INTERCORR2008_292

Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Avaliação da estabilidade eletroquímica de barras de aço carbono em macrocélulas configuradas por concreto carbonatado e argamassas de reparo

José Luis Serra Ribeiro[1], Sílvia M. S. Selmo[2]

Abstract

This paper addresses the prevention of the formation of corrosion macrocells in patch repairs of reinforced concrete structures with carbonation-induced corrosion. The aim is to present the results and the interpretation of a proposed methodology. The study involved 13 repair mortars. The specimens measured 6 cm x 6 cm x 12 cm, one half of each specimen volume was prepared in previously carbonated concrete and the other half was a repair mortar with two carbon steel bars, 6.3 mm in diameter, embedded in each half specimen. Specimens were submitted to three days of wet curing after the mortar was molded, and then kept in a dry chamber (RH = 50% $\pm$ 5% and 23°C $\pm$ 2°C) for over two years. Before the tests the cells were immersed for 14 days in individuals tanks in a saline solution specific for each mortar. The methodology for the analysis of electrochemical compatibility employed the potential and current measurements between the bars immersed in the repair mortar and the bars immersed in carbonated concrete. It was verified that the intensity of the macrocell corrosion current was related to the difference in initial potential between the isolated bars in the repair mortar and in the substrate concrete. Finally, a new scale was proposed for the interpretation of the effects of the potential difference on the macrocell current intensity within the test configuration studied here.

Resumo

Este artigo trata da prevenção à formação de macrocélulas de corrosão em reparos localizados de estruturas de concreto, com corrosão de armaduras por carbonatação. O objetivo é apresentar resultados e a interpretação de uma metodologia simplificada em proposição. O estudo envolveu 13 argamassas de reparo. Os corpos-de-prova constituíram-se por prismas de 6 cm x 6 cm x 12 cm, com metade do seu volume composto por concreto previamente carbonatado e a outra metade, por argamassa de reparo, havendo duas barras de aço carbono de diâmetro 6,3 mm imersas em cada material. Os prismas foram submetidos a três dias de cura úmida, após a moldagem das argamassas e depois permaneceram em câmara seca por período superior a dois anos. Antes do início dos ensaios, as células foram imersas por 14 dias, em cubas individuais com solução salinizada específica. A análise da compatibilidade eletroquímica empregou medidas de potencial e corrente entre as barras imersas na argamassa de reparo e as barras imersas no concreto carbonatado. Verificou-se que a intensidade de corrente de corrosão por macrocélula mostrou relação com a diferença de potencial inicial entre as barras isoladas, na argamassa de reparo e no concreto de substrato. Propõe-se, ao final uma escala para a interpretação dos efeitos da diferença de potencial na intensidade de corrente de macrocélula, na configuração estudada.

Palavras-chave: concreto, argamassa de reparo, corrosão de armaduras, macrocélula de corrosão, ZRA.

1 Doutorando, Eng. Civil - DEP. DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP.
2 Prof ª Dr ª, Eng. Civil - DEP. DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP.

Introdução

A recuperação de estruturas de concreto com corrosão de armaduras, por meio de reparos localizados, deve envolver decisões criteriosas, para a seleção de materiais e sistema de reparo.

A compatibilidade eletroquímica do material de reparo com o substrato de concreto é uma importante consideração e fundamental para a durabilidade dos reparos localizados [1]. Este requisito aumenta em relevância, quanto mais desfavoráveis forem as condições de exposição da estrutura ou dos elementos a serem reparados.

As pesquisas sobre a formação de macrocélulas em reparos localizados ainda são poucas e possivelmente iniciaram na década de 1980. Alguns trabalhos sobre compatibilidade eletroquímica em reparos localizados têm sido realizados, com contribuições importantes no que diz respeito ao entendimento dos fenômenos de macrocélula. Porém, poucos estudaram reparos aplicados em substrato de concreto carbonatado [2, 3]. A maioria das pesquisas se concentrou em reparos aplicados a concretos contaminados por cloretos [4, 5, 6, 7, 8, 9] onde a eficiência dessa tecnologia é questionável, mas atrativa pelo menor custo por m^2, em relação às soluções mais eficientes quanto à garantia de durabilidade.

O grande incremento de novos materiais de reparo no mercado mundial, aumentou a complexidade de escolha de materiais em projetos de recuperação, assim como o potencial de ocorrência de problemas [10, 11]. Por outro lado, a série de normas EN 1504 que trata da proteção e reparo das estruturas de concreto, aprovada nesta década na Comunidade Européia, ainda não prevê a compatibilidade eletroquímica entre o material de reparo e o substrato como uma propriedade a ser considerada para a escolha do sistema de reparo, o que evidencia uma experiência difusa neste tema.

Assim, não se tem ainda métodos ou critérios de fácil aplicação e interpretação, para orientar a escolha e o desenvolvimento de produtos de reparo pelas indústrias especializadas, no que diz respeito à suscetibilidade ao desenvolvimento de macrocélulas de corrosão.

Há, portanto, a necessidade de continuidade de pesquisas, para a formulação de metodologias de avaliação de compatibilidade eletroquímica, para seleção de materiais e sistemas de reparo.

O objetivo deste artigo é apresentar resultados iniciais da aplicação de uma metodologia em proposição, com a análise de resultados e critérios simplificados para a sua interpretação e que serão oportunamente confirmados pelos experimentos finais da pesquisa de doutoramento do autor principal deste artigo [12].

1. Macrocélulas em reparos localizados de estruturas com corrosão de armaduras induzida por carbonatação

O aço carbono corrói com velocidade desprezível, quando está no interior de concretos de cimento Portland, de boa qualidade. Isto acontece devido à alcalinidade da solução de poro (pH entre 12,5 e 13,5), que leva à formação de uma película de óxido na superfície da armadura (película passiva).

Para estruturas em meios mais agressivos e com deficiências de projeto, execução ou manutenção, existem duas situações mais comuns que podem ocorrer na interface da armadura com o concreto, em que a película passiva pode ser destruída: a) pela carbonatação do concreto; ou b) pela contaminação da solução de poro por ânions livres e agressivos, principalmente cloreto, acima de um determinado valor crítico.

Os reparos localizados de base cimentícia em estruturas de concreto produzem mudanças nas características eletroquímicas do meio que envolve o aço, em relação ao concreto original. A alta alcalinidade do reparo promove a repassivação da armadura no trecho reparado e extingue a atividade anódica que existia antes nesta região. Assim, a barra perde a função predominantemente catódica na região do substrato, adjacente ao reparo e a

carbonatação pode, então, se dar com maior velocidade neste trecho, porque a alcalinidade decorrente da sua atividade catódica é progressivamente perdida, pela diminuição significativa da produção local de OH^-. Desse modo, após a frente de carbonatação atingir o aço, nesta região do substrato, junto ao reparo, este pode sofrer um processo de corrosão por microcélulas. A corrosão nestas áreas pode tornar-se significativa e ser agravada pela transformação do trecho repassivado pelo reparo em uma área catódica. Desse modo, os reparos localizados podem levar ao surgimento de macrocélulas de corrosão, com a região anódica agora no substrato [13, 14].

Em [2] e [3], são relatados os poucos estudos encontrados que abordaram a compatibilidade eletroquímica de reparos base cimentícia, em substrato de concreto carbonatado. Gulikers e van Mier [2] 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 estas áreas. Concluíram em seus estudos que reparos localizados com argamassa à base de cimento Portland induzem a uma grave corrosão por macrocélulas e que a alternância de molhagem e secagem pode acelerar a corrosão do aço sob o concreto carbonatado. Além disso, sugeriram que a relação entre as áreas catódicas e anódicas é o fator que controla a corrosão por macrocélula. Schieβl *et al.* [3] pesquisaram o comportamento do aço em corpos-de-prova simulando estruturas de concreto com reparos localizados. Estes autores estudaram o comportamento da corrosão do aço no substrato carbonatado, antes e após a execução do reparo e concluíram que, quando o concreto do substrato não for totalmente removido, ocorre corrosão por macrocélula após o reparo e que esta corrente de corrosão atinge seu maior valor, quando a região do reparo for submetida a um ambiente com umidade relativa entre 90 e 95%.

O programa experimental a seguir descrito faz parte da tese do autor principal [12], que deve aprofundar conhecimentos e critérios para a identificação da suscetibilidade à corrosão do aço em reparos localizados de concreto carbonatado, tendo iniciado este projeto pelo estudo do método simplificado que a seguir é apresentado.

