

REPAROS LOCALIZADOS PODEM SER CONSIDERADOS SOLUÇÕES EFICIENTES PARA CORREÇÃO DE PROBLEMAS DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO?

Paulo Helene* and Paulo Monteiro**

*Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, P.O.Box 61548, SP 05424-970, Brasil

**Civil Engineering Department, University of California, Berkeley, CA 94720, USA

RESUMO

A grande maioria dos sistemas de reparo localizado de estruturas de concreto deterioradas, visam apenas a proteção efetiva da armadura na região reparada. Como se comportam as regiões adjacentes não reparadas? Após o reparo poderá haver transferência da célula de corrosão? Como avaliar a efetividade de um sistema de reparo?

Para contribuir na direção dessas respostas, foi desenvolvido programa experimental analisando-se o desempenho de cinco sistemas de reparo: argamassa de cimento e areia; pintura de base cimento com polímero modificado aplicada sobre a armadura; pintura de imprimação base epóxi aplicada sobre a armadura; aditivo inibidor de corrosão misturado à argamassa de cimento e areia e aditivo à base de microsilica também misturado à argamassa de cimento e areia.

O estudo foi efetuado em vigas de concreto armado (15x15x60 cm) submetidas a banhos de semi-imersão em solução de cloreto de sódio durante um ano. Para avaliar o desempenho dos sistemas foram adotados os métodos de potencial de corrosão (ASTM C 876), profundidade de carbonatação (RILEM CPC 18), teor de cloretos (ASTM C 1152), perda de massa (ASTM G 1) e observação visual. A transferência de local da célula de corrosão ficou evidenciada assim como uma diferenciação de comportamento entre os cinco sistemas analisados.

INTRODUÇÃO

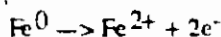
Em se tratando da deterioração de aço, dois são os processos de corrosão que podem ocorrer: o denominado de corrosão eletroquímica, de grande importância no campo da corrosão das armaduras das estruturas de concreto, e o de oxidação direta.

Na corrosão eletroquímica o fenômeno ocorre como resultado da formação de pilhas ou células de corrosão devido à presença de umidade, água ou uma solução aquosa na superfície das barras ou no concreto que a envolve, que possam atuar como eletrólito. A dissolução do aço ocorre nas regiões anódicas e o processo não é uniforme pois nas regiões catódicas o ataque pode ser considerado desprezível.

Na oxidação direta os átomos do aço reagem diretamente com o oxigênio. Geralmente é uma reação gás-metal ou íon-metal com formação de uma película uniforme e contínua de óxido de ferro. Este tipo de corrosão é muito lenta à temperatura ambiente podendo ser significativa somente em altas temperaturas.

Há portanto uma grande diferença entre os dois processos corrosivos. Na corrosão em meio aquoso ou eletroquímica, os elétrons movimentam-se no aço, partindo das regiões anódicas para as catódicas, completando-se o circuito elétrico através do eletrólito que é uma solução iônica. Na oxidação direta a capa de óxido sobre o metal atua simultaneamente como condutora de elétrons e de íons¹. Na oxidação direta em geral, os produtos da corrosão são uniformes, aderentes e podem atuar como barreira contra o meio impedindo o prosseguimento do processo e até aumentar a resistência da armadura contra a corrosão² úmida. Na corrosão eletroquímica isso dificilmente ocorrerá pois o produto da corrosão é heterogêneo, poroso, de baixa aderência e normalmente se forma fora do aço, nas vizinhanças da superfície da armadura³.

Os parâmetros principais da termodinâmica do processo de corrosão de armaduras são o pH da solução aquosa ou eletrólito e o potencial de eletrodo ou eletroquímico do aço nessa solução, também chamado de potencial de corrosão. Ao introduzir um metal numa solução aquosa com a qual não reage, há um princípio de ionização do metal que passa à solução na forma de cátions, perdendo energia até estabelecer um equilíbrio com o meio⁴:



Os elétrons ficam retidos na superfície do metal e os cátions ficam na solução, próximos da superfície do metal devido à atração elétrica dos elétrons. Moléculas polarizadas de água, ou seja, polos positivos de hidrogênio e polos negativos de oxigênio, são atraídas para a superfície do metal e formam uma camada orientada, chamada dipolo, impedindo a aproximação de cátions em solução.

O plano de cargas positivas que contem os cátions na solução, mais próximo da superfície negativa do metal é conhecido neste caso por plano de Helmholtz externo⁵. O fenômeno é conhecido por dupla camada elétrica que pode ser associada ao funcionamento elétrico de um capacitor com dimensões de micrometros. O potencial elétrico resultante é denominado potencial de eletrodo.

O potencial de eletrodo pode ser estimado através da equação de Nernst⁶:

$$E = E^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \frac{a_{\text{Me}^{n+}}}{a_{\text{Me}}} \quad \text{onde:}$$

E = potencial de eletrodo do metal, em Volts

E⁰ = potencial padrão do metal, em Volts

R = constante universal dos gases [8,314 J / (mol·K)]

T = temperatura absoluta em K (273 K=0°C)

n = valência dos íons do metal

F = constante de Faraday [96.493 Coulomb]

a_{Meⁿ⁺} = atividade dos íons metálicos na solução

a_{Me} = atividade unitária do íon metálico

A equação de Nernst pode ser usada para calcular a diferença de potencial entre duas semi-pilhas ou eletrodos quaisquer. Calcula-se o potencial para cada uma em separado e procede-se à subtração. Resultado positivo indica que o primeiro eletrodo terá caráter catódico e o segundo, anódico. Esses princípios embasam o procedimento de ensaio ASTM C 876 que foi utilizado como um dos instrumentos de avaliação da corrosão neste experimento.

