâmetro equivalente, que fica em contato com o corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova foram moldados com duas diferentes quantidades de cloretos em relação à massa de cimento (1% e 3%), a partir do NaCl, incorporados na água de amassamento. A Figura 4.2 ilustra o esquema desenvolvido para o reparo dos corpos-de-prova contaminados. As siglas CR, MC e AI correspondem, respectivamente, ao concreto de referência, ao microconcreto e à argamassa com inibidor, que foram os materiais empregados para a realização dos reparos (TINOCO, 2001).

Apenas os corpos-de-prova moldados com 3% de cloretos foram empregados na avaliação do desempenho da barreira epoxídica, uma vez que estes não sofreram ataque acelerado de cloretos por meio de ciclos de molhagem e secagem em solução com NaCl, conforme descrito na alínea “b” do Item 4.1.4.3.

de garantir uma boa conexão eletrolítica com a superfície do concreto. A esponja também ajuda a eliminar possíveis erros de leitura provocados por pequenas deformações superficiais do concreto (GEOCISA, 1993). Feito isto, realiza-se uma conexão elétrica entre o aparelho e a armadura por meio de um cabo e um conector metálico. Em seguida, inicia-se o manuseio do aparelho de forma digital, através de entrada e saída de dados.

O equipamento possui três principais componentes: o medidor LG-ECM-06, onde está a fonte de energia, os comandos, a tela de leitura dos resultados, as conexões de entrada e saída de dados, entre as quais está a de transmissão de dados ao computador; o sensor “A”, que tem o corpo de metil metacrilato, onde estão três eletrodos de referência de Cu/CuSO_4 e dois contraeletrodos de aço inoxidável localizados concentricamente; e o sensor “B”, que permite obter a resistividade elétrica, a temperatura e a umidade relativa do ambiente.

O procedimento de realização das medidas consiste na seguinte sequência:

- a) Selecionar cuidadosamente o local a ser medido;
- b) Verificar criteriosamente todas as conexões do equipamento e entre o equipamento e a estrutura, garantindo-se que o circuito esteja fechado;
- c) Conferir se há continuidade elétrica entre a barra de aço onde foi feita a conexão elétrica e a barra que está sendo medida. A conexão elétrica deve ser garantida pelos os estribos;
- d) Permitir o contato iônico eletrolítico na superfície de ensaio que garanta o fechamento do circuito. Para tanto se recomenda umedecer uma esponja e colocá-la entre a superfície do sensor “a” e a superfície do concreto;
- e) Por fim, devem-se seguir as instruções do aparelho e ser capaz de avaliar os resultados obtidos.

Mais detalhes sobre o GECOR6 podem ser obtidos no catálogo técnico do fabricante (GEOCISA, 1993), ou, ainda, no trabalho de dissertação de Brito (1997). A Figura 4.3 apresenta o GECOR6.



Figura 4.3 – Equipamento utilizado para a realização das medidas eletroquímicas.

4.1.3.1 Densidade de corrente de corrosão (i_{corr})

De acordo com Araújo (2004), a deterioração das armaduras de aço no concreto implica na existência de uma reação de oxidação e uma de redução, em presença de umidade e oxigênio. Na superfície do metal surgem duas regiões, uma anódica (oxidação) e outra catódica (de consumo de elétrons), onde ocorre a redução de alguma substância em meio aquoso, neste caso o oxigênio.

O GEGOR 6 aplica uma pequena corrente na armadura a fim de quantificar a resistência à polarização do metal (R_p). Assim, a intensidade de corrente gerada pelas reações de oxidação e redução do metal em presença de umidade e oxigênio chama-se i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), permitindo, assim, estimar a velocidade de corrente de corrosão.

A resistência à polarização representa a inércia que o sistema possui em desenvolver um processo de transferência de cargas elétricas, ou seja, um processo eletroquímico de corrosão, frente a uma polarização imposta. Utiliza o estímulo de uma diferença de potencial aplicada à armadura, exercendo uma polarização ao redor do potencial de eletrodo original (GONZÁLEZ e ANDRADE, 1988). A resistência de polarização é obtida

da pendente da curva formada pela variação de corrente (ΔI) em função da variação do potencial (ΔE).

$$Rp = \Delta E / \Delta I$$

A velocidade ou intensidade instantânea de corrosão (i_{corr}) é obtida a partir da resistência a polarização e da aplicação da fórmula de Stern e Geary (1957), segundo a Equação 4.1.

$$i_{\text{corr}} = B / Rp \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde, B é uma constante que varia em função das características do sistema metal/meio e que dificilmente abandona o intervalo entre 13 e 52 mV.

Dividindo-se a intensidade de corrosão (I_{corr}) pela área efetiva de estudo, obtém-se a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}), conforme mostra a Equação 4.2.

$$i_{\text{corr}} = B / Rp \cdot A \quad (\text{Equação 4.2})$$

onde, o i_{corr} é obtido em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, B é dado em mV, Rp é dada K.r e A é dado em cm^2 .

A Tabela 4.1 apresenta um critério de avaliação da importância da corrosão, em função da velocidade do processo (i_{corr}).

Tabela 4.1 – Critérios de avaliação para os resultados de velocidade de corrosão (ALONSO & ANDRADE, 1990).

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Velocidade do processo
> 1	Alta
0,5 – 1	Moderada a alta
0,2 - 0,5	Baixa a moderada
< 0,1 - 0,2	Desprezível

4.1.3.2 Potencial de corrosão (E_{corr})

A utilização do potencial de corrosão tem a vantagem por ser uma técnica não-destrutiva e de fácil aplicação, não sendo necessário o emprego de aparelhos caros e

sofisticados. Porém, apresenta a desvantagem de fornecer uma idéia relativa e aproximada do processo de corrosão instalado sobre a armadura, ou seja, do seu registro não se obtém nenhum dado quantitativo da cinética de corrosão (FIGUEIREDO, 1994).

A medida do Potencial de corrosão da armadura, de acordo com Nepomuceno (1992), consiste no registro da diferença de voltagem entre a armadura e um eletrodo de referência, que é colocado em contato com a superfície do concreto. A ASTM C-876 (1991) apresenta uma correlação entre intervalos de diferença de potencial, em relação a um eletrodo de referência de $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$, e a probabilidade de ocorrência de corrosão (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Critérios de avaliação da corrosão através de medidas de potencial de corrosão, segundo a ASTM C-876 (1991).

E_{corr} (mV) - $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$	Probabilidade de corrosão
> -200	< 5%
Entre -200 e -350	50% (região de incerteza)
< -350	>95%

4.1.4 Realização dos reparos

Os reparos foram feitos por Tinoco (2001) seguindo os procedimentos descritos do Item 4.1.4.2.

Os reparos foram realizados com e sem aplicação de adesivo de base epóxi sobre a superfície do concreto contaminado, com a finalidade de avaliar a influência deste material como barreira contra a difusão dos cloretos remanescentes no concreto contaminado.

4.1.4.1 Monitoramento inicial da corrosão

Segundo Tinoco (2001), logo após a moldagem dos corpos-de-prova foi feito um acompanhamento do estado passivo da armadura por meio das medidas de densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e do potencial de corrosão (E_{corr}), até que fosse identificada a corrosão. A corrosão era esperada, uma vez que se adicionou 1% ou 3% de cloretos na água de amassamento dos concretos.

4.1.4.2 Reparo dos corpos-de-prova corroídos

a) Corte e escarificação do concreto

Uma vez constatada a iniciação da corrosão, realizou-se o corte e a escarificação do concreto até a exposição total da armadura principal. O primeiro passo consistiu na delimitação da área a ser reparada, com o auxílio de um disco de corte diamantado, conforme mostra a Figura 4.4. A profundidade de corte foi de, aproximadamente, 25 mm. Em seguida, quebrou-se e removeu-se, com o auxílio de marretas e ponteiros, parte do concreto contaminado. A escarificação foi feita de maneira que permanecesse um espaço livre de, no mínimo, 20 mm entre a armadura e o substrato, permitindo um perfeito preenchimento da seção, conforme ilustra a Figura 4.5.



Figura 4.4 – Delimitação da região a ser reparada com disco de corte diamantado (TINOCO, 2001).



Figura 4.5 – Corte e escarificação dos corpos-de-prova até exposição total da armadura principal (TINOCO, 2001).

b) Limpeza da armadura e do concreto contaminado

Após a exposição da armadura, foi feita a limpeza da mesma através de um jateamento de areia, conforme ilustra a Figura 4.6, o que levou a total remoção do concreto contaminado devido à ação abrasiva da areia. A Figura 4.7 mostra o aspecto das armaduras logo após o jateamento abrasivo.

A limpeza foi concluída com uma posterior lavagem do aço por meio de um hidrojateamento, seguido de uma lavagem com água quente, colaborando, assim, com a eliminação ou remoção dos cloretos (Figuras 4.8 e 4.9).



Figura 4.6 – Limpeza das armaduras com jateamento de areia (TINOCO,2001).



Figura 4.7 - Aspecto das armaduras após o jateamento de areia (TINOCO, 2001).



Figura 4.8 – Complementação da limpeza das armaduras com hidrojetamento (TINOCO, 2001).



Figura 4.9 – Conclusão da limpeza das armaduras com lavagem com água quente (TINOCO, 2001).

c) Preparo do substrato

De acordo com Tinoco (2001), algumas horas antes da aplicação dos materiais de reparo, o substrato foi saturado com água limpa, no caso da aplicação dos materiais de reparo sem o uso de ponte de aderência de base epoxídica. No entanto, evitava-se o excesso de água na hora do lançamento, uma vez que, de acordo com recomendações do fabricante, o concreto deve encontrar-se na condição de “saturada com superfície seca”.

Os reparos foram executados com e sem a aplicação de adesivo epoxídico bicomponente entre o substrato e a área reparada, conforme ilustra a Figura 4.10. A aplicação foi cuidadosa, com a preocupação de promover uma camada íntegra e contínua de adesivo sobre o substrato.



Figura 4.10 – Aplicação de adesivo epoxídico como ponte de aderência e barreira contra a difusão dos Cl^- do concreto base para o material de reparo (TINOCO, 2001).

d) Mistura e aplicação dos materiais e sistemas de reparo

O preparo e aplicação dos materiais de reparo seguiram todas as recomendações e especificações do fabricante. A homogeneização foi executada por meio de um misturador de ação forçada e com capacidade adequada. Para tanto se utilizou uma furadeira portátil de

baixa rotação (400/500 rpm) com uma hélice metálica adaptada para tal serviço (TINOCO, 2001).

O microconcreto fluido e a argamassa com inibidor, já vêm pré-misturados em embalagens de 30 kg, onde é necessário, apenas, adicionar a quantidade de água especificada, que pode variar um pouco em função da umidade relativa e da temperatura do ambiente, em torno de 5%, para mais ou para menos.

A aplicação, neste caso, foi feita por gravidade, novamente seguindo-se todas as recomendações do fabricante e observando-se aspectos importantes de tempos de mistura e manuseio, a fim de usufruir os benefícios da fluidez e do processo de expansão. A Figura 4.11 mostra o momento de aplicação dos materiais de reparo.

As características do concreto de referência, empregado como material de reparo, foram apresentadas no Item 4.1.1.1. Este material foi utilizado para fabricação dos doze corpos-de-prova.



Figura 4.11 – Momento de aplicação do material de reparo (concreto referência) sobre o concreto contaminado com cloretos (TINOCO, 2001).

Imediatamente após a moldagem, os corpos-de-prova foram encaminhados à câmara úmida e, 24 horas depois, com a retirada das fôrmas, os CP's passaram a receber molhagens diárias, durante sete dias, com o objetivo de manter as superfícies sempre úmidas.

4.1.4.3 Monitoramento dos corpos-de-prova

a) Constatação da passivação

Depois de executados os reparos, fez-se o acompanhamento dos corpos-de-prova por meio de técnicas eletroquímicas. Desta forma, observou-se o estado de passivação das armaduras reparadas, para que fosse possível dar início aos ataques com cloretos, após ser constatada a passivação (TINOCO, 2001).

b) Ataque acelerado por cloretos

Uma vez constatada a passivação das armaduras, os corpos-de-prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem em solução com 2% de NaCl. Importante ressaltar que os seis corpos-de-prova com 3% de íons cloreto na água de amassamento, a partir do NaCl, não foram submetidos ao ataque acelerado por cloretos por não entrarem em estado de passivação, durante o período de monitoramento realizado por Tinoco (2001). Devido a isto, estes corpos-de-prova se tornaram um importante objeto de pesquisa para a avaliação do desempenho da barreira epoxídica contra à difusão dos cloretos do concreto contaminado para a região reparada.

Os ciclos foram realizados imergindo os CP's durante dois dias e secando-os durante cinco dias em ambiente com umidade controlada de $50 \pm 10\%$. A razão para a realização deste procedimento justifica-se pela capacidade que os materiais possuem de absorver água mais rapidamente do que de perdê-la (ANDRADE, 1992), desde que tais ações sejam executadas nas mesmas condições de umidade e temperatura ambiental.

Este ensaio simula a ação continuada dos íons agressivos sobre as estruturas de concreto, após a execução dos reparos. Os métodos acelerados que induzem a corrosão apresentam resultados capazes de indicar a eficiência das técnicas e dos materiais de reparo utilizados com vistas à durabilidade. Portanto, trazem subsídios importantes na escolha do procedimento correto para reparo e a recuperação de estruturas de concreto armado deterioradas pela corrosão das armaduras, mais especificamente provocada por cloretos.

4.1.5 Monitoramento dos corpos-de-prova na etapa I (primeira parte)

Esta etapa é a continuidade da avaliação da eficácia dos sistemas de reparo localizados utilizados por Tinoco (2001), verificando ao longo de mais de cinco anos como se comportaram os sistemas de reparo localizados empregados. Procurou-se, dessa forma, verificar qual dos sistemas de reparo utilizados foi o mais eficaz após o período de tempo contemplando, entre o ano de 2001 e 2006.

Para a realização desta etapa foi realizado um monitoramento dos corpos-de-prova por meio das medidas eletroquímicas i_{corr} (velocidade de corrosão) e E_{corr} (potencial de corrosão) e R_{ohm} (resistência ôhmica). Este monitoramento foi realizado em dois períodos de um mês, cada um, sendo que o primeiro período corresponde ao mês de outubro do ano de 2005 e o segundo período ao mês de fevereiro do ano de 2006. Importante ressaltar, que durante estes períodos de avaliações, os corpos-de-prova permaneceram na câmara úmida, o que favoreceu o desenvolvimento da corrosão devido à diminuição da resistividade do concreto e do material de reparo.

Depois de obtidos, os dados foram transferidos para uma planilha, juntamente com os resultados da pesquisa de mestrado de Tinoco (2001) e dos resultados obtidos em um trabalho de conclusão de curso no ano de 2004. O conjunto dos resultados e as análises são apresentadas no Item 5.1.1.

4.1.6 Avaliação da difusão dos cloretos através dos sistemas de reparo e da ponte de aderência epoxídica (Segunda Parte da etapa I)

Nesta segunda parte da etapa I foram colhidas amostras de concreto pulverizado em diferentes profundidades dos corpos-de-prova que foram fabricadas com 3% de íons cloreto, em relação à massa de cimento, colocados na água de amassamento (Item 4.1.2.1), a partir do NaCl, e que “não” foram submetidos aos ciclos de molhagem e secagem em solução com 2% de NaCl. Estas amostras foram utilizadas para a obtenção do teor de íons cloreto em várias profundidades dos corpos-de-prova, obtendo, desta forma, um perfil de cloretos x profundidade, a partir da interface entre o concreto contaminado e a região reparada. Com estes perfis foi possível analisar como ocorreu o processo de difusão dos íons cloreto, através dos materiais de reparo e da barreira epoxídica ao longo dos cinco anos.

4.1.6.1 Retirada das amostras pulverizadas do concreto

Estas amostras foram colhidas por meio de uma furadeira de bancada, de baixa rotação, com brocas de vídia, prumo fixo e controlador de profundidade, conforme mostra a Figura 4.13. Foram colhidas seis amostras de profundidades diferentes na área não-reparada e cinco amostras de profundidades diferentes na área reparada, obtendo-se um total de onze amostras em cada corpo-de-prova. Antes de colher as amostras os corpos-de-prova foram rompidos por compressão axial como mostra a Figura 4.12.



Figura 4.12 – Rompimento de corpo-de-prova por compressão axial.

Com os corpos-de-prova rompidos, o processo de extração foi facilitado. As Figuras 4.14 e 4.15 mostram, respectivamente, a demarcação e os locais onde foram colhidas as amostras. Os furos realizados para coleta das amostras serão realizados com brocas de vídia, de diferentes diâmetros. Os diâmetros das brocas foram trocados, conforme as espessuras das camadas a serem perfuradas para a retirada das amostras pulverizadas de concreto. Para cada amostra foram realizados vários furos na mesma profundidade ou camada, evitando assim que uma determinada amostra tenha o resultado mascarado, por exemplo, se for realizado um único furo para a remoção do concreto pulverizado e este furo incidisse sobre um agregado, o teor de cloretos da amostra diminuiria consideravelmente.

As amostras foram cuidadosamente colhidas para que não ocorresse mistura de amostras de profundidades diferentes, o que poderia mascarar o resultado e prejudicar as análises.



Figura 4.13 – Perfuração do corpo-de-prova por meio de uma furadeira de bancada para a obtenção das amostras pulverizadas de concreto.



Figura 4.14 – Marcação das camadas de diferentes profundidades a serem perfuradas para extração das amostras de concreto.



Figura 4.15– Visualização do corpo-de-prova após perfurações para retirada de amostras.

As amostras que foram analisadas foram extraídas dos seguintes locais:

a) Na região reparada:

- Da superfície reparada até 0,5 cm de profundidade,
- Entre 1,5 a 2,5 cm as superfície reparada, e
- Entre 3,5 a 4,5 cm de profundidade da superfície reparada.

b) Na região não-reparada:

- Entre 0,5 a 2,5 cm a partir da interface,
- Entre 4,5 a 6,5 cm a partir da interface, e
- Entre 8,0 a 9,5 cm a partir da interface.

Para coleta destas amostras a pessoa responsável estava usando uma luva plástica de polietileno, isenta de cloretos, pincéis e pequenos sacos plásticos, com composição química também isenta de cloretos. Para cada amostra obtida foi utilizado um pincel diferente, evitando a contaminação de novas amostras com íons cloreto de amostras anteriores. Os materiais utilizados são apresentados na Figura 4.16. As amostras foram armazenadas nos sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Química do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A. Os ensaios de teor de íons cloreto foram realizados pelo método de ensaio ASTM C 1152 (ASTM, 2004), o qual refere-se à

determinação de cloretos totais, por meio da diluição do concreto pulverizado em solução ácida.



Figura 4.16 – Materiais utilizados para obtenção das amostras de concreto pulverizado.

4.1.6.2 Determinação do teor de cloretos totais

O ensaio foi realizado de acordo com a ASTM C 1152 (ASTM, 2004) consiste em pesar uma amostra de 10 gramas do concreto pulverizado, em balança com precisão de 0,01 gramas, transferir para um Becker de 250 ml, dispersar em 75 ml de água deionizada e, logo em seguida, adicionar 25 ml de ácido nítrico com concentração de 1:1, desmanchando qualquer torrão com bastão de vidro.

Caso ocorra a percepção de um forte cheiro de sulfeto de hidrogênio, cheiro de ovo podre, deve-se adicionar 3 ml de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), solução 30 % vv, para evitar perda de cloretos.

É necessário realizar uma amostra branca, com a finalidade de verificar se o material utilizado para a realização do ensaio contém alguma evidência de cloretos. Caso positivo, deve-se diminuir o valor encontrado nesta amostra dos resultados das amostras avaliadas. A amostra branca é feita com 75 ml de água deionizada mais 25 ml de ácido

nítrico. Após este processo, as amostras são levadas a uma chapa quente para acelerar as reações.

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram o preparo das amostras no laboratório de Química de Furnas Centrais Elétricas S.A. Após este procedimento, as amostras são levadas para filtragem em um funil com papel filtro, devendo-se enxaguar a proveta e o papel filtro com pequenas porções de água deionizada. A Figura 4.19 mostra a etapa de filtragem das amostras e a Figura 4.20 apresenta as amostras prontas para a etapa de titulação.



Figura 4.17 – Preparo das amostras, mistura das amostras no Becker com 75 ml de água deionizada e 25 ml de ácido nítrico.

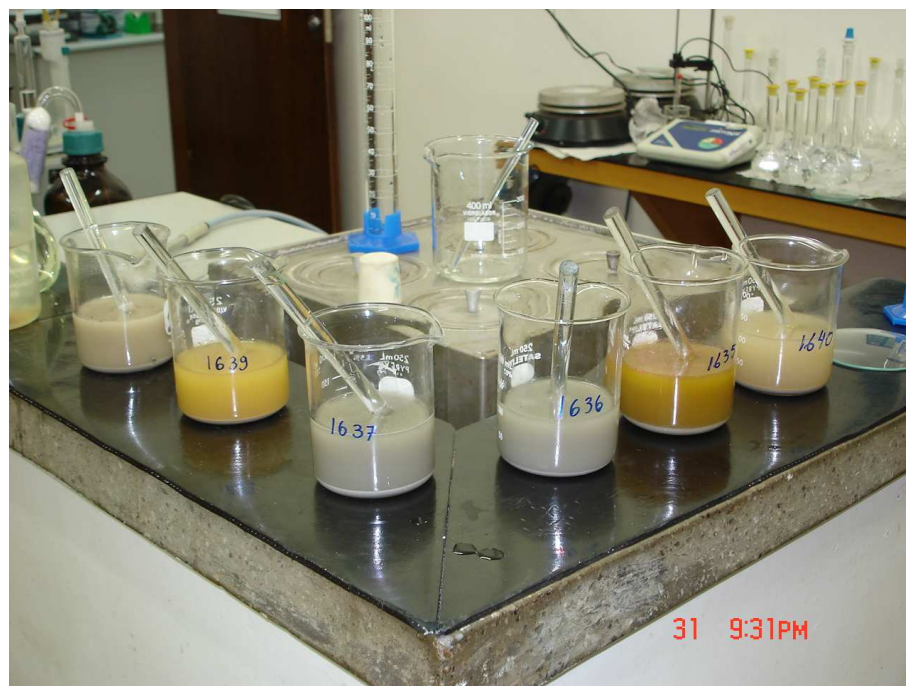


Figura 4.18 – Amostras preparadas, prontas para seguirem para aquecimento e posterior filtragem.



Figura 4.19 – Processo de filtragem das amostras.



Figura 4.20 – Amostras preparadas para o início do processo de titulação.

Na etapa de titulação, transfere-se 50 ml da amostra para um Becker, adiciona-se de 5 a 10 gotas da solução indicadora mista e agita-se o conjunto (Figura 4.21). A solução indicadora mista é composta por 0,5 g de difenilcarbozona e 0,05 g de azul de bromofenol em 75 ml de álcool etílico 95%. Se aparecer uma coloração azul-violeta ou avermelhada, adicionam-se gotas de solução de ácido nítrico 3:997 até a coloração mudar para amarela. Se, após adição da solução indicadora, a solução apresentar uma coloração amarela ou laranja, adicionar gotas de solução de hidróxido de sódio (10g/l) até a coloração mudar para azul violeta. Logo em seguida, adicionar gotas de ácido nítrico 3:997 até a cor mudar para amarela, novamente.

Após esse processo, deve-se titular a amostra com solução de nitrato de mercúrio até o desenvolvimento da coloração azul-violeta (Figura 4.22). Efetuar a amostra branca utilizando 50 ml de água destilada, seguindo o mesmo procedimento descrito para a amostra em análise.



Figura 4.21 – Adição da solução indicadora mista.



Figura 4.22 – Adição do Nitrato de mercúrio até obter a coloração azul-violeta.

Depois de obtido o volume de Nitrato de mercúrio para atingir a coloração azul-violeta na amostra, lança-se os valores na Equação 4.3 descrita abaixo para calcular o percentual de cloretos por volume de argamassa ou concreto.

$$Cl^-, \% = 3.545[(V_1 - V_2) N] / V_{am} \quad (\text{Equação 4.3})$$

onde, V_1 é o volume de nitrato de mercúrio gasto na titulação, V_2 é o volume de nitrato de mercúrio gasto no branco, N é a normalidade real da solução de nitrato de mercúrio e V_{am} é o volume da amostra.

Depois da realização dos ensaios de teor de íons cloreto pelo método da ASTM C 1152 (ASTM, 2004), e de posse dos resultados, elaborou-se os gráficos de teor de íons cloreto x profundidade da amostra. Com isso pode-se analisar a difusão dos íons cloreto ao longo do material de reparo e através da ponte de aderência epoxídica utilizada como barreira contra a difusão dos cloretos existentes no concreto contaminado. Como para cada sistema de reparo foram utilizados dois corpos-de-prova, sendo que, em um corpo-se-prova o reparo foi realizado com a utilização da ponte de aderência epoxídica e com o outro não, desta forma terá como comparar a eficácia desta ponte de aderência epoxídica contra a difusão dos íons cloretos, ver Figura 4.2 deste capítulo, onde apresenta um fluxograma do esquema para execução dos reparos nos CP's.

4.2 ETAPA II: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES SISTEMAS DE LIMPEZA DAS ARMADURAS

4.2.1 Questionário e seleção dos procedimentos de limpeza

Para a seleção dos procedimentos de limpeza, elaborou-se o questionário que se encontra no *Anexo B*. Este questionário foi respondido por atuantes profissionais da área de recuperação de estruturas de diferentes regiões do Brasil e de outros países. Os resultados revelaram as principais técnicas de sistemas de limpeza das armaduras com corrosão por íons cloreto, utilizadas em diferentes localidades. A partir disto, definiu-se quais seriam as técnicas de limpeza de armaduras utilizadas e quais seriam as combinações de técnicas de limpeza de armaduras avaliadas nesta dissertação.

4.2.2 Armaduras a serem submetidas aos procedimentos de limpeza

As armaduras a serem submetidas aos procedimentos de limpeza foram as que se encontravam nos corpos-de-prova utilizados na Etapa I, localizadas nas áreas não-reparadas dos corpos-de-prova com 3% de cloretos. Estas armaduras se encontravam em avançado processo de corrosão, por estarem embebidas em concretos contaminados com íons cloreto, durante mais de cinco anos, conforme pode-se observar nas Figuras 4.23 e 4.24.



Figura 4.23 – Aspecto das armaduras corroídas logo após terem sido retiradas dos corpos de prova com 3% de cloretos.

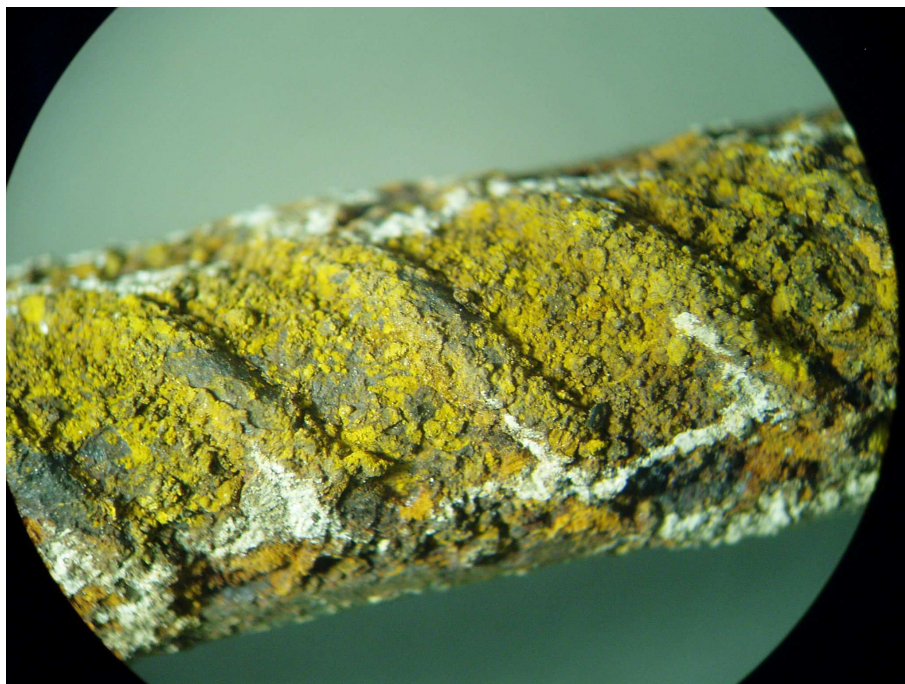


Figura 4.24 – Fotografia de uma microscopia estereoscópica da superfície da armadura, apresentando avançado processo de corrosão.