2. Programa experimental

2.1 *Método simplificado proposto para a previsão de compatibilidade eletroquímica em reparos localizados*

O método proposto visa analisar a estabilidade eletroquímica de armaduras de aço carbono, em situação análoga à de reparos localizados em estruturas de concreto carbonatado, por meio de medidas de potencial e corrente, em um amperímetro de resistência nula (ZRA).

Os corpos-de-prova são prismas de 6 cm x 6 cm x 12 cm (Figura 1), foram projetados para a pesquisa de Medeiros e Selmo [15], mas foram apenas moldados naquela época. Cada corpo-de-prova contém quatro barras de aço-carbono CA 50[1], diâmetro 6,3 mm, cortadas com comprimento de 15 cm, sendo duas barras imersas na argamassa e outras duas no concreto carbonatado. O procedimento de limpeza das barras foi o da ASTM G1/90. As barras tiveram um fio de cobre soldado na sua extremidade, mas pode ser empregada outra forma de conexão elétrica. Como área teórica de exposição de cada barra adotou-se 5,6 cm^2, equivalente a 3 cm de comprimento de exposição. A limitação desta área deve ser feita com tinta aderente de alta resistividade elétrica[2].

A monitoração das células foi feita com um ZRA, com vistas a registros contínuos de potencial e corrente. Antes da monitoração, mediu-se o potencial de corrosão de cada barra,

[1] CA 50 é classificação brasileira de aços para concreto armado, segundo a NBR 7480. É similar ao ASTM A615 Gr 75.
[2] Neste caso aplicou-se uma tinta epoxídica com alcatrão de hulha.

com a expectativa de detectar valores críticos de diferença de potencial que pudessem conduzir a valores de corrente de macrocélula acima da faixa usualmente tolerada como aceitável para armaduras em estruturas de concreto (0,1 a 0,2 $\mu A/cm^2$). Realizou-se, também, a medida da resistência elétrica do cobrimento de argamassa sobre cada barra por meio de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) das barras, após a desconexão do ZRA.

2.2 *Argamassas de reparo e concreto constituintes das células*

As treze argamassas de reparo usadas neste trabalho foram das mesmas partidas caracterizadas em [15], a saber: sete argamassas industrializadas (AI–1 até AI-7), e outras seis argamassas formuladas em laboratório (APO-1 até APO-6), cujas dosagens foram determinadas experimentalmente por desempenho quanto à aderência, em [16]. As argamassas APO-1 até APO-3 eram de CPIIF-32 (Tabela 1) e areia natural de rio e, respectivamente, sem polímero; com EVA (VINNAPAS LL 5044, da Wacker) e com acrilato (VINNAPAS LL 512, da Wacker). As argamassas APO-4 até APO-6 eram de cimento CPV (Tabela 1), com o mesmo tipo de areia e obedeceram à mesma ordem citada, quanto à presença e tipo de polímero.

O concreto como referência de substrato carbonatado a ser reparado foi um de resistência característica à compressão (f_{ck}) igual a 25 MPa, com resistência média (f_{cm}) igual a 33 MPa e desvio padrão de 3,7 MPa (proporção 1 : 2,23 : 3,12, relação a/c = 0,60), produzido com o mesmo cimento das argamassas APO-1 até APO-3. A carbonatação foi realizada em câmara com teor de CO_2 de 5%, a 24ºC e 65% de umidade relativa nominal (UR_{nom}).

Os corpos-de-prova aqui estudados foram moldados com a mesma metodologia descrita em [15]. Após a moldagem, as células foram mantidas em câmara úmida (UR = 95% $\pm$ 5%) por três dias.

No início desta pesquisa, a idade de hidratação das argamassas era superior a dois anos, e as células tinham sido mantidas em câmara seca (UR_{nom} = 50% $\pm$ 5% e 23°C $\pm$ 2°C), desde os três dias de cura úmida, sendo que o ambiente de baixa umidade protege o aço, mas é agressivo às argamassas por mecanismos de retração.

Uma síntese das características físicas e mecânicas destas argamassas pode ser consultada da Tabela 1 até a Tabela 3, na Figura 2 até a Figura 4 e com mais detalhes em [15] ou na respectiva dissertação de origem. Na Figura 3, verifica-se que as argamassas industrializadas não experimentaram coeficiente de carbonatação constante ao longo do ensaio acelerado, um pouco diferente das argamassas preparadas no laboratório. O desempenho à carbonatação de outros corpos-de-prova , destas mesmas partidas de argamassa, continua ainda sendo testado por ciclos de umedecimento e secagem e associado à sua microestrutura, com resultados iniciais analisados em [17], revelando comportamento heterogêneo na evolução da carbonatação em algumas argamassas.

2.3 *Ensaios eletroquímicos*

Ao serem retirados da câmara seca, os corpos-de-prova foram monitorados por EIS e imersos em cubas individuais com solução específica de cada tipo de célula. As treze soluções foram compostas pela imersão de iguais volumes de argamassa não carbonatada e concreto carbonatado por sete dias em água destilada, e uma décima quarta solução foi obtida apenas pela imersão de concreto não carbonatado (REF). As soluções resultaram com pH entre 7,5 e 8, e a condutividade variou entre 800 e 1500 µS/cm.

Os ensaios de medida de corrosão por macrocélula foram realizados entre 14 e 21 dias de imersão das células nas cubas, conforme a seqüência de medidas resumidas na Tabela 4. Foi então medido o potencial de corrosão de cada barra isolada e, na seqüência, avaliada a sua compatibilidade eletroquímica por meio da monitoração das curvas de potencial e corrente de

acoplamento das barras imersas em meios diferentes (concreto carbonatado e argamassas não-carbonatadas) através de um ZRA. Ao final da monitoração no ZRA, as barras foram avaliadas, novamente, por medidas de impedância, e os corpos-de-prova foram pesados. A Figura 2 mostra a quantidade de água que penetrou em cada um corpo-de-prova após 21 dias de imersão, e verifica-se que aqueles com argamassas produzidas em laboratório apresentaram menor absorção de água do que os que continham argamassas industrializadas, mas a presença de concreto carbonatado em cada corpo-de-prova, impede melhor interpretação a respeito da absorção de água de cada argamassa, neste momento.

O equipamento usado na monitoração das curvas de potencial e corrente foi um AutoZRA da ACM Instruments e utilizou-se um eletrodo de referência de platina (B 35-XM120, Radiometer Köpenhagen).

O equipamento usado para a EIS 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 inox (6 cm x 12 cm), fixado externamente à célula.

3 Resultados da monitoração inicial dos corpos-de-prova em condição de imersão total

A Figura 5 resume os valores dos potenciais de corrosão das barras, obtidos imediatamente antes do acoplamento de cada par, e dos pares de barras imersas em meios iguais (A-B e C-D), em argamassa e em concreto carbonatado, respectivamente, conforme identificação na Figura 1-(b)[3]. Observando os valores, verifica-se que os potenciais das barras imersas em argamassa estão, em média, menos negativos que os potenciais das barras imersas em concreto carbonatado, o que sugere o estado passivo das primeiras. Os pares de barras nas argamassas AI-2, AI-3, AI-6, APO-2 e APO-4 estão com potenciais mais próximos dos pares C-D (despassivados), e os pares dentro das argamassas AI-4, AI-7 e APO-5 apresentam valores discrepantes em mais de 200 mV. Estes desvios do comportamento esperado para barras dentro do mesmo meio serão investigados na seqüência desta pesquisa, na medida do necessário e podem, em princípio, ser atribuídos a diferenças na evolução da carbonatação [17].

A Figura 6 mostra os valores do potencial de corrosão de cada barra, obtidos imediatamente antes da conexão de cada par, e o respectivo potencial de acoplamento resultante para as barras imersas em meios diferentes (A-C e B-D), isto é, em argamassa e concreto carbonatado.

A Figura 7-(a) apresenta os valores das correntes de acoplamento dos pares de barras A-B e C-D nos mesmos meios, argamassa e concreto carbonatado, respectivamente. Verifica-se que as densidades de corrente ficaram abaixo da faixa 0,1 a 0,2 μA/cm², exceto nos pares AI-2, AI-7, APO-4 e APO-5. A Figura 7-(b) apresenta os valores das correntes de macrocélula dos pares de barras A-C e B-D, isto é, em meios diferentes. Em geral, as correntes de corrosão por macrocélula situaram-se acima da faixa de 0,1 a 0,2 μA/cm², exceto AI-3, AI-6, APO-2 e o par A-C da APO-5, que corresponderam às menores diferenças de potencial de corrosão, medidas antes do acoplamento.

