

JOSÉ LUÍS SERRA RIBEIRO

**CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE
ELETROQUÍMICA ENTRE ARGAMASSAS DE REPARO E
CONCRETO CARBONATADO**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia

SÃO PAULO

2009

JOSÉ LUÍS SERRA RIBEIRO

**CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE
ELETROQUÍMICA ENTRE ARGAMASSAS DE REPARO E
CONCRETO CARBONATADO**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientadora: Prof^a. Dr^a.
Sílvia Maria de Souza Selmo

SÃO PAULO

2009

DEDICATÓRIA

À minha mãe: Apolinária (*in memoriam*)

À minha esposa: Hidemi

Aos meus filhos: Bruno e Karol

RIBEIRO, J.L.S. **CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ELETROQUÍMICA ENTRE ARGAMASSAS DE REPARO E CONCRETO CARBONATADO.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto tem se tornado um assunto de interesse mundial nas últimas duas décadas. Os custos econômicos associados a reparos de estruturas de concreto são cada vez maiores, e tem crescido a incidência de insucessos nessas intervenções.

No Brasil, a técnica de intervenção corretiva mais utilizada é a de reparos localizados com argamassas à base de cimento Portland, modificadas com polímeros. Uma das patologias mais comumente apresentadas, quando essa técnica é utilizada, é a volta da corrosão, porém localizada em área adjacente ao reparo, que antes estava protegida. Isto ocorre com maior frequência em estruturas de concreto aparente ou naquelas com condições muito críticas de exposição dos elementos estruturais à umidade. Esse tipo de deterioração, conhecido na literatura como ânodo incipiente, decorre das mudanças nas características eletroquímicas do meio que envolve o aço na região do reparo, em relação ao concreto original, e pode levar a um desequilíbrio de potencial eletroquímico entre as regiões da barra de aço nesses meios, dando origem à corrosão por macrocélula.

O presente trabalho consiste em uma discussão sobre os princípios eletroquímicos envolvidos na compatibilidade entre a argamassa de reparo e o concreto da estrutura, assim como sobre o mecanismo de deterioração de reparos, decorrente da incompatibilidade; desenvolve um estudo para o estabelecimento de um método de avaliação da compatibilidade eletroquímica entre as argamassas de reparo e o substrato; por fim, propõe uma escala para a interpretação dos efeitos da diferença de potencial, entre os trechos da barra de aço no reparo e no substrato, na intensidade de corrente de macrocélula entre essas áreas.

Palavras-chave: concreto, corrosão de armaduras, argamassa de reparo, compatibilidade eletroquímica, macrocélula de corrosão

RIBEIRO, J.L.S. **CONTRIBUTION TO THE EVALUATION OF ELECTROCHEMICAL COMPATIBILITY BETWEEN MORTAR REPAIR AND CARBONATED CONCRETE.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ABSTRACT

The durability of concrete structures has become a subject of worldwide interest in the last two decades. The economic costs associated with repair of concrete structures is increasing and has increased the incidence of failures in these operations.

In Brazil, the technique of corrective intervention is the most widely used repair located with mortars based on Portland cement, modified with polymers. One of the diseases most commonly made when this technique is used, it is the turn of corrosion, but located in an area adjacent to the repair, before it was protected. This occurs more often in concrete structures or apparent in those conditions very critical structural elements of exposure to moisture. This type of deterioration, known in literature as incipient anode, follows the changes in the electrochemical characteristics of the environment surrounding the steel in the repair on the original concrete, and may lead to an imbalance in electrochemical potential between the regions of the bar steel in these environments, leading to corrosion by macrocélula.

This work is a discussion of the principles involved in the electrochemical compatibility between the repair mortar and concrete structure as well as on the mechanism of deterioration of repairs due to incompatibility; develop a study to establish a method for assessing electrochemical compatibility between the repair mortar and the substrate, finally, proposes a scale for the interpretation of the effects of the difference in potential between the sections of steel bar in the repair and the substrate, the intensity of current of macrocélula between these areas.

Key-words: corrosion of reinforcement, mortar repair, electrochemical compatibility, corrosion macrocell

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Relação entre o mecanismo de transporte e as dimensões de poro (HELENE, 1993).....	33
Figura 2.2 – Influência do grau de saturação do poro na densidade de corrente de corrosão da armadura em uma argamassa com $a/c = 0,5$. (GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 1993).....	35
Figura 2.3 – Influência da umidade relativa no coeficiente de difusão do oxigênio para pastas de cimento com fator $a/c = 0,42$ e $0,67$ (TUUTTI, 1982).....	36
Figura 2.4 – Classificação das argamassas quanto ao tipo de material aglomerante (ANDRADE, 1992)	40
Figura 2.5 – Diagramas de Evans da cinética de corrosão do aço em concreto ou argamassa.....	43
Figura 2.6 – Possíveis locais de corrosão após o reparo localizado (adaptado de Raupach (2006))	46
Figura 2.7 – Diagramas de Evans ilustrativos da incompatibilidade eletroquímica entre o reparo e o substrato de concreto carbonatado.....	47
Figura 2.8 – Diagramas de Evans para o efeito da macrocélula na taxa de corrosão.....	50
Figura 2.9 – Esquema básico de um circuito de um amperímetro de resistência nula (BABOIAN, 1976).....	52
Figura 2.10 – Modelo de circuito equivalente para o concreto (adaptado de Nóvoa (2004)).....	53
Figura 2.11 – (a) Modelo de circuito equivalente simplificado para o concreto; (b) Circuito equivalente convencional do modelo simplificado (a); (c) Diagrama de Nyquist experimental para o concreto (adaptado de Song (2000))	54
Figura 2.12 – (a) Modelo de circuito equivalente simplificado para o concreto e interface aço/concreto. (b) Diagrama de Nyquist típico para o cobrimento de concreto e interface aço/concreto	55
Figura 3. 1 – Barras de 15 cm utilizadas nos corpos-de-prova tipo A e B (MEDEIROS, 2002)	60

Figura 3.2 - Corpos-de-prova estudados nesta pesquisa: (a) CP misto tipo B e (b) CP misto tipo C (adaptado de Medeiros e Selmo (2000)).....	62
Figura 3.3 - Corpos-de-prova tipo A, estudados nas pesquisas de Medeiros (2002), Buonopane (2006) e Silva (2007). Figura adaptada de Medeiros e Selmo (2000).....	63
Figura 3.4 - corpos-de-prova de resistência de aderência por cisalhamento direto. Figura adaptada de Medeiros e Selmo (2000)	63
Figura 3.5 – Resumo cronológico dos ensaios relativos a esta pesquisa	64
Figura 3.6 – Condições de imersão e acoplamento dos CPs tipo B durante os ensaios.....	66
Figura 3.7 – Condição de imersão das células tipo C	67
Figura 4.1 – Comparação dos potenciais de acoplamento dos pares de barras A-C imersas em concretos carbonatados e argamassas, nos prazos de monitoração de 6 h e 24 h	72
Figura 4.2 – Comparação dos potenciais de acoplamento dos pares de barras B-D imersas em concretos carbonatados e argamassas, nos prazos de monitoração de 6 h e 24 h	72
Figura 4.3 – Potenciais de circuito aberto iniciais das barras isoladas, ao final de 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares A-B imersos em argamassa às 6 h de conexão	73
Figura 4.4 – Potenciais de circuito aberto iniciais das barras isoladas, ao final de 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares C-D imersos em concreto carbonatado às 6 h de conexão (REF = concreto não-carbonatado).....	73
Figuras 4.5 – Potenciais de circuito aberto das barras imersas em argamassa e concreto carbonatado, com 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares A-C às 6 h de conexão.....	74
Figura 4.6 – Potenciais de circuito aberto inicial das barras imersas em argamassa e concreto carbonatado, com 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares B-D às 6 h de conexão	74

Figura 4.7 – Comparação das correntes de macrocélula nos pares de barras A-C (a) e B-D (b), imersas em concretos carbonatados e argamassas não-carbonatadas, nos prazos de monitoração de 6 h e 24 h.	75
Figura 4.8 – Densidades de corrente de acoplamento dos pares de barras A-B e C-D, imersos no mesmo meio, na 6 ^a . hora de conexão	76
Figura 4.9 – Densidades de corrente de acoplamento dos pares de barras A-C e B-D, imersos em meios diferentes, na 6 ^a . hora de conexão	77
Figura 4.10 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento das barras A e C na 1 ^a fase dos ensaios	78
Figura 4.11 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento das barras B e D na 1 ^a fase dos ensaios	78
Figura 4.12 – Diagrama de Nyquist das barra C, imersas em concreto carbonatado nas células das argamassas passíveis de produção em obra (APO)	79
Figura 4.13 – Diagrama de Nyquist para a barra A, imersa em argamassa industrializada (AI).....	80
Figura 4.14 – Diagrama de Nyquist para a barra A, imersa em argamassa passível de produção em obra (APO)	81
Figura 4.15 – potenciais de corrosão da barra A, imersa em argamassa, da barra C, em concreto carbonatado, antes do acoplamento e o potencial de acoplamento Φ (A-C) na etapa 1 (2 ^a fase): imersão pelo lado do concreto	82
Figura 4.16 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento na etapa 1 (2 ^a fase): imersão pelo lado do concreto	83
Figura 4.17 – potenciais de corrosão da barra A, imersa em argamassa, da barra C, em concreto carbonatado, antes do acoplamento e o potencial de acoplamento Φ (A-C) na etapa 2 (2 ^a fase): imersão total.....	84
Figura 4.18 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento na etapa 2 (2 ^a fase): imersão total	85
Figura 4.19 – Potenciais de corrosão da barra A, imersa em argamassa, da barra C, em concreto carbonatado, antes do acoplamento e o potencial de acoplamento Φ (A-C) na etapa 3 (2 ^a fase): imersão pelo lado da argamassa	86

Figura 4.20 – Resultados médios de altura de ascensão capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, após 72 horas de contato com lâmina de 5 mm de água (MEDEIROS, 2002)	86
Figura 4.21 – Resultados médios de altura de ascensão capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, após 72 horas de contato com lâmina de 5 mm de água (MEDEIROS, 2002)	87
Figura 4.22 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento na etapa 1 (2ª fase): imersão pelo lado da argamassa.....	87
Figura 4.23 – Medidas de potencial de circuito aberto das barras A (imersas em argamassa), antes do início do acoplamento das barras, para monitoração da corrente de macrocélula.....	89
Figura 4.24 – Medidas da profundidade de carbonatação: carbonatação acelerada, por 28 dias a 5% de CO ₂ e carbonatação natural, por 2.370 dias em ambiente de laboratório. REF é o concreto de referência dosado conforme item 3.3.2	89
Figura 4.25 – Comparação das diferenças de potencial dos pares de barras A-C nos quatro acoplamentos das duas fases dos ensaios	90
Figura 4.26 – Medidas de potencial de circuito aberto das barras C (imersas em concreto carbonatado), antes do início do acoplamento das barras, para monitoração da corrente de macrocélula.....	91
Figura 4.27 – Correntes de acoplamento entre as barras imersas em meios diferentes nas duas fases dos ensaios, nas diversas condições de imersão: imersão total - 1ª fase; imersão pelo lado do concreto - 2ª fase, etapa 1; imersão total - 2ª fase, etapa 2; e imersão pelo lado da argamassa - 2ª fase, etapa 3, respectivamente. Correntes da Fase 1 e os pares A-C da Fase 2 são relativas a 6 h, enquanto a do pares B-D da Fase 2 são relativas a 2 horas de acoplamento.....	92
Figura 4.28 – Registro das 65 diferenças de potencial ($\Delta\Phi$) e das 65 densidades de corrente de macrocélula (i_{mac}) entre as barras dos pares A-B, C-D, A-C e B-D, para 6 h de monitoração (26 pares da Fase 1 e 30 pares da Fase 2).....	93
Figura 4.29 – Correlação entre o aumento da diferença de potencial ($\Delta\Phi$) entre as barras e o acréscimo da corrente de acoplamento, para $\Delta\Phi$ até 400 mV, para 6 h de monitoração.....	94

Figura 4.30 – Densidade de corrente de acoplamento das barras em função da resistência ôhmica do revestimento de argamassa sobre as barras de aço, sendo esta correlação aplicável para diferenças de potencial antes do acoplamento acima de 400 mV.....95

Figura 4.31 – Valores das medidas de correntes de corrosão por macrocélula dos 65 acoplamentos entre as barras imersas em meios heterogêneos, nas duas fases dos experimentos.....96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – características das argamassas de reparo	23
Tabela 2.2 – características dos revestimentos estudados	25
Tabela 2.3 – Alterações ambientais que os corpos-de-prova foram submetidos.....	26
Tabela 2.4 – Condições de exposição dos corpos-de-prova.....	28
Tabela 3.1 – Composição das argamassas tipo APO (MEDEIROS, 2002).....	59
Tabela 4.1 – Comparação das correntes de acoplamento entre todas as barras imersas em meios homogêneos (A-B e C-D) e as imersas em meios heterogêneos (A-C e B-D).....	77

CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ELETROQUÍMICA ENTRE ARGAMASSAS DE REPARO E CONCRETO CARBONATADO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	16
1.2 ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA	17
1.3 OBJETIVO.....	19
1.4 ORIGINALIDADE	20
1.5 ORGANIZAÇÃO E CONTEÚDO	20
2 REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 PESQUISAS SOBRE COMPATIBILIDADE ELETROQUÍMICA ENTRE REPARO E SUBSTRATO.....	22
2.2 COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO DO AÇO-CABONO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	31
2.2.1 Corrosão eletroquímica de armaduras de aço-carbono	31
2.2.2 Parâmetros que influenciam a corrosão do aço no concreto	32
2.2.2.1 Porosidade	32
2.2.2.2 Umidade, resistividade e acesso de oxigênio	33
2.2.2.3 Reserva alcalina e pH da água de poro	37
2.2.2.4 Outros parâmetros	38
2.3 FORMAÇÃO DE MACROCÉLULAS DE CORROSÃO EM ARMADURAS COM REPAROS DE ARGAMASSA	39
2.3.1 Conceitos gerais	39
2.3.1.1 Reparos localizados de argamassa.....	39
2.3.1.2 Requisitos de desempenho para reparos localizados	40
2.3.2 Corrosão de armadura induzida por reparo localizado	41
2.3.2.1 Mecanismos de corrosão induzidos por reparos localizados.....	44
2.3.2.1.1 Corrosão por microcélulas e por pite no concreto original	44
2.3.2.1.2 Corrosão por macrocélula no substrato	46
2.3.2.2 Efeito da macrocélula na taxa de corrosão	47
2.4 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS EMPREGADAS NA PESQUISA.....	51
2.4.1 Medida de potencial de corrosão	51
2.4.2 Medida de corrente de macrocélula	52
2.4.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica	52

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	56
3.1 OBJETIVO.....	56
3.2 MATERIAIS EMPREGADOS.....	56
3.2.1 Argamassas de reparo.....	56
3.2.1.1 Argamassas industrializadas (AI).....	57
3.2.1.2 Argamassas passíveis de preparo em obra (APO).....	57
3.2.2 Barras de aço-carbono	59
3.2.3 Concreto de referência ou de substrato	60
3.3 VARIÁVEIS DO ESTUDO	61
3.3.1 Variáveis fixadas	61
3.3.2 Variáveis medidas	61
3.4 CORPOS-DE-PROVA	61
3.5 ENSAIOS DE MONITORAÇÃO ELETROQUÍMICA.....	64
3.5.1 Ensaios com os CPs tipo B – 1ª fase: imersão por 14 dias para monitoração das macrocélulas.....	65
3.5.2 Ensaios com os CPs tipo B – 2ª fase: imersão em condições simplificadas e diferenciadas de monitoração das macrocélulas	66
3.5.3 Ensaios com os CPs tipo C	67
3.5.4 Procedimentos dos ensaios e medidas realizadas.....	68
3.5.4.1 Medidas de potencial de corrosão	68
3.5.4.2 Monitoração da corrente de macrocélula.....	69
3.5.4.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica.....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1 ENSAIOS DA 1ª FASE: CORPOS-DE-PROVA MISTOS (TIPO B) EM IMERSÃO TOTAL E COM MONITORAÇÃO PROLONGADA.....	71
4.1.1 Medidas de potencial das barras isoladas e de acoplamento dos pares.....	71
4.1.2 Monitoração da corrente de macrocélula	75
4.1.3 Relação entre a diferença de potencial das barras e a corrente de macrocélula.....	78
4.1.4 Monitoração por impedância eletroquímica	79

4.2	ENSAIOS DA 2ª FASE: CORPOS-DE-PROVA MISTOS (TIPO B) MONITORADOS POR MEDIDAS SIMPLIFICADAS E EM TRÊS CONDIÇÕES DE IMERSÃO	81
4.2.1	Resultados da etapa 1: imersão capilar do concreto carbonatado	81
4.2.1.1	Medidas de potencial de corrosão	82
4.2.1.2	Relação entre a diferença de potencial e a corrente de macrocélula.....	82
4.2.2	Resultados da etapa 2: imersão total em seqüência à etapa 1	83
4.2.2.1	Medidas de potencial de corrosão	83
4.2.2.2	Relação entre a diferença de potencial e a corrente de macrocélula.....	84
4.2.3	Resultados da etapa 3: imersão capilar da argamassa de reparo	85
4.2.3.1	Medidas de potencial de corrosão	85
4.2.3.2	Relação entre a diferença de potencial e a corrente de macrocélula.....	87
4.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA E DA SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS DOS CORPOS-DE-PROVA MISTOS TIPO B	88
4.3.1	Comparação dos potenciais.....	88
4.3.2	Comparação das diferenças de potencial	90
4.3.3	Comparação do sinal das correntes de acoplamento.....	91
4.3.4	Relação das diferenças de potencial às correntes de acoplamento	92
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
5.1	QUANTO À METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ELETROQUÍMICA ENTRE ARGAMASSAS DE REPARO E CONCRETO CARBONATADO	97
5.2	PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA FORMAÇÃO DE MACROCÉLULA.....	97
5.3	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	98
5.4	TRANSFERÊNCIA DOS RESULTADOS DESTA PESQUISA	99
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

APÊNDICE A - CORPOS-DE-PROVA ADOTADOS EM ESTUDOS DE REPARO LOCALIZADO EM ESTRUTURA DE CONCRETO	109
APÊNDICE B – COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE CORRENTE ENTRE OS ACOPLAMENTOS DA 1ª. FASE DOS EXPERIMENTOS	112
APÊNDICES COMPLEMENTARES EM VERSÃO DIGITAL DE DOCUMENTAÇÃO DOS DADOS	116
APÊNDICE C – ESCALA COMPARATIVA DE POTENCIAL PARA O ELETRODO EMPREGADO NA PESQUISA.....	116
APÊNDICE D - ARQUIVOS E INTERPRETAÇÃO COMPLEMENTAR DE DADOS DA FASE I	116
APÊNDICE E – ARQUIVOS E INTERPRETAÇÃO COMPLEMENTAR DE DADOS DA FASE II.....	116
APÊNDICE F – PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À FORMAÇÃO DE MACROCÉLULA COM O TIPO DE CÉLULA EMPREGADO NESTA PESQUISA	116
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DAS ARGAMASSAS.....	117
ANEXOS COMPLEMENTARES EM VERSÃO DIGITAL DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	122
ANEXO B – SILVA; SELMO (2007).....	122
ANEXO C - ARQUIVOS E INTERPRETAÇÃO COMPLEMENTAR DA MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS E CONCRETO A PARTIR DE ENSAIOS DE BUONOPANE (2006)	122
ANEXO D - GRÁFICOS DE ANÁLISE DE RESULTADOS EM FUNÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E DA MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS ..	122
ANEXO E – EXPERIMENTOS ELETROQUÍMICOS COMPLEMENTARES	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Estudos realizados no Brasil, por diversos pesquisadores, apontam para um percentual de 30 % de incidência de corrosão de armaduras, dentre as manifestações patológicas que mais atingem as construções de concreto armado.

Devido às irregularidades e deficiências de cobrimento, os agentes agressivos atingem a armadura de forma descontínua e provocam corrosão em áreas localizadas e limitadas. Assim, os reparos localizados são um dos sistemas de recuperação mais usados em estruturas de concreto afetadas por corrosão de armaduras.

Se apenas as áreas afetadas são reparadas, substituindo-se o concreto danificado por uma argamassa de reparo, em pouco tempo podem surgir novos focos de corrosão nas proximidades do reparo executado, principalmente, se houver umidade e presença de agentes aceleradores da corrosão.

Enquanto a corrosão ocorre em uma dada região (ânodo), as áreas adjacentes funcionam como cátodo, estando, assim, protegidas da corrosão. Após o reparo, com a eliminação do ânodo, o efeito de proteção que a atividade anódica exercia sobre as regiões vizinhas desaparece e poderá ocorrer corrosão nessas áreas da estrutura antes não-afetadas. Assim, a substituição do concreto deteriorado por um material de reparo pode precipitar o surgimento de um processo corrosivo junto ao reparo, agravado pela formação de macrocélulas de corrosão.

As pesquisas na área da durabilidade do concreto têm melhorado substancialmente o conhecimento sobre os materiais cimentícios e sobre os fundamentos da deterioração do concreto.

Os estudos no campo das tecnologias de reparo têm objetivado, prioritariamente, a melhoria das propriedades dos materiais de reparo com relação à compatibilidade estrutural, à compatibilidade de deformações e à compatibilidade à agressividade ambiental.

Para que essas pesquisas resultem numa efetiva melhoria na durabilidade dos reparos, devem levar em consideração, também, a compatibilidade eletroquímica

entre o material de reparo e o concreto da estrutura a ser reparada (VAYSBURD; EMMONS, 2004).

As pesquisas encontradas, apesar de serem de extrema importância para o estudo da compatibilidade eletroquímica, em geral, usam corpos-de-prova muito complexos e adotam prioritariamente o cloreto como agente acelerador da corrosão.

No Brasil, para o caso de estruturas localizadas em regiões não-litorâneas, o mecanismo de degradação que causa maiores problemas às estruturas é o da carbonatação, principalmente nos locais onde a poluição é maior. Levy & Helene (2000), em estudo de vistorias de campo realizadas em 27 escolas em diversas localidades do Estado de São Paulo, constataram que a carbonatação era responsável pelo desenvolvimento da corrosão de armaduras em 96 % das escolas vistoriadas.

A importância da realização da presente pesquisa consiste no estudo da compatibilidade eletroquímica entre os reparos localizados e o substrato de concreto carbonatado com a finalidade de contribuir para a escolha de materiais de reparo mais duráveis.

1.2 ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA

Vários estudos, no exterior e, também, no Brasil, têm sido feitos no sentido de entender e melhorar a durabilidade dos reparos em estruturas de concreto com problemas de corrosão. Segundo Raupach (1996), alguns resultados de pesquisas têm somado conhecimentos importantes nesse campo, por exemplo, as recomendações elaboradas pelo comitê RILEM (*Repair of Concrete Structures Damaged By Steel Corrosion*) TC 124 (1993).

As pesquisas específicas sobre o tema deste trabalho ainda são poucas e foram encontradas apenas duas que usaram o concreto carbonatado como substrato (GULIKERS; VAN MIER, 1992; SCHIESSL *et al.*, 1994). No Brasil, os estudos sobre reparos começaram no início da década de 1990, com o Prof. Paulo Helene da Escola Politécnica da USP.

A seguir, estão relatados alguns estudos importantes publicados em revistas e congressos internacionais.

Gulikers e van Mier (1992) estudaram o efeito de reparos localizados de argamassa na corrosão de armaduras em concreto carbonatado, discutiram a repassivação do aço promovida pelo reparo e os seus efeitos sobre os potenciais da barra nas regiões do reparo e do concreto original, assim como a corrente de macrocélula entre essas áreas.

Nepomuceno (1992) estudou o comportamento das armaduras situadas na interface do material de reparo e o substrato, com o objetivo de verificar a correlação entre a capacidade de proteção das argamassas e a sua influência na formação de pares galvânicos.

Helene e Monteiro (1993) avaliaram o desempenho de cinco sistemas de reparo expostos à contaminação por cloretos com a finalidade de desenvolver uma metodologia de avaliação do desempenho dos materiais e sistemas de reparo usados em reparos localizados de estruturas de concreto.

Schiessl e colaboradores (1994) pesquisaram o comportamento do aço em estruturas de concreto com reparos localizados. Esses autores estudaram o comportamento da corrosão do aço no substrato, antes e após a execução do reparo.

Figueiredo (1994) avaliou a capacidade de proteção de três tipos de revestimentos aplicados sobre a armadura contra a corrosão induzida pela realização de reparos localizados.

Morgan (1996) fez um estudo teórico comparativo, baseado na literatura então existente, sobre a compatibilidade eletroquímica e o surgimento de macrocélula decorrente de reparo localizado. Ele apresenta vários resultados de pesquisas, procurando confrontar os resultados e as conclusões contraditórias.

Ping Gu e colaboradores. (1997), publicaram um trabalho, também teórico, em que discutem as causas da incompatibilidade eletroquímica entre o reparo e o substrato, com base nos princípios básicos da eletroquímica.

Castanheira (1997) estudou por meio de medidas eletroquímicas (potencial de corrosão, resistência ôhmica, intensidade de corrente galvânica e resistência de polarização) o desempenho de três materiais de reparo aplicados sozinhos e associados a revestimentos da armadura, em dois tipos de corpos-de-prova.

Nounu e Chaudhary (1999) realizaram estudos para avaliar as características de dois sistemas de reparo. Analisaram o desempenho eletroquímico da área reparada, assim como os efeitos dos reparos no concreto adjacente.

Castro et al. (2003) estudaram a ação de revestimentos sobre a armadura na formação de macrocélulas de corrosão entre a área de reparo e o substrato. Trabalharam com quatro mecanismos de proteção: repassivação, inibição, barreira e proteção catódica.

Barkey (2004) empreendeu um estudo experimental com a finalidade de caracterizar a distribuição de corrente e o controle exercido pela resistência na corrosão por macrocélula decorrente de diferenças no meio eletroquímico do material de reparo e no substrato contaminado por cloreto.

Qian e colaboradores (2006) estudaram o mecanismo de corrosão e o conceito de compatibilidade em sistema de reparo localizado em corpos-de-prova de concreto com barras de aço-carbono e aço inoxidável. Foi usado cloreto para a contaminação do substrato.

Zhang e Mailvaganam (2006) fizeram uma revisão teórica, para verificar a correlação entre os mecanismos de corrosão por macrocélula e por microcélula em um sistema de reparo localizado. Analisaram os principais fatores que caracterizam a corrosão na deterioração dos reparos.

Cusson e colaboradores (2006) avaliaram o desempenho de sete sistemas de reparo em condições de emprego no campo. Os reparos foram aplicados na defesa de uma ponte de concreto e monitorados por três anos.

1.3 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é contribuir para o desenvolvimento de um método de avaliação da compatibilidade eletroquímica entre o comportamento da barra de aço no material de reparo e o seu comportamento no concreto original em uma estrutura com problema de corrosão de armadura induzida por carbonatação.

1.4 ORIGINALIDADE

Existe carência de estudos sobre a compatibilidade eletroquímica entre os materiais de reparo e os concretos das estruturas com problemas de corrosão de armadura, principalmente naquelas induzidas por carbonatação, o que foi evidenciado neste trabalho (item 2.1), por meio de levantamento dos trabalhos de pesquisadores, publicados no Brasil e no exterior. As pesquisas sobre esse tema, até o presente, tiveram como objetivo apenas evidenciar e quantificar os efeitos das macrocélulas de corrosão induzidas pela aplicação de reparos localizados.

Este trabalho propõe um critério quantitativo para avaliar o risco de surgimento de macrocélulas de corrosão potencialmente danosas, após a execução de um reparo localizado. Esse critério deve permitir a avaliação da compatibilidade eletroquímica entre o material de reparo e o substrato em uma estrutura de concreto armado com problema de corrosão de armadura induzida por carbonatação e contribuir para a escolha de materiais que resultem em reparos mais duráveis.

1.5 ORGANIZAÇÃO E CONTEÚDO

O presente trabalho encontra-se dividido da seguinte forma:

- **o capítulo 1** trata da justificativa e da importância do desenvolvimento deste estudo, apresenta objetivo, as pesquisas relevantes na área e o conteúdo do trabalho;
- **o capítulo 2** faz uma revisão da literatura em que descreve algumas pesquisas sobre compatibilidade eletroquímica entre reparo e substrato de concreto, aborda os aspectos conceituais do comportamento eletroquímico do aço no concreto; os parâmetros que influenciam a corrosão do aço no concreto além de conceitos gerais sobre a formação de macrocélulas de corrosão, decorrente de reparos de argamassa nas estruturas de concreto. Em seguida, faz uma análise sobre a incompatibilidade eletroquímica dos reparos localizados e sobre os mecanismos de formação das macrocélulas;
- **o capítulo 3** apresenta o programa experimental onde são descritas as variáveis envolvidas no trabalho, os materiais empregados e a metodologia planejada;

- **o capítulo 4** apresenta uma análise parcial e uma breve discussão dos resultados até agora obtidos;
- **o capítulo 5** apresenta as conclusões inferidas da primeira fase dos experimentos;
- **o capítulo 6** apresenta o cronograma das atividades até a conclusão da pesquisa;
- Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas, os apêndices e os anexos ao trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PESQUISAS SOBRE COMPATIBILIDADE ELETROQUÍMICA ENTRE REPARO E SUBSTRATO

Neste item, serão descritos, resumidamente, alguns estudos experimentais encontrados na literatura, sobre a formação de macrocélulas de corrosão induzidas por reparos localizados.

Gulikers e van Mier (1992) desenvolveram uma pesquisa para investigar os efeitos eletroquímicos de reparos localizados em estruturas de concreto carbonatado com corrosão de armadura. Foram aplicados reparos de argamassa em corpos-de-prova previamente carbonatados, projetados para permitir a pesquisa da influência da espessura do revestimento, da distância entre as barras e da relação entre as áreas catódicas e anódicas nas correntes das macrocélulas de corrosão induzidas pela aplicação dos reparos (ver Figura no Apêndice A). A formação de macrocélulas de corrosão foi acelerada por meio de ciclos de duas semanas de umedecimento e duas semanas de secagem. Foram monitoradas as diferenças de potencial entre as barras imersas nos reparos e as barras imersas no concreto carbonatado, a resistência do eletrólito e as medidas de correntes de acoplamento. As principais conclusões a que chegaram foram:

- a) o emprego de argamassa à base de cimento Portland como reparo em estruturas de concreto carbonatado com problemas de corrosão induz corrente por macrocélula e acelera a corrosão do aço no concreto carbonatado original;
- b) a distância entre as barras acopladas teve pouca influência na corrente de corrosão por macrocélulas;
- c) a relação entre as áreas catódicas e anódicas é um fator controlador da intensidade de corrente por macrocélula.

Nepomuceno (1992) estudou o comportamento das armaduras situadas na interface do material de reparo e o substrato, para cinco diferentes argamassas de reparo;

sendo que uma de cimento e areia (1:3, a/c = 0,5), sem aditivos, serviu de referência (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – características das argamassas de reparo

Material	Especificação	fc (MPa)	fct (MPa)
A	argamassa de cimento e areia – referência	45	*
B	argamassa de cimento com microssílica e látex	*	*
D	argamassa com retração compensada (industrializada)	77	9,1
G	argamassa de cimento modificado com estireno-butadieno	40	9,0
H	argamassa de cimento base fosfato de magnésio	62	7,0

Nepomuceno (1992)

Os reparos foram executados após 105 dias da moldagem do substrato. Após sete dias de cura secaram por 180 dias. Então foi utilizada uma solução de NaCl a 5 % sobre as juntas da interface do reparo com o substrato. Os corpos-de-prova foram submetidos a 15 dias de ataque com a solução e secos por sete dias. Em seguida, mais 13 dias de ataque e 60 dias de secagem. A partir daí, foi mais uma vez colocada a solução agressiva e, então passou-se a monitorar a corrente galvânica a resistência de polarização (R_p), o potencial de corrosão (E_{corr}) e a resistência ôhmica (R_{ohm}). Estas medidas eram realizadas, à medida que as barras 7, 8, 9, 10, 5 e 6 (Apêndice A) iam sendo conectadas com a barra 2, que possuía uma pequena área anódica, sob a fissura da interface reparo/substrato (atacada pela solução de cloretos).

Os principais resultados encontrados foram os seguintes:

- a) os maiores valores de corrente de corrosão e corrente galvânica foram obtidos para as argamassas A e B;
- b) os corpos-de-prova reparados com a argamassa D apresentaram a maior fissura na interface reparo/concreto, porém, apresentou valores corrente de corrosão e corrente galvânica inferiores aos medidos nos corpos-de-prova reparados com o material A. O autor atribuiu este fato ao pH da argamassa que entre todas foi o mais alto;

- c) nos corpos-de-prova reparados com argamassa H, a maior parte das barras sob as interfaces permaneceu passiva. O autor explicou este fato pela inexistência de fissura na interface reparo/concreto;
- d) O autor concluiu que a velocidade de corrosão das barras na interface argamassa/concreto foi pouco influenciada pela magnitude das fissuras abertas nessa região.

Helene e Monteiro (1993) analisaram o desempenho de cinco sistemas de reparo em pequenas vigas produzidas em laboratório (Apêndice A). Os reparos localizados foram aplicados num trecho da armadura previamente submetido à corrosão. Após a aplicação e cura dos reparos, as vigas foram imersas parcialmente, durante um ano, em recipientes com solução de 5 % de NaCl, pelo lado do reparo, de modo a deixar os reparos semi-imersos. Para analisar o desempenho dos sistemas, foram adotados os métodos de potencial de corrosão (ASTM C 876), profundidade de carbonatação (RILAM CPC 18), teor de cloretos (ASTM C 1152), perda de massa (ASTM G 1) e observação visual. Concluíram que:

- a) em concretos de qualidade média, expostos a ambientes agressivos e com elevados níveis de contaminação, os reparos localizados podem acelerar o aparecimento de outros pontos de corrosão, aumentando o problema ao invés de reduzi-lo;
- b) há necessidade de desenvolver metodologias de ensaio adequadas para estudar o emprego de reparos localizados em estruturas de concreto com armaduras em corrosão. Segundo estes autores, os estudos não devem se limitar a analisar a proteção nos locais reparados, como se tratasse de obra nova, mas devem considerar os efeitos dos reparos na estrutura como um todo.

Schiessl *et al.* (1994) realizaram estudo experimental em corpos-de-prova (Apêndice A), para determinar o comportamento da corrosão do aço no concreto após um reparo localizado em decorrência de corrosão na armadura induzida por carbonatação ou por contaminação por íons cloreto. Chegaram aos seguintes resultados:

- a) onde o concreto carbonatado não foi removido completamente, ocorreu macrocélula de corrosão, quando os CPs foram umedecidos;

- b) a taxa de corrosão depende essencialmente do grau de saturação e é menos influenciada pelas características específicas do concreto;
- c) no caso de macrocélula induzida por contaminação de cloreto no substrato, toda a área com um nível crítico de cloreto deve ser removida, independente de haver ou não sinais de corrosão sobre a barra;
- d) a reação catódica nas áreas reparadas foi reduzida a valores desprezíveis, quando o aço foi revestido por uma camada de tinta epóxi. Porém, foi verificado que outras áreas da superfície do aço atuaram como cátodo.

Figueiredo (1994) avaliou a capacidade de proteção dos revestimentos aplicados sobre a armadura. Para tal, empregou o corpo-de-prova mostrado no Apêndice A. O resumo das especificações dos materiais empregados está na tabela 1.2. O substrato foi confeccionado em duas etapas: a) parte inferior com concreto isento de cloreto (traço 1:2,9:3,2; fator água/cimento = 0,65) e b) partes laterais superiores com o mesmo concreto, porém, contaminado com 0,7 % de cloretos. O reparo de argamassa foi feito com cimento, areia e plastificante (traço 1:3; fator água/cimento = 0,42 e plastificante = 1,5 %), isenta de cloreto.

Tabela 2.2 – características dos revestimentos estudados

Revestimento	Composição
3	argamassa de cimento e polímero termoplástico bi-componente com inibidor de corrosão
5	epóxi rico em zinco
6	revestimento polimérico de base epóxi

Figueiredo (1994)

Antes da realização do reparo, foi registrada a densidade de corrente de corrosão de cada parte da armadura seccionada e da armadura contínua. Imediatamente após a realização do reparo, começaram a ser registradas as intensidades de corrente galvânica que circulavam em cada tramo da armadura seccionada.

As vigas foram mantidas em câmaras de 80 % a 90 % de umidade relativa durante 150 dias. Ao longo desse período, foram registradas as medidas de Ig. Em momentos adequados, em função dos valores obtidos de intensidade de corrente galvânica, registrou-se a densidade de corrente de corrosão de cada seguimento da armadura seccionada e da armadura lateral contínua.

Após os 150 dias na câmara úmida, os corpos-de-prova passaram à situação de parcialmente submersos, segundo o autor, para que fossem verificadas possíveis alterações na intensidade de corrente galvânica e na densidade de corrente de corrosão em função da ativação das macro e microcélulas. O autor concluiu que:

- a) a ação da macrocélula é limitada aos primeiros dias, após a realização do reparo;
- b) quando os revestimentos 3 e 6 foram empregados, os seguimentos localizados na interface reparo/concreto com 0,7 % de cloreto foram os que mais sofreram a ação da macrocélula de corrosão;
- c) quanto menor a resistência ôhmica oferecida pelo revestimento, maior foi o efeito da macrocélula.

Castanheira (1997) estudou o desempenho de três materiais de reparo (concreto sem adições, concreto com microsilica e argamassa epóxi) aplicados sozinhos e associados a revestimentos da armadura (revestimento polimérico com inibidor de corrosão e resina epóxi), em dois tipos de corpos-de-prova (grandes, com 14 barras, e pequenos com duas barras cada um), conforme Apêndice A. O substrato foi confeccionado com concreto contaminado com 3 % de CaCl_2 em relação à massa do cimento.

Após sete dias de cura em câmara úmida (o CP de argamassa epóxi ficou em ambiente de laboratório), os corpos-de-prova foram desformados e, a partir do 37º dia da desforma foram submetidos a diferentes ambientes (tabela 1.3).

