Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Gestão Total da Corrosão. Análise documental

M. Donadio[1]*, J. Capacho[2], L. Santander[3]
* Autor de Contato: donadio.michel@fr.sika.com
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690

Recebido: 27/02/2023 | Correções recebidas: 17/04/2023 | Aceito: 23/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

O objetivo deste relatório é apresentar as diferentes técnicas de mitigação da corrosão atualmente disponíveis, tais como argamassas de reparo, inibidores de corrosão (ativos ou passivos), revestimentos de proteção e proteção catódica por corrente induzida ou galvânica. As estruturas, construídas para durar muito tempo, estão sujeitas ao envelhecimento precoce devido a influências ambientais como água, dióxido de carbono atmosférico e outros elementos nocivos, como cloretos e poluição. O processo de deterioração mais comum em estruturas de concreto armado é a corrosão e posterior expansão devida aos produtos de corrosão do aço, levando à fissuração e ao destacamento superficial do concreto.

Palavras-chave: corrosão; inibidor de corrosão; proteção catódica; ânodos galvânicos.

Citar como: Donadio, M., Capacho, J., Santander, L. (2023), *"Gestão Total da Corrosão. Análise documental"*, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 235 – 253, DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690

[1] Technical Manager, Sika Services AG, Suiza.
[2] Business Development Manager LATAM, Sika Mexicana SA de CV, México
[3] Product Engineer, Sika Mexicana SA de CV, México.

Contribuição de cada autor
este trabalho o autor Michel Donadio escreveu o artigo. Os autores Luis Santander e Juan Capacho fizeram contribuições e adaptações de forma e conteúdo.

Licença Creative Commons
Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0).

Discussões e correções pós-publicação
Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

© 2023 ALCONPAT Internacional

Total Corrosion Management. Documentary analysis

ABSTRACT

The aim of this report is to provide a documentary analysis of the different corrosion mitigation techniques currently available, such as repair mortars, active and passive corrosion inhibitors, protective coatings and galvanic or induced current cathodic protection. These structures, built to last for a long time, are subject to ageing due to environmental influences such as water, atmospheric carbon dioxide and other harmful elements such as chlorides and pollution. The most common deterioration process in reinforced concrete structures is corrosion and subsequent expansion of the steel reinforcement, leading to cracking and spalling of the concrete.

Keywords: Corrosion; corrosion inhibitor; cathodic protection; galvanic anodes.

Gestión integral de la corrosión. Análisis documental

RESUMEN

El objetivo de este informe es hacer un análisis documental sobre las diferentes técnicas de mitigación de la corrosión disponibles en la actualidad, como los morteros de reparación, los inhibidores activos y pasivos de la corrosión, los revestimientos protectores y la protección catódica con corriente inducida o galvánica. Estas estructuras, construidas para durar mucho tiempo, están sometidas al envejecimiento por influencias de su entorno, como el agua, el dióxido de carbono atmosférico y otros elementos nocivos como los cloruros y la contaminación. El proceso de deterioro más común en las estructuras de concreto armado es la corrosión y la consiguiente dilatación de la armadura de acero, lo que provoca la fisuración y el desconchado del concreto.

Palabras clave: corrosión; inhibidor de corrosión; protección catódica, ánodo galvánico.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado, como edifícios, pontes, etc., estão projetadas para durar muito tempo; não é raro que as estruturas das pontes tenham uma vida útil de 100 anos ou mais. Tendo o cobrimento de concreto correto com uma dosagem apropriada, o concreto geralmente fornece a proteção contra a corrosão necessária para as barras de aço em seu interior.
Durante a hidratação, o cimento gera cal hidratada, que produz um ambiente altamente alcalino na solução de poro da matriz cimentícia. Desta forma, as barras de aço são mantidas em uma condição passivada, pois a formação de óxidos de ferro está presente na superfície do aço. No entanto, devido ao processo natural de carbonatação, o concreto pode perder progressivamente sua alta alcalinidade, ou devido a ação localizada de cloretos, os óxidos de ferro estáveis podem descompor-se, o que significa que as barras de aço já não estarão em um ambiente passivo, e podem começar a corroer-se.
A corrosão das armaduras de aço no interior no concreto se comporta da mesma forma que a corrosão de um metal em soluções eletrolíticas, a corrosão se produz sempre nos ânodos como está descrito na figura 1.

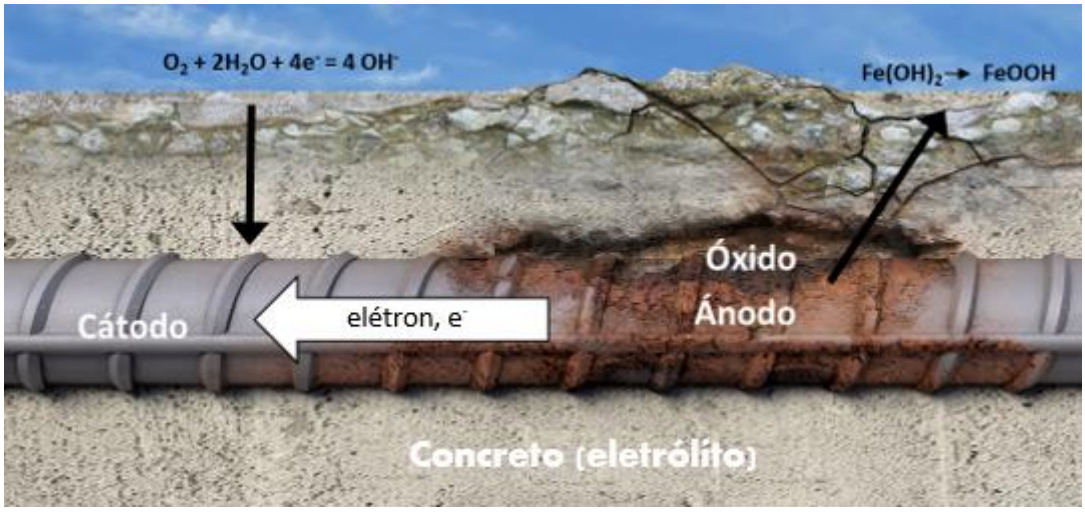

Figura 1. modelo esquemático da corrosão do aço da armadura no concreto.

