



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

A Utilização de Anodos de Proteção Catódica em Pontes e Estruturas de Concreto

Luiz Paulo Gomes

IEC-Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda

LPgomes@iecengenharia.com.br

Resumo

O concreto, enquanto novo e em bom estado de conservação, possui pH elevado e alta resistividade elétrica. Essas características conferem excelente proteção contra a corrosão para as armaduras de aço nele embutidas. Com o passar do tempo o concreto pode absorver água, CO₂, cloretos, ácidos, sais e outros poluentes. Essa contaminação reduz o pH e a resistividade elétrica e a estrutura de concreto se transforma em um eletrólito importante, permitindo o funcionamento das pilhas de corrosão, que destroem as ferragens e causam grandes prejuízos e transtornos para as equipes que cuidam de sua manutenção. Para garantir a proteção das ferragens contra a corrosão a melhor solução consiste na utilização de anodos de proteção catódica, desenvolvidos especialmente para essa finalidade. Os anodos podem ser instalados durante a construção da obra ou por ocasião dos serviços de recuperação, onde os problemas de corrosão já começaram a aparecer. O presente trabalho mostra como exatamente funcionam as pilhas de corrosão e como os anodos de proteção catódica podem ser utilizados de maneira prática e econômica para garantir a integridade das pontes e estruturas de concreto de um modo geral.

Palavras-chave

Concreto; armadura de aço; corrosão; anodos; proteção catódica.

Introdução

Com o passar do tempo o concreto pode absorver água, CO₂, cloretos, ácidos, sais e outros poluentes. Essa contaminação reduz o pH e a resistividade elétrica e a estrutura de concreto se transforma em um eletrólito importante, permitindo o funcionamento das pilhas de corrosão, que destroem as ferragens e causam grandes prejuízos e transtornos para as equipes que cuidam de sua manutenção.

Na maioria dos casos, principalmente quando ocorre a penetração ou a contaminação por íons cloreto, é impossível, na prática, fazer-se uma recuperação efetiva e permanente da estrutura de concreto afetada sem a instalação dos anodos de proteção catódica.

As técnicas tradicionais de recuperação não passam, nesses casos, de mero paliativos, cuja aplicação terá que ser periodicamente repetida ao longo da vida útil restante da estrutura, se os anodos galvânicos ou inertes não forem instalados.

A figura 1 mostra exatamente isso, uma estrutura que foi reparada sem a instalação dos anodos de proteção catódica e a corrosão não foi eliminada, voltando a aflorar em pouco tempo.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual



Fig. 1 Estrutura de Concreto com Reincidência de Corrosão após Serviços de Reparos

Mecanismo da Corrosão das Armaduras no Concreto

Em condições normais, o concreto apresenta pH alcalino, superior a 12 e resistividade elétrica elevada. Nesse ambiente as armaduras entram em estado passivo, com uma taxa de corrosão virtualmente igual a zero.

Todavia, nem sempre essa condição prevalece, pois, sob a presença de sais, normalmente cloretos, ou quando o revestimento do concreto é carbonatado, o aço das armaduras torna-se suscetível à corrosão.

Os produtos resultantes da corrosão do aço ocupam um volume de cerca de 2 a 10 vezes superior ao volume ocupado pelo material original. Devido a esse aumento de volume aparecem enormes pressões, superiores a 15 Mpa, na interface entre o concreto e o aço, que provocam o fissuramento do concreto.

O progressivo fissuramento e lascamento do concreto facilita ainda mais a penetração de agentes agressivos e a difusão de oxigênio e de CO₂, acelerando cada vez mais o processo corrosivo, que culminará com o colapso da estrutura.

As principais causas da corrosão das ferragens são a carbonatação e a absorção de cloretos.

A carbonatação é o fenômeno pelo qual os hidróxidos alcalinos do cimento reagem com o dióxido de carbono e outros gases ácidos, como SO₂ e H₂S, presentes na atmosfera, reduzindo o pH do concreto.

