

Reparo localizado para estruturas de concreto armado: erros, acertos e reflexões

MARCELO H. F. DE MEDEIROS, <https://orcid.org/0000-0003-3112-9715>; PAULO A. DASCHEVI, <https://orcid.org/0000-0002-2716-3091>
EMANOEL C. ARAÚJO, emanoelcunhaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7825-3479> – UFPR

R E S U M O

O reparo localizado é uma das técnicas mais utilizadas pelos engenheiros para reabilitação de estruturas de concreto armado. No entanto, observa-se que este não tem sido efetivo em deter o processo corrosivo e, frequentemente, é realizado repetidas vezes, com altos custos e sem sucesso. Nesse contexto, este artigo trata do conceito do ânodo incipiente, que consiste no fenômeno da deterioração prematura dos reparos localizados. Além disso,

investiga as condições de compatibilidade dimensional, com destaque para a retração e variações térmicas. Por fim, apresenta técnicas que podem ser aplicadas concomitantemente à realização do reparo, como a utilização de ânodos de sacrifício, a aplicação de proteção de superfície e o uso de inibidores de corrosão migratórios. Com isso, são apresentados caminhos que podem mitigar os danos precoces citados e conduzir a reparos efetivos e duráveis.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO, REPARO LOCALIZADO, COMPATIBILIDADE, ÂNODO INCIPIENTE.

1. INTRODUÇÃO

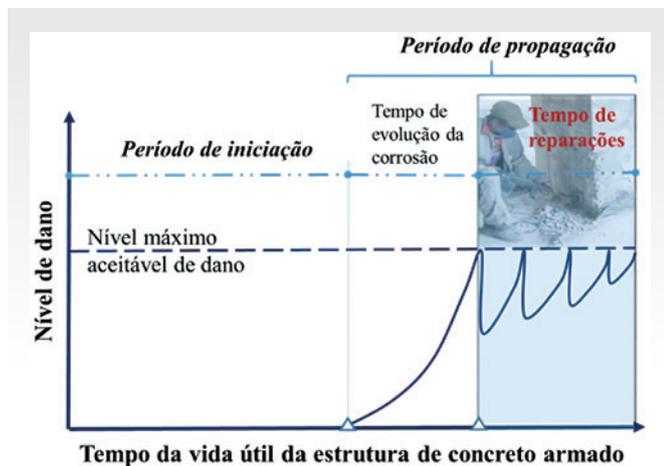
A Figura 1 mostra um esquema da vida útil das estruturas de concreto armado, evidenciando o período de iniciação que conta desde a produção da estrutura até o momento que um processo de deterioração se instala e faz a corrosão de armaduras iniciar. Em seguida, entra-se no período de propagação da corrosão, de modo que o processo evolui até atingir um

nível de dano considerado inaceitável. Após este momento, adentra-se no período da vida útil da estrutura de concreto armado que é foco deste artigo, o momento em que são necessárias ações de reabilitação, em destaque na Figura 1.

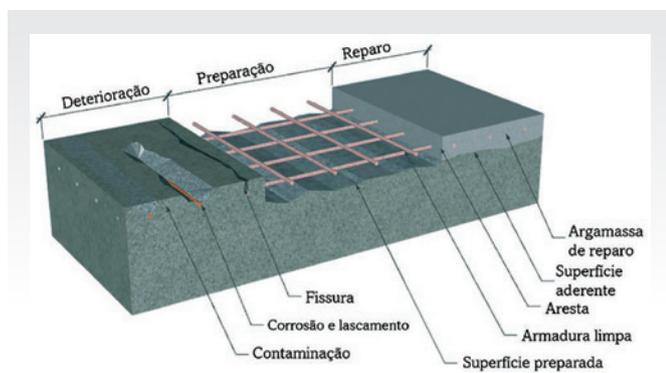
Em 2016, o custo total da corrosão para vários países foi estimado entre 4 e 10% do PIB, dos quais cerca de 50% é devido à corrosão em estruturas de concreto armado. De acordo com Krishnan *et al.* (2021), o NACE Impact Report (2016) indica que $\approx 50\%$ das estruturas de concreto armado são reparadas dentro de 10 anos após a sua construção. Geralmente, a solução adotada é a execução de reparos localizados. Contudo, existem relatos de que o reparo localizado não é capaz de impedir a corrosão de armaduras.