Tabela 2.3 – Alterações ambientais que os corpos-de-prova foram submetidos

Evento	Corpo-de-prova	Idade a partir da desforma
Colocação na câmara úmida a 60°C	CP1, CP2, CP3	37º Dia
	CP1	85º Dia
Colocação em ambiente de laboratório	CP2	64º Dia
	CP3	61º Dia
Colocação na câmara úmida a 60°C	CP1	89º Dia
	CP2	68º Dia
	CP3	65º Dia
Colocação em ambiente de laboratório	CP1	135º Dia
	CP2	114º Dia
	CP3	111º Dia
Colocação parcialmente submersos em água, na posição vertical	CP1	172º Dia
	CP2	164º Dia
	CP3	188º Dia

Castanheira (1997)

As medidas eletroquímicas (potencial de corrosão, resistência ôhmica, intensidade de corrente galvânica e resistência de polarização) iniciaram-se no 1º dia após a desforma, sendo feitas de três em três dias, inicialmente; em seguida, de sete em sete dias e mais espaçadamente no decorrer do tempo. Foram realizadas, também, sempre antes e depois de uma alteração ambiental. As principais conclusões da autora foram as seguintes:

- a) dos sistemas de reparo estudados, o que apresentou melhor desempenho foi o reparado com argamassa com microssílica, cujas barras receberam revestimento polimérico inibidor de corrosão, enquanto que o que apresentou o pior desempenho foi o reparado com argamassa base epóxi, cujas armaduras não receberam pintura;
- b) para sistemas de reparo cujas armaduras não foram pintadas, o que apresentou melhor desempenho foi aquele contendo argamassa com cimento Portland;
- c) as armaduras da região de reparo dos corpos-de-prova grandes atuaram como cátodo quando foram conectadas às armaduras da região contaminada, indicando que o reparo pode contribuir para o aumento da corrosão de armaduras consideradas anódicas, quando conectadas a elas. Isso pode ocorrer quando for impossível eliminar todo o cloreto da estrutura, estando algumas armaduras da região reparada ligadas às armaduras da região contaminada por meio de estribo, por exemplo.

Nounu e Chaudhary (1999) realizaram estudos para avaliar as características de dois sistemas de reparo: argamassa de cimento e areia e microconcreto, quanto à restauração da capacidade de carga da estrutura reparada e quanto à proteção da armadura proporcionada pelo reparo. Foram moldados dezoito corpos-de-prova (Apêndice A): seis não sofreram reparo e foram usados como referência. Após sete dias de cura, os doze restantes foram submetidos a uma corrosão acelerada por meio de corrente impressa entre a armadura e uma malha de aço externa usada como cátodo. Após a corrosão induzida, as regiões corroídas foram reparadas com argamassa de cimento e areia e com microconcreto. Após a cura dos reparos, foram separados seis corpos-de-prova para ensaios estruturais e os seis restantes foram submetidos a ciclos de mudança de temperatura (12 h a 30 °C e 12 h a 80 °C), três

períodos diários de névoa com solução de 5 % de NaCl e a um carregamento constante de 2 t, por um período de seis meses. As armaduras desses corpos-de-prova foram monitoradas antes durante e após os seis meses de ensaio, por meio do seu potencial de corrosão, medidas de corrente galvânica e por inspeção visual do estado final de corrosão das barras.

As principais conclusões do trabalho, no aspecto eletroquímico, foram:

- a) o microconcreto teve um efeito protetor da armadura mais significativa do que a argamassa;
- b) o microconcreto também ofereceu melhor proteção contra o ingresso de cloretos vindos do exterior ao CP.

Castro e colaboradores (2003) repetiram o mesmo experimento de Figueiredo (1994), acrescentando um sistema de referência: um reparo com argamassa sobre a armadura sem revestimento, cujo mecanismo de proteção era a repassivação. Nessa nova edição do experimento, também foram alteradas as condições de exposição dos corpos-de-prova (tabela 1.4).

Tabela 2.4 – Condições de exposição dos corpos-de-prova

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Condição	Reparo	Cura	80 % a 90 % UR	Imersão parcial	40 % UR	85 % UR	95 % UR
Prazo	3 dias após a moldagem	24 dias após reparo	103 dias após (2)	59 dias após (3)	1106 dias após (4)	90 dias após (5)	110 dias após (6)

Castro *et al.* (2003)

Neste trabalho os pesquisadores chegaram às seguintes conclusões:

- a) o arranjo experimental usado com seguimentos localizados nas interfaces reparo/concreto mostrou uma ótima adequação no estudo da atividade da macrocélula. A falta destes seguimentos nas interfaces poderia levar a interpretações equivocadas e à perda de importantes informações;
- b) a extensão da atividade da macrocélula é relativamente limitada nas condições do presente experimento (uma baixa concentração de cloretos, 0,7 % nas regiões não reparadas). A limitação é na sua extensão (sua influência não atinge mais que 10cm ou 20cm) e no tempo (é significativamente atenuada após 30 dias da execução do reparo);

- c) o revestimento rico em zinco foi o único efetivo na redução da atividade da macrocélula nas interfaces, em curto prazo. A prazo mais longo, os revestimentos que protegem por barreira reduziram significativamente a atividade da macrocélula comparando-se ao revestimento de referência ou ao de proteção catódica. O revestimento rico em zinco apresentou certo aumento na tendência à corrosão das áreas não reparadas as quais poderiam ser estudadas em maior profundidade.

Barkey (2004) empreendeu um estudo experimental com a finalidade de caracterizar a geometria, a distribuição de corrente e o controle exercido pela resistividade na intensidade da corrente de corrosão por macrocélula, causada pelas diferenças no meio eletroquímico do material de reparo e no substrato contaminado com íons cloreto.

O experimento foi conduzido de acordo com a ASTM G 109:1992, com as modificações nos corpos-de-prova, para incorporar reparos simulados, conforme as ilustrações do Apêndice A. Como material de reparo, foram utilizados uma argamassa industrializada de cimento modificado com polímero e o próprio concreto do substrato, porém, sem contaminação. O substrato foi confeccionado com concreto, traço 1:3:2 e relação água/cimento = 0,5. Os corpos-de-prova tiveram o substrato contaminado com 2 % de CaCl_2 , exceto os de referência, e sobre todos foi colocado um reservatório que permanecia duas semanas cheio com uma solução de 3,5 % de NaCl e duas semanas vazio. As técnicas utilizadas na monitoração dos corpos-de-prova foram a medida do potencial de corrosão e a medida da corrente galvânica.

Os principais resultados obtidos por Barkey (2004) são listados a seguir:

- a) os prismas não contaminados com cloreto e reparados com argamassa uma insignificante queda de potencial e uma corrente galvânica desprezível;
- b) nos prismas contaminados com cloreto e reparados com argamassa foi substancial a diferença de potencial entre os cátodos e ânodos e foi verificado os maiores níveis de corrosão;
- d) os prismas contaminados e com reparo de concreto mantiveram a diferença de potencial e corrosão no mesmo nível dos reparados com argamassa;

- e) a distribuição da corrente na macrocélula de corrosão é controlada pela resistência ôhmica entre o ânodo e o cátodo e tem alcance restrito a poucos centímetros da interface reparo/substrato;
- f) a distribuição da corrente no lado anódico da macrocélula, por ser controlada pela resistência ôhmica, é sensível à condutividade iônica, assim como à umidade do concreto.

Qian e colaboradores (2006) realizaram um trabalho teórico-experimental sobre a relação entre macrocélula e microcélula de corrosão em reparos localizados de estrutura de concreto. Usaram células eletroquímicas com barras de aço-carbono em solução saturada de Ca(OH)_2 com 3 % de NaCl e aço-carbono ou aço inoxidável em solução saturada de Ca(OH)_2 , em duas cubas interligadas por uma ponte salina; moldaram, também, corpos-de-prova de concreto (ver Apêndice A), à semelhança das células eletroquímicas, com metade contaminada com 3,5 % da NaCl, em massa. Com base em seus resultados, enunciaram as seguintes conclusões:

- a) o efeito da macrocélula de corrosão é menos significativo quando o potencial de corrosão do eletrodo com corrosão ativa for menos negativo. Entretanto, o efeito da corrosão por macrocélula pode ser maior quando a área ativa do aço for muito pequena em relação à área passiva;
- b) o valor da corrosão por macrocélula decresce com o aumento da resistência da ponte salina na célula eletroquímica. Isto confirma que o efeito da macrocélula de corrosão é reduzido na armadura em que o concreto tem alta resistividade;
- c) a corrente de redução catódica no aço inoxidável é significativamente mais baixa que no aço-carbono passivo, resultando numa densidade de corrente de macrocélula menor quando o aço inoxidável está eletricamente conectado com o aço-carbono ativo;
- d) os experimentos com os corpos-de-prova de concreto confirmaram que a corrente de macrocélula foi mais baixa quando o aço-carbono ativo foi conectado ao aço inoxidável do que quando fora conectado com o aço-carbono passivado.

Cusson e colaboradores (2006) avaliaram o desempenho de seis sistemas de reparo industrializados e um reparo de concreto, como referência, em condições de

emprego no campo. Os reparos foram aplicados na defesa de uma ponte de concreto com problemas de corrosão por contaminação com íons cloreto. Foram monitorados, por três anos, o potencial de corrosão, a resistividade elétrica e a temperatura, tanto da área do reparo quanto do substrato, junto ao reparo. Os potenciais da armadura no interior dos seis sistemas de reparo industrializados tiveram pouca variação e permaneceram entre $-200 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ e $-300 \text{ mV}_{\text{CSE}}$, enquanto que o potencial no sistema de referência variou de $-320 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ para $-470 \text{ mV}_{\text{CSE}}$. Os potenciais da armadura no substrato junto aos reparos ficaram mais negativos em mais de 100 mV no decorrer dos três anos. Concluíram que:

- a) o risco de ocorrência de corrosão por microcélulas na armadura no interior do reparo era menor naqueles que tinham maior resistência à compressão e menores valores de permeabilidade medidas em laboratório;
- b) o risco de corrosão por macrocélulas no substrato era menor nos reparos com características similares às do concreto original; e
- c) o risco de corrosão por microcélulas no substrato aumentava, mesmo após a execução do reparo.

2.2 COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO DO AÇO-CABONO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

2.2.1 Corrosão eletroquímica de armaduras de aço-carbono

A corrosão do aço em meio aquoso dos poros do concreto dá-se por meio de mecanismo eletroquímico. A superfície do metal atua como um eletrodo misto, sobre o qual ocorrem as reações anódicas e catódicas. Nas regiões anódicas, os íons do metal passam para a solução eletrolítica (reação de oxidação) e o excesso de elétrons flui através da barra, para as regiões catódicas, onde é consumido pela espécie oxidante, o oxigênio dissolvido na solução (reação de redução).

Segundo Panossian (1993), as células de corrosão podem ser de três tipos: células de ação local, caracterizadas pela distância microscópica entre o ânodo e o cátodo, conhecidas como microcélulas; célula de longo alcance, na qual o ânodo e o cátodo estão localizados a grandes distâncias, chegando a quilômetros, como no caso de

correntes de fuga em tubulações enterradas nas vizinhanças de uma estrada de ferro eletrificada; e célula oclusa em que o ânodo e o cátodo encontram-se fisicamente separados, de modo que o eletrólito junto ao ânodo tem dificuldade de misturar-se com o eletrólito junto ao cátodo. As células oclusas são mais conhecidas no meio da Engenharia Civil como macrocélulas.

As macrocélulas em armaduras de concreto podem ser originadas por um ou pela combinação de vários fatores, como a heterogeneidade do eletrólito (diferença de pH, concentração salina diferenciada, etc.); heterogeneidade do metal (impurezas na matriz metálica, tensões residuais, contornos de grãos, etc.) e contato elétrico entre metais com potenciais eletroquímicos diferentes.

2.2.2 Parâmetros que influenciam a corrosão do aço no concreto

Nas estruturas de concreto armado, o aço é protegido contra a corrosão pela alta alcalinidade da água de poro¹, solução onde os componentes mais comuns são $\text{Ca}(\text{OH})_2$, KOH, e NaOH com o pH variando de 12 a 13, o que proporciona um meio adequado à formação de uma película passiva na superfície do aço. A seguir, são discutidos os principais fatores que influenciam a corrosão do aço no concreto.

2.2.2.1 Porosidade

O cobrimento de concreto sobre a armadura protege o aço: preserva o ambiente alcalino e atua como uma barreira física, limitando o acesso de agentes agressivos à armadura. O desempenho do cobrimento do concreto está relacionado com a sua porosidade e o volume de poros do concreto não depende somente de sua composição, mas também, das condições de cura e de exposição, além do grau de hidratação do cimento (HELENE, 1993).

A pasta de cimento hidratada contém vários tipos de vazios que têm grande influência nas propriedades de transporte de massa no concreto. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), em pastas de cimento bem hidratadas e com baixa relação água/cimento, os vazios capilares podem variar entre 10 nm e 50 nm, podendo chegar a

¹ Água presente nos poros da pasta de cimento endurecida.

5.000 nm em pastas com alta relação água/cimento, nas primeiras idades de hidratação.

Quando apenas causas físicas estão envolvidas no processo, o fenômeno de transporte é influenciado pelas dimensões dos poros, isto é, cada faixa de dimensões de poros é responsável, predominantemente, por um mecanismo de transporte diferente (MENG, 1994), conforme a Figura 2.1.

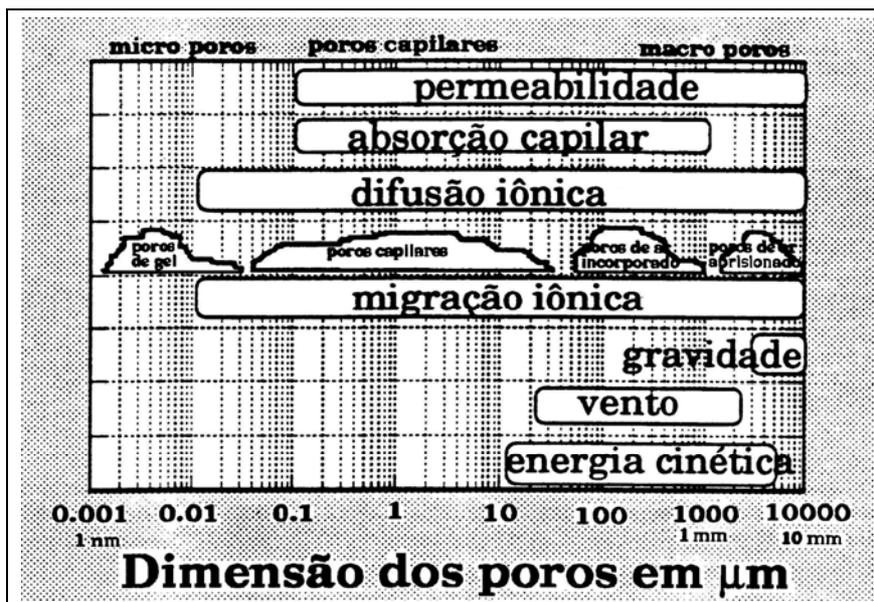


Figura 2.1 – Relação entre o mecanismo de transporte e as dimensões de poro (HELENE, 1993)

2.2.2.2 Umidade, resistividade e acesso de oxigênio

A umidade tem um papel fundamental nas reações químicas no concreto e nos processos físicos e químicos de vários fenômenos específicos de sua deterioração e também no caso da corrosão eletroquímica do aço.

O grau de saturação no concreto é função da umidade relativa do ambiente, se não houver outras fontes de umidade (HELENE, 1993). A relação entre a umidade interna do concreto e a umidade ambiente, depende das características da microestrutura do concreto – tipo, volume e distribuição de tamanhos de poros – e da temperatura (NEPOMUCENO, 1992).

O tempo de iniciação² da corrosão da armadura é fortemente influenciado pelo seu nível de umidade. Um concreto com alto grau de umidade retarda a penetração do dióxido de carbono, pois a difusão de CO₂ na água é 10⁴ vezes menor que no gás (HELENE, 1993). Entretanto, certo grau de umidade é necessário para ocorrer a reação do dióxido de carbono com a portlandita (Ca(OH)₂).

Segundo Guimarães (2000), a penetração dos íons cloreto só é possível quando este íon está dissolvido em água. Se há água capilar estagnada nos poros, o deslocamento dos íons cloreto se dá por dissolução e difusão. Quando o concreto sofre ciclos de molhagem e secagem, a penetração desses íons passa a ser por absorção capilar da água em que estão presentes.

A taxa de corrosão da armadura é grandemente influenciada pelo grau de saturação do concreto. Tanto no concreto seco, onde a resistividade do concreto é muito alta, quanto no concreto saturado onde a difusão do oxigênio é o fator controlador, a taxa de corrosão é baixa (RAUPACH, 1996). Porém, uma condição de saturação intermediária garante a presença de eletrólito e permite a penetração do oxigênio no concreto. Por isso, o grau de saturação dos poros é um parâmetro vital no processo de corrosão do aço no concreto. Uma pequena queda na umidade causa esvaziamento dos poros maiores que passam a atuar como canais preferenciais de aeração, permitindo que o oxigênio penetre no concreto por difusão no ar e se dissolva na água de poro mais perto da barra.

A Figura 2.2 mostra que a taxa de corrosão do aço em uma argamassa contaminada com cloreto³ cai, quando o grau de saturação varia entre 60 % e 30 %: abaixo de 60 % a resistência do concreto torna-se o fator controlador da cinética da corrosão. Por outro lado, vê-se, na mesma Figura, que a taxa de corrosão da argamassa isenta de cloretos permanece mais ou menos constante nesta faixa de grau de saturação, com valores absolutos de i_{corr} na faixa de 10⁻⁷ A/cm².

² Período de tempo que vai do término da construção de uma estrutura de concreto até a despassivação da sua armadura (TUUTI, 1982).

³ Argamassa com dosagem de 1:3:0,5 (cimento, areia e água, em massa) e porosidade de 16,1 %, utilizada nos experimentos de González e colaboradores (1993).

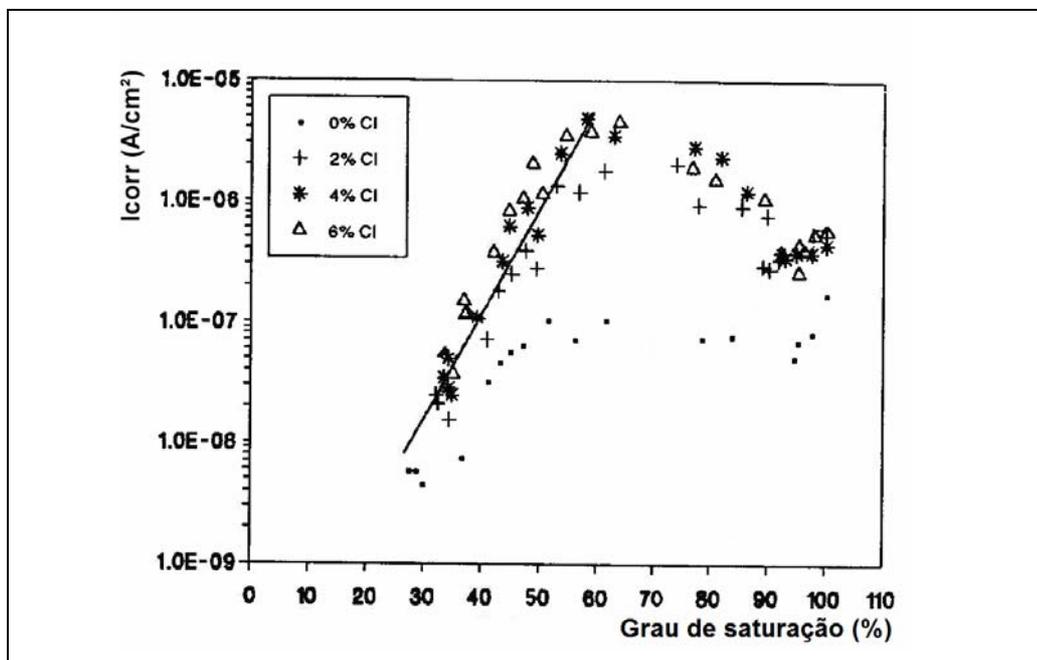


Figura 2.2 – Influência do grau de saturação do poro na densidade de corrente de corrosão da armadura em uma argamassa com $a/c = 0,5$. (GONZÁLEZ *et al.*, 1993)

O efeito da umidade na difusão do oxigênio no concreto está ilustrado na Figura 2.3, abaixo, onde os coeficientes de difusão foram plotados em função da umidade de equilíbrio nos poros de dois concretos ($a/c = 0,42$ e $a/c = 0,67$), na faixa de umidade relativa do ambiente, variando de 0 a 100 %.

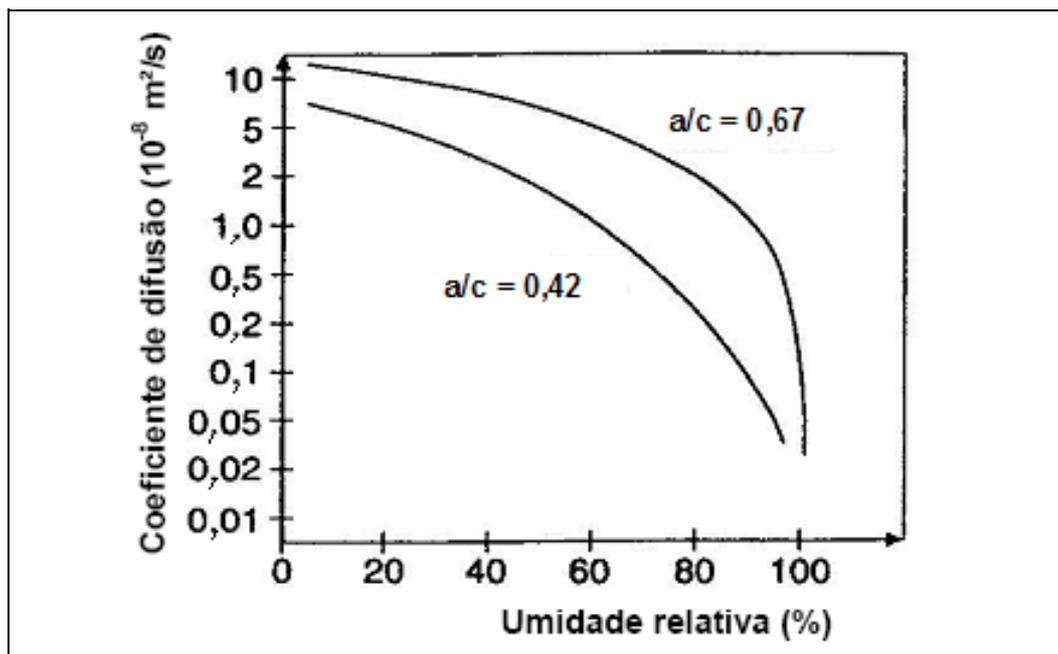


Figura 2.3 – Influência da umidade relativa no coeficiente de difusão do oxigênio para pastas de cimento com fator $a/c = 0,42$ e $0,67$ (TUUTTI, 1982)

Segundo Raupach (1996), em estruturas submersas, quando o concreto está saturado e a maior parte do oxigênio próximo à superfície da barra já foi consumida pela reação catódica do processo de corrosão, a disponibilidade de oxigênio é o único fator limitante da taxa de corrosão da armadura. No caso de estruturas externas, sujeitas a chuva ou a outros tipos de molhagem periódica, pesquisas mostraram que as taxas de corrosão são mais elevadas.

Andrade e colaboradores (1989) chegaram a resultados semelhantes. Em pesquisa sobre a influência do fluxo de oxigênio na taxa de corrosão em concretos com fator água/cimento iguais a 0,5 e 1,0, para dois cobrimentos (1,5 cm e 7,2 cm), em vários graus de saturação; concluíram que a disponibilidade de oxigênio é limitada, quando o concreto está totalmente saturado. Nos concretos não-saturados o fluxo de oxigênio é sempre maior do que o necessário para alimentar o processo de corrosão. Não notaram influências significativas em relação ao tipo de cimento, dosagem ou espessura do cobrimento.

Segundo Bijen (1989), *apud* Helene (1993), sempre há oxigênio suficiente para as reações de corrosão. Impedir a corrosão a partir do controle do acesso de oxigênio por meio da espessura do cobrimento implicaria em ter uma resistência à difusão de oxigênio equivalente a mais de 200 m de cobrimento com um concreto de relação água/cimento igual a 0,65. Resistência à difusão dessa ordem só é conseguida por meio de aplicação de revestimentos protetores superficiais, tipo base epóxi ou base poliuretana.

Em resumo, para o nível de taxa de corrosão comumente encontrado em barras de aço imersas em concreto não-saturado⁴, a difusão de oxigênio através do concreto até a barra, na maioria dos casos, não é o fator controlador da corrosão de armaduras. O fluxo de oxigênio é restrito apenas em concretos completamente saturados.

2.2.2.3 Reserva alcalina e pH da água de poro

Nas estruturas de concreto armado, o aço é protegido contra a corrosão pela alta alcalinidade da água de poro, cujo pH varia de 12 a 13, o que proporciona um meio adequado à formação da película passiva na superfície do aço. Na verdade, a água de poro é uma solução de íons cuja composição depende do tipo de cimento, da relação água/cimento (*a/c*), da cura, do grau de hidratação do cimento e das condições de exposição (OLIVEIRA, 2000).

A alcalinidade da água de poro do concreto é consequência, principalmente, das reações de hidratação dos compostos principais do cimento, os silicatos de cálcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), que liberam certa percentagem de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). O volume total de hidróxido de cálcio, para as pastas totalmente hidratadas, constitui 20 % a 25 % do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Helene (1993), quando a frente de carbonatação⁵ avança no concreto, o CO_2 dissolvido na água de poro reage com os álcalis presentes na solução, baixando o seu pH. Esta condição de pH mais baixo favorece a dissolução dos cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presentes nos poros da pasta de cimento. Quanto maior for a quantidade de hidróxido de cálcio que o concreto está apto a liberar por unidade de volume de pasta de cimento, maior será a sua reserva alcalina e menor será a velocidade do avanço da frente de

⁴ Andrade e Alonso (1996) reuniram em um banco de dados e analisaram os resultados das taxas de corrosão de estruturas, obtidas em numerosas pesquisas realizadas em campo. Verificaram que mais de 90 % das taxas de corrosão eram inferiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ e as máximas raramente chegavam a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

⁵ Por frente de carbonatação entende-se a posição da interface entre a região carbonatada, de baixa alcalinidade por ação do CO_2 sobre os produtos alcalinos da hidratação do cimento e a região contígua, não-carbonatada, de elevado pH (HELENE, 1993).

carbonatação, pois, para a sua progressão, há necessidade de reagir com todo o hidróxido de cálcio disponível na solução.

A carbonatação do concreto é caracterizada pela diminuição do pH em torno de quatro unidades. A monitoração do pH é feita por meio de medidas com fenolftaleína ou timolftaleína. Como a frente de carbonatação, em geral, é bem definida, não há necessidade de uso de sensores de alta precisão, para a sua determinação.

Em pesquisa recente, Chang e Chen (2006), utilizando técnicas de análise termogravimétrica, difração de raios X e espectroscopia de infravermelho, concluíram que a frente de carbonatação é uma faixa na qual o pH varia de 7,5 (totalmente carbonatado) a 11,5 (não-carbonatado) e que a profundidade de carbonatação determinada com a utilização de fenolftaleína indica uma linha intermediária onde o pH é igual a 9.

2.2.2.4 Outros parâmetros

Entre outros parâmetros que influenciam a corrosão do aço no concreto, o mais importante é a presença de íons cloreto.

A corrosão de armaduras causada por íons cloreto é a principal causa de deterioração das estruturas de concreto armado nas regiões marítimas. Uma alta concentração de cloreto no concreto resulta em uma destruição localizada da película passiva que protege a armadura. Esta situação representa um alto risco de corrosão. Entretanto é necessária a presença de oxigênio e umidade na superfície do aço.

Ataques severos de corrosão ocorrem quando há ciclos de molhagem e secagem no concreto (situação típica da zona de respingo de estruturas marinhas). A penetração do cloreto determina o tempo para a despassivação ocorrer e um possível início de corrosão localizada. Esta é uma das mais decisivas etapas que determinam a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto (período de iniciação).

Em ambientes marinhos, água e os cloretos são transportados para dentro do concreto por capilaridade. Além da influência predominante da porosidade do concreto e da distribuição e tamanhos dos poros, a taxa e a quantidade de absorção de cloretos são devidas ao grau de umidade da matriz do concreto, assim como as propriedades químicas do cimento. O uso de cimentos com alto teor de C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) contribui para uma boa resistência à corrosão, por causa de sua capacidade de reagir quimicamente com os cloretos, formando

o cloro-aluminato de cálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Entretanto, o ataque de sulfatos, existentes na água do mar, decompõe o cloro-aluminato de cálcio, liberando, assim, os cloretos e formando o sulfo-aluminato de cálcio, deixando os cloretos livres, para atuar no processo de corrosão (NEVILLE, 1995).

A carbonatação da pasta de cimento, em que há cloretos combinados, tem um efeito similar: deixa livres os cloretos que estavam combinados, aumentando o risco de corrosão. A presença de uma pequena quantidade de íons cloreto no concreto carbonatado aumenta a taxa de corrosão provocada pela baixa alcalinidade do concreto carbonatado (TUUTTI, 1982).

2.3 FORMAÇÃO DE MACROCÉLULAS DE CORROSÃO EM ARMADURAS COM REPAROS DE ARGAMASSA

2.3.1 Conceitos gerais

Neste item, serão vistos conceitos introdutórios importantes, para o estudo da macrocélula de corrosão.

2.3.1.1 Reparos localizados de argamassa

No trabalho de Buonopane (2006), pode ser consultada uma classificação geral e abrangente sobre argamassas de reparo.

Os mecanismos de proteção e controle da corrosão, pelos materiais e sistemas de reparo, baseiam-se na intervenção em uma ou mais etapas do processo corrosivo e podem ser classificados de acordo com o seu principal mecanismo de ação. Assim, os sistemas de reparo podem ter composição bastante complexa, pois em geral, envolvem materiais que atuam por um ou mais tipos de mecanismo.

Os conceitos de reparo e de sistema de reparo estão muito próximos e associados. Segundo Buonopane (2006), sistema de reparo é um conjunto de materiais e técnicas aplicados desde a interface com o concreto de substrato até o acabamento de proteção final do elemento reparado. Neste trabalho, sistema de reparo será usado como sinônimo de reparo, sendo que este pode ser considerado como a materialização do sistema de reparo.

Segundo Andrade (1992), as argamassas são classificadas de acordo com o seu princípio de ação: 1) à base de cimento; 2) de base polimérica ou de resina e 3) mistas (Figura 2.4). As primeiras, em quase todos os casos, contêm diversos aditivos que melhoram as suas propriedades como retração, exsudação, tempo de pega, consistência e outras. Estes materiais à base de cimento devem restaurar o meio alcalino que permita a repassivação da armadura.

As argamassas de reparo de base orgânica têm composição muito variada e as mais comuns são constituídas de resinas epóxi, resinas poliéster, base poliuretano e base acrílica. Elas atuam como uma barreira contra a penetração de oxigênio, umidade, cloretos ou CO₂.

As argamassas mistas são produzidas a partir de misturas das duas anteriores e atuam como passivantes e como barreira.

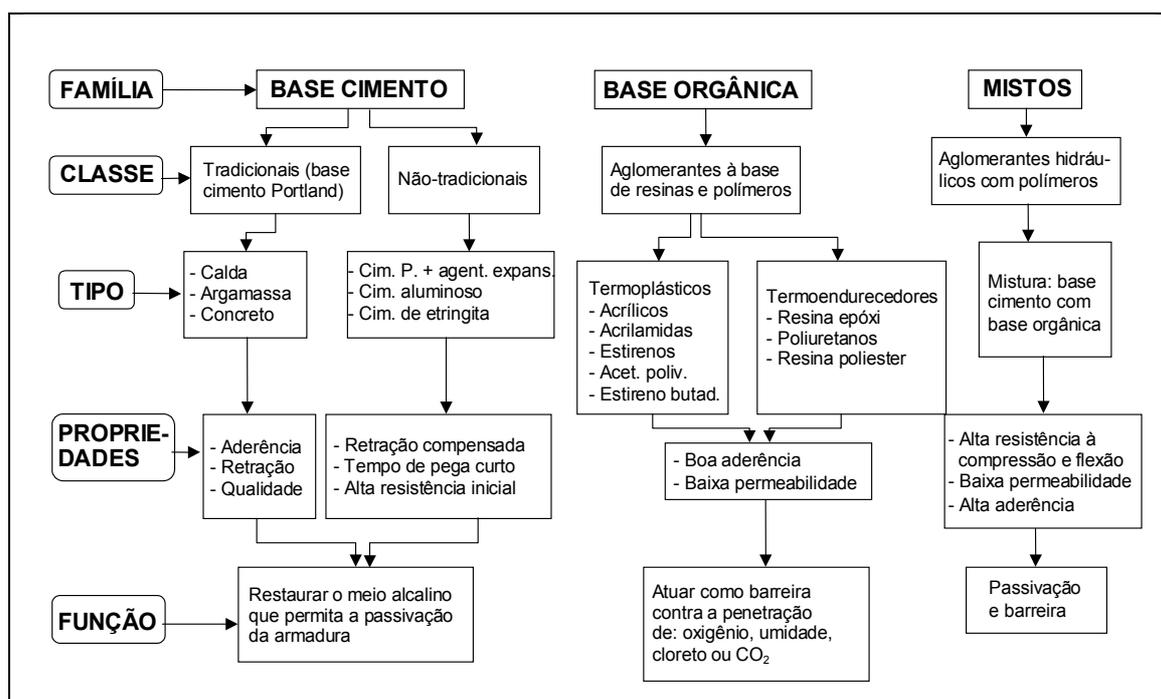


Figura 2.4 – Classificação das argamassas quanto ao tipo de material aglomerante (ANDRADE, 1992)

2.3.1.2 Requisitos de desempenho para reparos localizados

Para que um reparo seja durável e eficiente, deve ser compatível com a peça estrutural a ser reparada. Segundo Emmons e colaboradores (1994), a compatibilidade entre o reparo e o substrato pode ser definida como o equilíbrio das propriedades físicas, químicas e eletroquímicas e dimensionais entre o reparo e o substrato. Deve permitir que o reparo

resista a todas as tensões causadas pelas variações de volume e aos efeitos químicos e eletroquímicos, sem deteriorar-se, num meio específico, num determinado período de tempo. Desse modo, os materiais de reparo devem possuir os seguintes requisitos:

- **compatibilidade estrutural** - engloba fatores físicos como aderência, resistência à compressão, resistência à flexão, deformação lenta e módulo de elasticidade similares ao substrato;
- **compatibilidade de deformações** - os reparos devem ter baixa retração por secagem e ter coeficiente de dilatação térmica compatível com o substrato;
- **compatibilidade à agressividade ambiental** - a baixa porosidade e a estabilidade química são importantes para que o reparo resista a microclimas agressivos; e
- **compatibilidade eletroquímica** - o reparo deve provocar o mínimo de desequilíbrio de potencial eletroquímico na armadura, em decorrência de diferenças entre os meios proporcionados pelo reparo e o concreto da estrutura.

2.3.2 Corrosão de armadura induzida por reparo localizado

Este item resume uma análise teórica realizada em cooperação técnica com a Prof^a Dr^a Zehbour Panossian, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, conforme Ribeiro; Selmo; Panossian (2007, 2008).

A corrente e o potencial de corrosão de um metal imerso em um meio corrosivo podem ser determinados pela representação gráfica das curvas de polarização das reações anódicas e catódicas, por meio dos diagramas de Evans, com fundamentos já bem estabelecidos e discutidos em livros e manuais de eletroquímica. Assim, estes diagramas são aqui usados, para ilustrar e discutir os mecanismos de formação de macrocélula decorrente de reparos localizados, e os seus efeitos na taxa de corrosão das armaduras, nos casos de reparos em estruturas de concreto com carbonatação e de reparos em estruturas com contaminação por cloreto.

A Figura 2.5(a) ilustra a cinética da corrosão do aço num meio alcalino, sem contaminação por íons agressivos, como no caso do concreto ou argamassa não-carbonatados; a Figura 2.5(b) mostra o caso de corrosão de armadura em um concreto ou argamassa carbonatados (pH ~ 9); e a Figura 2.5(c) ilustra a situação em que estes estão apenas contaminados por íons cloreto. Segundo Panossian (1993), nestes casos, as reações prováveis de ocorrer são:

- **reação anódica** - em meio com pH de 12 a 13: $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^-$ (1)
- **reação anódica** - em meio com pH em torno de 9: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (2)
- **reação catódica** - em ambos os meios: $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ (3)

Na Figura 2.5, a curva A1 representa a reação anódica da corrosão de armadura no concreto não-carbonatado⁶; a curva A2 representa a reação anódica em um concreto carbonatado e A3 a reação anódica em um concreto não-carbonatado e contaminado com íons cloreto. As curvas C1, C2 e C3 referem-se às reações catódicas, representando a reação de redução do oxigênio. Os interceptos das curvas A1 com C1, A2 com C2 e A3 com C3, onde as velocidades das reações anódicas se igualam às das reações catódicas, determinam os potenciais de corrosão (E_{corr}) e as densidades de corrente de corrosão (i_{corr}).

⁶ O aço não apresenta região ativa, quando está submerso em concreto ou argamassa não-carbonatados (pH de 12 a 13).