Na Figura 9 estão registradas as 52 diferenças de potencial ($\Delta\Phi$), entre as barras dos pares A-B, C-D, A-C e B-D, nesta ordem, dentro de cada corpo-de-prova. Em geral, os $\Delta\Phi$ entre as barras imersas no mesmo meio foram inferiores aos das barras imersas em meios diferentes. Entre as 26 barras imersas no mesmo meio, apenas três, um par em cada corpo-de-

[3] Os resultados detalhados da monitoração estão publicados em [19] e [20].

prova - AI-4, AI-7 e APO-5 - tiveram ΔΦ da mesma magnitude daquelas, medidas nos pares imersos em meios diferentes. Nota-se que, quanto maior o ΔΦ, maior é a densidade de corrente da macrocélula. Conseqüentemente as correntes resultantes dos acoplamentos das barras imersas no mesmo meio ficaram, em média, inferiores às correntes nos acoplamentos das barras imersas em meios diferentes. Os dados do teste ANOVA, com nível de significância de 5%, resumidos nos quadros da Fig. 8, indicam similaridade entre a média das correntes dos pares A-B e a média das correntes dos pares C-D. Também indicam similaridade entre a média das correntes dos pares A-C e a média das correntes dos pares B-D. Porém, acusam diferença entre a média das correntes do grupo de pares A-B/C-D e a média das correntes do grupo de pares A-C/B-D. A média de correntes do último grupo é superior, por se tratar de correntes de acoplamento entre barras imersas em meios diferentes.

A Figura 10 reúne os dados de diferença de potencial *versus* densidade de corrente de macrocélula, para os 26 pares imersos em meios diferentes (A-C e B-D). Nota-se, claramente, uma tendência de aumento do logaritmo da densidade da corrente, com o aumento do ΔΦ entre as barras, para os ΔΦ abaixo da faixa de 350 mV a 400 mV. Para os ΔΦ acima desta faixa há uma tendência de limite na densidade de corrente próximo a 5,0 μA/cm². Dado que os corpos-de-prova ficaram submersos por 14 dias antes do início da monitoração da corrente de macrocélula, este limite está de acordo com o que afirma West em [18], para quem a densidade de corrente de redução do O_2 máxima em solução aquosa estagnada a 25ºC é em torno de 4,0 μA/cm².

4 Proposição de critérios para análise da suscetibilidade à formação de macrocélulas

Segundo a análise de resultados no item 3 e para as condições propostas no programa experimental desta pesquisa, a formação de macrocélulas de corrosão, que possa comprometer a durabilidade de reparos localizados de estruturas com corrosão de armaduras por carbonatação, pode ser avaliada pelos seguintes critérios:

- quando a diferença de potencial entre a barra no material de reparo e no substrato for menor que 50 mV, a tendência à formação de macrocélula de corrosão será *desprezível*;
- quando a diferença de potencial entre a barra no material de reparo e no substrato estiver entre 50 mV e 200 mV, a possibilidade de formação de macrocélula de corrosão será *baixa*; e
- quando a diferença de potencial entre a barra no material de reparo e no substrato for maior que 200 mV, a possibilidade de formação de macrocélula de corrosão será *alta.*

A dispersão ocorrida nas densidades de corrente de acoplamento entre pares de barras imersas em meios diferentes (A-C e B-D) deve-se, provavelmente ao controle resistivo da corrente nas argamassas. Note-se que, apesar das diferenças de potencial no corpo-de-prova da argamassa AI-5 serem em torno de 650 mV, entre os pares de barras A-C e B-D, as densidades de corrente ficaram entre 0,3 μA/cm² e 0,7 μA/cm², bem abaixo das densidades de corrente de outros pares que tiveram valores semelhantes de ΔΦ e do limite indicado por West [18], sugerindo o controle resistivo da corrente nessas macrocélulas. Esta consideração também está respaldada no fato dessa argamassa ter apresentado uma das menores absorções de água (Fig. 2 e Fig. 4) e ter se destacado por apresentar a maior resistência elétrica, entre todas, pela análise comparativa dos ensaios de impedância, através dos Diagramas de Bode [19].

3. Considerações finais

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

A intensidade de corrosão por macrocélula, nas condições dos ensaios aqui realizados, teve boa correlação com a diferença de potencial entre as barras isoladas e imersas no material de reparo (argamassa) e no substrato (concreto carbonatado). Uma escala de critérios para avaliação da suscetibilidade à formação de macrocélula foi aqui proposta, e esta deve ainda ser confirmada para outras condições de imersão dos corpos-de-prova, de idade de hidratação das argamassas e de conexão inicial das barras.

Em análises complementares dos resultados de EIS deste trabalho, deve-se confirmar os efeitos da resistividade de algumas argamassas nos valores das intensidades de densidade de corrente das macrocélulas medidas.

Como prosseguimento desta pesquisa [12], serão testadas células com as barras conectadas desde a moldagem, situação mais próxima à realidade dos reparos localizados. Espera-se que os novos experimentos confirmem os resultados iniciais, assim como os critérios aqui apresentados, e que, ao final, possa contribuir para facilitar a escolha de materiais de reparo quanto à compatibilidade eletroquímica com o substrato onde serão empregados.

Agradecimentos

Ao colega Marcelo Henrique Farias de Medeiros e à estagiária Patrícia Castanho Galeni, pela caracterização inicial das argamassas e preparo dos corpos-de-prova testados neste trabalho. Aos especialistas Zehbour Panossian, Stephan Wolynec, Isolda Costa e Fábio Panoni, por contribuições que em diversos momentos apoiaram o desenvolvimento deste trabalho, bem como ao Projeto Temático FAPESP 03/01729-2 e a outros projetos precedentes coordenados pelo Prof. Dr. Paulo Helene, por subsídios com equipamentos.

Tabela 1 – Composição química percentual dos cimentos usados no grupo de argamassa APO [15].

Cimento	Perda ao fogo	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	CO_2	Res. Ins.	Cal livre	Eq. Alc., Na_2O
CPIIF-32	6,38	16,70	3,56	5,03	57,50	6,65	2,83	0,05	0,39	4,97	1,80	1,94	0,31
CP V	3,59	21,80	5,63	3,58	58,08	2,76	2,75	0,12	0,65	2,52	0,44	1,81	0,55

Tabela 2 – Dados das argamassas industrializadas AI-1 até AI-7, no estado anidro e recomendações de dosagem de água adotadas no trabalho reportado em [15].

DOSAGEM DE ÁGUA RECOMENDADA PELO FABRICANTE	
Argamassa industrializada (código)	**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)

Tabela 3 – Características dos materiais usados nas argamassas APO-1 até APO-6, preparadas em laboratório por [15], com as proporções de mistura definidas no estudo de aderência por [16].

Código	Cimento	Cimento: areia	Aditivo superplastificante	Relação a/c (kg/kg)	Polímero (Tipo eTeor)
APO – 1	CP II-F	1 : 3	2,4 %	0,40	Referência (0%)
APO – 2				0,43	EVA (10 %)
APO – 3				0,40	Acrilato (10 %)
APO – 4	CPV-ARI PLUS RS	1 : 3	2,4 %	0,40	Referência (0)
APO – 5				0,43	EVA (10 %)
APO – 6				0,40	Acrilato (10 %)

Tabela 4 – Seqüência dos ensaios realizados em cada corpo-de-prova [12], após mais de dois anos em câmara seca.

PRAZO	TIPO DE ENSAIO
Imediatamente à retirada da câmara seca ((UR$_{nom}$ = 50% ± 5% e T = 23°C ± 2°C)	EIS das 4 barras de cada corpo-de-prova .
Após 8 dias em ambiente de laboratório (UR$_{nom}$ = 65% ± 10% e T = 22°C ± 3°C)	EIS das 4 barras de cada corpo-de-prova . Em seguida, saturação, de acordo com a norma NBR 9778/1987.
Aos 14 dias de imersão	Monitoração do potencial de corrosão de cada barra por 30min.
Do 14º ao 18º dia de imersão	Monitoração da corrente, por 24 h, entre as barras dos pares A-B, C-D, A-C e B-D, nesta ordem.
Aos 21 dias de imersão	1- Monitoração do potencial de cada barra por 30min. 2- EIS das 4 barras.
No 21º dia de imersão	Retirada da imersão e pesagem.

