Copyright 2010, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Estudo teórico da corrosão por macrocélula em armaduras de aço-carbono expostas a reparos localizados em estruturas de concreto

José Luis Serra Ribeiro[1], Silvia Maria de Souza Selmo[2], Zehbour Panossian[3]

Abstract

The technique used most of corrective intervention in concrete structures with corrosion of reinforcement is located in the repair mortars based on Portland cement. One of the deterioration of reinforced concrete structures, more frequent, when the use of this type of intervention is the back of corrosion, however, located in an area adjacent to the repair, which was protected before. The mechanism of corrosion is commonly attributed to macrocell corrosion by electrochemical incompatibility between the repair material and the original concrete. This work is a theoretical review on the mechanisms of formation of corrosion macrocell by electrochemical incompatibility, due to localized repair of mortar. The aim is to contribute to your understanding. It is focused the behavior of electrochemical repair of reinforced concrete in structures with corrosion induced by carbonation, in a theoretical situation and ideal, ie not for a repair cracks. Based on the principles of Electrochemistry, are interpreted the likely mechanisms of premature corrosion of reinforcement in regions adjacent to repair located in that situation.

Key-words: reinforced concrete, repair compatibility, galvanic corrosion, carbon steel.

Resumo

A técnica de intervenção corretiva mais utilizada em estruturas de concreto com corrosão de armaduras é a de reparos localizados com argamassas à base cimento Portland. Uma das deteriorações das estruturas de concreto armado mais freqüentes, quando do uso deste tipo de intervenção, é a volta da corrosão, porém, localizada em área adjacente ao reparo, a qual antes estava protegida. Este mecanismo de corrosão é comumente atribuído à corrosão por macrocélula por incompatibilidade eletroquímica entre o material de reparo e o concreto original. Este trabalho faz uma revisão teórica sobre os mecanismos de formação de macrocélula de corrosão por incompatibilidade eletroquímica, decorrente de reparos localizados de argamassa, com a finalidade de contribuir no seu entendimento. É focalizado o comportamento eletroquímico de reparos em estruturas de concreto armado com corrosão induzida por carbonatação e em estruturas com corrosão induzida por contaminação com íons cloreto, em uma situação ideal, para reparos não fissurados. Com base nos princípios da Eletroquímica, são interpretados os prováveis mecanismos da corrosão prematura da armadura, em regiões adjacentes a reparos localizados, nesta situação

[1] Doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
[2] Professora Doutora da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
[3] Especialista em Corrosão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Professora de Pós-Graduação da Escola Politécnica da USP

Palavras-chave: concreto armado, reparo de argamassa, corrosão galvânica, aço-carbono, corrosão, macrocélula.

Introdução

As tecnologias de controle da corrosão de armaduras em estruturas de concreto baseiam-se na intervenção em uma ou mais etapas do processo corrosivo e são classificadas de acordo com o seu principal mecanismo de ação: repassivação, inibição, barreira (na barra ou na superfície do concreto) e proteção catódica [1, 2].

Segundo Emmons e colaboradores, a compatibilidade de um sistema de reparo é o equilíbrio das propriedades físicas, químicas e eletroquímicas entre o reparo e o substrato. Estas propriedades devem 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.

Os sistemas de reparo localizado de estruturas de concreto deterioradas por corrosão de armadura são usualmente compostos de tratamentos do concreto e da armadura, ponte de aderência e argamassa de reparo, para restaurar a geometria inicial da peça de concreto. Atuam, em geral, por mecanismo misto de repassivação e barreira. Especialistas concluíram há algum tempo que os sistemas que atuam por repassivação induzem a um aumento da atividade de corrosão na zona não reparada, adjacente ao reparo (substrato), caso esteja carbonatada ou contaminada por íons cloreto, acima de um limite crítico, neste segundo caso [3, 4].

O objetivo deste artigo é fazer uma discussão teórica sobre os mecanismos de formação de macrocélulas de corrosão por concentração diferencial, decorrente de reparos localizados, com a finalidade de contribuir no seu entendimento. É interpretado o comportamento eletroquímico de reparos não-fissurados em estruturas de concreto armado com corrosão induzida por carbonatação e com corrosão induzida por contaminação com íons cloreto.

1 Corrosão de armadura induzida por reparo localizado

As principais causas relacionadas com a corrosão prematura do aço, após um reparo localizado com material à base de cimento Portland, são as fissuras, decorrentes da retração plástica ou por secagem da argamassa; as mudanças no interior do concreto original, causadas pelo reparo; e a incompatibilidade eletroquímica entre o reparo e o substrato [5].

A retração plástica e a retração por secagem, inerentes aos materiais à base de cimento Portland, são talvez as variáveis mais importantes para a durabilidade dos reparos, mas são processos contínuos e de difícil distinção na prática. Quando uma argamassa compacta possui baixa retração e elevada resistência à tração, o reparo resulta com uma permeabilidade baixa. Porém, as argamassas de cimento Portland são materiais frágeis e freqüentemente apresentam microfissuras decorrentes, principalmente, da retração por secagem. A restrição da retração pelo substrato de concreto provoca o surgimento de tensões de tração diferenciais no reparo. Quando estas tensões ultrapassam a resistência à tração da argamassa, aparecem as fissuras. As fissuras dependem das propriedades da argamassa, como o módulo de elasticidade, a contração dimensional pela secagem inicial, a resistência à tração e a deformação lenta.