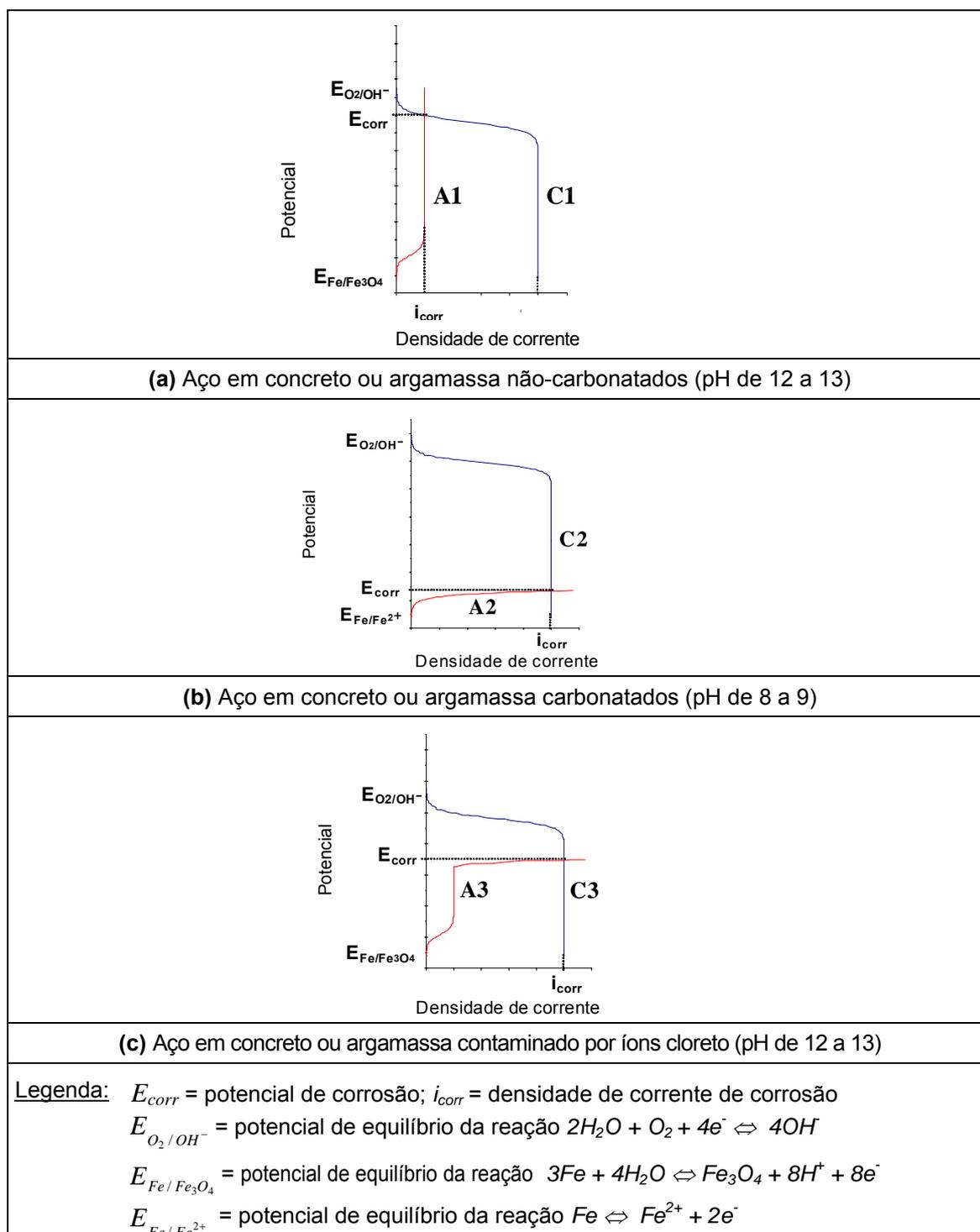


Figura 2.5 – Diagramas de Evans da cinética de corrosão do aço em concreto ou argamassa

No caso da Figura 2.5(c), a representação é apenas didática, pois, quando a corrosão por cloreto se manifesta na superfície do concreto, já existe uma região de corrosão extensa, que não se caracteriza mais como um pite e já pode ser considerada como generalizada. Este fato explica por que os potenciais de

corrosão do aço por cloreto em estruturas de concreto são do mesmo nível que os potenciais das barras com corrosão por carbonatação.

2.3.2.1 Mecanismos de corrosão induzidos por reparos localizados

Um reparo em uma estrutura de concreto com problema de corrosão pode induzir um processo corrosivo no trecho da barra de aço no concreto original (substrato) por três mecanismos principais: corrosão por microcélulas ou generalizada, quando o concreto está carbonatado; corrosão por pite, quando o concreto está contaminado por íons cloreto; e corrosão por macrocélula decorrente de concentração diferencial de elementos alcalinos entre a região do reparo e o concreto original adjacente.

Esses mecanismos são analisados a seguir.

2.3.2.1.1 Corrosão por microcélulas e por pite no concreto original

Normalmente, a frente de carbonatação ou de cloreto avança para o interior de de uma estrutura de modo irregular, seja por diferença de concentração dos contaminantes ao longo da sua superfície, seja por diferença de umidade ou pela heterogeneidade característica do concreto de cimento Portland. Deste modo, a frente de contaminantes pode atingir a armadura e despassivá-la, inicialmente em pontos isolados, levando à corrosão da armadura em regiões descontínuas (Figura 2.6(a)).

A atividade anódica numa região da superfície do aço polariza catodicamente a barra de aço nas suas áreas adjacentes. Assim, estas áreas resistem mais ao avanço da frente de carbonatação, pela alcalinidade decorrente da produção de hidroxilas que sustentam o processo corrosivo, mantendo a passivação do aço nessas áreas (áreas catódicas). Por outro lado, no caso de contaminação por cloreto, a polarização catódica dos trechos adjacentes mantém a armadura num baixo potencial, diminuindo, assim, a probabilidade de ocorrência de pite, mesmo se a frente de cloretos acima de um limite crítico atingir a superfície do aço.

A substituição do material que envolve a região da armadura em corrosão, pelo material de reparo, repassiva o aço nesse trecho e eleva o seu potencial eletroquímico, eliminando, desse modo, a polarização catódica do aço no

concreto original, adjacente ao reparo. Assim, a frente de carbonatação, já adiantada no substrato, continua avançando e pode atingir outros pontos da armadura. (Figura 2.6(b)).

Quando o substrato é um concreto carbonatado, a alcalinidade decorrente da atividade catódica é perdida, pela diminuição significativa da produção de íons hidroxila (OH^-). O excesso destes íons, responsável pela manutenção do pH elevado e, em consequência, pela passivação das áreas catódicas, é transportado, por difusão, para as áreas vizinhas, com menor concentração de OH^- . Em seguida, são gradativamente consumidos pela carbonatação do concreto, causando perda de alcalinidade e a consequente despassivação do aço, como visto no item 2.1.2.2.

No caso de substrato contaminado por íons cloreto, a elevação do potencial eletroquímico da armadura, após a execução do reparo, pode ultrapassar o seu potencial de pite, criando-se, assim, condições de se estabelecer um processo corrosivo. Desse modo, a corrosão no substrato, em ambos os casos, carbonatado ou contaminado por cloreto, pode tornar-se significativa e ser agravada pela corrosão por macrocélula, induzida pela incompatibilidade eletroquímica entre o reparo e o substrato, a qual será abordada no próximo item.

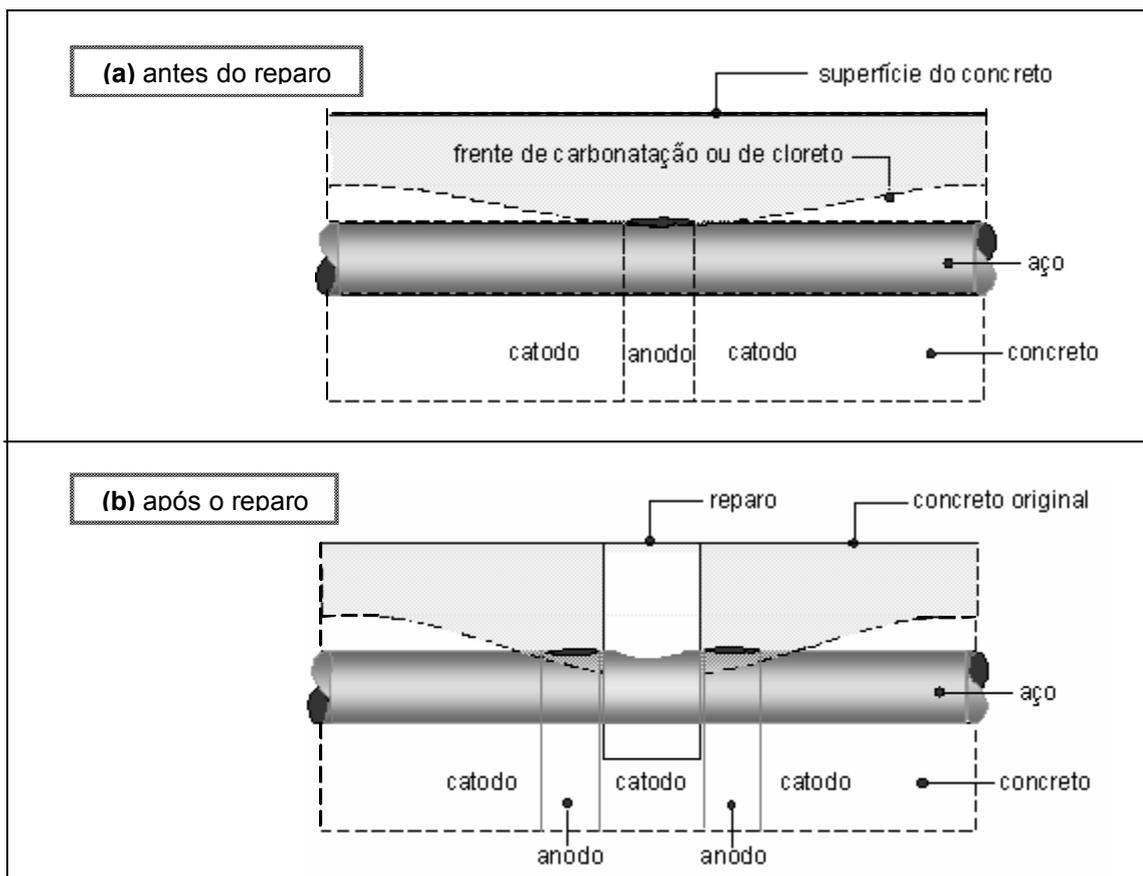


Figura 2.6 – Possíveis locais de corrosão após o reparo localizado (adaptado de Raupach (2006))

2.3.2.1.2 Corrosão por macrocélula no substrato

A causa mais comum da corrosão por macrocélulas em reparos localizados é a incompatibilidade eletroquímica entre o material de reparo e o concreto original, quando este se encontra carbonatado ou contaminado por cloreto.

Nos casos usuais, não é viável a remoção completa do concreto carbonatado da estrutura a ser reparada. Nesses casos, a parte da armadura que está imersa no concreto carbonatado (no substrato), adjacente ao reparo, perde a polarização catódica que lhe era proporcionada pela atividade anódica contígua, antes do reparo. Por outro lado, a armadura na região reparada é repassivada, devido ao meio altamente alcalino proporcionado pelo reparo. Esta condição é ilustrada na Figura 2.7. As curvas A1 e C1 representam, respectivamente, as reações anódicas e as reações catódicas do aço na armadura, no interior do reparo (meio alcalino), com o aço repassivado; enquanto que as curvas A2 e C2 representam as reações anódicas e catódicas do aço imerso no substrato (concreto carbonatado - pH ~ 9), com a armadura despessivada, junto ao reparo. $E_{corr(rp)}$ e

$i_{\text{corr}(\text{rp})}$ representam o potencial e a intensidade de corrosão do aço no interior do reparo. $E_{\text{corr}(\text{sb})}$ e $i_{\text{corr}(\text{sb})}$ correspondem ao potencial e à intensidade de corrosão do aço no substrato.

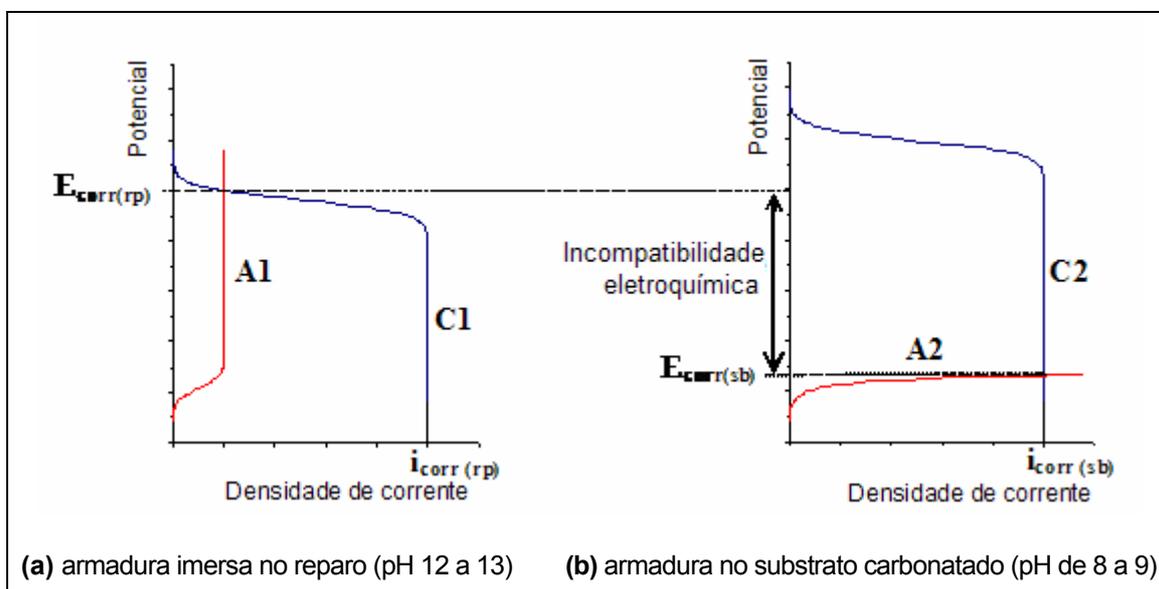


Figura 2.7 – Diagramas de Evans ilustrativos da incompatibilidade eletroquímica entre o reparo e o substrato de concreto carbonatado

Na situação da Figura 2.7, surge uma diferença de potencial eletroquímico, $|E_{\text{corr}(\text{rp})} - E_{\text{corr}(\text{sb})}|$ entre as regiões da armadura no reparo e no substrato, que pode induzir à formação de uma macrocélula por concentração diferencial de hidróxidos (diferença de pH) nas soluções de poro do reparo e do concreto do substrato. Esta diferença de potencial representa a incompatibilidade eletroquímica entre o reparo e o concreto original.

2.3.2.2 Efeito da macrocélula na taxa de corrosão

A intensidade de corrosão das armaduras no concreto devida às macrocélulas é controlada principalmente, pela diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo. Este tipo de corrosão é influenciado, também, pela resistência ôhmica entre as regiões anódicas e catódicas e por fatores geométricos, como a relação entre as áreas do cátodo e do ânodo e suas posições relativas: se as armaduras onde se encontram estão no mesmo plano ou em planos paralelos (ANDRADE *et al.*, 1992).

Para facilidade de estudo, os gráficos a seguir estudados são semiquantitativos e foram adotados valores de intensidade de corrosão semelhantes às máximas encontradas em estruturas com corrosão de armaduras em campo (ANDRADE e ALONSO, 1996) e foi considerada a densidade de corrente limite (i_L) do oxigênio na argamassa menor que densidade de corrente limite do oxigênio no concreto do substrato (GJORV *et al.*, 1986):

- i_{corr} da ordem de $10 \mu A/cm^2$;
- limite de passivação, $i_{corr} = (0,1 - 0,2) \mu A/cm^2$; e
- i_L do oxigênio no concreto da ordem de três vezes o i_L do oxigênio na argamassa de reparo.

Quando as armaduras são despassivadas por carbonatação do concreto de cobertura, ocorre corrosão do tipo generalizada, como consequência do estabelecimento de inúmeras células de ação local (microcélulas), distribuídas aleatoriamente pela superfície das barras.

O comportamento de uma armadura que corrói em decorrência da ação de microcélulas pode ser representado por uma única célula de corrosão, onde a reação anódica e a reação catódica representam a soma das reações anódicas e catódicas, respectivamente, de todas as microcélulas existentes na superfície do metal. Assim, as curvas A1 e C1 (Figura 2.8(a)) representam as reações anódicas e catódicas, respectivamente, nos trechos carbonatados (despassivados) da armadura e as curvas A2 e C2 (Figura 2.8(b)) representam as reações anódicas e catódicas na superfície do aço passivado no interior do reparo. Estas são as representações do que ocorreria se as regiões fossem isoladas. Como a armadura é contínua, as duas regiões estão eletricamente conectadas e as curvas A3 e C3 representam a soma das correntes anódicas ($A1 + A2$) e catódicas ($C1 + C2$), respectivamente⁷, resultando na corrente efetiva medida (I_{corr}) (Figura 2.8(c)).

Nessas condições, os potenciais $E_{corr(sb)}$ (Figura 2.8(a)) e $E_{corr(rp)}$ (Figura 2.8(b)) resultam em um potencial comum, que é o potencial de corrosão da macrocélula

⁷ Caso especial em que as áreas catódicas são iguais às áreas anódicas.

(E_{corr}) (Figura 2.8(c)). A parte da armadura no interior do reparo é catodicamente polarizada e o trecho sob o substrato é polarizado anodicamente.

Observando a Figura 2.8(a), verifica-se que a intensidade de corrosão $i_{\text{corr}(\text{sb})}$ representa a corrosão por microcélulas no trecho carbonatado, junto ao reparo e a intensidade $i_{\text{corr}(\text{rp})}$, na Figura 2.8(b), corresponde à taxa de corrosão da armadura no interior do reparo, quando consideradas as regiões de reparo e substrato isoladas. Estando as áreas eletricamente conectadas, a intensidade i_{corr} (Figura 2.8(a)) representa a corrosão total do aço na região do concreto original: corrosão por microcélulas agravada pela formação da macrocélula. A diferença entre a intensidade de corrosão total e a corrosão por microcélulas no substrato ($i_{\text{corr}} - i_{\text{corr}(\text{sb})}$) representa a corrente de corrosão devida à macrocélula (I_{mac}) (Figura 2.8(c)).

Na superfície da armadura sob o reparo (Figura 2.8(b)), a redução do oxigênio passa a ocorrer com uma taxa $i_{\text{O}_2(\text{rp})}$, muito maior do que ocorreria se as barras das regiões do reparo e do substrato estivessem isoladas. Os elétrons necessários para essa reação provêm, quase que totalmente, do trecho da armadura que está no substrato (OHBA, 1997). Apenas uma parcela desprezível é fornecida pela reação anódica que ocorre no trecho reparado.

Assim, o aço sob o substrato pode apresentar um aumento sensível de sua taxa de corrosão, após a execução do reparo (de $i_{\text{corr}(\text{sb})}$ para i_{corr}). O aumento da quantidade de elétrons produzidos devido a este incremento flui pela barra, para sustentar a reação catódica que ocorre sob o reparo. Esta corrente que passa pela barra em direção ao reparo é a corrente de corrosão por macrocélula. Na superfície do aço, sob o substrato, a redução do oxigênio ocorre com a mesma taxa observada antes do reparo ($i_{\text{O}_2(\text{sb})}$). O aumento da taxa de corrosão no substrato é sustentado pelo acréscimo da redução do oxigênio na região do reparo ($i_{\text{O}_2(\text{rp})} - i_{\text{corr}(\text{rp})} = i_{\text{mac}}$) (Figura 2.8(b)).

Andrade *et al.* (1992) advertem que na análise de macrocélulas é importante diferenciá-las de acordo com as posições relativas de suas áreas catódicas e anódicas: se estão face a face, em barras paralelas, com a região anódica em frente à catódica ou justapostas, com a área catódica vizinha à anódica, na mesma barra. No primeiro caso, há certa uniformidade na distribuição da corrente sobre a superfície da barra, quando as áreas têm a mesma dimensão. Enquanto que no último a distribuição nas linhas de corrente não é uniforme. Além disso, a ação da macrocélula, no caso da disposição face a face, se estende sobre toda a área anódica e essa ação é restrita às regiões anódicas próximas à borda do cátodo, quando a macrocélula está sobre a mesma barra.

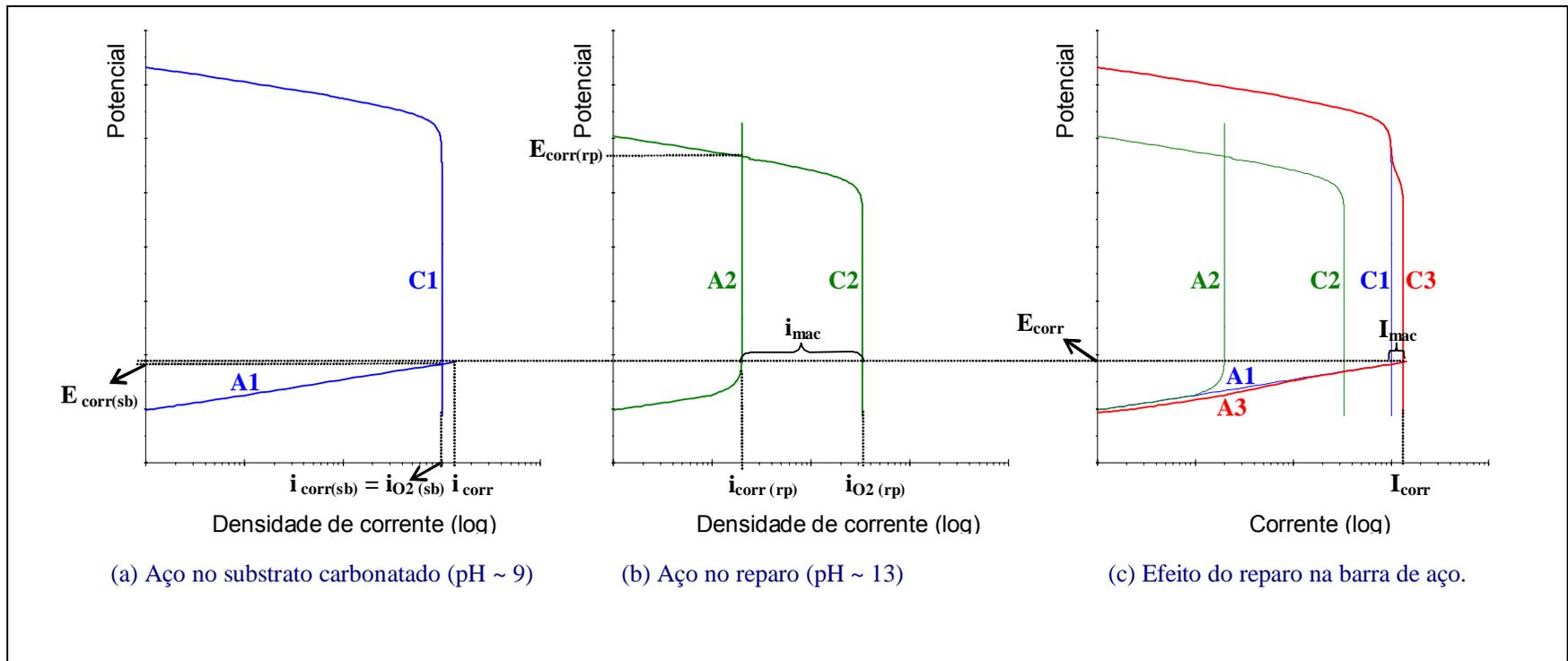


Figura 2.8 – Diagramas de Evans para o efeito da macrocélula na taxa de corrosão

2.4 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS EMPREGADAS NA PESQUISA

2.4.1 Medida de potencial de corrosão

O potencial de corrosão, também denominado de potencial misto ou potencial de circuito aberto, é o potencial correspondente ao ponto em que a reação catódica (redução) de uma espécie do meio tem, praticamente, a mesma velocidade da reação anódica do metal (oxidação).

O potencial de corrosão dá uma indicação aproximada da situação de corrosão ou de passivação das armaduras. Por isso o seu uso é sempre recomendado, mesmo quando houver avaliação por outras técnicas.

A medida do potencial de corrosão é obtida por meio da determinação da diferença de potencial elétrico entre o aço das armaduras e um eletrodo de referência colocado em contato com a superfície do concreto (ASTM C 876:1999), pois não pode ser medido diretamente na interface do concreto/armadura devido à presença do revestimento. Os potenciais obtidos são influenciados, dentre outros fatores, pela resistividade do concreto, pela disponibilidade de oxigênio e pela espessura do revestimento (ELSENER *et al.*, 2003):

- **resistividade do concreto (grau de saturação)** - o fator de maior influência na leitura do potencial de corrosão é o grau de saturação do concreto. Mudanças no grau de saturação causam alteração nos potenciais – quanto o maior grau de saturação, mais negativo será o potencial. Uma distribuição irregular no grau de saturação (por exemplo: regiões ativas úmidas e regiões passivas mais secas) aumenta a diferença de potencial entre as regiões ativas e as regiões passivas;
- **disponibilidade de oxigênio** - quando a disponibilidade de oxigênio é muito limitada, como no caso de estruturas submersas ou enterradas, a corrente catódica pode ser muito baixa para manter o filme passivo na superfície da armadura. Nestas circunstâncias a taxa de corrosão é bem baixa em consequência da baixa densidade de corrente catódica e o seu potencial de corrosão pode cair para valores muito negativos, entre $-0,9 V_{CSC}$ e $-1,0 V_{CSC}$. Esta situação de potencial muito baixo pode levar a uma interpretação equivocada sobre a taxa de corrosão se, por exemplo, forem aplicados os critérios da ASTM C 876;
- **espessura do revestimento** - a diferença entre o potencial registrado na região sobre o ânodo e na região sobre o cátodo diminui com o aumento da espessura do

cobrimento. Portanto, as diferenças na espessura do revestimento, também podem levar a conclusões falsas sobre a condição de atividade ou passividade da armadura.

2.4.2 Medida de corrente de macrocélula

A medida de corrente de macrocélula é feita por meio de amperímetro de resistência nula (ZRA). O ZRA (Figura 2.1) permite a medida de corrente de macrocélula ou galvânica entre dois eletrodos, quando estes estão conectados eletricamente.

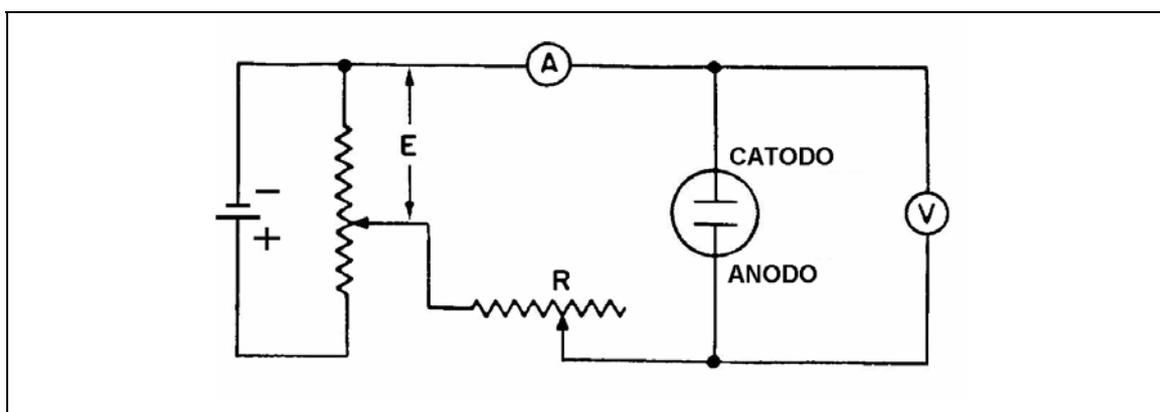


Figura 2.9 – Esquema básico de um circuito de um amperímetro de resistência nula (BABOIAN, 1976)

A corrente é medida por um amperímetro (A), por meio de um ajuste da voltagem (E), ou da resistência (R), de modo que a diferença de potencial entre os dois eletrodos seja zero, indicado pelo voltímetro (V) (BABOIAN, 1976). Como a ligação em curto-circuito no acoplamento indica uma queda de potencial igual a zero, a corrente medida é a corrente de macrocélula ou galvânica.

Segundo Baboian (1976), o desenvolvimento do autobalanceamento permitiu o monitoramento contínuo da corrente galvânica. O autobalanceamento é executado por meio do ajuste eletrônico automático da resistência (R) ou do potencial (E) no circuito básico (Figura 2.1).

2.4.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) tem sido usada na Engenharia Civil, para o estudo dos mecanismos de corrosão de armaduras, desde a década de 1980. Segundo Nóvoa (2004), o trabalho pioneiro nessa área foi realizado por

Dawson e colaboradores, em 1981. Nesse trabalho os pesquisadores obtiveram uma resposta resistivo-capacitiva no espectrograma do concreto, na faixa de alta frequência, além da resposta da dupla camada elétrica da interface aço/concreto. Eles atribuíram esse primeiro arco à alguma característica dielétrica na interface aço/concreto. Porém, os trabalhos posteriores indicaram que essa resposta se devia à contribuição dielétrica do revestimento de concreto: resistência do concreto e capacitância da rede de poros.

Dentre os vários modelos de circuito equivalente para a matriz do concreto, o que melhor se ajusta é o proposto por Song (2000) e confirmado por Nóvoa (2004) (Figura 2.2). Nessa Figura, a faixa vertical à direita (“concreto”) é uma representação esquemática da microestrutura do concreto. Basicamente existem três “caminhos” para a corrente no concreto úmido: os poros contínuos; os poros descontínuos e a matriz de concreto contínua, composta pelo cimento hidratado (gel) que funciona como isolante.

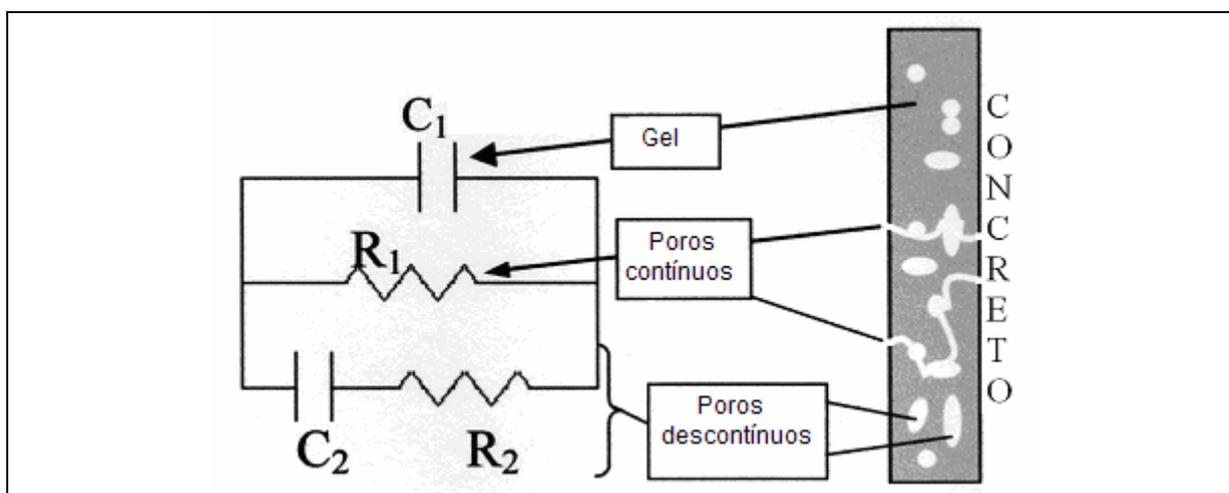


Figura 2.10 – Modelo de circuito equivalente para o concreto (adaptado de Nóvoa (2004))

A corrente através dos poros contínuos ocorre por meio da migração de íons na solução de poro. Por isso a impedância total de todos os poros contínuos pode ser representada por um resistor ($Z_1 = R_1$). A impedância através dos poros descontínuos é constituída de duas partes: a porção de poro e a porção de gel, que pode ser representada por um capacitor em série com um resistor ($Z_2 = C_2 + R_2$). A matriz do concreto pode ser atravessada por uma corrente alternada por meio do efeito capacitivo de carregamento e descarregamento. Neste caso, as duas faces da

matriz do concreto funcionam como duas placas paralelas de capacitância C_1 , tendo como dielétrico a matriz do concreto.

Segundo Song, a matriz do concreto não é totalmente isolante à corrente contínua. O gel tem condutividade limitada e pode ser considerado como um resistor. Sua contribuição na condutividade total do concreto só é significativa quando a resistência dos poros contínuos e a resistência dos poros descontínuos forem extremamente altas. Isto acontece quando o concreto está muito seco. Usualmente, a resistência da matriz do concreto não é considerada no circuito equivalente. Desse modo, para condições experimentais, o circuito foi simplificado pela eliminação da capacitância C_1 da Figura 2.10, assumindo a configuração mostrada na Figura 2.11(a), a qual é representada convencionalmente pelo circuito da Figura 2.11(b) e o diagrama de Nyquist teórico correspondente está representado na Figura 2.11(c).

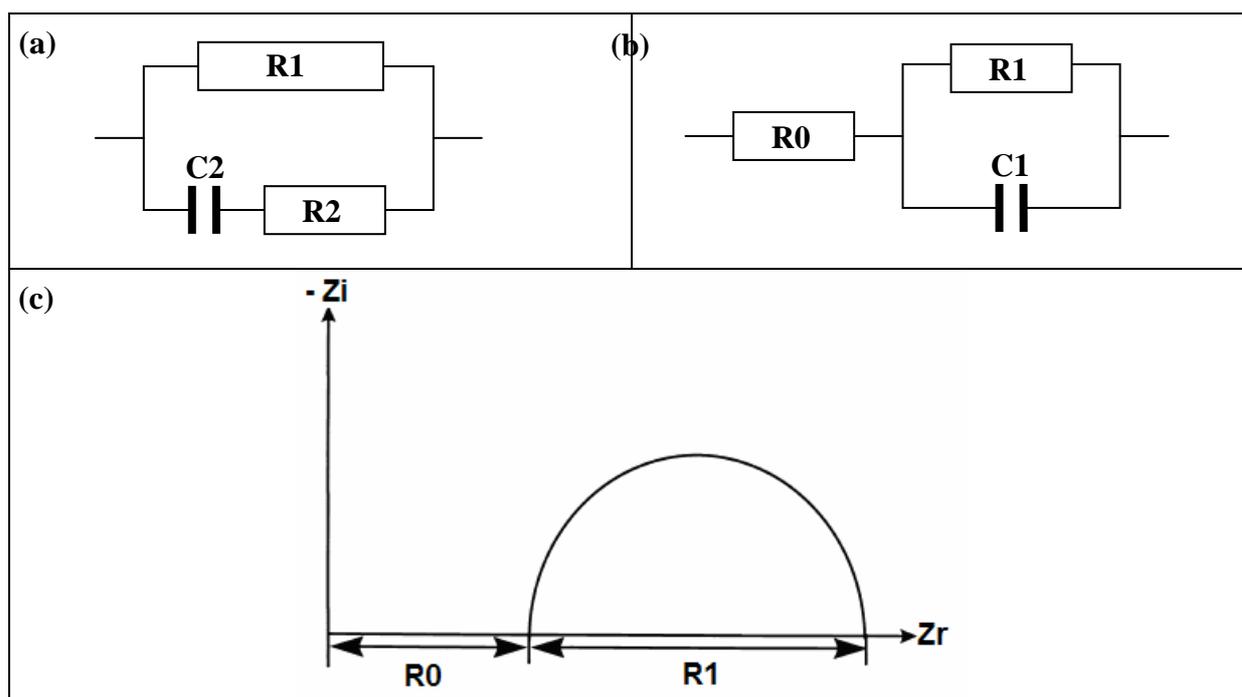


Figura 2.11 – (a) Modelo de circuito equivalente simplificado para o concreto; (b) Circuito equivalente convencional do modelo simplificado (a); (c) Diagrama de Nyquist experimental para o concreto (adaptado de Song (2000))

Na prática, devido às limitações dos equipamentos, os diagramas de Nyquist apresentam apenas parte do arco da Figura 2.11(c), correspondente às frequências mais baixas.

O circuito equivalente do processo de corrosão na superfície do aço é normalmente representado pela capacitância da dupla camada, C_{dl} , e pela resistência de

polarização, R_p . A Figura 2.12 mostra o circuito equivalente do cobrimento de concreto associado ao circuito equivalente da interface aço/concreto (Figura 2.12(a)) e a indicação dos arcos correspondentes no diagrama de Nyquist (Figura 2.12(b)).

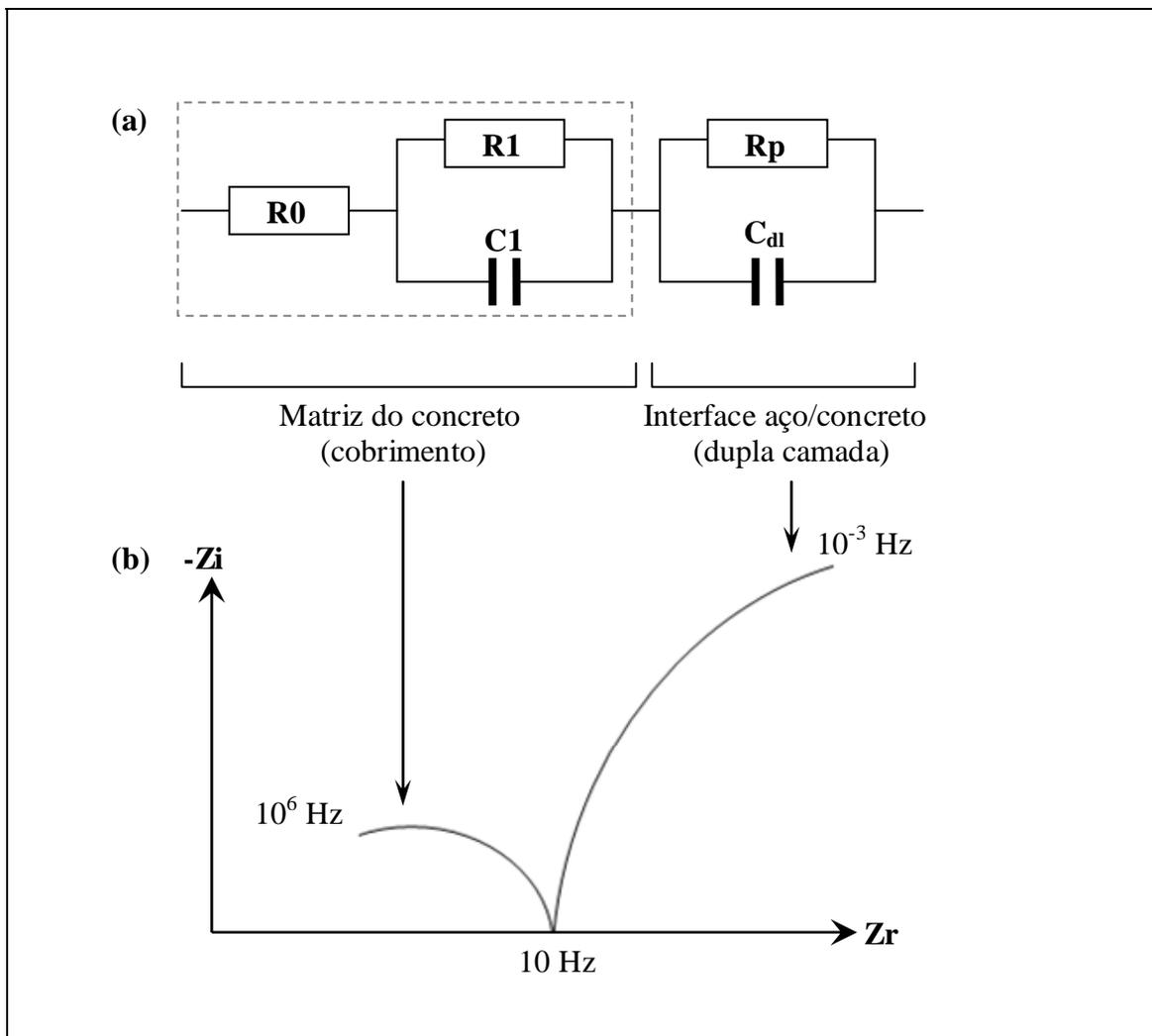


Figura 2.12 – (a) Modelo de circuito equivalente simplificado para o concreto e interface aço/concreto. (b) Diagrama de Nyquist típico para o cobrimento de concreto e interface aço/concreto

Alguns pesquisadores (GU *et al.*, 1997; FORD e MASON, 1998; HACHINI, 1992) relatam a existência de um arco intermediário, entre o arco da matriz do concreto e o arco da interface aço/concreto, atribuído a um possível filme na superfície do aço, formado por produtos de hidratação do cimento (Ca(OH)_2 e C-S-H) ou formado por uma mistura de produtos de corrosão com produtos de hidratação do cimento. Entretanto, Gu e colaboradores (1997) advertem que esse arco intermediário não pode ser distinguido do arco da matriz do concreto na maioria dos casos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa constitui uma continuidade dos experimentos sobre argamassas de reparo de estruturas de concreto com corrosão de armaduras, iniciados pela orientadora deste trabalho, por meio das dissertações de mestrado de Moreno Jr. (2002), Medeiros (2002) e Buonopane (2006).