Inicialmente, como visto anteriormente, estas armaduras foram embebidas em concretos com concentrações de 3% de íons cloreto, a partir do NaCl, incorporados na água de amassamento.

Para retirada das armaduras com diâmetro de 10 mm e comprimento de aproximadamente 40 cm, os corpos-de-prova foram rompidos por meio de compressão axial, conforme apresentado na Figura 4.25, e, em seguida, com auxílio de ponteiros e marretas.



Figura 4.25 – Rompimento dos CP's por compressão axial para facilitar a remoção das armaduras.

4.2.3 Qualidade do ensaio e procedimento

A metodologia encontrada para avaliar se o procedimento e a execução das técnicas de limpeza estavam coerentes e se não havia grandes divergências nos resultados entre as armaduras de uma mesma classe de contaminação (3% de cloretos), com o mesmo procedimento de limpeza, foi a de executar três amostras para cada classe de contaminação das armaduras e cada tipo de procedimento de limpeza escolhido. Assim, se avaliou se ocorreu alguma divergência considerável nos resultados. Esse comportamento divergente poderia ser esperado, uma vez que alguma armadura poderia estar mais deteriorada ou contaminada que as outras, para uma mesma classe de contaminação. Também, no caso de limpeza com escova de aço manual, por se ter dificuldade de se manter, do início ao fim da atividade, os mesmos padrões de limpeza.

4.2.4 Procedimentos de limpeza das armaduras avaliadas

As armaduras foram submetidas a quatro diferentes sistemas de limpeza, exceto as armaduras utilizadas como referência, que não foram submetidas a nenhum procedimento de limpeza.

As divisões das amostras e as diferentes técnicas de limpeza escolhidas para avaliação nesta pesquisa se encontram esquematizada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Sistemas de limpeza avaliados e quantidades de amostras para cada procedimento.

Tipo de limpeza	Quantidade de amostras retiradas dos CP's com 3% de íons cloreto
Armaduras sem limpeza (referência)	3
Escova de aço manual	3
Jateamento de areia à seco + Jateamento de água fria sob pressão.	3
Jateamento de areia à seco + Jateamento de água quente sob pressão.	3
Jateamento de água com pressão acima de 6000 psi.	3
Total de amostras	15 amostras

a) Armaduras sem procedimento de limpeza

Estas amostras não foram submetidas a nenhum processo de limpeza com a finalidade de servirem como amostras de referência para as demais técnicas de limpeza.

b) Limpeza com escova de aço manual

O procedimento de limpeza das armaduras com escova de aço manual foi executado conforme o que vem sendo adotado pelo meio técnico, cuidando-se para que não ocorra contaminação das barras por outros meios. O procedimento foi executado com luvas de polipropileno, isenta de cloretos, e escova de aço, conforme mostra a Figura 4.26. Foi empregada uma luva para cada barra a ser limpa. O tempo de limpeza em cada armadura variava entre 15 a 20 minutos, dependendo do grau de deterioração.



Figura 4.26 – Procedimento de limpeza das armaduras por meio de escova de aço.

Após a limpeza das barras, estas eram devidamente armazenadas em sacos plásticos e identificadas com etiquetas, conforme mostra a Figura 4.27.



Figura 4.27 – Forma de armazenamento de todas as armaduras até momento da nova concretagem.

c) Jateamento de areia à seco combinado com jateamento de água fria com baixa pressão (≈ 1600 psi)

As armaduras deste procedimento foram primeiramente submetidas ao jateamento de areia à seco, conforme mostra a Figura 4.28, armazenadas conforme a Figura 4.27 e levadas para realização de um hidrojateamento de água fria com pressão de aproximadamente 1600 psi, conforme a Figura 4.29. Após o processo de hidrojateamento estas foram secadas ao ar livre e novamente armazenadas conforme a Figura 4.27.



Figura 4.28 – Jateamento de areia à seco.



Figura 4.29 – Hidrojateamento, após jateamento de areia à seco.

d) Jateamento de areia à seco combinado com jateamento com água quente com baixa pressão (≈ 1600 psi)

O procedimento realizado nesta técnica foi o mesmo utilizado no processo anterior (alínea “c”), diferindo apenas por ter se utilizado água quente à $50^\circ \pm 10^\circ$ C no processo de hidrojateamento.

e) Hidrojateamento com pressão de aproximadamente 6000 psi

Para a execução deste procedimento, as seis barras foram enviadas a empresa Pires, Giovanetti e guardia em São Paulo – SP, já que não foi encontrado este equipamento na região, o que impossibilitou a concretagem destas armaduras no mesmo tempo que as demais.

As armaduras em processo de corrosão foram enviadas, separadamente, em sacos plásticos, acompanhadas de sacos plásticos limpos e já identificados para o armazenamento das barras, após o procedimento de limpeza, luvas de polietileno para manuseio das barras, evitando a contaminação devido ao manuseio, rolo de etiquetas de identificação, caso necessário e rolo de fitas para vedação adequada das amostras. Os procedimentos a serem adotados durante a limpeza, conforme listados a seguir, foram enviados a empresa que executou a limpeza das barras.

1. A limpeza deverá ser realizada com pressão de aproximadamente 6000 psi, caso haja alguma alteração, por favor, informar. O procedimento de limpeza deverá ser realizado de acordo com a forma usualmente utilizado pelo meio técnico, sem nenhuma alteração;
2. Após limpeza das armaduras com hidrojateamento, as armaduras deverão ser secadas ao ar livre, em local isento de contaminações de íons cloreto;
3. Junto às armaduras, seguem luvas de polietileno, isenta de cloretos, as quais servirão para manuseio das armaduras após limpeza, evitando, desta forma, qualquer contaminação;
4. Seguem três sacos plásticos, já identificados, para armazenar as três armaduras com 3% de íons cloreto, devendo ser armazenada uma armadura em cada saco plástico. Segue, também, sacos adicionais, caso necessário, e um rolo de etiqueta de identificação, para que não ocorra nenhum problema de troca de amostras; e
5. Segue uma fita para vedação dos sacos plásticos.

4.2.5 Microscopia estereoscópica

Antes e depois da realização dos procedimentos de limpeza, as armaduras foram observadas, atenciosamente, a olho nú. Porém, buscando uma visualização detalhada dos produtos de corrosão e pites de corrosão sobre a superfície das armaduras, após os procedimentos de limpeza, utilizou-se da técnica de microscopia estereoscópica. O microscópio estereoscópico utilizado foi um MST 131 fabricado pela PZO WARSZAWA. As ampliações utilizadas nas análises foram de 6,3 a 40 vezes. As fotografias de microscopia estereoscópica são apresentadas no Item 5.2.1 no capítulo 5.

4.2.6 Concretagem das armaduras após procedimentos de limpeza

Depois de realizado os processos de limpeza das armaduras, cada uma delas foi novamente concretada em fôrmas de madeirite de 20 x 20 x 6 cm, utilizando-se, também, espaçadores plásticos para obter uma uniformidade no cobrimento, conforme mostrado nas Figuras 4.30 e 4.31.

O traço unitário em massa do concreto utilizado, para um consumo de cimento de 363 Kg por m³, foi de 1 : 2,44 : 2,17 : 0,65 (cimento: areia : brita 0 : água/cimento).

A média da resistência à compressão aos 28 dias foi de 20,6 MPa.

O cimento Portland utilizado foi o CP II – Z – 32, segundo a denominação da ABNT – NBR 11578/1991 (Cimento Portland Composto com Pozolana).

A consistência do concreto foi medida por meio do método da determinação da consistência pelo abatimento do tronco do cone, ABNT – NBR 7223/1992. O valor estabelecido foi de 100 ± 20 mm.

A mistura foi feita mecanicamente por meio de uma betoneira com capacidade de 120 litros.

A areia utilizada foi do tipo média, de origem natural (areia de rio). Sua caracterização foi feita através da realização dos ensaios de Massa unitária (ABNT - NBR 7251/1982), Módulo de finura e Diâmetro máximo (ABNT - NBR 7217/1987), Massa específica (ABNT – NBR 9776/1986) e Inchamento (ABNT – NBR 6467/1987).

O agregado graúdo utilizado foi do tipo “0” (12,5mm), de origem natural.

A água utilizada foi aquela disponível na rede de abastecimento local.

A Figura 4.31 apresenta detalhe da fita isolante utilizada na armadura entre a parte interior do concreto e a parte externa, com o propósito de evitar uma diferença de potencial promovida pela diferença de aeração neste ponto (concentração diferente de oxigênio na mesma armadura).

A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada manualmente. O adensamento foi realizado em uma mesa vibratória, como apresenta a Figura 4.32.

Sabe-se que o concreto utilizado não é um material adequado para serviços de recuperação estrutural, porém não se queria que a composição ou características do material, como a baixa permeabilidade, interferisse no objetivo desta etapa, ou seja, a eficácia das técnicas de limpeza utilizadas.



Figura 4.30 – Formas de compensado com as armaduras, prontas para serem concretadas.



Figura 4.31 – Detalhe do espaçador plástico e da fita isolante na armadura, com a finalidade de manter o cobrimento e evitar uma diferença de aeração, respectivamente.



Figura 4.32 – Vibração dos corpos-de-prova em mesa vibratória no Laboratório de Materiais de Construção da EEC/UFG.

4.2.7 Armazenamento dos corpos-de-prova

Logo após a concretagem das armaduras, os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida, com umidade relativa de $90 \pm 10\%$ (Figura 4.33), até 71 dias, com exceção dos corpos-de-prova com armaduras limpas por hidrojateamento de alta pressão (6000 psi), os quais permaneceram neste ambiente de cura até os 113º dia, uma vez que estas armaduras foram concretadas alguns meses depois, como já explicado no Item 4.5.4 (e). O monitoramento das armaduras foi feito em ambiente de câmara úmida, esperando que o processo de corrosão fosse controlado mesmo existindo um ambiente favorável ao desenvolvimento da corrosão.

Após o período na câmara úmida, os corpos-de-prova foram levados ao Laboratório de Ensaio de Corrosão da EEC/UFG, onde a umidade relativa se encontra em $40 \pm 10\%$ e a temperatura em $25 \pm 5^\circ\text{C}$. A intenção de armazenar estes corpos-de-prova em um ambiente de baixa umidade relativa foi para que ocorresse uma estabilização no processo de corrosão, já que os resultados das medidas eletroquímicas, principalmente dos resultados de intensidade de corrente de corrosão, estavam tendo muitos picos, divergências, dificultando as análises das medidas eletroquímicas.

Verificando-se a estabilização dos resultados das medidas eletroquímicas, as amostras foram novamente armazenadas em câmara úmida (Figura 4.33), ambiente bastante favorável para o processo de corrosão, para realizar a avaliação final dos sistemas de limpeza.



Figura 4.33 – Corpos-de-prova armazenados na câmara úmida do Laboratório de Materiais de Construção da EEC/UFG.

4.2.8 Monitoramento dos corpos-de-prova

O monitoramento dos corpos-de-prova foi feito por meio de medidas eletroquímicas, por um período de aproximadamente de oito meses. A Fotografia 4.34 mostra o momento da realização de uma medida. Durante este período os corpos-de-prova foram armazenados durante 72 dias em câmara úmida, com umidade relativa entre $90 \pm 10 \%$. Após este período, os corpos-de-prova foram levados para o Laboratório de Corrosão, o qual possui umidade relativa do ar controlada entre $40 \pm 10 \%$ e temperatura em $25 \pm 5^\circ\text{C}$, objetivando a estabilização nas medidas eletroquímicas, sendo, na sequência, novamente, devolvidos à câmara úmida para avaliação final.

Com base nos gráficos de velocidade de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) obtidos, foram verificados quais os sistemas de limpeza das armaduras foram eficazes, permitindo que a armadura se repassivasse ou apresentasse níveis aceitáveis de corrosão.



Figura 4.34 – Monitoramento dos corpos-de-prova por meio do GECOR6, avaliando os sistemas de limpeza das armaduras.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nas duas Etapas da metodologia apresentadas no capítulo 4.

Na primeira Etapa avaliou-se o comportamento dos reparos localizados realizados por Tinoco (2001), após mais de cinco anos de suas execuções, buscando informações de como se encontra o estado da armadura e qual dos sistemas de reparo utilizados teve o melhor desempenho quanto a capacidade de proteger as armaduras contra a corrosão.

Para a avaliação dos sistemas de reparo, a primeira etapa foi dividida em duas partes. Na primeira parte, foram utilizadas as medidas eletroquímicas de velocidade de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}), e, na segunda parte, coletaram-se amostras pulverizadas das regiões reparadas e não-reparadas para determinação dos teores de cloretos totais. As amostras dos materiais foram retiradas dos corpos-de-prova com 3% de cloretos, com a finalidade de avaliar a difusão dos íons cloreto através de uma ponte de aderência epoxídica utilizada como barreira contra a difusão destes agentes agressivos, bem como a difusão destes íons através dos materiais de reparo.

Na segunda Etapa fez-se a avaliação dos sistemas de limpeza das armaduras com corrosão por íons cloreto, submetendo as armaduras dos corpos-de-prova que estavam em avançado processo de corrosão, a diferentes técnicas de limpeza. As armadura limpas foram novamente concretadas. Posteriormente, monitorou as armaduras por meio de medidas eletroquímicas, durante um período de, aproximadamente, oito meses, a fim de verificar quais dos sistemas de limpeza foram mais eficazes, proporcionando a passivação das armaduras ou um maior controle da corrosão.

5.1 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE REPARO

5.1.1 Avaliação dos sistemas de reparo por meio de medidas eletroquímicas

5.1.1.1 Concretos contaminados com 1% de cloretos

a) Intensidade de corrente de corrosão (i_{corr})

Os resultados das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 representam o comportamento dos sistemas de reparo avaliados, desde a pesquisa de Tinoco (2001), até o presente momento, em relação à velocidade ou densidade de corrente de corrosão. Cada figura apresenta os resultados de corpos-de-prova feitos com o mesmo material de reparo, porém um com a utilização de uma ponte de aderência epoxídica e o outro sem a utilização desta ponte de aderência.

As análises levam em consideração, principalmente, os resultados obtidos nesta dissertação, ou seja, o comportamento após mais de cinco anos da realização dos reparos.

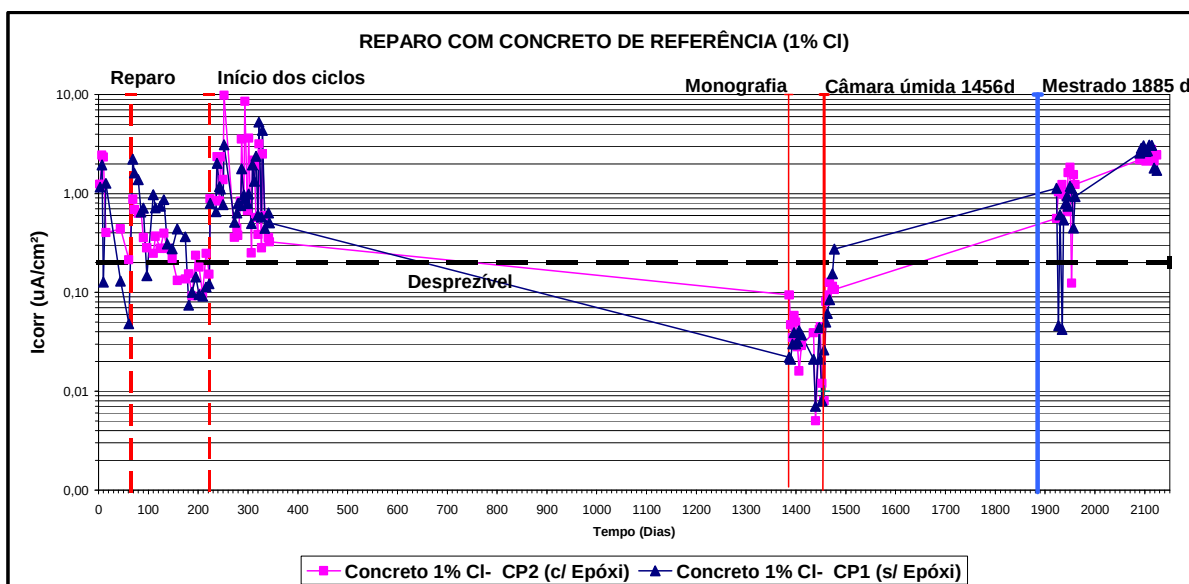


Figura 5.1 – Densidade de corrente de corrosão da armadura em função do tempo do concreto contaminado com 1% de cloretos, reparado com concreto referência.

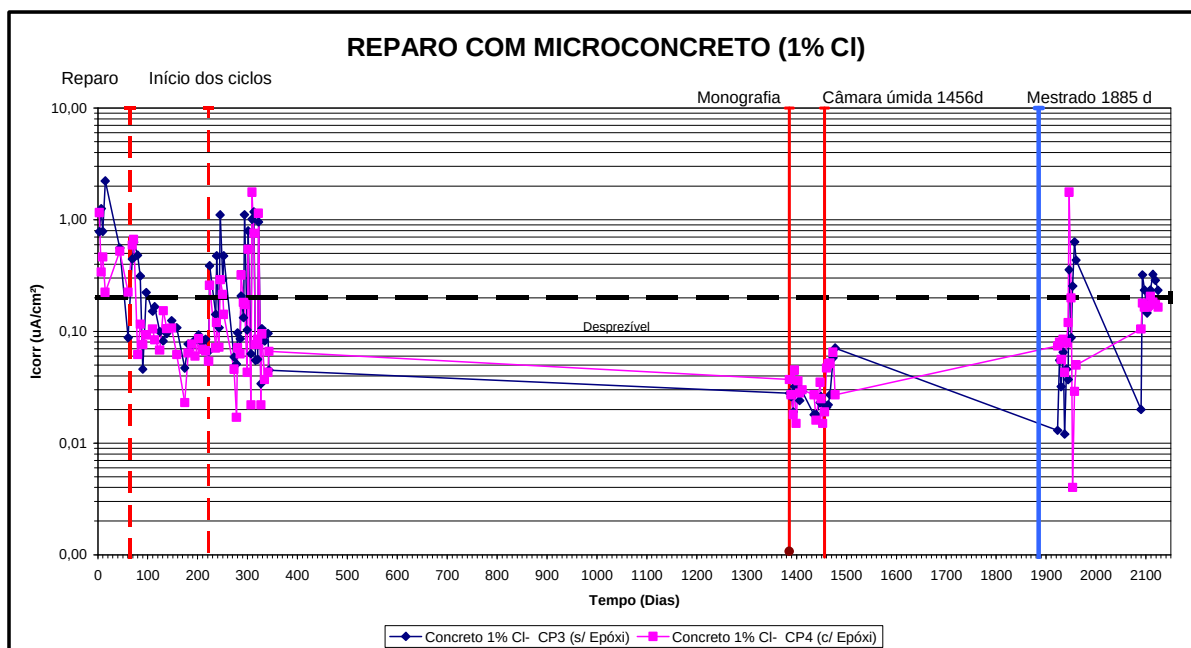


Figura 5.2 - Densidade de corrente de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com microconcreto.

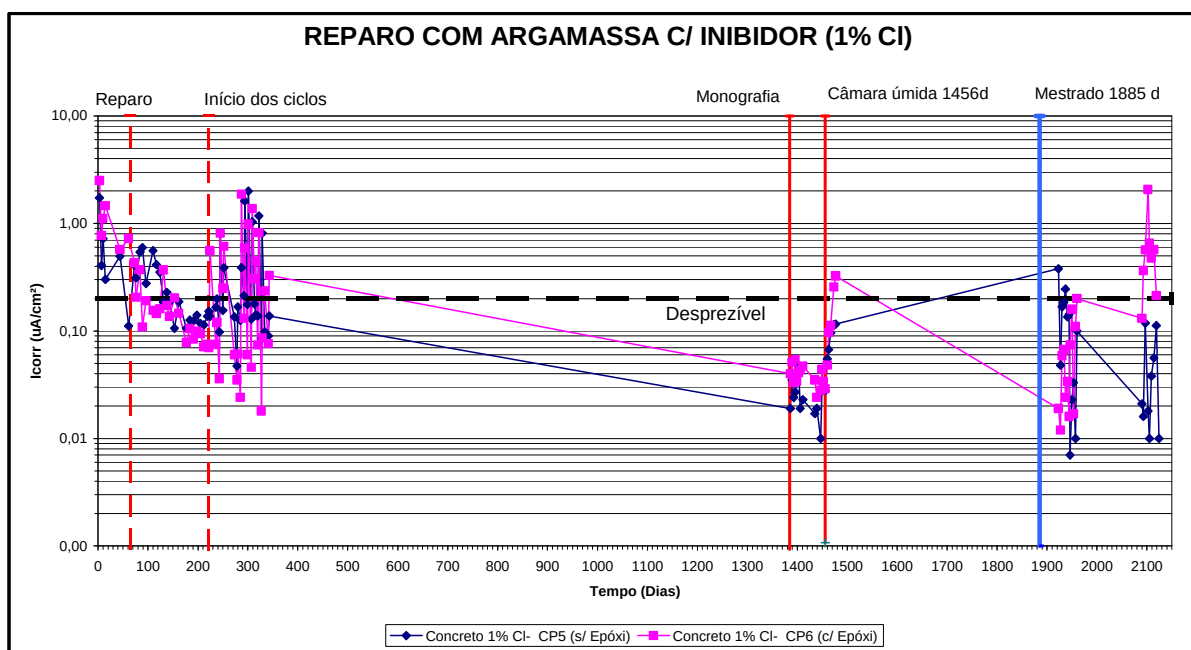


Figura 5.3 - Densidade de corrente de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com argamassa contendo inibidor de corrosão.

Após mais de cinco anos da realização dos reparos localizados nos corpos-de-prova (CP's) com 1% de cloretos, que foram submetidos aos ciclos de molhagem e secagem em solução com 2% de NaCl, após a constatação da passividade das armaduras pôde-se observar que nos CP's reparados com o **concreto referência**, os níveis da velocidade de

corrosão se encontram altos, de acordo com a classificação da Tabela 4.1, no Item 4.2.2.1, ou seja, maiores que $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, sendo, então, classificados como tendo densidade de corrente de corrosão alta. O concreto referência em relação aos demais sistemas de reparo apresentou os resultados mais desfavoráveis ao longo desses anos, quanto a intensidade do processo de corrosão.

O corpo-de-prova reparado com **microconcreto** e com a utilização da ponte de aderência epoxídica apresentou densidade de corrente de corrosão desprezível, ou seja, menor que $0,1 - 0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Já o corpo-de-prova reparado também com **microconcreto** sem a utilização da ponte de aderência epoxídica pode ser classificado como tendo velocidade de corrosão de baixa a moderada, uma vez que os valores se encontram entre $0,2 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Os sistemas reparados com **argamassa com inibidor** apresentaram resultados muito semelhantes aos sistemas reparados com microconcreto. O corpo-de-prova de argamassa com inibidor com a ponte de aderência epoxídica apresentou densidade de corrente de corrosão entre desprezível a baixa e moderada. O corpo-de-prova sem a ponte de aderência epoxídica apresentou intensidade de corrosão desprezível.

Importante lembrar que, como estes corpos-de-prova receberam ciclos de molhagem e secagem em solução com 2% de NaCl, estando todos os lados dos corpos-de-prova vulneráveis a penetração dos íons cloreto pelas faces externas, não se pode concluir sobre a eficácia da ponte de aderência epoxídica na função de barreira contra estes agentes agressivos. Esta avaliação terá melhor embasamento nos corpos-de-prova com 3% de íons cloreto, que não receberam os ciclos de molhagem e secagem em solução com cloretos. Nesse caso a coleta de amostras, à diferentes profundidades, para formar um perfil de penetração de cloretos, pode informar as condições de difusão dos cloretos através da barreira epoxídica sobre o concreto.

b) Potencial de corrosão (E_{corr})

A medida do potencial de corrosão (E_{corr}) da armadura consiste no registro da diferença de voltagem entre a armadura e um eletrodo de referência, que é colocado em contato com a superfície do concreto.

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os resultados de E_{corr} obtidos com os sistemas de reparo estudados, desde a pesquisa de Tinoco (2001) até o presente momento.

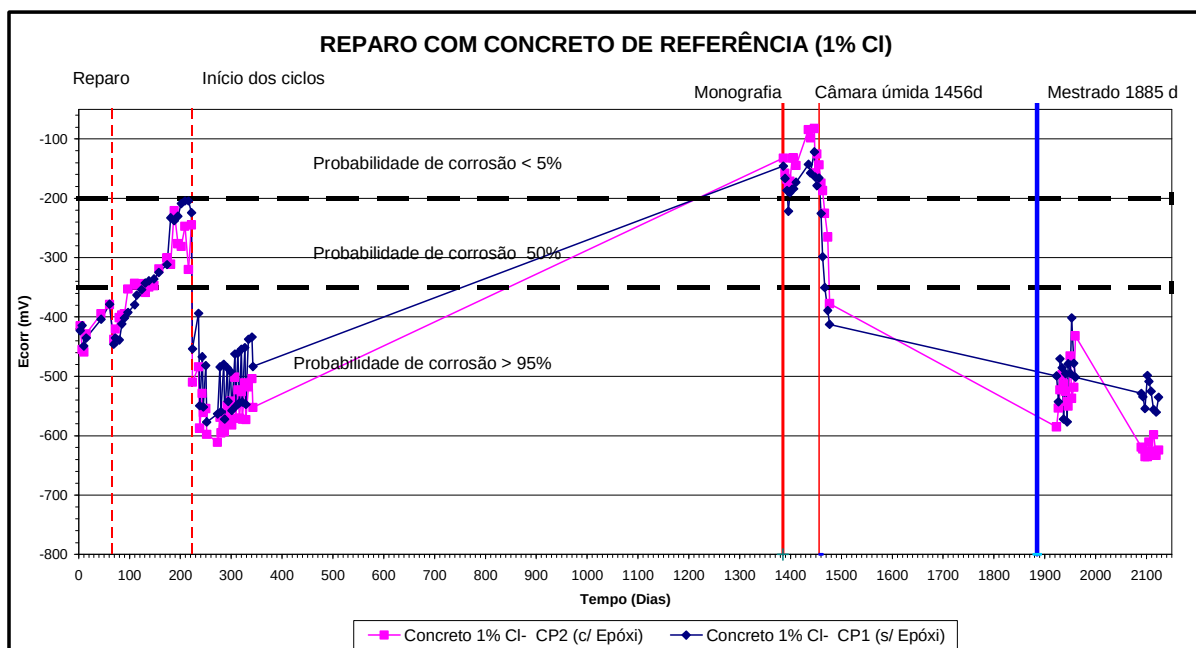


Figura 5.4 - Potencial de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com concreto de referência.