O estudo experimental desenvolvido nos laboratórios da Universidade da Califórnia, em Berkeley, teve por objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de metodologia de avaliação de desempenho de materiais e sistemas de reparo localizado de estruturas com problemas de corrosão de armaduras. Para tal, além do potencial de corrosão foi determinado o teor de cloretos, conforme ASTM C 1152, a diferentes níveis de profundidade com o objetivo de comprovar o movimento dos íons cloreto dentro do eletrólito, em função dos campos elétricos gerados pela movimentação da célula de corrosão. A medida da profundidade de carbonatação pelo método RILEM CPC 18 visou avaliar o efeito desta na liberação de cloretos eventualmente retidos pela formação do sal de Friedel, ou seja, do cloroaluminato de cálcio.

Ao final dos ensaios, após um ano, os corpos de prova prismáticos foram rompidos e observados detalhadamente, registrando-se por fotos e comparação, o estado de corrosão das barras. A seguir as barras foram limpas e pesadas de acordo com o procedimento ASTM G 1, determinando-se então a perda final de massa das armaduras principais.

Nesta comunicação técnica que é parte de uma série de artigos sobre o tema, apresenta-se e discute-se principalmente, os resultados obtidos a partir do potencial de corrosão, da observação visual e da perda de massa, reservando-se a discussão das demais determinações para outros artigos.

PROGRAMA DE ENSAIOS

Reparo e medidas

As dimensões e localização da região reparada, efetuada após comprovação de corrosão das barras numa idade em torno de 2 meses, estão apresentados na Fig. 1. Na mesma figura apresenta-se também a localização dos eletrodos de referência para medida do potencial de corrosão.

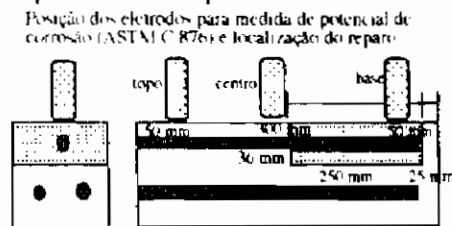
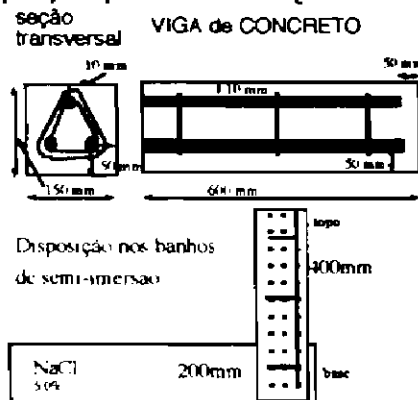


FIGURA 1 Representação esquemática da posição e dimensões das regiões reparadas, assim como indicação da posição de colocação dos eletrodos de referência para medida do potencial de corrosão (ASTM C 876)

Corpos de prova

Os corpos de prova de concreto armado, especialmente desenvolvidos para este experimento, tiveram a forma, a composição e a disposição apresentadas na Fig. 2.



Obs: as extremidades das barras foram protegidas com pintura de base epóxi, numa extensão da ordem de 1cm, para evitar distorções de comportamento devidas à operação de corte das barras. A extremidade externa foi, ainda, envolvida por mastique de base silicone.

FIGURA 2. Dimensões e disposições dos corpos de prova prismáticos utilizados no experimento.

Sequência geral do ensaio

- Limpeza das barras por escovamento seguido de limpeza com pano embebido em solvente de base acetona
- Moldagem dos corpos de prova prismáticos (15cmx15cmx60cm) e conservação em câmara úmida, (23 ± 2)°C e UR $\geq 98\%$, por 7 dias.
- Medida do potencial de corrosão nesses prismas.
- Medida da migração de cloretos conforme ASTM C 1202, porosidade conforme ASTM C 642 e resistência à compressão conforme ASTM C 39, em corpos de prova do concreto de referência e em corpos de prova da argamassa de reparo de referência, ambos a 7 dias.
- Manutenção dos corpos de prova prismáticos em banho de semi-imersão em solução de cloreto de sódio a 5,0%, em temperatura de (38 ± 1)°C e UR (65 ± 5)% na parte externa do corpo de prova. Medida do potencial de corrosão a cada 7 dias.
- Aos 49 dias após comprovação do potencial de corrosão e retirada do banho de semi-imersão. Aos 56 dias de idade nova medida do potencial de corrosão e início das operações de reparo.
- Manutenção dos corpos de prova prismáticos reparados em câmara úmida até a idade de 7 dias, após reparo. A seguir medida do potencial de corrosão e conservação em banhos de semi-imersão em sala climatizada conforme apresentado na alínea e).
- Manutenção dos corpos de prova, prismáticos e reparados, em solução de semi-imersão em sala climatizada avaliando-se o potencial de corrosão a cada 7 dias por um período total de um ano a contar da data de moldagem dos corpos de prova prismáticos com o concreto de referência.