Por outro lado, a presença de íons cloretos e outros íons agressivos acima de determinados teores, chamados de limiar da corrosão por cloretos, é considerada uma das principais causas da falha prematura do concreto.

A contaminação do concreto por íons cloreto pode dar-se durante ou após a construção, devido ao uso de aditivos e à presença de ambientes agressivos, em especial os marinhos, sendo que nos países de clima frio a corrosão é ainda mais agravada devido à utilização de sais para o degelo das rodovias.

Situação normalmente encontrada na prática, é a ocorrência simultânea da carbonatação e contaminação por íons cloretos. Essa combinação não só aumenta a taxa esperada de corrosão como também reduz o valor limiar de corrosão por cloretos.

A corrosão das armaduras do concreto, da mesma forma que nas estruturas metálicas enterradas ou submersas, é um fenômeno de natureza eletroquímica. Embora existam diferentes mecanismos, as situações mais comuns podem ser resumidas pelas equações abaixo:



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

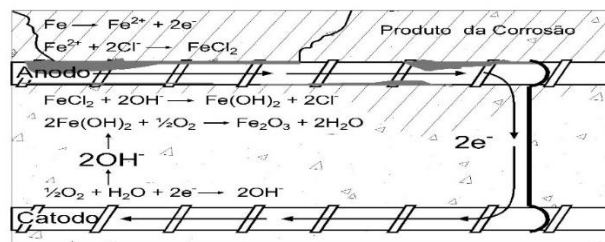
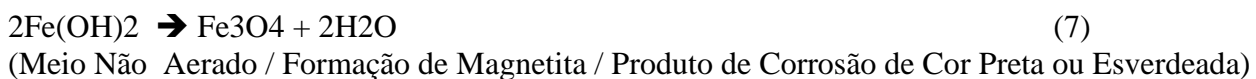
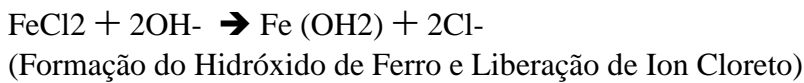
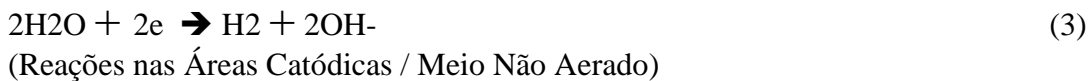
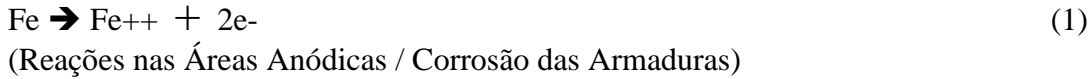


Fig. 2 – Funcionamento das Pilhas de Corrosão em uma Estrutura de Concreto

Analisando essa figura, podemos entender o que acontece na prática:

1) A umidade, oxigênio, íons cloreto, sais diversos, ácidos, CO₂ e outros agentes agressivos, penetram no concreto e destroem a película de passivação do aço.

2) A concentração de umidade, cloretos e oxigênio é maior junto à superfície.

- 3) As ferragens mais profundas ficam em contato com um eletrólito de características diferentes, com menor concentração de cloretos, umidade e oxigênio.
- 4) A variação das características do eletrólito (concreto) dá origem a uma diferença de potencial (pilha de corrosão) entre as ferragens mais superficiais (áreas anódicas) e as áreas mais profundas (áreas catódicas).
- 5) A diferença de potencial causa um fluxo de corrente que abandona as áreas anódicas, corroendo as ferragens, atravessa o concreto, entra nas áreas catódicas e retorna pelas próprias ferragens e elementos da armação, fechando o circuito. Os elétrons fluem em sentido contrário.
- 6) Importante notar que o íon cloreto (Cl^-) não é consumido na reação, permanecendo impregnado no concreto, reduzindo a resistividade elétrica e facilitando o funcionamento das pilhas de corrosão.
- 7) As reações nas áreas anódicas ocorrem no aço, provocando sua corrosão, ao passo que nas áreas catódicas as reações de corrosão se processam no meio, não havendo perda de material metálico.
- 8) O produto da corrosão formado nas áreas anódicas ocupa um volume muito maior que o volume de aço corroído, estourando o concreto e aumentando a penetração de umidade, sais, oxigênio, CO_2 , ácidos e outros agentes agressivos, o que acelera ainda mais o processo de corrosão.
- 9) Como produtos de corrosão da armadura, temos inicialmente o Hidróxido de Ferro (FeOH_2), que em meio não aerado se transforma em magnetita (Fe_3O_4), de cor preta ou esverdeada e em meio aerado se transforma em hematita (Fe_2O_3), o minério de ferro mais comum de ser encontrado, de cor castanho-alaranjada. Essas duas colorações são muito comuns de serem observadas em estruturas de concreto em processo de corrosão, servindo como alerta sobre o problema e chamando a atenção para a necessidade da utilização urgente de métodos de prevenção.