Nos materiais cimentícios, como é o caso das argamassas, algumas propriedades são antagônicas, por exemplo: quanto maior a resistência à tração, maior o módulo de elasticidade e o risco de retração é mais alto. Assim, as fissuras de retração podem aparecer nas interfaces do reparo com o concreto ou regularmente espaçadas no interior do reparo. As partes da armadura, assim expostas, são, em seqüência, despassivadas pela ação da carbonatação da argamassa junto às fissuras ou pela contaminação por íons agressivos que podem induzir à corrosão na região do reparo.

Além disso, após a execução de um reparo localizado, são estabelecidas sobre a armadura duas regiões de eletrólito com características diferentes: o meio proporcionado pelo concreto original (substrato) e o meio proporcionado pelo sistema de reparo. Assim, pode surgir a incompatibilidade eletroquímica que é o desequilíbrio do potencial eletroquímico entre diferentes locais de uma barra de aço, causado pelas diferenças de composição química dos meios proporcionados pelo reparo e o concreto do substrato [6]. Nessas condições, podem surgir áreas anódicas e catódicas decorrentes da heterogeneidade do meio proporcionada pela diferença de concentração de uma ou mais espécies ativas. Esse mecanismo ocorre como conseqüência do estabelecimento de macrocélulas de corrosão entre aquelas regiões de eletrólitos com características diferentes e eletricamente conectadas. Neste trabalho, esse processo corrosivo é denominado de corrosão por concentração diferencial[1].

O entendimento e aplicação dos princípios da Eletroquímica, para minimizar as causas da incompatibilidade e a corrosão por concentração diferencial, são essenciais para o projeto de reparos duráveis. A importância da compatibilidade eletroquímica para a durabilidade do reparo tem sido enfatizada por alguns pesquisadores [7, 8, 9].

Gulikers e van Mier [3] 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. Seus estudos mostraram que reparos localizados de argamassa à base de cimento Portland induzem a uma grave corrosão por macrocélula.

Schiessl e colaboradores [4] e Raupach [10, 11] pesquisaram o comportamento do aço em estruturas de concreto com reparos localizados. Estes autores estudaram o comportamento da corrosão do aço no substrato, antes e após a execução do reparo e constataram que, quando o concreto do substrato (carbonatado ou contaminado por cloreto) não é totalmente removido, ocorre corrosão por macrocélula após o reparo.

Zhang e Mailvaganam [12] fizeram uma revisão teórica, para verificar a correlação entre os mecanismos de corrosão por macrocélula e por microcélula. No seu estudo analisaram os principais fatores que caracterizam a corrosão em reparos localizados e concluíram que há necessidade de mais pesquisas focadas na identificação dos mecanismos de corrosão, para que os reparos localizados em estruturas de concreto sejam bem sucedidos.

1.1 Comportamentos do aço imerso em concreto ou argamassa

A corrente e o potencial de corrosão de um metal imerso em um meio corrosivo podem ser determinados teoricamente pela representação gráfica das curvas de polarização das reações

[1] No meio técnico da Engenharia Civil, a corrosão de armaduras de concreto devida às macrocélulas é também mencionada como corrosão galvânica.

anódicas e catódicas, por meio dos diagramas de Evans, com fundamentos já bem estabelecidos e discutidos em livros e manuais de Eletroquímica [13, 14, 15]. 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 íons cloreto.

A Figura 1(a) ilustra a cinética da corrosão do aço num meio alcalino (pH de 12 a 14), sem contaminação por íons agressivos, como no caso do concreto ou argamassa não-carbonatados; a Figura 1(b) mostra o caso de corrosão de armadura em um concreto ou argamassa carbonatados (pH < 9); e a Figura 1(c) ilustra a situação em que estes estão apenas contaminados por íons cloreto. Segundo Panossian [14], nestes casos, as duas reações prováveis de ocorrer são:

- reação anódica em meio não-carbonatado: $3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 8H^+ + 8e^-$ (1)
- reação anódica em meio carbonatado: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (2)
- reação catódica em ambos os meios: $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ (3)

Na Figura 1(a), a curva **A1** representa a reação anódica da corrosão de armadura no concreto não-carbonatado. Nesta condição, a curva anódica apresenta apenas a região passiva[2]. A curva **A2**, na Figura 1(b), representa a reação anódica em um concreto carbonatado, e a curva **A3,** na Figura 1(c), a reação anódica em um concreto não carbonatado e contaminado com íons cloreto. As curvas **C1, C2** e **C3** referem-se à reação catódica, representando a reação de redução do O_2. 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}).

1.2 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.

1.2.1 Corrosão por microcélulas e por pite no aço em região do concreto original

Normalmente, a frente de carbonatação ou de cloreto avança para o interior 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. Desse modo, a frente de contaminantes pode atingir a armadura e despassivá-la, inicialmente em pontos isolados, levando à corrosão da armadura em regiões descontínuas, como na Figura 2(a).

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

A atividade anódica numa região da superfície do aço polariza catodicamente a barra de aço nas suas áreas adjacentes. Assim, devido à alcalinidade decorrente da produção de hidroxilas que sustenta o processo corrosivo, essas áreas podem resistir mais ao avanço da frente de carbonatação, mantendo a passivação do aço nessas áreas (áreas catódicas). Por outro lado, no caso de contaminação por cloreto, a polarização catódica dos trechos adjacentes pode manter 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 [11].