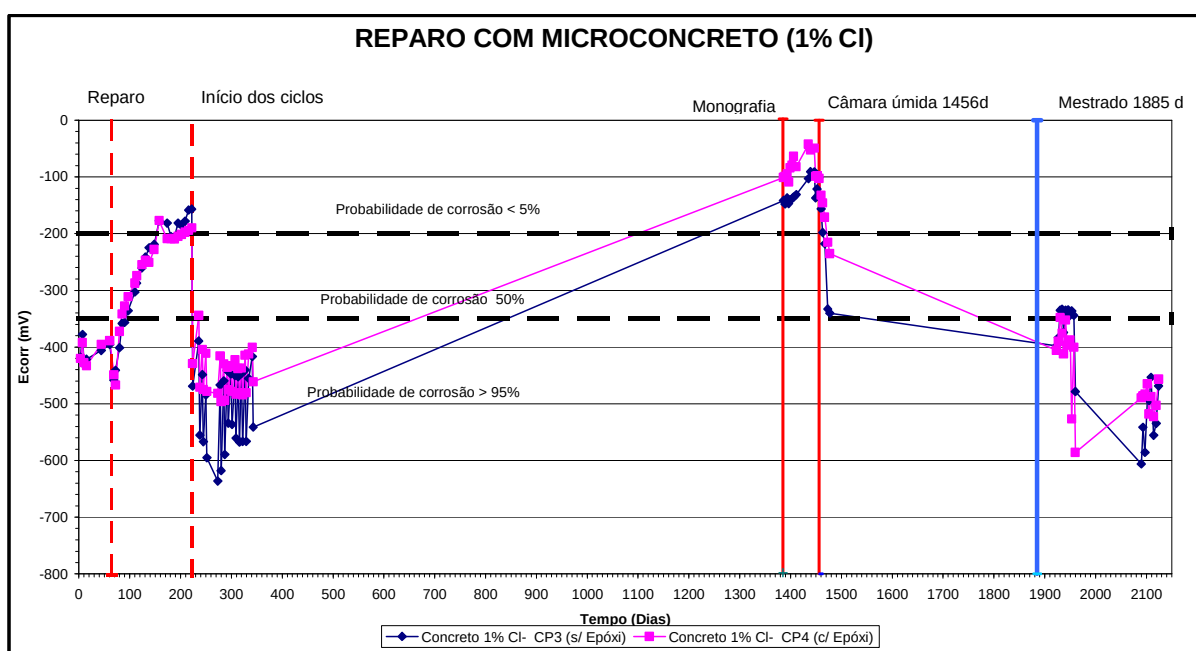


Figura 5.5 - Potencial de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com microconcreto.

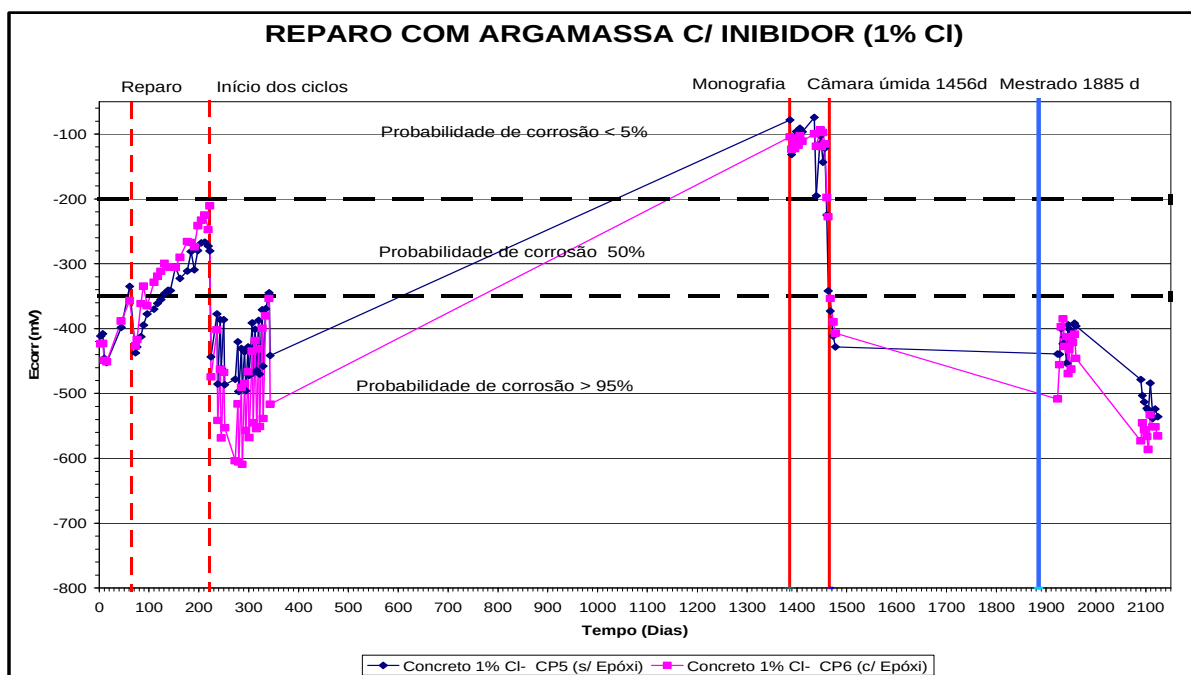


Figura 5.6 - Potencial de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 1% de Cl^- , reparado com argamassa contendo inibidor de corrosão.

Os resultados de E_{corr} mostram que todos os sistemas de reparo não protegem as armaduras nas condições ensaiadas, registrando potenciais de corrosão indicativos de probabilidade de corrosão maior que 95%.

Os reparos realizados com **concreto referência** apresentaram os valores mais eletronegativos em relação aos demais sistemas, estando na faixa entre -500 mV a -630 mV. Entretanto, verifica-se que, todos sistemas se encontram em intervalos de probabilidades de corrosão maiores que 95% de acordo com a Tabela 4.2 no item 4.2.2.2.

Os sistemas com **microconcreto**, os valores apresentados se encontram na faixa de -350 mV a -550mV.

No caso da **argamassa com inibidor** os valores de potencial de corrosão estiveram próximos aos do microconcreto, estando entre -400mV a -550 mV.

5.1.1.2 Concretos contaminados com 3 % de cloretos

a) Intensidade de corrente de corrosão (i_{corr})

As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam os resultados referentes à velocidade de corrosão das armaduras dos corpos-de-prova contaminados com 3 % de íons cloretos, desde a pesquisa de Tinoco (2001) até o presente momento. Estes corpos-de-prova não receberam os ciclos de molhagem e secagem em solução de 2 % de NaCl, uma vez que demoraram para entrar no estado de passivação, após os reparos, o que não permitiu que Tinoco (2001) apresentasse os resultados dos referentes corpos-de-prova em sua pesquisa. Devido a este fato, nesses corpos-de-prova foi possível avaliar a influência da ponte de aderência epoxídica utilizada como barreira à difusão dos íons cloreto.

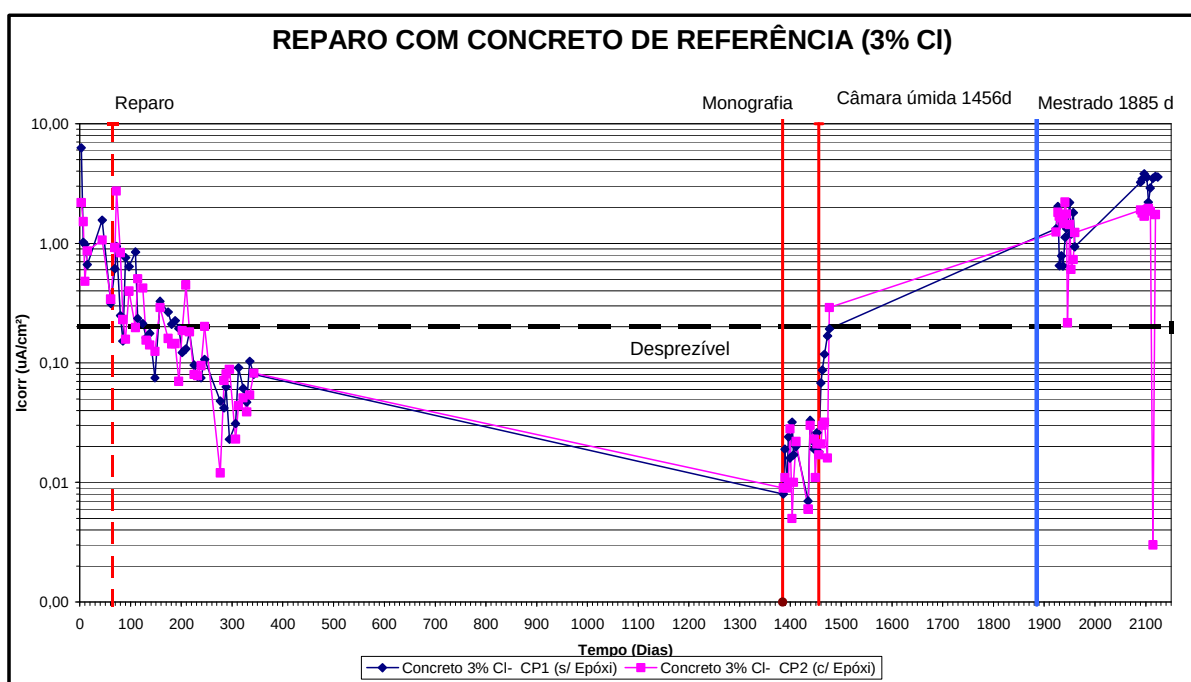


Figura 5.7 – Densidade de corrente de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com concreto referência.

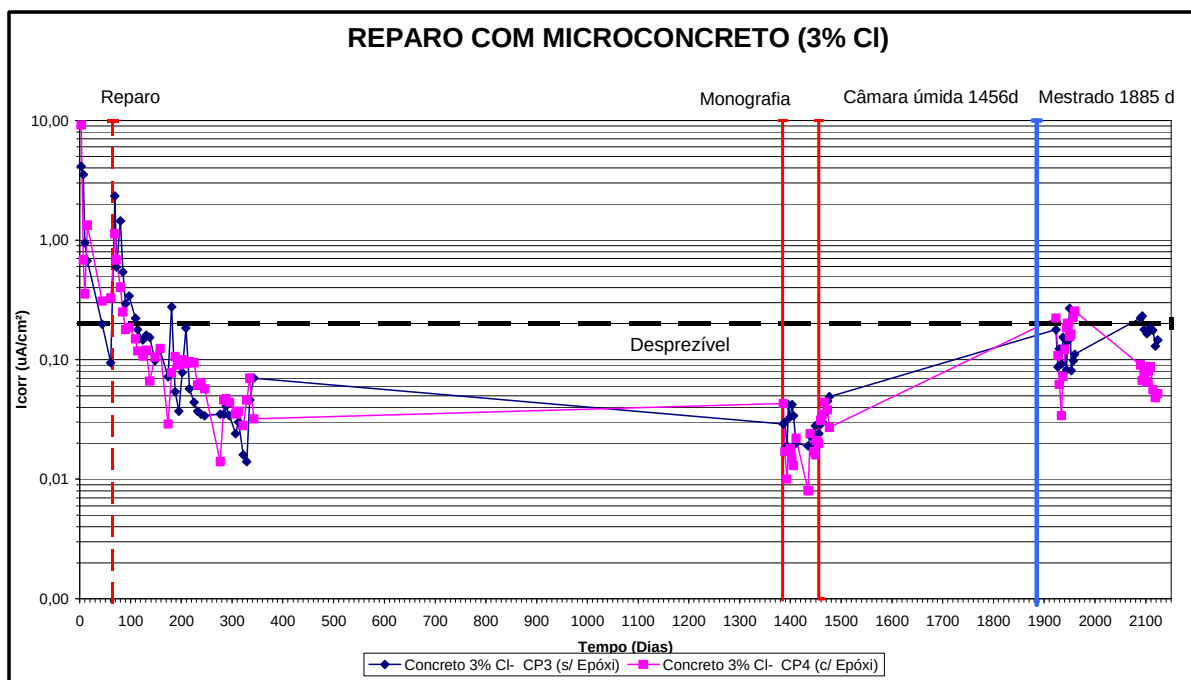


Figura 5.8 - Densidade de corrente de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com microconcreto.

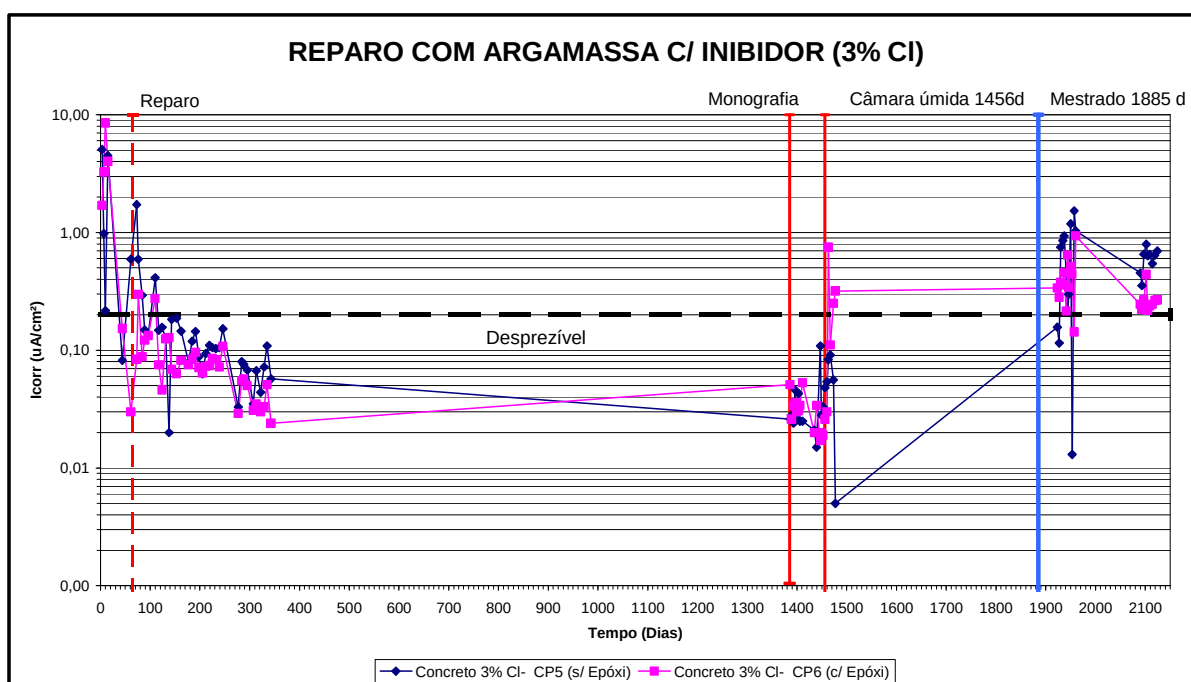


Figura 5.9 - Densidade de corrente de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com argamassa contendo inibidor de corrosão.

Nos gráficos de velocidade de corrosão dos sistemas de reparo dos corpos-de-prova contaminados com 3% de íons cloreto, verifica-se que aqueles com a ponte de

aderência epoxídica apresentaram densidade de corrente de corrosão inferior àqueles em que não foram utilizados a ponte de aderência epoxídica. Isso mostra que houve uma pequena melhoria com a utilização desta barreira epoxídica contra a difusão dos cloretos oriundos da região não reparada. Este aspecto, como já comentada, será melhor avaliada nos resultados da segunda parte desta etapa.

Os sistemas de reparo com **concreto referência** mostraram-se, mais uma vez, que ao longo do tempo foram ineficazes, apresentando intensidade de corrosão alta, ou seja, maior que $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Tabela 4.1, Item 4.2.2.1).

O reparo localizado com **microconcreto** foi o melhor sistema de reparo utilizado, mostrando valores de densidade de corrente de corrosão desprezíveis para o processo de corrosão, ou seja, menores que $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. É importante ressaltar, que, na pesquisa de Tinoco (2001), o microconcreto foi o melhor sistema pesquisado, tanto nos ensaios de caracterização, como a resistência à compressão, absorção de água por imersão, permeabilidade ao ar e difusão dos cloretos por meio de medidas eletroquímicas, como nos ensaios acelerados de ataque por cloretos, após a realização dos reparos localizados. Os resultados de caracterização obtidos na pesquisa de Tinoco (2001) são apresentados no Item 5.1.2.

A **argamassa com inibidor**, ao longo desses anos, apresentou melhor desempenho quando acompanhada com a ponte de aderência epoxídica, registrando valores de velocidade de corrosão de baixa a moderada, ou seja, $0,2 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. No corpo-de-prova sem a ponte de aderência epoxídica apresentou densidade de corrente de corrosão de moderada a alta, entre $0,5 - 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Com esses resultados observa-se que o processo de corrosão, com este sistema de reparo, não foi totalmente controlado. Apesar disso, houve uma pequena melhoria no reparo localizado com o uso da ponte de aderência epoxídica.

b) Potencial de corrosão (Ecorr)

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os resultados do Ecorr das armaduras da região reparada dos corpos-de-prova com 3% de cloretos, desde a pesquisa de Tinoco (2001) até o presente momento.

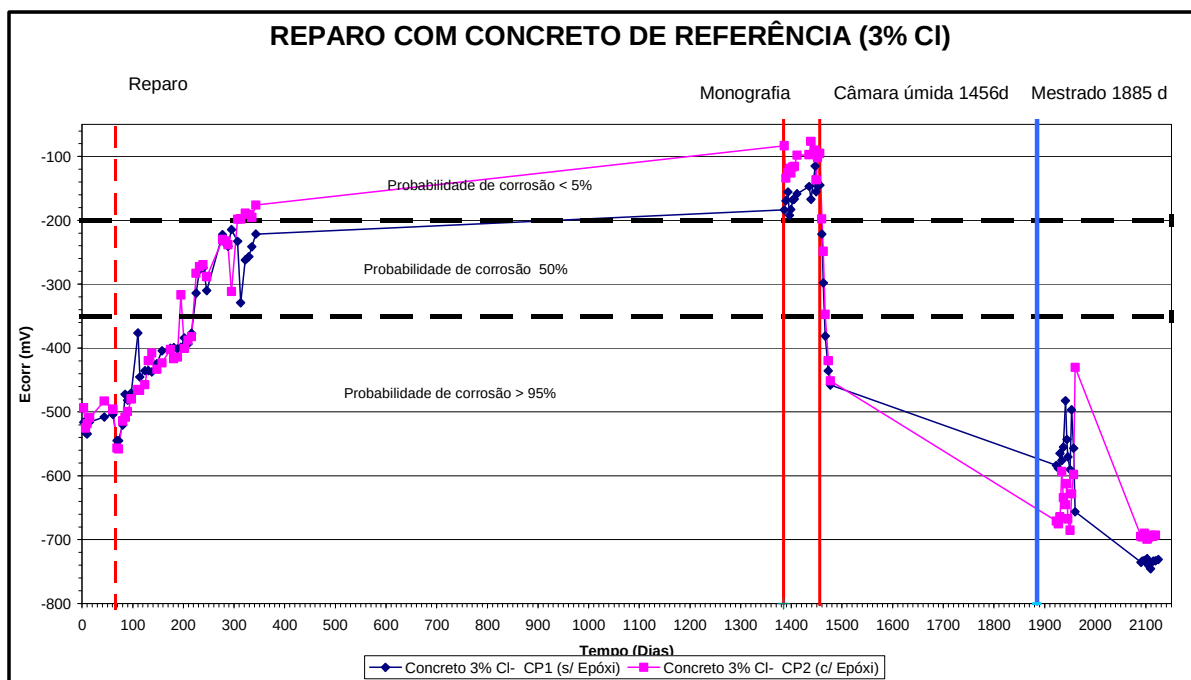


Figura 5.10 - Potencial de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com concreto referência.

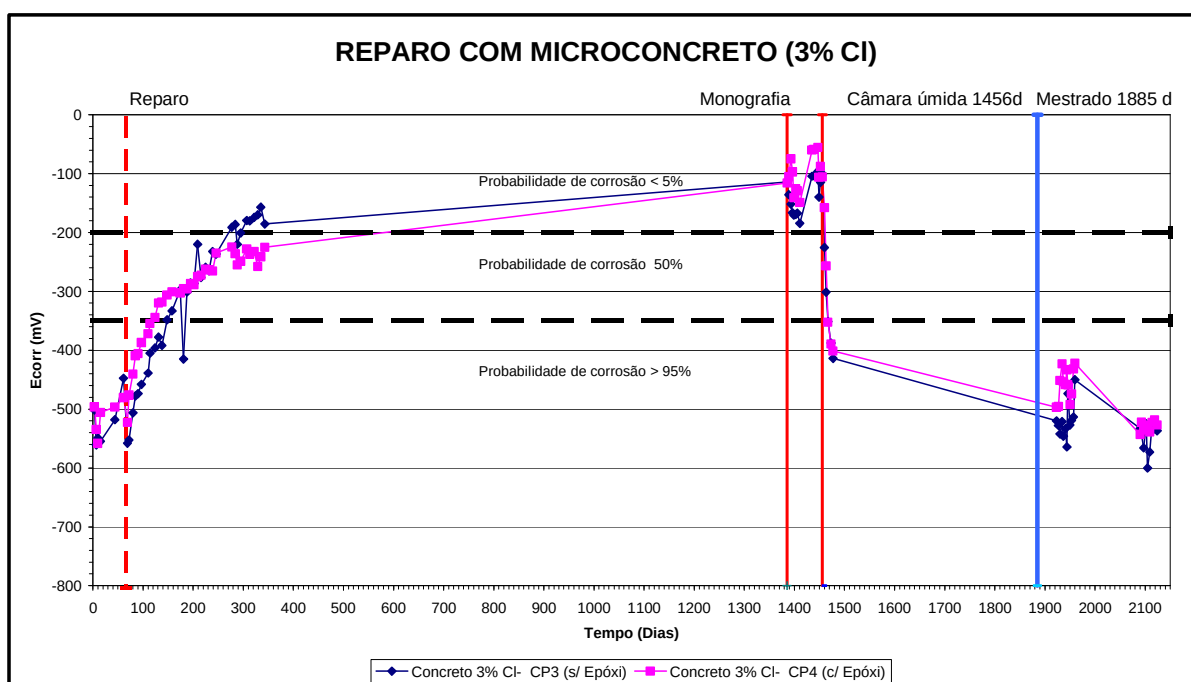


Figura 5.11 - Potencial de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com microconcreto.

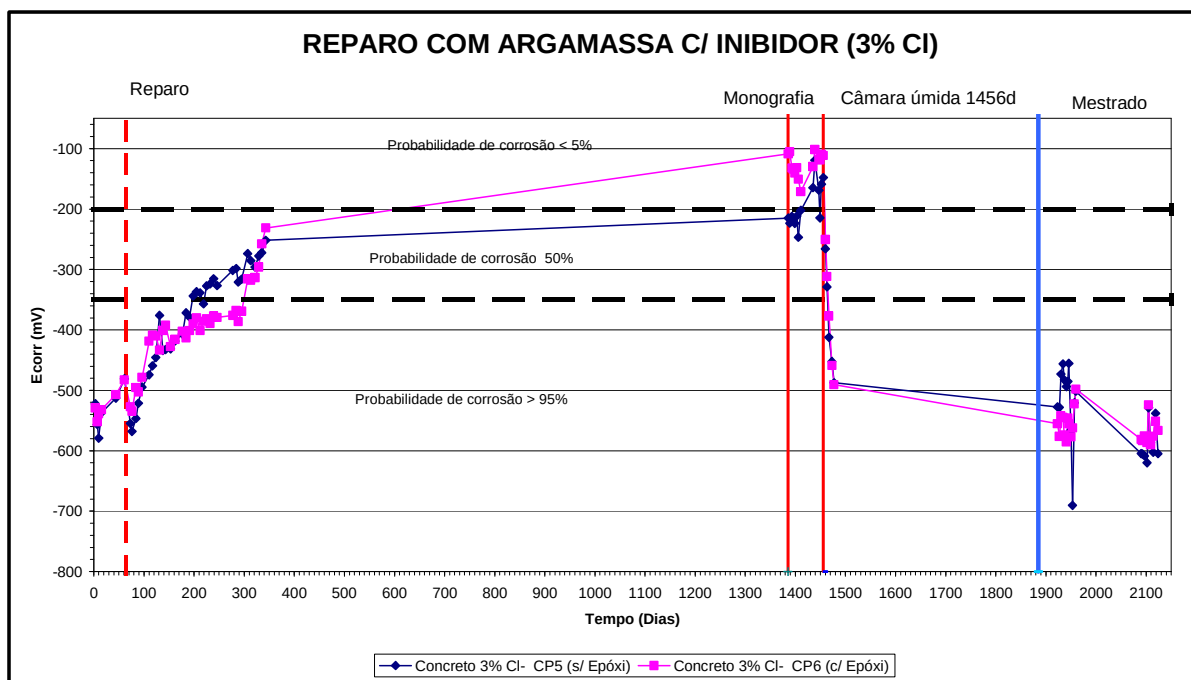


Figura 5.12 - Potencial de corrosão da armadura em função do tempo em concreto contaminado com 3% de Cl^- , reparado com argamassa contendo inibidor de corrosão.

Ao se analisar os gráficos de potencial de corrosão nos corpos-de-prova com 3% de íons cloreto, verifica-se que a ponte de aderência epoxídica praticamente não influenciou os resultados. Verifica-se, ainda, que todos os sistemas se encontram no intervalo de probabilidade de corrosão maior que 95% (Tabela 4.2, Item 4.2.2.2).

O reparo com **concreto referência**, novamente, apresentou-se como o pior sistema de reparo com resultados mais eletronegativos que os demais sistemas, tendo nas últimas medições valores entre -650 mV a -740 mV.

O potencial de corrosão referente ao **microconcreto** foi um pouco melhor que o da **argamassa com inibidor** nas medições iniciais desta pesquisa. No entanto, a análise geral dos resultados de Ecorr indicam que estes materiais mostram comportamentos semelhantes, registrando-se valores entre -500 mV a -600 mV, ao final das avaliações.

5.1.2 Caracterização dos materiais de reparo

Para um melhor entendimento dos perfis de cloretos nos corpos-de-prova (Item 5.1.3), apresenta-se, na sequência, os resultados da primeira etapa da pesquisa de Tinoco (2001), que tratam de caracterizar os materiais de reparo. Desta forma, pode-se relacionar

algumas características dos materiais com a sua capacidade de controlar a difusão dos íons cloreto.

5.1.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma importante característica dos concretos e materiais de reparo. Ela está intimamente ligada à durabilidade, pois quanto maior a resistência à compressão de um material, maior será sua resistência à penetração de agentes agressivos, como a umidade e os íons cloreto, uma vez que sua estrutura porosa será mais densa e compacta.

Em função disso, e pela maneira relativamente simples de se determinar a resistência à compressão, ela é usada, normalmente, como índice para controle da qualidade e da avaliação de vários fatores.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, realizados aos 7 e 28 dias de idade nos materiais estudados.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos (TINOCO, 2001).

<i>Material</i>	<i>CP</i>	<i>Idade (dias)</i>	<i>Carga de ruptura (kg)</i>	<i>Área da seção (cm²)</i>	<i>Tensão de compressão (MPa)</i>	<i>Tensão de compressão média (MPa)</i>
Concreto referência	1	7	32800	176,63	18,6	18,5
	2		32600	176,63	18,5	
	1	28	34200	176,63	19,4	20,7
	2		39000	176,63	22,1	
Microconcreto fluido	1	7	45250	78,5	57,6	56,4
	2		43250	78,5	55,1	
	1	28	50750	78,5	64,7	63,2
	2		48500	78,5	61,8	

Argamassa com inibidor	1	7	6400	19,63	32,6	36,6
	2		7600	19,63	38,7	
	3		6700	19,63	34,1	
	4		8000	19,63	40,8	
	1	28	8200	19,63	41,8	46,2
	2		10300	19,63	52,5	
	3		9800	19,63	49,9	
	4		8200	19,63	41,8	

Embora não seja o objetivo principal deste trabalho a determinação e análise das propriedades mecânicas dos materiais de reparo estudados, os resultados deste ensaio permitem observar, por exemplo, que o microconcreto apresentou valores significativamente elevados de resistência à compressão, podendo também ser recomendado para aplicação em reforços de peças estruturais, além dos serviços de reparo, sem função estrutural (TINOCO, 2001).

5.1.2.2 Absorção de água

De acordo com Nepomuceno (2005), um dos principais mecanismos de penetração de líquidos no concreto é o transporte por capilaridade, onde os pequenos poros presentes produzem grandes forças capilares que controlam a penetração do líquido no concreto. A absorção capilar é um dos mecanismos de transporte que mais afeta a durabilidade das edificações, especialmente aquelas expostas à chuva, variações da maré e sujeitas a ciclos de umedecimento e secagem. A água por si só pode ser uma substância agressiva se ela penetra em uma região de uma estrutura de concreto armado, cujas armaduras já estão despassivadas pela ação da carbonatação ou de cloretos, provocando a redução da resistividade do concreto. Por isso, além da quantidade de água absorvida, é importante considerar a profundidade de penetração da água devido à absorção e a velocidade com que o fenômeno ocorre.