Importante observar que as pilhas de corrosão eletroquímica das armaduras aparecem quando o concreto se transforma em um eletrólito e porque existem diferenças de potencial ao longo da superfície do aço. Essas diferenças de potencial são causadas pelas variações de resistividade elétrica, temperatura, pH, teor de umidade e teor de oxigênio do concreto e pelas características intrínsecas do aço, como a variação da composição química, a presença de inclusões não metálicas e as tensões internas diferenciais causadas pelos processos de fabricação, conformação, corte, dobragem e soldagem das armaduras.

Assim sendo, não podemos nunca deixar que as pilhas de corrosão funcionem, sob pena de termos a destruição das armaduras. Para tanto devemos utilizar sempre um método eficaz de proteção contra a corrosão, como por exemplo a proteção catódica, reconhecidamente o único método capaz de eliminar por completo o funcionamento dessas indesejáveis pilhas.

Quando fazemos um serviço de recuperação do concreto em locais onde houve corrosão, procedimento muito comum de acontecer, criamos, imediatamente, uma nova e importante pilha de corrosão, causada pela diferença de características entre o concreto novo e o concreto existente já contaminado. Dessa maneira, os serviços de recuperação não podem ser executados sem que sejam instalados anodos de proteção catódica, única maneira de garantirmos que o processo corrosivo será eliminado.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

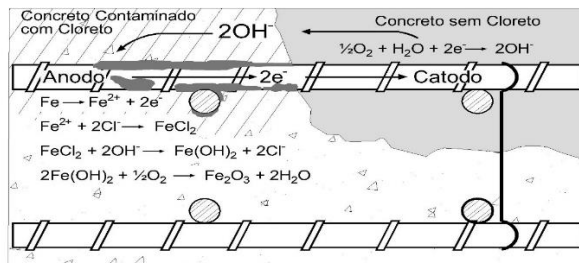


Fig. 3 – Pilha de Corrosão Causada Pelos Serviços de Recuperação do Concreto

Utilização dos Anodos de Proteção Catódica

A proteção catódica é considerada a técnica mais versátil e segura no controle da corrosão das armaduras embutidas nas estruturas de concreto. Praticamente qualquer tipo de estrutura, nova ou existente, pode ser protegida com a instalação de anodos de proteção catódica, do tipo galvânico (proteção catódica galvânica) ou do tipo inerte (proteção catódica por corrente impressa).

A finalidade do sistema de proteção catódica consiste em evitar o funcionamento das pilhas de corrosão que estão sempre presentes nas instalações metálicas enterradas, submersas ou embutidas no concreto.

Estudos realizados pelo Departamento de Estradas de Rodagem Norte-Americano (*FHWA – Federal Highway Administration*), para avaliar os diferentes métodos disponíveis para o controle da corrosão nas estruturas de concretos contaminados por cloretos, concluíram que a proteção catódica é o único método capaz de controlar a corrosão das ferragens, independentemente do grau de contaminação por cloretos.