Materiais básicos do concreto de referência

Cimento Portland comum de acordo com a ASTM C 150, tipo I-II, com composição potencial de $C_3S = 57,50\%$; $C_2S = 19,80\%$; $C_3A = 4,50\%$ e $C_4AF = 11,20\%$, e massa específica de 3120 kg/m^3

Areia natural de rio foi empregada como agregado miúdo, em conformidade com ASTM C 33, com dimensão máxima característica, $D_{\max} = 2,4 \text{ mm}$, módulo de finura MF = 3,1, massa específica de 2640 kg/m^3 e absorção de água para a condição de saturado-superfície seca, de 1,45%, em massa.

Seixo rolado de rio foi utilizado como agregado graúdo, em conformidade com a ASTM C 33, possuindo a seguinte composição mineralógica básica; Metagraywacke, 32 a 38%; Graywacke, 21 a 23%; Chert, 11 a 18%; Metabasic igneous, 13 a 16%; Vein quartz, 8 a 10%; Granite, meta volcanic, quartzite, 1 a 5%; Serpentine, 1 a 2%. Dimensão máxima característica $D_{\max} = 19 \text{ mm}$, módulo de finura MF = 5,88, massa específica de 2680 kg/m^3 , e absorção de água na condição de saturado-superfície seca de 0,34%, em massa

Cloreto de cálcio foi utilizado como aditivo com o objetivo de criar condições para a aceleração do processo de corrosão, no teor de 1% de CaCl_2 em relação à massa de cimento, ou seja, 0,71% de teor de cloretos em relação ao cimento

Barras de aço laminadas a quente, classe 60, em conformidade com a ASTM A 615, diâmetro nominal de 12,7 mm, # 4. Estribos de diâmetro de 4 mm

A composição e características do concreto de referência estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Composição e características do concreto de referência.

Concreto	Descrição	Significado	Unidade	Valor
composição	cimento		kg / m ³	305
	agregado miúdo	areia	kg / m ³	951
	agregado graúdo	seixo	kg / m ³	912
	água		kg / m ³	198
	cloro de cálcio		kg / m ³	2,16
concreto fresco	teor de argamassa seca	(cimento + areia) / (cimento+areia+seixo)	%	58
	ar aprisionado	vol vazios / vol total	%	0,61
	traço a/c	(areia+seixo) / cimento	kg / kg	6,11
	abatimento	água / cimento	kg / kg	0,65
	massa específica		mm	50±10
concreto endurecido	resistência à compressão ASTM C 39	7 dias	MPa	26,6
		28 dias	MPa	32,1
		63 dias	MPa	37,8
		1 ano	MPa	40,7
	penetração de cloretos ASTM C 1202	7 dias	C	11.500
		28 dias	C	8.530
		63 dias	C	6.420
		1 ano	C	4.400
	porosidade ASTM C 642	7 dias (vol. vazios / vol. total)	%	11,4
		28 dias (vol. vazios / vol. total)	%	9,6
		63 dias (vol. vazios / vol. total)	%	9,4
		1 ano (vol. vazios / vol. total)	%	9,0
	carbonatação RILEM CPC 18	(38±1)°C UR (65±5)%	mm	≤8

Materiais básicos da argamassa de reparo, de referência

Na argamassa de reparo, utilizada como referência para todos os serviços de reparação, foi utilizados o mesmo cimento e a mesma areia utilizada no concreto de referência. Neste caso não foi utilizado aditivos.

As proporções da argamassa fresca e endurecida, estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2. Composição e características da argamassa de referência.

Argamassa	Descrição	Significado	Unidade	Valor
composição	cimento		kg / m ³	692
	agregado miúdo	areia	kg / m ³	1385
	água		kg / m ³	243
argamassa fresca	ar aprisionado	vol. vazios / vol total	%	1,27
	traço a/c	areia / cimento	kg / kg	2,0
	abatimento	água / cimento	kg / kg	0,35
	massa específica		mm	120±20
argamassa endurecida	resistência à compressão ASTM C 39	28 dias	MPa	51,6
		300 dias (10 meses)	MPa	59,8
	penetração de cloretos ASTM C 1202	28 dias	C	4.350
		300 dias (10 meses)	C	2.830
	porosidade ASTM C 642	28 dias (vol. vazios / vol. total)	%	12,
carbonatação RILEM CPC 18	300 dias (vol. vazios / vol. total)	%	10,6	
	(38±1)°C UR (65±5)%	mm	≤3	

Materiais de reparo

- Pintura base cimento modificada com polímero, bi-componente, aplicada diretamente sobre a superfície das barras. Segundo o fabricante destina-se a proteger as barras contra água e penetração de cloretos. Tem coloração cinza esverdeado.
- Pintura de imprimação base epóxi, mono-componente, aplicada diretamente sobre a superfície das barras. Segundo o fabricante destina-se a proteger as barras contra água, carbonatação e cloretos.
- Inibidor de corrosão à base de nitrato de cálcio, líquido. Deve ser adicionado à argamassa de reparo como um aditivo e deve ser bem disperso. Segundo o fabricante destina-se a proteger a armadura contra a penetração de agentes agressivos, especialmente contra cloretos. A argamassa de referência, com este aditivo

apresentou características equivalentes à da argamassa de reparo (vide Tabela 2), à exceção da penetração de cloretos que caiu para 2360 C a 28 dias e 2140 C a 300 dias.