As condições necessárias para que ocorra a corrosão do aço são:

- Perda de passividade (devida a carbonatação, ou pela presença de cloretos).
- Umidade nos poros de concreto (eletrólito).
- Presença de oxigênio perto das armaduras.

As três condições devem estar presentes para que o aço seja corroído.

1.1 Corrosão induzida por carbonatação

Quando o dióxido de carbono atmosférico se encontra com a cal hidratada na solução de poro do concreto não carbonatado, se produz uma reação de carbonatação, e o hidróxido de cálcio altamente alcalino ($Ca(OH)_2$ com um pH ~13), procedente da cal hidratada, se converte em carbonato de cálcio pouco alcalino (pH ~9), relativamente insolúvel, como se observa na equação 1:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow \downarrow CaCO_3 \quad (1)$$

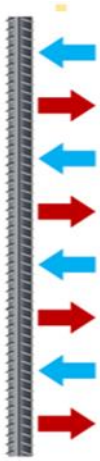

Figura 2. Adaptado de Angst. O ânodo e o cátodo são de tamanho similar na corrosão induzida por carbonatação.

Figura 3. Corrosão induzida por carbonatação em zonas de ausência ou cobrimento inadequado de concreto.

A corrosão iniciada por carbonatação gera uma série de microcélulas anódicas/catódicas (figura 2), que conduzem ao que pode ser uma corrosão generalizada, mas que progride com bastante lentidão, normalmente uma redução de 1/100 a 1/10 mm da armadura por ano (Angst et al, 2020). Este tipo de corrosão afeta com frequência grandes áreas de armadura próximas de superfícies de concreto expostas em zonas de ausência ou cobrimento de concreto inadequado, como o muro da fachada do edifício que se mostra na figura 3 .

1.1.1 Corrosão induzida por cloretos

Ocorre até em condições alcalinas de concreto carbonatado ou não, quando há penetração por difusão de íons cloreto, por exemplo, em atmosferas marinhas ou quando se aplica sais de degelo, ou ambientes industriais. Assim que uma certa concentração de cloretos atinge a superfície do aço da armadura, pode acarretar a temida corrosão por pites (Silva, 2013), com a formação de áreas anódicas alternadas com catódicas, como se mostra nas figuras 4 e 5:

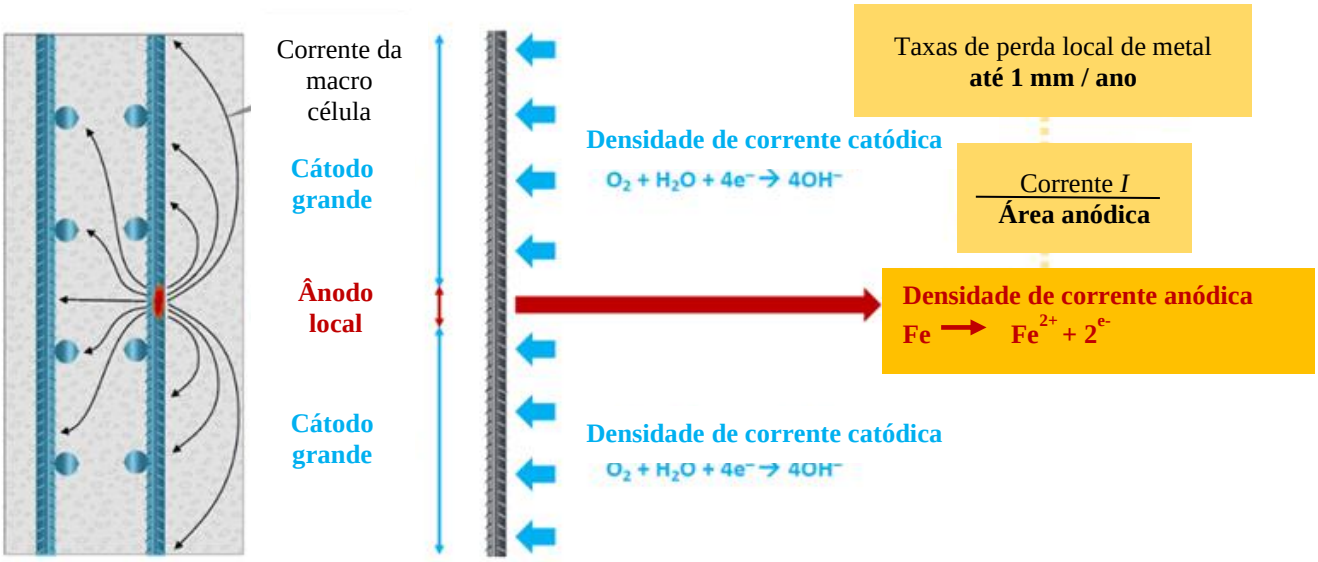

Figura 4. Adaptado de Angst. formação de um ânodo localizado no concreto contaminado com cloreto.