Neste capítulo são apresentados o objetivo, as variáveis, os materiais e os corpos-de-prova usados, assim como também explica os métodos utilizados para a obtenção dos resultados. A metodologia envolveu ensaios de monitoração eletroquímica.

3.1 OBJETIVO

O programa experimental foi elaborado com o objetivo de contribuir para a avaliação da tendência à formação de macrocélulas de corrosão em armaduras imersas em argamassas de reparo e concreto carbonatado, de modo a permitir a análise da compatibilidade eletroquímica de reparos localizados de argamassa em estruturas de concreto.

3.2 MATERIAIS EMPREGADOS

3.2.1 Argamassas de reparo

As pesquisas abrangeram treze argamassas de reparo, sendo seis produzidas em laboratório e sete industrializadas, disponíveis no mercado de São Paulo/SP em 2000.

Os materiais e as dosagens das argamassas produzidas em laboratório foram definidas na dissertação de Moreno Jr. (2002) por critérios de trabalhabilidade no estado fresco e de aderência a substratos de concreto com três classes de resistência mecânica.

Medeiros (2002) selecionou outras sete argamassas industrializadas do mercado e repetiu as formulações de melhor comportamento obtidas em Moreno Jr (2002), mas para novas partidas de materiais. Naquela ocasião introduziu mais um tipo de cimento (CPV) e um polímero alternativo (acrilato) ao que fora selecionado por Moreno Jr. (2002), por recomendação do fabricante. Em seqüência procedeu à ampla caracterização física e mecânica de todos os materiais empregados nas argamassas desta pesquisa, em idades até 91 dias, e moldou todos os corpos-de-prova (CPs) da presente pesquisa. Pela análise dos seus resultados foi possível sugerir classificações e critérios para a seleção de argamassas com vistas à evolução normativa da tecnologia de reparos localizados.

Buonopane (2006) aprofundou as investigações de Medeiros (2002) nos CP's com idade a partir de 500 dias. Analisou o efeito barreira das argamassas por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), antes, durante e após ciclagem higro-térmica de 287 dias. Realizou, também, avaliação de retração lenta e análises complementares de comportamento físico, mecânico e da microestrutura de cada uma das treze argamassas empregadas nesta pesquisa.

3.2.1.1 Argamassas industrializadas (AI)

As argamassas industrializadas (AI) eram de composições definidas pelos respectivos fabricantes e tinham as seguintes denominações comerciais: Renderoc S2 e Renderoc S25 da FOSROC, Emaco 167-com fibras e Emaco 168 da MBT, Revestimento OBE 240 e Revestimento OBE 250 da Otto Baumgart, Sika Top 122 da Sika. Nesta pesquisa e nas anteriores, estes produtos foram identificados com os códigos AI-1 até AI-7, sem relação alguma com a ordem acima mencionada. As caracterizações físicas, químicas e mecânicas dessas argamassas constam no Anexo A.

3.2.1.2 Argamassas passíveis de preparo em obra (APO)

Seis argamassas foram reproduzidas na pesquisa de Medeiros (2002) e aqui também estudadas, sendo identificadas pela sigla (APO).

Os materiais e dosagens de duas das seis argamassas foram selecionados por estudos de trabalhabilidade e de aderência em três classes de concreto estrutural, por experimentos de Moreno Jr. (2002).

De forma empírica, na pesquisa de Medeiros (2002), foram incluídos mais um tipo de polímero (acrilato) e mais um tipo de cimento (CPV), os quais foram proporcionados pela mesma dosagem dos materiais selecionados por Moreno Jr (2002).

O cimento pré-selecionado foi o CP II-F 32, da marca Bonfim, e o segundo acrescentado por Medeiros (2002) foi o CPV ARI-PLUS RS, sendo três argamassas confeccionadas com cada tipo de cimento.

Quanto ao aditivo superplastificante, este foi de marca selecionada por Moreno (2002) entre três fabricantes do mercado e o seu teor também foi balizado por estudos conduzidos naquela pesquisa.

Os copolímeros empregados neste estudo foram um acrilato (VINNAPAS LL 512) e um EVA (VINNAPAS LL 5044) fornecidos em pó pela Wacker Polymer Systems, com fichas de especificação informadas em Medeiros (2002). O copolímero EVA foi também previamente estudado por Moreno Jr (2002), do ponto de vista da trabalhabilidade e aderência e foi usado no teor selecionado por aquele trabalho. A dosagem do copolímero acrilato foi adotada em teor idêntico.

O agregado miúdo para a confecção destas argamassas foi uma areia natural oriunda do Porto Perdigão, em São José dos Campos – SP, que abastecia o mercado de São Paulo há muitos anos.

Assim, as seis argamassas APO foram produzidas com nível de consistência pré-fixada, em uma única dosagem de cimento, agregado, aditivo superplastificante e adição polimérica, variando-se entre elas o tipo de cimento e o tipo de polímero. Um resumo da composição e dosagem consta na Tabela 3.1, e as propriedades estão apresentadas no Anexo A.

Tabela 3.1 – Composição das argamassas tipo APO (MEDEIROS, 2002)

Identificação	Cimento	Traço (kg)	Aditivo SP	a/c (kg/kg)	Polímero (Tipo e Teor)
APO – 1				0,40	Referência (0 %)
APO – 2	CP II-F 32	1:3	2,4 %	0,43	EVA (10 %)
APO – 3				0,40	Acrilato (10 %)
APO – 4				0,40	Referência (0 %)
APO – 5	ARI-CPV PLUS RS	1:3	2,4 %	0,43	EVA (10 %)
APO – 6				0,40	Acrilato (10 %)

3.2.2 Barras de aço-carbono

As barras desta pesquisa foram obtidas a partir de uma única barra usinada de aço CA-50, de 6,3 mm de diâmetro nominal, da marca Gerdau, cortada em segmentos de 15 cm e 9 cm, conforme o tipo de corpo-de-prova adiante descritos.

As barras foram limpas segundo o procedimento da ASTM G1:1990.

O grupo de barras com 15 cm de comprimento teve um fio soldado na sua extremidade e foram pintadas com uma tinta epóxica à base de alcatrão de hulha, de modo a delimitar a área de exposição da barra no interior do corpo-de-prova (Figura 3. 1). A área de exposição das barras nesta tese foi admitida como sendo de 6 cm².

Um segundo grupo de barras, com 9 cm de comprimento, tiveram a totalidade de suas áreas expostas de forma totalmente embutida em corpo-de-prova adiante descrito.

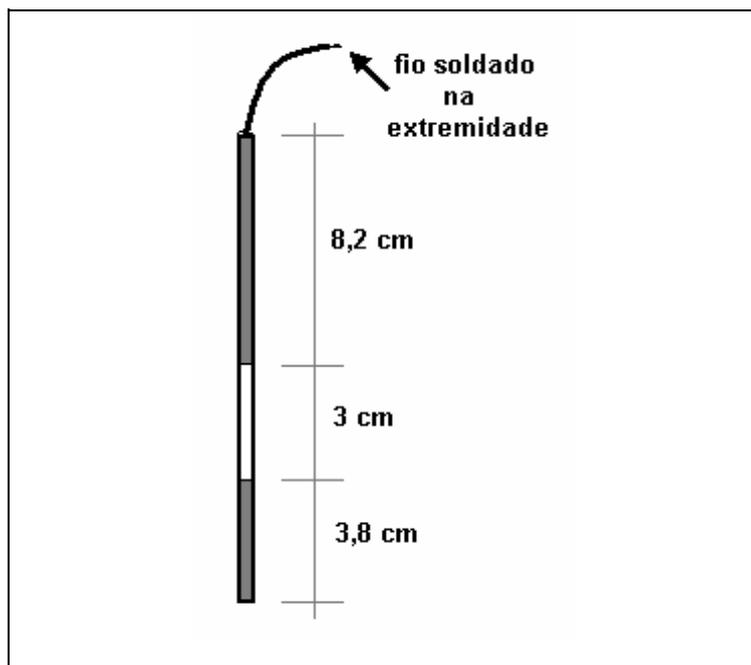


Figura 3. 1 – Barras de 15 cm utilizadas nos corpos-de-prova tipo A e B (MEDEIROS, 2002)

3.2.3 Concreto de referência ou de substrato

O concreto utilizado como substrato para aplicação das argamassas de reparo, foi definido por Moreno Jr. (2002), que fez estudo de dosagem com os mesmos materiais utilizados por Medeiros (2002).

Trata-se de um concreto de traço 1 : 2,24 : 3,12 com relação água/cimento 0,60 kg/kg e resistência característica, f_{ck} , igual a 25 MPa. O teor de argamassa deste concreto é de 51 % e a consistência medida pelo abatimento do tronco de cone igual a (100 ± 10) mm. O cimento empregado foi do tipo CII-F 32, da mesma marca usada nas argamassas de reparo APO-1 até APO-3. A areia empregada foi da mesma procedência usada nas argamassas tipo APO, enquanto a brita foi de dimensão máxima característica de 19 mm.

Segundo descrito em Medeiros (2002), o concreto de substrato foi carbonatado com armaduras embutidas por exposição acelerada em câmara com 5 % de pressão de CO_2 , umidade relativa de 65 % e temperatura de 24 °C.

3.3 VARIÁVEIS DO ESTUDO

As variáveis independentes desta pesquisa são consideradas como sendo aquelas arbitradas ou fixadas, enquanto as variáveis dependentes são aquelas medidas e de interesse para o objetivo da pesquisa.

3.3.1 Variáveis fixadas

- Treze tipos de argamassa de reparo;
- Um tipo de concreto de substrato;
- Um tipo de armadura de aço carbono;
- Dois tipos de corpos-de-prova.

3.3.2 Variáveis medidas⁸

- diferença de potencial de corrosão antes do acoplamento;
- potencial de acoplamento da macrocélula;
- intensidade de corrente de macrocélula;

3.4 CORPOS-DE-PROVA

Os corpos-de-prova foram projetados pela orientadora deste trabalho no plano de pesquisa de Medeiros e Selmo (2000) e produzidos conforme Medeiros (2002), mas muito pouco explorados na época, pelas diversas interferências de hidratação e instabilidade nas primeiras idades da moldagem (MEDEIROS; 2002). No trabalho de Medeiros (2002), constam detalhes da sua produção.

Os corpos-de-prova feitos para ensaios eletroquímicos têm a forma prismática, com dimensões de 12 cm x 6,0 cm x 6,0 cm e quatro barras imersas (Figuras 3.2 e 3.3). Nesta pesquisa, foram estudados os CPs tipo B e tipo C (Figura 3.2), os quais foram moldados com uma metade constituída de material de reparo e a

⁸ As propriedades físicas, mecânicas das argamassas e do concreto do substrato, assim como suas composições químicas foram determinadas em trabalhos anteriores (MEDEIROS, 2002; BUONOPANE, 2006) (Anexo).

outra metade de concreto carbonatado, em câmara com pressão de CO₂, segundo descrito em Medeiros (2002).

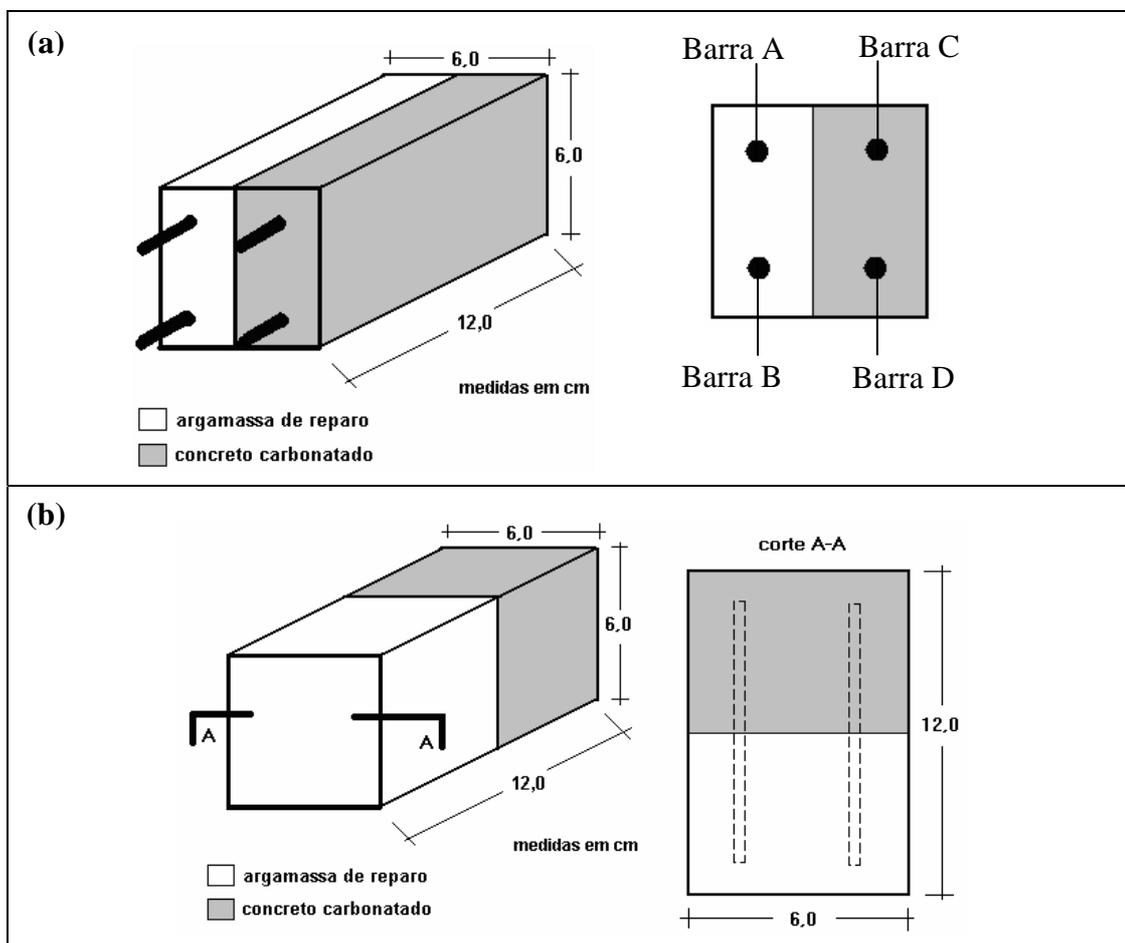


Figura 3.2 - Corpos-de-prova estudados nesta pesquisa: (a) CP misto tipo B e (b) CP misto tipo C (adaptado de Medeiros e Selmo (2000))

Nos corpos-de-prova mistos tipo B, duas barras ficam imersas na região com concreto carbonatado e outras duas na região com argamassa de reparo e, nos corpos-de-prova mistos tipo C, as quatro barras ficam totalmente embutidas no seu interior, com a metade de cada barra imersa na argamassa e a outra metade imersa no concreto carbonatado. Os corpos-de-prova tipo A (Figura 3.3) foram constituídos somente de argamassa e foram estudados nas pesquisas de Medeiros (2002), de Buonopane (2006) e de Silva; Selmo (2007), constando este último no Anexo B, por se tratar de um relatório de iniciação científica não publicado.

Os CPs foram curados por três dias em câmara úmida ($UR = 95 \% \pm 5 \%$ e $T = 23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), após a sua moldagem e, em seguida, foram colocados em câmara seca

(UR = 50 % \pm 5 % e T = 23 °C \pm 2 °C), onde permaneceram até a sua retirada para os ensaios. Os CPs tipo B permaneceram em câmara seca três anos em média (1.095 dias) e os tipo C por 1.650 dias. Um resumo cronológico dos ensaios é mostrado na Figura 3.5.

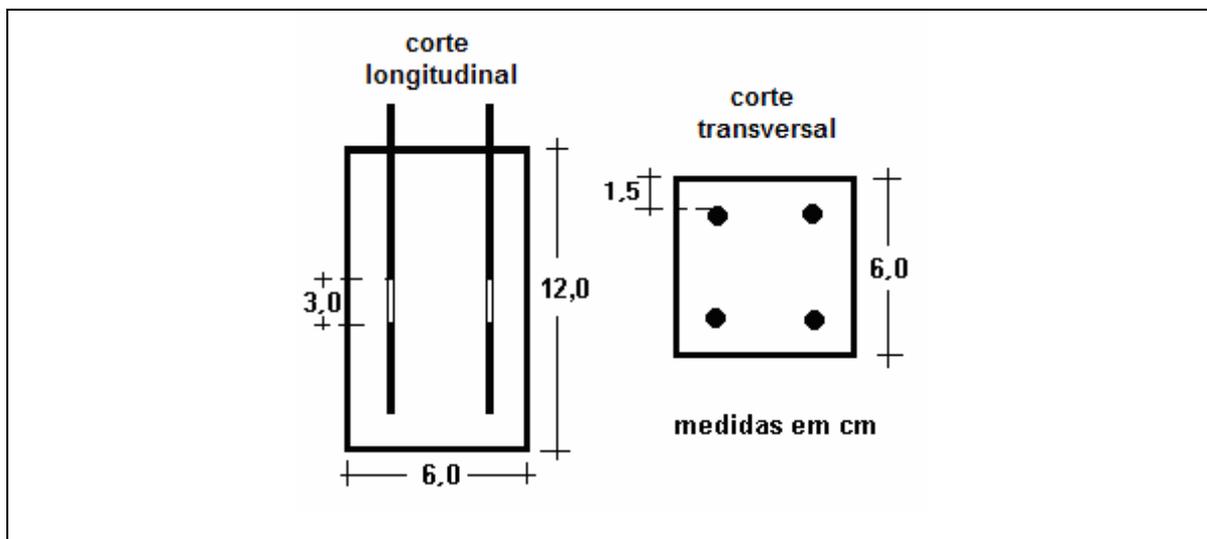


Figura 3.3 - Corpos-de-prova tipo A, estudados nas pesquisas de Medeiros (2002), Buonopane (2006) e Silva (2007). Figura adaptada de Medeiros e Selmo (2000).

Foram utilizados, também, corpos-de-prova moldados para medidas de resistência de aderência por cisalhamento direto (Figura 3.4), para medidas de profundidade de carbonatação natural das argamassas.

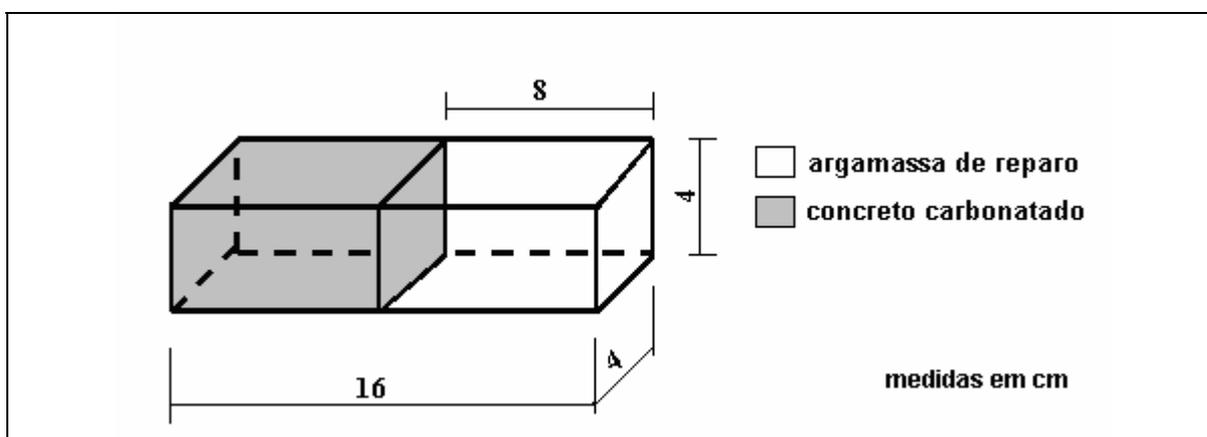


Figura 3.4 - corpos-de-prova de resistência de aderência por cisalhamento direto. Figura adaptada de Medeiros e Selmo (2000)

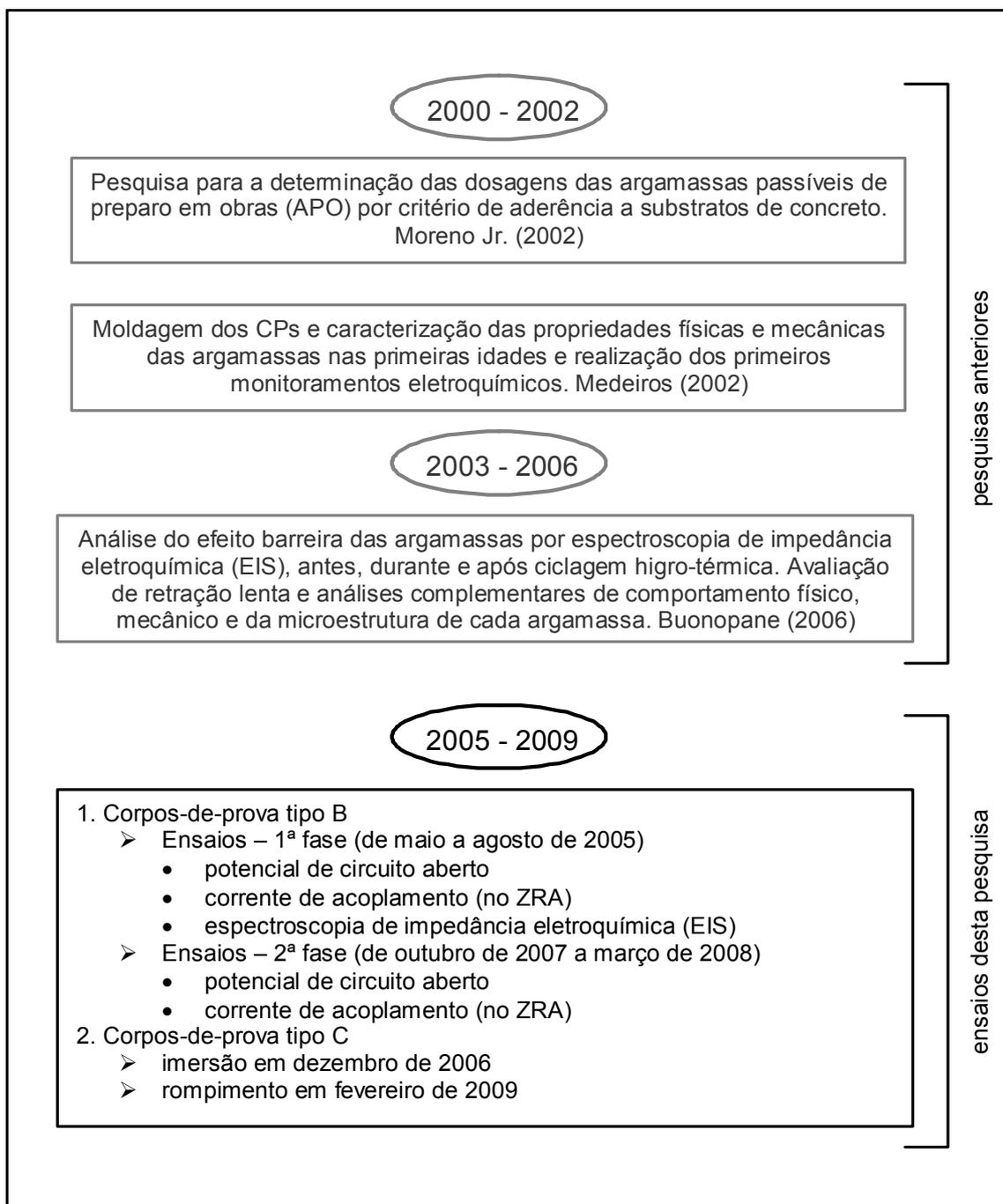


Figura 3.5 – Resumo cronológico dos ensaios relativos a esta pesquisa

3.5 ENSAIOS DE MONITORAÇÃO ELETROQUÍMICA

Os ensaios com os corpos-de-prova tipo B e tipo C foram diferentes. Os primeiros foram realizados em duas fases, as quais estão descritas nos itens 3.5.1 e 3.5.2. Os ensaios com os CPs tipo C estão descritos no item 3.5.3.

3.5.1 Ensaios com os CPs tipo B – 1ª fase: imersão por 14 dias para monitoração das macrocélulas

Os ensaios da 1ª fase se desenvolveram na seguinte ordem:

- **1º dia** – retirada da câmara seca em idade avançada (1095 dias), pesagem e monitoração por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) das quatro barras;
- **2º ao 7º dia** – os corpos-de-prova permaneceram no laboratório;
- **8º dia** – monitoração por EIS das quatro barras após 7 dias em laboratório;
- **9º dia** – imersão em cubas individuais com solução específica⁹ de cada tipo de CP, com procedimento de saturação segundo a NBR 9778 (ABNT, 1987) e como ilustra a Figura 3.6 (b);
- **9º ao 23º dia** – manutenção da imersão dos corpos-de-prova em solução específica por prazo de 14 dias, no laboratório;
- **23º ao 27º dia** – monitoração do potencial de corrosão de cada barra por 30 minutos (aos 14 dias de imersão), seguida da monitoração por 24 horas da corrente de acoplamento de duas das barras imersas no mesmo meio (concreto ou argamassa), e depois da monitoração das barras imersas em meios diferentes, ou seja, no concreto carbonatado e nas argamassas de reparo, através de um amperímetro de resistência nula (ZRA), segundo ilustra a Figura 3.6 (d) e a Figura 3.6 (e). Ao final da conexão dos quatro pares (27º dia) as barras permaneceram desconectadas;
- **28º dia** – polarização linear das quatro barras de cada corpo-de-prova;
- **28º ao 30º dia** – os CPs permaneceram desconectados no laboratório;

⁹ Soluções de água destilada e produtos de lixiviação de CPs iguais aos ensaiados. Resultaram da imersão de cada CP, constituído com o mesmo concreto e a mesma argamassa, em água destilada por sete dias.

- **30º dia** – monitoração do potencial de corrosão de cada barra por 30 minutos, monitoração por EIS, retirada da imersão e pesagem;
- **37º dia, 44º dia, 60º dia** – pesagem e EIS das quatro barras de cada corpo-de-prova.

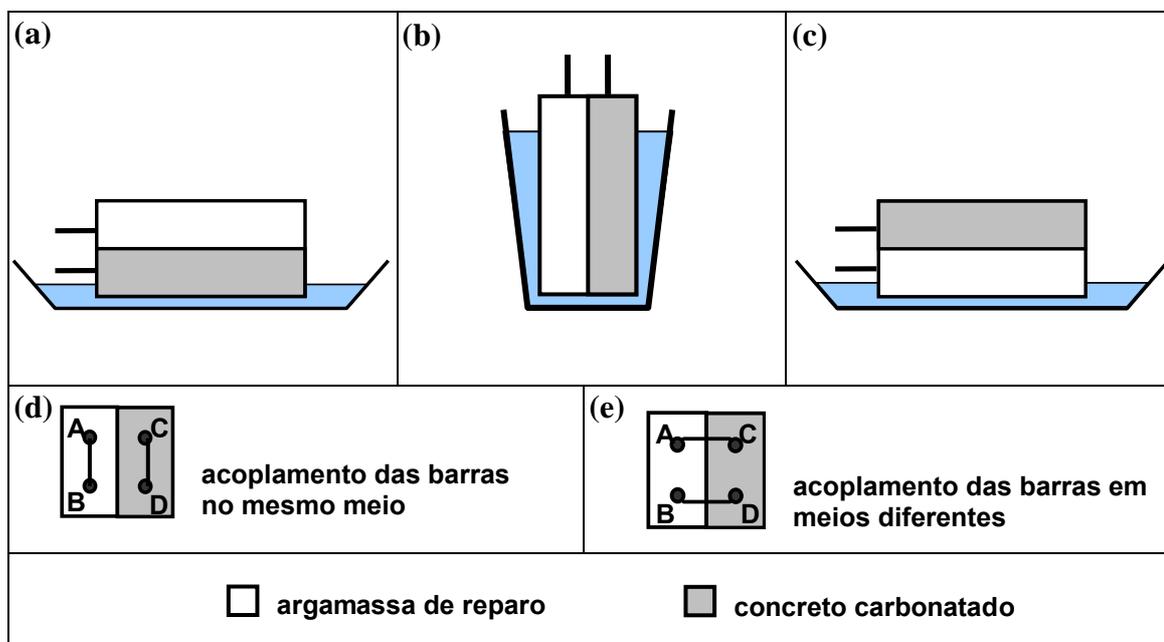


Figura 3.6 – Condições de imersão e acoplamento dos CPs tipo B durante os ensaios

3.5.2 Ensaio com os CPs tipo B – 2ª fase: imersão em condições simplificadas e diferenciadas de monitoração das macrocélulas

A segunda fase desta pesquisa foi realizada com o objetivo de repetir medidas de corrente de macrocélula em condições de saturação diferenciadas, para os pares de barras em argamassa e concreto, e fazendo-se uso de procedimentos mais rápidos e simplificados para as medidas do potencial de corrosão, antes da conexão de cada par.

A segunda fase iniciou-se 750 dias após o término da primeira. Nesse intervalo, os CPs permaneceram em ambiente de laboratório ($UR = 65 \% \pm 10 \%$ e $T = 22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$) e durante vinte e um dias foram testados de forma preliminar e semelhante à Etapa 1, em experimentos de Silva (2007).

Esta fase foi realizada em três etapas e em cada etapa foi realizada a monitoração do potencial de corrosão de cada barra e a monitoração da corrente de acoplamento dos pares de barras imersas em meios diferentes (argamassa e concreto

carbonatado – Figura 3.6). As monitorações foram iniciadas após 21 dias de imersão. Cada etapa refere-se às condições de ensaio a seguir:

- **Etapa 1** – CP imerso pelo lado do concreto em uma lâmina de solução específica de 5 mm, após a sua secagem em ambiente de laboratório (Figura 3.6 (a));
- **Etapa 2** – CP totalmente imerso em solução específica (Figura 3.6 (b));
- **Etapa 3** – CP imerso pelo lado da argamassa em uma lâmina de solução específica de 5 mm, após a sua secagem em uma estufa ventilada a 40°C (Figura 3.6 (c)).

3.5.3 Ensaio com os CPs tipo C

Os CPs tipo C, após a sua retirada da câmara seca em idade avançada de 1650 dias, foram imersos, pelo lado do concreto, em cubas individuais com uma lâmina de 2 cm de água de abastecimento do laboratório (figura 3.7). Esta situação é semelhante à de um reparo no pé de um pilar em solo úmido. No laboratório, entretanto, não foi possível garantir a espessura de lâmina de água durante o período integral deste experimento, e optou-se por não apresentar os resultados no escopo desta tese, pois os resultados precisam seguramente ser confirmados para os corpos-de-prova irmãos que ainda se dispõe.

A previsão é de que sejam abertos para a verificação da profundidade de carbonatação das argamassas, devendo as barras serem visualmente examinadas e submetidas a ensaios comparativos finais.

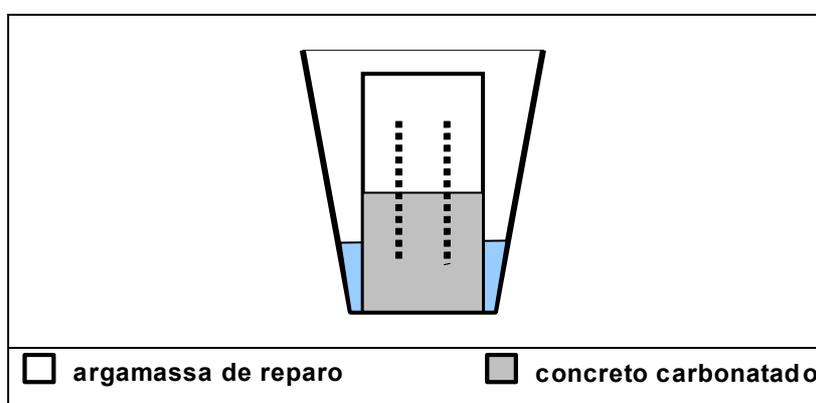


Figura 3.7 – Condição de imersão das células tipo C

3.5.4 Procedimentos dos ensaios e medidas realizadas

3.5.4.1 Medidas de potencial de corrosão

O potencial de corrosão das barras, na primeira fase dos experimentos, foi obtido por meio de monitoramento de cada barra por trinta minutos em um potenciostato, modelo 283 da Princeton Applied Research.

Na segunda fase dos experimentos (item 3.5.2), por iniciativa do autor e com vistas a testar a metodologia para medidas mais simplificadas de E_{corr} , o potencial de corrosão foi medido pelo uso de um multímetro de alta impedância (valor a informar), de marca Fluke, modelo 289, sendo as medidas obtidas em prazo médio de dez minutos e até a estabilização aparente da medida.

O eletrodo de referência usado foi um de platina, modelo B 35-XM120, da Radiometer Köpenhagen. Em medidas realizadas por este autor para soluções específicas de algumas argamassas (condutividade a informar), este eletrodo apresentou valor de potencial igual a + 245 mV *versus* ECS (eletrodo de calomelano saturado, marca Analion).

Este eletrodo foi inicialmente escolhido por não oferecer risco de contaminação às soluções e aos corpos-de-prova. Mais recentemente, constatou-se ainda ter a vantagem da platina apresentar reação de equilíbrio com oxigênio (ASHBY; JONES, 2007). Como desvantagem constatou-se que é recomendável aguardar no mínimo o prazo de 30 min para a estabilização de seu potencial toda a vez que for imerso a partir do estado seco e em profundidade em uma dada solução. Este período de 30 min foi certificado pela orientadora deste trabalho em experimentos realizados para todas as soluções específicas das argamassas e concreto pertinentes a esta tese (Anexo E) e para o eletrodo citado imerso a uma profundidade em torno de 8 cm. Em condições de imersão superficial os prazos para estabilização do eletrodo podem ser possivelmente menores e estes experimentos estão sendo confirmados.

Assim, assumiu-se que o prazo para estabilizar o potencial de corrosão em medidas com o eletrodo de platina usado nesta pesquisa não interfere nas interpretações e resultados desta tese, pois todas as medidas, tanto na primeira quanto na segunda fase, foram obtidas nos mesmos intervalos (trinta minutos na primeira e dez minutos na segunda fase). Além do mais, a variável de interesse na pesquisa é a diferença

de potencial de corrosão entre as barras, o que minimiza os efeitos das prováveis diferenças entre os potenciais obtidos e os potenciais finais seguramente estabilizados em prazo de 1 hora.

3.5.4.2 Monitoração da corrente de macrocélula

O equipamento utilizado na monitoração do potencial e corrente de macrocélula foi um AutoZRA da ACM Instruments.

A monitoração das correntes de acoplamento entre as barras, na primeira fase, foi feita por um período de 24 horas, para cada par de barras dos CPs, tendo em vista a recomendação de Baboian (1976) quanto a prazos prolongados para a obtenção de corrente de macrocélula em amperímetros de resistência nula, no caso de corrosão galvânica, que em parte tem muita analogia à corrosão aqui estudada.

Por iniciativa deste autor e tendo em vista as conclusões da 1ª. Fase, na segunda fase, o prazo de monitoração foi reduzido a doze horas para o par A-C e a apenas duas horas para o par B-D. A finalidade de alterar os prazos de monitoração visou inicialmente uma simplificação do método.

3.5.4.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica

O equipamento usado foi um potenciostato, modelo 283 da Princeton Applied Research, em conjunto com um Lock-in Analyzer modelo 5210 EC, operados pelo software Power Sine, do fabricante.

As medidas da EIS foram feitas pela aplicação de um sinal de ± 10 mV em relação ao valor do potencial de circuito aberto (E_{corr}). Iniciou-se em 100 kHz e varreu-se o espectro até 10 mHz, com o registro de um total de 30 (trinta) pontos e foi adotada a configuração de dois eletrodos, servindo como referência o contra-eletrodo de chapa de aço inoxidável (6 cm x 12 cm), fixado externamente ao CP, configuração esta já adotada em Medeiros (2002) e Buonopane (2006).

O uso de eletrodo de inox externo ao corpo-de-prova, como referência e contra-eletrodo, para medidas de impedância teve por objetivo eliminar efeitos de ruído em

alta frequência e ainda evitar a contaminação dos materiais em estudo por soluções de eletrodos clássicos de referência, como cloretos de potássio ou sulfato de cobre. Todavia, a configuração desta célula precisa ser confirmada como realmente adequada, pois recentemente a orientadora deste trabalho realizou medidas comparativas em corpos-de-prova desta pesquisa e houve suspeita que o uso do inox em condição exposta ao ar, possa deslocar o potencial do eletrodo de trabalho. Em vista disto, este autor confirmará ainda se houve ou não deslocamento de potencial para os experimentos de EIS, na Fase 1 (arquivos no Apêndice D). A outra questão a ser apontada para o uso do eletrodo de inox como eletrodo de referência é que constatou-se recentemente que o mesmo também requer um tempo de estabilização do potencial de circuito aberto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão expostos e discutidos os resultados obtidos nos ensaios com os corpos-de-prova tipo B na primeira e na segunda fase dos experimentos descritos no Capítulo 3.