A substituição do material que envolve o trecho da armadura em corrosão, pelo material de reparo, repassiva o aço na zona reparada 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 ou de cloreto, já adiantada no substrato, continua avançando e pode atingir outros pontos das armaduras, em especial nas áreas vizinhas ao reparo, como na Figura 2(b).

Quando o substrato é um concreto carbonatado, supõe-se que a alcalinidade decorrente da atividade catódica, nas áreas adjacentes ao reparo, seja diminuída, pela redução da produção de íons hidroxila (OH^-). Supõe-se, ainda, que o excesso desses íons, responsáveis pela manutenção do pH elevado e, em conseqüência, pela passivação das áreas catódicas, seja transportado por difusão, para as áreas vizinhas, com menor concentração de OH^-. Em seguida, sejam gradativamente consumidos pela carbonatação do concreto, causando perda de alcalinidade e a conseqüente despassivação do aço.

No caso de substrato contaminado por íons cloreto, a elevação do potencial eletroquímico da armadura adjacente ao reparo, após a sua aplicação, pode ultrapassar o seu potencial de pite, criando-se, assim, condições de se estabelecer um processo corrosivo.

Assim, 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.

1.2.2 Corrosão por macrocélula no aço, na interface substrato/reparo

A causa mais comum que induz à 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.

a) Corrosão por macrocélula no caso de concreto carbonatado

Nos casos usuais, não é viável a remoção completa do concreto carbonatado. Nestes casos, supõe-se que a parte da armadura, no interior do concreto carbonatado (no substrato) e adjacente ao reparo, perde a polarização catódica que lhe era proporcionada pela atividade anódica contígua, antes do reparo, como visto em 2.2.1. Por outro lado, a armadura na região reparada é repassivada, devido ao meio altamente alcalino proporcionado pelo reparo. Esta condição é ilustrada na Figura 3. As curvas **A1** e **C1**, na Figura 3(a), representam, respectivamente, a reação anódica e a reação catódica do aço na armadura, no interior do reparo (meio alcalino), com o aço repassivado; enquanto que as curvas **A2** e **C2**, na Figura 3(b), representam as reações anódica e catódica do aço imerso no substrato (concreto carbonatado, pH < 9), com a armadura despassivada, junto ao reparo. $\mathbf{E_{corr(rp)}}$ e $\mathbf{i_{corr(rp)}}$ representam o potencial e a intensidade de corrosão do aço no interior do reparo. $\mathbf{E_{corr(sb)}}$ e $\mathbf{i_{corr(sb)}}$ correspondem ao potencial e à intensidade de corrosão do aço no substrato.

Nesta situação surge uma diferença de potencial eletroquímico, $|E_{corr(rp)} - E_{corr(sb)}|$ 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 [6].

b) Corrosão por macrocélula no caso de concreto contaminado por cloreto

Como o concreto contaminado e deteriorado é normalmente removido a profundidades limitadas para a realização do reparo, um desequilíbrio de potencial eletroquímico pode também, ocorrer entre o reparo, isento de cloreto, e o substrato que, usualmente, continua contaminado por cloreto. A Figura 4 ilustra esta condição. A curva **A1**, na Figura 4(a), representa a reação anódica da armadura no interior do reparo (meio alcalino), com o aço passivado. A curva **A2**, na Figura 4(b), representa a reação anódica no substrato, junto ao reparo, contaminado por íons cloreto. As curvas **C1** e **C2** representam as reações catódicas no reparo e no substrato, respectivamente.

Aqui, de modo semelhante ao caso de concreto carbonatado, também, surge uma diferença de potencial eletroquímico, $|E_{corr(rp)} - E_{corr(sb)}|$, entre as regiões da armadura no reparo e no substrato, ocasionando a formação de uma macrocélula de corrosão. O efeito da macrocélula formada com a presença de íons cloreto é muito mais problemático, porque estes íons não são consumidos no processo corrosivo e, ao mesmo tempo, aumentam consideravelmente a condutividade do eletrólito.

1.3 Efeito da macrocélula na taxa de corrosão

A intensidade de corrosão por macrocélulas nas barras de aço carbono em uma estrutura de concreto é controlada, principalmente, pela diferença de potencial entre as regiões anódicas e catódicas. Esse tipo de corrosão é influenciado, também, pela resistência ôhmica entre o ânodo e o cátodo 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 o ânodo e o cátodo estão no mesmo plano ou em planos paralelos [16].

Para facilidade deste estudo, os gráficos a seguir são semiquantitativos e foram adotados valores de intensidade de corrosão semelhantes às encontradas em campo, em estruturas com corrosão de armaduras [17] e foi considerada a densidade de corrente limite (i_L) do O_2 na argamassa menor que a densidade de corrente limite do O_2 no concreto do substrato [18]:

- **densidade de corrente por microcélula na armadura ativa (i_{corr}) da ordem de 10 µA/cm²** - semelhantes às máximas encontradas em estruturas com corrosão de armaduras em campo [17];
- **densidade de corrente considerada limite de passivação do aço no concreto, i_{corr} = (0,1 – 0,2) µA/cm²** - [17];
- **densidade de corrente limite do oxigênio no concreto ($i_{O2(sb)}$) da ordem de três vezes superior ao do oxigênio na argamassa de reparo ($i_{O2(rp)}$)** – [18].