Figura 5. Corrosão típica induzida por cloretos com formação de pites.

A velocidade da corrosão induzida por cloreto pode ser rápida, em geral localizada e produz poucos sinais visíveis externamente, até que os produtos da corrosão expandam e destaquem o concreto de cobrimento, como ilustrado na figura 6. O colapso repentino e devastador das estruturas devido a esta perda local da seção transversal da armadura pode ocorrer, sem sinais significativos de aviso prévios.

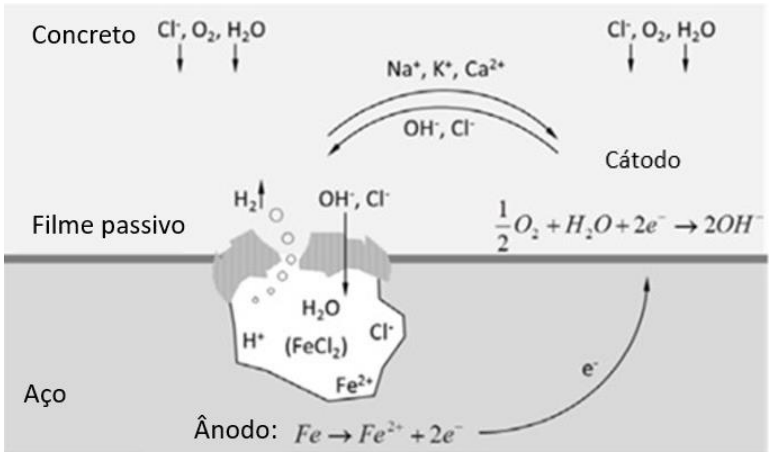

Figura 6. Adaptado de Silva (Silva, 2013). Representação esquemática da corrosão por pites induzida por cloretos.

1.1.2 Sistemas para a gestão da corrosão

Existem diferentes tipos de sistemas para a gestão da corrosão, que permitem resolver os problemas ao redor da corrosão nos aços da armadura:

- Argamassas de reparo para o concreto
- Inibidores de corrosão ativos e passivos
- Cobrimentos anti-carbonatação
- Proteção catódica contra corrosão induzida por corrente
- Ânodos galvânicos (instalados na armadura, discretos e aplicados em superfície)

Outros sistemas disponíveis não mencionados nas normas europeias EN 1504, no entanto, não serão abordados neste artigo.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise documental sobre um dos sistemas mais usados para gerenciamento da corrosão mencionada anteriormente.

2. SISTEMAS PARA A GESTÃO DA CORROSÃO

2.1 Argamassas de reparo para o concreto

A corrosão da armadura de aço afeta o uso de muitas estruturas de concreto. A recuperação localizada é uma técnica comum que implica a eliminação do concreto deteriorado fisicamente (por exemplo, mecanicamente com martelos demolidores ou mediante hidrodemolição), a limpeza das superfícies de aço expostas e, em seguida, a restauração do perfil original com uma argamassa ou argamassas de recuperação adequadas.

Este processo deixa o aço da zona de recuperação em estado passivo (Page & Sergi, 2000).

Em um número significativo de casos, foram observados danos posteriores induzidos pela corrosão no que parecia concreto são na área imediatamente ao lado das recuperações realizadas, como se vê na figura 7. Em certas ocasiões, isso ocorreu alguns meses depois de finalizado o processo de recuperação localizada (Qian, et al 2006). Este fenômeno é conhecido como formação de ânodos incipientes ou em anel, o efeito “halo” (Bertolini, et al 2004).

Figura 7. Desplacamento superficial devido a corrosão por cloretos.

O conceito de que a atividade macro celular (a formação de ânodos e cátodos separados espacialmente) causa o efeito de ânodo incipiente, foi introduzido pela primeira vez por Page e Treadaway (Page & Treadaway, 1982). Os autores sugeriram que a redistribuição das regiões anódicas e catódicas próximas da região recuperada do concreto afeta o risco futuro de corrosão. Christodoulou (Christodoulou, 2012) sustenta a opinião generalizada de que a causa dos ânodos incipientes é a perda da proteção catódica natural que fornece o aço em corrosão ao aço da base de concreto adjacente ao trecho recuperado.

O projeto Conrep (Tilly et all , 2007) indica que, na Europa, 20% dos trabalhos de recuperação caíram em 5 anos e 55% em 10 anos. O documento também indica que apenas 30% das recuperações parciais se comportam bem quando utilizadas de forma isolada, enquanto que esta

percentagem aumenta para 50% quando se combina com um revestimento protetor de superfície.
Portanto, podemos retomar o processo de ânodo incipiente do seguinte modo:

- O desplacamento devido à corrosão induzida pelo cloreto do aço da armadura se produz nas zonas anódicas.
- A extração do concreto é realizada nessas zonas afetadas.
- A recuperação é feita com um material próprio à base de cimento patenteado, que é altamente alcalino.
- A zona recém recuperada passa a ser uma zona catódica (devido à alta alcalinidade da argamassa de recuperação).
- As zonas catódicas que migram para as zonas anódicas (zonas desplacadas) se convertem agora em zonas anódicas, já que são menos alcalinas que a argamassa de recuperação recém aplicada e o mais provável é que contenham alguns cloretos.
- O aço da armadura que antes se encontrava nas zonas catódicas protegidas já não se encontra num ambiente de passivação, já que esta zona se converteu num ânodo.
- A aceleração da corrosão se produz então nestas zonas anódicas recém-formadas (que contornam as zonas de recuperação parcial); consulte as figuras 7 e 8.