4.1 ENSAIOS DA 1ª FASE: CORPOS-DE-PROVA MISTOS (TIPO B) EM IMERSÃO TOTAL E COM MONITORAÇÃO PROLONGADA

Nesta fase foram monitorados o potencial de corrosão das barras isoladas, de acoplamento e a corrente de corrosão por macrocélula dos pares de barras imersas no mesmo meio (concreto carbonatado ou argamassa de reparo) e em meios diferentes (concreto carbonatado e argamassa), na situação de imersão total dos corpos-de-prova, conforme descrito em 3.5.1, além da EIS de cada barra.

A discussão deste item resume e sintetiza as curvas de monitoração apresentadas e discutidas de forma detalhada nas três seguintes publicações, documentadas ao final da Fase 1 desta tese: RIBEIRO; SELMO (2006); RIBEIRO; SELMO (2008^a, ^b).

4.1.1 Medidas de potencial das barras isoladas e de acoplamento dos pares

Nas Figuras 4.1 e 4.2 estão registrados os valores dos potenciais de acoplamento entre as barras imersas em meios diferentes (concreto carbonatado e argamassa de reparo, identificadas por pares A-C e B-D), nos tempos de 6 e 24 horas de monitoração. Verifica-se que não há diferença significativa do potencial entre esses dois momentos. Desse modo, o potencial às 6 horas foi adotado como representativo do potencial de acoplamento entre as barras.

As Figuras 4.3 e 4.4 resumem os valores dos potenciais de corrosão das barras, registrados antes do acoplamento de cada par, e os valores dos potenciais de acoplamento dos pares de barras imersas em meios iguais (A-B e C-D, ver Figura 3.6), em argamassa e em concreto carbonatado, respectivamente, após catorze dias de imersão em solução específica. Observando os valores, é verificado que os potenciais das barras imersas no concreto carbonatado estão, em média, com

potenciais mais negativos que os potenciais das barras imersas nas argamassas, o que confirma o seu estado de despassivação. Também a comparação dos potenciais de barras imersas em concreto de referência na Figura 4.2 (b) ilustra essa condição de despassivação.

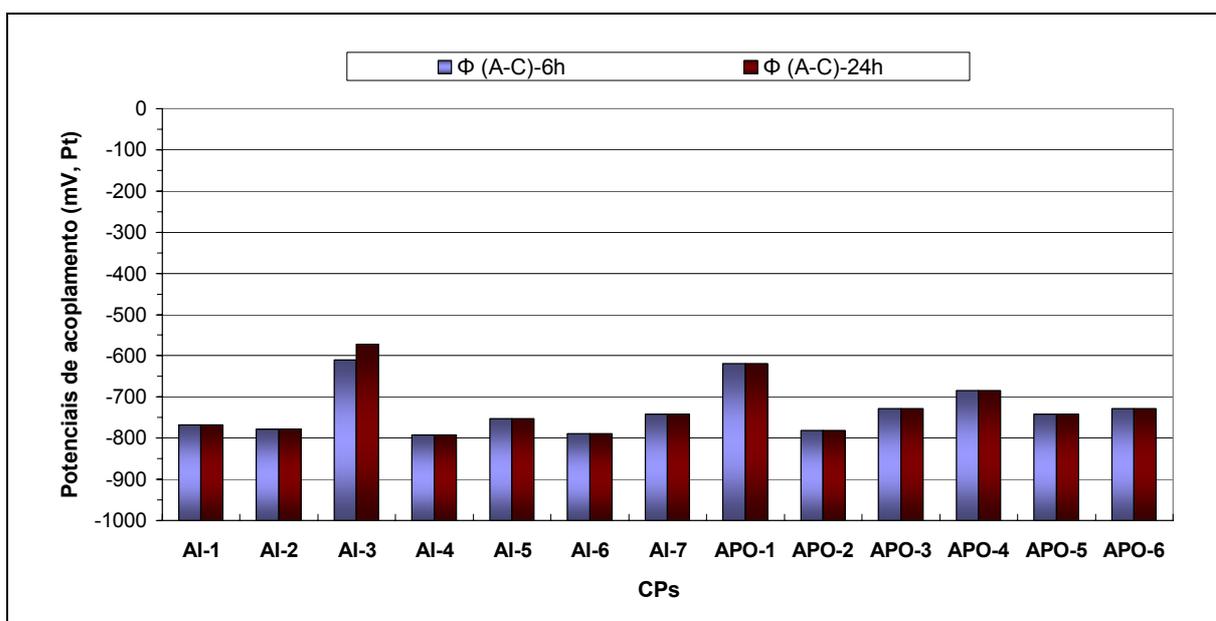


Figura 4.1 – Comparação dos potenciais de acoplamento dos pares de barras A-C imersas em concretos carbonatados e argamassas, nos prazos de monitoração de 6 h e 24 h

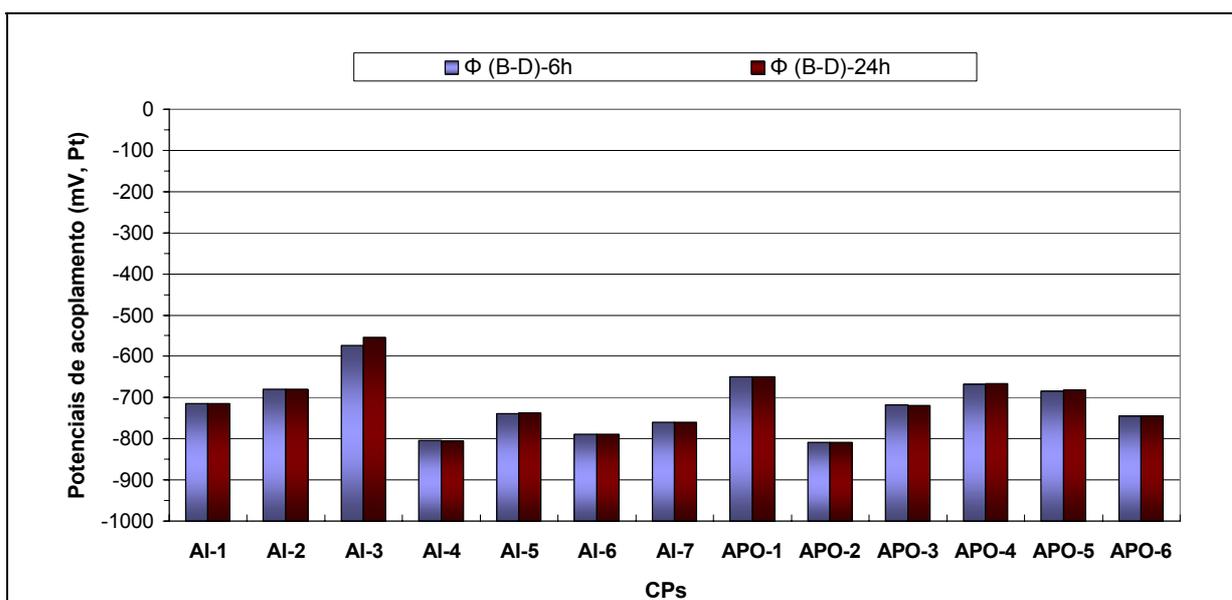


Figura 4.2 – Comparação dos potenciais de acoplamento dos pares de barras B-D imersas em concretos carbonatados e argamassas, nos prazos de monitoração de 6 h e 24 h

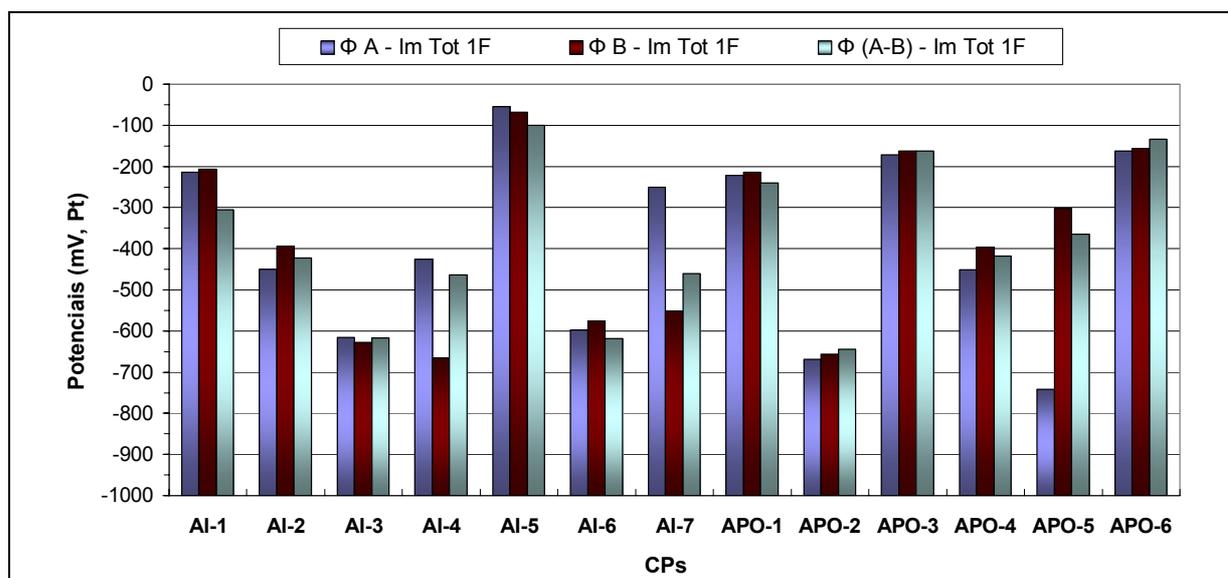


Figura 4.3 – Potenciais de circuito aberto iniciais das barras isoladas, ao final de 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares A-B imersos em argamassa às 6 h de conexão

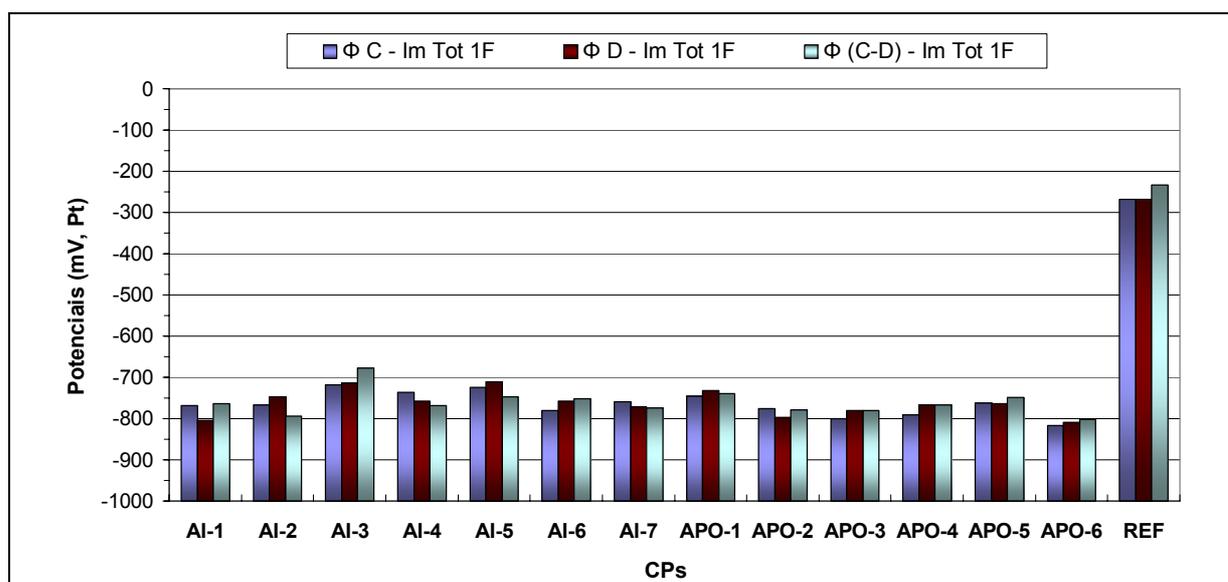
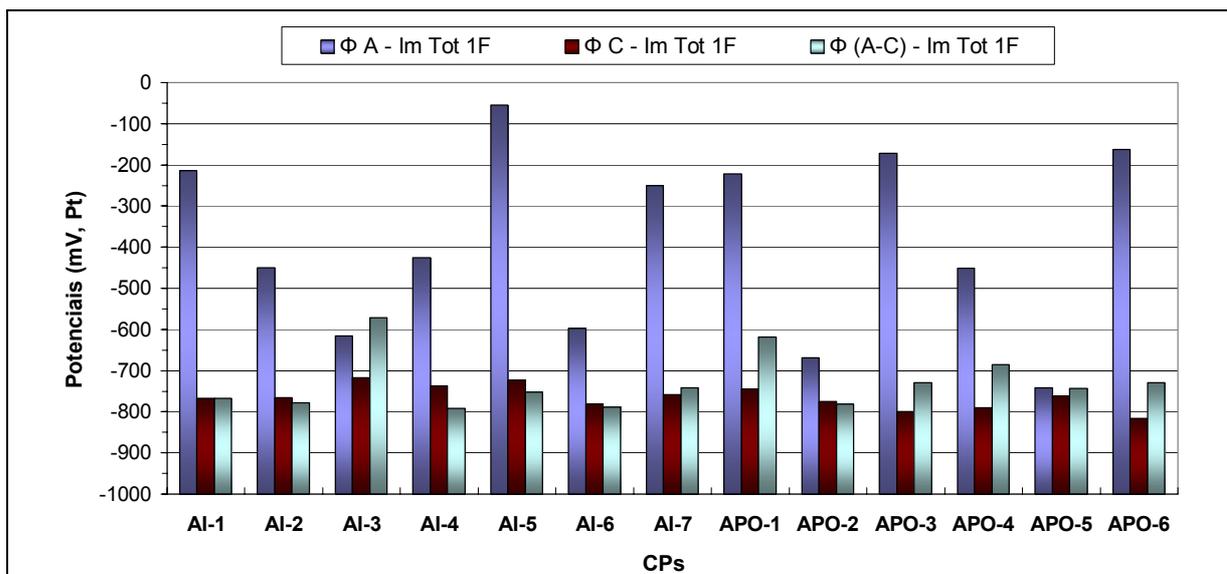


Figura 4.4 – Potenciais de circuito aberto iniciais das barras isoladas, ao final de 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares C-D imersos em concreto carbonatado às 6 h de conexão (REF = concreto não-carbonatado)

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram os valores dos potenciais de corrosão das barras, obtidos imediatamente antes do acoplamento de cada par e dos potenciais de acoplamento dos pares de barras imersas em meios diferentes, (A-C e B-D), em argamassa e concreto carbonatado. Observa-se que, em geral, os potenciais de acoplamento se estabilizaram próximo aos potenciais das barras despassivadas, imersas em concreto carbonatado, em concordância com o previsto na fundamentação teórica da formação da

macrocélula, no item 2.3.2.2. A estabilização de alguns potenciais de acoplamento se deu fora do intervalo entre os potenciais das barras na argamassa e no concreto carbonatado, provavelmente, pelas seguintes razões: a) prazo transcorrido entre as medidas das barras isoladas e as medidas dos pares acoplados; b) conexão prévia das barras nos meios homogêneos; c) devido ao tempo requerido para a estabilização do eletrodo de platina usado como referência (ver item 3.4.4.1).



Figuras 4.5 – Potenciais de circuito aberto das barras imersas em argamassa e concreto carbonatado, com 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares A-C às 6 h de conexão

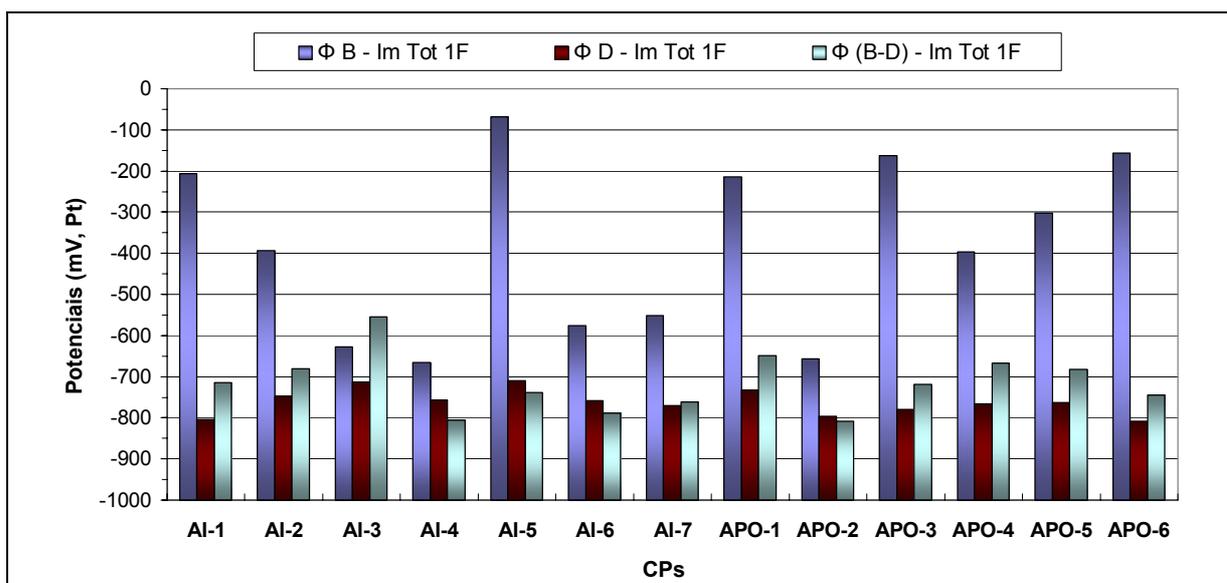


Figura 4.6 – Potenciais de circuito aberto inicial das barras imersas em argamassa e concreto carbonatado, com 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares B-D às 6 h de conexão

4.1.2 Monitoração da corrente de macrocélula

A Figura 4.7 reúne as medidas das correntes de macrocélula entre as barras imersas em meios diferentes (concreto carbonatado e argamassa de reparo), nos tempos de 6 horas e 24 horas de monitoração. Nota-se que, com exceção do par A-C da célula APO-5, não há diferença significativa da corrente entre esses dois momentos. Assim, a corrente às 6 horas foi usada nos gráficos seguintes, por ser representativa do acoplamento entre as barras.

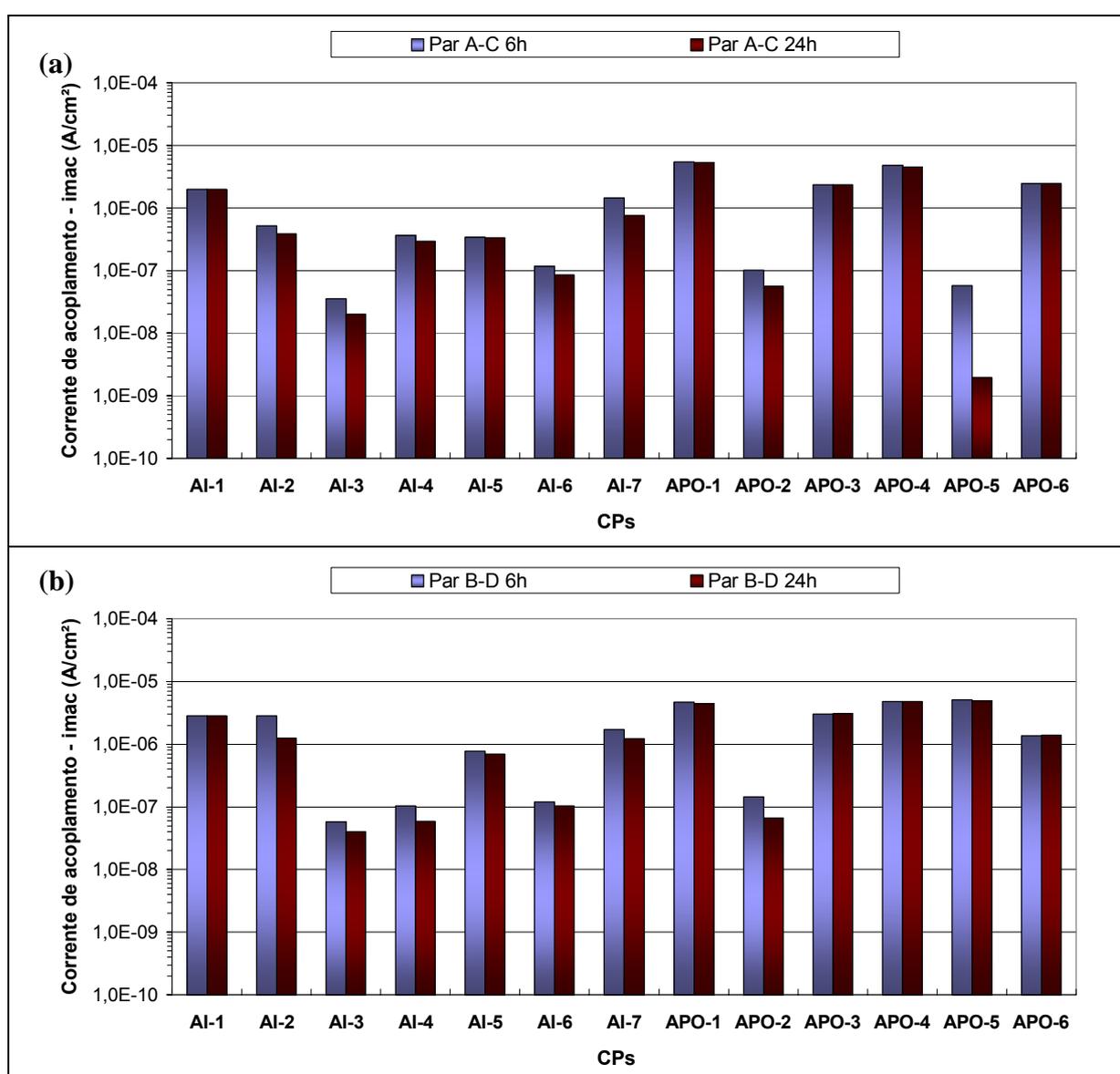


Figura 4.7 – Comparação das correntes de macrocélula nos pares de barras A-C (a) e B-D (b), imersas em concretos carbonatados e argamassas não-carbonatadas, nos prazos de monitoração de 6 h e 24 h.

A Figura 4.8 apresenta os valores das correntes de acoplamento dos pares de barras A-B e C-D, imersas nos mesmos meios, argamassa ou concreto carbonatado, respectivamente. Verifica-se que as densidades de corrente se encontram dentro ou abaixo da faixa (0,1 a 0,2) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, exceto nos pares AI-2, AI-7 APO-4 e APO-5. Essa baixa corrente de macrocélula era esperada por estarem as barras imersas em meios semelhantes e, em consequência, apresentarem uma pequena diferença de potencial.

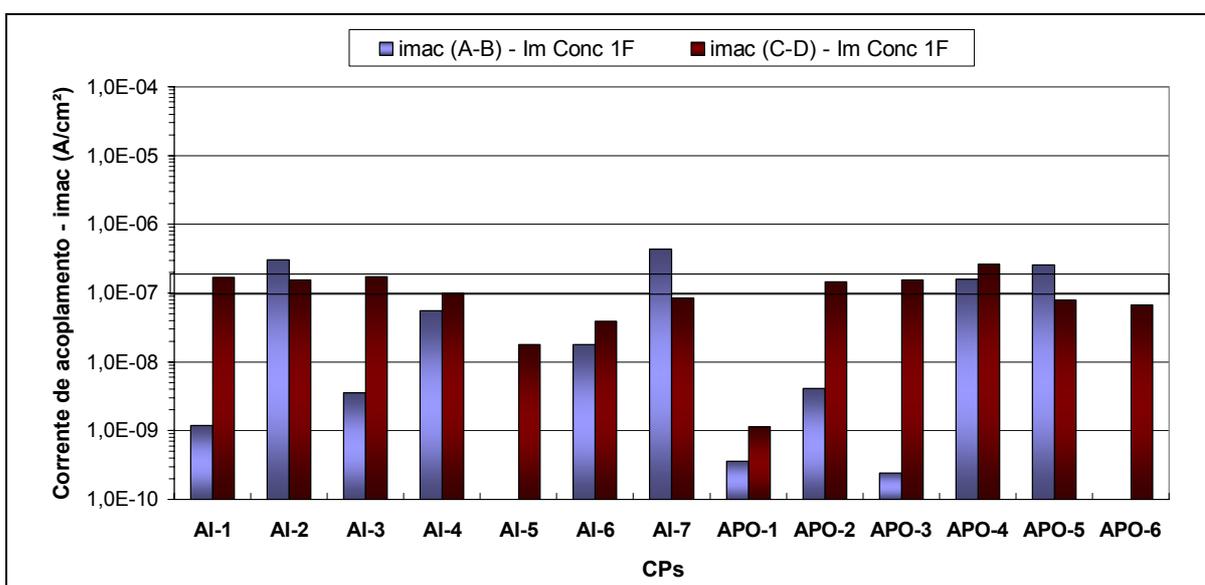


Figura 4.8 – Densidades de corrente de acoplamento dos pares de barras A-B e C-D, imersos no mesmo meio, na 6ª. hora de conexão

A figura 4.9 mostra os valores das correntes de acoplamento dos pares de barras A-C e B-D imersas em meios diferentes. Em geral, as correntes de corrosão por macrocélula situaram-se acima da faixa de (0,1 a 0,2) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, exceto AI-3, AI-6, APO-2 e o par A-C da APO-5, estas últimas com polímero EVA e que corresponderam às menores diferenças de potencial de corrosão, medidos antes do acoplamento.

Os valores das correntes de acoplamento dos pares de barras A-B e C-D, imersas nos mesmos meios foram, em média, inferiores aos dos pares de barras A-C e B-D imersas em meios diferentes, ao nível de significância de 5 %, como mostram os resultados das análises de variância na Tabela 4.1. Por outro lado, as correntes dos pares imersos em meios homogêneos (A-B e C-D) foram consideradas iguais, assim como as correntes dos pares imersos em meios heterogêneos (A-C e B-D) (ver APÊNDICE C).

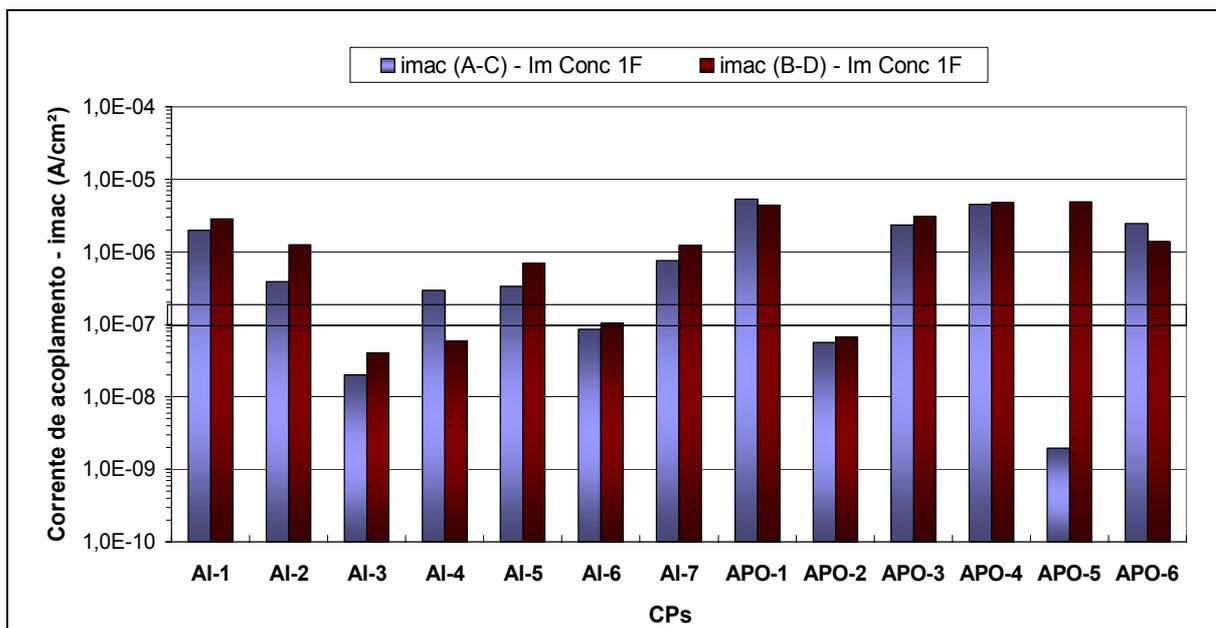


Figura 4.9 – Densidades de corrente de acoplamento dos pares de barras A-C e B-D, imersos em meios diferentes, na 6ª. hora de conexão

Tabela 4.1 – Comparação das correntes de acoplamento entre todas as barras imersas em meios homogêneos (A-B e C-D) e as imersas em meios heterogêneos (A-C e B-D)

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Conexão A-B/C-D	26	0,002683	0,000103	1,2937E-08
Conexão A-C/B-D	26	0,043483	0,001672	3,3073E-06

ANOVA ($\alpha = 5\%$)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,2013E-05	1	3,2E-05	19,2830966	5,85E-05	4,03432
Dentro dos grupos	8,3007E-05	50	1,66E-06			
Total	0,00011502	51				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são diferentes.

4.1.3 Relação entre a diferença de potencial das barras e a corrente de macrocélula

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram a relação entre a diferença de potencial das barras A e C e das barras B e D, imersas em meios diferentes, argamassa e concreto carbonatado, respectivamente. Nota-se que há uma clara tendência de aumento da corrente de acoplamento com o aumento da diferença de potencial.

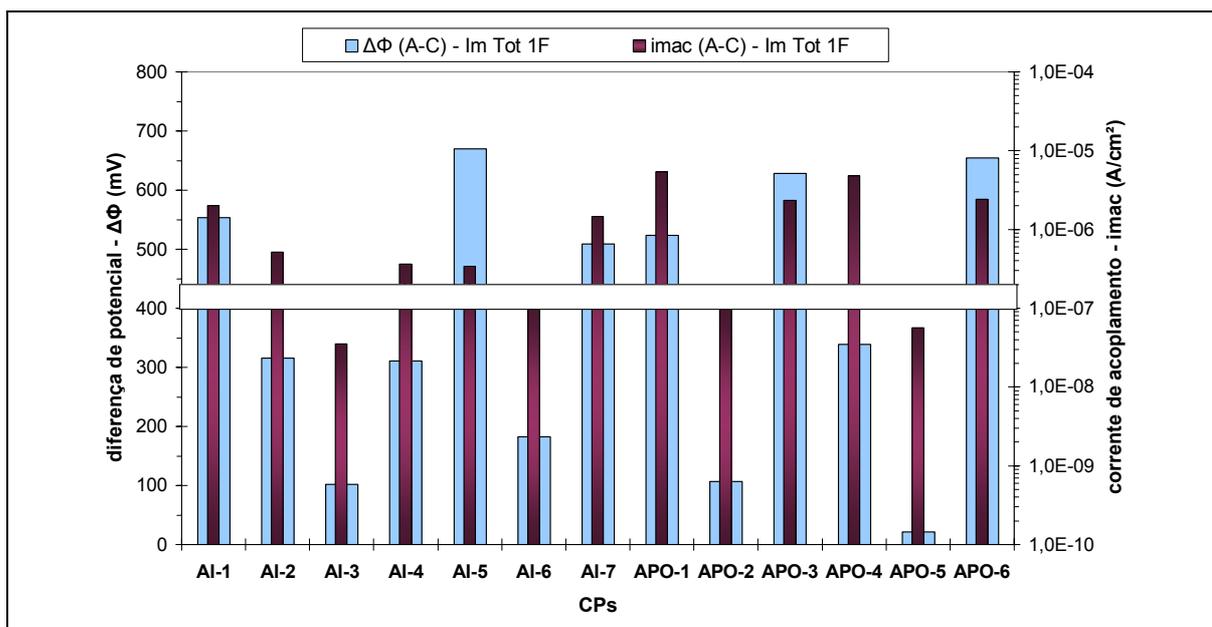


Figura 4.10 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento das barras A e C na 1ª fase dos ensaios

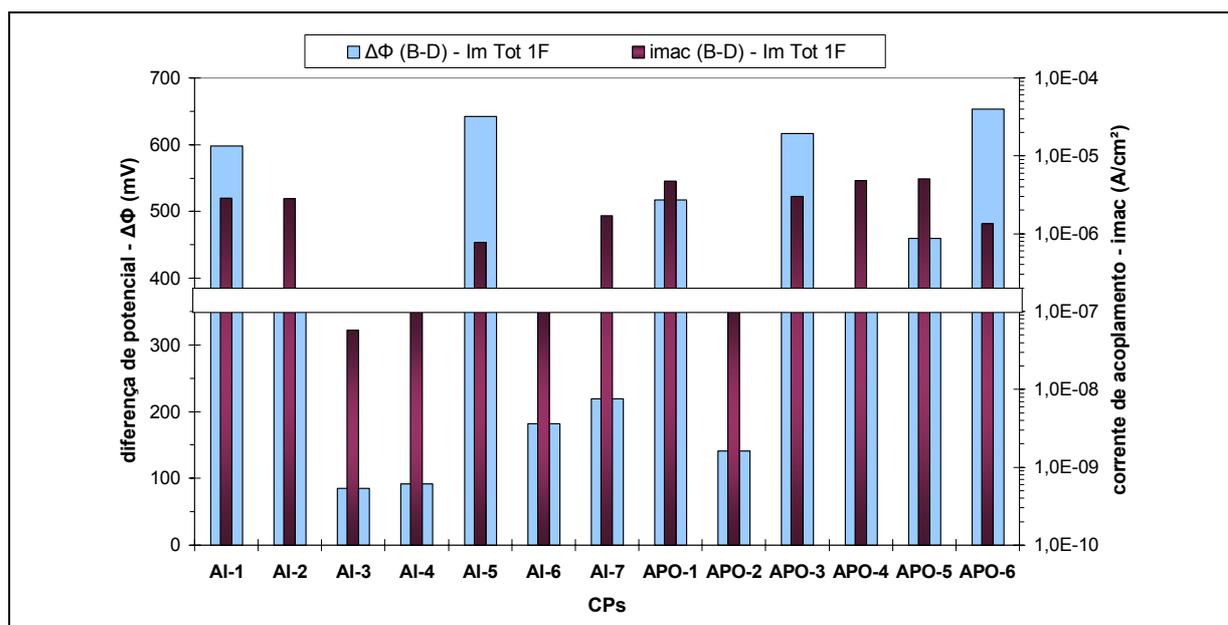


Figura 4.11 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento das barras B e D na 1ª fase dos ensaios

4.1.4 Monitoração por impedância eletroquímica

A monitoração por espectroscopia de impedância eletroquímica foi conduzida três dias após o a monitoração da corrente e potencial de acoplamento das barras e conforme documentado em 3.5.1.

O objetivo do emprego desta técnica foi confirmar a condição de passivação das barras imersas nas argamassas de reparo e a condição menos passiva das barras imersas em concreto carbonatado.

Os resultados da monitoração por impedância eletroquímica constam ilustrados em conjunto nas Figuras de 4.12 a 4.14. Os diagramas de Nyquist de 13 barras imersas em concreto carbonatado, foram muito semelhantes e apenas a barra no concreto de referência, não-carbonatado, apresentou diferença mais acentuada no espectrograma. Observa-se que a resistência da camada de concreto não-carbonatado, na alta frequência, assumiu valor nitidamente inferior (em torno de 800 Ohms) em relação às outras 13 medidas registradas no mesmo intervalo de frequência, para as barras no concreto carbonatado, de 2.200 Ohms em média (Figura 4.8). Isto indica o efeito da carbonatação no aumento da resistividade do concreto.

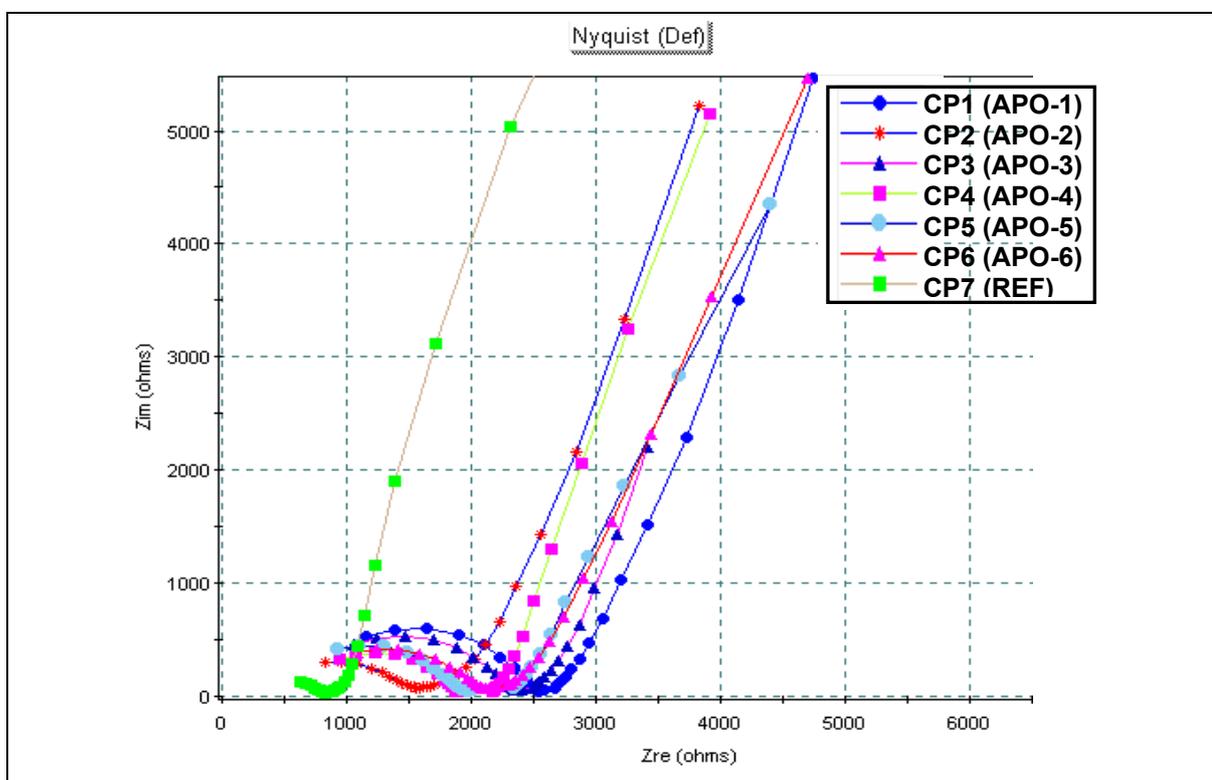


Figura 4.12 – Diagrama de Nyquist das barra C, imersas em concreto carbonatado nas células das argamassas passíveis de produção em obra (APO)

Os diagramas das argamassas industrializadas, ilustrados na Figura 4.9, mostram que as resistências dos cobrimentos das argamassas AI-2, AI-3, AI-4, AI-6 e AI-7 situaram-se entre 500 Ohms e 1.000 Ohms. Destacaram-se a argamassa AI-1 e AI-5 com resistências de 5.000 Ohms e 48.000 Ohms, respectivamente.