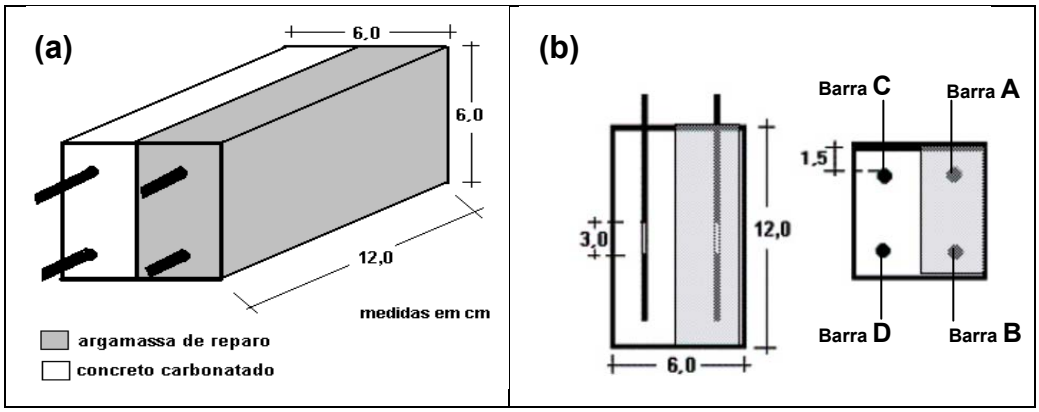


Figura 1 – Geometria e configuração do corpo-de-prova de concreto e argamassa, com duas barras imersas em cada um dos meios.

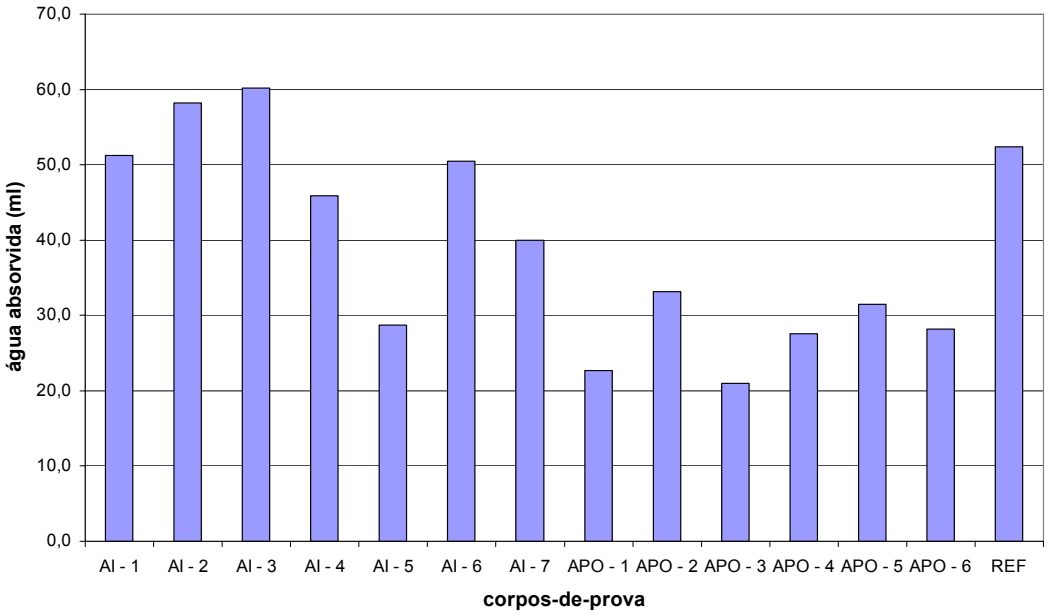


Figura 2 – Água absorvida ao final de 21 dias de imersão dos corpos-de-prova, nas condições descritas na Tabela 4 (REF = concreto não-carbonatado).

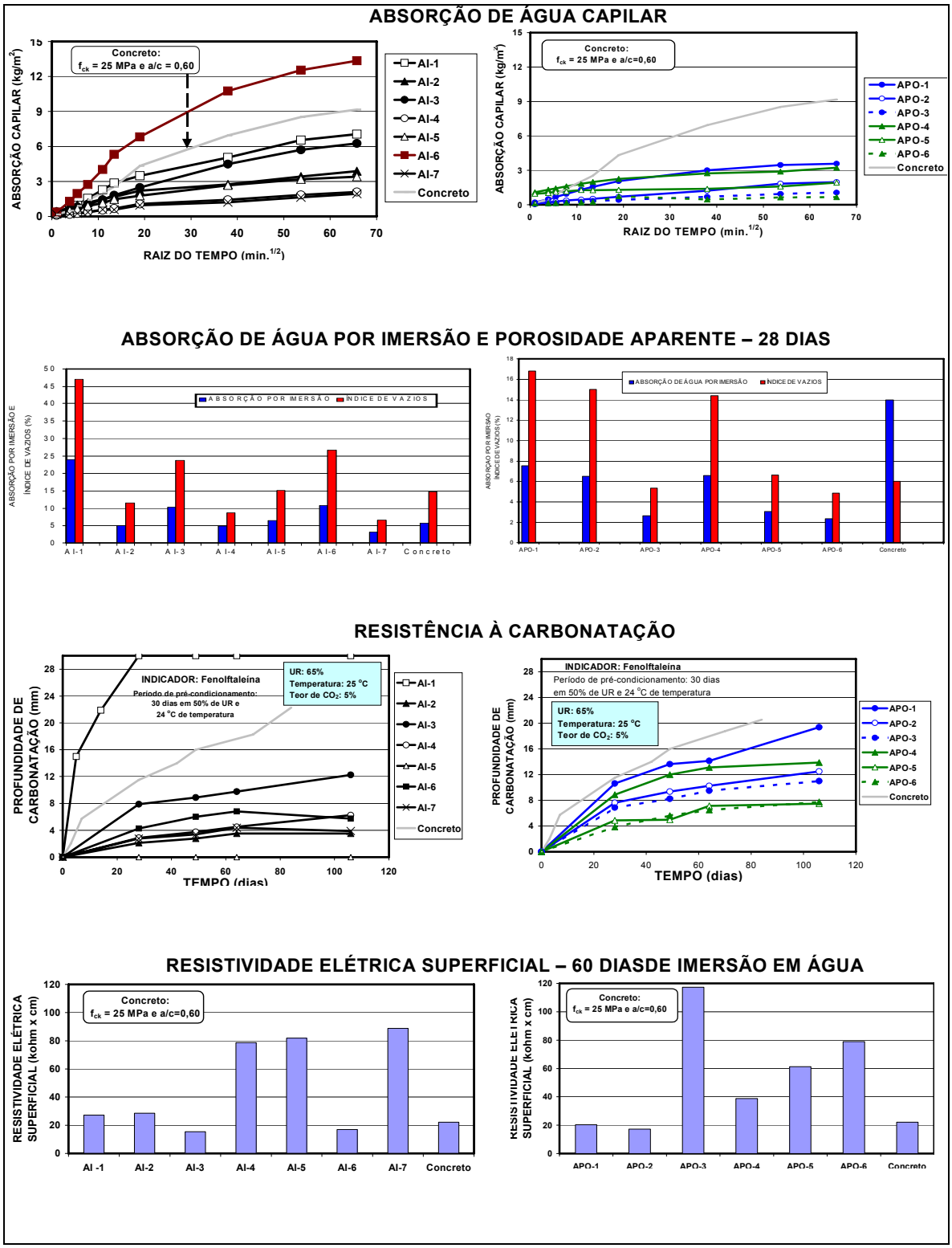


Figura 3 – Caracterização das argamassas AI e APO, quanto a propriedades usualmente relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço em reparos. Dados obtidos por [15].