Em uma das referências mostradas no final desse texto estamos citando o guia técnico BRIDGE PRESERVATION GUIDE, publicado pelo FHWA-Federal Highway Administration em 2011. Esse guia mostra que a tecnologia de Proteção catódica é uma técnica consagrada e largamente utilizada para a proteção contra a corrosão das pontes e viadutos administrados pelo FHWA.

O IPT de São Paulo também fez estudos sobre o assunto, práticos de campo e em laboratório, e também chegou à essa conclusão. No COTEQ 2019, congresso de corrosão da ABRACO-Associação Brasileira de Corrosão, engenheiros do IPT apresentaram um trabalho técnico mostrando os resultados de ensaios feitos com a utilização de anodos de proteção catódica e inibidores de corrosão para a proteção das ferragens. A conclusão do trabalho mostra que “*Dentre as duas tecnologias para reparo, julga-se que a do anodo galvânico é a mais adequada, pois se sabe que a ação protetiva do inibidor de corrosão é dependente de muitas variáveis, em destaque da efetiva concentração presente junto à armadura*”.

Proteção Catódica Galvânica

Para proteger as armaduras contra a corrosão a melhor solução, eficiente, segura e muito utilizada no mundo inteiro e também aqui no Brasil, consiste na utilização de anodos galvânicos de liga de zinco de alto potencial, desenvolvidos pela canadense Vector-Corrosion Technologies e fabricados especialmente para essa finalidade.

Os anodos de zinco, de alta pureza, são fornecidos com um encapsulamento de argamassa especial, alcali-ativada, com pH superior a 14 e baixa resistividade elétrica e são fundidos em um arame de aço recozido ou aço inoxidável, podendo ser simplesmente amarrados às ferragens, bastando apenas que exista um bom contato elétrico entre ambos.

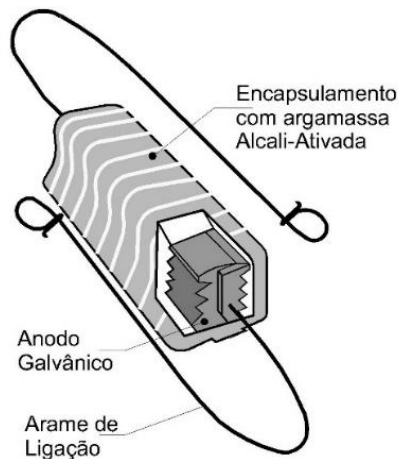


Fig. 4 Anodo Galvânico para a Proteção das Ferragens contra a Corrosão



Fig. 5 Instalação e Teste do Anodo

Esses anodos são fabricados em vários tipos, formatos e tamanhos, dependendo da aplicação que se deseja e podem ser dimensionados para a vida que for necessária. A vida útil e o desempenho dos anodos dependem, principalmente, da área de aço a ser protegida e da massa do anodo escolhido. De posse dessas informações, das características da estrutura de concreto e do local onde ela será ou está construída, o projetista pode dimensionar a quantidade e tipo dos anodos a serem utilizados.

Uma aplicação importante e econômica dos anodos galvânicos consiste na sua utilização para a proteção de regiões seletivas, onde os problemas de corrosão estão atuantes, eliminando a necessidade de instalação nos locais onde o concreto ainda está íntegro e sem contaminação.



A instalação de anodos galvânicos é sempre recomendada em todas as atividades de recuperação estrutural e de extrema importância para evitar a continuidade dos processos corrosivos em estruturas de concreto de um modo geral, antes mesmo que os primeiros sinais de deterioração comecem a aparecer.

Em obras novas, ainda em fase de construção, os anodos são instalados, com grande facilidade e economia, durante a armação das ferragens, evitando problemas futuros de corrosão, em especial em obras nas proximidades do mar ou influenciadas pelo ambiente marinho.

Os anodos são instalados, também, em obras já existentes, onde a corrosão já começou mas ainda não florou. Nesses casos, a corrosão pode ser detectada com facilidade mediante medições dos potenciais das ferragens em relação ao concreto, de acordo com o procedimento recomendado pela ASTM C 876.