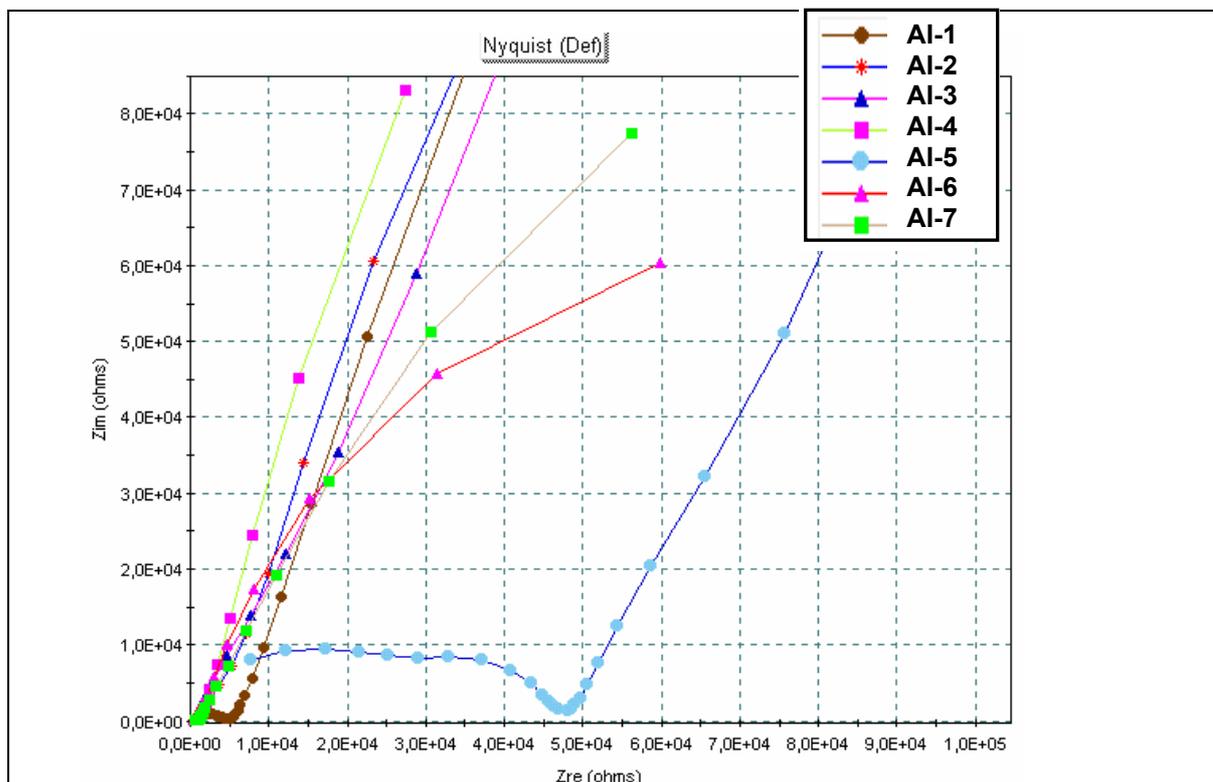


Figura 4.13 – Diagrama de Nyquist para a barra A, imersa em argamassa industrializada (AI)

Entre as argamassas produzidas em laboratório (APO) (Figura 4.10), houve menor dispersão nos valores das suas resistências: as menores ficaram em torno de 600 Ohms e a maior, com valor de 7.000 Ohms. No caso destas argamassas, notou-se uma clara influência do tipo de polímero usado na sua produção. As argamassas sem polímero, APO-1 e APO-4, apresentaram resistência em torno de 2.500 Ohms. As argamassas com o polímero EVA, APO-2 e APO-5, tiveram suas resistências reduzidas em relação às argamassas sem polímero e apresentaram resistências com valores próximos a 700 Ohms. As argamassas com acrilato, APO-4 e APO-6, tiveram a resistências elevadas para 4.500 Ohms e 7.000 Ohms, respectivamente.

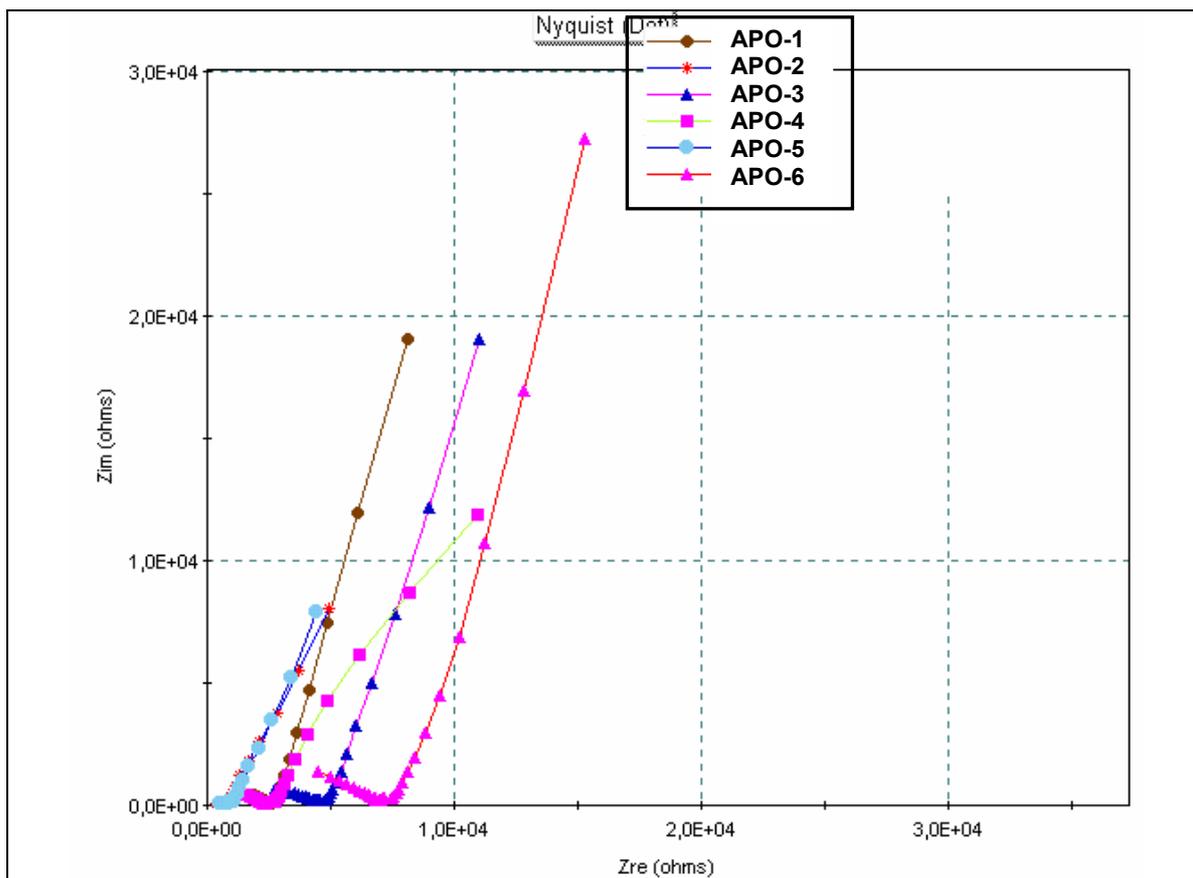


Figura 4.14 – Diagrama de Nyquist para a barra A, imersa em argamassa passível de produção em obra (APO)

4.2 ENSAIOS DA 2ª FASE: CORPOS-DE-PROVA MISTOS (TIPO B) MONITORADOS POR MEDIDAS SIMPLIFICADAS E EM TRÊS CONDIÇÕES DE IMERSÃO

Nesta fase foram monitorados o potencial de circuito aberto e a corrente de corrosão por macrocélula dos pares de barras imersas em meios diferentes, em diversas situações de imersão, correspondentes às etapas 1, 2 e 3, conforme descrito em 3.4.2.

4.2.1 Resultados da etapa 1: imersão capilar do concreto carbonatado

Nesta etapa os CPs foram imersos por 21 dias pelo lado do concreto em uma lâmina de solução específica de 5 mm, após a sua secagem em ambiente de laboratório (ver Figura 3.6 (a)).

4.2.1.1 Medidas de potencial de corrosão

A Figura 4.15 mostra os potenciais de corrosão da barra A, imersa em argamassa, da barra C, em concreto carbonatado, antes do acoplamento e o potencial de acoplamento Φ (A-C). Nesta situação de imersão, o concreto carbonatado está com alto grau de saturação e, desse modo, os potenciais das barras estão bem negativos, como visto no item 2.4.1. A maioria dos potenciais de acoplamento estabilizou-se num potencial abaixo dos potenciais das barras C, fora do intervalo entre os potenciais medidos, porque nesta fase os potenciais foram medidos por meio de um multímetro, por um período médio de dez minutos, tempo muito curto para a estabilização do eletrodo de platina utilizado como referência, conforme visto no item 3.4.4.1.

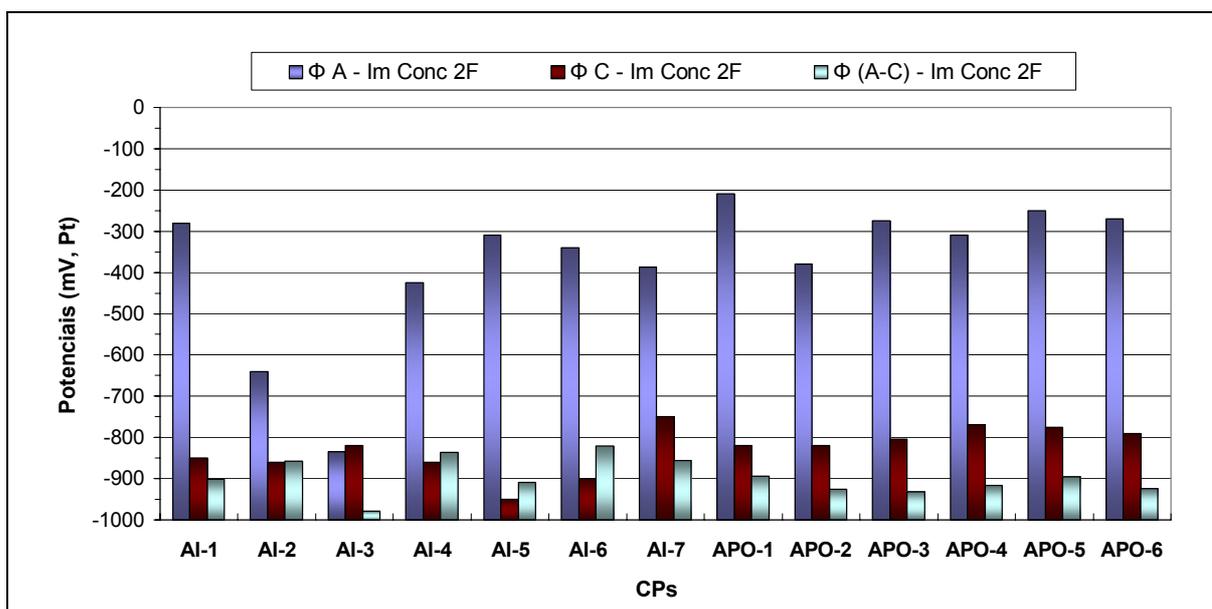


Figura 4.15 – potenciais de corrosão da barra A, imersa em argamassa, da barra C, em concreto carbonatado, antes do acoplamento e o potencial de acoplamento Φ (A-C) na etapa 1 (2ª fase): imersão pelo lado do concreto

4.2.1.2 Relação entre a diferença de potencial e a corrente de macrocélula

Nesta etapa ocorreram, em média, as maiores taxas de corrosão por macrocélula, como mostra a Figura 4.16. A provável explicação para esse fato é

que, estando os CPs imersos pelo lado do concreto, este fica mais úmido e os potenciais de suas barras ficaram mais negativos, enquanto que na argamassa, com menos umidade, os potenciais das barras ficaram ainda mais positivos. Assim, nesta etapa foram registradas as maiores diferenças de potencial das duas fases.

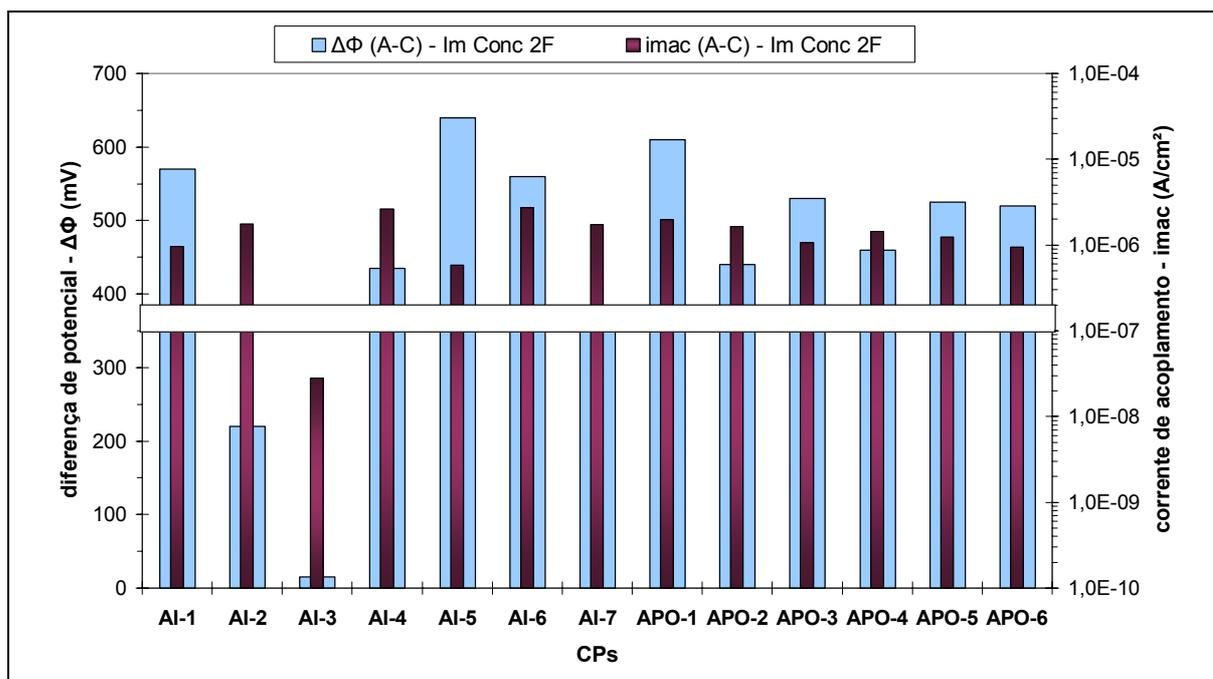


Figura 4.16 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento na etapa 1 (2ª fase): imersão pelo lado do concreto

4.2.2 Resultados da etapa 2: imersão total em seqüência à etapa 1

Nesta etapa os CPs foram imersos totalmente em uma cuba com solução específica, por 21 dias, em seguida à imersão pelo lado do concreto na etapa 1 (ver Figura 3.6 (b)).

4.2.2.1 Medidas de potencial de corrosão

A Figura 4.17 mostra os potenciais das barras nas argamassas, no concreto carbonatado e o potencial de acoplamento entre as barras, Φ (A-C). Nesta etapa, os potenciais das barras nas argamassas estão, em média, mais negativos que na etapa anterior, devido ao maior grau de umidade destas.

Neste caso, como no anterior, os potenciais de acoplamento estabilizaram-se fora do intervalo entre os potenciais das argamassas e dos concretos carbonatados, conforme visto no item 4.2.1.1.

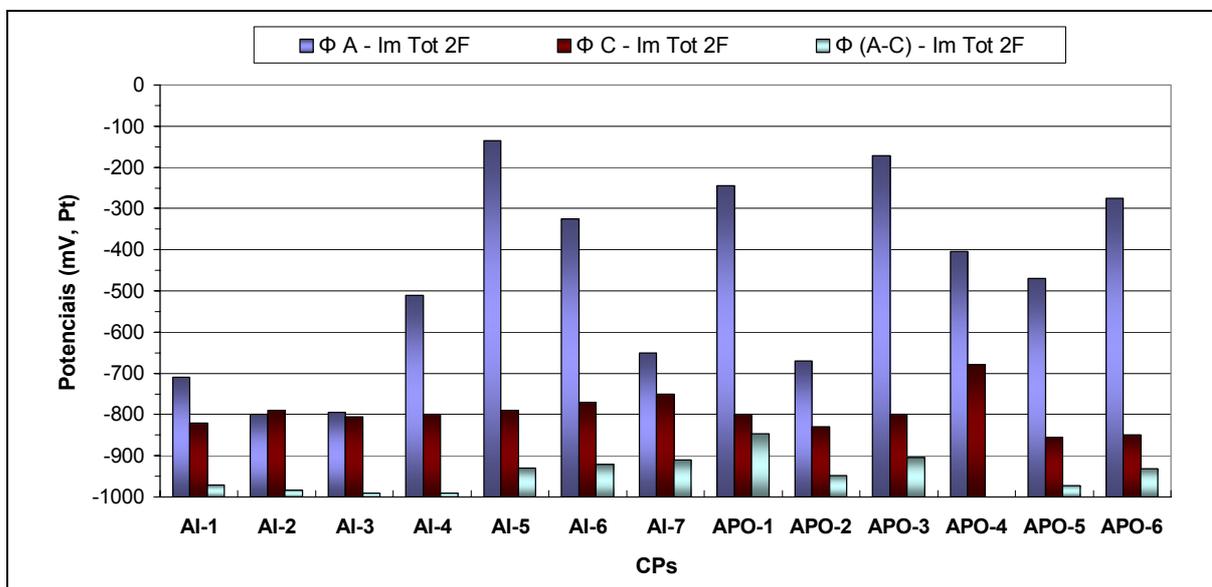


Figura 4.17 – potenciais de corrosão da barra A, imersa em argamassa, da barra C, em concreto carbonatado, antes do acoplamento e o potencial de acoplamento $\Phi (A-C)$ na etapa 2 (2ª fase): imersão total

4.2.2.2 Relação entre a diferença de potencial e a corrente de macrocélula

Observa-se na Figura 4.18 que, nesta etapa, as diferenças de potencial foram, em média, menores que na etapa 1, devido aos menores níveis de potencial das barras imersas nas argamassas, por seu maior grau de umidade, como foi observado no item 2.4.1. Observa-se, ainda, que as maiores correntes de acoplamento correspondem às maiores diferenças de potencial.

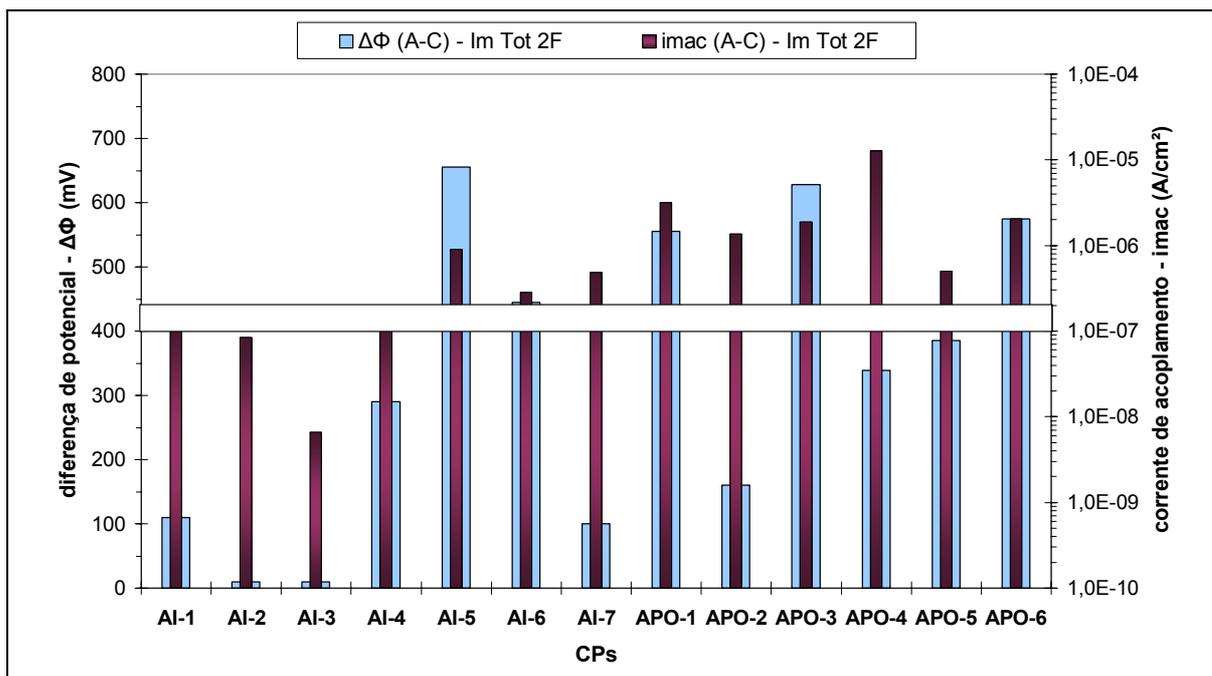


Figura 4.18 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento na etapa 2 (2ª fase): imersão total

4.2.3 Resultados da etapa 3: imersão capilar da argamassa de reparo

Nesta etapa os CPs foram inicialmente secos em uma estufa ventilada a 40°C. Em seguida foram imersos, por 21 dias pelo lado da argamassa, em uma lâmina de solução específica de 5 mm, conforme está representado na Figura 3.6(c).

4.2.3.1 Medidas de potencial de corrosão

A Figura 4.19 mostra os potenciais de corrosão das barras A e C – em argamassa e concreto carbonatado, respectivamente – e o potencial de acoplamento das duas barras, Φ (A-C). Esta condição de imersão manteve o concreto mais seco, não permitindo um elevado grau de saturação do concreto carbonatado, na parte superior do CP, devido às baixas alturas de ascensão capilar da maioria das argamassas (Figuras 4.20 e 4.21). Os potenciais das barras imersas em concreto nas etapas anteriores, nas quais estavam com um alto grau de saturação, ficaram em torno de -800 mV_{Pt}. Nesta etapa ficaram menos negativos cerca de 400 mV, em média. O efeito da pouca umidade no concreto carbonatado elevou os potenciais da maioria das barras despassivadas a patamares superiores aos das barras nas

argamassas, que, em princípio, estavam passivadas. Aqui, mais uma vez, a maioria dos potenciais de acoplamento estabilizou-se num potencial mais baixo do que os potenciais das barras mais negativas, fora do intervalo entre os potenciais medidos, devido à redução para 10 min quanto ao prazo de estabilização do eletrodo de platina utilizado como referência, conforme visto no item 3.4.4.1.

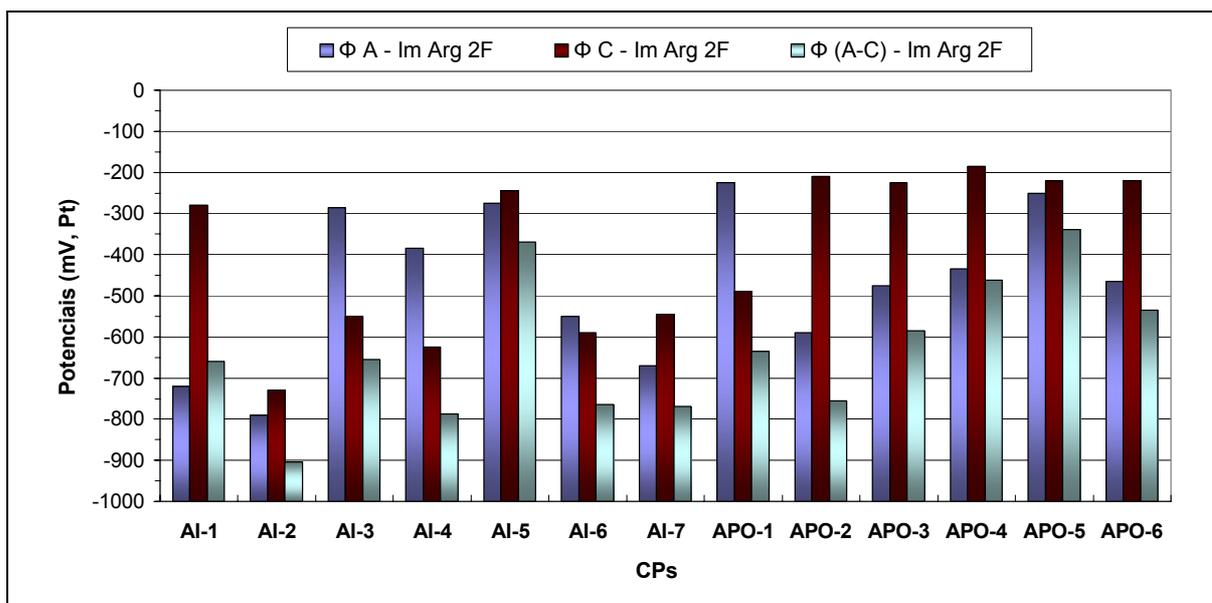


Figura 4.19 – Potenciais de corrosão da barra A, imersa em argamassa, da barra C, em concreto carbonatado, antes do acoplamento e o potencial de acoplamento Φ (A-C) na etapa 3 (2ª fase): imersão pelo lado da argamassa

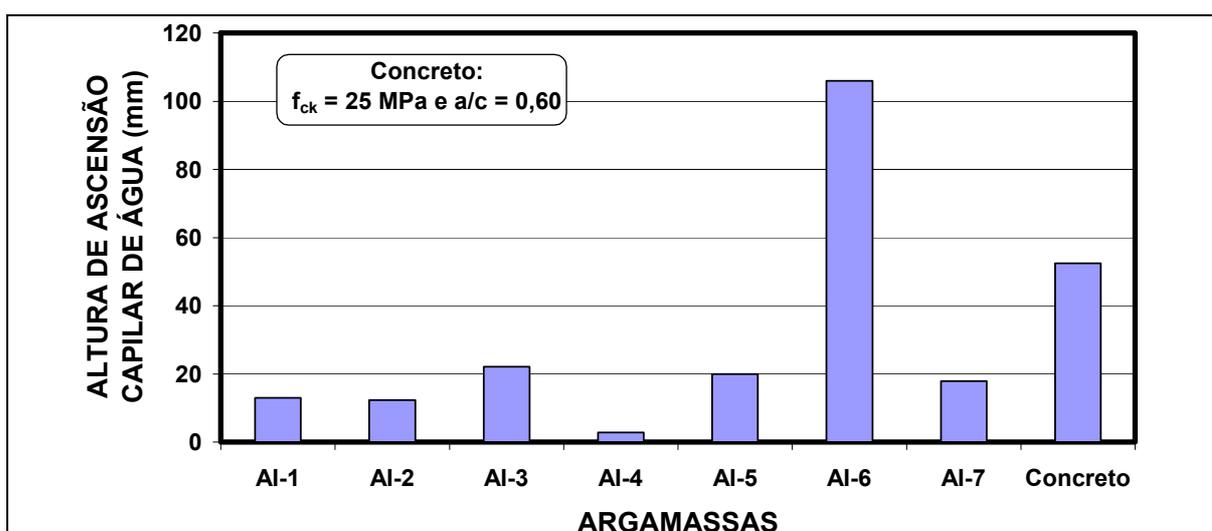


Figura 4.20 – Resultados médios de altura de ascensão capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, após 72 horas de contato com lâmina de 5 mm de água (MEDEIROS, 2002)

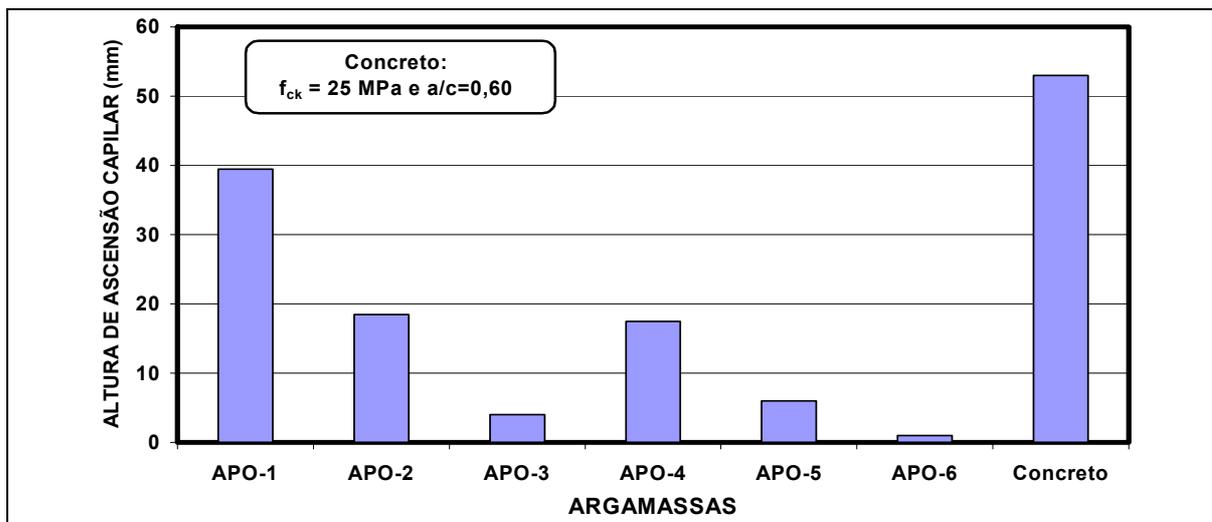


Figura 4.21 – Resultados médios de altura de ascensão capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, após 72 horas de contato com lâmina de 5 mm de água (MEDEIROS, 2002)

4.2.3.2 Relação entre a diferença de potencial e a corrente de macrocélula

A Figura 4.22 apresenta a relação entre as diferenças de potencial e as correntes de acoplamento das barras A e C. Esta condição de imersão provocou uma inversão nos níveis de potenciais das barras em concreto e em argamassa e uma consequente inversão no fluxo das correntes de macrocélula da maioria dos acoplamentos.

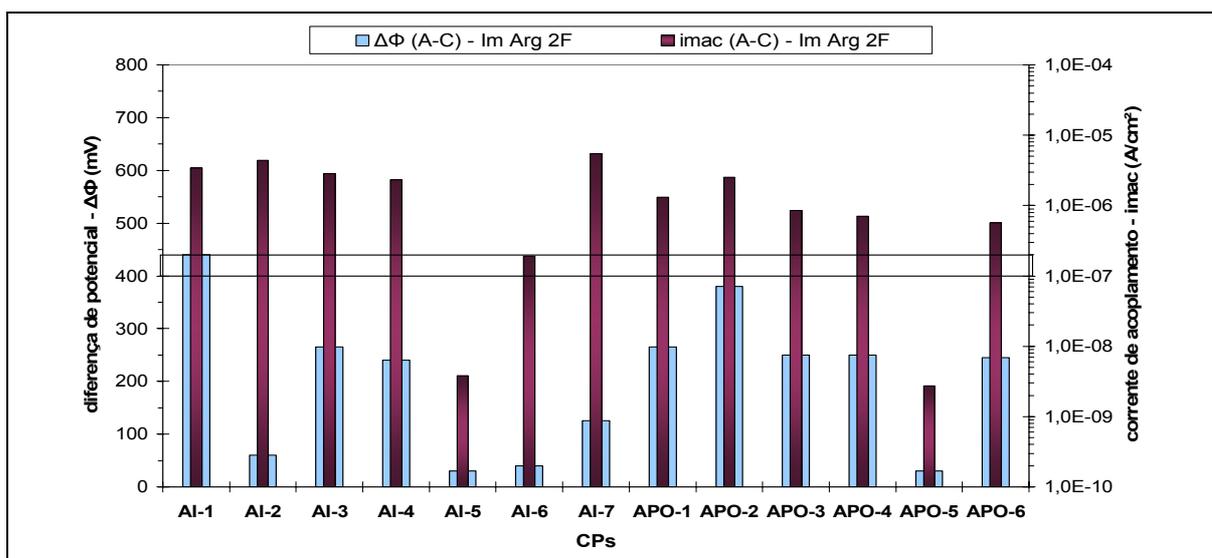


Figura 4.22 – Relação entre a diferença de potencial e a corrente de acoplamento na etapa 1 (2ª fase): imersão pelo lado da argamassa

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA E DA SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS DOS CORPOS-DE-PROVA MISTOS TIPO B

Neste item os resultados da primeira e da segunda fase estão comparados e analisados em conjunto, com o objetivo de exemplificar que mesmo havendo a simplificação das medidas de potencial antes do acoplamento das barras foi possível interpretar a sua relação com os níveis de corrente de macrocélula.

4.3.1 Comparação dos potenciais

A Figura 4.23 mostra a evolução dos potenciais de corrosão das barras A imersas nas argamassas. Observa-se que algumas barras nas argamassas, na etapa 2 da segunda fase (imersão total), apresentaram valores de potencial mais negativos, em mais de 300mV, que na primeira fase, para a mesma condição de imersão (argamassas AI-1, AI-2 e AI-7). Uma possível explicação seria que a frente de carbonatação dessas argamassas estivesse começando a atingir as barras, pois esta etapa foi executada cerca de 840 dias após a primeira fase (cerca de 1.935 dias após a sua moldagem) e os CPs permaneceram em ambiente de laboratório (UR = 65% \pm 10% e T = 22°C \pm 3°C). Entretanto, as medidas de profundidade de carbonatação em corpos-de-prova moldados com as mesmas argamassas e na mesma época¹⁰, sugerem que, nesse prazo, a frente de carbonatação não deve ter atingido as barras, como se vê na Figura 4.24. Exceção feita à argamassa AI-1 que aos 2.370 dias de carbonatação natural, em ambiente de laboratório, a frente de carbonatação chegou a 20 mm.

As outras hipóteses a serem consideradas para os valores mais baixos de potencial das barras imersas nas argamassas de reparo, na Fase 2, podem ter relação com:

- simplificação das medidas, que foram feitas em prazo de apenas 10 min;

¹⁰ Estes CPs foram utilizados nos ensaios de resistência de aderência por cisalhamento direto na pesquisa de Medeiros (2000). Permaneceram em ambiente de laboratório desde então e, nesse período, não sofreram saturação e secagem como os CPs tipo B utilizados nos ensaios.

- eventual deslocamento real do potencial de corrosão, pelo acoplamento prolongado dos pares de macrocélula logo seguido de secagem ao final da Fase 1.

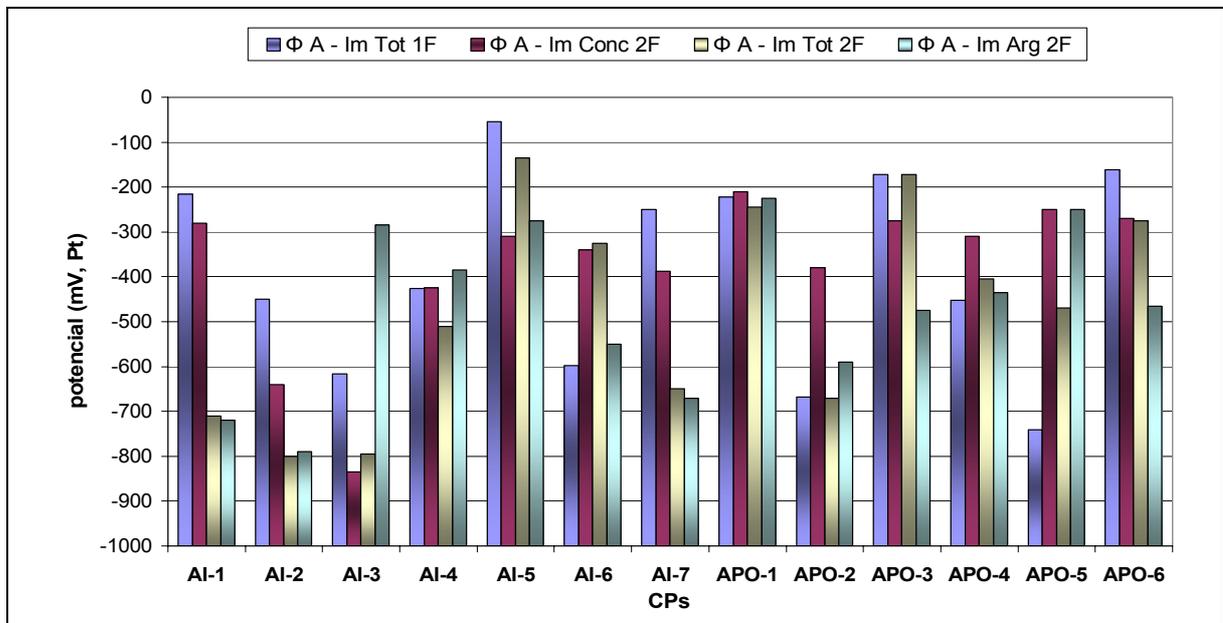


Figura 4.23 – Medidas de potencial de circuito aberto das barras A (imersas em argamassa), antes do início do acoplamento das barras, para monitoração da corrente de macrocélula

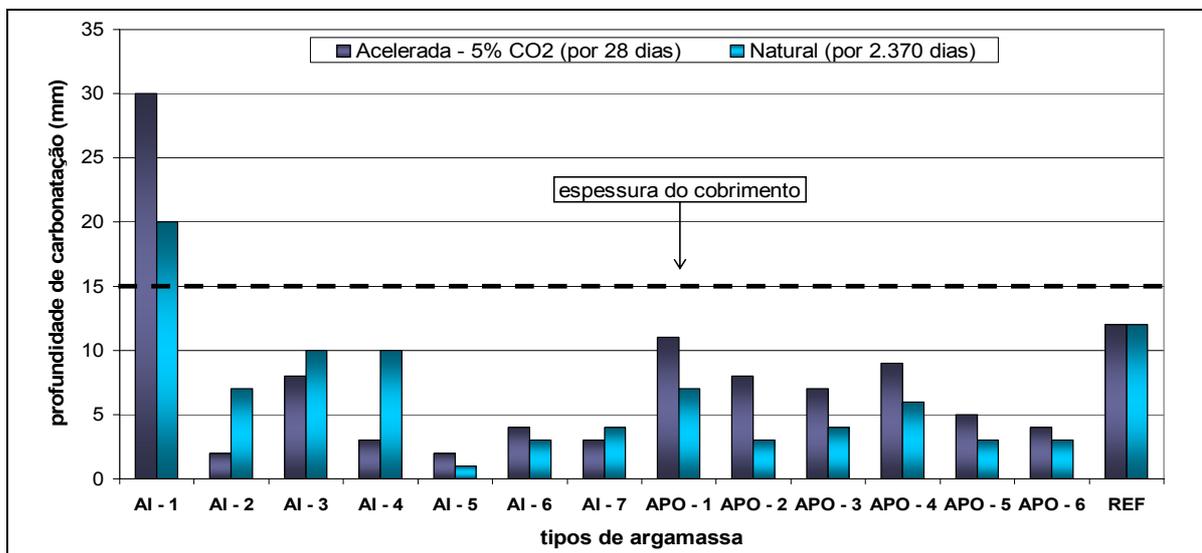


Figura 4.24 – Medidas da profundidade de carbonatação: carbonatação acelerada, por 28 dias a 5% de CO₂ e carbonatação natural, por 2.370 dias em ambiente de laboratório. REF é o concreto de referência dosado conforme item 3.3.2

4.3.2 Comparação das diferenças de potencial

A Figura 4.25 mostra a comparação das diferenças de potencial dos pares de barras A-C nos quatro acoplamentos das duas fases, verifica-se que dos treze corpos-de-prova a diferença de potencial da etapa 1 da 2ª. fase está maior em sete. Este fato pode justificar a ocorrência das maiores taxas de corrosão por macrocélula, em média, naquela fase, como foi mostrado no item 4.2.1.2.