Os materiais utilizados para reparos em estruturas de concreto armado devem possuir requisitos mínimos necessários que garantam uma boa durabilidade. Logo, é

importante e essencial que os materiais de reparo possuam baixa permeabilidade e um número reduzido de vazios ou poros. Desta forma, o ensaio de absorção de água representou uma ferramenta de grande valor para a avaliação dos materiais em estudo (TINOCO, 2001).

A Figura 5.13 apresenta os valores de absorção de água dos materiais avaliados. Os ensaios tiveram início aos 35 dias de idade em 3 amostras de cada material.

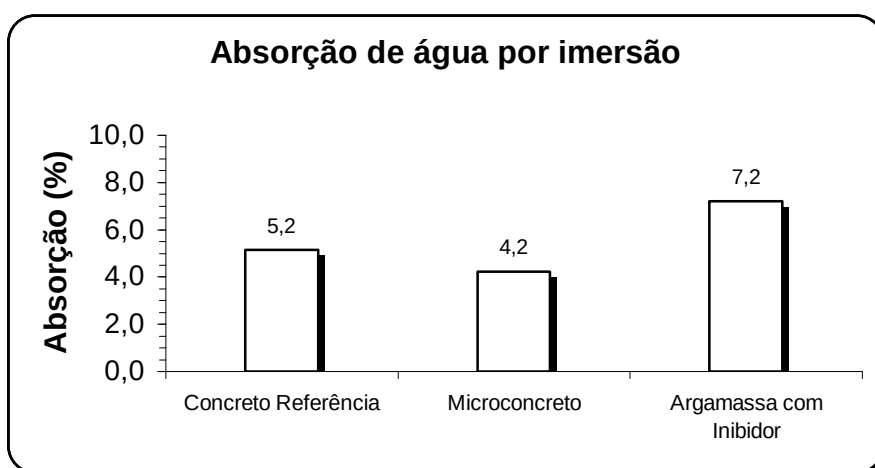


Figura 5.13 - Resultados médios dos ensaios de absorção de água por imersão (TINOCO, 2001).

O desempenho obtido pelo microconcreto foi superior ao dos outros dois materiais. Isto significa que tal material estará menos vulnerável à absorção de água através de seus poros.

A maior absorção apresentada pelo concreto de referência em relação ao microconcreto justifica-se pela sua maior relação água/cimento.

A argamassa com inibidor apresentou um elevado percentual de absorção, apesar de ter maior resistência à compressão que o concreto de referência. De acordo com Tinoco (2001), isto pode ser atribuído, principalmente, à natureza do material. De acordo com informações fornecidas por técnicos da empresa fabricante do produto, em sua formulação estão presentes substâncias que se dissociam ionicamente com facilidade, o que contribui, de certa forma, para uma maior absorção. Além disso, um dos aditivos que compõem o produto tem como característica a incorporação de ar durante a mistura, promovendo, assim, a formação de vazios (bolhas) que se depositam na superfície do material e, embora não se encontrem conectados, deixam a superfície muito porosa, isto é, bastante “absorvente”. Estes poros promovem a chamada porosidade superficial aberta ou em forma de bolsa que não permite a penetração dos agentes agressivos no interior do concreto, mas pode contribuir para o aumento da absorção total.

5.1.2.3 Permeabilidade ao ar

De acordo com Gonçalves et al (1999), para a realização dos ensaios de permeabilidade ao ar foi preciso que a umidade interna dos corpos-de-prova ficasse em equilíbrio com a do ambiente externo. Desta forma os resultados estariam mais próximos da realidade. Eles realizaram um estudo onde foram mantidas algumas características do concreto, tais como materiais, abatimento, tempo de cura e idade de hidratação, alterando-se apenas a relação a/c. Verificou-se uma grande diferença nos valores entre os concretos estudados, onde os resultados registraram decréscimos do tempo de permeabilidade da ordem de 85% entre um concreto com relação a/c = 0,50 e outro com a/c = 0,65, por exemplo.

Para se certificar deste equilíbrio, os corpos-de-prova foram pesados em intervalos semanais até que se comprovasse a constância em suas massas depois de realizadas algumas pesagens sucessivas (TINOCO, 2001).

O gráfico da Figura 5.14 mostra a perda de massa dos corpos-de-prova durante o tempo de permanência em ambiente com umidade relativa controlada em $(50 \pm 10) \%$, até atingir o equilíbrio com tal ambiente.

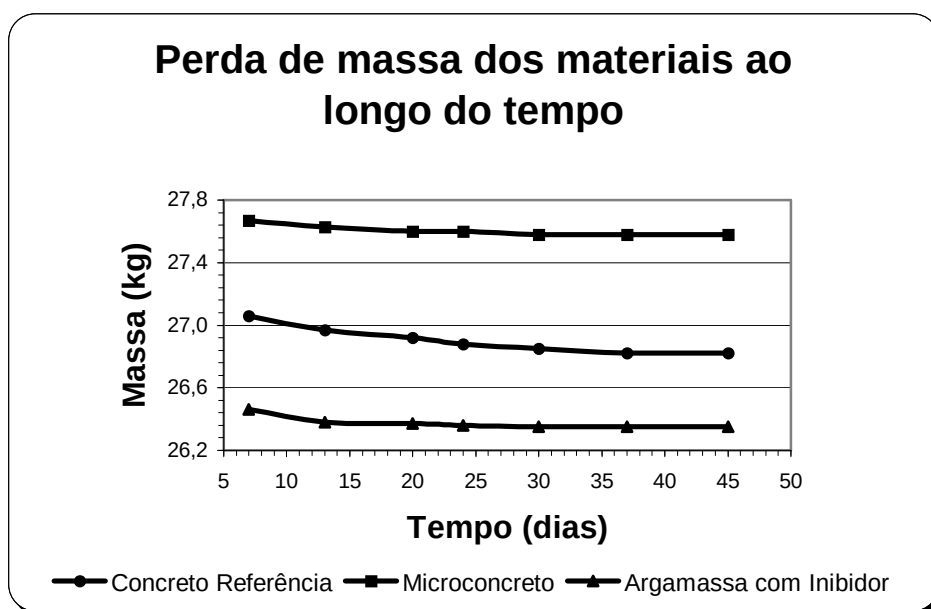


Figura 5.14 – Perda de massa dos materiais ao longo do tempo (TINOCO, 2001).

Pode-se observar que o concreto de referência perdeu maior quantidade de água durante o tempo avaliado.

As medidas dos tempos de permeabilidade foram realizadas aos 50 e 70 dias de idade.

Os resultados dos tempos de permeabilidade são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar (TINOCO, 2001).

Material	Tempo de permeabilidade (s)	
	50 dias	70 dias
Concreto de referência	186	146
Microconcreto	7.145	7.448
Argamassa com inibidor	4.163	5.601

Os valores apresentados na Tabela 5.2 são correspondentes às médias aritméticas dos tempos medidos nas duas cavidades que apresentaram tempos de permeabilidade mais próximos, eliminando-se os valores máximos e mínimos de cada amostra.

Pôde-se constatar, diante dos resultados obtidos, que o microconcreto possui uma ótima resistência à penetração de gases, que é uma das vias de transporte dos agentes agressivos. Este resultado está de acordo com a baixa porcentagem de absorção e a alta resistência à compressão que o material apresentou. Tal comportamento pode ser explicado pela baixa relação água/pó (0,126) do material, implicando em um menor número e volume de poros, o que lhe confere uma maior homogeneidade (TINOCO, 2001).

A argamassa com inibidor, também, apresentou um tempo de permeabilidade elevado, o que, embora pareça contraditório em virtude de sua alta absorção, mostra uma estrutura pouco permeável, provavelmente, como já foi dito, devida a uma falta de conexão entre os poros de sua microestrutura, como também à presença de aditivos em sua composição. A ausência de agregados graúdos também elimina uma zona porosa e fraca, a chamada zona de transição pasta/agregado, que caracteriza-se por ser uma região de elevada relação água/cimento e, portanto, bastante porosa (TINOCO, 2001).

Os resultados também confirmam a facilidade de penetração do ar em concretos convencionais que, neste caso, apresentou baixos tempos de permeabilidade, sendo estes coerentes com os resultados alcançados por GONÇALVES et al. (1999).

Desta forma, tem-se, para os materiais estudados, a classificação da Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Classificação qualitativa dos materiais estudados em função dos tempos de permeabilidade (TINOCO, 2001).

Material	1/2Tempo (s) (50 dias)	f_{ck} - 28 dias (MPa)	Interpretação
<i>Concreto de referência</i>	93	20,7	Moderada
<i>Microconcreto</i>	3.572	63,2	Excelente
<i>Argamassa com inibidor</i>	2.081	46,2	Excelente

Diante destes resultados, pode-se observar que a resistência à compressão, que é inversamente proporcional à porosidade do material, possui, com a permeabilidade aos gases, uma relação direta, ou seja, quanto mais resistente à compressão for o material, mais resistente à penetração dos gases este também será (TINOCO, 2001).

5.1.2.4 Resistência à penetração de cloretos

a) Densidade de corrente de corrosão

Os resultados apresentados a seguir são dos corpos-de-prova fabricados totalmente com os materiais de reparo. Estes corpos-de-prova foram fabricados e depois constatados a passivação das armaduras por meio de medidas eletroquímicas, com a utilização do GECOR 6 (Item 4.2.2) foram submetidos a ataques externos de cloretos através de ciclos de molhagem e secagem em solução com concentração de 1% de NaCl.

As Figuras 5.15, 5.16, e 5.17 mostram o comportamento dos materiais em função da velocidade do processo corrosivo.

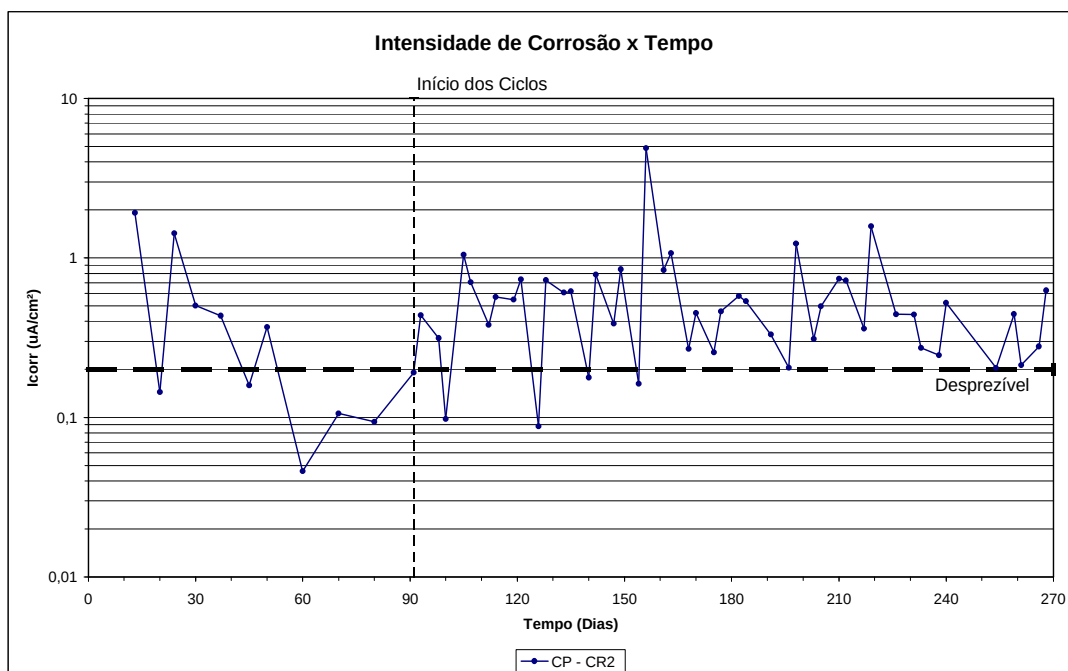


Figura 5.15 – Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, no concreto de referência (TINOCO, 2001).

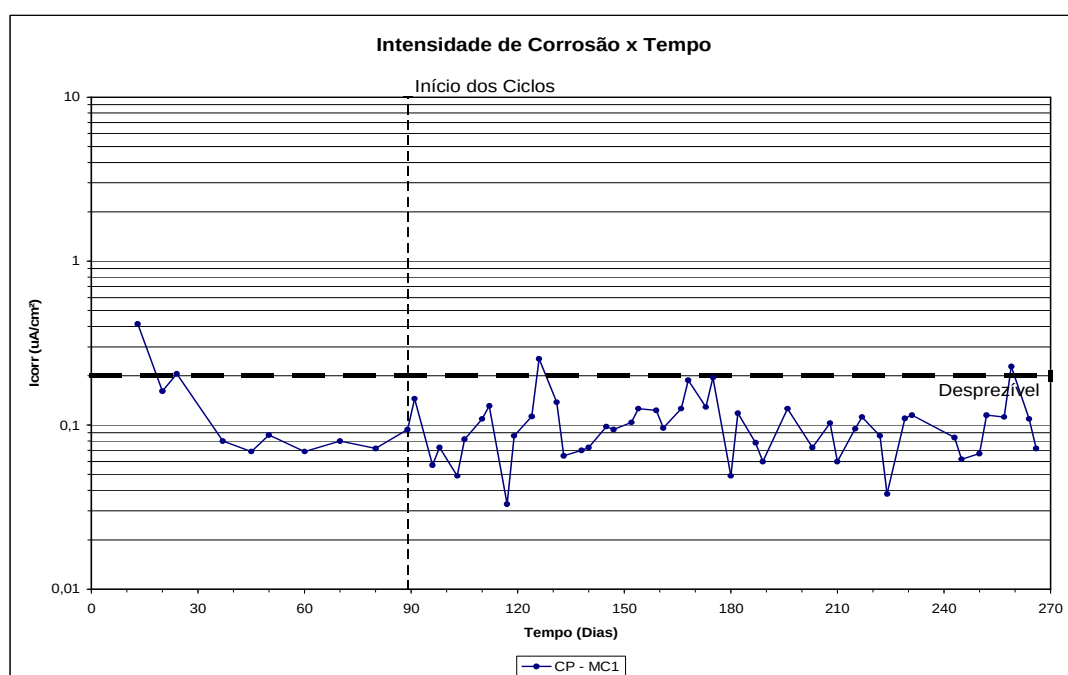


Figura 5.16 - Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, no microconcreto (TINOCO, 2001).

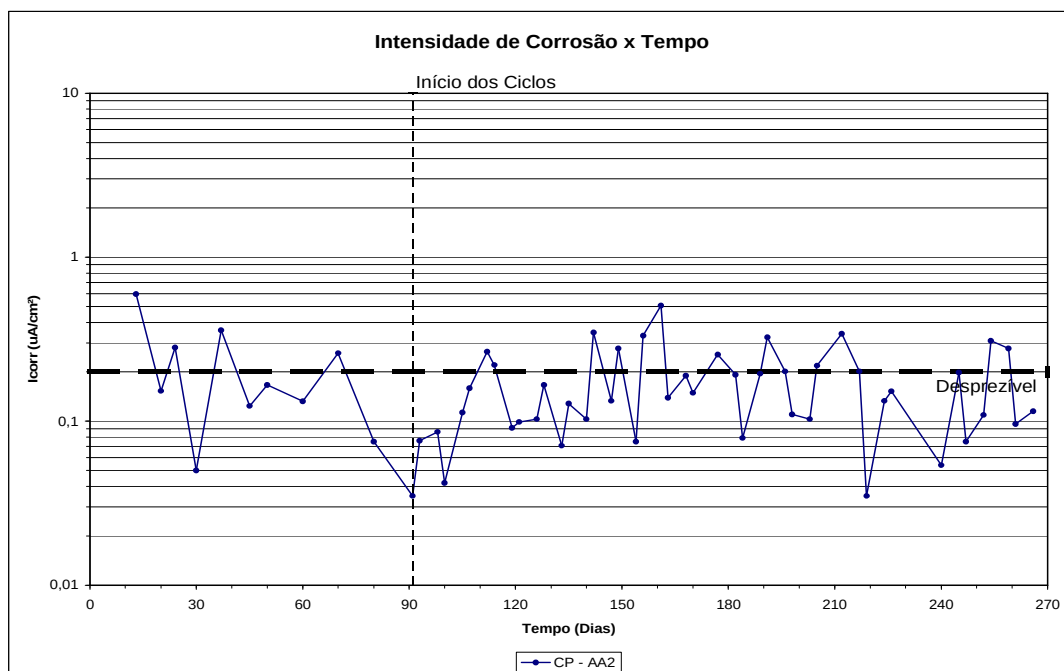


Figura 5.17 - Densidade de corrente de corrosão da armadura, em função do tempo, na argamassa com inibidor (TINOCO, 2001).

Muitas das alterações observadas nos gráficos podem ser atribuídas às condições dos corpos-de-prova no momento das leituras, as quais foram realizadas ora após o término do ciclo de secagem, ora após o término do ciclo de imersão.

Os altos valores de i_{corr} e os baixos valores de E_{corr} registrados logo nas primeiras idades são devidos ao processo de formação da película passivadora sobre as armaduras.

Dentre os três materiais avaliados, o concreto de referência foi o material que levou mais tempo para atingir um patamar considerado passivo, isto é, com valores de i_{corr} inferiores a $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Por outro lado, no microconcreto o tempo de passivação foi bem mais curto, seguido da argamassa com inibidor.

A capacidade protetora do concreto de referência diante do ataque por cloretos, por meio dos ciclos de molhagem e secagem, em relação à velocidade de corrosão, foi bastante insatisfatória, tendo em vista o comportamento apresentado por este material logo após o primeiro ciclo de molhagem e secagem. Os valores de i_{corr} mantiveram-se bem acima do limite de $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, apresentando, neste caso, velocidade de corrosão **moderada a alta**, de acordo com o critério de classificação adotado (Tabela 4.1 – Item 4.2.2.1).

O microconcreto, por sua vez, mostrou-se bastante resistente à penetração dos cloretos, tendo seus valores de i_{corr} mantendo-se abaixo do valor crítico de $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, caracterizando uma corrosão **desprezível**, mesmo depois de ter sido submetido a 25 ciclos de

molhagem em solução salina e secagem. A argamassa com inibidor também mostrou, de uma maneira geral, uma boa capacidade protetora, apresentando, no entanto, alguns valores indicativos de velocidades de corrosão **baixa a moderada**. Seu desempenho ficou um pouco abaixo do apresentado pelo microconcreto. Mesmo assim, pode-se dizer que o material controlou o processo de corrosão em relação ao concreto de referência.

b) Potencial de corrosão

As Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam o comportamento dos materiais avaliados em função dos valores obtidos de potencial de corrosão, antes e durante o ataque por cloretos.

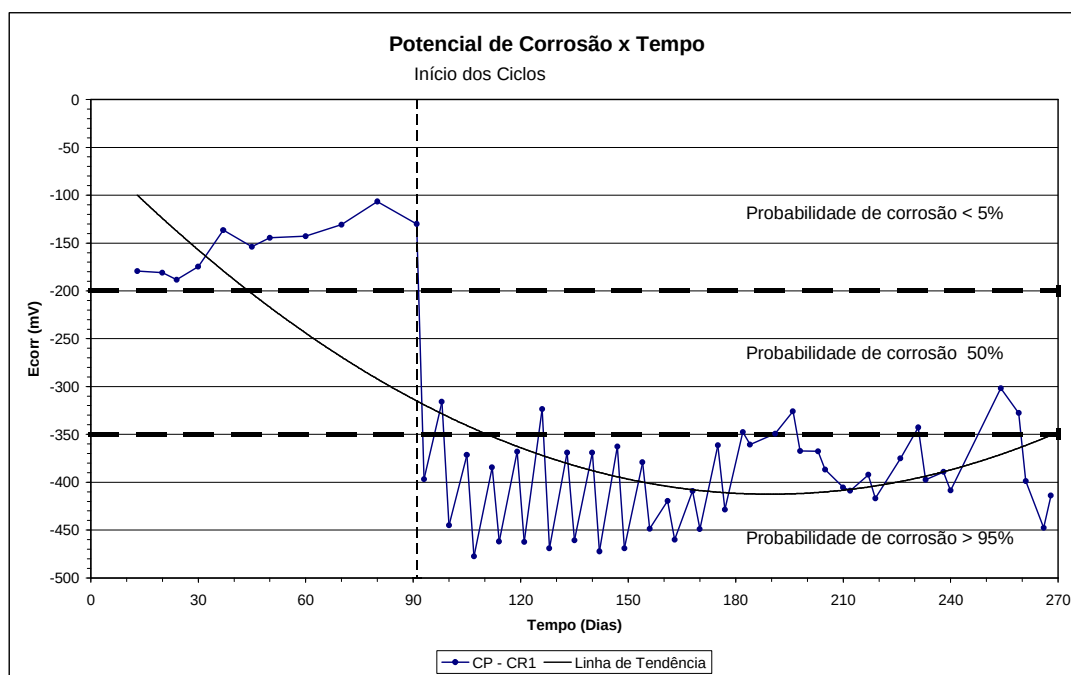


Figura 5.18 – Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, no concreto referência (TINOCO, 2001).

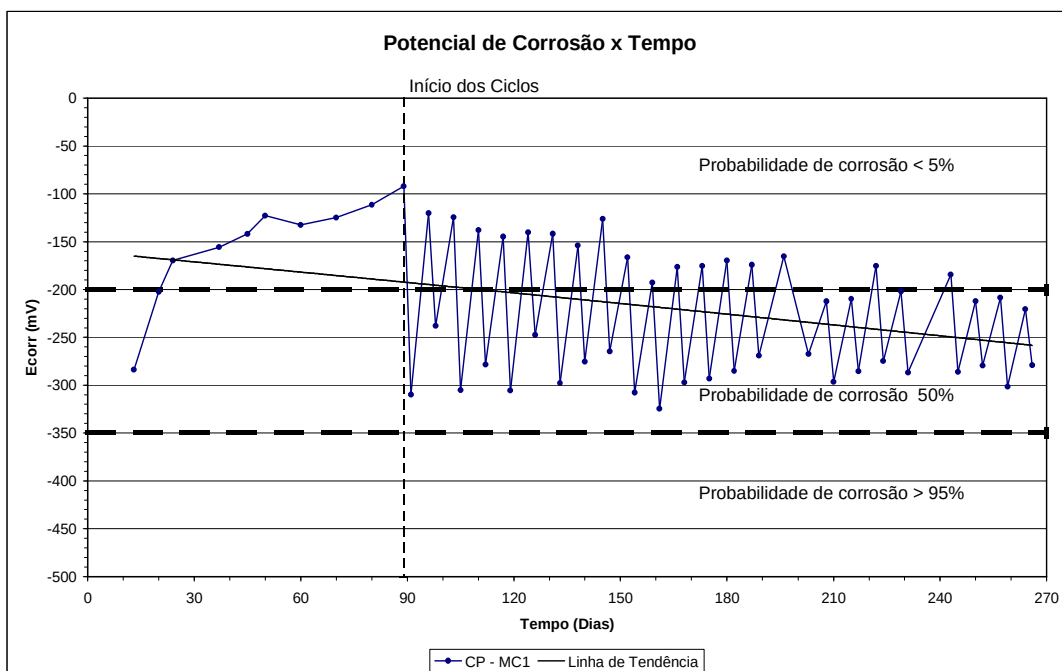


Figura 5.19 – Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, do microconcreto (TINOCO, 2001).

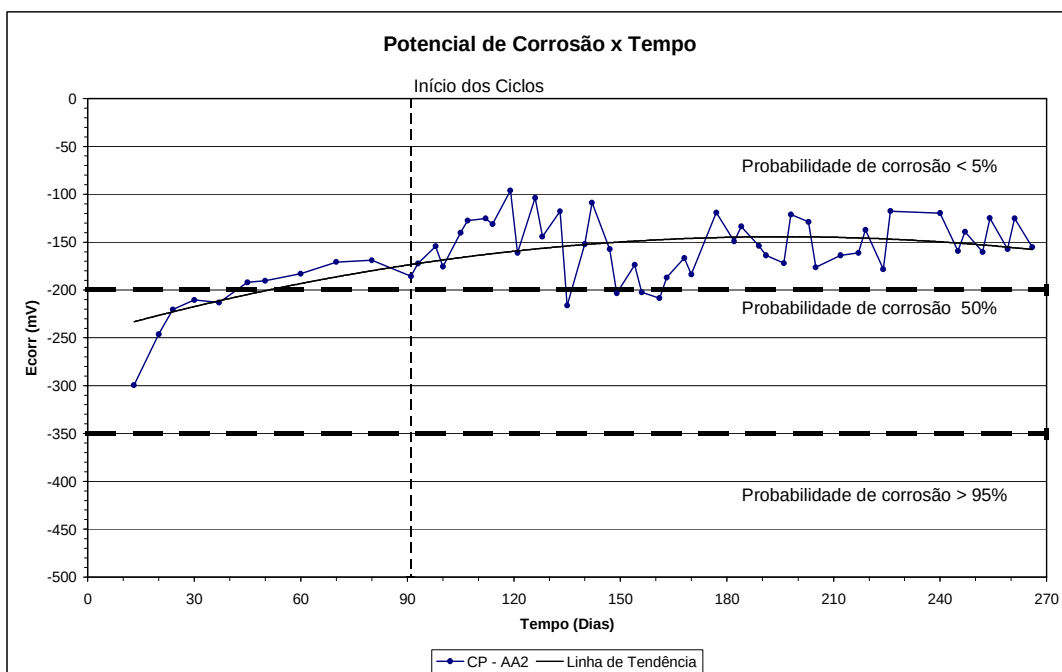


Figura 5.20 – Potencial de corrosão da armadura, em função do tempo, na argamassa com inibidor (TINOCO, 2001).

O concreto de referência, da mesma forma que aconteceu com os valores de i_{corr} , apresentou uma queda significativa nos valores do potencial logo após o primeiro ciclo, passando imediatamente de uma faixa de potencial onde a probabilidade de corrosão era

menor que 5%, para valores que acusavam probabilidade de corrosão **maior que 95%**, conforme critério contido na Tabela 4.2, no Item 4.2.2.2.

O microconcreto também sofreu uma queda brusca nos valores de potencial após a primeira imersão, porém, no geral, ao longo do ensaio, os valores permaneceram, na faixa que caracteriza uma probabilidade de ocorrência da corrosão de **50%**, sem ultrapassar o valor crítico de -350 mV.

A argamassa com inibidor não apresentou mudança de comportamento nos primeiros ciclos de molhagem e secagem com cloretos. Durante os 25 ciclos o comportamento do material manteve-se **inalterado**, indicando probabilidade menor que 5% durante todo o ensaio. Importante ressaltar que quando o concreto contém inibidores de corrosão, os parâmetros de corrosão definidos pela ASTM C-876 (1991) não são adequados para avaliar o processo de corrosão.

De uma maneira geral, quando a intensidade de corrosão aumenta, o potencial tende a assumir valores mais eletronegativos, tendo sido esta a relação obtida, no presente estudo, entre a i_{corr} e E_{corr} .

5.1.3 Difusão dos íons cloreto

As Figuras 5.21, 5.22 e 5.23 apresentam os perfis de cloretos dos corpos-de-prova concretados com 3% de íons cloreto, a partir do NaCl, adicionados à água de amassamento. A partir destes perfis pode-se analisar a difusão dos íons cloreto através da ponte de aderência epoxídica e dos materiais de reparo e concluir a respeito da eficiência dos sistemas estudados em impedir que os cloretos do concreto contaminado penetrassem para a região reparada.