Desse modo, é fato que os reparos adotados em muitas estruturas estão falhando em cerca de 5 anos, gerando a necessidade de reparos repetidos e aumento significativo no custo total da corrosão e do ciclo de vida das estruturas de concreto armado. Os motivos para as falhas prematuras permeiam pela falta de rigor técnico na execução, pela incorreta especificação de materiais e pela economia nos sistemas de reparo (reparos incompletos para reduzir custo), de modo a não se atingir a estagnação plena do processo de corrosão.

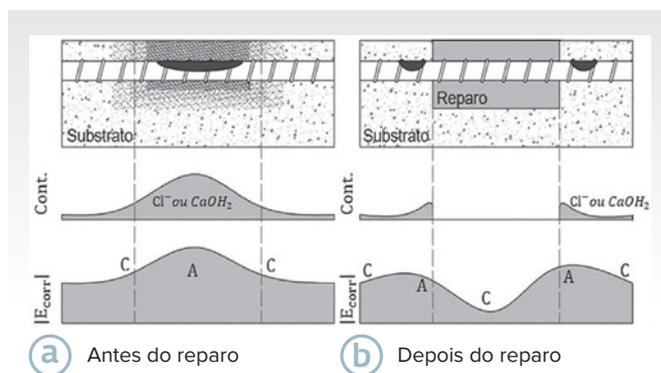
Neste contexto, sabe-se que a corrosão em estruturas reparadas costuma reiniciar na interface entre o concreto antigo e a área reparada. Sendo assim, a corrosão pode continuar a progredir dentro do concreto, mesmo após uma seção de concreto deteriorado ter sido removida e substituída por um novo material de reparo. Isso geralmente é causado pela proteção insuficiente contra corrosão de vergalhões corroídos (Kim *et al.*, 2016). Esses fatos indicam que um grande número de estruturas de concreto armado pode precisar de reparos repetidos ao longo da sua vida útil, resultando em uma demanda acima da necessária devido à falta de eficiência das



► **Figura 1**
Esquema das fases da vida útil de uma estrutura de concreto armado



► **Figura 2**
Composição de um sistema de reparo localizado
Fonte: Adaptado de Helene (1992) e Emmons e Vaysburd (1996)



► **Figura 3**
Esquema da ocorrência típica do ânodo incipiente
Fonte: Adaptado de Ali *et al.* (2018)

intervenções por reparo. Portanto, existe a necessidade de adotar uma estratégia de reparo adequada (Kamde *et al.*, 2021), para evitar o uso indevido de recursos naturais e contribuir para o aumento da sustentabilidade do concreto armado.

2. FORMAÇÃO DE ÂNODOS INCIPIENTES

A realização de reparos localizados é uma das técnicas mais difundidas para recuperação de estruturas de concreto armado. O procedimento busca interromper o processo anódico na área reparada, restaurando a condição passiva das armaduras pela substituição do concreto contaminado por argamassa ou graute de reparo. As etapas para realização do reparo estão ilustradas na Figura 2.

Ainda assim, tem-se notado a ocorrência de corrosão na vizinhança do reparo pouco tempo depois de sua execução, mesmo nos casos em que a intervenção tenha sido realizada em estrita conformidade com as prescrições técnicas e normativas, conforme ilustrado na Figura 3. Essa deterioração precoce em reparos localizados é usualmente denominada ânodo incipiente.

No âmbito nacional, foram desenvolvidos trabalhos pioneiros como o de Helene e Monteiro (1993), que corrobora a ocorrência de migração das células de corrosão para as adjacências do reparo quando

usadas técnicas usuais de reparos localizados. Diante disso, os autores recomendaram a adoção de medidas adicionais para supressão da corrosão, tais como proteção de superfície por barreira, proteção catódica galvânica e redução da agressividade do ambiente. Também vale ressaltar que as bases metodológicas adotadas nesse trabalho foram replicadas em diversas pesquisas subsequentes, com relevante contribuição para o entendimento do fenômeno.

As causas do ânodo incipiente são, atualmente, atribuídas a três fatores distintos: incompatibilidade eletroquímica entre os materiais do substrato e do reparo; fragilidade da zona de transição; e contaminação pré-existente no substrato. A incompatibilidade eletroquímica consiste na diferença de potencial de eletrodo entre o trecho de aço imerso no substrato e o trecho imerso no reparo. A fragilidade da zona de transição, por sua vez, provém do fato de que podem surgir fissuras nessa região por conta de incompatibilidades dimensionais e/ou do próprio processo de preparação do substrato para a realização do reparo. Por fim, aponta-se a existência de contaminação ou frente de carbonatação remanescente no substrato.