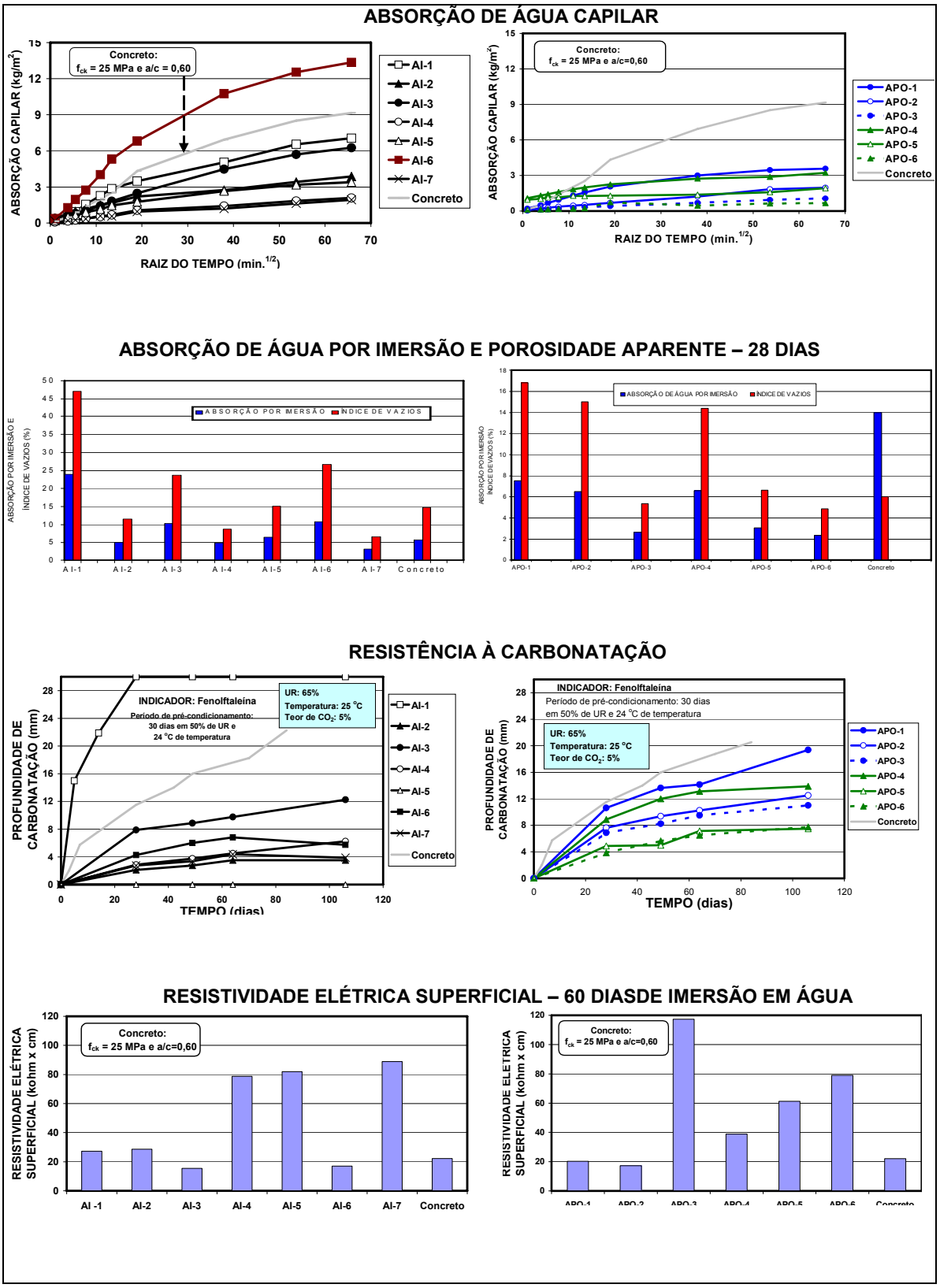
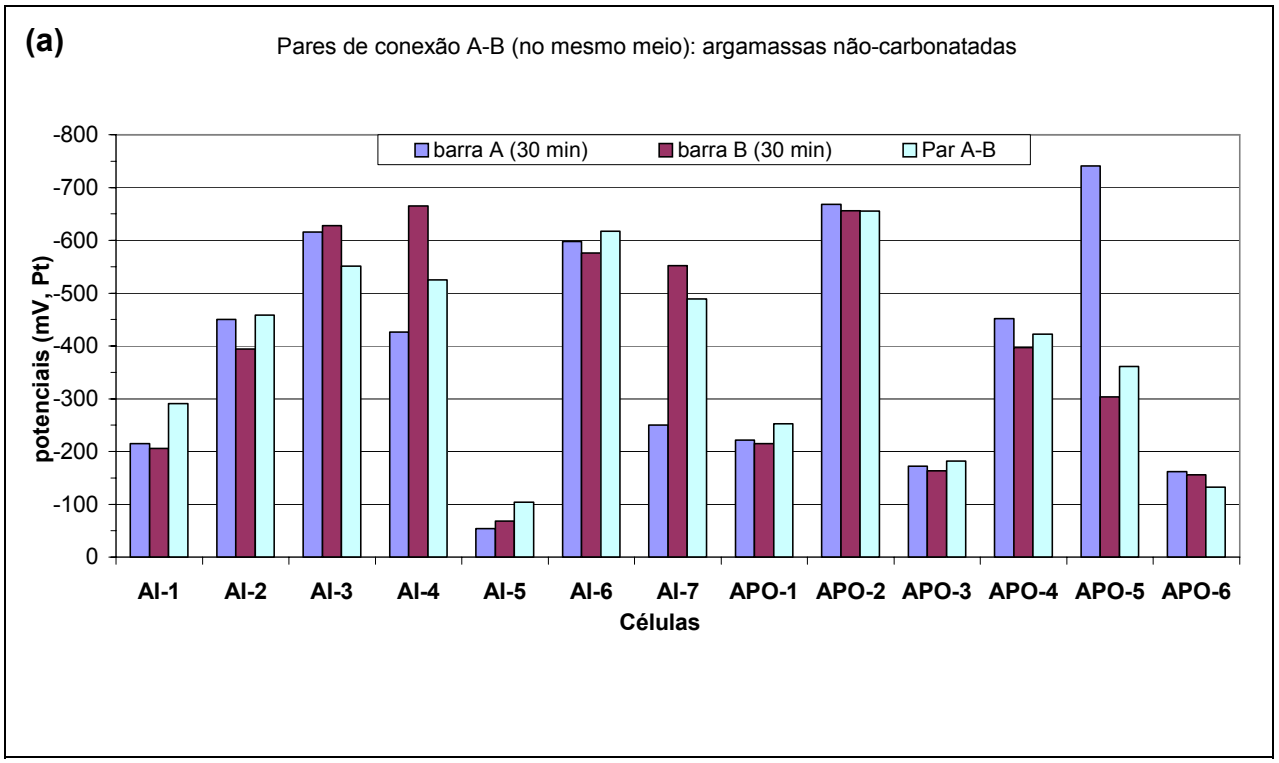


Figura 4 – Caracterização das argamassas AI e APO, quanto a propriedades usualmente relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço em reparos. Dados obtidos por [15].