- Aditivo para concreto e argamassa à base de microssilica. Deve ser adicionado à argamassa de reparo como um aditivo e deve ser bem disperso. Segundo o fabricante destina-se a proteger a armadura contra a penetração de agentes agressivos, especialmente contra cloretos, destinando-se tanto a obras novas como a reparos. A argamassa de referência, com este aditivo apresentou características de penetração de cloretos de 380 C a 28 dias e de 325 C a 300 dias. A resistência à compressão subiu a 60,3 MPa a 28 dias e 66,7 MPa a 300 dias. A porosidade caiu para 8,8% a 28 dias e 7,1 a 300 dias. A profundidade de carbonatação foi ≤ 4 mm.

Sistemas de reparo

1. Sistema I - argamassa de referência

Corte do contorno do reparo com disco de corte, seguido de demolição do concreto em profundidade que alcance 2 cm abaixo da armadura. Limpeza dos produtos de corrosão com água, lixa e escova de aço, até metal brilhante. Saturação do substrato com água potável, colocação de fôrmas e preenchimento da região com argamassa bem adensada. Cura úmida.

2. Sistema II - pintura com produto base cimento modificado com polímero

Corte do contorno do reparo com disco de corte, seguido de demolição do concreto em profundidade que alcance 2 cm abaixo da armadura. Limpeza dos produtos de corrosão com água, lixa e escova de aço, até metal brilhante, seguido de pano com acetona. Após 20 minutos a pintura foi aplicada com pincel observando-se três demãos defasadas de 15 minutos uma da outra. Os dois componentes da tinta foram previamente misturados mecanicamente por pelo menos três minutos assegurando uma boa e homogênea mistura. A argamassa de reparo foi aplicada mais tarde, cuidadosamente, após comprovação que a pintura estava seca ao toque. Colocação de fôrmas e preenchimento da região com argamassa bem adensada. Cura úmida.

3. Sistema III - pintura de imprimação base epóxi

Corte do contorno do reparo com disco de corte, seguido de demolição do concreto em profundidade que alcance 2 cm abaixo da armadura. Limpeza dos produtos de corrosão com água, lixa e escova de aço, até metal brilhante, seguido de limpeza com pano com acetona. Após 20 minutos a pintura foi aplicada com pincel observando-se apenas uma demão. A argamassa de reparo foi aplicada mais tarde, após 15 minutos, cuidadosamente, após comprovação que a tinta não estava seca ao toque, a fim de assegurar a aderência. Colocação de fôrmas e preenchimento da região com argamassa bem adensada. Cura úmida.

4. Sistema IV - aditivo inibidor de corrosão

Corte do contorno do reparo com disco de corte, seguido de demolição do concreto em profundidade que alcance 2 cm abaixo da armadura. Limpeza dos produtos de corrosão com água, lixa e escova de aço, até metal brilhante. A argamassa de reparo foi aplicada com o aditivo na proporção de 4,5% de aditivo líquido por massa de cimento. Saturação do substrato com água potável, colocação de fôrmas e preenchimento da região com essa argamassa aditivada bem adensada. Cura úmida.

5. Sistema V - 3.4.5 System V - Microsilica-based admixture+reference mortar

Corte do contorno do reparo com disco de corte, seguido de demolição do concreto em profundidade que alcance 2 cm abaixo da armadura. Limpeza dos produtos de corrosão com água, lixa e escova de aço, até metal brilhante. A argamassa de reparo foi aplicada com o aditivo na proporção de 12% de aditivo por massa de cimento. Saturação do substrato com água potável, colocação de fôrmas e preenchimento da região com essa argamassa aditivada bem adensada. Cura úmida.

RESULTADOS OBTIDOS

Observação visual

No encerramento da avaliação experimental todos os corpos de prova prismáticos foram rompidas seguindo-se uma observação visual cuidadosa. As observações efetuadas estão descritas nas Figs. 3 a 8.

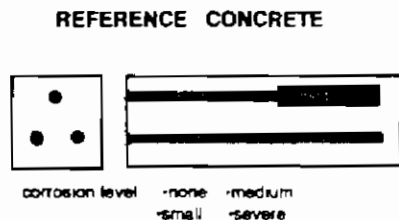


FIGURA 3. Estado da corrosão nos corpos de prova prismáticos, para o concreto de referência, sem reparo

**REFERENCE MORTAR
System I**

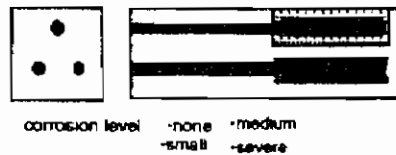


FIGURA 4. Estado da corrosão nos corpos de prova prismáticos, para a argamassa de referência, prisma reparado.