No que se refere à localização, podem ser observados pontos de corrosão tanto na zona de transição quanto em regiões no interior do

substrato. A ocorrência de deterioração na zona de transição indica que a fragilidade da interface reparo-substrato pode ser a causa para deflagrar o ânodo incipiente. Por outro lado, a deterioração avançada em direção ao substrato evidencia maior possibilidade de ocorrência do fenômeno em virtude da própria contaminação do substrato.

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento a respeito da deterioração causada pelo ânodo incipiente e investigar práticas para a realização de reparos duráveis, alguns estudos com reparos localizados têm sido realizados pelo Grupo de Pesquisa de Patologia e Recuperação das Construções (PRC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Para tanto, foram moldados corpos de prova com substratos contaminados por cloretos, aplicando-se diferentes traços de argamassa. Esses corpos de prova passaram pelo monitoramento de corrente de corrosão (i_{corr}), além de serem rompidos ao final de 500 dias para inspeção visual da deterioração das armaduras.

Na inspeção destrutiva das armaduras na amostra reparada, observou-se a deterioração severa no interior do substrato, em especial no lado direito da amostra, conforme apresentado na Figura 4-d. Por outro lado, também se observou concentração de corrosão na zona de transição (Figura 4-b, c, e, f),

típica do ânodo incipiente. O método experimental e análise completa das amostras serão publicados posteriormente pelo PRC-UFPR.

3. COMPATIBILIDADE DIMENSIONAL

A compatibilidade entre material de reparo (MR) e substrato é alcançada quando as propriedades físicas, químicas e eletroquímicas de ambos os materiais são similares. A compatibilidade dimensional é o principal critério a ser avaliado para a garantia da eficiência do reparo. As propriedades fundamentais associadas à variação volumétrica de MRs são: a retração por secagem, módulo de elasticidade (E) e coeficiente de expansão térmica (CTE).

Pode-se considerar a estrutura reparada como um compósito com três fases:

1. MR;
2. Zona de transição (ZT) e
3. Substrato de concreto.

O substrato de concreto, geral-

mente, é caracterizado como uma fase do compósito com certa estabilidade dimensional, ou seja, não irá apresentar mudanças volumétricas expressivas, visto que, as variações volumétricas provenientes da retração já ocorreram. Quanto aos MRs, há uma gama ampla de produtos no mercado, sendo geralmente grautes e argamassas, à base cimentícia, modificadas com polímeros, materiais cimentícios suplementares (MCS), fibras sintéticas, fillers, materiais poliméricos, resinas, grautes, entre outros.

Por fim, entre o MR e o substrato existe uma zona intermediária de ligação entre as fases, nomeada aqui como ZT. A ZT nas técnicas de reparo, apresenta-se similar àquela entre pasta e agregado, caracterizada como uma área porosa. As características da ZT definem o desempenho do compósito reparado, particularmente, quanto à aderência. A seguir, estão abordadas algumas pro-

priedades essenciais a serem avaliadas no estudo da compatibilidade dimensional dos reparos.

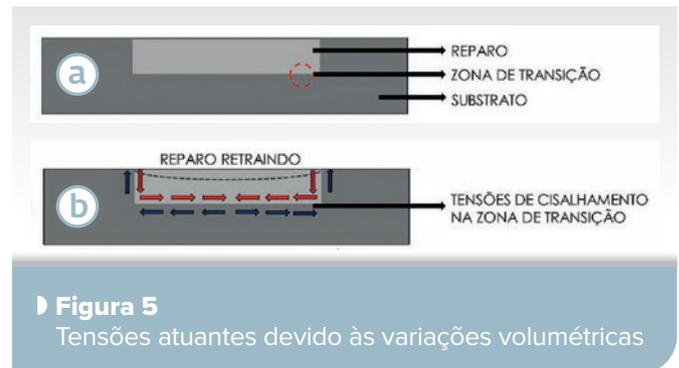
3.1 Retração

A retração é um fenômeno associado à perda de água para o ambiente e para as reações de hidratação do cimento, resultando em mudanças volumétricas do material. Esse fenômeno tem grande influência na eficiência de técnicas de reparo, uma vez que, o substrato de concreto já atingiu certa estabilidade dimensional. A Figura 5-a ilustra as três zonas de uma estrutura reparada: MR, ZT e substrato. A Figura 5-b exemplifica o reparo durante o fenômeno de retração. O MR retrai devido à perda de água, porém, em razão da aderência com o substrato, a movimentação é restringida. Essa movimentação restringida ocasiona a formação de tensões de cisalhamento na interface e,