1.3.1 Reparos em estrutura com carbonatação

Quando as armaduras, em presença de umidade, são despassivadas por carbonatação do concreto de cobrimento, ocorre corrosão do tipo generalizada, como conseqüência do estabelecimento de inúmeras células de ação local (microcélulas), distribuídas aleatoriamente pela superfície das barras de aço-carbono.

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**, na Figura 5(a), representam as reações anódicas e catódicas, respectivamente, nos trechos carbonatados (despassivados) da armadura e as curvas **A2** e **C2**, na Figura 5(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**), respectivamente[3], resultando na corrente efetiva medida ($\mathbf{I_{corr}}$), na Figura 5(c).

Nessas condições, os potenciais $\mathbf{E_{corr(sb)}}$, na Figura 5(a) e $\mathbf{E_{corr(rp)}}$, na Figura 5(b), resultam em um potencial comum, que é o potencial de corrosão da macrocélula ($\mathbf{E_{corr}}$), na Figura 5(c). A parte da armadura no interior do reparo é catodicamente polarizada e o trecho sob o substrato é polarizado anodicamente.

Observando a Figura 5(a), verifica-se que a intensidade de corrosão $\mathbf{i_{corr(sb)}}$ representa a corrosão por microcélulas no trecho carbonatado, junto ao reparo e a intensidade $\mathbf{i_{corr(rp)}}$, na Figura 5(b), corresponde à taxa de corrosão da armadura no interior do reparo, quando consideradas as regiões de reparo e substrato isoladas. Como as áreas estão eletricamente conectadas, a intensidade $\mathbf{i_{corr}}$, na Figura 5(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 ($\mathbf{i_{corr} - i_{corr(sb)}}$) representa a corrente de corrosão devida à macrocélula ($\mathbf{i_{mac}}$), na Figura 5(a).

Na superfície da armadura sob o reparo, na Figura 5(b), a redução do oxigênio passa a ocorrer com uma taxa $\mathbf{i_{O2(rp)}}$, muito maior do que ocorreria se as barras das regiões do reparo e do substrato estivessem isoladas. Os elétrons necessários para esta reação provêm, quase que totalmente, do trecho da armadura que está no substrato. Apenas uma parcela desprezível é fornecida pela reação anódica que ocorre no trecho reparado [19].

Assim, o aço sob o substrato pode apresentar um aumento sensível de sua taxa de corrosão, após a execução do reparo (de $\mathbf{i_{corr(sb)}}$ para $\mathbf{i_{corr}}$). 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 ($\mathbf{i_{O2(sb)}}$). O aumento da taxa de corrosão no substrato é sustentado pelo acréscimo da redução do oxigênio na região do reparo ($\mathbf{i_{O2(rp)} - i_{corr(rp)} = i_{mac}}$), como ilustra a Figura 5(b).

1.3.2 Reparos em estrutura com contaminação por cloreto

[3] Caso especial em que as áreas catódicas são iguais às áreas anódicas.

Quando são usados reparos localizados em estruturas contaminadas por cloreto, o processo corrosivo nas regiões não reparadas pode iniciar-se num tempo mais curto do que aquele que ocorre nos casos de concretos carbonatados e, dependendo do seu grau de contaminação, com maior intensidade. A maior intensidade de corrosão deve-se, principalmente, à baixa resistividade do concreto, pela presença dos íons cloreto e umidade.

A Figura 6 representa uma estrutura com reparo localizado em conseqüência de corrosão acelerada por contaminação de íons cloreto. As curvas **A1** e **C1**, na Figura 6(a), representam as reações anódicas e catódicas na região do substrato, contaminada por íons cloreto, e as curvas **A2** e **C2**, na Figura 6(b), representam as reações anódicas e catódicas na superfície do aço livre de cloreto, no interior do reparo, considerando-se as regiões isoladas. Como as barras sob o reparo e sob o substrato estão conectadas, as curvas **A3** e **C3**, na Figura 6(c), representam a soma das correntes anódicas (**A1** + **A2**) e catódicas (**C1** + **C2**), respectivamente. Novamente, aqui, a taxa de corrosão $\mathbf{i_{corr(sb)}}$ representa a corrosão do trecho contaminado por íons cloreto, se este fosse isolado. A indicação $\mathbf{i_{corr(rp)}}$ corresponde à taxa de corrosão da armadura no interior do reparo. A taxa $\mathbf{i_{corr}}$ representa a corrosão no substrato, agravada pela formação da macrocélula. A diferença $\mathbf{i_{corr}} - \mathbf{i_{corr(sb)}}$ representa a taxa de corrosão devida à macrocélula.

Cabem aqui as mesmas observações feitas no item anterior, para o fluxo de elétrons entre o reparo e o substrato.

Considerações finais

Os reparos em estruturas de concreto armado com problema de corrosão protegem a região das barras no seu interior, porém, a corrosão em áreas adjacentes aos reparos pode ocorrer mais cedo do que normalmente ocorreria, por três motivos principais: a) no caso de estruturas com corrosão induzida por carbonatação, a perda da função catódica dos trechos da armadura no substrato, junto ao reparo, pela eliminação da região ativa (ânodo), pode reduzir sua produção de hidroxilas e permitir o avanço da frente de carbonatação com maior rapidez; b) no caso das estruturas com contaminação por íons cloreto, o aumento da relação Cl^-/OH^-, devido à redução de hidroxilas e a elevação do potencial eletroquímico das áreas contaminadas, adjacentes ao trecho reparado, devido à repassivação do trecho anódico, eleva a probabilidade de ocorrência de pite; e c) em ambos os casos, após a despassivação da armadura no substrato, junto ao reparo, o processo corrosivo pode ser agravado pelo surgimento de macrocélulas de corrosão, decorrentes da diferença de potencial eletroquímico entre o trecho da armadura imerso no reparo e o que está sob o substrato.