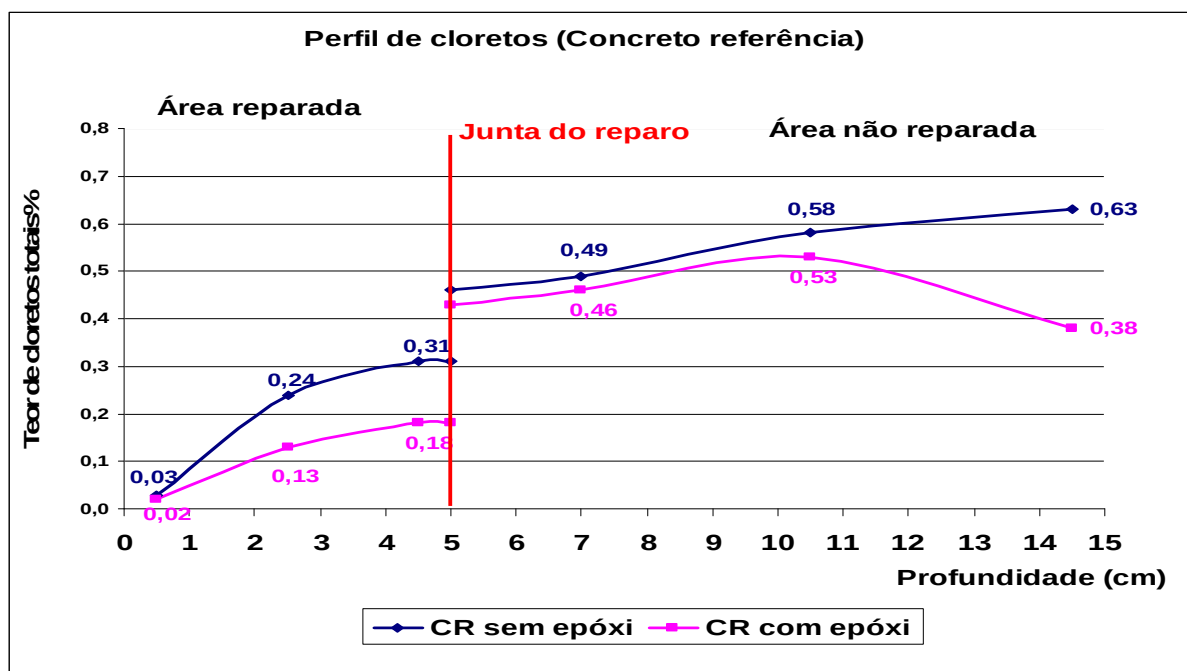


Figura 5.21 – Gráfico do perfil de cloretos dos corpos-de-prova reparados com concreto referência com e sem a ponte de aderência epoxídica.

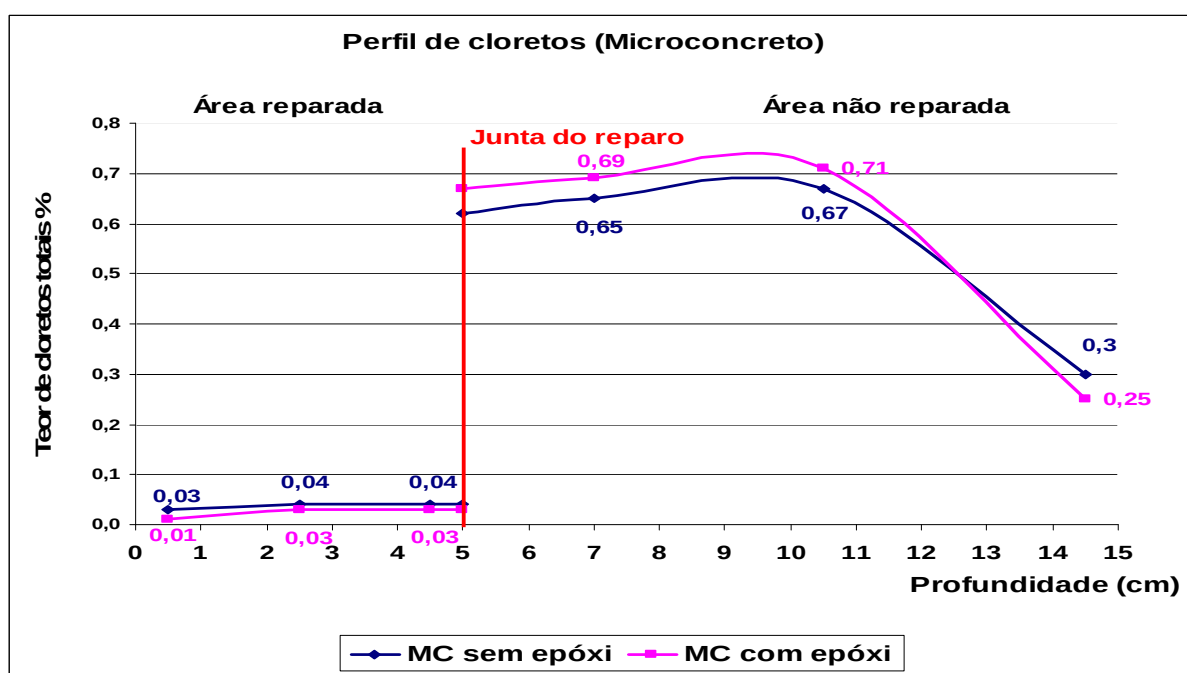


Figura 5.22 – Gráfico do perfil de cloretos dos corpos-de-prova reparados com microconcreto com e sem a ponte de aderência epoxídica.

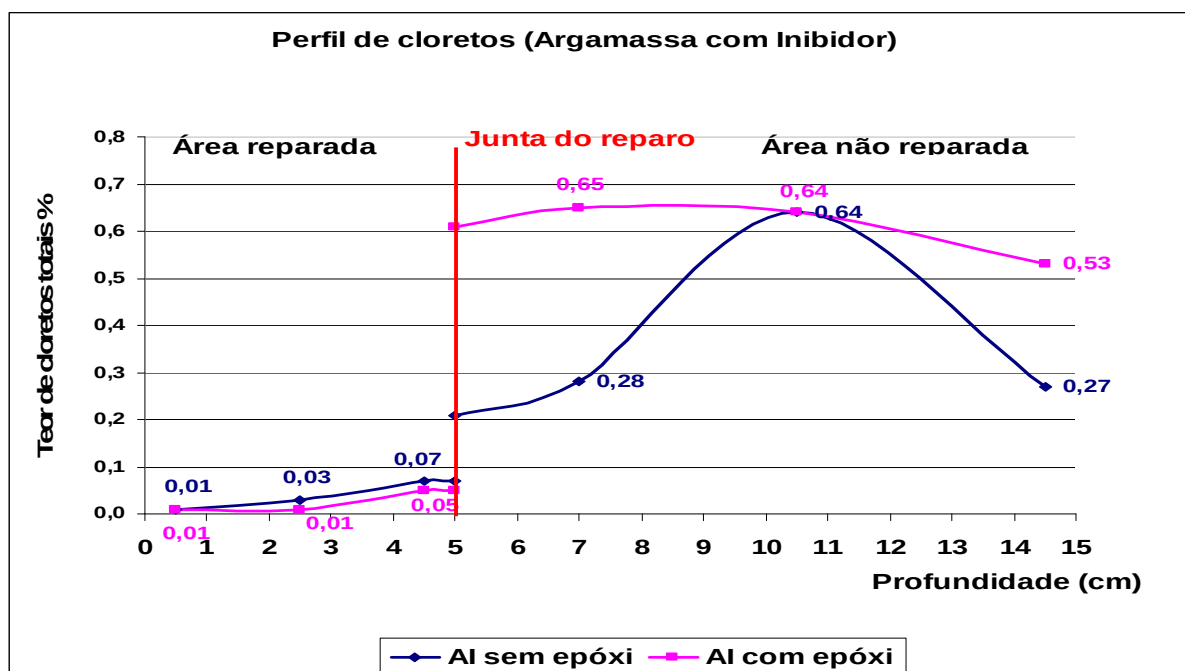


Figura 5.23 – Gráfico do perfil de cloretos dos corpos-de-prova reparados com argamassa com inibidor com e sem a ponte de aderência epoxídica.

Os teores de cloretos foram obtidos de acordo com os procedimentos da ASTM C 1152 (ASTM, 2004) como apresentado no Item 4.1.6.2.

O reparo localizado realizado com o **concreto referência** sem a utilização da ponte de aderência epoxídica foi o sistema que permitiu a maior penetração dos cloretos para a região reparada, com 0,31 % de íons cloreto em relação ao volume do material, na profundidade referente a 4,5 cm em relação à face reparada, ou seja, quase na intersecção da área reparada com a não reparada. Analisando os resultados do concreto referência, com a utilização da ponte de aderência epoxídica, verifica-se que houve uma redução de 42% na penetração dos íons para a parte reparada, uma vez que o valor encontrado foi de 0,18% de íons cloreto em relação ao volume de concreto. Com isto, verificou-se que, a utilização da **ponte de aderência epoxídica**, como barreira a difusão de íons cloreto, levou a uma redução considerável, porém sem evitar a penetração dos íons cloreto para a região reparada. A ineficiência do concreto referência já era esperada, devido à análise dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização deste material, apresentados no Item 5.1.2, os quais mostram que o concreto referência apresentou maior absorção, menor resistência à compressão, maior permeabilidade ao ar e menor resistência a penetração dos cloretos.

Os sistemas formados por **microconcreto** foram os que apresentaram os melhores resultados, tendo na profundidade de 4,5 cm em relação à face reparada, o valor de 0,03% de

cloretos por volume do material, para o sistema com ponte de aderência epoxídica e de 0,04% para o sistema de reparo com microconcreto sem a utilização da ponte de aderência epoxídica. Nota-se que, quando comparados os mesmos sistemas, um com a ponte de aderência epoxídica e o outro sem, a variação do teor de cloretos não foi representativa. Verifica-se, portanto, que o reparo realizado com o microconcreto foi eficaz no impedimento da difusão dos íons cloreto da região não-reparada para a região reparada. A eficácia deste material, deve-se as excelentes características do microconcreto, apresentadas nos ensaios de caracterização dos materiais, tais como, a resistência à compressão, absorção de água, permeabilidade ao ar a resistência à penetração dos cloretos, apresentados no Item 5.1.2.

Segundo Andrade (1992) considera-se como um limite geral de cloretos para que ocorra a despassivação da armadura um valor de 0,4% em relação à massa de cimento ou 0,05% a 0,1% em relação ao peso de concreto. Observando os valores críticos citados pelo autor e analisando os resultados obtidos na primeira e segunda parte desta primeira etapa da pesquisa, encontra-se a razão pela qual os corpos-de-prova com 3% de cloretos (Figura 5.8) reparados com microconcreto são os únicos que mantêm uma intensidade de corrente de corrosão desprezível, ou seja, menores que $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Desta forma, os resultados obtidos nesta pesquisa, coincidem com a média geral dos valores críticos de cloretos, citados pela literatura, para que ocorra a despassivação das armaduras.

O reparo com argamassa com inibidor, como esperado, obteve resultados bem melhores que o concreto referência. Quando comparado ao microconcreto apresentou resultados similares. O sistema de reparo com a utilização de argamassa com inibidor e ponte de aderência epoxídica, na profundidade de 4,5 cm, partindo da face reparada, apresentou teor de cloretos de 0,05% em relação ao volume do material e de 0,07% de teor de cloretos para o sistema de argamassa com inibidor sem a ponte de aderência epoxídica. No entanto, quando somados todos os resultados obtidos na área reparada do microconcreto e com argamassa com inibidor os resultados coincidem, ou seja, totalizam 0,11% para os sistemas sem barreira epoxídica e 0,07% para os sistemas com barreira epoxídica. Estes resultados mostram que, possivelmente, após os cloretos penetrarem no material de reparo, a sua movimentação no sistema com argamassa com inibidor, aparentemente, é mais dificultada quando comparada ao microconcreto.

É importante realizar uma correlação entre os presentes resultados da difusão dos cloretos, obtidos a partir do teor de cloretos ao longo dos corpos-de-prova, com os resultados de difusão de cloretos obtidos por Tinoco (2001), onde os corpos-de-prova, totalmente fabricados com os materiais que estão sendo avaliados (concreto referência, microconcreto e

argamassa com inibidor), foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem em solução com 1% de NaCl e monitorados por meio de medidas eletroquímicas.

Os resultados obtidos por Tinoco (2001) coincidem com os resultados encontrados nesta nova etapa da pesquisa. Analisando as Figuras 5.15 a 5.20 verifica-se que, o concreto referência foi o sistema que apresentou os resultados mais desfavoráveis quanto a intensidade de corrente de corrosão e potencial de corrosão, mostrando ser o material que permitiu a maior penetração dos íons cloreto, sendo o primeiro a permitir a despassivação da armadura

O microconcreto apresentou ser bastante resistente à penetração dos cloretos, onde, mesmo após os ciclos de molhagem e secagem em solução salina, mostrou densidade de corrente de corrosão desprezível (Figura 5.16).

A argamassa com inibidor, também, apresentou resultados favoráveis, principalmente em relação ao potencial de corrosão. No entanto, a intensidade de corrente de corrosão apresentou resultados sensivelmente mais desfavoráveis em relação ao microconcreto, registrando alguns valores de densidade de corrente de corrosão de baixa a moderada e sendo o segundo a permitir a despassivação da armadura.

Na análise geral dos resultados, verifica-se que a ponte de aderência epoxídica reduziu a difusão dos íons cloreto da região não-reparada para a região reparada, porém não evitou a penetração por completa destes íons, mostrando que a qualidade do material de reparo (microconcreto e argamassa com inibidor) foi importante na função de barreira contra a difusão dos íons cloreto e até mais eficaz nesta função do que a ponte de aderência epoxídica nos casos do microconcreto e argamassa com inibidor.

De uma forma geral, o epóxi é conhecido como um material bastante impermeável, de excelentes propriedades mecânicas e um material de excelente resistência à ataques químicos, devido a sua baixa absorção de líquidos. No entanto, este material não se mostrou eficaz na função de barreira contra os íons cloreto. Muitos fatores podem explicar o motivo pelo qual os íons cloreto difundiram (penetraram) através da membrana epoxídica, como, por exemplo, a forma de aplicação manual (metodologia usualmente utilizada em obras), pode permitir o aparecimento de algumas falhas ou pequenas bolhas e a superfície rugosa do substrato dificulta a aplicação de uma película uniforme e sem falhas. É importante lembrar que os exemplos citados anteriormente são problemas que serão encontrados na prática, estando a metodologia da presente pesquisa próxima à realidade dos serviços de reparos em estruturas de concreto armado. As dificuldades operacionais, como os reparos em locais com elevada densidade de armaduras, extensas áreas de aplicação, locais de difícil

acesso, necessidade do uso de fôrmas, requerendo elevados tempo de aplicação, também podem comprometer a eficiência da barreira epoxídica.

Além dos problemas operacionais, deve-se levar em consideração a baixa resistência química do epóxi aos ambientes alcalinos. Os materiais de reparo de base cimento possuem pH altamente alcalino, o que pode levar a degradação da película epoxídica em curto ou médio prazo.

5.2 AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE LIMPEZA DAS ARMADURAS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO POR ÍONS CLORETO (ETAPA II)

5.2.1 Microscopia estereoscópica

Após os procedimentos de limpeza das armaduras terem sido executados, uma análise visual mais detalhada das superfícies das armaduras com a finalidade de observar a presença de pites e produtos de corrosão. Para isso, utilizou-se de um microscópio estereoscópico, modelo MST 131, fabricado pela PZO WARSZAWA. As ampliações utilizadas nas análises foram de 6,3 a 40 vezes. As Figuras 5.24 a 5.32 mostram as imagens obtidas pela microscopia.

5.2.1.1 Armaduras sem limpeza (SL)

Estas armaduras são aquelas que não foram submetidas a processo algum de limpeza, sendo concretadas novamente no mesmo estado em que foram retiradas dos corpos-de-prova contaminados com íons cloreto e que se encontravam em avançado processo de corrosão, como pode ser visto nas Figuras 5.24 e 5.25, servindo, desta forma, como armaduras de referência para esta pesquisa.

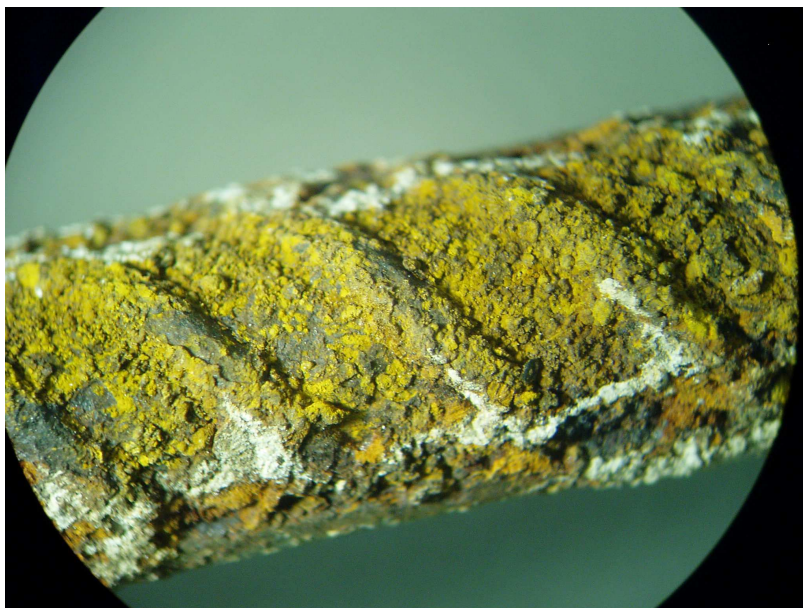


Figura 5.24 - Imagem estereoscópica da superfície da armadura sem procedimento de limpeza, apresentando avançado processo de corrosão.



Figura 5.25 - Imagem estereoscópica da superfície da armadura sem procedimento de limpeza, apresentando avançado processo de corrosão.

Como se pode observar nas Figuras 5.24 e 5.25, as armaduras retiradas dos corpos-de-prova se encontravam em avançado estado de deterioração devido ao processo de corrosão.

5.2.1.2 Escova de aço (EA)

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam as imagens de microscopia estereoscópica das armaduras após terem sido submetidas ao procedimento de limpeza com escova de aço manual.

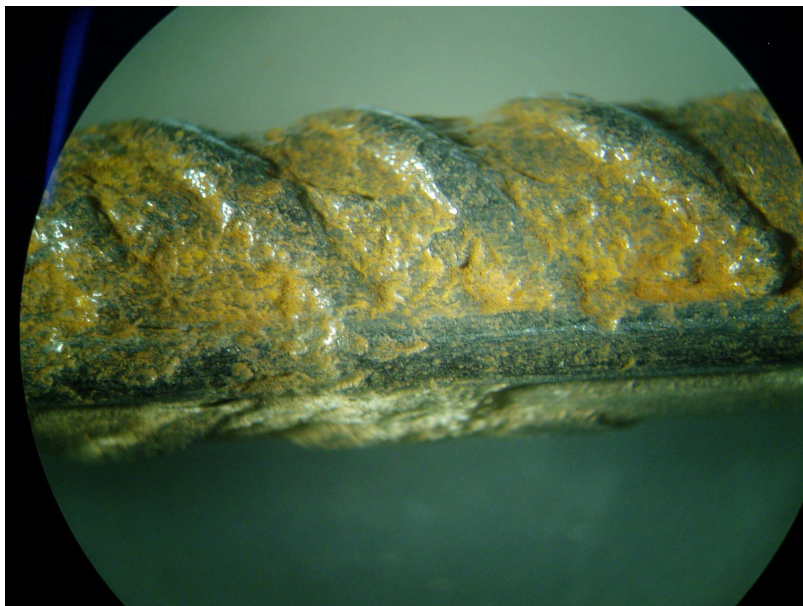


Figura 5.26 - Imagem estereoscópica da armadura após o procedimento de limpeza com escova de aço manual, apresentando produtos de corrosão e provavelmente contaminada pelos íons cloreto.

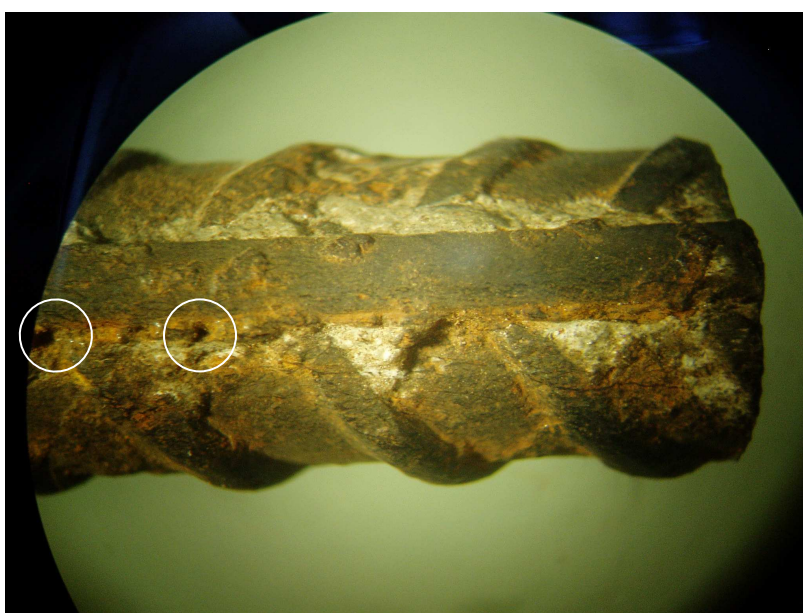


Figura 5.27 - Imagem estereoscópica da armadura após o procedimento de limpeza com escova de aço manual. Destacado nos círculos exemplos de pites de corrosão.

Após o procedimento de limpeza com escova de aço manual verificou-se que, tanto visualmente, como também, por meio da microscopia estereoscópica, este processo não é eficaz na remoção dos produtos de corrosão e íons cloreto da superfície das armaduras. Foi possível visualizar os pites de corrosão nas armaduras completamente incrustados por produtos de corrosão. O efeito desta constatação será avaliada por meio das medidas eletroquímicas (potencial de corrosão e densidade de corrente ou velocidade de corrosão) que serão apresentados no Item 5.2.2.

5.2.1.3 Jateamento abrasivo de areia (JF e JQ)

Como neste item o objetivo é mostrar a qualidade visual dos procedimentos de limpeza por meio da microscopia estereoscópica, não serão apresentados separadamente os procedimentos de limpeza do jateamento abrasivo de areia com hidrojateamento de baixa pressão de água fria (JF) e jateamento abrasivo de areia com hidrojateamento de baixa pressão com água morna (JQ), já que, as pressões destes hidrojateamentos não eram diferentes entre si. A intenção de usar água quente à $50^{\circ} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ no hidrojateamento foi a de aumentar a capacidade de remoção dos íons cloreto.

As Figuras 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam as imagens da microscopia estereoscópicas após o procedimento de jateamento abrasivo de areia e hidrojateamento de baixa pressão nas superfícies das armaduras em processo de corrosão devido aos cloretos.

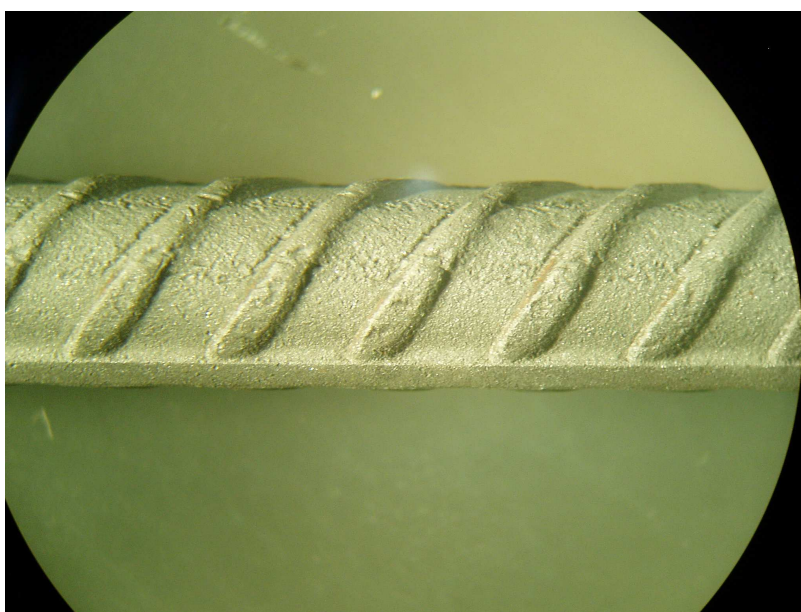


Figura 5.28 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura após o procedimento de jateamento abrasivo de areia.

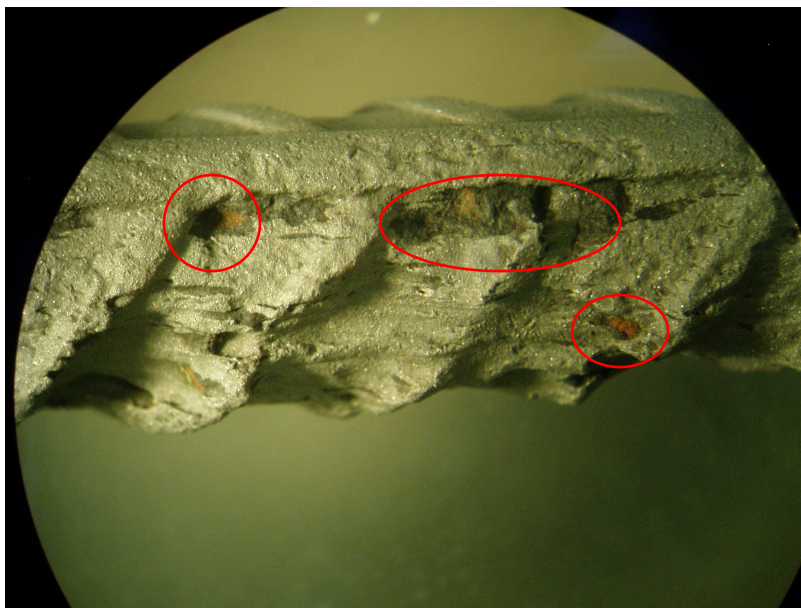


Figura 5.29 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura após o procedimento de jateamento abrasivo de areia, apresentando pites de corrosão contaminados por produtos de corrosão.

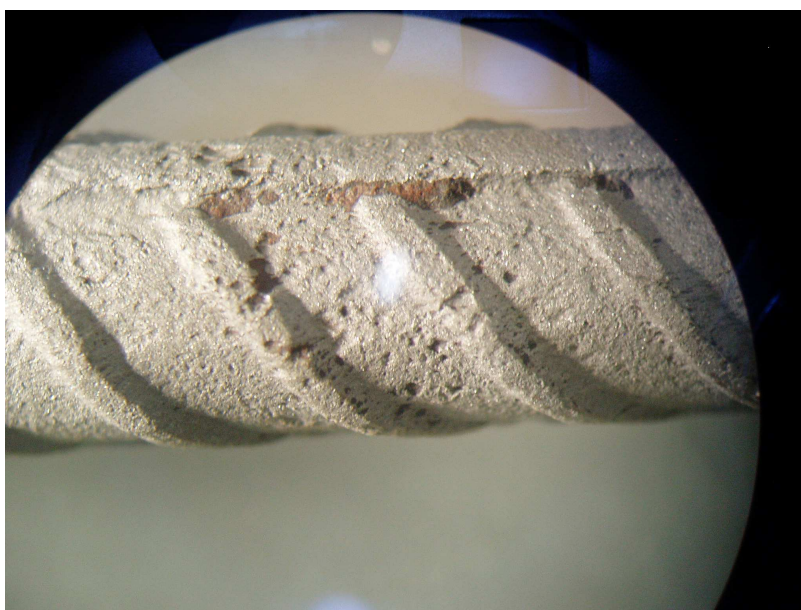


Figura 5.30 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura submetida à limpeza por jateamento abrasivo de areia apresentando alguns produtos de corrosão.

As limpezas realizadas com o jateamento abrasivo de areia aparentaram visualmente, ser mais eficientes na remoção dos produtos de corrosão. No entanto, ao visualizar as armaduras no microscópio estereoscópico foram identificados alguns pites de

corrosão ainda contaminados por produtos de corrosão nas superfícies das armaduras, como apresentado nas Figuras 5.29 e 5.30. Isso ocorre devido aos grãos de areias terem um tamanho grande suficiente para não conseguirem penetrar nestas minúsculas crateras, existindo, possivelmente, nestes locais, íons cloreto ainda alojados. Este pode ser o motivo de Vassie (1989), em sua pesquisa, ter concluído que para armaduras com problemas de corrosão por íons cloreto, os sistemas de limpeza com escova de aço manual e mecânica e jateamento de areia não eram eficazes.