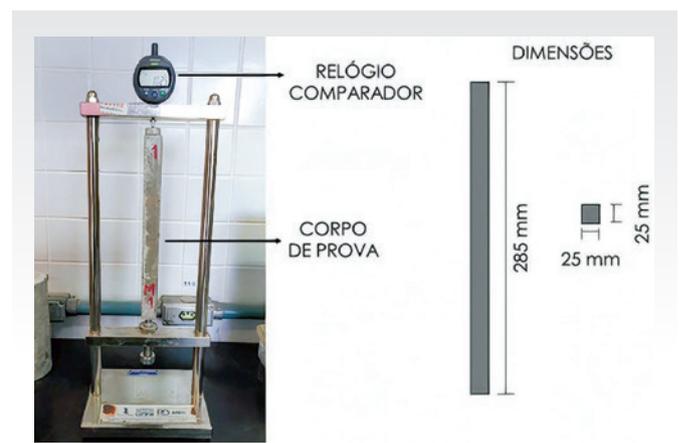
► **Figura 4**

Inspeção destrutiva de corpo de prova com substrato contaminado por cloretos após reparo (a) visão geral do corpo de prova; (b), (c) e (d) ampliação da região de cima da armadura; (e) e (f) ampliação da região de baixo da armadura



► **Figura 5**

Tensões atuantes devido às variações volumétricas

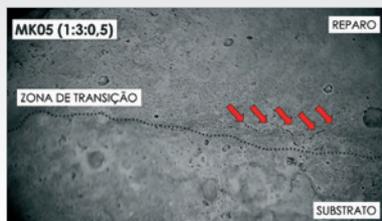


► **Figura 6**

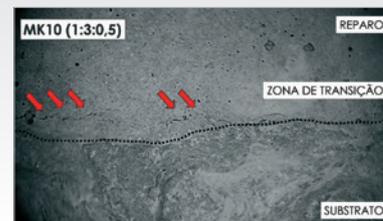
Aparato para leitura da variação linear dimensional



► **Figura 7**
Ligação entre MR (MREF)
e substrato



► **Figura 8**
Ligação entre MR (MK05)
e substrato



► **Figura 9**
Ligação entre MR (MK10)
e substrato

caso essas tensões superem a resistência de uma das fases, o processo fissuratório se inicia no material menos resistente.

Um ensaio utilizado para avaliar a estabilidade dimensional em argamassas é apresentado na Figura 6, de modo que a variação linear dimensional (VLD) é obtida usando prismas de 25x25x285 mm. Com a VLD analisa-se a estabilidade dimensional em distintos tipos de cura. Sobre este tema, o ACI 546.3R recomenda que MRs devam apresentar retração < 0,10%.

A utilização de MCS na composição de MR é uma das opções para a redução da retração. Além disso, essas adições atuam na melhoria de propriedades relacionadas à durabilidade, seja como resultado das reações pozolânicas e/ou pelo efeito fíler. Uma das adições de alta reatividade utilizada em materiais cimentícios é o metacaulim (MK), produto da calcinação de argilas caulínicas. As Figuras 7, 8 e 9 mostram a ZT entre três tipos de argamassas de reparo (traço em massa de 1:3:0,5): sem (MREF) e com substituição parcial do cimento Portland por MK nos teores de 5% (MK05) e 10% (MK10) aos 28 dias após a aplicação no substrato.

É possível observar que, em todas as argamassas, a ZT é caracterizada como uma área porosa. Aliado a isso, a formação de fissuras na ZT é relacionada com o comportamento

dimensional da argamassa durante a retração. A argamassa MREF apresentou uma ZT com processo fissuratório pronunciado. Por outro lado, as argamassas MK05 e MK10 apresentaram uma redução na quantidade de fissuras. Esse comportamento se deve à redução da retração ocasionado pelo MK. O resultado completo da pesquisa supracitada será publicado posteriormente pelo PRC-UFPR.