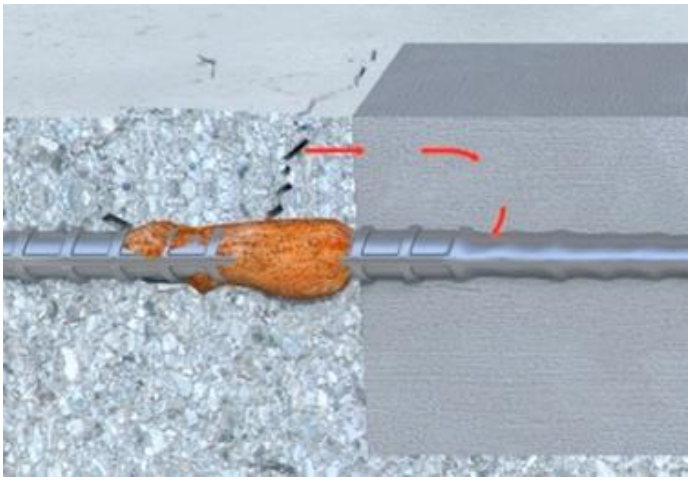

Figura 8. Desplacamento na área adjacente devido a corrosão por ânodo incipiente.

Por isso, especialmente no caso de corrosão da armadura induzida por cloreto, a recuperação do concreto com argamassas adequadas por si só, não poderia fornecer a eficácia desejada por um longo período.
Em consequência, os trabalhos de recuperação por trechos devem ser combinados com sistemas adequados de proteção superficial para evitar a formação de ânodos incipientes.

2.2 Inibidores de corrosão

Um inibidor é uma substância que atrasa ou retarda a velocidade de uma reação química. Um inibidor de corrosão é definido como uma substância que retarda o início da corrosão ou reduz a velocidade de corrosão do aço existente.
Os inibidores de corrosão para concreto armado estão disponíveis como aditivos que podem ser misturados com o concreto, à argamassa ou concreto de recuperação, ou como produtos de impregnação aplicados na superfície; este último é o tipo mais comumente utilizado para os trabalhos de recuperação de concreto.
Existem dois tipos principais de inibidores de corrosão no mercado:

- Inibidores ativos que requerem que o componente ativo penetre e alcancem as armaduras

para poder fornecer uma película contínua na superfície, que protege as barras de aço da corrosão.

- Inibidores passivos que agem de forma diferente, impedindo que a água líquida penetre e migre através do concreto, permitindo ao mesmo tempo a evaporação da umidade de vapor. Isso aumenta a resistência do concreto que protege o aço da armadura. Uma vantagem desta técnica é que também evita a futura entrada de cloreto na estrutura.

2.2.1 Inibidores ativos da corrosão

Também existem no mercado diferentes tecnologias de inibidores ativos de corrosão:

- Inibidores da corrosão anódica que suprimem a reação anódica - o produto típico é o inibidor à base de nitrito. Seu uso pode ser crítico se sua concentração não for alta o suficiente, pois pode produzir uma corrosão acelerada.
- Inibidores da corrosão catódica que ativam a própria reação catódica ou precipitam seletivamente nas zonas catódicas para aumentar a impedância da superfície e limitar a difusão de espécies redutíveis a estas zonas. Os produtos típicos são o composto de zinco (precipitação de óxido que forma uma película protetora sobre a barra de aço) ou o sulfito de sódio que atua como sequestrador de oxigênio. Se considerar seguros, eles são menos eficazes do que os inibidores anódicos.
- Inibidores de corrosão ambiódicos (mistos) que atuam simultaneamente nas zonas anódica e catódica. Esta classe de inibidores tem um efeito sinérgico, combinando os benefícios dos tipos anódico e catódico, inclusive em dosagens baixas. Não se encontrou nenhuma aceleração da corrosão, apenas um redutor de efeito.

Os inibidores ambiódicos geralmente são baseados em uma mistura de um aminoálcool e seu sal de aminoácido. Estes são muito pequenos e muito voláteis, e não reagem ao cimento, pelo que podem migrar livremente para dentro da matriz de cimento (Tritthart , 2002).

Em resumo, os inibidores de corrosão ambiódicos:

- Penetram no concreto tanto na fase líquida como de vapor
- Transferem hidróxidos na superfície do aço em concreto carbonatado
- Transferem cloretos na superficie do aço (em determinadas condições)
- Formam uma capa química adsorvida de 100-1000 angstrom (0,00001 a 0,0001 mm) de espessura na superfície da armadura de aço.
- Reduzem a dissolução de ferro no ânodo
- Reduzem o acesso de oxigênio no cátodo

No entanto, em muitos países, a tecnologia dos inibidores ativos de corrosão aplicados em superfície teve apenas uma aceitação limitada e, de fato, podem apresentar limitações significativas quanto ao seu uso e eficácia:

- A primeira limitação é sua capacidade de migrar em quantidade suficiente para ser eficaz. Se o concreto for de alta qualidade e/ou o cobrimento for relativamente importante, então a capacidade da molécula inibidora para migrar para a profundidade em quantidade suficiente ao nível das barras da armadura é limitada. Esta situação é a mais provável nas estruturas de engenharia civil.
- A segunda limitação importante se produz quando há cloretos presentes no concreto. De acordo com a experiência e as intensas investigações como o projeto SAMARIS (SAMARIS, 2003-2005), esses inibidores não são eficazes se houver uma elevada concentração de cloretos junto às barras de aço.