Observou-se no estudo do efeito da macrocélula na taxa de corrosão, no item 2.3, que o potencial de corrosão final da barra, com a ação da macrocélula ($\mathbf{E_{corr}}$), resultou próximo ao potencial do aço no substrato com corrosão ativa da barra ($\mathbf{E_{corr(sb)}}$), quando considera isolada, sem conexão com a região passivada sob o reparo, como ilustram as Figuras 5 e 6.

Essa tendência no comportamento do potencial da macrocélula foi constatada na tese de Ribeiro [20], para várias formulações de argamassa de reparo, com ampla faixa de resistividade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Stephan Wolynec (EPUSP-PMT) e ao Projeto Temático FAPESP 03/01729-2

Referências bibliográficas

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

[2] CASTRO P. et al. Macrocell Activity in Slightly Chloride-Contaminated Concrete Induced by Reinforcement Primers. **Corrosion**, NACE v. 59, No. 6, p. 535-546, jun 2003.

[3] GULIKERS, J.J.W. VAN MIER, J.G.M. 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).

[4] 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.

[5] 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.

[6] GU, P. *et al.* Electrochemical Incompatibility of Patches in Reinforced Concrete. **Concrete International.** v. 19. n. 8. p. 68-72. 1997.

[7] EMMONS P.H.; VAYSBURD A.M.; MCDONALD J.E. Concrete Repair in the Future Turn of the Century—Any Problems?. **Concrete International**. v. 16. n. 3 . p. 42-49. 1994.

[8] MORGAN, D.R. Compatibility of Concrete Repair Materials and Systems. **Consttruction and Building Materials**, v. 10, n.1, p.57-67, 1996.

[9] Mailvaganam, N. P. Concrete Repair and Rehabilitation: Issues and Trends. **The Indian Concrete Journa**l, volume 75, Pag. 759-764. 2001.

[10] RAUPACH M. Chloride-Induced Macrocell Corrosion of Steel in Concrete-Theoretical Background and Practical Consequences. **Construction and Building**, v.10, n. 5, p. 329-338, 1996.

[11] RAUPACH M. Models for the propagation phase of reinforcement corrosion – an overview. **Materials and Corrosion**, v.57, n. 8, p. 605-613, 2006.

[12] ZHANG, J.; MAILVAGANAM, N. P. Corrosion of concrete reinforcement and electrochemical factors in concrete patch repair. **Canadian Journal of Civil Engineering,** v. 33, n. 6, p. 785-793.

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

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

[15] Evans, U. R. **An introduction to metallic corrosion.** 3a. Ed. Edward Arnold, London, 1981.

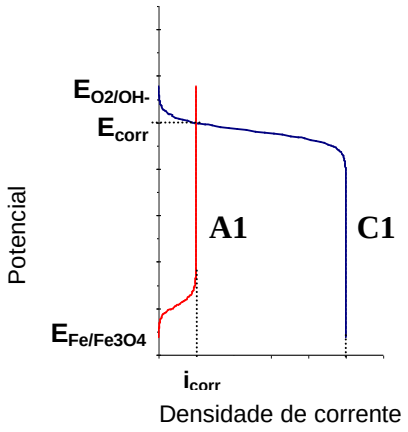
[16] ANDRADE, C. *et al*. **Macrocell Versus Microcell Corrosion of Reinforcements Placed in Parallel.** In: Corrosion – 92, paper nº 194, 1992.

[17] ANDRADE, C.; ALONSO, C. Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. **Consttruction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 315-328, 1996.

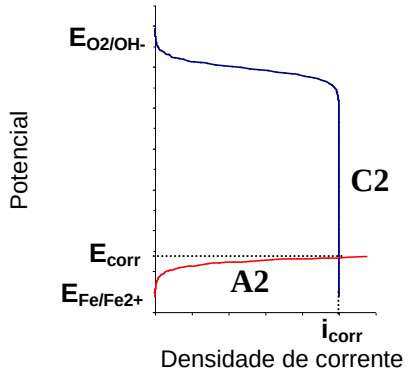
[18] GJORV, O. E.; VENNESLAND, O; El – BUSAIDY, A. H. S. Diffusion of dissolved oxygen through concrete. **Materials Performance**, v. 25. p. 39-44, 1986.

[19] OHBA, M. **Corrosão por aeração diferencial**. 1997. 224 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

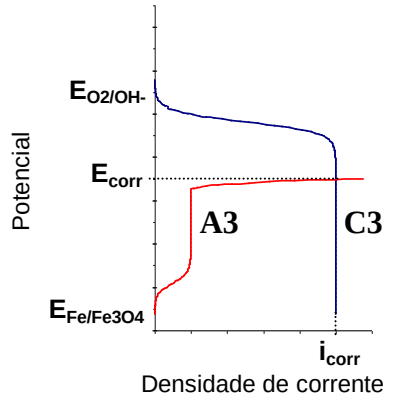
[20] RIBEIRO, J. L. S. **Contribuição para a avaliação da compatibilidade eletroquímica entre argamassas de reparo e concreto carbonatado.** 2010 - 212 p - Tese (Doutorado) - EP - Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2010.