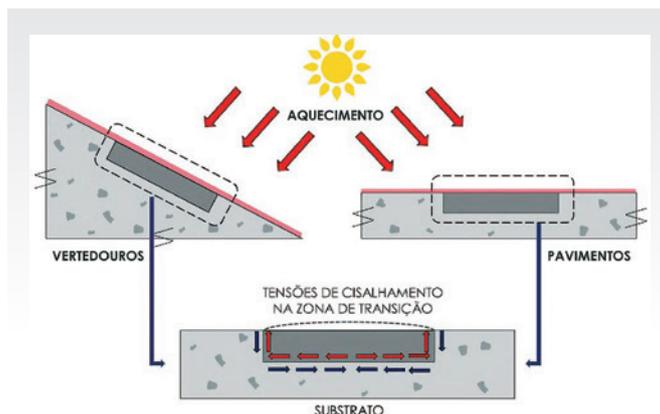
3.2 Propriedades térmicas

A compatibilidade térmica é de extrema importância em situações onde há flutuações de temperaturas. A Figura 10 exemplifica dois tipos de estruturas de concreto que estão, geralmente, expostas a ciclos de aquecimento e resfriamento, secagem e saturação, e, em alguns casos, ao choque térmico (aquecimento seguido de resfriamento brusco).

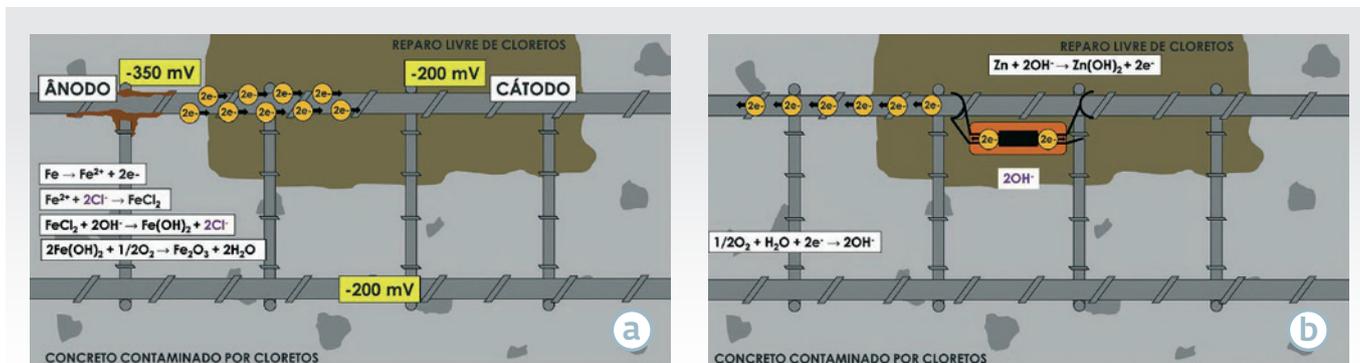
Dentre as propriedades térmicas, CET é dado pela variação dimensional (linear e/ou volumétrica) ocasionada pela mudança de 1°C de temperatura. O concreto é um material cimentício multifásico formado por materiais com distintos CET. Essa propriedade é influenciada pelo volume de agregados na mistura, % de vazios, % de umidade, presença de MCS, entre outros. Em técnicas de reparo que estão expostas às intempéries ambientais, como vertedouros de barragens com comportas fechadas e pavimentos (Figura 10), o aquecimento gerado pela radiação solar tende a aquecer a superfície. A propagação desta energia em forma de calor na estrutura irá depender do coeficiente de condução térmica (CCT). Em condições das quais há uma incompatibilidade entre o CET do MR e o substrato de concreto (ver Figura 10), variações dimensionais distintas irão surgir e ocasionar uma concentração de tensão na ZT.

4. EVITANDO PROBLEMAS COM ÂNODOS DE SACRIFÍCIO

A formação de ânodos incipientes (Figura 11-a) pode levar a falhas prematuras em até menos de 5 anos depois da intervenção por reparos localizados. Neste contexto, um caminho para evitar falhas em curto espaço de tempo é o uso da proteção catódica por par galvânico a partir



► **Figura 10**
Efeitos do aquecimento em estruturas reparadas



► **Figura 11**

Efeito da proteção catódica com pastilhas de zinco: (a) corrosão típica de falha adjacente ao reparo; (b) reparo com proteção catódica por par galvânico

de pastilhas de zinco, como mostra a Figura 11-b.