Outra importante aplicação dos anodos galvânicos consiste na proteção de estruturas de concreto em água do mar, como é o caso de portos e terminais marítimos de um modo geral, onde a corrosão é sempre bastante severa, devido à presença de cloretos e de sulfatos solúveis na água.

Nessas estruturas, as zonas submersas menos profundas, as faixas de variação de marés e respingos e as regiões permanentemente aéreas, em contato com a névoa salina, são as que apresentam corrosão mais severa e as que precisam de atenção especial.

As zonas mais profundas e as regiões enterradas, principalmente por estarem sujeitas a uma baixa concentração de oxigênio, apresentam corrosão mais suave e não são motivo de grande preocupação, a não ser que estudos específicos recomendem cuidados especiais.

Para as zonas logo abaixo da maré mínima, zona de variação de marés e zona de respingos, a solução mais indicada consiste na instalação de anodos galvânicos de proteção catódica, que podem ser instalados com facilidade e baixo custo, com o auxílio de jaquetas não metálicas, especialmente desenhadas para essa finalidade.

Proteção Catódica por Corrente Impressa

Para o caso de grandes estruturas de concreto, em especial quando a densidade de armadura é elevada, o sistema de proteção catódica mais indicado pode ser o do tipo por corrente impressa, onde são utilizados anodos inertes especiais alimentados por um retificador de corrente. A definição do método mais indicado de proteção catódica, com anodos galvânicos ou por corrente impressa, depende de um estudo criterioso onde são analisadas as vantagens técnicas e econômicas de cada método para uma determinada estrutura de concreto. Um exemplo importante de aplicação de proteção por corrente impressa no Brasil é o monumento do Cristo Redentor, no Rio de Janeiro, que está completando 90 anos.



Fig. 6 Esquema Típico de Instalação de um Sistema por Corrente Impressa utilizado na Estátua do Cristo Redentor, no Rio de Janeiro

Medições dos Potenciais Armadura / Concreto

As medições de potencial são o principal método utilizado para se avaliar se uma estrutura está ou não se corroendo. Essas medições são feitas com o auxílio de voltímetro apropriado, de alta impedância, e um eletrodo de referência de Cu/SuSO₄, os mesmos utilizados para as medições dos potenciais de dutos enterrados de um modo geral, como os oleodutos, gasodutos, adutoras, minerodutos, alcooldutos e polidutos.

O procedimento correto para as medições dos potenciais das armadura de aço está descrito com detalhes na Norma ASTM C876-15 (Standard Test Method for Corrosion Potentials Uncoated Reinforced Steel in Concrete).

Essa Norma mostra que as medições de potencial são de fundamental importância para a avaliação da presença ou não de corrosão das armaduras, sem a necessidade que elas estejam aparentes e possam ser inspecionadas visualmente.

Para tanto, é necessário fazer-se um mapeamento dos potenciais das ferragens ao longo da superfície de concreto e os valores obtidos devem ser analisados da seguinte maneira:

- Regiões com potenciais iguais ou menos negativos que $-0,20\text{V}$ (Cu/CuSO₄): 90% de probabilidade de não haver corrosão ativa nas armaduras.
- Regiões com potenciais entre $-0,20\text{ V}$ e $-0,35\text{ V}$ (Cu/CuSO₄): Probabilidades iguais de haver ou não corrosão ativa nas armaduras.
- Regiões com potenciais mais negativos que $-0,35\text{ V}$ (Cu/CuSO₄): 90% de probabilidade de haver presença de corrosão ativa nas ferragens.

Procedimento Recomendado

O procedimento que recomendamos adotar para o estudo, projeto, fornecimento e instalação do sistema de proteção catódica de uma determinada estrutura de concreto é o seguinte:

Primeira Etapa: análise dos desenhos, inspeção visual, medições dos potenciais das ferragens e demais medições de campo.

Segunda Etapa: análise das informações de campo e elaboração do projeto de proteção catódica, com definição do tipo de proteção a ser utilizado (galvânico ou corrente impressa), especificação dos materiais, desenhos e instruções de instalação.