Em resumo, para as estruturas marítimas ou de engenharia civil expostas a sais de degelo, os inibidores ativos da corrosão, aplicados na superfície, não são a solução ideal para mitigar a corrosão existente.

No entanto, existem alguns resultados positivos para o uso destes inibidores na corrosão induzida por cloreto - o projeto SAMARIS também apresenta um deles - Fleet Flood Bridge, onde o inibidor foi utilizado com êxito para resolver o problema da corrosão incipiente do ânodo.
Como mostra Heiyandtuduwa (Heiyantuduwa, 2006) e Taché (Taché, 2000) (veja a figura 9 onde se nota uma redução acentuada da corrosão com o efeito dos inibidores que são aplicados antes ou depois da carbonatação acelerada), esta tecnologia funciona melhor em concreto armado com corrosão do aço induzido por carbonatação por três razões principais:

- A corrosão induzida pela carbonatação está associada a um baixo cobrimento do concreto. Portanto, é mais fácil que o inibidor chegue à armadura.
- A carbonatação é produzida principalmente em concretos de menor qualidade, por isso sua densidade é menor e, em consequência, há uma maior penetração (profundidade e intensidade) do inibidor.
- A velocidade de corrosão associada à carbonatação é relativamente lenta, por isso é mais fácil que o inibidor seja eficaz.

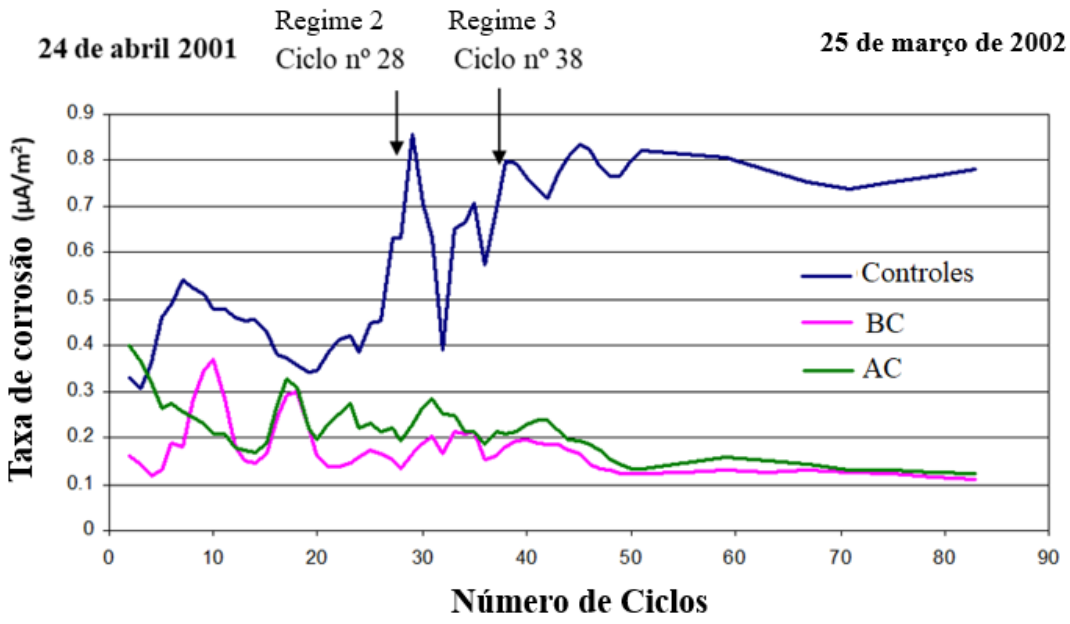

Figura 9. Concreto carbonatado – efeito do inibidor ambiótico (aplicado antes e depois da carbonatação). (Heiyantuduwa, 2006)

Quando se mostra adequada, a tecnologia de inibidores ativos da corrosão é uma técnica muito econômica.
Normalmente, os inibidores ativos da corrosão são mais eficazes para reduzir a corrosão induzida pela carbonatação nos edifícios que para mitigar a corrosão induzida pelo cloreto na engenharia civil ou nas estruturas marítimas.

2.2.2 Inibidores passivos da corrosão

Como indicado anteriormente, os inibidores passivos da corrosão atuam aumentando significativamente a resistividade do concreto ao nível das barras de aço. Os inibidores passivos do tipo silano concentrados com um conteúdo ativo em torno de 80% para os tipos mais densos, ou superior a 95% para os tipos líquidos, são soluções eficazes para reduzir a penetração da água em estruturas de concreto. Numerosos estudos de campo atestam também sua longa duração. Christodoulou (Christodoulou, et al 2012) demonstrou que "os tratamentos realizados há 20 anos podem seguir proporcionando um efeito protetor residual".

Estes inibidores passivos de corrosão são muito eficazes para evitar a migração de cloreto para o concreto. Eva Rodum (Rodum, 2012) realizou testes em estruturas existentes e demonstrou que as impregnações hidrófobas de diferentes formas são muito eficazes para evitar a migração de cloreto, até 10 anos após sua aplicação (veja a figura 10) onde o concreto de referência tem uma quantidade de cloreto muito elevada enquanto as amostras tratadas com os diferentes tratamentos hidrofóbicos têm níveis de cloreto próximo de zero. Os estudos realizados por M. Brem (Brem, et al 2022) durante um período de 11 anos mostram que a velocidade de corrosão e a resistividade elétrica do concreto estão muito bem correlacionadas, o que confirma que a reação de corrosão está controlada principalmente pela quantidade de umidade do concreto ao nível da armadura de aço. Neste estudo, um silano denso foi aplicado no concreto deixando uma parte sem aplicação como referência. Foi instalado um sistema de monitoramento que permite medir a resistividade em diferentes profundidades no concreto e a atividade de corrosão das armaduras. Depois de 11 anos, não houve penetração de umidade na zona tratada (em azul na figura 11) com uma atividade de corrosão quase nula. Do outro lado, notou-se uma atividade de corrosão alta e grande umidade na zona não tratada (em preto na figura 11). Este estudo também mostra a vantagem positiva deste tratamento com silanos em termos de longevidade e proteção contra a corrosão.