(a) Aço em concreto não-carbonatado (pH de 12 a 14)



(b) Aço em concreto carbonatado (pH < 9)



(c) Aço em concreto contaminado por íons cloreto (pH de 12 a 14)

Legenda: E_{corr} = potencial de corrosão; i_{corr} = densidade de corrente de corrosão;

E_{O_2/OH^-} = potencial de equilíbrio da reação $2H_2O + O_2 + 4e^- \Leftrightarrow 4OH^-$;

E_{Fe/Fe_3O_4} = potencial de equilíbrio da reação $3Fe + 4H_2O \Leftrightarrow Fe_3O_4 + 8H^+ + 8e^-$;

$E_{Fe/Fe^{2+}}$ = potencial de equilíbrio da reação $Fe \Leftrightarrow Fe^{2+} + 2e^-$.

Figura 1 – Diagramas de Evans da cinética de corrosão do aço em concreto não-carbonatado (a), em concreto carbonatado (b) e em concreto não-carbonatado e contaminado com íons cloreto.

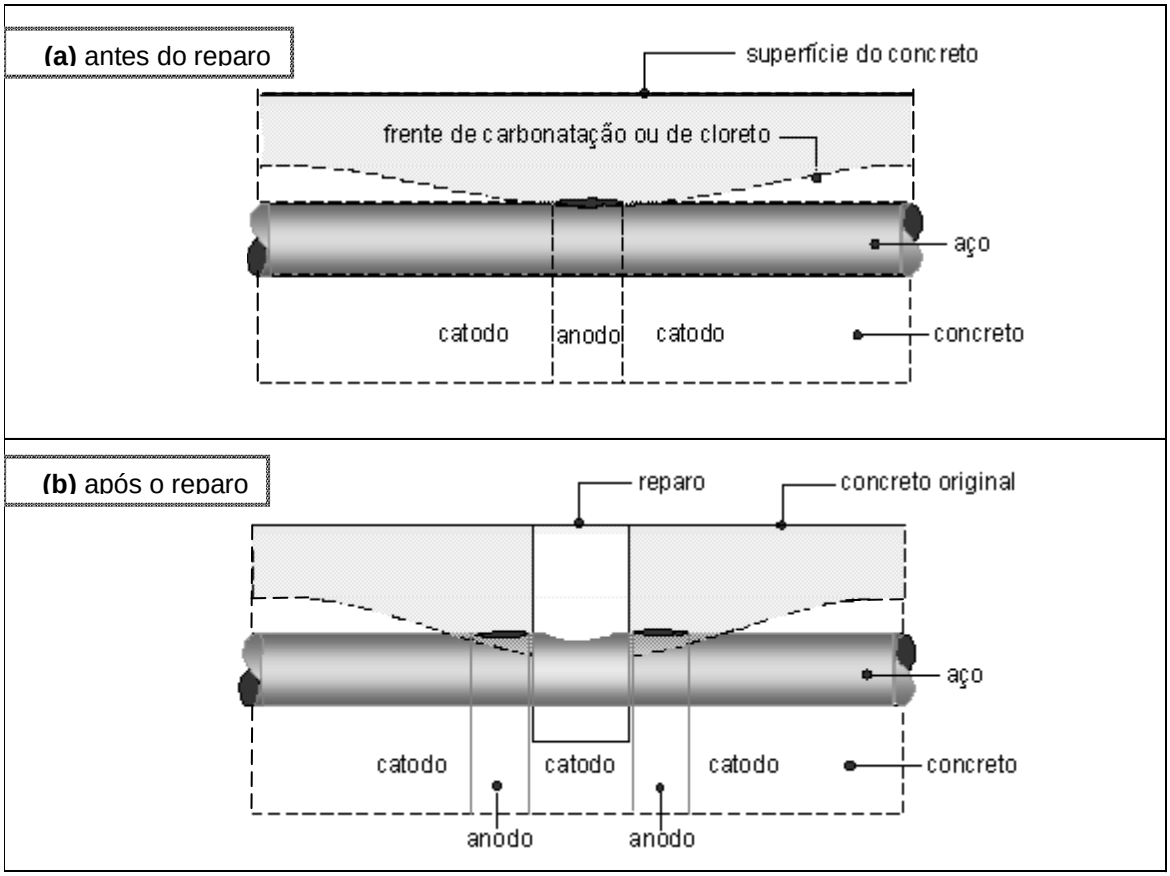
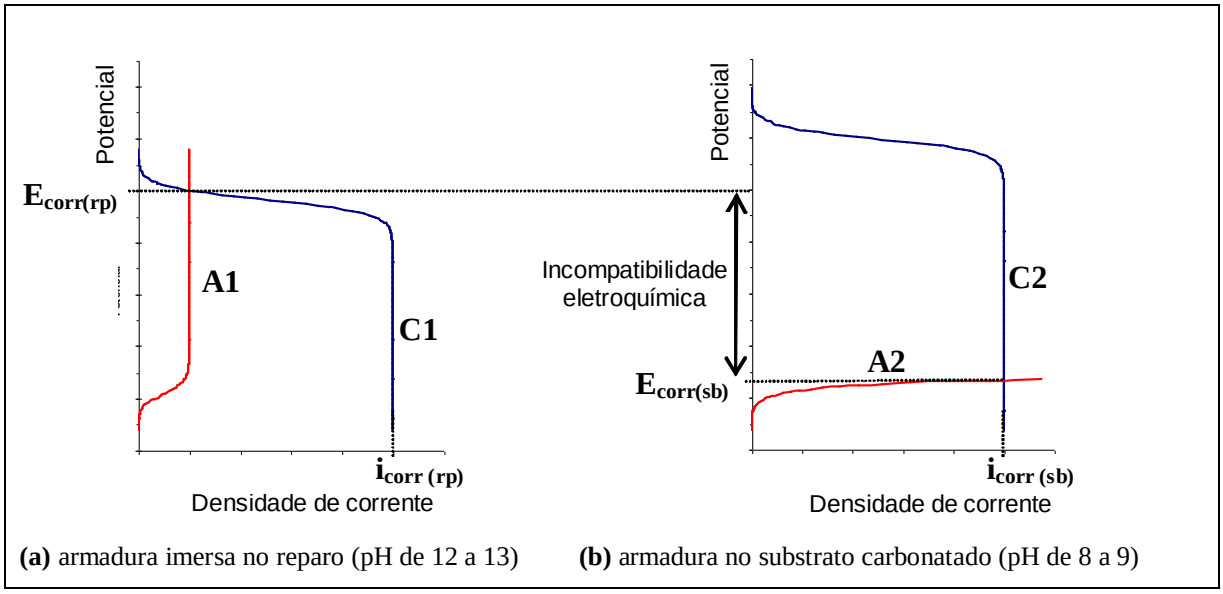
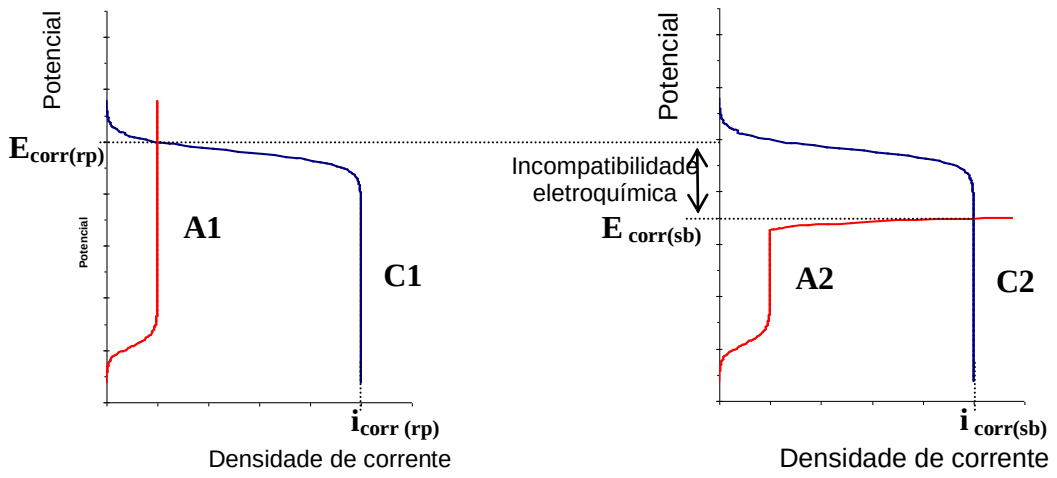