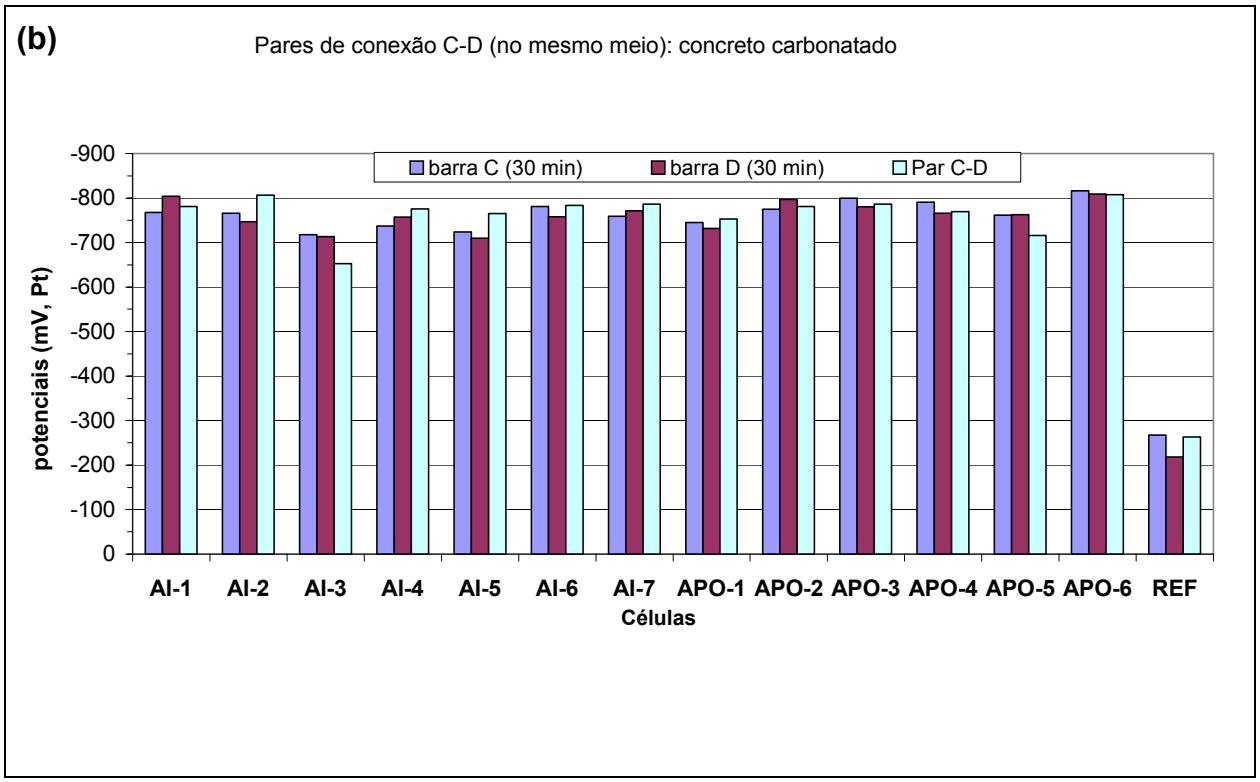
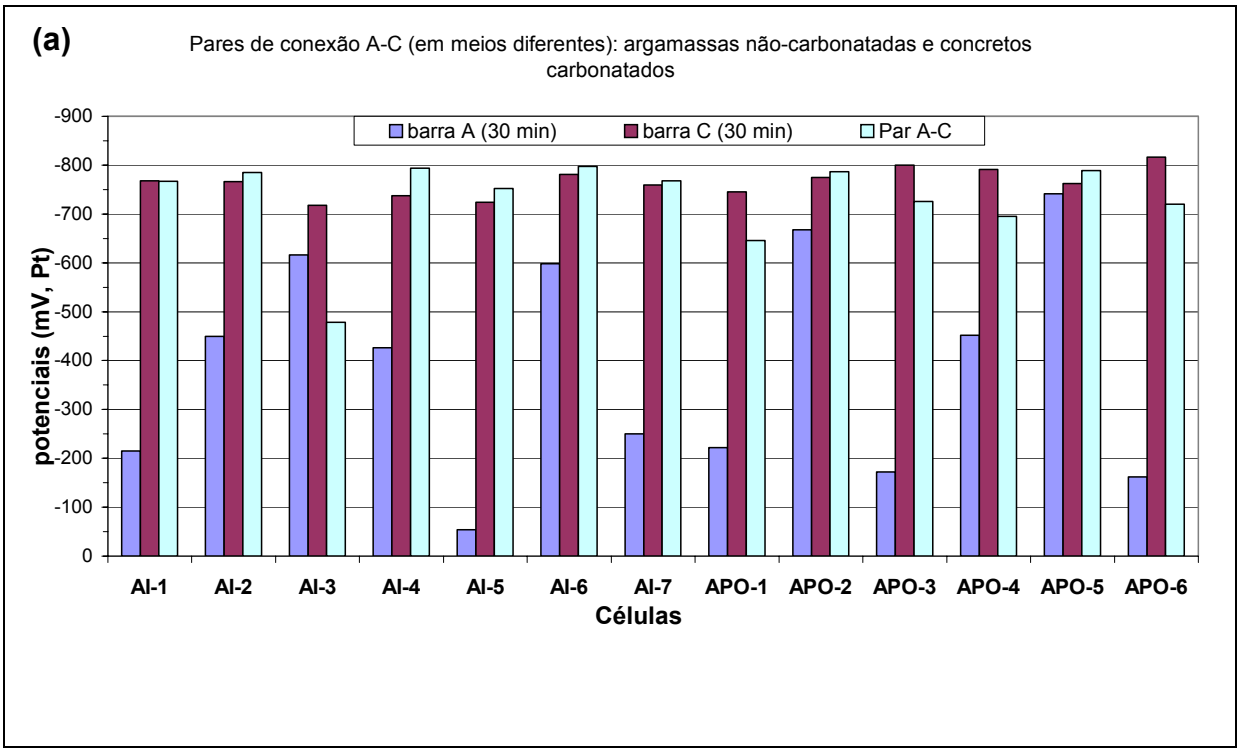


Figura 5 – Potenciais de circuito aberto inicial das barras isoladas, ao final de 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares de barras às 24 h de conexão, com as células previamente estabilizadas por imersão em soluções salinas específicas durante 14 dias (REF = concreto não-carbonatado).



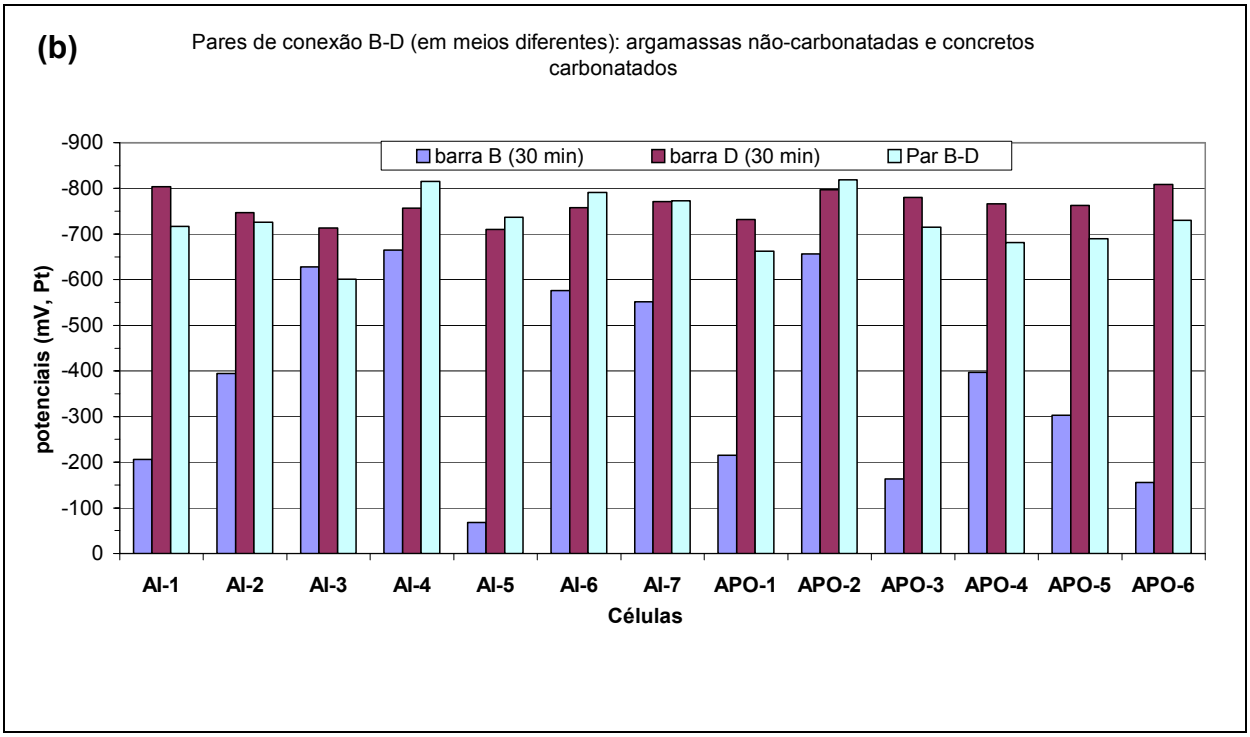
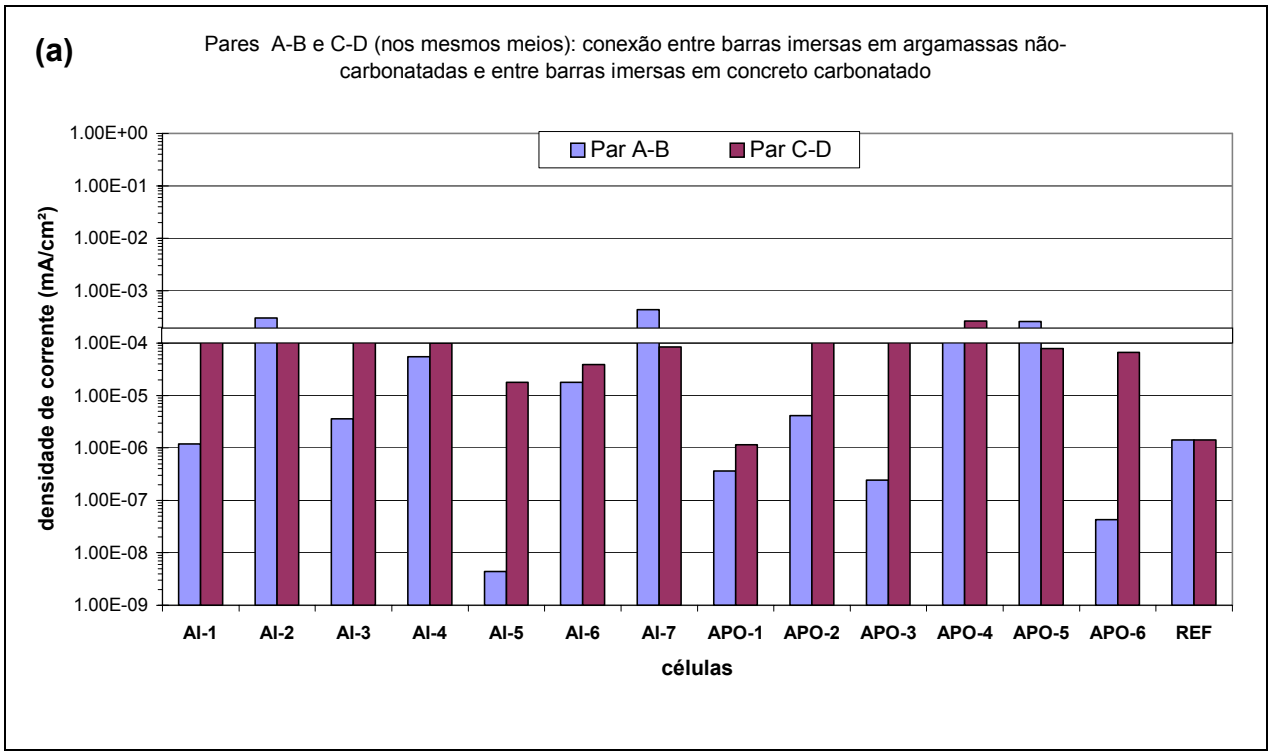