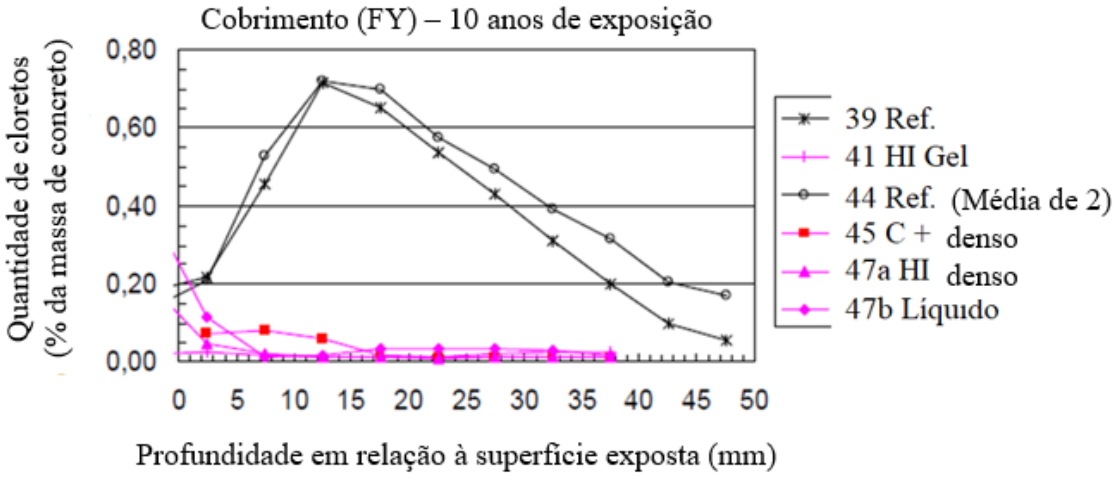

Figura 10. Perfis de cloreto do concreto da parte inferior de uma doca na Noruega. (Rodum, 2012)

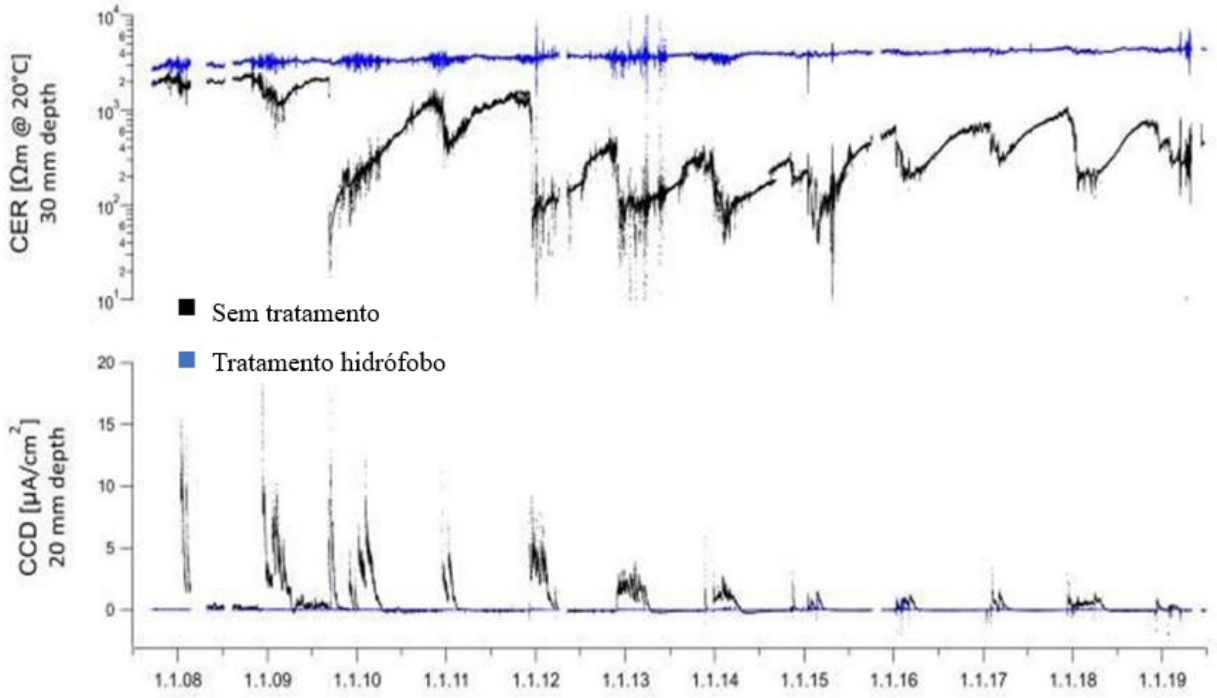

Figura 11. Resistividade elétrica do concreto CER (acima) e densidade de corrente de corrosão CCD (abaixo) de superfícies não tratadas (preto) e tratadas (azul) com uma impregnação hidrófoba densa de um trecho de um túnel durante um período de 11 anos (Brem et al. 2022).