**Polymer-Modified
Cementitious Coating
System II**

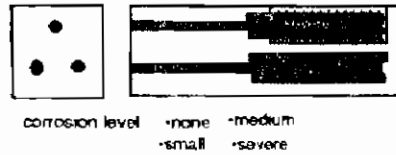


FIGURA 5. Estado da corrosão nos corpos de prova prismáticos, para o sistema II, prisma reparado.

**Epoxy Primer Coating
System III**



FIGURA 6. Estado da corrosão nos corpos de prova prismáticos, para o sistema III, prisma reparado.

**Corrosion Inhibitor Admixture
System IV**

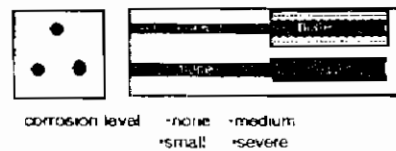


FIGURA 7. Estado da corrosão nos corpos de prova prismáticos, para o sistema IV, prisma reparado.

**Microsilica-Based Admixture
System V**

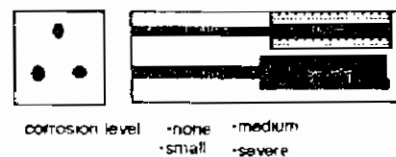


FIGURA 8. Estado da corrosão nos corpos de prova prismáticos, para o sistema V, prisma reparado.

Perda de massa

No encerramento da avaliação experimental as vigas foram rompidas para observação visual e medida da perda de massa. Para tal as barras foram submetidas a um processo de limpeza dos produtos de corrosão. O método utilizado para tal procedimento foi o descrito na ASTM G 1. De acordo com esse procedimento, as barras foram limpas através de banhos sucessivos numa solução composta de 500 ml de ácido clorídrico, 3.5g de hexametileno tetramina e água destilada para completar 1000 ml. Foram estabelecidos ciclos de cerca de 10 minutos de imersão na solução, seguido de lavagem com água destilada e determinação da massa da barra. O número de ciclos (ou banhos) de lavagem prosseguiu até constância de peso estabelecida para duas medidas consecutivas com diferença menor que três centésimos de grama. As barras apresentaram limpeza satisfatória com o processo que retirou produtos de corrosão e eventuais restos de argamassa aderida.

Resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3

TABELA 3. Perda de massa após um ano. Valores médios de 5 corpos de prova.

Barra considerada	Concreto de referência	Argamassa de referência	Sistema II	Sistema III	Sistema IV	Sistema V
	não reparado	reparado	reparado	reparado	reparado	reparado
barra principal	0,606	0,223	0,681	0,125	0,005	0,006
barra esquerda	0,004	0,548	0,655	0,552	0,571	0,691
barra direita	0,004	0,528	0,683	0,538	0,533	0,709

Potencial de corrosão

Os resultados obtidos estão apresentados na Fig. 9.