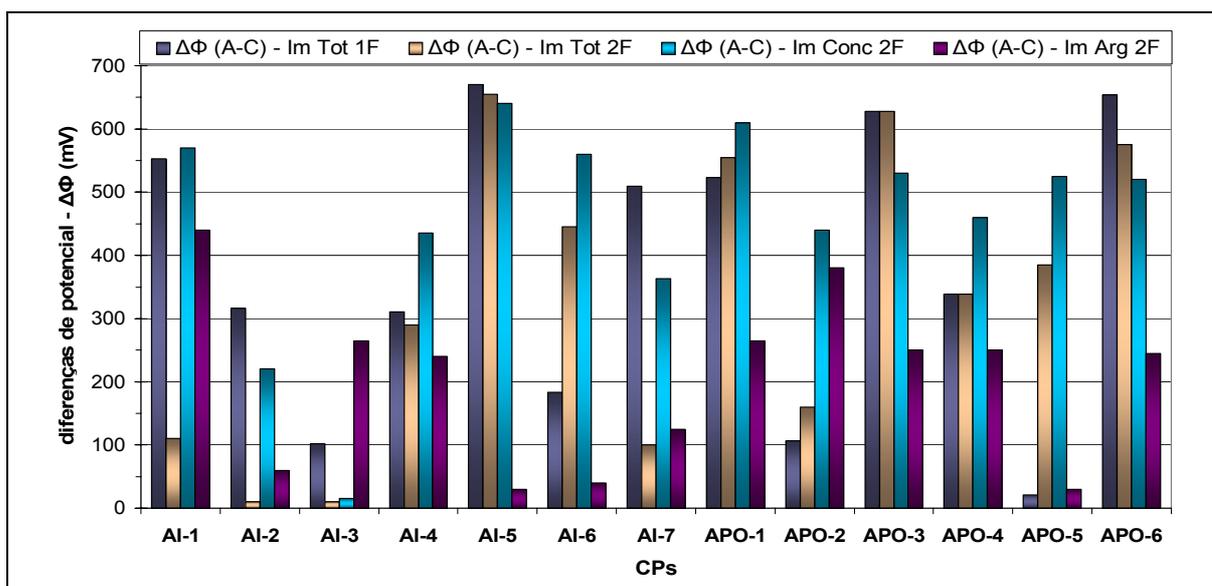


Figura 4.25 – Comparação das diferenças de potencial dos pares de barras A-C nos quatro acoplamentos das duas fases dos ensaios

A Figura 4.26 ilustra a evolução dos potenciais de corrosão das barras imersas no concreto carbonatado. Nota-se que os potenciais dessas barras na etapa 3 da 2ª fase (imersão pelo lado da argamassa) estão menos negativos que os potenciais correspondentes das etapas anteriores e muitas com potencial mais alto que as barras nas argamassas.

Os potenciais mais altos ocorreram naquelas barras cujos CPs eram constituídos com as argamassas com menor ascensão capilar (ver Figuras 4.20 e 4.21) É provável que essas argamassas tenham dificultado a umidificação do concreto, na parte superior dos CPs.

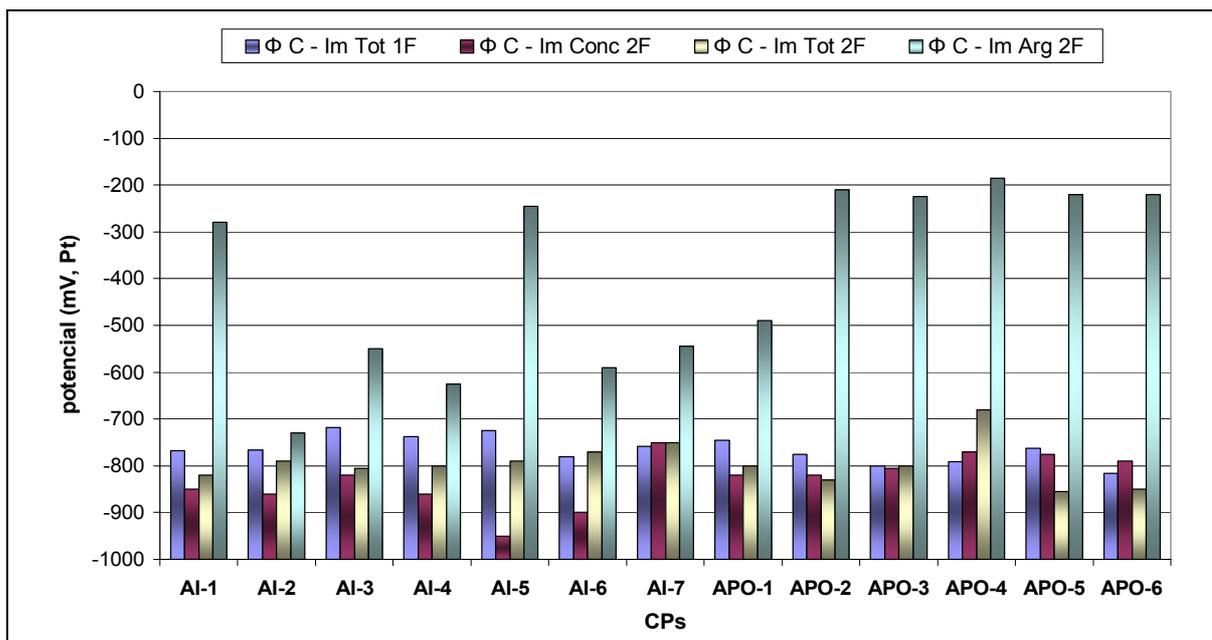


Figura 4.26 – Medidas de potencial de circuito aberto das barras C (imersas em concreto carbonatado), antes do início do acoplamento das barras, para monitoração da corrente de macrocélula

4.3.3 Comparação do sinal das correntes de acoplamento

A Figura 4.27 apresenta todas as correntes de acoplamento entre as barras imersas em meios diferentes nas duas fases dos ensaios, nas diversas condições de imersão: imersão total - 1ª fase; imersão pelo lado do concreto - 2ª fase, etapa 1; imersão total - 2ª fase, etapa 2; e imersão pelo lado da argamassa - 2ª fase, etapa 3, respectivamente. Verifica-se que dos 26 acoplamentos, durante a imersão pelo lado da argamassa (2ª fase), quinze apresentaram correntes negativas¹¹. Nesses casos, a diferença de potencial entre a barra considerada passivada na argamassa e a barra despассивada no concreto carbonatado ficou negativa, isto é, o potencial da barra no concreto carbonatado estava menos negativo que o potencial da barra na argamassa e a corrente de corrosão por macrocélula também se inverteu¹², com os elétrons fluindo da barra na argamassa para a barra no concreto carbonatado.

¹¹ Aqui foram incluídos também os acoplamentos dos pares B-D, monitorados por apenas duas horas, para ilustração do número de ocorrências de inversão das correntes de acoplamento.

¹² Nos ensaios, tomou-se como referência o potencial da barra imersa na argamassa (considerada passivada) e a corrente de macrocélula positiva, aquela em que os elétrons fluem da barra despассивada para a barra passivada.

Segundo Alonso e colaboradores (1998), as regiões anódicas podem assumir comportamento catódico em concretos com pouca umidade. A oxidação da magnetita ($3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\gamma^- \rightleftharpoons \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$), existente nas áreas anódicas, é observada quando a barra apresenta potenciais mais nobres que $-100 \text{ mV}_{\text{ECS}}$. Ao assumir potenciais de corrosão mais negativos que $-100 \text{ mV}_{\text{ECS}}$, essa reação desaparece. Desse modo, regiões ativas podem se tornar catódicas, com liberação de elétrons pela redução de Fe^{3+} em Fe^{2+} , quando o concreto está com baixa umidade e tem fácil acesso de oxigênio para a armadura. Essa reação catódica eleva o potencial de corrosão do aço.

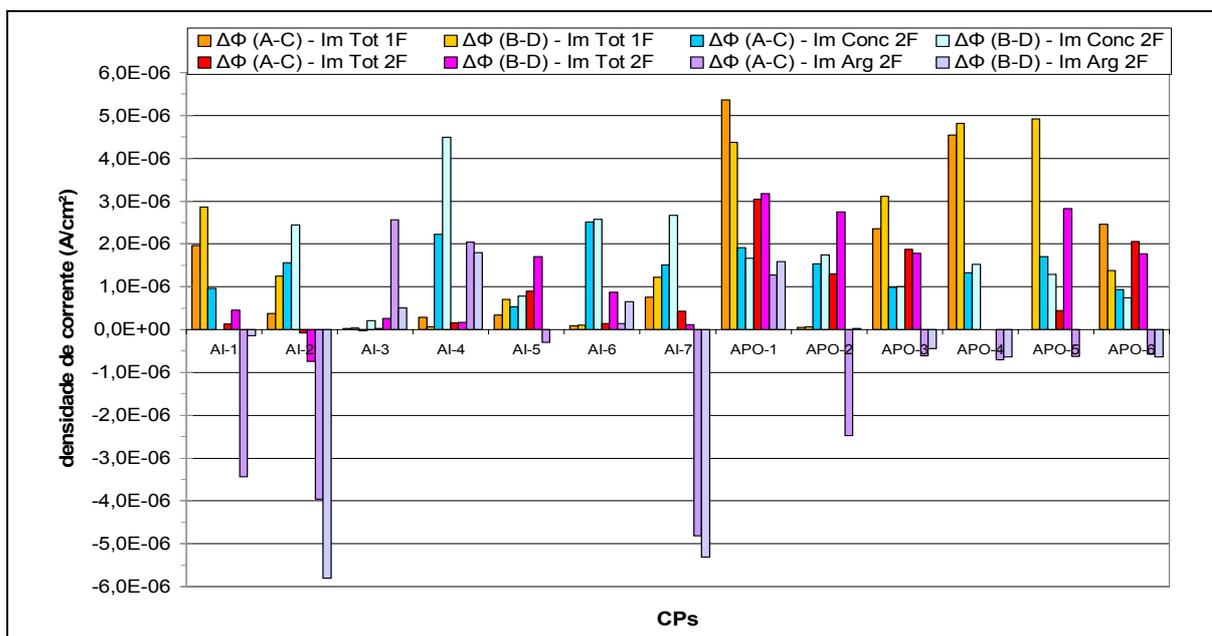


Figura 4.27 – Correntes de acoplamento entre as barras imersas em meios diferentes nas duas fases dos ensaios, nas diversas condições de imersão: imersão total - 1ª fase; imersão pelo lado do concreto - 2ª fase, etapa 1; imersão total - 2ª fase, etapa 2; e imersão pelo lado da argamassa - 2ª fase, etapa 3, respectivamente. Correntes da Fase 1 e os pares A-C da Fase 2 são relativas a 6 h, enquanto a do pares B-D da Fase 2 são relativas a 2 horas de acoplamento.

4.3.4 Relação das diferenças de potencial às correntes de acoplamento

Neste item foram considerados os resultados de potenciais e correntes dos acoplamentos dos pares de barras imersos em meios diferentes (argamassa de

A corrente de acoplamento do par A-C do CP AI-2 na etapa 2 da 2ª. fase, também foi negativa, porque o potencial da barra A, na argamassa, estava um pouco mais negativa que a barra C, no concreto carbonatado, conforme já comentado no item 4.3.1.

reparo e concreto carbonatado) na sexta hora de monitoração, conforme o item 3.4.4.2. Da primeira fase dos ensaios foram adotados os resultados dos acoplamentos dos pares A-C e B-D. Considerou-se da segunda fase, apenas os resultados dos acoplamentos dos pares A-C, pois os pares B-D foram monitorados por apenas duas horas.

A Figura 4.28 reúne os dados de diferença de potencial, $\Delta\Phi$, e de densidade de corrente de macrocélula, i_{mac} , dos 65 pares imersos em meios diferentes, A-C e B-D, da primeira fase e A-C, da segunda fase, na sexta hora de monitoração¹³. Nota-se, claramente, uma tendência de aumento da densidade da corrente, com o aumento da diferença de potencial entre as barras nos $\Delta\Phi$ abaixo de 400 mV. Para as diferenças de potencial acima de 400 mV, há uma tendência de limite na densidade de corrente próximo a $5,0E-6$ A/cm². Esse limite está de acordo com o que afirma West (1970) para quem a densidade de corrente de redução máxima do oxigênio em solução aquosa estagnada a 25°C fica em torno de $4,0E-6$ A/cm².

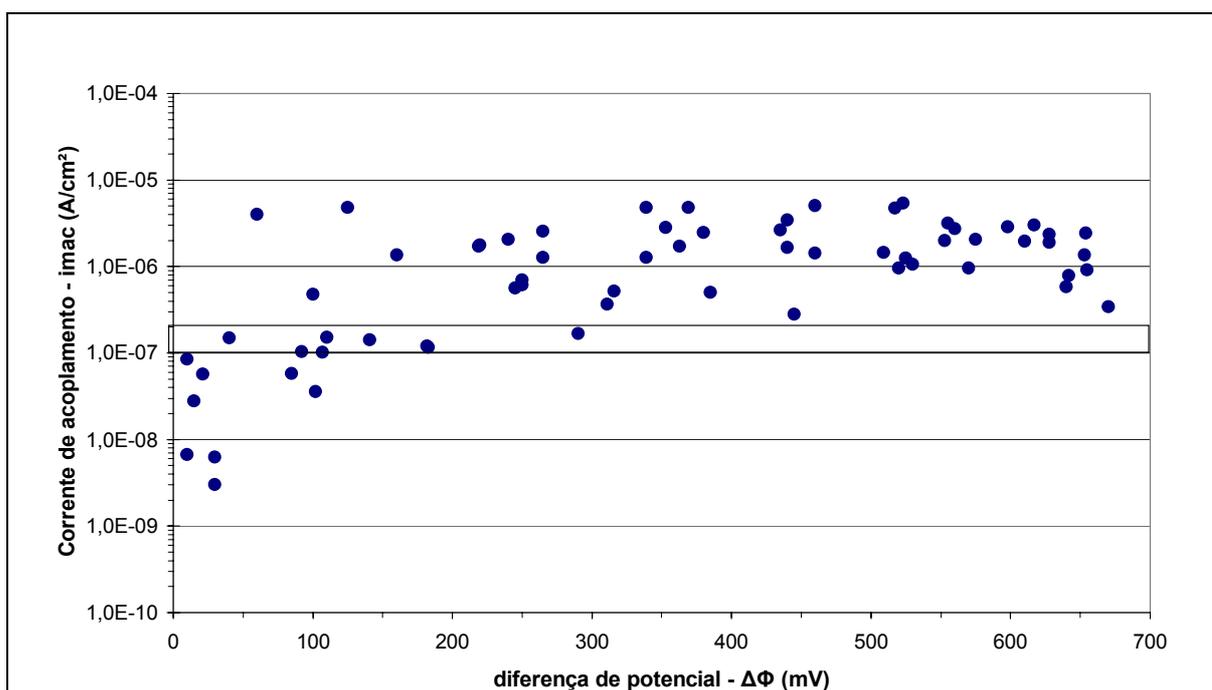


Figura 4.28 – Registro das 65 diferenças de potencial ($\Delta\Phi$) e das 65 densidades de corrente de macrocélula (i_{mac}) entre as barras dos pares A-B, C-D, A-C e B-D, para 6 h de monitoração (26 pares da Fase 1 e 30 pares da Fase 2).

¹³ Foram realizadas 104 medidas de corrente de acoplamento de barras imersas em meios diferentes: 26 na primeira fase e 78 na segunda fase. Metade das 78 medidas da segunda fase foram monitoradas por apenas duas horas e não foram consideradas por não terem sido consideradas representativas do acoplamento entre as barras, conforme visto no item 4.1.2.

A Figura 4.29 apresenta a correlação entre o aumento da diferença de potencial entre as barras e o acréscimo da corrente de acoplamento, para $\Delta\Phi$ até 400 mV.

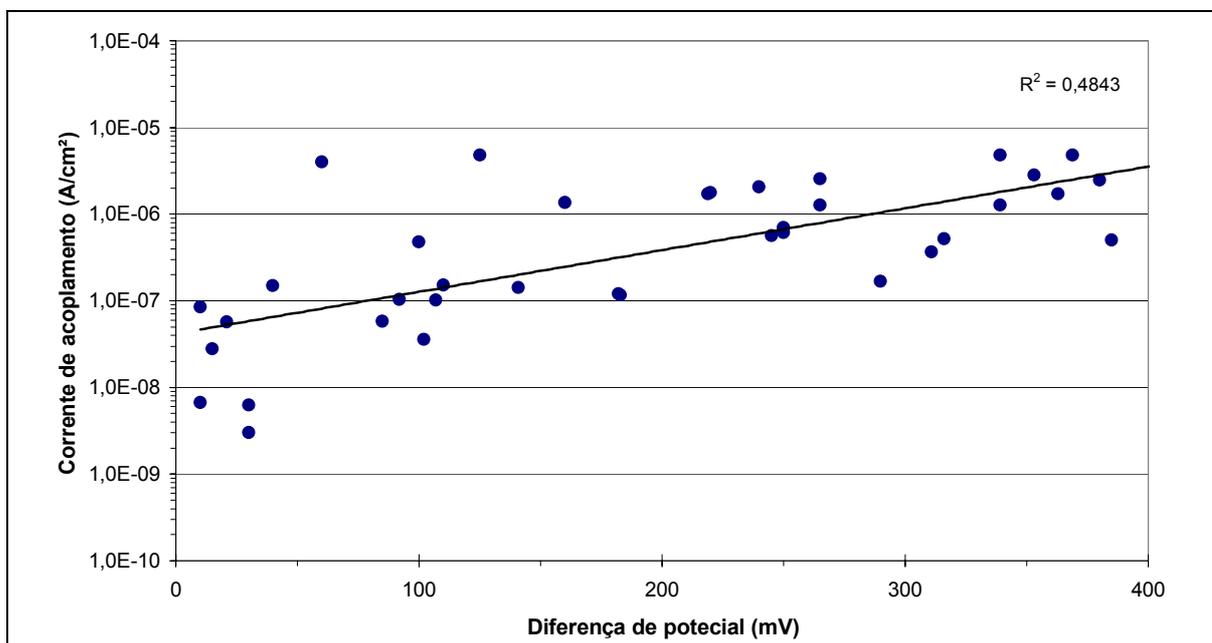


Figura 4.29 – Correlação entre o aumento da diferença de potencial ($\Delta\Phi$) entre as barras e o acréscimo da corrente de acoplamento, para $\Delta\Phi$ até 400 mV, para 6 h de monitoração.

Para valores de $\Delta\Phi$ acima desse patamar não houve mais elevação no valor da corrente, como se vê na Figura 4.28. A partir desse ponto, o aumento da diferença de potencial deixa de ser uma variável importante na determinação do valor da corrente de acoplamento. A dispersão verificada nos resultados da densidade de corrente nesse patamar deve-se, provavelmente, a influências de outros fatores como as resistividades das argamassas, por exemplo.

A Figura 4.30 apresenta a correlação entre a resistência ôhmica do cobrimento de argamassa sobre as barras de aço e a densidade de corrente de acoplamento das barras A-C. Segundo Polder (2001), devido à natureza do processo de corrosão, pode haver uma correlação entre a resistividade do concreto e a taxa de corrosão, pois num circuito de uma célula de corrosão eletroquímica, o transporte de íon entre o ânodo e o cátodo é um dos fatores que controla a velocidade de corrosão.

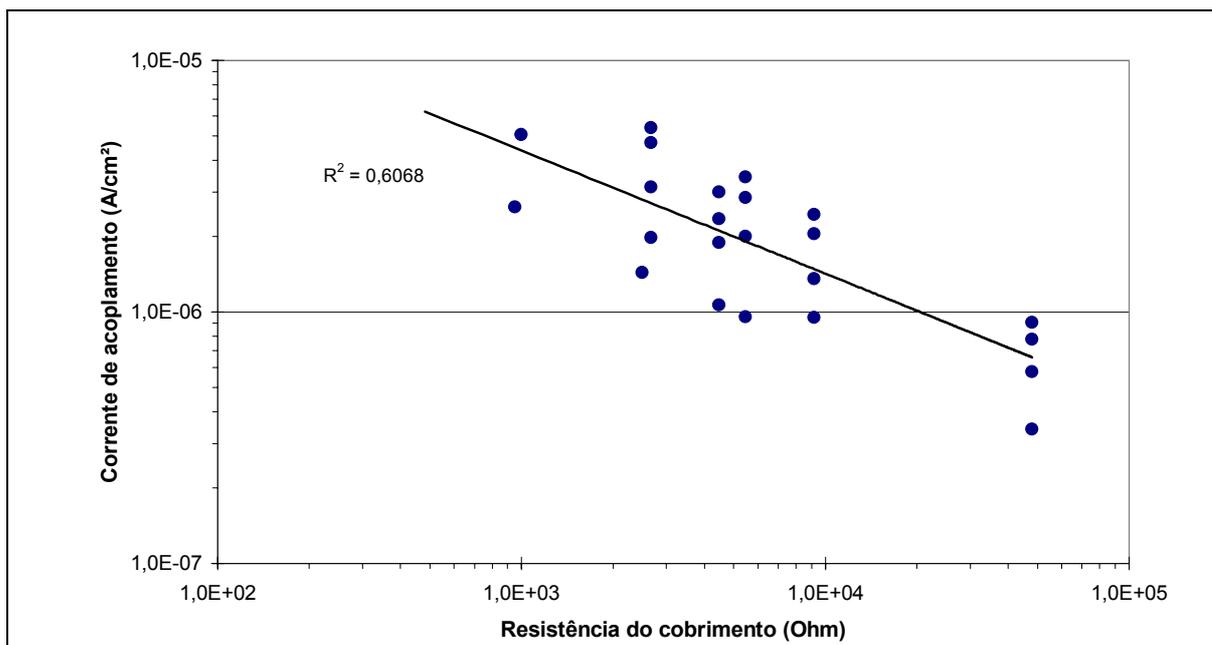


Figura 4.30 – Densidade de corrente de acoplamento das barras em função da resistência ôhmica do revestimento de argamassa sobre as barras de aço, sendo esta correlação aplicável para diferenças de potencial antes do acoplamento acima de 400 mV.

O transporte de íons entre duas barras conectadas, nos CPs usados nesta pesquisa, é feito através de uma camada constituída de uma fase de concreto carbonatado e outra de argamassa (Figura 3.2(a)). O gráfico da Figura 4.30 mostra a influência que a resistividade da fase de argamassa exerce sobre o fluxo iônico entre as barras, visto que a influência do concreto é a mesma em todos os CPs. Sendo a resistividade de cada argamassa diretamente proporcional à resistência do revestimento dela sobre as barras de aço, a densidade de corrente diminui à medida que a resistividade da argamassa aumenta. Nota-se que a dispersão dos valores no gráfico, a cada valor de resistência, decorre, principalmente, da variação dos níveis das correntes obtidas em cada fase/etapa de ensaio. Resultados semelhantes foram encontrados por Nepomuceno (1992), Castro *et al.* (2003), Barkey (2004) e Qian *et al.* (2006) (item 2.1).

Para a construção do gráfico da Figura 4.30 foram considerados os valores de diferença de potencial acima de 400 mV e foram excluídos os acoplamentos das barras imersas nas argamassas com resistência inferior a 900 Ohms (quatro ao todo), pois esses valores de resistências não apresentaram restrição significativa à taxa de corrosão.

A partir dos resultados evidenciados na Figura 4.28 e considerando-se o limite de corrente de passivação para a corrosão da armadura no concreto, adotado na construção civil como sendo a faixa (0,1 a 0,2) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ANDRADE e ALONSO, 1996), observou-se que os níveis de corrosão por macrocélula encontrados nesta pesquisa podem ser reunidos em três grupos, de acordo com as diferenças de potencial que lhes deram causa: até 50 mV, acima de 50 mV até 200 mV e acima de 200 mV.

A Figura 4.31 reinterpreta a Figura 4.28 para sugerir os níveis de corrente de acoplamento ocorridos nos patamares citados, para 65 acoplamentos. Verifica-se que, para os valores de $\Delta\Phi$ até 50 mV, todos os valores ficaram dentro ou abaixo da faixa de 0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$; para os valores de $\Delta\Phi$ acima de 50 mV até 200 mV os valores das correntes são um pouco mais altos: dos onze resultados quatro ficaram acima da faixa de corrente considerada desprezível; e, para os valores de $\Delta\Phi$ acima de 200 mV, com exceção de um, todos os valores de corrente ficaram acima da faixa considerada de passivação.

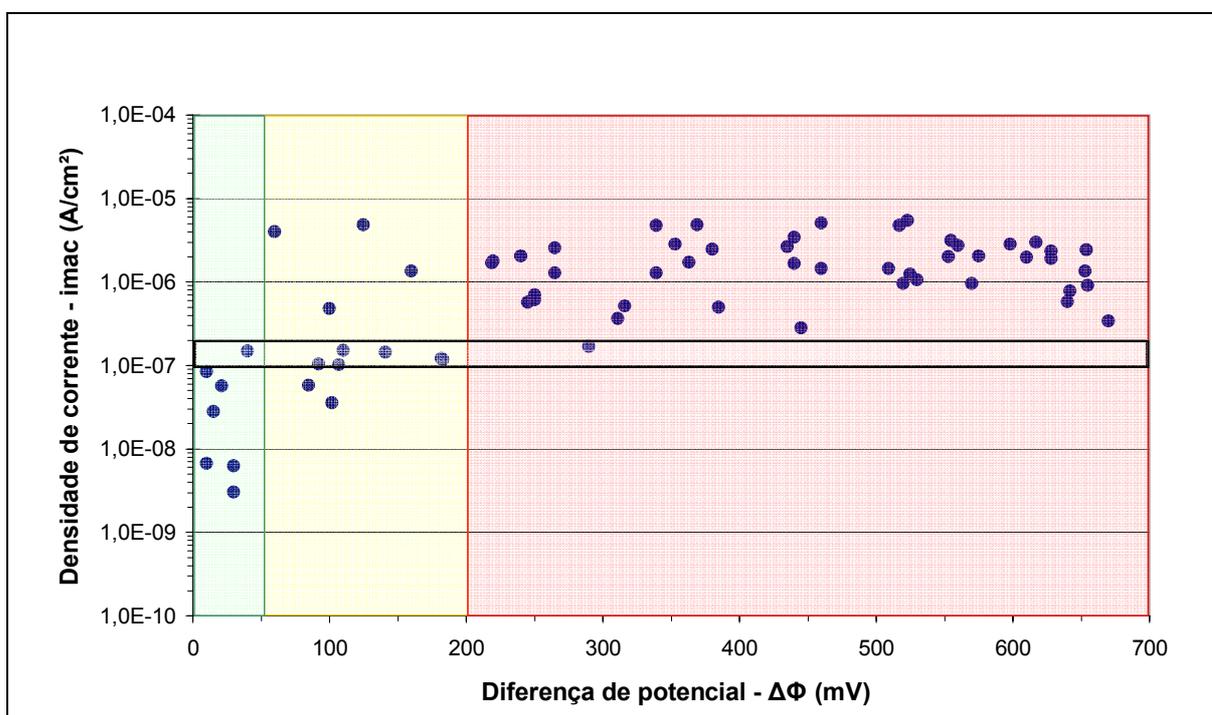


Figura 4.31 – Valores das medidas de correntes de corrosão por macrocélula dos 65 acoplamentos entre as barras imersas em meios heterogêneos, nas duas fases dos experimentos

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 QUANTO À METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ELETROQUÍMICA ENTRE ARGAMASSAS DE REPARO E CONCRETO CARBONATADO

O Apêndice F contém a descrição de procedimentos para avaliação da suscetibilidade à formação de macrocélulas em corpos-de-prova do tipo empregado nesta pesquisa, de modo a contribuir para a evolução de pesquisas neste tema.

5.2 PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA FORMAÇÃO DE MACROCÉLULA

Os corpos-de-prova e o método simplificado proposto mostraram-se adequados para o estudo da corrosão por macrocélulas entre reparos localizados e substrato de concreto carbonatado.

A intensidade de corrosão por macrocélula, nas condições dos ensaios aqui realizados, apresentou boa correlação com a diferença de potencial entre as barras imersas no material de reparo (argamassa) e no substrato (concreto carbonatado).

Para as condições propostas no programa experimental desta pesquisa, a formação de macrocélulas de corrosão que comprometem a durabilidade de reparos localizados de estrutura com corrosão de armaduras, pode ser avaliada pelos seguintes critérios:

- quando a diferença de potencial entre o trecho da barra no interior do material de reparo e o trecho da barra no substrato de concreto carbonatado for menor que 50 mV, a tendência à formação de macrocélula de corrosão será *desprezível*;
- quando a diferença de potencial entre o trecho da barra no interior do material de reparo e o trecho da barra no substrato de concreto carbonatado estiver entre 50 mV e 200 mV, a possibilidade de formação de macrocélula de corrosão será *moderada*; e

- quando a diferença de potencial entre o trecho da barra no interior do material de reparo e o trecho da barra no substrato de concreto carbonatado for maior que 200 mV, a possibilidade de formação de macrocélula de corrosão será *alta*.

5.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como sugestões para evolução do método aqui proposto, as seguintes pesquisas devem ser recomendadas:

- confirmação dos efeitos do polímero EVA sobre a condição de passivação do aço carbono, em meios de elevada alcalinidade e a base de cimentos Portland;
- validação estatística dos critérios de formação de macrocélula, concluídos por esta pesquisa, por planejamento de experimentos específico para este fim;
- verificação da adequação dos critérios de formação de macrocélula, concluídos por esta pesquisa, em caso de amostras de concreto carbonatado obtidas em campo e para argamassas de reparo disponíveis no mercado atual;
- determinação de idades iniciais adequadas para monitorar este tipo de processo sem a interferência da hidratação da argamassa de reparo;
- estudos para definir se é importante readequar a célula de modo a poder portar um contra-eletrodo interno embutido, e avaliação de efeitos da composição deste contra-eletrodo em relação à estabilização de potencial das barras de interesse e ainda da sua durabilidade em meio alcalino;
- efeitos da desconexão dos pares de macro-célula, como feito no corpo-de-prova aqui estudado, em relação a pares mantidos conectados desde a moldagem;
- avaliação dos prazos e condições de experimento que assegurem o retorno do potencial original em barras desacopladas.

5.4 TRANSFERÊNCIA DOS RESULTADOS DESTA PESQUISA

Durante a pesquisa as cinco seguintes publicações já foram transferidas ao meio técnico: Ribeiro; Selmo (2006); Ribeiro; Selmo; Panossian (2007; 2008); Ribeiro; Selmo (2008^{a,b}).

Como requisito para a obtenção do título de doutoramento outras publicações em inglês estão no prelo e já foram encaminhadas a periódico indexado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHBY, M.F.; JONES, D. R. H. **Engenharia de Materiais: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2007, 3.ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; IZQUIERDO, M.; NÓVOA, X. R.; PÉREZ, M. C. **Effect of protective oxide scales in the macrogalvanic behaviour of concrete reinforcements**. Corrosion Science, Vol. 40, nº 8, pp 1379-1389, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete – C 876 – 91** (Reapproved 1999). Philadelphia, 1999.

ANDRADE, C. e GONZÁLEZ, J. A. **Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embebed in Concrete Using Polarization Resistance Measurements**. Werkstoffe und Korrosion 29, pp 515-519, 1978.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; MARIBONA, I. e GARCIA, M. **Suitability of the Measurement techniques of Oxigen Permeability in Order to Predict Corrosion Rates of Concrete Rebars**. Paul Kieger Symposium on Performance of Concrete, pp 45-59, 1989.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo, Ed. Pini, 1992.

ANDRADE, C.; MARIBONA, I.; FELIÚ, S. e GONZÁLEZ, J. A. **Macrocell Versus Microcell Corrosion of Reinforcements Placed in Parallel**. In: Corrosion – 92, paper nº 194, 1992.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SARRÍA, J.; RÍO, O. **Tecnicas de Reparacion de Estructuras Dañadas por Corrosion de Armaduras**. In: 4º Congresso

Iberoamericano de Patologia das Construções, 4., Porto Alegre, 1997. **Anais**. Porto Alegre, UFRGS, 1997. v. 1, p. 47-54.

AOKI, I. V. **Corrosão e Seleção de Materiais, Apostila de Laboratório**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Química, 2005.

AOKI, I. V. **Corrosão e Métodos de Proteção. Notas de Aula**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Química, 2002.

ARAÚJO, A. Estudo para o Estabelecimento de Metodologia de Seleção de Vernizes na Proteção ao Concreto Armado Contra a Penetração de Agentes Agressivos. São Paulo, 2004. 396p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

BABOIAN, R. **Electrochemical Techniques for Predicting Galvanic Corrosion**. Galvanic and Pittig Corrosion – Field and Laboratory Studies, ASTM STP 576, American Society for Testing and Materials, pp 5-19, 1976.

BARKEY D.P. **Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete Adjacent to Surface Repairs**. ACI Materials Journal, vol.101, Issue 4, pp. 266-272, 2004.

BENTUR, A.; DIAMOND, S. e BERKE, N. S. **Steel Corrosion in Concrete**. 1st Ed. Ed. E & FN Spon, UK, 1997.

BERKE, N. S.; SHEN, D.F. e SUNBERG, K. M. **Comparison of the Polarization Resistance Technique to the Macrocell Corrosion Technique**. ASTM STP 1065. Corrosion Rates of Steel in Concrete. 1990

BUONOPANE, R. S. São Paulo, 2005. **Durabilidade de Reparos de Argamassa em Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras**. Exame de qualificação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BUONOPANE, Renata Spinelli ; GALENI, Patricia Castanho ; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de ; SELMO, S. M. S. . Argamassas de reparo de estruturas de concreto - Medidas da impedância de proteção do aço. In: **59º Congresso Anual da ABM - 59 th Annual Congress - International**, 2004, São Paulo. 59º Congresso

Anual da ABM - Internacional - 59th Annual ABM International Congress. São Paulo : Tec Art Editora Ltda, 2004. p. 620-629.

CASTANHEIRA, A. P. A. **Estudo de um sistema de reparo mais eficaz para uma estrutura de concreto armado contaminada por cloretos**. Brasília, 1997. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. São Paulo, Pini, São Paulo, 1997.

CASTRO P., PAZINI E., ANDRADE C., ALONSO C. **Macrocell Activity in Slightly Chloride-Contaminated Concrete Induced by Reinforcement Primers**. Corrosion, NACE vol. 59, No. 6, pp.535-546, jun 2003.

CLELAND D.J., YEOH K.M., LONG A.E. **Corrosion of Reinforcement in Concrete Repair**. Construction and Building Materials, vol., No.4, pp.233-238, 1997.

CLÍMACO, J. C. T. S.; NEPOMUCENO, A. A. **Parâmetros para uma metodologia de manutenção de estruturas de concreto**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 36., Porto Alegre, 1995. Anais. Porto Alegre, PUCRS, 1995.

CUSSON, D., MAILVAGANAM, N. **Durability of repair materials**. Concrete international. Authorized reprint, Mar. 1996.

ELSENER, B. ; ANDRADE, C.; GULIKERS, J.; POLDER, R. e RAUPACH, M. **Half-Cell Potential Measurements – Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures**. Materials and Structures, vol 36, pp 461-471, 2003.

EMMONS P.H.; VAYSBURD A.M.; MCDONALD J.E. **Concrete Repair in the Future Turn of the Century—Any Problems?**. Concrete International. Volume 16. Issue 3 . Pag. 42-49. 1994.

EMMONS P.H.; VAYSBURD A.M.; MCDONALD J.E; POSTON R.W.; KESNER K.E. **Selecting Durable Repair Materials: Performance Criteria/Field Studies**. Concrete International. Volume 22. Issue 12 . Pag. 39-45. 2000

EMMONS, P. H. Concrete repair and maintenance illustrated: problem analysis, repair strategies, techniques. Kingston: R. S. Means Company, Inc. 1993.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. **System concept in design and construction of durable concrete repairs**. Construction and Building Materials, vol. 10, no 1, pp. 69-75, 1996.

FIGUEIREDO, E.J.P. Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura Contra a Corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas- contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado. São Paulo, 1994. 423p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

GONZÁLEZ, J. A.; Molina, A.; ESCUDERO, M. L. e ANDRADE, C. **Errors in the Electrochemical Evaluation of Very Small Corrosion Rates**. Corrosion Science, vol 25, nº 10, pp 917-930, 1985.