5.2.1.4 Hidrojateamento com alta pressão de aproximadamente 6000 psi

A escolha deste processo foi definida esperando-se que ele suprisse as falhas acontecidas no jateamento abrasivo de areia, ou seja, dos grãos de areia não conseguirem penetrar nas pequenas crateras dos pites de corrosão. As Figuras 5.31 e 5.32 apresentam fotografias de microscopia estereoscópica das armaduras após terem sido submetidas ao processo de hidrojateamento de alta pressão.



Figura 5.31 – Imagem estereoscópica da superfície da armadura após o procedimento de limpeza com hidrojateamento de alta pressão com 6000 psi.



Figura 5.32 - Imagem estereoscópica da superfície da armadura após o procedimento de limpeza com hidrojateamento de alta pressão com 6000 psi apresentando pouca eficácia na remoção dos produtos de corrosão.

O hidrojateamento com pressão de aproximadamente 6000 psi não se mostrou eficaz na remoção dos produtos de corrosão, podendo ter sido devido à pressão utilizada não ter sido suficiente para a remoção dos produtos de corrosão. As medidas eletroquímicas permitirão verificar se este processo foi eficaz ou não na remoção dos cloretos.

Cabe salientar que este procedimento, conforme comentado no Item 4.2.4, alínea “e”, foi feito em São Paulo pela empresa Pires, Giovanetti e Guardia, não estando o presente mestrando no momento da limpeza..

5.2.1.5 Análise comparativa entre os sistemas de limpeza por meio da microscopia estereoscópica

Ao analisar as fotografias da microscopia estereoscópica das superfícies das armaduras, verificou-se que as armaduras submetidas à limpeza com escova de aço manual e hidrojateamento de alta pressão apresentaram as aparências mais desfavoráveis, contendo muitos produtos de corrosão, os quais, possivelmente, podem estar contaminados por cloretos. As armaduras limpas por meio do jateamento abrasivo de areia apresentaram os melhores resultados, mostrando a olho nu uma superfície isenta de produtos de corrosão. Porém, vista com microscopia estereoscópica verificou-se incrustações de produtos de corrosão no interior

dos pites. O grau de contaminação por cloretos e sua influência na corrosão serão melhores analisadas por meio das medidas eletroquímicas (Item 5.2.2).

5.2.2 Avaliação dos procedimentos de limpeza por meio de medidas eletroquímicas

Com o objetivo de avaliar a eficácia de diferentes procedimentos de limpeza das armaduras, colocou-se as armaduras limpas em corpos-de-prova de concreto e registrou-se, ao longo do tempo, o potencial de corrosão (E_{corr}) e a velocidade de corrosão (i_{corr}).

Como explicado no Item 4.5.3, para a avaliação de cada procedimento de limpeza das armaduras foram utilizadas três barras corroídas (amostras). Esta metodologia foi definida com a finalidade de avaliar a qualidade e a repetitividade da qualidade dos procedimentos de limpeza utilizados. Castanheira (1997) observou, por exemplo, que armaduras que estavam inseridas uniformemente em concreto contaminado com 3% de íons cloreto apresentaram valores de densidade de corrente de corrosão divergentes, indicando não existir uma uniformidade no ataque.

5.2.2.1 Avaliação da qualidade e repetitividade da qualidade dos procedimentos de sistemas de limpeza das armaduras

Neste item apresentam-se os resultados das medidas eletroquímicas (E_{corr} e i_{corr}). Procurar-se-á analisar, neste momento, os resultados entre um mesmo procedimento de limpeza, verificando, desta forma, se entre as mesmas condições de contaminação (3% de cloretos) e mesmo procedimento de limpeza ocorreram divergências de comportamento eletroquímico. Para tanto, fez-se a comparação entre os resultados individuais com a medida dos três comportamentos.

A avaliação dos comportamentos eletroquímicos também permitiu verificar qual o procedimento de limpeza que foi mais eficiente no controle da corrosão.

5.2.2.1.1 Armaduras retiradas dos corpos-de-prova com 3% de cloretos

Os resultados apresentados neste item são referentes às armaduras retiradas da área não-reparada dos corpos-de-prova concretados por Tinoco (2001) com 3% de cloretos, a partir

do NaCl, adicionados à água de amassamento. Estes procedimentos da metodologia são melhores explicados no Item 4.1.4.3, alínea “b”.

a) Densidade de corrente de corrosão (i_{corr})

As Figuras 5.33 a 5.37 apresentam os resultados de densidade de corrente de corrosão das armaduras referência (sem limpeza) e das armaduras submetidas aos sistemas de limpeza estudados. Cada Figura apresenta os resultados das três amostras de cada procedimento de limpeza e sua respectiva média dos resultados.

A Figura 5.33 apresenta os resultados de intensidade de corrente de corrosão das armaduras sem procedimento de limpeza, os quais serão utilizados nesta pesquisa como parâmetros de referência.

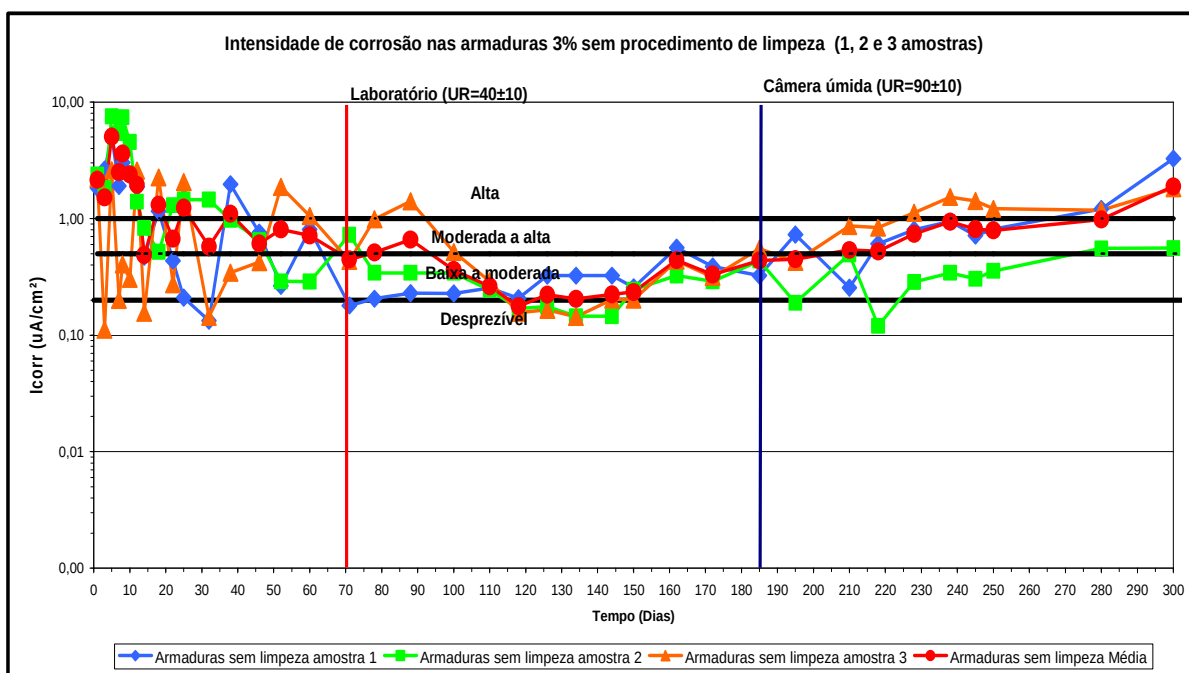


Figura 5.33 – Densidade de corrente de corrosão da média e das três armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , sem procedimento de limpeza.

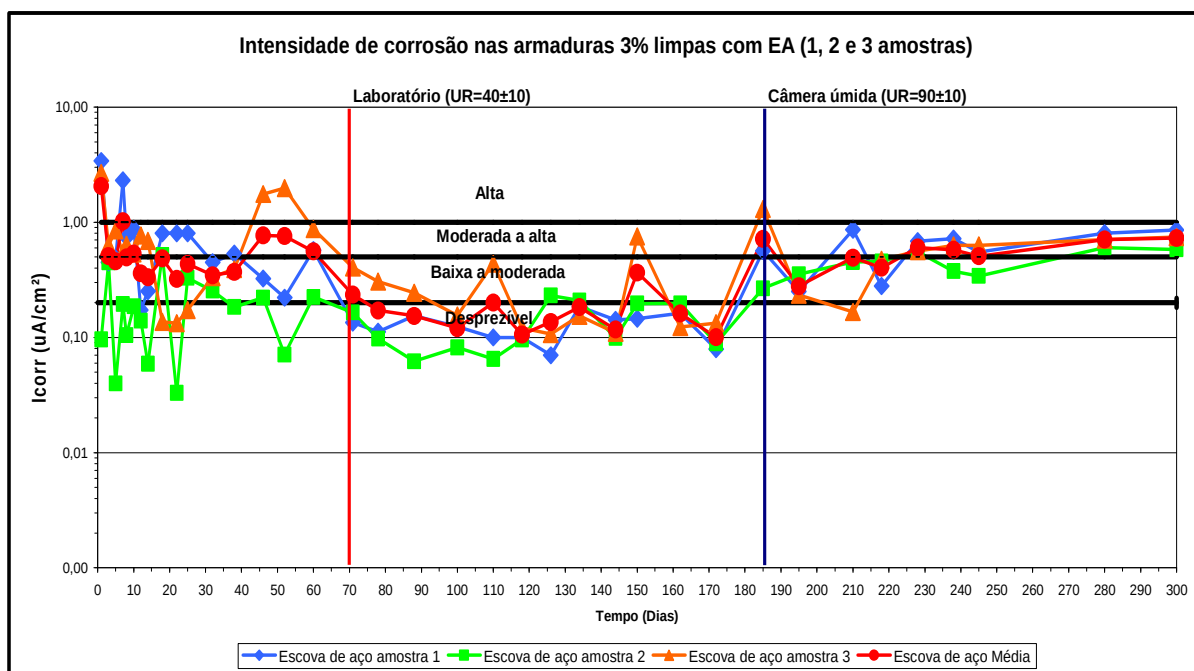


Figura 5.34 – Densidade de corrente de corrosão média e das três armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , submetidas à limpeza com escova de aço manual.

A Figura 5.35 apresenta os resultados de densidade de corrente de corrosão das três armaduras que foram submetidas à limpeza com jateamento abrasivo de areia combinado com um hidrojateamento de água fria com baixa pressão de aproximadamente 1600 psi.

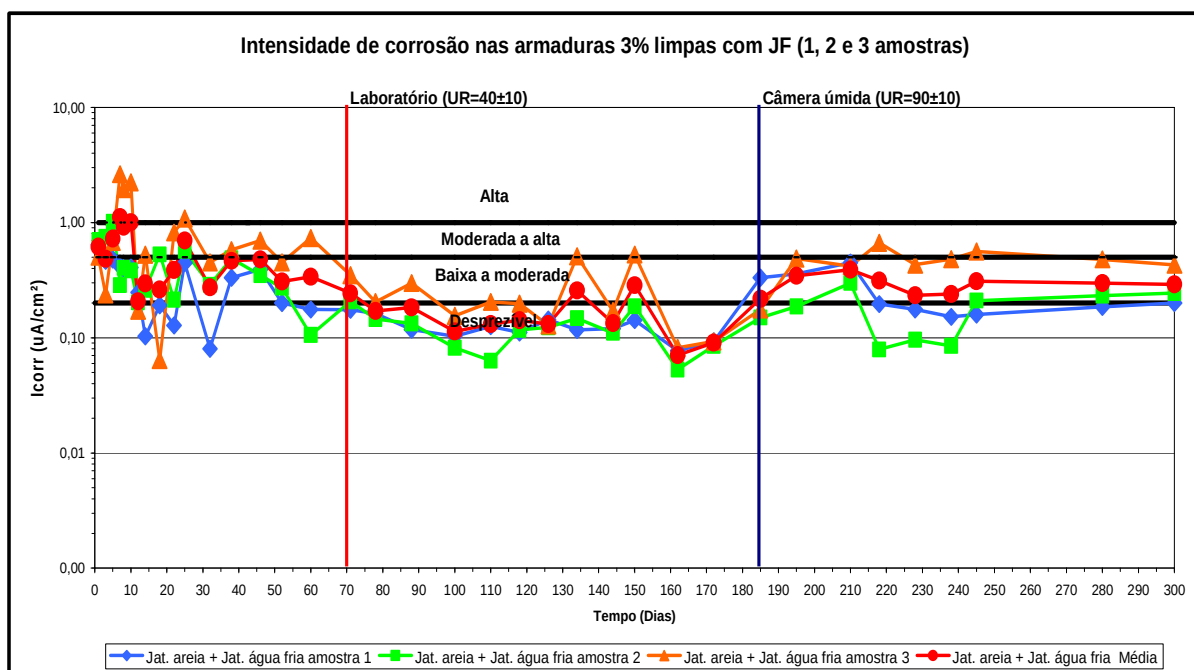


Figura 5.35 – Densidade de corrente de corrosão da média e das três armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , submetidas à limpeza de jateamento de areia combinada com hidrojateamento de água fria com pressão de 1600 psi.

A Figura 5.36 apresenta os resultados de densidade de corrente de corrosão das três armaduras submetidas ao jateamento abrasivo de areia combinado com um hidrojetamento de água quente com pressão de aproximadamente 1600 psi.

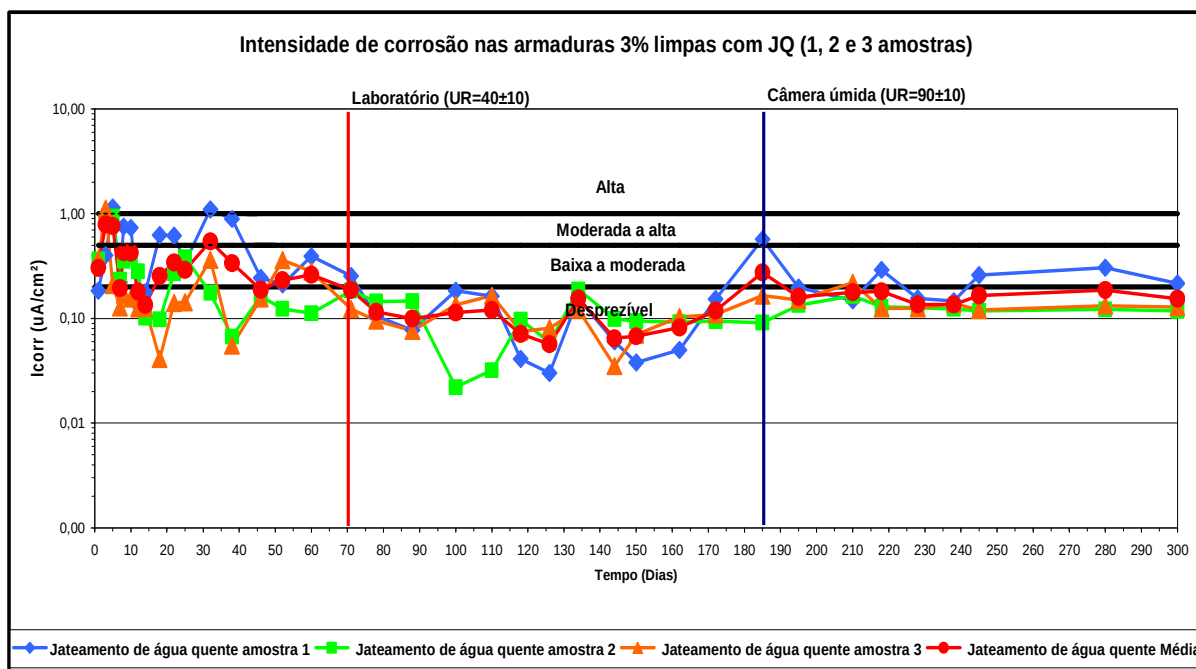


Figura 5.36 – Densidade de corrente de corrosão da média e das três armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , submetidas à limpeza com jateamento de areia combinada com hidrojetamento de água quente com pressão de 1600 psi.

A Figura 5.37 mostra o comportamento das três armaduras submetidas à limpeza com hidrojetamento de alta pressão, com aproximadamente 6000 psi, em relação à densidade de corrente de corrosão.

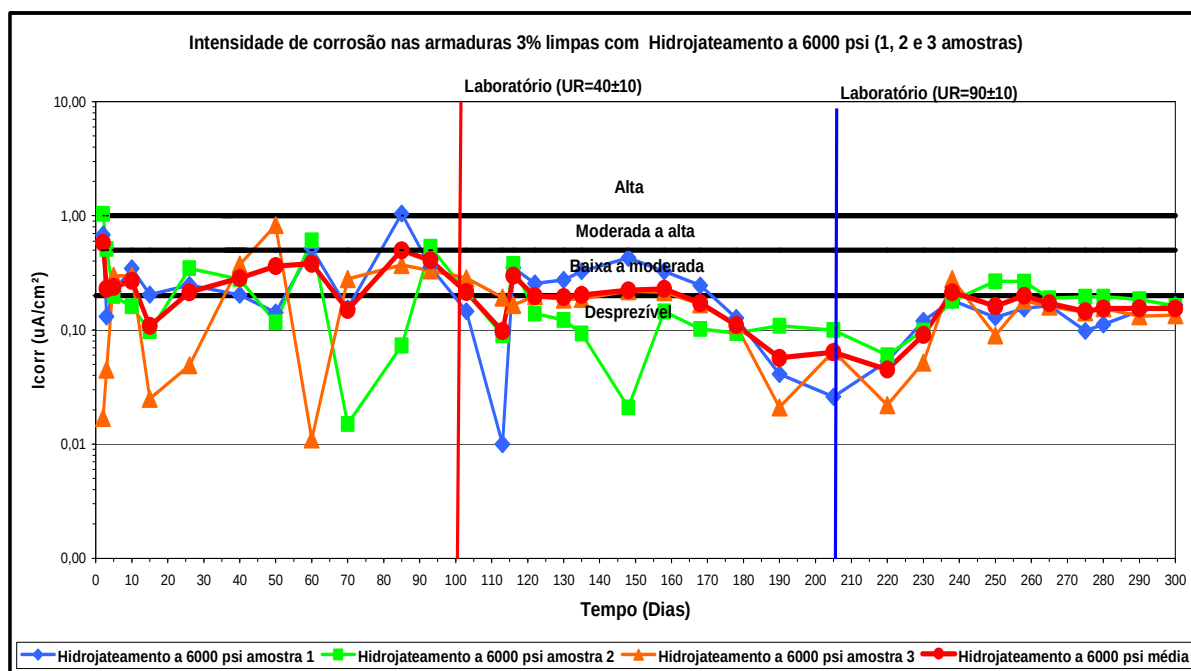


Figura 5.37 – Densidade de corrente de corrosão da média e das armaduras, removidas do concreto com 3% de Cl^- , após serem submetidas à limpeza com hidrojateamento de alta pressão com 6000 psi.

Ao analisar os resultados da densidade de corrente de corrosão das armaduras, inicialmente, verifica-se que as **armaduras referência** (Figura 5.33), ou seja, aquelas que não passaram por procedimento de limpeza, estiveram em média com a intensidade de corrente de corrosão entre moderada - alta ($0,5 - 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a alta (maior que $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). No final do ensaio, quando armazenada em câmara úmida ($\text{UR } 90 \pm 10\%$), a densidade de corrosão variou, em média, de $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $1,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. É também importante observar que, logo após a concretagem das armaduras, os valores de densidade de corrente de corrosão tendem a decrescer. Isto ocorre devido, provavelmente, ao aumento da resistividade do concreto em função da hidratação do cimento, da secagem do material e da possibilidade de formação da película passiva. No processo de hidratação do cimento ocorre a redução da água disponível, diminuindo o teor de umidade e aumentando a resistividade. Ao levar os corpos-de-prova ao ambiente com baixa umidade relativa do ar, em torno de $40 \pm 10\%$, ocorre o aumento considerável da resistividade do concreto, dificultando, assim, o processo de corrosão, uma vez que a umidade no concreto é um item essencial para que ocorra o processo de corrosão. Nesta fase do ensaio, registrou-se os mais baixos valores de densidade de corrosão, não somente para o caso da armadura referência, como, também, em todos os demais casos. Mesmo assim, em média, não obteve-se, em nenhum momento, resultados de intensidade de corrente de corrosão desprezível (menor que $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Ao devolver os corpos-de-prova a

câmara úmida, os valores de densidade de corrente de corrosão saltaram para valores entre baixa - moderada ($0,2 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a moderada - alta ($0,5 - 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Nota-se que as três amostras apresentaram resultados similares, indicando que elas estavam com o grau de deterioração e contaminação parecidos.

Verificando o comportamento da densidade de corrente de corrosão das armaduras limpas com **escova de aço manual** (Figura 5.34), observa-se, claramente, a ineficácia deste procedimento, obtendo uma pequena melhoria em relação às armaduras sem procedimento de limpeza. Inicialmente, em câmara úmida, a densidade de corrente de corrosão média encontrou-se na faixa de baixa – moderada ($0,2 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a moderada – alta ($0,5 - 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Ao passar ao ambiente com baixa umidade relativa do ar, de $40 \pm 10\%$, os resultados se apresentaram entre desprezível (menor que $0,1 - 0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a baixa – moderada ($0,2 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Retornando os corpos-de-prova à câmara úmida, os resultados subiram para corrosão alta, ou seja, maior que $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Nota-se que os resultados não apresentaram consideráveis divergências, mostrando que mesmo com grandes dificuldades, conseguiu-se manter os mesmos padrões de limpeza. Importante lembrar que em situações reais, para este tipo de procedimento de limpeza é quase impossível conseguir os mesmos padrões de limpeza. Isto geralmente ocorre devido que, no processo de limpeza das armaduras com escova de aço manual, no início do serviço é normal se aplicar uma energia mais intensa em uma barra do que nas barras posteriores, fato que ocorre devido ao cansaço físico do operário, por exemplo.

As armaduras limpas com a combinação de **Jateamento abrasivo de areia e hidrojateamento de água fria com baixa pressão** (1600 psi), Figura 5.35, do início do monitoramento até os 71 dias, quando estavam armazenados em câmara úmida, apresentaram resultados de densidade de corrente de corrosão de baixa – moderada ($0,2 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a moderada – alta ($0,5 - 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Ao transportar os corpos-de-prova para ambiente de baixa umidade relativa do ar, em torno de $40 \pm 10\%$, a densidade de corrente de corrosão se estabilizou em valores considerados desprezíveis (menor que $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Ao retornar à câmara úmida, ambiente bastante favorável para o processo de corrosão, a primeira e terceira amostra permaneceram com densidade de corrente de corrosão entre desprezível a baixa – moderada. De acordo com os resultados, pôde-se definir que esta técnica de limpeza se apresentou como um sistema homogêneo e repetível em relação aos seus resultados.

As armaduras limpas com a combinação de **Jateamento abrasivo de areia e hidrojateamento de água quente com baixa pressão** (1600 psi), Figura 5.36, apresentaram

do início das medições até os 71 dias, momento em que estavam armazenados em câmara úmida, uma densidade de corrente de corrosão bastante variável. No entanto, a densidade de corrosão média ficou, preponderantemente, no intervalo de 0,2 a 0,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, considerada de baixa a moderada, segundo os critérios da Tabela 4.1, no Item 4.1.3.1. Em ambiente com umidade relativa controlada entre $40 \pm 10\%$, todas as amostras apresentaram intensidade de corrente de corrosão considerada desprezível. Ao retornarem à câmara úmida apenas os resultados da primeira amostra apresentaram-se no intervalo de densidade de corrente de corrosão de baixa a moderada. A segunda, terceira e média das amostras apresentaram densidade de corrosão desprezíveis. Prevalecendo estes últimos resultados. Os resultados desta combinação de procedimentos de limpeza mostraram-se homogêneos e repetíveis.

As armaduras limpas por **hidrojateamento com pressão de 6000 psi** (Figura 5.37), inicialmente, quando armazenadas em câmara úmida apresentaram resultados entre desprezível (menor que 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) a baixa – moderada (0,2 a 0,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Levando-as para um ambiente com uma umidade relativa controlada entre $40 \pm 10\%$, os resultados prevaleceram para densidade de corrente de corrosão desprezível. No entanto, a primeira amostra apresentou densidade de corrente de corrosão de baixa a moderada, e a média das amostras com resultados desprezíveis para a densidade de corrosão. Ao retornarem à câmara úmida, os resultados se apresentaram desprezíveis para a densidade de corrente de corrosão em todas as amostras. Os resultados foram muito favoráveis para este sistema de limpeza, que se apresentou como o sistema mais eficaz entre os sistemas pesquisados, seguido da combinação de jateamento de areia a seco com hidrojateamento de água quente com pressão de 1600 psi.

b) Potencial de corrosão (E_{corr})

As Figuras 5.38 a 5.42 apresentam os resultados do potencial de corrosão das armaduras referência e das armaduras submetidas aos sistemas de limpeza. Cada Figura apresenta os resultados das três amostras de cada procedimento de limpeza e sua respectiva média dos resultados.

A Figura 5.38 apresenta os resultados de potencial de corrosão das armaduras que não foram submetidas a processos de limpeza, ou seja, armaduras utilizadas como referência.

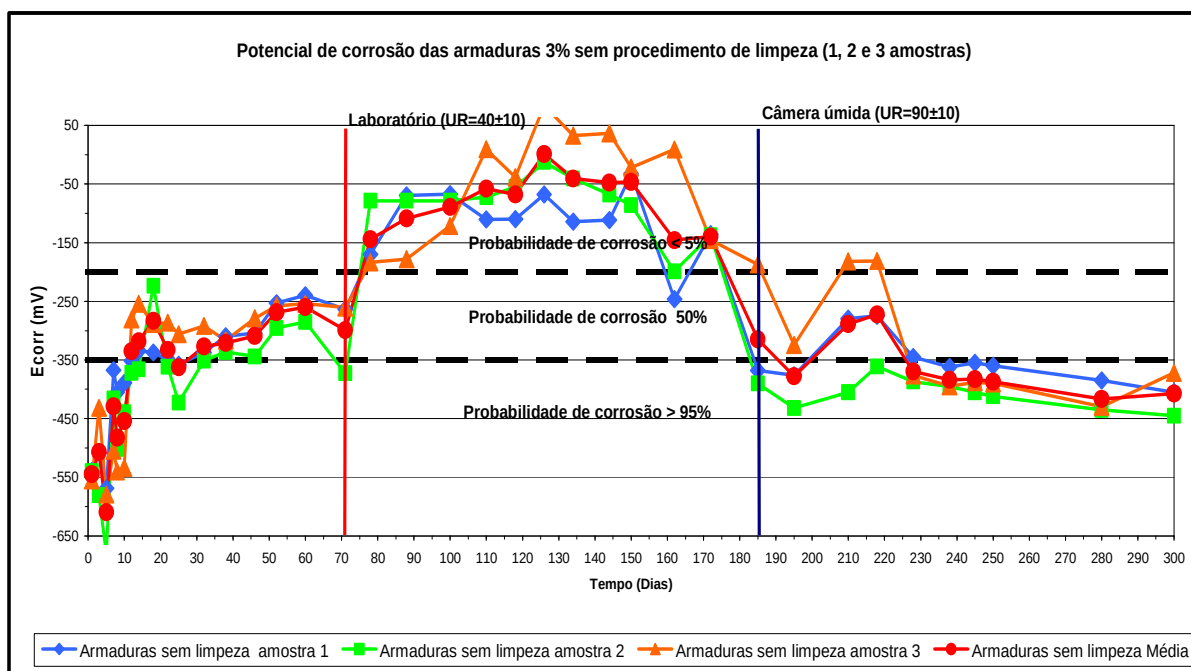


Figura 5.38 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos sem procedimentos de limpeza.

A Figura 5.39 apresenta o potencial de corrosão das armaduras que foram submetidas à limpeza com escova de aço manual.