O ânodo galvânico é mais eletro-negativo (≈ -1100 mV) do que o vergalhão de aço carbono (≈ -350 mV, quando apresenta tendência de corrosão) (KAMDE *et al.*, 2021). Os ânodos de zinco são conectados usando arames de amarração ao vergalhão e o concreto atua como condutor iônico. Desse modo, a diferença de potencial entre o ânodo galvânico e o aço carbono é maior do que a diferença de potencial entre o trecho do aço na área de reparo localizado e o trecho na área do concreto antigo. Portanto, quando os ânodos galvânicos são colocados nas áreas de repa-

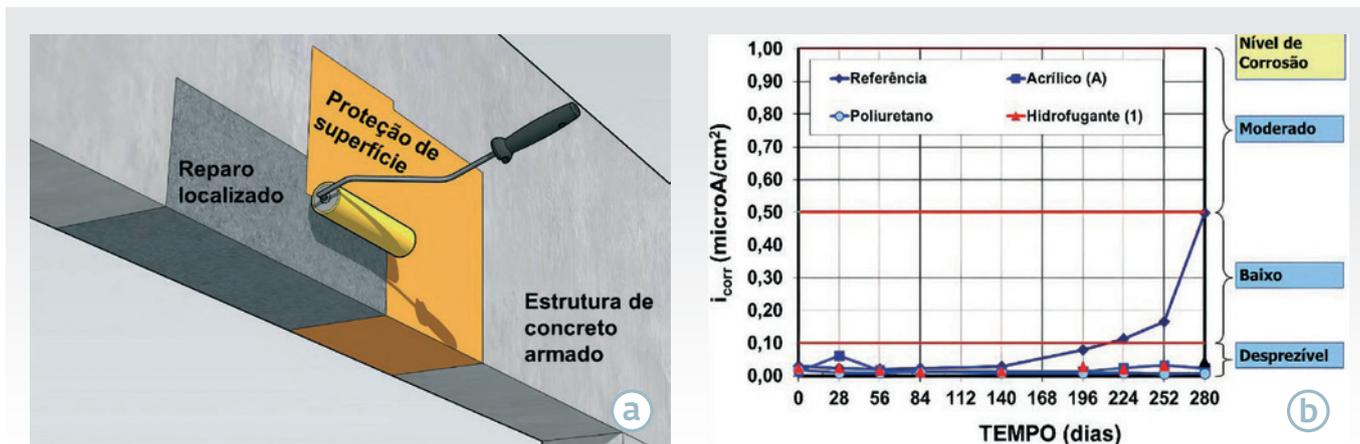
ro e ânodos incipientes apresentam tendência de ocorrerem, os ânodos galvânicos corroem no lugar da armadura de aço. Este efeito evita a falha prematura do reparo e prolonga a vida útil da estrutura reparada.

De acordo com Krishnan *et al.* (2021), o reparo localizado com proteção catódica pode aumentar a vida útil em cerca de 20 anos. Apesar disso, a proteção catódica usando ânodos galvânicos não está sendo considerada por muitos profissionais devido ao mito das implicações de custo excessivo. Krishnan *et al.* (2021) analisaram o custo de ciclo de vida de reparos em estruturas de concreto armado com e sem ânodos galvâ-

cos. No trabalho, foi demonstrada uma redução de ≈ 90% no custo do ciclo de vida com a implementação da proteção catódica, de modo que os autores sugerem que os engenheiros devem ter confiança para usar ânodos galvânicos, obtendo reparos duráveis e prolongamento da vida útil de estruturas reparadas.

5. EVITANDO PROBLEMAS COM PROTEÇÃO DE SUPERFÍCIE

Um caminho para obter estruturas de concreto armado reparadas e com vida útil residual estendida é proteger a superfície dos elementos após a execução dos reparos localizados (Figura 12-a). Esta indicação é importante porque,



► **Figura 12**

(a) Proteção de superfície na estrutura após a execução de reparos localizados; (b) Efeito da proteção de superfície na redução da corrente de corrosão

estando a estrutura com o processo de corrosão de armaduras instalado (mas agora reparado nos pontos críticos), o efeito da proteção de superfície é desacelerar a corrosão de armaduras pela restrição do ingresso de água e/ou oxigênio para o interior do concreto. Esta afirmação é correta porque a cinética das reações de corrosão de armaduras é altamente dependente da quantidade de eletrólito nos poros do concreto. A Figura 12-b evidencia a eficácia de alguns sistemas de proteção de superfície quando aplicados sobre uma estrutura de concreto armado contaminada com 1% de cloretos.