Figura 6 – Potenciais de circuito aberto inicial das barras isoladas, ao final de 30 min de monitoração, e potencial de acoplamento dos pares de barras às 24 h de conexão, medido com a mesma referência e estando as células previamente estabilizadas por imersão em soluções salinas específicas durante 14 dias.



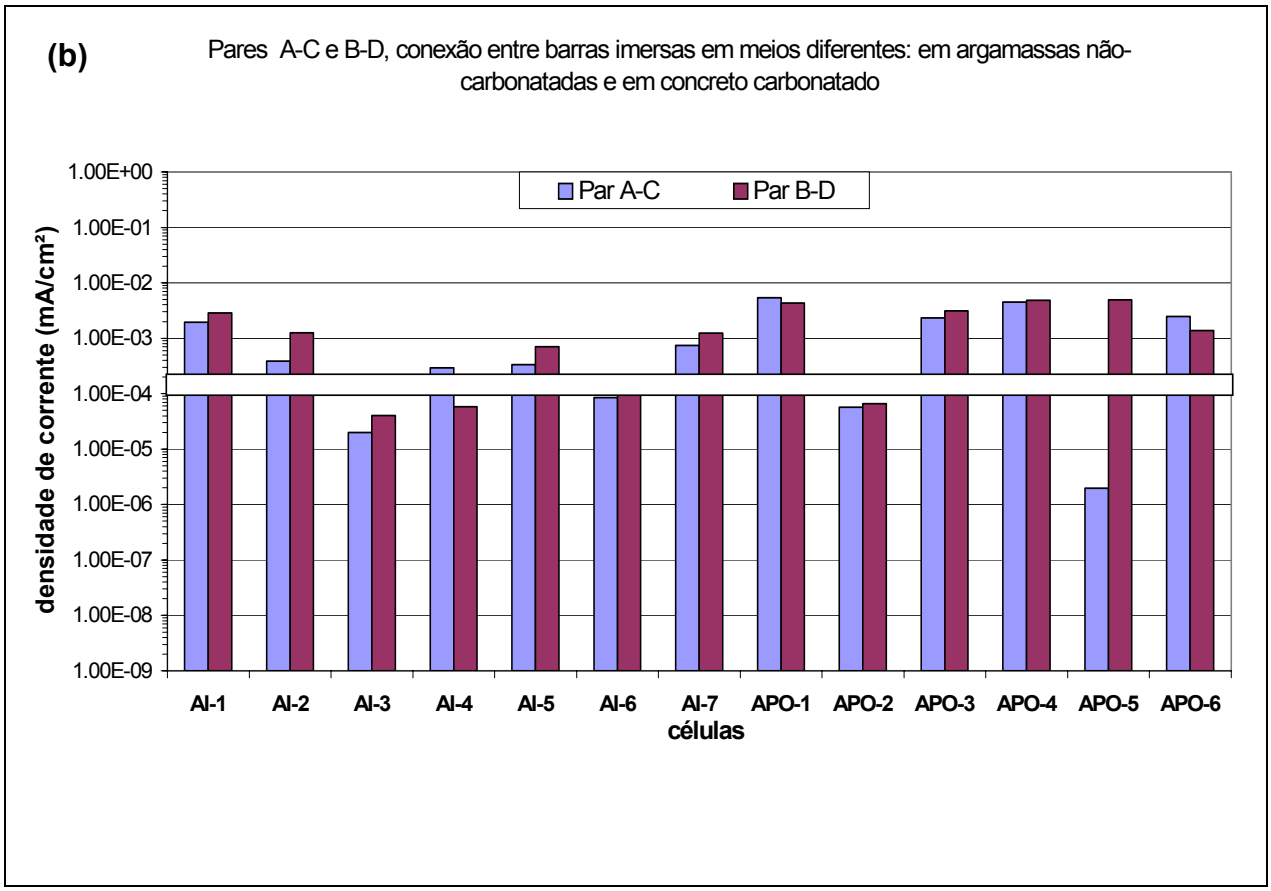


Figura 7 – Densidades de corrente de acoplamento dos pares de barras a 24 h de conexão, previamente estabilizadas por imersão em soluções salinas específicas durante 14 dias (REF = concreto não-carbonatado).

Anova: fator único (Alfa = 0,05)

	Contagem	*Soma*	*Média*	*Variância*
Conexão A-B	13	1,23E-03	9,49E-05	2,14E-08
Conexão C-D	13	1,45E-03	1,11E-04	5,41E-09

ANOVA

Fonte da variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	1,79E-09	1	1,79E-09	0,133	0,718	4,260
Dentro dos grupos	3,22E-07	24	1,34E-08			
Total	3,23E-07	25				

Obs.: Aceitar a hipótese nula. **Os níveis de corrente dos grupos são iguais**

Anova: fator único (Alfa = 0,05)

	Contagem	*Soma*	*Média*	*Variância*
Conexão A-B	13	1,23E-03	9,49E-05	2,14E-08
Conexão C-D	13	1,45E-03	1,11E-04	5,41E-09

ANOVA

Fonte da variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	1,79E-09	1	1,79E-09	0,133	0,718	4,260
Dentro dos grupos	3,22E-07	24	1,34E-08			
Total	3,23E-07	25				

Obs.: Aceitar a hipótese nula. **Os níveis de corrente dos grupos são iguais**

Anova: fator único (Alfa = 0,05)

	Contagem	*Soma*	*Média*	*Variância*
Conexão A-B	13	1,23E-03	9,49E-05	2,14E-08
Conexão C-D	13	1,45E-03	1,11E-04	5,41E-09

ANOVA

Fonte da variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	1,79E-09	1	1,79E-09	0,133	0,718	4,260
Dentro dos grupos	3,22E-07	24	1,34E-08			
Total	3,23E-07	25				

Obs.: Aceitar a hipótese nula. **Os níveis de corrente dos grupos são iguais**

Figura 8 – Comparação das densidades de corrente de acoplamento dos pares de barras imersas no mesmo meio e dos pares de barras imersas em meios diferentes (concreto carbonatado e argamassas não-carbonatadas).