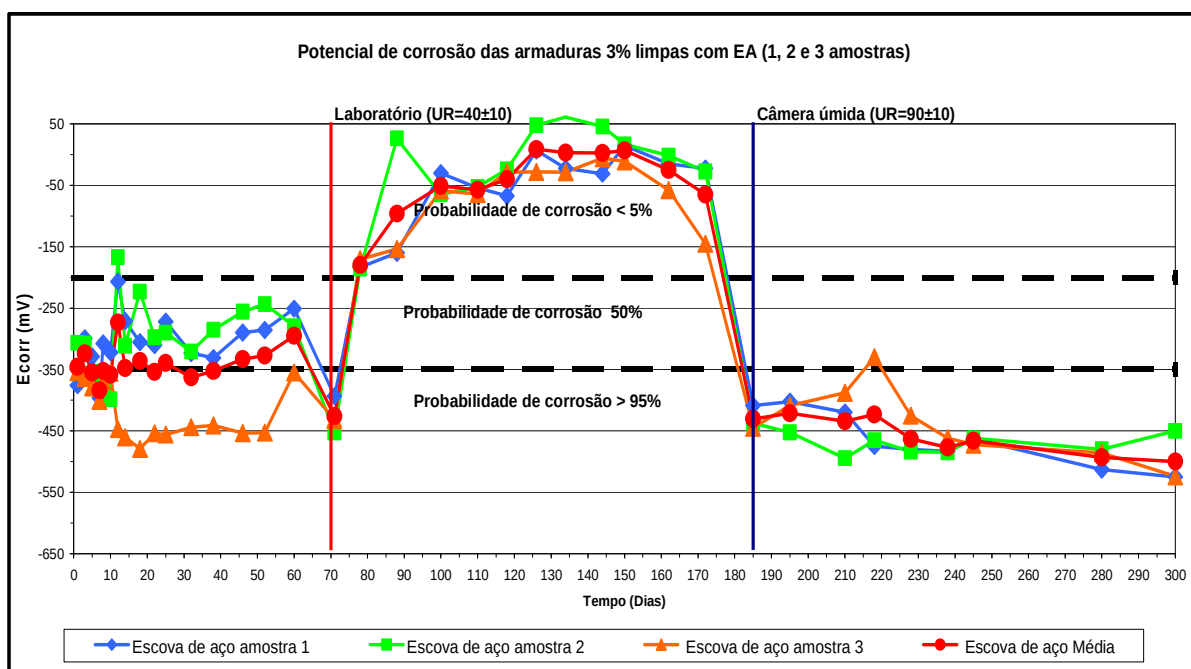


Figura 5.39 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos e limpas com escova de aço manual.

A Figura 5.40 apresenta o potencial de corrosão das armaduras que foram limpas com a combinação de jateamento abrasivo de areia e hidrojetamento de baixa pressão (1600 psi) com água fria.

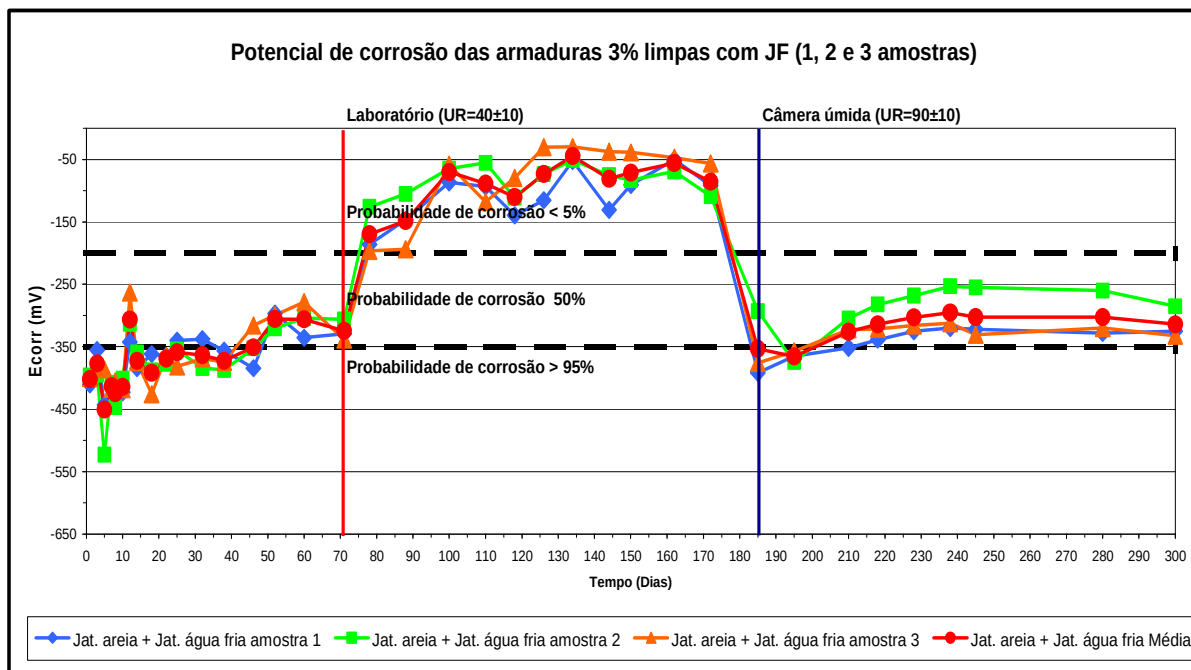


Figura 5.40 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos limpas com jateamento abrasivo de areia e hidrojetamento de água fria com baixa pressão (1600 psi).

A Figura 5.41 mostra o potencial de corrosão das armaduras submetidas à limpeza com a combinação de técnicas de jateamento abrasivo de areia e hidrojetamento de baixa pressão (1600 psi) com água quente.

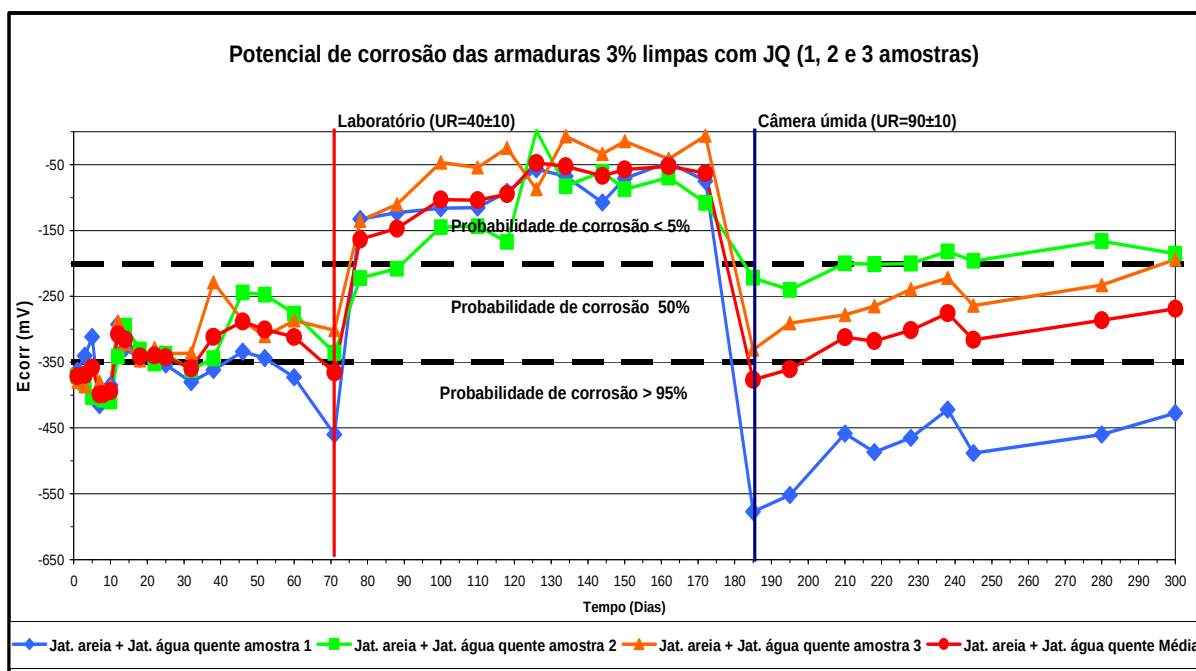


Figura 5.41 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos e limpas com jateamento abrasivo de areia e hidrojateamento com água morna de baixa pressão (1600 psi).

A Figura 5.42 apresenta o potencial de corrosão das armaduras submetidas à limpeza por hidrojateamento de alta pressão (6000 psi).

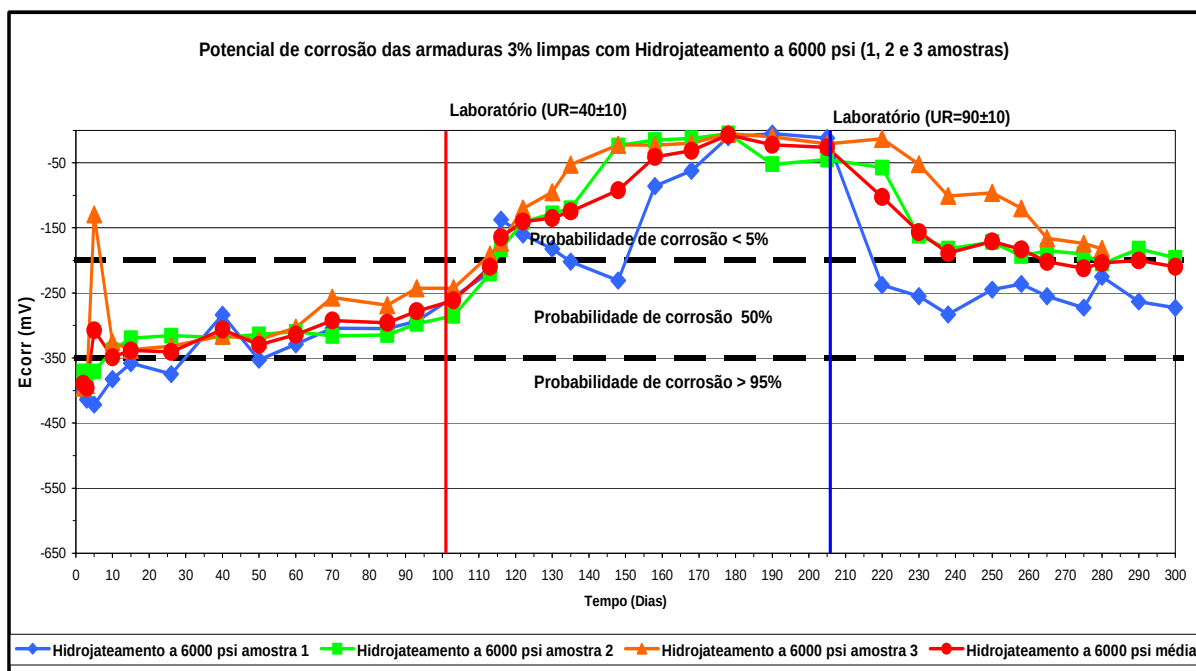


Figura 5.42 – Potencial de corrosão das armaduras removidas do concreto com 3% de cloretos e limpas com hidrojateamento de alta pressão (6000 psi).

Em análise aos potenciais de corrosão dos corpos-de-prova avaliados verificou-se a grande interferência da umidade do ambiente onde se encontravam armazenadas as amostras. Inicialmente, momento em que os corpos-de-prova se encontravam em câmara úmida ($UR\ 90 \pm 10\%$), observou-se que logo após a concretagem das armaduras, os potenciais de corrosão se encontravam abaixo de -350 mV , ou seja, probabilidade de corrosão maior que 95% e que após um determinado período, o qual variava de acordo com os procedimentos de limpeza, tendia a ascender para intervalos de probabilidades de corrosão de incerteza, entre -350 mV a -200 mV .

Ao se armazenar estes corpos-de-prova em laboratório com umidade relativa do ar controlada em $40 \pm 10\%$, observaram-se a ascendência de alguns corpos-de-prova para intervalos de probabilidades de corrosão menor que 5%, ou seja, potencial de corrosão maior que -200 mV e uma ascendência para alguns corpos-de-prova ocorrendo mais lentamente, variando de acordo com os procedimentos de limpeza. Estas ascendências dos resultados dos potenciais de corrosão se devem ao fato de reduzir um dos principais itens para a continuidade do processo de corrosão, a umidade. O que faz com que ocorra uma alteração do meio aço – concreto aumentado sua resistividade e diminuindo a mobilidade dos íons ao entorno da armadura.

Voltando os corpos-de-prova para a câmara úmida, verificou-se claramente a descendência dos potenciais de corrosão para intervalos de probabilidades de corrosão maior que 95%, ou seja, menor que -350 mV .

Nos corpos-de-prova que continham as **armaduras sem procedimento de limpeza** (Figura 5.38), logo após a concretagem das barras e armazenamento em câmara úmida ($UR\ 90 \pm 10\%$), verificou-se que os resultados dos potenciais de corrosão estavam na faixa de -650 mV a -450 mV (probabilidade de corrosão maior que 95%) e logo em seguida subiram para a faixa de -350 mV a -250 mV (probabilidade de incerteza de corrosão). Essa diminuição da eletronegatividade dos potenciais de corrosão ocorre devido à hidratação do cimento formando ou iniciando a formação da película passiva, como também, neste processo de hidratação do cimento ocorre a redução de água disponível, diminuindo a umidade e conseqüentemente, aumentando a resistividade. Ao transferir os corpos-de-prova para o laboratório com umidade relativa controlada em $40 \pm 10\%$, os resultados subiram rapidamente para a faixa acima de -150 mV (probabilidade de corrosão menor que 5%), isto indica que o processo de corrosão foi diminuído devido a redução da umidade (eletrólito) no interior do concreto. No final da análise, retornando os corpos-de-prova para a câmara úmida, ambiente

favorável para o processo de corrosão, os resultados de potenciais de corrosão retornaram a região de probabilidade de corrosão maior que 95%, estando entre resultados de -450 mV a -350 mV.

Os resultados dos potenciais de corrosão das armaduras limpas com **escova de aço manual** (Figura 5.39), novamente, se apresentaram muito semelhantes aos das armaduras sem procedimentos de limpeza. Inicialmente, em câmara úmida estiveram na faixa de -450 mV a -250 mV. Transferindo as amostras para o laboratório com umidade relativa controlada em $40 \pm 10\%$, os resultados dos potenciais de corrosão subiram para a faixa acima de -150 mV. Retornando a câmara úmida, obteve-se resultados entre -500 mV a -400 mV. Os resultados neste procedimento se mostraram homogêneos e repetíveis.

A combinação de sistemas de limpeza com **jateamento de areia seco e hidrojateamento de água fria de baixa pressão (1600 psi)** (Figura 5.40) apresentou no momento em que estavam armazenados em câmara úmida potenciais de corrosão entre -450 mV a -350 mV, ou seja, na faixa de probabilidade de corrosão maior que 95%. Transferindo os corpos-de-prova para o laboratório com umidade relativa controlada em $40 \pm 10\%$, os resultados dos potenciais subiram para uma faixa acima de -150 mV. Retornando os corpos-de-prova à câmara úmida, verificou que as três amostras permaneceram na faixa de probabilidade de corrosão de incerteza, apresentando valores de potenciais de corrosão entre -350 mV a -250 mV. Os resultados dos potenciais de corrosão nestes corpos-de-prova apresentaram-se homogêneos e repetíveis, indicando mesma qualidade nas limpezas das armaduras, grau de contaminação e características no concreto de cobrimento.

A combinação de sistemas de limpeza com **jateamento de areia seco e hidrojateamento de água quente de baixa pressão (1600 psi)** (Figura 5.41), inicialmente em câmara úmida, apresentou resultados na região de probabilidade de corrosão maior que 95% a faixa de incerteza, entre -400 mV a -300 mV. Em ambiente com a umidade relativa controlada em $40 \pm 10\%$, os potenciais de corrosão subiram rapidamente para a faixa acima de -150 mV. Armazenando-os novamente em câmara úmida, os resultados da primeira amostra apresentaram divergências com os resultados das demais amostras. A primeira amostra teve seu potencial de corrosão entre -500 mV a -450 mV (probabilidade de corrosão maior que 95%) e a segunda e terceira amostras apresentaram resultados entre -300 mV a -200 mV (probabilidade de corrosão incerta).

O sistema de limpeza com **hidrojateamento de alta pressão (6000 psi)**, inicialmente em câmara úmida apresentou potenciais de corrosão entre -350 a -300, ou seja,

probabilidade de corrosão incerta. Ao armazenar os corpos-de-prova em ambiente com umidade relativa $40 \pm 10\%$, os resultados ascenderam para a faixa acima de -150 mV. Retornando à câmara úmida os resultados se apresentaram na faixa de -200 mV a -150 mV (probabilidade de corrosão menor que 5%), com exceção da primeira amostra que seus resultados decresceram para a -300 mV a -250 mV (probabilidade de corrosão de incerteza).

Ao analisar os resultados dos potenciais de corrosão, verificou-se que os corpos-de-prova com armaduras limpas por meio de hidrojateamento de alta pressão (6000 psi) apresentaram os melhores resultados, indicando que esta técnica controlou o processo de corrosão.

6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões associadas ao atendimento dos objetivos da presente dissertação. Fornecendo uma conclusão dos resultados obtidos nos ensaios dos materiais e técnicas de reparo avaliadas nesta pesquisa.

6.1 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE REPARO (ETAPA I)

6.1.1 Avaliação dos sistemas de reparo por meio de medidas eletroquímicas

Os ensaios realizados na primeira parte da primeira etapa permitiram avaliar a eficácia dos sistemas de reparo após cinco anos da realização dos procedimentos de reparos.

Diante dos resultados obtidos pode-se verificar, nas condições ensaiadas, que o material **concreto referência** não foi apropriado para a realização de serviços de recuperação estrutural com problemas de corrosão. Este material apresentou resultados insatisfatórios em todos os aspectos ensaiados.

Os reparos realizados com o **microconcreto fluido** foram os que apresentaram os melhores resultados. De acordo com as características observadas e ensaiadas, concluiu-se que o microconcreto fluido é um material adequado para a utilização em recuperação estrutural de estruturas de concreto com problemas de corrosão.

A **argamassa com inibidor** de corrosão apresentou resultados sensivelmente piores em relação ao microconcreto. No entanto, pode ser indicada para a utilização em reparos localizados em estruturas com problemas de corrosão, nas condições ensaiadas.

A **ponte de aderência epoxídica** com a função de barreira à penetração dos íons cloreto da região não-reparada para a região reparada, apresentaram parâmetros eletroquímicos, ligeiramente, mais favoráveis ao controle do processo de corrosão. No entanto, esta análise terá melhor embasamento na segunda parte da primeira etapa desta

pesquisa, que efetivamente mediu o teor de cloretos passantes na barreira epoxídica (Item 6.1.2).

6.1.2 Difusão dos íons cloreto

Com relação às análises dos perfis de cloretos obtidos, afim de verificar a eficácia da ponte de aderência epoxídica e dos materiais de reparo como função de barreira contra a difusão dos íons cloreto, conclui-se que:

- Houve uma redução na difusão dos íons cloreto da região não-reparada para a região reparada com a utilização da ponte de aderência epoxídica. Porém, a utilização deste material não evitou por completa a penetração destes íons, gerando resultados insatisfatórios para o objetivo desejado.
- As qualidades e características dos materiais de reparo (microconcreto fluido e argamassa com inibidor de corrosão) mostraram que foram mais eficazes na função de barreira contra a difusão dos íons cloreto em comparação com a ponte de aderência epoxídica.

6.2 AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE LIMPEZA DAS ARMADURAS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO POR ÍONS CLORETO (ETAPA II)

6.2.1 Avaliação por meio de microscopia estereoscópica

Após a realização os procedimentos de limpeza nas armaduras, fizeram-se uma análise visual e microscópica das superfícies das armaduras, com o objetivo de verificar a existência de produtos e *pites* de corrosão que ainda poderiam estar contaminados por íons cloreto.

Verificou-se que as armaduras submetidas à limpeza com escova de aço manual e hidrojateamento de alta pressão apresentaram as aparências mais desfavoráveis, verificando-se a existência de muitos produtos de corrosão. No entanto, no caso do

hidrojateamento de alta pressão, a aparência indesejada pode ter sido devido a uma corrosão atmosférica, a qual deixou a superfície com manchas de produtos de corrosão, os quais, devido à natureza do fenômeno não influenciam na corrosão futura.

As armaduras submetidas à limpeza com jateamento de areia à seco apresentaram as melhores aparências a olho nú. No entanto, ao submeter às análises em microscopia estereoscópica, visualizou-se pites de corrosão com a presença de produtos de corrosão em seus interiores. Este fato era esperado, uma vez que os grãos de areia, devido ao seu tamanho, não conseguem entrar e limpar o interior dos *pites*.. Este pode ser o motivo pelo qual Vassie (1989) concluiu que o procedimento de jateamento de areia não é eficaz na limpeza de armaduras corroídas pela ação dos íons cloreto.

6.2.2 Avaliação dos procedimentos de limpeza por meio de medidas eletroquímicas

Por meio de medidas eletroquímicas foram avaliados os sistemas de limpeza das armaduras, concluindo-se que:

- O sistema de limpeza com escova de aço manual apresentou um comportamento muito próximo às armaduras que não foram submetidas a nenhum procedimento de limpeza, ou seja, este sistema apresenta pouca eficácia.
- O sistema de limpeza com a combinação de técnicas de jateamento de areia à seco e hidrojateamento de água fria com pressão de 1600 psi, apresentou-se superior ao sistema de escova de aço manual. Porém, ainda foi verificado continuidade no processo de corrosão nas armaduras limpas com este procedimento.
- Os melhores procedimentos ensaiados foram o jateamento de areia à seco combinado com o hidrojateamento de água quente com pressão de 1600 psi e o hidrojateamento de alta pressão com 6000 psi. As armaduras limpas com estes procedimentos apresentaram densidade de corrente de corrosão desprezível ao final das medições eletroquímicas.

- Verificou-se grande dificuldade para se manter os mesmos padrões de limpeza nas armaduras. Mostrando que em situações reais é fácil ocorrer grandes divergências nos resultados de limpeza das armaduras.

6.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Analisar outros tipos de materiais e técnicas de limpeza existentes no mercado;
- Analisar um novo concreto referência com características melhoradas, buscando obter um material com as características semelhantes de um microconcreto fluido e com um custo inferior ao do microconcreto fluido industrializado;
- Ensaiar estruturas em serviço que tenham sido pintadas com epóxi, analisando a eficácia do produto no impedimento do processo de corrosão por meio da redução do acesso de oxigênio, da umidade ou dos agentes agressivos.
- Revestir por completo corpos-de-prova com uma película epoxídica e submeter a ataques externos de cloretos, verificando a eficácia deste revestimento no impedimento do processo de corrosão.
- Avaliar outros procedimentos de limpeza das armaduras, como por exemplo a combinação de técnicas de jateamento de areia com hidrojateamento de alta pressão a partir de 6000 psi.
- Ensaiar os mesmos procedimentos de limpeza. Porém, concretando posteriormente com materiais de melhores qualidades, como o microconcreto fluido, uma argamassa com inibidor ou um concreto com melhores características, como maior resistência à compressão e menor absorção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KHAJA, A. W. **Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes.**

Construction and Buildings Materials, v. 11, n. 1, 1997, p. 9-13.

ALMENAR, G. V. **Ingreso de cloruros em hórmiçon:** métodos de análisis, detección no destructiva y modelización del transporte tras un aporte inicial limitado. Alicante: Universidad de Alicante, 2000, Tese de Doutorado.

ALONSO, C.; ANDRADE, C. **Effect of nitrite as a corrosion inhibitor in a contaminated and chloride-free carbonated mortars.** ACI materials Journal, v.87, n.2, p.130-37, 1990.

ALONSO, C.; ANDRADE, C. **Corrosion of steel reinforcement in carbonated mortar containing chlorides.** Advances in Cement Research, v.1, n.3, p. 155-163, 1988.

ALVES, J.D. **Manual de tecnologia do concreto.** 3.ed.. Goiânia, Editora da UFG, 1993. 194p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE-COMMITTEE 222. **Corrosion of metals in concrete.** ACI 222R-85, American Concrete Institute Journal, Proc. 82(1), 1985, p. 3-32.

_____. **Corrosion of Metals in Concrete:** reported by ACI Committee 222, 1991. Detroit: ACI Manual of Concrete Practice, 1991. v. 1.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.** ASTM C 1152M. In: - Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.** ASTM C 1152M. In: - Annual Book of ASTM Standards. West Conshohoken, 2004.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard Test Method for Water-Soluble Chloride Present as Admixes in Graded Aggregate Road Mix.** ASTM C 1411 In: - Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.** ASTM C 1202 In: - Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard Test Methods for Half Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.** ASTM C-876. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, E.U.A., 1991.

ANDRADE, W. P. (Ed). **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades.** Equipe Furnas. São Paulo, 1997.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** Ed. PINI, São Paulo, 1992, 104 p.

ANDRADE, C., MARIBONA, I., FELIÚ, S., GONZÁLEZ, J. A., FELIÚ, JR. S. **The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcement.** Corrosion Science, vol. 33, n. 2, 1992. p. 237 – 249.

ANDRADE, C., MARIBONA, R. **Macrocell versus microcell corrosion of reinforcements placed in parallel.** Corrosion 92. The Nace Annual Conference and Corrosion Show, paper n. 194, 1992. p. 3 – 16.

ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. **Tendencias actuales en la investigacion sobre corrosion de armaduras.** Informes de la Construcción, v.40, n.398, p.7-14, nov./dic. 1988.

ANDRIOLO, F.R.; SGARBOZA, B. C. **Inspeção e controle de qualidade do concreto.** São Paulo, NEWSWORK, 1993. 572p.

ANDRADE, C.; PAGE, C. L. **Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts; a study of cation specific effects.** British Corrosion Journal. Vol. 21, N° 1, 1986, p. 49-53.

ANDRES, P. R. **A influência da natureza do aglomerante e suas adições na carbonatação de argamassas de concreto.** In: IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção. São Paulo, Maio. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2003). **Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro, 242 p.

_____. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro, 1978.

_____. NBR 5739. **Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos de concreto.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1980.

_____. NBR 7251. **Agregado em estado solto - Determinação da Massa Unitária.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR 9776. **Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco de Chapman.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 6467. **Agregados – Determinação do Inchamento de Agregado Miúdo.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 7217. **Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 7223. Concreto – **Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 1992.

BAKKER, R. F. M. **Initiation Period: Corrosion of steel in concrete; State of the Art Report.** Cap. 3, RILEM TC 60-CSC, Editor Peter Schiessl, Ed. Chapman & Hall, 1988, p. 22-54.

BASILIO, F. A.; **Durabilidade dos Concretos. Permeabilidade e Corrosão Eletrolítica.** São Paulo, ABCP, 1972.

BAUER, E.; HELENE, P. R. L. **Investigação comparativa da influência da escória de alto-forno na corrosão das armaduras.** In: Proceedings of the international congress on high performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Anais. Florianópolis, SC, 1996. p. 433-444.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT DIGEST. The durability of steel in concrete: Part 1; Mechanism of protection and corrosion. Garston, **BRE Digest 263**, Jul. 1982. 7p.

BUILDING RESEARCH STATION DIGEST. **Zinc Coated Reinforcement for concrete.** BRE Digest 109, sept., 1969. 7p.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION Structural use of concrete. Part 1: Code of Practice for Design and Construction. London, **BS 8110**, 1985.

CASTANHEIRA, A. P. A. **Estudo de um sistema de reparo mais eficaz para uma estrutura de concreto armado contaminada por cloretos.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 1997. 146 p.

CASTRO, P. **Corrosión en estructuras de concreto armado: teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones.** 1ª edición. México: Ed. Instituto Mexicano Del Cemento y Del concreto, A. C, 2001. 125p.

CASTRO, P.; CASTILLO, R.; CARPIO, J. **Procedimiento para determinar daños en estructuras corroídas. Inspección preliminar.** Corrosión en estructuras de concreto armado: teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 2001. p.33 – 42.

CASTRO, P.; CASTILLO, R.; CARPIO, J. **Procedimiento para determinar daños en estructuras corroídas. Inspección detallada.** Corrosión en estructuras de concreto armado: teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 2001. p.43 - 50.