Não se pode esquecer que a eficiência de uma proteção de superfície é diminuída ao longo do tempo de exposição ao meio ambiente. Também deve-se ter em mente que o tempo de vida útil da pintura é menor do que a esperada para a estrutura reparada. Desse modo, o caminho do sucesso para os produtos de proteção de superfície para concreto está no estabelecimento de um programa de manutenção, com previsão de renovação para garantir o nível de proteção requerido.

6. EVITANDO PROBLEMAS COM INIBIDORES DE CORROSÃO MIGRATÓRIOS

Pode-se dizer que o emprego de inibidores aumenta a resiliência à corrosão de armaduras dos sistemas

de concreto armado expostos à carbonatação e aos íons cloreto. Neste contexto, os inibidores de corrosão migratórios podem ser aplicados na superfície do concreto armado na forma líquida e atingirem a superfície do aço migrando através do concreto por capilaridade e por difusão. Chegando na superfície das armaduras, os inibidores se depositam por atração polar, formando uma camada protetora monomolecular no aço carbono.

Os inibidores de corrosão migratórios mais usados são sais de amina, produtos à base de aminoálcool e monofluor fosfato de sódio.

Como o tema deste artigo é a obtenção de serviços de reparos localizados duráveis e sabendo da tendência à formação de ânodos incipientes, a aplicação de inibidores migratórios é apresentado como um caminho para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado reparadas. Neste caso, a aplicação deve ser feita nos elementos reparados de modo que o efeito da inibição atue principalmente no substrato de concreto reparado, que é o local de manifestação dos problemas relacionados à ocorrência dos ânodos incipientes.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante que os usuários entendam as edificações como algo que necessita de manutenções periódicas. Neste contexto, é aceito que o pro-

prietário de um carro troque algumas peças e contrate serviços periodicamente. Este procedimento é típico de manutenção preventiva, prática pouco aplicada na construção civil.

É exatamente este conceito que precisa ser estendido para as edificações, o usuário deve se conscientizar que uma edificação não é um bem eterno e sua durabilidade será maior ou menor em função da manutenção realizada ao longo da sua vida útil.

O reparo localizado é uma ferramenta dentro deste panorama de reabilitação das estruturas de concreto armado. Porém, este artigo evidenciou situações de falhas prematuras do reparo localizado, como a deterioração localizada na zona de transição, mesmo quando sua execução segue adequadamente as orientações da literatura técnica. Desse modo, se faz recomendável a adoção de medidas adicionais, como ânodos de sacrifício, proteção de superfície e aplicação de inibidores de corrosão. Com isso, busca-se tornar mais robusta a proteção promovida pelos reparos localizados e proporcionar intervenções mais duráveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao PP-GEC-UFPR, ao CESEC-UFPR, à CAPES, à Agência Nacional de Águas (ANA), à Fundação Araucária e ao CNPq. 

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), 546.3R – Guide to Materials Selection for Concrete Repair. Farmington Hills, 2014.
- [2] ALI, M. S. et al. An experimental study of electrochemical incompatibility between repaired patch concrete and existing old concrete. *Construction and Building Materials*, v. 174, p. 159–172, 2018.
- [3] EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. System concept in design and construction of durable concrete repairs. *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 1, p. 69–75, 1996.
- [4] HELENE, P. R. L. Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto, 2 ed. São Paulo: PINI, 1992.
- [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? Congresso Iberoamericano de Patologia de La Construction, v. 2, p. 80-89, 1993.
- [6] KAMDE, D. K. et al. Long-term performance of galvanic anodes for the protection of steel reinforced concrete structures. *Journal of Building Engineering*, v. 42, p. 103049, 2021.
- [7] KIM, M. O. et al. Cracking and failure of patch repairs in RC members subjected to bar corrosion. *Construction and Building Materials*, v. 107, p. 255-263, 2016.
- [8] KRISHNAN, N. K. et al. Long-term performance and life-cycle-cost benefits of cathodic protection of concrete structures using galvanic anodes. *Journal of Building Engineering*, v. 42, p. 102467, 2021.