Em resumo, os inibidores passivos da corrosão são muito eficazes para prevenir a longo prazo a corrosão induzida por cloreto.
Seus recursos para mitigar a corrosão existente são mais discutíveis e suas eficácias podem depender do nível de corrosão e de seus recursos para penetrar o suficiente na superfície do concreto (sem necessidade de alcançar as barras de armadura). Além disso, o concreto deve seguir permitindo a difusão do vapor em cada direção para que a umidade se evapore e o concreto seque ao nível da armadura.

2.3 Revestimentos de proteção

A principal função dos revestimentos de proteção das superfícies de concreto é geralmente controlar o avanço da frente de carbonatação na matriz de cimento.
Estes revestimentos também podem ser formulados para serem elásticos e preencher de forma eficaz as fissuras, mesmo a temperaturas muito baixas (até -20°C ou menos).
Dependendo do produto, a preparação da superfície e a aplicação podem observar uma durabilidade típica de 10-15 anos para um revestimento flexível de base acrílica e dispersão em água, ou de 15-20 anos para um revestimento de base rígida de resina metacrilato e dispersão em solvente (Mozaryn, et al 2009). Transcorrido este tempo, pode ser necessária uma aplicação de segunda demão para manter o desempenho protetivo. No entanto, há exemplos de que se observou uma degradação prematura, devido principalmente ao fato de a corrosão estar muito avançada, uma quantidade excessiva de umidade ou a uma preparação e aplicação inadequadas da superfície.
Uma vez realizadas as recuperações do concreto, podem ser utilizados revestimentos protetores para impedir a entrada futura de elementos negativos (por exemplo, cloreto e CO_2), e para fornecer um aspecto visual homogêneo do substrato, ocultando as diferenças de cor devidas aos trabalhos de recuperação em trechos.
Os revestimentos de proteção transpiráveis atenuam a corrosão do mesmo modo que as impregnações hidrófobas, impedindo a entrada de agentes negativos (por exemplo, cloreto e CO_2)

e permitindo que o concreto seque.
Mas se a corrosão está muito avançada e/ou se não são utilizados revestimentos transpiráveis, existe o risco de que a umidade fique presa com todos os materiais presentes no concreto para que a corrosão continue.

2.4 Proteção Catódica

Existe uma norma europeia atualizada de elaboração recente que é aplicável: Proteção catódica do aço em concreto (ISO 12696:2016). Esta norma é válida tanto para a proteção catódica por corrente induzida quanto para a proteção galvânica.

2.4.1 Proteção catódica por corrente induzida

A proteção contra a corrosão é obtida através da instalação de um ânodo, por exemplo, de titânio, na superfície do concreto e conectado diretamente às armaduras (consulte a figura 12).

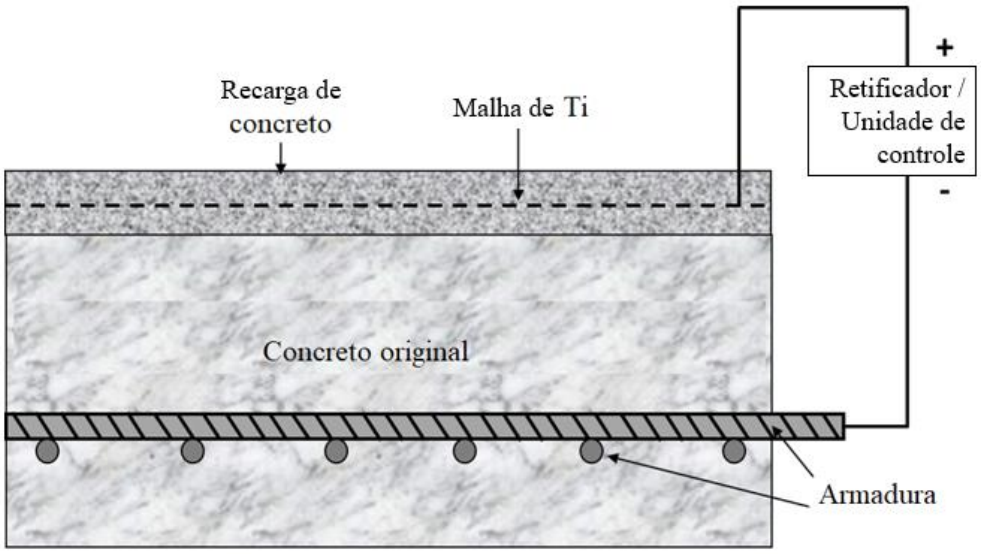

Figura 12. Proteção catódica por corrente induzida.

Através deste sistema circula uma corrente que mantém as armaduras na zona catódica, o que significa que não pode produzir corrosão nesta zona, mesmo na presença de altos teores de cloreto. Quando instalado corretamente, é o único sistema disponível que detém por completo as atividades de corrosão. No entanto, o design e a instalação desses sistemas requerem um alto nível de qualificação. Também requer um fornecimento contínuo de corrente elétrica e um controle contínuo durante toda a vida útil para garantir que o sistema funcione corretamente. A falta deste serviço pode provocar efeitos destrutivos da corrente induzida na estrutura.
O Programa Nacional de Investigação Cooperativa em Rodovias de EE.UU., em sua síntese 398 (National Cooperative Highway Research Program, 2009), sugere que muitas agências não executam, nem a supervisão nem a manutenção, ou o fazem de forma insuficiente, e que esta é a razão mais importante do desempenho deficiente de muitos destes sistemas.
Resumindo, a proteção catódica por corrente induzida é um sistema muito eficaz para deter as atividades de corrosão, mas é muito complexo de projetar e instalar, além de muito caro para instalar, administrar continuamente e supervisionar durante toda a sua vida útil.
Além disso, esta técnica é a única que pode ser utilizada eficazmente em estruturas de concreto

protendido com medidas adicionais como precaução devido ao risco de fragilização por hidrogênio.