CASTRO, P.; PAZINI, E.; HELENE, P. **Sistemas de reparación para estructuras dañadas por corrosión.** Corrosión en estructuras de concreto armado: teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. 2001. p.33 – 42.

CASTRO, P.; RINCÓN, O. T.; PAZINI, Enio. **Chloride penetration profiles in marine environments.** In: II International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures. Porto Alegre: UFRGS, 1999. p.371 -389.

CASTRO, P.; PAZINI, E.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. **Macrocell activity in slightly chloride-contaminated concrete induced by reinforcement primers.** Corrosion, NACE, vol. 59, n°. 06, june, 2003. p.535-546.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL - CEB. **Durability of concrete structures.** Report of CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, Maio, 1983; también CEB Bulletin D'Information, N9 152, 1984.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL - CEB. **Durability of concrete structures;** State of the Art Report.Bulletin D'Information n. 148, Paris, 1982.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL - CEB. **Durable concrete structures:** Design guide. 1992. Lausanne: 1992. (Bulletin d' Information, n. 152).

COOTE, A. T.; MCKENZIE, S. G.; TREADAWAY, W. J. **Repair to reinforced concrete in marines structures: assessment of a method for studying and evaluating repair system.** Marine Concrete 96, International Conference on Concrete in the Marine Enviroment, Londres, 1986. p. 333 – 348.

CYTED – PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA PARA EL DESARROLLO. **Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón: reparación, refuerzo y protección.** Editores: Paulo Helene e Fernanda Pereira. 1ª edición. Cytel – Sub programa xv, red. REHABILITAR – Red Temática XV.F, Reparación, refuerzo y protección de estructuras de hormigón, 2003. 741p.

CYTED – PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA PARA EL DESARROLLO. **Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.** Editores: Oladis de Rincón, Aleida de Carruyo, Carmen Andrade, Paulo Helene e Isabel Diaz. 2º edición. CYTED – Sub Programa xv, Red Durar, Red temática XV. B Durabilidad de la armadura, 1998. 208 p.

FIGUEIREDO, E. J. P.; ANDRADE, C.; HELENE, P. R. L. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura de concreto.** São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 1993. (Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC121).

FIGUEIREDO, E. P.; O'REILLY, V. Orientación para el Diagnóstico. Capítulo 2. In: **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón: reparación, refuerzo y protección.** Editores: Paulo Helene e Fernanda Pereira. CYTED – XV-F. 2003, Capítulo 2, p.111-157.

FIGUEIREDO, E. J. P. **As técnicas eletroquímicas e o estudo da durabilidade do concreto armado.** In: WORKSHOP – DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São Leopoldo, 1997. **Anais.** São Leopoldo: 1997. p. 93 – 106.

FIGUEIREDO, E. P.; ANDRADE, C. **Protection corrosion mechanisms involved in repair systems with surface coatings on reinforced cement.** In: Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures: The State of the Art. **Anais.** ASCE, 1997. p.224-238.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas: contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.** Tese (Doutorado) – CPGECC, Escola Politécnica de São Paulo – USP, São Paulo, 1994. 423 p.

FIGUEIREDO, E. J. P.; ANDRADE, J. J. O. **Materiais para reparar as estruturas atacadas: reparo localizado.** In: Seminário Internacional sobre a Prevenção, Inspeção e Reparo de Estruturas de Concreto Atacadas pela Corrosão da Armadura. Porto Alegre, RS, 1995.

FIGUEIREDO, E. J. P.; **As técnicas eletroquímicas e o estudo da durabilidade do concreto armado.** In: **Seminário Internacional de Avanços na Tecnologia do Concreto.** Goiânia, 1999. **Anais,** p. 44-57.

FIGUEIREDO, E. J. P.; **Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto.** In: **CONCRETO, Ensino, Pesquisa e Realizações.** Editor: Geraldo Isaia. Vol II. IBRACON, 2005, Cap. 27, p. 829-855.

FUJIWARA, M.; MINOSAKU, K. **Repair methods for concrete bridges deteriorated by chloride ions.** The United States Strategic Highway Research Program, Ed. Thomas Telford, London, 1990, p. 125-134.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3.ed. Rio de Janeiro, LTC editora, 1996. 345p.

GEOCISA. **Manual de Utilización del Equipo GECOR6**. Madrid, 1993.

GEHO, D. **Morteros de reparación**. Boletín n. 04, 1989. p. 66.

GJORV, O. E.; VENNESLAND, O. **Diffusion of chlorides ions from seawater into concrete**. Cement and Concrete Research, v. 91, 1979, p. 229-238.

GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. **The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete**. Corrosion Science, Great Britain, v. 39, n. 5, p. 1001 – 1013, 1997.

GOÑI, S. e ANDRADE, C. **Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides**. Cement and Concrete Research, vol. 20, 1990, p. 525-539.

GOÑI, S.; MORAGUES, A.; ANDRADE, C. **Influencia de la conductividad y fuerza iónica de soluciones sintéticas que simulan la fase acuosa del hormigón en el fenómeno de la corrosión de armaduras**. Materiales de Construcción, v. 39, n. 215, 1989, p. 19-28.

GONÇALVES, H.S.; FERREIRA, R.C.; FIGUEIREDO, E.P.; LEÃO, S. **Permeabilidade do Concreto ao Ar Pelo Método de Figg**. In: CONPAT 99 – V Congresso Ibero-americano de Patologia de las Construcciones e VII Congreso de Control de Calidad. **Anais**. Montevideo, 1999, v. 1, p.261-68.

GONZÁLEZ, J. A., FELIU, S., RODRIGUES, P., RAMIREZ, E., ALONSO, C., ANDRADE, C. **Some questions on the corrosion of steel in concrete – part 1: when, how and how much steel corrodes**. Matériaux et Constructions/Materials and structures, vol. 29, 1996, p. 40-46.

GOUDA, V.K. **Anodic Polarization Measurements of corrosion and corrosion inhibition of steel in concrete**. British Corrosion Journal, v. 1, 1966, p.138 -142.

GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marinhos.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. 241p.

HANSSON, C. M.; STRUNGE, H.; MARKUSSEN, J. B. e FRÖLUND, T. **The effect of cement type on the diffusion of chloride.** Nordic Concrete Research, Publicação N° 4, Dinamarca, 1985, p. 70-80.

HAUSMANN, D. A. **Steel corrosion in concrete; how does it occur?** Materials Protection. 1967, p. 19-23.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras de concreto armado.** Tese de livre Docência, EPUSP, São Paulo, 1993. 231p.

_____. **Manual para reparación, refuerzo y protección de las estructuras de concreto.** Tradução Leonel Tula e Nelson Brito. 1° edición. México: Ed. IMCYC, 1997. 148p.

_____. **Corrosão das armaduras em concreto armado.** In: 4° Simpósio de Aplicação de Tecnologia do concreto – Simpatcon. Anais. São Paulo, 1981, p. 1-44.

_____. **Corrosão das armaduras em concreto armado.** São Paulo, Pini, 1986.

_____. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: CONPAT 97 – IV Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. **Anais.** Porto Alegre, 1997, v.1, p.1-30.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. **Concrete quality after one year of outdoor exposure.** Durability of Building Materials, 5, 1987, p1-11.

HOLMES, C.W., BRUNDLE S.G. **The deterioration of reinforced concrete through chloride attack.** 2nd Int. Conf. Of deterioration and Repair of Reinforced Concrete of Arabian Golf, 1987. p. 469 - 487.

HUSSAIN, S. E., et al. **Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete.** Cement and Concrete Research, USA, v. 25, n. 7, p. 1543 – 1555, 1995.

JAEGERMANN, C. **Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to mediterranean sea climate.** ACI Materials Journal, v. 87, n. 4, p. 333-339. 1990.

JUCÁ, T. R. P. **Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de asperção de solução de nitrato de prata.** 2002. 129p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

JÚNIOR, P. F. **Estudo da difusão de oxigênio no concreto através da técnica eletroquímica.** 105p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997.

KAZMIERCZAK, C. S., **Contribuição para a análise de eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação.** Tese (Doutorado), EPUSP-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. 168p.

_____. **Proteção superficial do concreto.** In: **CONCRETO, Ensino, Pesquisa e Realizações.** Editor: Geraldo Isaia. Vol II. IBRACON, 2005, Cap. 29, p. 879-899.

KOBAYASHI, K.; SHUTTOH, K. **Oxygen diffusivity of various cementitious materials.** **Cement and Concrete Research.** vol. 21, 1991. p. 273 -284.

KRÖPP, J. Chlorides in Concrete. In: KRÖPP, J; HILSDORF, H. K. (ed.) **Performance Criteria for Concrete Durability.** (report 12 – RILEM). London: E&FN Spon, 1995. p. 138-164.

LAMBERT, P.; PAGE, C. L.; VASSIE, P. R. W. **Investigations of reinforcement corrosion-electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete.** Materials and structures, v. 24, 1991. p. 351-358.

LIMA, M. G.; **Ação do Meio Ambiente sobre Estruturas de Concreto** In: **CONCRETO, Ensino, Pesquisa e Realizações.** Editor: Geraldo Isaia. Vol II. IBRACON, 2005, Cap. 24, p. 713-751.

LÓPEZ, J.E.R. **Las resinas epóxicas en la rehabilitación de estructuras de concreto.** Construcción y Tecnología, 1995, p.38-44.

MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. **Factors, influencing chloride-induced corrosion of reinforcement in concrete.** Materials and Structures, v. 25, 1992, p. 404-411.

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

MEIRA, G. M. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2004. 327p.

NEPOMUCENO, 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, 1992. 371p. Tese (Doutorado) – Universidad Politécnica de Madrid.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto. In: **CONCRETO, Ensino, Pesquisa e Realizações.** Editor: Geraldo Isaia. Vol II. IBRACON, 2005, Cap. 26, p. 793-827.

NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R. **Chloride diffusion in partially saturated cementitious material**. Cement and Concrete Research, v. 33, p. 133 -138, 2003.

OHAMA, Y. **Polimer – Modified Mortars and concretes, concrete admixture handbook: Properties, science, and technology**. Noyes Publications, Park Ridge, 1984. P. 337 – 429.

OLLIVIER, J. P. ; **Durability of Concrete** (boletim técnico 192). São Paulo: USP, 1998. 129 p.

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

PAGE, C.L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. **The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel**. Cement and Concrete Research, v. 16, 1986, p. 79-86.

PAGE, C. L. ; TREADAWAY, K.W.J. **Aspects of the Electrochemistry of steel in concrete**. Nature, v. 297, May, 1982, p.109 – 115.

RASHEEDUZZAFAR et al. **Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete**. Cement and Concrete Research, v.20, n. 5, p. 723-738, September. 1990.

RIBEIRO, F. H. M. **Desempenho de inibidores de corrosão como método de prevenção e reparo para estruturas de concreto armado**. 2001. 196 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

RILEM DRAFT RECOMMENDATION. Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion, 1994, p. 415 – 436.

ROPER, H. E.; BAWEJA, D. **Carbonation-Chloride interactions and their influence on corrosion rates of steel in concrete**. EUA, American Concrete Association, ACI SP 126-16, 1989, p. 295-315.

RUANO, R. P. **importância de una metodología de investigación en los trabajos de patología, diagnóstico y rehabilitación de edificios**. In: CONPAT 97 – IV Congresso Ibero-americano de patología das construções e VI congresso de controle da qualidade, Porto Alegre, 1997. Anais, vol. 01, p. 685 – 692.

SÁ, R. R.; **Influência da realcalinização através da absorção/difusão de soluções alcalinas na resistência à compressão do concreto, na aderência de tintas e vernizes e na repassivação da armadura**. 2006. 109p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

SCHIESSL, P.; **Influence of the composition of concrete on the corrosion protection of the reinforcement**. American Concrete Institute. 1987, v. 2, p. 1634 – 1650.

SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. **Macrocell steel; corrosion in concrete caused by chlorides**. In: Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Montreal, 1991, p. 565-583.

SITTER, W.R. **Costs of service life optimization. The “law of fives”**. In: CEB-RILEM. Durability of concrete structures-International Workshop. Proceedings. Copenhagen, 1984.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª edição. São Paulo: Ed. PINI, 1998. 255p.

STERN, M.; GEARY, A. L. Electrochemical Polarization. **A theoretical analysis of the sharp of polarization curves**. J. Electrochemical Society, v.104, n.1, p.56-63, 1957.

TEIXEIRA, F. A. **Realcalinização do concreto carbonatado empregando solução rica em álcalis**. 2002. 150p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

TRITTHART, J. **Chloride binding in cement – the influence of the hidroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding**. Cement and Concrete Research, v. 19, p. 683 – 691, 1989.

TINÔCO, H. F. F. **Avaliação do desempenho de sistemas de reparo e recuperação para estruturas de concreto com corrosão das armaduras**. 2001. 143p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

TREADAWAY, K.; COX. R. N.; BROWN, B. L. **Durability of corrosion resisting steel in concrete**. Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 1, 86, Apr. 1989, p. 305-331.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. Tese de doutorado. 469 p.

VAGHETTI, M. A. O.; ISAIA, G. C. **Concreto de alto desempenho com misturas pozolânicas: um estudo sobre a influência da carbonatação**. In: 5º Congresso Brasileiro de Cimento, 1999.

VAIDERGORIN, E. Y. L.; DANTAS, F. A. S. **Determinação de cloretos em concretos endurecidos**. In: REIBRAC, São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, 27-31 Ago. 1984.

VASSIE, P. R. **The influence of steel condition on the effectiveness of repair to reinforced concrete**. Construction & Building Materials, v. 3, n. 4, p. 201 – 207, Dec. 1989.

VÉNUAT, M.; ALEXANDRE, J. **De la carbonation du béton.** França, CERILM, Publicação n.195, 1969, 30 p.

WALTERS, G., **Comparasion of látex-modified Portland cement mortars,** ACI Materials Journal, 1990.

ZANG, M.; GJØRV, O. **Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes.** Cement and Concrete Research, vol. 21, 1991. p. 1006 – 1014.

**ANEXO A – CARACTERÍSTICAS COMERCIAIS DOS MATERIAIS DE REPARO
ESTUDADOS EXTRAÍDAS DAS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS
FABRICANTES.**

A1 – MICROCONCRETO FLUIDO

A2 – ARGAMASSA ANTICORROSIVA FLUIDA

A3 – ADESIVO ESTRUTURAL DE BASE EPÓXI

A1 – MICROCONCRETO FLUIDO

Microconcreto fluido não retrátil, à base de cimento para reparo e reforço de concreto. É industrializado e necessita apenas de uma adição correta de água limpa.

É constituído por cimento Portland, agregados graduados e aditivos que conferem a expansão controlada no estado plástico e ainda reduzem a demanda de água, garantindo um rápido ganho de resistência, baixa permeabilidade e grande durabilidade.

Este material é indicado para o reparo de grandes seções de concreto armado e também de locais menores onde o acesso à região de reparo é restrito ou existe congestionamento de armaduras. Seu uso é recomendado para aplicações com até 300 mm de espessura, para situações onde se deseja baixa permeabilidade à água, a cloretos e ao dióxido de carbono.

VANTAGENS:

- 1- Altas resistências mecânicas;
- 2- Aderência excepcional a substratos de concreto, sem a necessidade do uso de adesivos;
- 3- A expansão controlada promove a compensação da retração no estado plástico;
- 4- Pode ser bombeado ou vertido por gravidade;
- 5- Auto-adensável;
- 6- Pré-dosado, eliminando a possibilidade de erros de dosagem;
- 7- Alta resistência inicial, facilitando a rápida liberação da estrutura;
- 8- Não contém aditivos à base de cloretos.

CRITÉRIOS DE PROJETO:

O microconcreto foi desenvolvido para reparos em larga escala, para espessuras maiores que 30 mm, podendo ser aplicado em seções de até 300 mm de espessura, porém, maiores espessuras podem ser atingidas, dependendo da configuração e condições do local de reparo

PROPRIEDADES:

Os seguintes resultados são válidos para relação água/pó 0,126, à temperatura de 25 °C:

Testes (RT 001/IPT)	Resultados	
Resistência à compressão (NBR 5739)	1 dia	20 MPa
	3 dias	30 MPa
	7 dias	40 MPa
	28 dias	50 MPa
Resistência à tração na flexão (ISSO-EN-196):	28 dias	10,4 MPa
Módulo de deformação (NBR 8522)	33,1 GPa	
Coeficiente de dilatação térmica linear (ASTM C 531)	$8,2 \times 10^{-6}$ por °C ⁻¹	
Permeabilidade ao vapor d'água (ASTM E 96):	1,3 ng / (Pa.s.m)	

Difusividade de cloretos (ASTM / AASHTO):

Material	Carga passante (C)	Classificação
Concreto a/c = 0.81	5072	Alta
Concreto a/c = 0.64	3267	Moderada
Concreto a/c = 0.53	3086	Moderada
Microconcreto	2648	Moderada

Obs.: Concretos de comparação com brita de dimensão máxima 19mm, ensaiados a 56 dias de idade, sendo 28 sob cura úmida padrão e 28 sob carbonatação acelerada.

Carbonatação acelerada (IPT/AMCC/MRT 1/3):

Material	Profundidade carbonatada (mm)	Tempo de carbonatação (dias)
Concreto a/c = 0.81	13,0	28
Concreto a/c = 0.64	6,0	28
Concreto a/c = 0.53	2,5	28
Microconcreto	0,0	56

Obs.: Câmara de carbonatação com ar passante contendo 5% de CO₂, temperatura 21 °C e U.R. 90%, imersão em água durante 30 minutos a cada 7 dias.

PREPARO DO SUBSTRATO:

- Delimitar a área de reparo fazendo um corte com disco diamantado, quebrando e removendo o concreto deteriorado;
- Limpar a superfície, removendo todo o pó, material contaminado, reboco, óleo, tinta, graxa ou ferrugem;
- Expor a armadura corroída ao redor de toda a sua circunferência, removendo os produtos de corrosão com jateamento de areia, garantindo um espaço livre de no mínimo 20 mm entre a armadura e o substrato;
- Se houver a presença de cloretos, lavar o aço com hidrojateamento de alta pressão;

PROTEÇÃO DA ARMADURA:

Pode ser aplicada uma pintura de proteção sobre a armadura à base de zinco, em casos especiais.

SATURAÇÃO DO SUBSTRATO:

O substrato, antes da aplicação do produto, deverá ser saturado com água limpa, de maneira que a superfície permaneça na condição de “saturada e seca”.

Também se recomenda a aplicação de uma ponte de aderência à base de epóxi com o intuito de formar uma barreira contra íons agressivos entre o substrato e a área reparada.

MISTURA:

A mistura deverá ser realizada em um misturador de ação forçada, que poderá ser uma furadeira de baixa rotação (400/500rpm) com uma hélice acoplada.

A água necessária para mistura é 3,8 litros por saco de 30 kg. O material deve ser adicionado à água aos poucos com o misturador em movimento até que seja verificada uniformidade e homogeneidade do material, que ocorre entre 3 a 5 minutos de mistura.

A quantidade de água poderá variar um pouco, em função da temperatura do ambiente, em 5% para mais ou menos.

LANÇAMENTO:

Deverá ser aplicado no máximo 20 minutos após o início da operação de mistura, por gravidade.

CURA:

O tratamento de cura deve seguir as recomendações da tecnologia do concreto, por se tratar de um material à base de cimento.

PROTEÇÃO SUPERFICIAL:

Apesar de o fabricante garantir uma longa durabilidade do material, bem como uma excelente proteção do aço, também sugere a aplicação de um sistema de pintura de proteção para deixar a estrutura como um todo, no mesmo nível de proteção do elemento reparado.

LIMITAÇÕES:

O fabricante não indica o produto para reparos em áreas horizontais, nem exposto à água corrente durante a aplicação e também não aplicar o produto sob insolação direta.

FORNECIMENTO:

O produto é encontrado no mercado em embalagens (sacos) de 30 kg. O seu consumo é de 1980 kg/m³.

A2 – ARGAMASSA ANTICORROSIVA FLUIDA

Argamassa anticorrosiva fluida, à base de cimento para reparos em concreto. É industrializada e necessita apenas de uma adição correta de água limpa.

É constituída por cimento Portland, agregados selecionados, aditivos redutores de água e anticorrosivos, conferindo uma proteção catódica galvânica localizada à armadura do concreto contra a corrosão eletroquímica. Possui uma expansão controlada no estado plástico e ainda reduz a demanda de água, garantindo um rápido ganho de resistência, baixa permeabilidade e grande durabilidade.

Este material é indicado para a proteção de seções de concreto armado reparadas contra a corrosão futura e para locais onde o acesso à região de reparo é restrito ou existe congestionamento de armaduras. Seu uso é recomendado para aplicações com até 60 mm de espessura, para situações onde se deseja baixa permeabilidade à água, aos cloretos e ao dióxido de carbono.

VANTAGENS:

- 1- Excepcional ação anticorrosiva;
- 2- Aderência excepcional a substratos de concreto;
- 3- A expansão controlada promove a compensação da retração no estado plástico;
- 4- Pode ser bombeado ou vertido por gravidade;
- 5- Auto-adensável;
- 6- Pré-dosado, eliminando a possibilidade de erros de dosagem;
- 7- Elevado desempenho e alta resistência inicial, facilitando a rápida liberação da estrutura;
- 8- Não contém aditivos à base de cloretos.

PROPRIEDADES:

Os seguintes resultados são válidos para relação água/pó 0,126, à temperatura de 25 °C:

Resistência à compressão (NBR 5739)	1 dia	20 MPa
	3 dias	30 MPa
	7 dias	37 MPa
	28 dias	45 MPa
Resistência à tração por flexão (NBR 12142):	28 dias	10 MPa
Módulo de deformação (NBR 8522)	29 GPa	

PREPARO DO SUBSTRATO:

- Delimitar a área de reparo fazendo um corte com disco diamantado, quebrando e removendo o concreto deteriorado;
- Limpar a superfície, removendo todo o pó, material contaminado, reboco, óleo, tinta, graxa ou ferrugem;

- Expor a armadura corroída ao redor de toda a sua circunferência, removendo os produtos de corrosão com jateamento de areia, garantindo um espaço livre de no mínimo 20 mm entre a armadura e o substrato;
- Se houver a presença de cloretos, lavar o aço com hidrojateamento de alta pressão;

SATURAÇÃO DO SUBSTRATO:

O substrato, algumas horas antes da aplicação do produto, deverá ser saturado com água limpa, de maneira que imediatamente antes do lançamento a superfície esteja seca.

Também se recomenda a aplicação de uma ponte de aderência à base de epóxi com o intuito de formar uma barreira contra íons agressivos entre o substrato e a área reparada.

MISTURA:

A mistura deverá ser realizada em um misturador de ação forçada, que poderá ser uma furadeira de baixa rotação (400/500rpm) com uma hélice acoplada.

A água necessária para mistura é 3,78 litros por saco de 30 kg. O material deve ser adicionado à água aos poucos com o misturador em movimento até que seja verificada uniformidade e homogeneidade do material, que ocorre entre 3 a 5 minutos de mistura.

A quantidade de água poderá variar um pouco, em função da temperatura do ambiente, em 5% para mais ou menos.

LANÇAMENTO:

Deverá ser aplicado no máximo 20 minutos após o início da operação de mistura, por gravidade. Decorridas 24 horas, remover os excessos, de baixo para cima.

CURA:

Recomenda-se a cura úmida com água limpa durante 7 dias, no mínimo, ou aspersão de produto de cura base água.

PROTEÇÃO SUPERFICIAL:

Apesar da longa durabilidade garantida, bem como da excelente proteção do aço, sugere-se a aplicação de um sistema de pintura de proteção para deixar a estrutura como um todo, no mesmo nível de proteção do elemento reparado.

LIMITAÇÕES:

O produto deve ser utilizado em reparos generalizados e não deve ser exposto à água corrente e insolação direta durante sua aplicação.

FORNECIMENTO:

O produto é encontrado no mercado em embalagens (sacos) de 30 kg. O seu consumo é de 2020 kg/m³

A3 – ADESIVO ESTRUTURAL DE BASE EPÓXI

É um adesivo de alta viscosidade, à base de epóxi sem solvente, sendo fornecido pré-dosado, pronto para mistura.

Possui dois componentes, A e B. O primeiro (Base) possui cor branca e o segundo (Endurecedor) cor verde, o que possibilita uma evidência visual da mistura adequada dos 2 componentes.

Tem um tempo de pega lento (5 a 6 horas), consequentemente permite a montagem das armaduras e fôrmas e o lançamento do concreto ou graute até 12 horas após a aplicação do adesivo.

VANTAGENS:

- 1- Ótima aderência ao concreto existente
- 2- Elevada resistência mecânica
- 3- Anticorrosivo: pode ser usado para formar uma barreira contra cloretos entre o substrato de concreto e a argamassa de reparo
- 4- Pode ser aplicado tanto em superfícies secas quanto úmidas
- 5- Aplicação simples: com pincel ou trincha;

PROPRIEDADES:

Resistência à compressão (BS 6319)	7 dias	50 MPa
Tempo de manuseio	5 a 6 h	
Dureza inicial	48 h	
Cura total	7 dias	
Temperatura de aplicação	5 a 35 °C	
Temperatura de serviço	- 30 a 60 °C	
Prazo de colagem (<i>Open time</i>)	12 h	

PREPARO DA SUPERFÍCIE:

- Limpar a superfície do concreto, removendo, material contaminado, óleo, graxa, nata de cimento, etc.;
- As superfícies lisas deverão ser apicoadas, de preferência por escarificação mecânica;
- Expor a armadura corroída ao redor de toda a sua circunferência, removendo os produtos de corrosão com jateamento de areia;

MISTURA:

Misturar separadamente o endurecedor e a base antes de juntá-los, de modo a dispersar quaisquer sedimentos, e despejar todo o conteúdo do endurecedor no recipiente da base. Em seguida fazer a mistura dos dois componentes até obtenção de uma cor uniforme.

APLICAÇÃO

Deverá ser aplicado com pincel ou trincha de cerdas rígidas de náilon sobre o substrato preparado, observando que o produto penetre bem na superfície e que toda a área seja completamente coberta.

O material de reparo deve ser aplicado sobre o adesivo num prazo máximo de 12 horas a 25 °C.

Como parte de um sistema de reparo, o material deverá ser utilizado com outros materiais da linha no intuito de se formar uma barreira entre o substrato contaminado com cloretos e o novo material. Para isso deve-se aplicar uma camada íntegra do adesivo, esperando curar entre 8 e 24 horas. Em seguida aplicar outra camada servindo como ponte de aderência para o material de reparo. Tal material de reparo deverá ser aplicado sobre a segunda camada de adesivo ainda pegajoso.

LIMITAÇÕES:

O produto deve ser utilizado sobre superfícies limpas e íntegras e não deve ser aplicado sobre pinturas existentes. Também não deve aplicá-lo se a temperatura estiver igual ou abaixo de 5 °C. Apesar do produto também ser indicado para superfícies úmidas, estas não podem estar empoçadas ou com água corrente.

FORNECIMENTO:

O produto é encontrado no mercado em embalagens de 1,0 kg (conjunto).

**ANEXO B: QUESTIONÁRIO PARA A SELEÇÃO DOS
PROCEDIMENTOS DE LIMPEZA.**

QUESTIONÁRIO PARA PESQUISA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO.

1) Entre os procedimentos de limpeza da armadura citados abaixo, assinale qual o utilizado pela sua empresa em situações de armaduras com processo de corrosão por ataque de íons cloreto.

- a)(☐) Escova de aço manual
- b)(☐) Escova de aço mecânica
- c)(☐) Jateamento de areia seca ou úmida
- d)(☐) Jateamento de água fria
- e)(☐) Jateamento de água quente
- f)(☐) Pistola de agulha de aço
- g)(☐) Outra técnica
- h)(☐) Combinação entre técnicas

- Observação 01: Caso tenha marcado a opção “g” favor descrevê-la.

- Observação 02: Caso tenha marcado a opção “h” favor descrever o procedimento, colocando em ordem as etapas para execução do procedimento de limpeza das armaduras em processo de corrosão.

Obrigado pela atenção!

Grupo de Pesquisa em Reabilitação de Estruturas de Concreto

Eng. Raphael Duarte

Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)