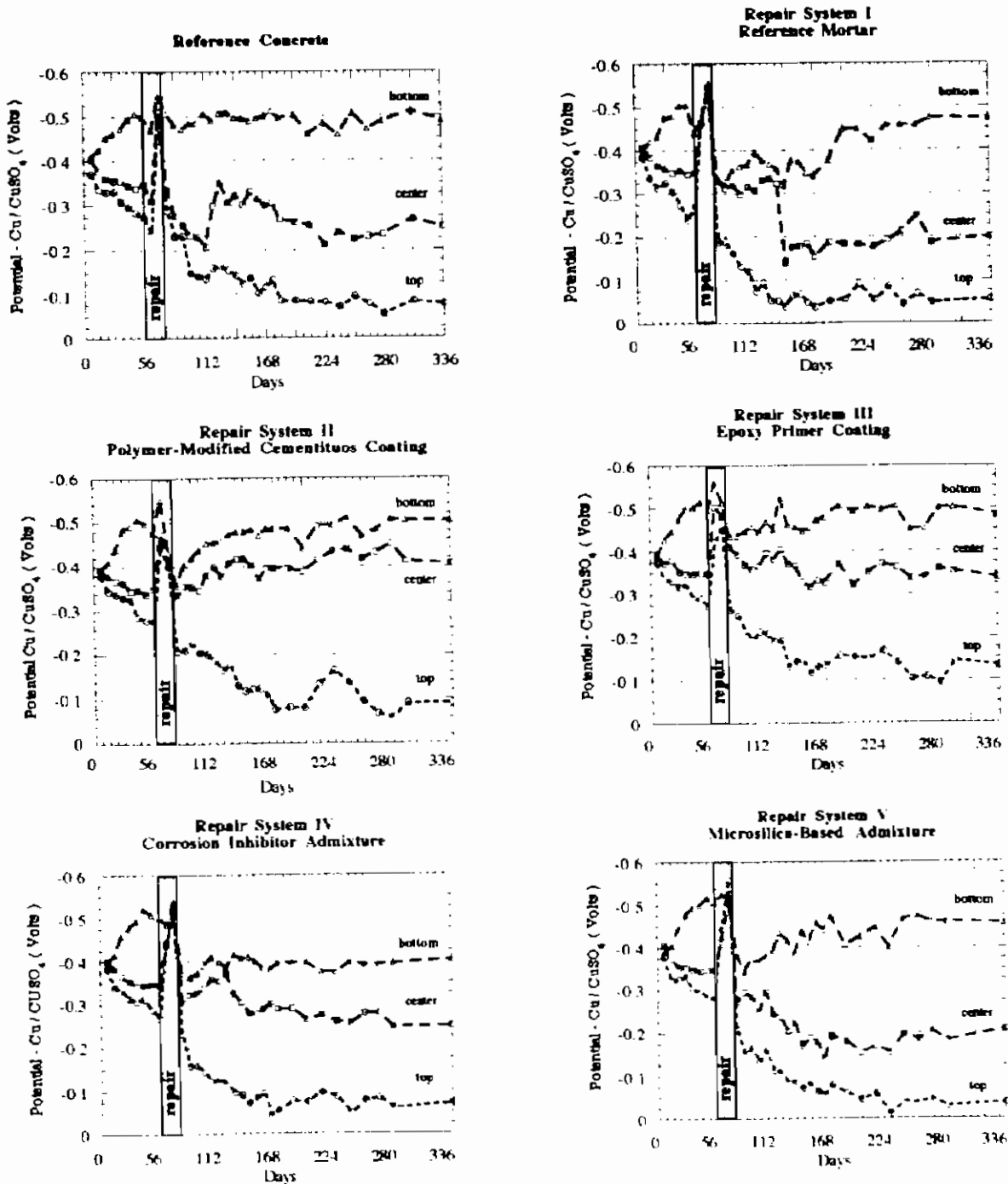


FIGURA 9. Potencial de corrosão (ASTM C 876) obtido dos diversos sistemas, em relação à barra principal de cobrimento igual a 1 cm, no prazo de 1 ano, em Volts. Notar período de reparo.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme é possível observar nos gráficos da Fig. 9, todos os corpos de prova apresentaram a mesma tendência (sempre referida à armadura principal) nos primeiros 63 dias, ou seja, até a idade de reparo. Os mais de 32 corpos de prova apresentaram um potencial de corrosão inicial em torno de $-0,4$ V nas três posições; topo, centro e base. Na região central e no topo o potencial foi progressivamente elevando-se até a data de reparo, demonstrando a passivação da armadura nessas regiões. Na região da base, no entanto, o potencial reduziu-se mostrando que a configuração geométrica do corpo de prova e do banho de semi-imersão escolhidos, foram adequados e induziram a corrosão a manifestar-se numa região localizada na interface solução/ar. Efetuados os diferentes reparos nessa região e retornando os corpos de prova novamente às condições de exposição, foi possível notar um comportamento distinto entre cada sistema utilizado. Enquanto a armadura principal no concreto de referência, na argamassa de referência, no sistema IV e no sistema V mantiveram-se praticamente passivadas na região central e no topo, os sistemas II e III, de pintura sobre a barra, mostraram potenciais característicos de despassivação para a região central. Todos, no entanto indicavam potenciais característicos de corrosão na região da base.

Na realidade os critérios de julgamento sugeridos pelo método da ASTM C 876, estabelecidos a partir de levantamentos de Stralfull^{7,8}, efetuados no início da década de 70, em tabuleiros de ponte que apresentavam corrosão típica de ação de sais de descongelamento, devem ser tomados com certa precaução, ou seja, não valem sempre como valores absolutos, sendo aceitáveis apenas como referência, conforme mostrado no estudo comparativo publicado por Elsener e Bohni⁹.

Essa relatividade, no entanto, não desmerece o método, ao contrário, se bem utilizado e combinando-se os resultados com outras determinações de teor de cloretos, resistividade do concreto e profundidade de carbonatação, por exemplo, é perfeitamente possível estabelecer um quadro claro da situação de corrosão na estrutura ou em laboratório. Este método é normalmente utilizado para registrar uma dada situação em termos de probabilidade de corrosão permitindo também acompanhar a evolução no tempo, ou seja fazer um monitoramento da estrutura ou corpo de prova em estudo.

Babaei¹⁰ cita as experiências positivas de mais de nove Departamentos Estaduais de Transporte nos Estados Unidos e na Inglaterra que vêm utilizando este método com sucesso. Apresenta ainda resultados de reprodutibilidade e repetibilidade do ensaio efetuado com dois equipamentos distintos na mesma área e com o mesmo equipamento aplicado nos mesmos pontos mais de cinco vezes, encontrando desvio padrão dentro do ensaio de $0,007$ V e desvios de média para mesmo ponto, nas mesmas condições de medida e exposição, da ordem de $0,010$ V.

No presente estudo experimental em 32 corpos de prova moldados nas mesmas condições e submetidos a idênticas condições de exposição, até idade de reparo, obtém-se desvio padrão médio total de ensaio e fenômeno¹¹ de $0,026$ V, com variabilidade média total, expressa pelo coeficiente de variação, de apenas 7% . Os resultados distribuíram-se aleatoriamente e independentemente do estado de corrosão da armadura, se ativo ou passivado. Esses resultados, por si só demonstram que esta metodologia é confiável, com variabilidade inferior à normalmente aceita em resultados consagrados de ruptura de corpos de prova à compressão axial, em concretos.