GONZÁLEZ, J. A.; LÓPEZ, W. e RODRÍGUEZ, P. Effects of Moisture Availability on Corrosion Kinetics of Steel Embedded in Concrete Corrosion. Corrosion, vol 49, pp1004-1010, 1993.

J.J.W. Gulikers and J.G.M. van Mier, **Accelerated Corrosion by Patch Repairs of Reinforced Concrete Structures**, in Proceedings Int'l. RILEM/CSIRO/ACRA Conference on Rehabilitation of Concrete Structures, Melbourne, August 31 - September 2, 1992 (D.W.S. Ho and F. Collins eds.), pp. 341-353 (ISBN 0 643 05413 8).

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

HOLLER, H. D. **Studies on Galvanic Couples**. Journal of the Electrochemical Society, pp 271-282, setembro de 1950.

JAYALAKSHMI, M; MARALIDHARAN, V. S. Empirical and Deterministic Models of Pitting Corrosion – An Overview. **Corrosion Reviews**, vol 14, pp 375-402, 1996.

LAUER, G. e MANSFELD, F. Technical Note Measurement of Galvanic Corrosion Current at Zero External Impedance. Corrosion, vol 26, pp 504-508, 1970.

LEVY, S.; HELENE, P. Restauração e recuperação de estruturas de concreto armado de escolas estaduais no Estado de São Paulo. *Téchne*, Pini, n. 47, p. 53-62, Julho/agosto, 2000.

LIMA, R. C. **Avaliação da Eficiência de Inibidores de Corrosão em Reparo de estruturas de Concreto.** . São Paulo, 2000. 169p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LIN, L.F., CHAO, C. Y., MACDONALD, D. D. **A Point Defect Model for Anodic Passive Films II. Chemical Reakdown and Pit Initiation.** *J. Electrochem. Soc.* no. 128, pp 1194-1198, 1981.

MANSFELD, F. **Area Relationships in Gavanic Corrosion.** *Corrosion*, vol 27, nº 10, 1971.

MEDEIROS, M. H. F. Estruturas de Concreto com corrosão de Armaduras por Carbonatação: Comparação de Argamassas de reparo quanto à Proteção do Aço. São Paulo, 2002. 193p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MEDEIROS, M. H. F. **Estruturas De Concreto Com Corrosão De Armaduras Por Carbonatação: Comparação De Sistemas De Reparo Localizado.** São Paulo, 2001. Exame de qualificação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MENG, B. Calculation of Moisture Transport Coeficients on the Basis of Relevant Pore Structure Parameters. *Materials and Structures*, v. 27, pp 125-134, 1994.

METHA, P. K.; e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Ed. PINI, 573p, 1994.

MORENO JÚNIOR, R. **Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto.** 2002. 202p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MORGAN, D.R. **Compatibility of Concrete Repair Materials and Systems.** *Consttuction and Building Materials*, vol. 10, No.1, pp.57-67, 1996.

MURRAY, R. T. **The Development of Specifications fo Soil Nailing**. Research Report 380, Transportation Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1993.

NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de morteros de reparacion frente a la carbonatación y la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras - Estudio mediante la resistencia de polarizacion**. Madrid, 1992. Tese (Doutorado) - Universid Politecnica de Madrid, Instituto de Ciencias de la Construccin "Eduardo Torroja"- CSIC.

NEVILLE, A. **Chloride attack of Reinforced Concrete: an Overview**. Materials and Structures, v. 28, pp 63-70, 1995

NOUNU G.; CHAUDHARY Z. **Reinforced Concrete Repairs in Beams**. Consttuction and Building Materials, vol. 13, pp.195-212, 1999.

OLDFIELD, J. W. **Electrochemical Theory of Galvanic Corrosion**. Galvanic Corrosion, ASTM STP 978, H. P. Hack, Ed. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 5-22, 1988.

OLIVEIRA,C. T. A. **Água do Poro de Pastas de Cimentos de Escória**. São Paulo, 2000. 161p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e Proteção Contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas**, vol. 1, São Paulo: Intituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993. (Publicação IPT 2032).

PING GU; BEAUDOIN J.J.; TUMIDAJSKI P.J.; MAILVAGANAM N.P. **Electrochemical Incompatibility of Patches in Reinforced Concrete**. Concrete International. Volume 19. Issue 8. Pg.68-72. 1997.

PRUCKNER, F. Corrosion and Protection of Reinforcement in Concrete Measurements and Interpretation. Vienna, 2001. Tese – University of Vienna.

PRUCKNER F., GJORV O.E. **Patch Repair and Macrocell Activity in concrete Structures**. ACI Materials Journal, vol.99, Issue 2, pp. 143-148, 2002.

RAUPACH M. **Chloride-Induced Macrocell Corrosion of Steel in Concrete-Theoretical Background and Practical Consequences**. Construction and Building, vol.10, No. 5, pp. 329-338, 1996.

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e Seu Controle**. 1ª Ed. Editora Hemus, São Paulo, 1988.

RIBEIRO, J. L. S. ; SELMO, S. M. S. . Avaliação da estabilidade eletroquímica de barras de aço carbono em argamassas de reparo.. In: Congresso Latino-Americano de Corrosão, 2006, Fortaleza. ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão. Rio de Janeiro, 2006.

RIBEIRO, J. L. S. ; SELMO, S. M. S. ; PANOSSIAN, Z . Sistemas de reparo de estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação - Parte 1. Corrosão & Proteção, Rio de Janeiro, p. 20 - 24, 31 dez. 2007.

RIBEIRO, J. L. S. ; SELMO, S. M. S. ; PANOSSIAN, Z . Sistemas de reparo de estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação - Parte 2. Corrosão & Proteção, Rio de Janeiro, p. 28 - 30, 29 fev. 2008.

RIBEIRO, J. L. S. ; SELMO, S. M. S. . Avaliação da estabilidade eletroquímica de barras de aço carbono em concreto carbonatado. In: 28º Congresso Brasileiro de Corrosão / 2nd International Corrosion Meeting, 2008, Recife. ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão. Rio de Janeiro, 2008^a.

RIBEIRO, J. L. S. ; SELMO, . Avaliação da estabilidade eletroquímica de barras de aço carbono em macrocélulas configuradas por concreto carbonatado e argamassas de reparo. In: 28º congresso Brasileiro de corrosão / 2nd International Corrosion Meeting, 2008, Recife. ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão. Rio de Janeiro, 2008^b.

RILEM TECHNICAL RECOMMENDATION 124-SRC. **Repair Strategies for Concrete structures Demanged by Reinforcement Corrosion**. 1993. 73p.

SARHAN, H.; O'NEILL, M. W. e SIMON, P. D. **Corrosion of Reinforcing Steel in Drilled Shafts with Construction Flaws**. Transportation Research Board, 81st Annual Meeting, Washington, D.C. 2002.

SATO, N. **Toward a More Fundamental Understanding of Corrosion Processes.** Corrosion. Volume 45, pp 354-368, 1989.

SATO, N. M. N. **Análise Da Porosidade E De Propriedades De Transporte De Massa Em Concretos** - São Paulo, 1998 - 163 p - Tese (Doutorado) - EP - Escola Politécnica da USP.

SELMO, S. M. S. **Aço-carbono em pastas de gesso de construção: Estimativa de taxas de corrosão por impedância e por método gravimétrico conjugado à análise de imagem.** São Paulo, 1997. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

SELMO, S. M. S.; MORENO Jr., R.; MITRE, M. P. **Caracterização básica de argamassas de reparo para estruturas de concreto, industrializadas no Brasil.** In: Encontro Nacional sobre Conservação e reabilitação de estruturas, Lisboa, 2000. Anais. Lisboa, LNEC, 2000. p. 805-814.

SILVA, T. F.; SELMO, S.M.S. **Estudo de métodos para previsão de durabilidade de reparos localizados em armaduras corroídas de estruturas de concreto.** São Paulo, EPUSP-PCC, 2007. (Relatório de Iniciação Científica).

SCHIESSL, P.; BREIT, W.; RAUPACH, M. **Durability of Local Repair Measures on Concrete Structures Damaged by Reinforcement Corrosion.** In: Third International Conference, Nice, France 1994. p. 1195-1215.

TUUTTI, K. **Corrosion Steel in Concrete.** Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, 469p.

VAYSBURD A.M.; EMMONS P.H.; MCDONALD J.E. MAILVAGANAM, N.; JAMES, E.; BISSONETTE, B. **Concrete Repair Tecnology – A Rvised Approach Is Needed.** Concrete International. Volume. Issue . Pag. 58-65. 2004.

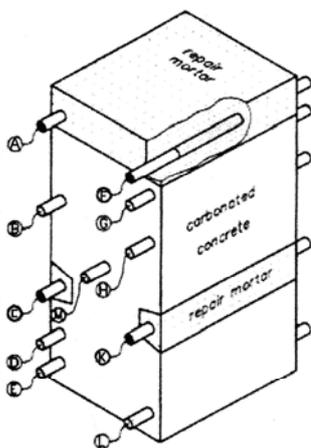
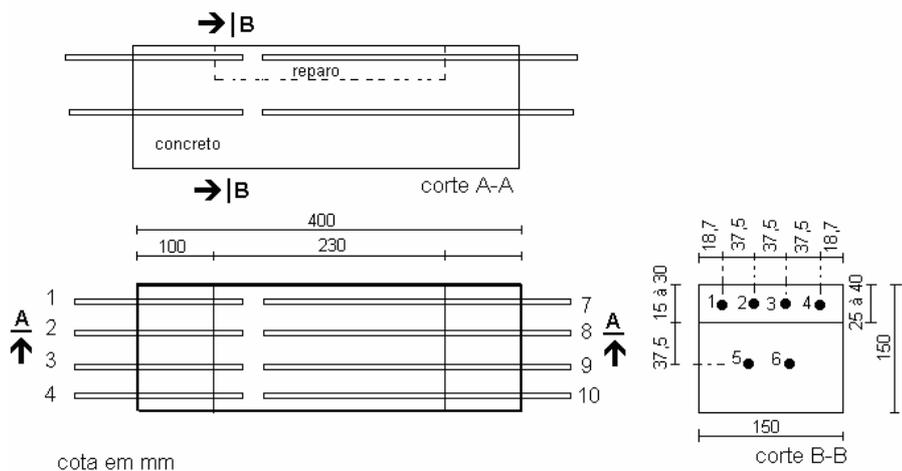
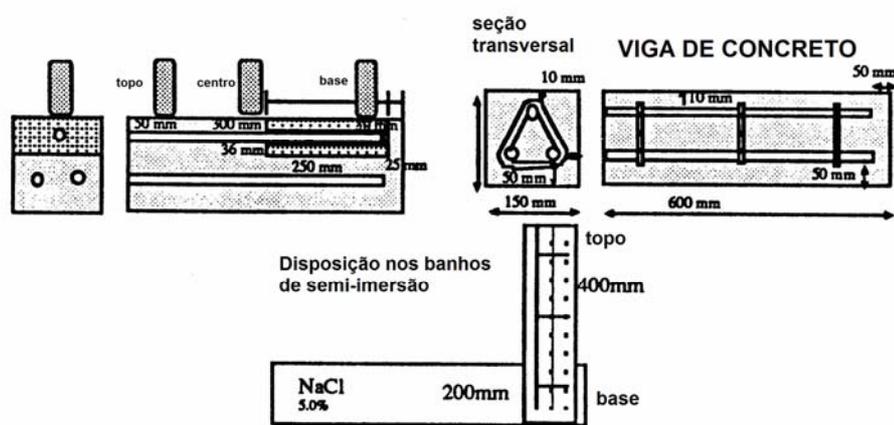
VAYSBURD, A. M. & EMMONS, P. H. **How to make today's repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair.** Construction and Building Materials. v. 14, p. 189-197, 2000.

VAYSBURD, A. M. & EMMONS, P. H. **Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair: concepts or misconcepts**. Cement & Concrete Composites. v. 26, p. 255-263, 2004.

WEST, J. M. **Electrodeposition and corrosion process**. 2^a ed., London, Van Nostrand Reinhold Company Ltd., 1970.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. 1^a Ed EDUSP, USP, São Paulo, 2003.

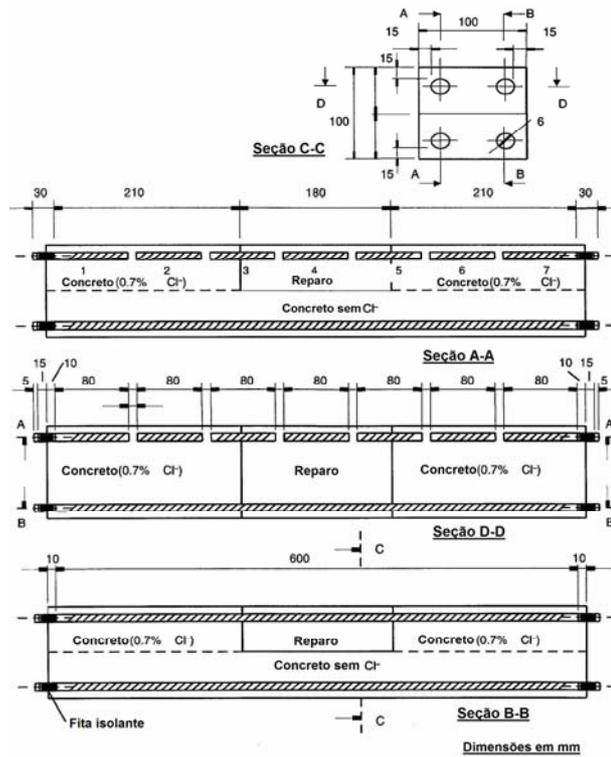
APÊNDICE A - CORPOS-DE-PROVA ADOTADOS EM ESTUDOS DE REPARO LOCALIZADO EM ESTRUTURA DE CONCRETO

Pesquisadores	Corpos-de-prova
Gulikers e van Mier (1992)	
Nepomuceno (1992)	 <p style="text-align: center;">cota em mm</p>
Helene e Monteiro (1993)	 <p style="text-align: center;">Disposição nos banhos de semi-imersão</p> <p style="text-align: center;">NaCl 5.0% 200mm</p>

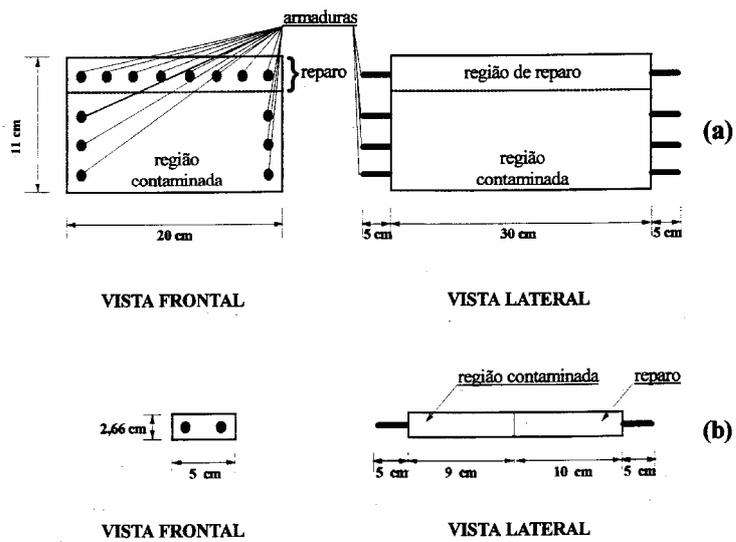
Schiessl *et al.*
(1994)



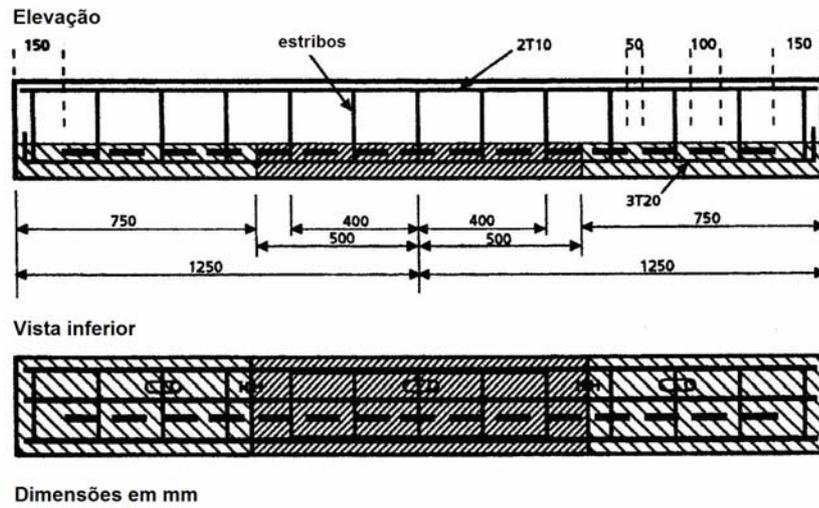
Figueiredo
(1994) e Castro
et al. (2003)



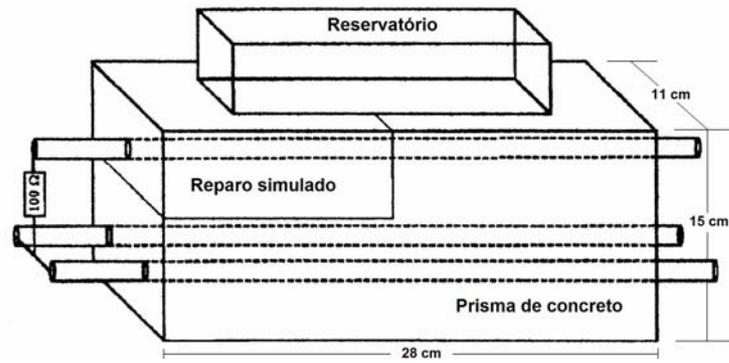
Castanheira
(1997)



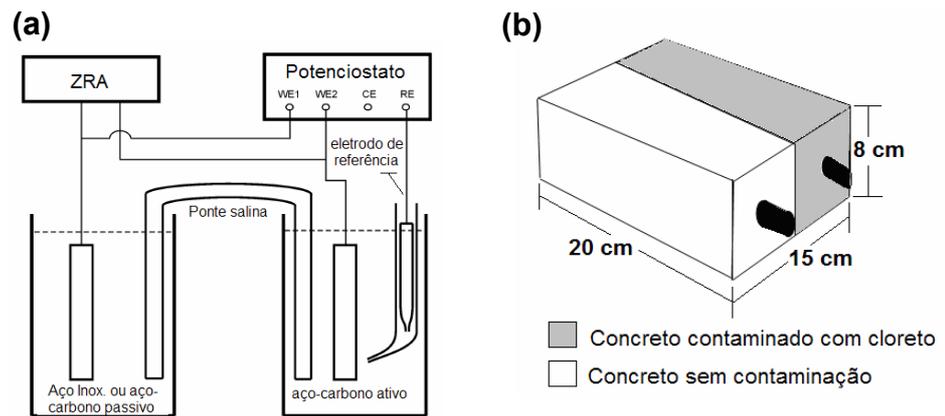
Nounu e Chaudhary (1999)



Barkey (2004)



Qian *et al.* (2006)



APÊNDICE B – COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE CORRENTE ENTRE OS ACOPLAMENTOS DA 1ª. FASE DOS EXPERIMENTOS

(ANOVA, AO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 5 %)

Tabela C.1 – Comparação das correntes de acoplamento entre os grupos de barras imersas em meios homogêneos (A-B) e (C-D) e entre os grupos de barras imersas em meios heterogêneos (A-C) e (B-D)

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Conexão A-B	13	0,001234	9,49E-05	2,1393E-08
Conexão C-D	13	0,001449	0,000111	5,411E-09
Conexão A-C	13	0,018589	0,00143	3,2543E-06
Conexão B-D	13	0,024894	0,001915	3,5086E-06

ANOVA ($\alpha = 5\%$)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,3543E-05	3	1,12E-05	6,58709722	0,000808	2,79806
Dentro dos grupos	8,1476E-05	48	1,7E-06			
Total	0,00011502	51				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são diferentes.

Tabela C.2 – Comparação das correntes de acoplamento entre todas as barras imersas em meios homogêneos (A-B}C-D) e todas imersas em meios heterogêneos (A-C}B-D)

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Conexão A-B/C-D	26	0,002683	0,000103	1,2937E-08
Conexão A-C/B-D	26	0,043483	0,001672	3,3073E-06

ANOVA ($\alpha = 5\%$)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,2013E-05	1	3,2E-05	19,2830966	5,85E-05	4,03432
Dentro dos grupos	8,3007E-05	50	1,66E-06			
Total	0,00011502	51				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são diferentes.

Tabela C.3 – Comparação das correntes de acoplamento entre os grupos de barras imersas em meios homogêneos (A-B) e (C-D)

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Conexão A-B	13	0,001234	9,49E-05	2,1393E-08
Conexão C-D	13	0,001449	0,000111	5,411E-09

ANOVA ($\alpha = 5\%$)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,7872E-09	1	1,79E-09	0,13335682	0,718175	4,259675
Dentro dos grupos	3,2164E-07	24	1,34E-08			
Total	3,2343E-07	25				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são iguais.

Tabela C.4 – Comparação das correntes de acoplamento entre os grupos de barras imersas em meios heterogêneos (A-C) e (B-D)

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Conexão A-C	13	0,018589	0,00143	3,2543E-06
Conexão B-D	13	0,024894	0,001915	3,5086E-06

ANOVA ($\alpha = 5\%$)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,5289E-06	1	1,53E-06	0,4521328	0,50775	4,259675279
Dentro dos grupos	8,1155E-05	24	3,38E-06			
Total	8,2684E-05	25				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são iguais.

Tabela C.5 – Comparação das correntes de acoplamento os grupos de barras imersas em meios homogêneos (C-D) e as imersas em meios heterogêneos (A-C)

Anova: fator único						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Conexão C-D	13	0,001449	0,000111	5,411E-09		
Conexão A-C	13	0,018589	0,00143	3,2543E-06		
ANOVA ($\alpha = 5\%$)						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,1299E-05	1	1,13E-05	6,93267911	0,01457	4,259675279
Dentro dos grupos	3,9116E-05	24	1,63E-06			
Total	5,0415E-05	25				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são diferentes.

Tabela C.6 – Comparação das correntes de acoplamento os grupos de barras imersas em meios homogêneos (A-B) e as imersas em meios heterogêneos (A-C)

Anova: fator único						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Conexão A-B	13	0,001234	9,49E-05	2,1393E-08		
Conexão A-C	13	0,018589	0,00143	3,2543E-06		
ANOVA ($\alpha = 5\%$)						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,1585E-05	1	1,16E-05	7,07347636	0,01372	4,25968
Dentro dos grupos	3,9308E-05	24	1,64E-06			
Total	5,0893E-05	25				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são diferentes.

Tabela C.7 – Comparação das correntes de acoplamento os grupos de barras imersas em meios homogêneos (A-B) e as imersas em meios heterogêneos (B-D)

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Conexão A-B	13	0,001234	9,49E-05	2,1393E-08
Conexão B-D	13	0,024894	0,001915	3,5086E-06

ANOVA ($\alpha = 5\%$)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,1531E-05	1	2,15E-05	12,1988406	0,00188	4,25968
Dentro dos grupos	4,236E-05	24	1,77E-06			
Total	6,3892E-05	25				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são diferentes.

Tabela C.8 – Comparação das correntes de acoplamento entre os grupos de barras imersas em meios homogêneos (C-D) e as imersas em meios heterogêneos (B-D)

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Conexão C-D	13	0,001449	0,000111	5,411E-09
Conexão B-D	13	0,024894	0,001915	3,5086E-06

ANOVA ($\alpha = 5\%$)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,1141E-05	1	2,11E-05	12,0320439	0,00199	4,25968
Dentro dos grupos	4,2169E-05	24	1,76E-06			
Total	6,3309E-05	25				

Obs: Os níveis de corrente dos grupos são diferentes.

**APÊNDICES COMPLEMENTARES EM VERSÃO DIGITAL DE
DOCUMENTAÇÃO DOS DADOS**

**APÊNDICE C – ESCALA COMPARATIVA DE POTENCIAL PARA O
ELETRODO EMPREGADO NA PESQUISA**

**APÊNDICE D - ARQUIVOS E INTERPRETAÇÃO COMPLEMENTAR
DE DADOS DA FASE I**

**APÊNDICE E – ARQUIVOS E INTERPRETAÇÃO COMPLEMENTAR
DE DADOS DA FASE II**

**APÊNDICE F – PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA
SUSCETIBILIDADE À FORMAÇÃO DE MACROCÉLULA COM O TIPO
DE CÉLULA EMPREGADO NESTA PESQUISA**

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DAS ARGAMASSAS

As sete argamassas industrializadas foram identificadas como AI-1 até AI-7, e suas características estão indicadas na Tabela 1.

As outras 6 argamassas foram formuladas em laboratório, identificadas como APO-1 até APO-6 e a composição está descrita na Tabela 2. Nas argamassas tipo APO foram usadas um mesmo tipo de areia natural de rio. Tomou-se como referência de concreto a ser reparado um de f_{ck} igual a 25 MPa.

Tabela 1 – Identificação das argamassas industrializadas (AI) e a sua respectiva relação água/material anidro. Corrigida* de Medeiros (2002)

Argamassa industrializada	Relação líquido/material anidro (kg/kg)
AI-1	0,167* (componente A/componente B)
AI-2	0,125* (componente A/componente B)
AI-3	0,14 (água/material seco)
AI-4	0,13 (componente A/componente B)
AI-5	0,14* (água/material seco)
AI-6	0,16 (água/material seco)
AI-7	0,149 (componente A/componente B)

(*) Valores transcritos de tabela de moldagem e não da dissertação.

Tabela 2 – Identificação das argamassas dosadas em laboratório (APO), com superplastificante (SP). (a/c = proporção de água). Medeiros (2002)

Identificação	Cimento	Traço (kg)	Aditivo SP	a/c (kg/kg)	Polímero (Tipo e Teor)
APO – 1		1:3	2,4 %	0,40	Referência (0 %)
APO – 2	CP II-F 32			0,43	EVA (10 %)
APO – 3				0,40	Acrilato (10 %)
APO – 4		1:3	2,4 %	0,40	Referência (0 %)
APO – 5	ARI-CPV PLUS RS			0,43	EVA (10 %)
APO - 6				0,40	Acrilato (10 %)

No estado anidro, entre outras análises na época de moldagem, as argamassas foram caracterizadas quanto ao teor de álcalis solúveis em água, conforme a Tabela 5.3 e a Tabela 5.4.

Tabela 3 – Resultado da determinação do teor de álcalis solúveis em água das argamassas industrializadas, ensaio realizado de acordo com a ASTM C144/94. Medeiros (2002).

MATERIAL	Teor nos cimentos e nas argamassas (% em massa)		
	Na ₂ O	K ₂ O	Álcalis solúveis em água na argamassa (expresso em Na ₂ O)
Argamassa AI – 1	0,07	0,34	0,13
Argamassa AI – 2	0,01	0,51	0,11
Argamassa AI – 3	0,10	0,46	0,15
Argamassa AI – 4	0,10	0,51	0,17
Argamassa AI – 5	0,06	0,55	0,20
Argamassa AI – 6	0,09	0,36	0,17
Argamassa AI – 7	0,03	0,54	0,15

Tabela 4 - Resultado teórico do teor de álcalis solúveis em água das argamassas do tipo APO, ensaio de acordo com a ASTM C144/94. Medeiros (2002)

MATERIAL	Teor nos cimentos e nas argamassas (% em massa)		
	Na ₂ O	K ₂ O	Álcalis solúveis em água na argamassa (expresso em Na ₂ O)
Argamassa APO – 1	0,04	0,40	0,08
Argamassa APO – 2	0,04	0,40	0,08
Argamassa APO – 3	0,04	0,40	0,08
Argamassa APO – 4	0,01	0,57	0,10
Argamassa APO – 5	0,01	0,57	0,10
Argamassa APO – 6	0,01	0,57	0,10

No estado fresco, as propriedades relacionadas à adesão inicial das argamassas ao aço tiveram o seguinte comportamento:

- a) a consistência inicial (NBR 7215/96): variou de 180 mm (AI-3) a 230 mm (AI-1e AI-6);
- b) o teor de ar (NBR13278/95): de 1 a 2 % (AI-5, APO-2 e APO-5) até 27 % (AI-).

Os métodos de caracterização das argamassas no estado endurecido estão descritos em Medeiros (2002). Constatou-se grande variação no espectro das propriedades intrínsecas, sejam das argamassas industrializadas (AI) ou das formuladas em laboratório (APO).

As propriedades das argamassas diretamente relacionadas com a proteção e estabilidade do aço-carbono, variaram nos seguintes limites, conforme detalhado na Figura 1.

- a) Absorção de água capilar a 72 horas (DIN 52617/87): de 0 kg/m² em todas as argamassas até 13 kg/m² na AI-6;
- b) Absorção de água por imersão (NBR 9798/87): de 3%(APO-3 e APO-6) a 24%(AI-1);
- c) Porosidade aparente (NBR 9798/87): de 5% (APO-3 e APO-6) a 47% (AI-1);
- d) Resistência à carbonatação a 105 dias com 5 % CO₂ – UR 65 % – 24 °C: de 3 mm (AI-2; AI-7) a 28mm (AI-1);
- e) Resistividade elétrica superficial (método 4 pinos) após 2 meses de imersão em água: de 15 kohm x cm (AI-3) a 118 kohm x cm (APO-3).

Outras propriedades das argamassas terão influência na sua resistência à fissuração e na durabilidade de reparos localizados podem ser mais bem visualizadas pela Figura 2, e variaram nos seguintes limites:

- a) retração livre por secagem a 90 dias em câmara seca (UR:50 ±5%, temperatura: 23±3°C): mínimo de – 0,07% (AI-3 e APO-1) e máximo de – 0,21% (AI-6);
- b) resistência à tração na flexão com 28 dias: de 8 MPa (AI-1) a 24 MPa (AI-7);
- c) resistência à compressão aos 28 dias de: 22 MPa (AI-1) a 108 MPa (AI-7);
- d) módulo de elasticidade aos 28 dias: de 15 GPa (AI-1) a 50 GPa (AI-6).

Nas argamassas formuladas em laboratório, o uso de polímeros melhorou todas as propriedades estudadas, exceto a retração por secagem. O cimento de alta resistência inicial produziu argamassas melhores do que as de cimento CII F 32.

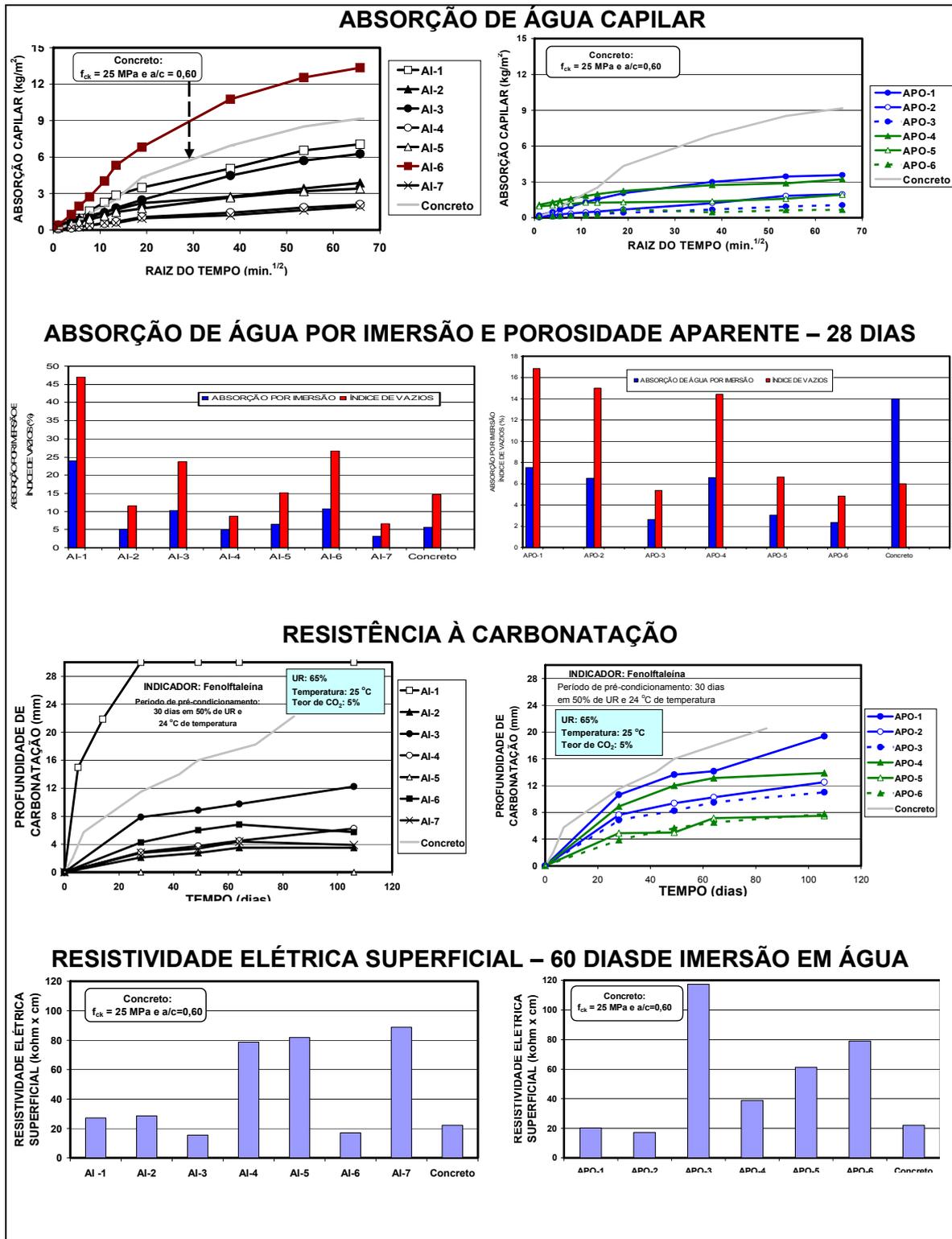


Figura 1 – Propriedades das argamassas usada na Fase I deste trabalho, relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço-carbono. Medeiros (2002).

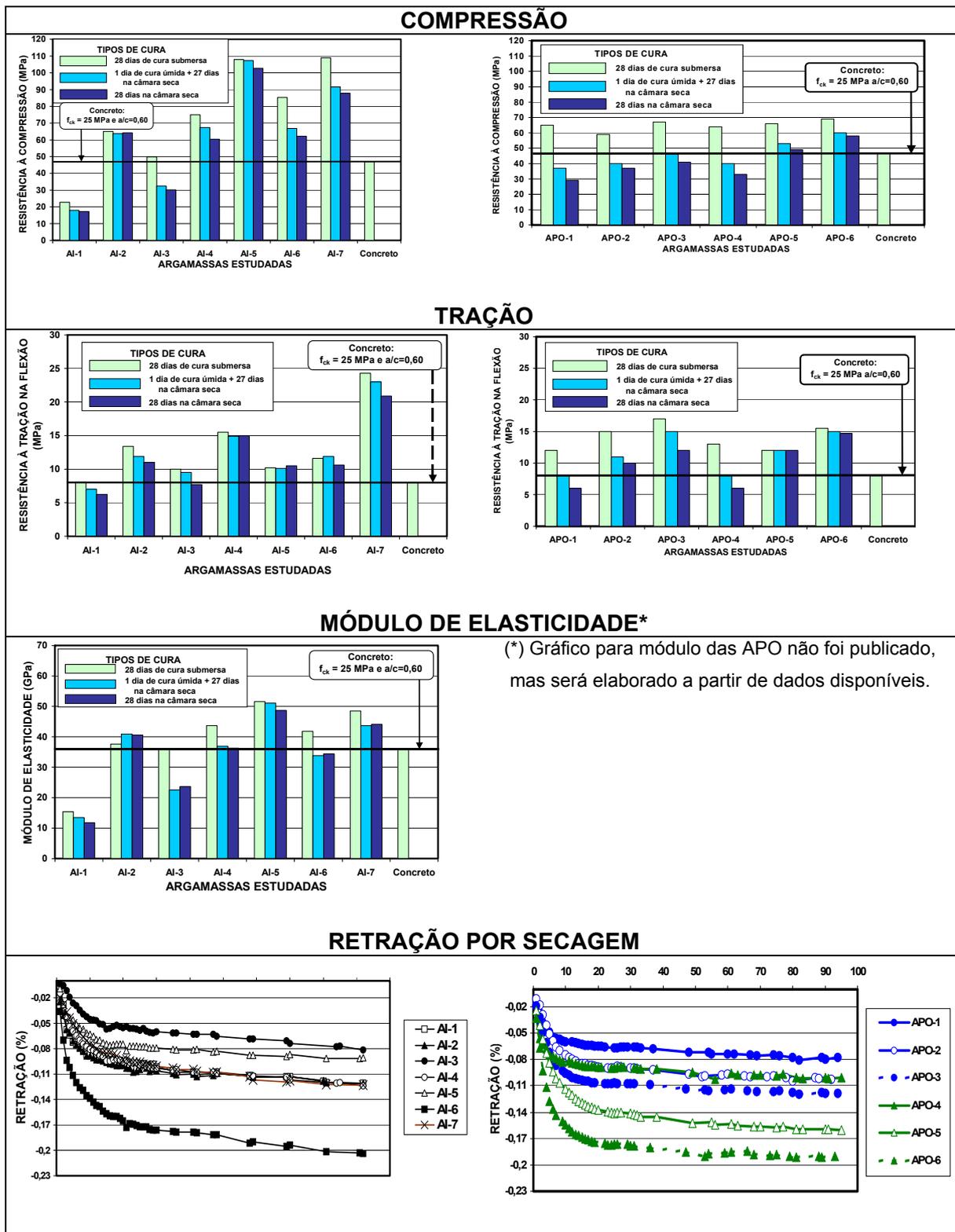


Figura 2 - Variação de propriedades físicas e mecânicas básicas das argamassas utilizadas neste trabalho. Dados de Medeiros (2002)

ANEXOS COMPLEMENTARES EM VERSÃO DIGITAL DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

ANEXO B – SILVA; SELMO (2007)

**ANEXO C - ARQUIVOS E INTERPRETAÇÃO COMPLEMENTAR DA
MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS E CONCRETO A PARTIR
DE ENSAIOS DE BUONOPANE (2006)**

**ANEXO D - GRÁFICOS DE ANÁLISE DE RESULTADOS EM FUNÇÃO
DE PROPRIEDADES FÍSICAS E DA MICROESTRUTURA DAS
ARGAMASSAS**

**ANEXO E – EXPERIMENTOS ELETROQUÍMICOS
COMPLEMENTARES**