Figura 2 – Possíveis locais de corrosão antes e após reparos localizados - adaptado de Raupach [



(a) armadura imersa no reparo (pH de 12 a 13) **(b)** armadura no substrato carbonatado (pH de 8 a 9)

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



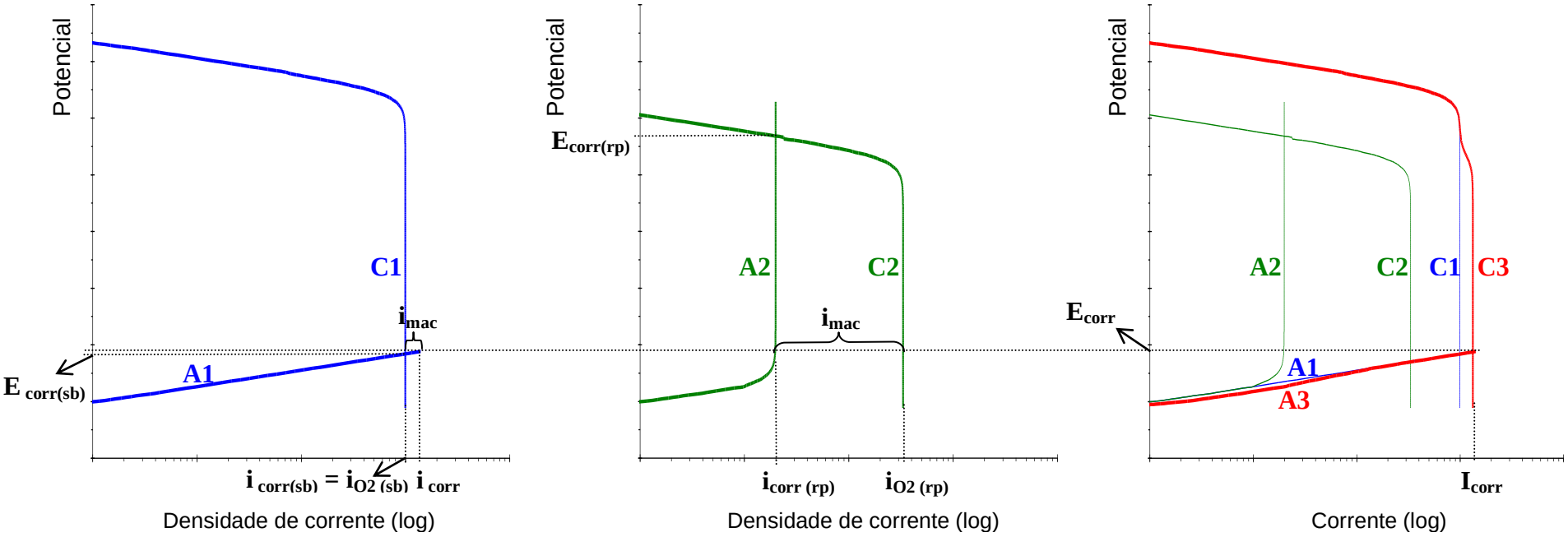
(a) armadura imersa no reparo

(b) armadura no substrato contaminado por íons cloreto

Figura 4 – Diagramas de Evans ilustrativos da incompatibilidade eletroquímica entre o reparo e o substrato de concreto contaminado com íons cloreto.

Copyright 2010, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

[1] Doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
[2] Professora Doutora da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
[3] Especialista em Corrosão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Professora de Pós-Graduação da Escola Politécnica da USP

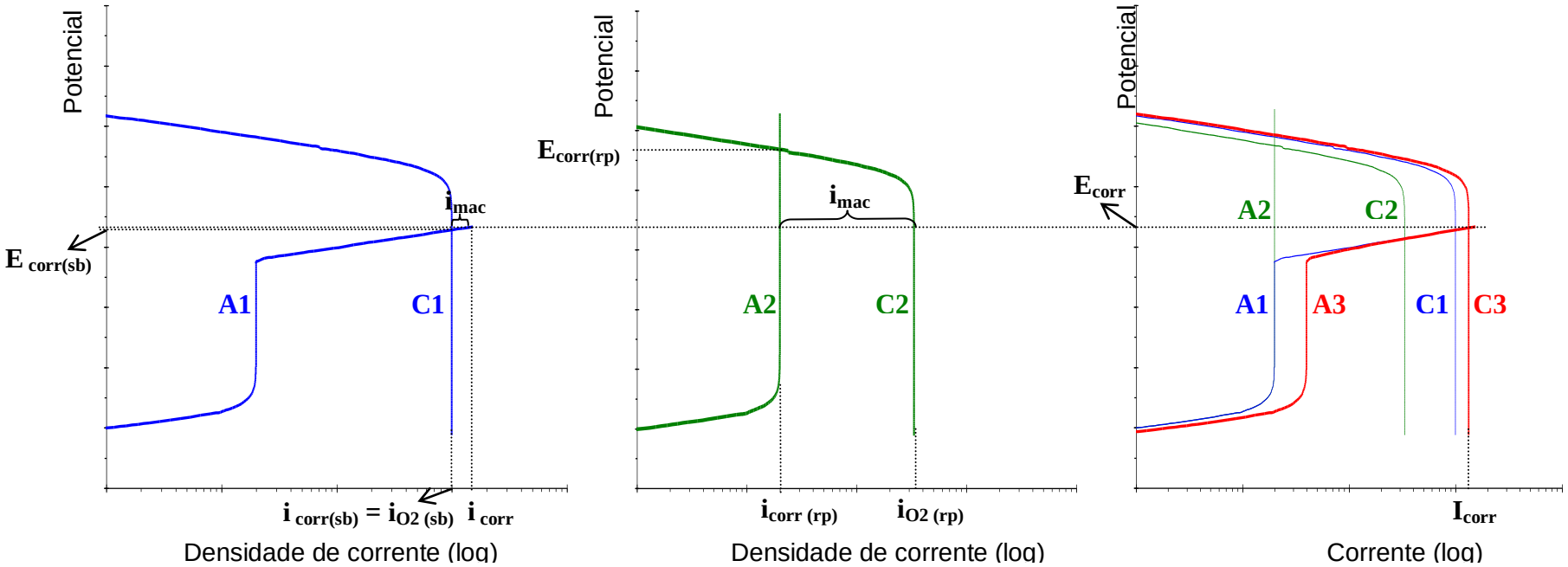


(a) Aço no substrato carbonatado (pH < 9)

(b) Aço no reparo (pH de 12 a 14)

(c) Efeito do reparo na barra de aço.

Figura 5 – Diagramas de Evans, semiquantitativos, ilustrativos do efeito da macrocélula na taxa de corrosão da armadura, após reparo em estruturas com concreto carbonatado



(a) Aço no substrato com cloreto (pH de 12 a 14)

(b) Aço no reparo (pH de 12 a 14)

(c) Efeito do reparo na barra de aço.

Figura 6 – Diagrama de Evans, semiquantitativos, ilustrativos do efeito da macrocélula na taxa de corrosão da armadura, após reparo em estruturas de concreto contaminadas com íons cloreto.