Considerando que a magnitude da diferença de potencial entre regiões vizinhas pode ser um indicativo da intensidade da corrosão, verifica-se a partir da Fig. 10, e tomando-se a diferença topo/centro como referência, que o sistema II e III parecem apresentar elevadas taxas de corrosão. A observação visual feita a posteriori assim como a perda de massa comprovam essa inferência feita a partir dos resultados de potencial.

A observação visual mostra também que enquanto a armadura principal no concreto de referência, não reparado, é a única a apresentar corrosão, ou seja, é a única a manter a célula de corrosão com a região anódica estável, os demais sistemas de reparo não são suficientes para impedir o aparecimento de corrosão nas armaduras auxiliares, mesmo estando estas com cobertura mínima de 5 cm. Essa transferência da célula de corrosão, aventada na literatura especializada, deve-se, neste caso, ao fato do concreto original de referência, possuir um certo teor elevado de cloretos o que facilitou a transferência rápida (um ano) da célula de corrosão eletroquímica. Num caso real, de concreto contaminado apenas com cloretos provenientes do exterior, essa transferência poderá tardar bem mais tempo e conseqüentemente o sistema apresentar-se, nesse período inicial, como aparentemente eficiente.

Os sistemas IV e V mostraram ser os melhores na proteção da região reparada, comprovando uma vez mais a eficiência dos inibidores de corrosão à base de nitrato de cálcio e a reduzida difusividade de íons dos concretos e argamassas com microfibras, que são capazes de impedir por longos períodos a penetração dos cloretos.

CONCLUSÕES

Com base nas determinações efetuadas pode-se concluir:

- em concretos de qualidade média, expostos a meio ambiente agressivo e com elevados níveis de contaminação, os reparos localizados podem dar origem rápida a outros pontos de corrosão, aumentando o problema ao invés de reduzi-lo, ou seja, há um risco elevado de transferência de local das células de corrosão eletroquímica, alternando posição entre ânodos e cátodos. Os reparos localizados não devem ser adotados nessas situações. Medidas complementares¹² tais como: redução da agressividade ambiente, proteção superficial por barreiras, realcalinização do concreto e remoção eletroquímica de íons

contaminantes, ou até mesmo proteção catódica do tipo galvânica ou de corrente impressa, devem ser empregadas;