Terceira Etapa: fornecimento dos materiais e instalação dos anodos, incluindo os certificados de garantia.

Onde Utilizar os Anodos de Proteção Catódica

Praticamente todas as estruturas de concreto podem ser protegidas catodicamente, em especial os tabuleiros e estruturas de pontes e viadutos, as estruturas pré-moldadas, as edificações de um modo geral, as estruturas marítimas, as instalações urbanas e industriais, as estações de tratamento, os tanques de salmoura e os tanques de armazenamento de água do mar, muito utilizados em aquários turísticos.

Todas essas estruturas, quando situadas em cidades (contaminação por CO₂), ambientes industriais (contaminação por gases diversos) e ambientes marinhos (contaminação por cloretos) ficam submetidas a processos de corrosão importantes que precisam ser eliminados. Nesses casos, a única solução, eficiente, econômica e definitiva, consiste no uso dos anodos de proteção catódica, do tipo galvânico ou por corrente impressa.

Conclusões

Do que foi exposto podemos concluir:

- A contaminação por íons cloreto, gases diversos e carbonatação são as principais causas da corrosão das armaduras das estruturas de concreto.
- A proteção catódica é a única técnica capaz de efetivamente controlar a corrosão de ferragens embutidas em concretos, carbonatados ou contaminados por cloretos.
- O uso da proteção catódica deve sempre ser considerado durante as atividades de reparo, reforço e conservação das estruturas de concreto de um modo geral.
- Os anodos de proteção catódica podem ser instalados em estruturas novas, ainda em construção, em estruturas já contaminadas pela corrosão, durante os serviços de recuperação do concreto ou em estruturas onde a corrosão ainda não aflorou, mas já foi detectada com o auxílio das medições dos potenciais das ferragens.
- A utilização em novas estruturas, ainda na fase de construção, é altamente recomendada, em especial nas estruturas influenciadas pelo ambiente marinho, onde se sabe, com certeza absoluta, que a corrosão das ferragens será um problema importante.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

- O tipo de sistema a ser utilizado, gavânico ou por corrente impressa, depende sempre do tipo de estrutura a ser protegida e de um estudo técnico e econômico cuidadoso.
- Atualmente, com os conhecimentos sobre o assunto, é possível proteger-se qualquer tipo de estrutura por meio de proteção catódica, não existindo nenhuma justificativa, nem técnica e nem econômica, para não utilizá-la nas obras de concreto, tanto as novas quanto as já contaminadas pelos poluentes.
- Apenas a falta de conhecimento das reais causas da corrosão e do entendimento correto a respeito do funcionamento dos sistemas de proteção catódica podem impedir a utilização dessa técnica em estruturas de concreto de um modo geral.

Referências

GOMES, LUIZ PAULO, Livro Sistemas de Proteção Catódica, Segunda Edição, 351 páginas, 2020, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.

G. SERGI, G. SENEVIRATNE, D. SIMPSON, Monitoring Results of Galvanic Anodes in Steel Reinforced Concrete Over 20 Years, Vector-Corrosion Technologies, Revista Constructions and Building Materials, November 2020, UK.

GOMES, LUIZ PAULO, Corrosão e Proteção Catódica de Armaduras de Aço, Revista Concreto e Construções publicada pelo IBRACON-Instituto Brasileiro do Concreto, Edição 100, Dezembro 2020, São Paulo, Brasil.

GOMES, LUIZ PAULO, Utilização de Anodos Galvânicos para a Proteção Catódica de Armaduras de Estruturas de Concreto, Revista Corrosão e Proteção publicada pela ABRACO-Associação Brasileira de Corrosão, Março 2019, Rio de Janeiro, Brasil.

GOMES, LUIZ PAULO, Come Preservare Le Strutture In Cemento Con Gli Anodi Galvanici, Revista Protective Coatings publicada pela IPCM, Outubro 2018, Milão, Itália.

AHMAD, ANWAR, Bridge Preservation Guide, Publicado pela FHWA-Federal Highway Administration, August 2011, USA.