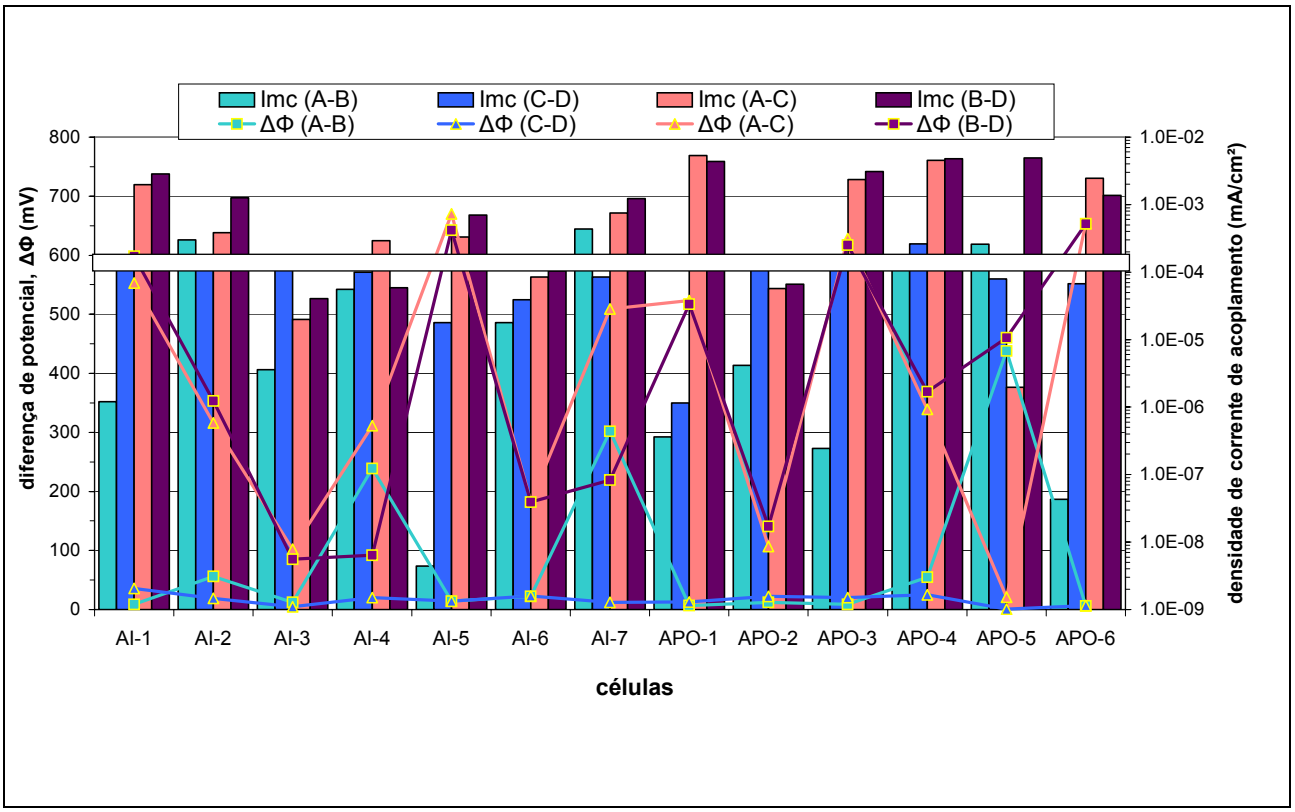


Figura 9 – Registro das 52 diferenças de potencial (ΔΦ) e das 52 densidades de corrente de acoplamento (imc) entre as barras dos pares A-B, C-D, A-C e B-D, nesta ordem, dentro de cada corpo-de-prova .

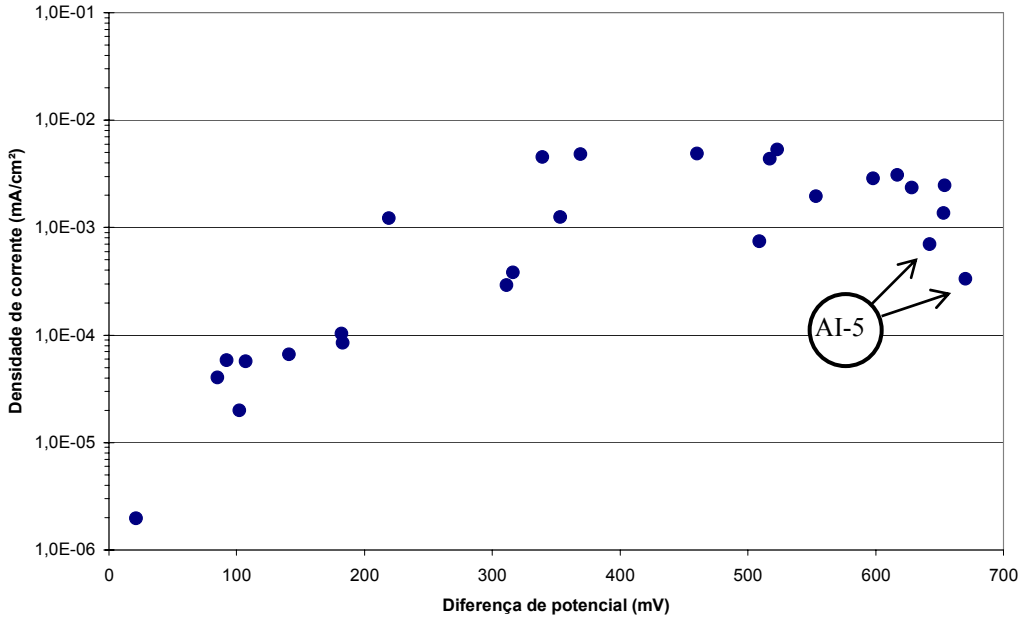


Figura 10 - Diferença de potencial *versus* densidade de corrente de macrocélula, para os pares imersos em meios diferentes (A-C e B-D). Nota-se, claramente, uma tendência de aumento do logaritmo da densidade da corrente, com o aumento do ΔΦ entre as barras. Em destaque as densidades de corrente do corpo-de-prova com argamassa AI-5.

Referências

[1] 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 p. 39-45. 2000.

[2] GULIKERS, J. J. W.; VAN MIER, J. G. M. Accelerated Corrosion by Patch Repairs of Reinforced Concrete Structures**. 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.), p. 341-353 (ISBN 0 643 05413 8).

[3] SCHIEβL, P.; BREIT, W.; RAUPACH, M. Durability of Local Repair Measures on Concrete Structures Damaged by Reinforcement Corrosion. In: Malhotra, V. M., editor. **Durebility of Concrete. Third International Conference**, Nice, France, May 1994, Detroit. American Concrete Institute, ACI SP-145, 1994. p. 1195-1215.

[4] NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de morteros de reparación frente a la carbonatación y la penetración 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 Construccion "Eduardo Torroja"- CSIC.

[5] HELENE, P. R. L.; MONTEIRO, P. J. M. Reparos localizados podem ser considerados soluções eficientes para correção de problemas de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado?. In: II Congreso iberoamericano de patología de la construcción y IV Congreso de control de calidad, 1993, Barquisimeto. **Anais**... II Congreso iberoamericano de patología de la construcción y IV Congreso de control de calidad, 1993.

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

[7] NOUNU, G.; CHAUDHARY, Z. Reinforced Concrete Repairs in Beams**. Construction and Building Materials**, vol. 13, p.195-212, 1999.

[8] 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, p.535-546, jun 2003.

[9] QIAN, S.; ZHANG, J.; QU, D. Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, Volume 28, Issue 8, September 2006, p.685-695.

[10] MAILVAGANAM, N. P. Concrete Repair and Rehabilitation: Issues and Trends**. The Indian Concrete Journal**, volume 75, Pag. 759-764. 2001.

[11] VAYSBURD A. M.; EMMONS P. H.; MCDONALD J. E.; MAILVAGANAM, N.; JAMES, E.; BISSONETTE, B. Concrete Repair Technology – A Revised Approach Is Needed. **Concrete International.** Volume 26. Issue 1. Pag. 58-65. 2004.

[12] RIBEIRO, J. L. S. **Formação de Macrocélulas de Corrosão em Reparo (de Armaduras) de Estruturas de Concreto Armado**. 2005. 156 f. Exame de Qualificação e Projeto de Pesquisa para Doutorado Direto – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

[13] 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**. No. 18, p.20-24 Nov/Dez 2007,.

[14] 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**. No. 19, p. 28-29 Jan/Fev 2008.

[15] MEDEIROS, M. H. F.; SELMO, S. M. S. **Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonato: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço**. São Paulo: EPUSP, 2003. 21 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/ PCC/344).

[16] 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.

[17] SELMO, S. M. S.; BUONAPANE, R. S. B.; RIBEIRO, J. L. S.; MEDEIROS, M. H. F.; GALENI, P. C.; SILVA, T. F. Contribution to the macro and microstructure analysis of repair mortars for corroded reinforced concrete structures. In: 5th International Essen Workshop Transport ind Concrete: Nano-to Macrostructure - TRANSCON 07, 2007, Essen. **Proceedings**… 5th International Essen Workshop Transport ind Concrete: Nano-to Macrostructure - TRANSCON 07. Freiburg : Aedificatio Publishers, 2007. p. 241-250.

[18] WEST, J. M. **Eletrodeposition and corrosion process**. 2ª ed., London, Van Nostrand Reinhold Company Ltd., 1970.

[19] 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. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão, 2006.

[20] RIBEIRO, J. L. S. ; SELMO, S. M. S. Avaliação da estabilidade eletroquímica de barras de aço carbono em concreto carbonatado. In: 2nd International Corrosion Meeting, 2008, Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão, 2008.