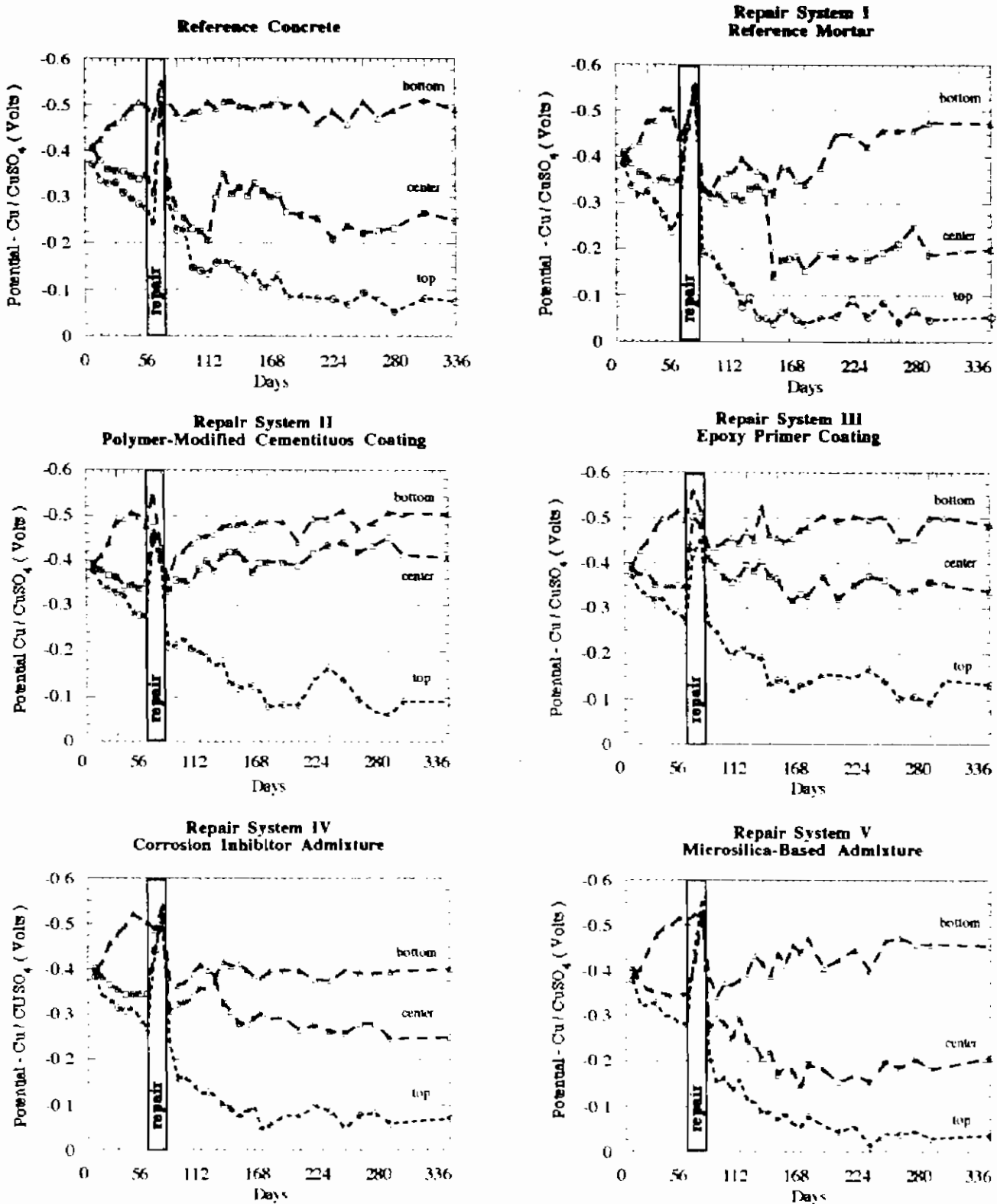


FIGURA 10. Diferença de potencial de corrosão, em V, entre as três regiões estudadas (topo, centro e base) nos corpos de prova prismáticos e armados, referido à barra principal de cobrimento igual a 1 cm. Período de 1 ano, indicando-se também o período de reparo.

- b) os inibidores de corrosão e a microsilica, utilizados como aditivos de argamassas de reparo de concreto exposto a ambiente com cloretos, são capazes de proteger e manter a passivação das barras nas regiões reparadas, por longos períodos de tempo.
- c) as pinturas à base de cimento modificado por polímeros e à base de epóxi, estudadas neste trabalho, assim como a tradicional argamassa de cimento e areia, não mostraram-se eficientes nem capazes de impedir o retorno da corrosão nos locais reparados;
- d) há necessidade de desenvolver metodologias de ensaio adequadas para estudar a questão dos reparos de estruturas de concreto com armaduras corroídas. Estudos que se limitem apenas a analisar a proteção nos locais reparados, como se tratasse de obra nova, não são suficientes para cobrir todas as variáveis em jogo. A observação visual e a determinação da perda de massa ainda parecem ser indispensáveis. O potencial de corrosão pode auxiliar no acompanhamento do fenômeno. Recursos mais recentes tais como impedância eletroquímica¹³ e resistência de polarização¹⁴ devem ser incorporados nestas análises de desempenho, afinando a apreciação dos fenômenos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Jon Asselans do laboratório de engenharia civil, ao mestrando Jorge Quiñones e especialmente ao engenheiro David Trejo, todos da UC Berkeley, pela valiosa colaboração nos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GONZALEZ FERNANDEZ, J. A. *Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión*. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1984. p. 10.
2. TREADAWAY, K. W. J., COX, R. N.; BROWN, B. L. Durability of Corrosion Resisting Steels in Concrete. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, v. 86, part 1, p. 305-31, Apr. 1989.
3. HELENE, Paulo R. L. *Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado*. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, fev. 1993. (tese de livre-doutoramento)
4. MAILVAGANAM, Noel P. *Repair and Protection of Concrete Structures*. Boca Raton, CRC Press, 1992.
5. JONES, Denny A. *Principles and Prevention of Corrosion*. New York, 1992. p. 39-45.
6. Walther Hermann Nernst (1864 - 1941) químico alemão, um dos fundadores da físico-química moderna. Recebeu o prêmio Nobel de Química em 1920 pela formulação da terceira lei da termodinâmica.
7. STRATFULL, R. F. *Half-Cell Potentials and the Corrosion of Steel in Concrete*. California Department of Transportation, Sacramento, 1972. (Research Report, CA-HY-MR-5116-7-72-42)
8. —. Half cell Potentials and the Corrosion of Steel in Concrete. *Highway Research Record*, n. 433, p. 12-21, 1973.
9. EISENER, B., BOHNI, Hans. Potential Mapping and Corrosion of Steel in Concrete. In: Neal S. Berke; Victor Chaker, David Whiting, eds. *Corrosion Rates of Steel in Concrete*. Philadelphia, ASTM, 1990. p. 143-56 (STP 1065).
10. BABAEI, Khosrow. *Evaluation of Half-Cell Corrosion Detection Test for Concrete Bridge Decks: final report*. Seattle, Washington State Department of Transportation, Nov. 1986. (WA-RD 95-1)
11. O desvio padrão total de ensaio e fenômeno, σ_{pc} , representa a variabilidade devida ao ensaio, σ_e , e a variabilidade devida ao fenômeno propriamente dito, $\sigma_{efetivo}$, estando assim relacionados $\sigma_{pc}^2 = \sigma_e^2 + \sigma_{efetivo}^2$.
12. MEHTA, P. K., SCHISSL, P., RAUPACH, M. Performance and Durability of Concrete Systems. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 9., New Delhi, Nov. 1992. *Proceedings*. s.n.t.
13. ANDRADE, C. *Manual para Diagnóstico de Estruturas com Armaduras Corroídas*. trad. Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, PINI, 1992.
14. —. Monitoring Techniques. In: P. Schiessl, ed. *Corrosion of Steel in Concrete*. RILEM Report of Technical Committee 60-CSC. London, Chapman & Hall, 1988. p. 79-94.