2.4.2 Proteção Galvânica

A proteção galvânica contra a corrosão do aço no concreto se baseia na formação de um elemento galvânico se um metal menos nobre que o aço (figura 13), em contato direto com o cobrimento do concreto, se conecta eletricamente às barras de aço de armadura. O aço de armadura fica protegido da corrosão enquanto flui corrente galvânica suficiente entre o elemento galvânico (que atua como ânodo) e a armadura de aço (que atua como cátodo). O mais habitual é usar o zinco como elemento de sacrifício/material anódico. A célula galvânica que se forma corresponde a uma pilha convencional de zinco/ar. A primeira aplicação conhecida de um sistema galvânico de proteção contra a corrosão para o concreto armado foi no tabuleiro de uma ponte em Illinois em 1977.

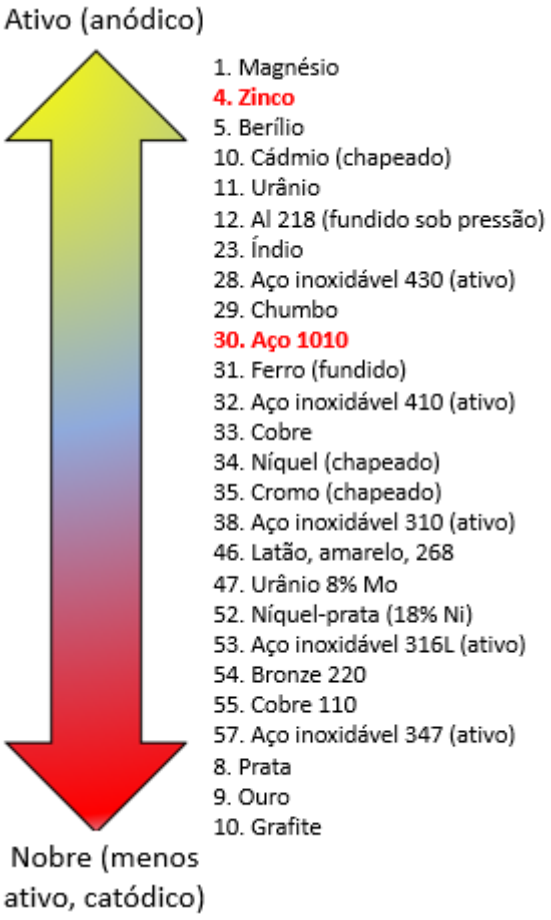

Figura 13. Diferença de potencial de vários metais.

A eficácia da proteção galvânica contra a corrosão depende da atividade permanente e da durabilidade do ânodo de zinco. No entanto, a passivação do ânodo de zinco mediante a formação de uma capa passiva que reduz o fluxo de corrente na superfície do zinco pode ser devida a:

- Deposição de produtos anódicos (corrosão do zinco) na superfície do elemento de zinco.
- Contato com hidróxido de cálcio alcalino na solução de poros de concreto.

Os primeiros sistemas galvânicos aplicados em estruturas de concreto armado sofreram uma rápida passivação dos ânodos de zinco, por isso que perdem seu efeito protetor em pouco tempo. Esta passivação teria que ser solucionada mediante a introdução de agentes de ativação adequados, que também poderiam provocar uma autocorrosão excessiva, consumindo até 70% do zinco sem produzir a protetora corrente necessário.

Os estudos críticos sobre os resultados desiguais das primeiras aplicações criam resistência ao uso de sistemas galvânicos até agora em alguns países. Foram realizados enormes esforços de investigação e pesquisa para desenvolver melhores ânodos galvânicos com uma ativação equilibrada para uma eficácia duradoura. Todos os métodos que foram desenvolvidos com sucesso até a data estão amplamente protegidos por patentes. No entanto, agora também há testes de uma vida útil do sistema patenteado há mais de 20 anos.

Existem vários sistemas de proteção galvânica:

- Mitigação de ânodos incipientes:
  - Ânodos inseridos na região reparada
  - Ânodos discretos instalados na periferia da zona reparada
- Controle da corrosão em concreto contaminado:
  - Ânodos discretos híbridos
  - Ânodos discretos galvânicos
  - Ânodos instalados em superfície

As vantagens típicas dos sistemas galvânicos sobre a proteção catódica por corrente impressa são:

- Não demanda cabeamento externo dos ânodos (sem riscos de roubos do cabo de cobre)
- Instalação simples, custo relativamente baixo
- Sem risco de fragilização por hidrogênio em cordoalhas protendidas
- Densidade de corrente autoajustável
- Não requer manutenção e supervisão contínua (embora sempre se recomende a supervisão quando se requer uma vida útil superior a 15 anos).

2.4.2.1. Mitigação dos ânodos incipientes

Estes ânodos são colocados e embutidos na zona de recuperação (figura 14), sendo necessária a utilização de uma argamassa com uma resistividade específica para preencher a região (Lozinguez, et al 2018; Christodoulou, et al 2014), ou no interior do concreto que o envolve a área de reparo (Figura 15). A eficiência desses ânodos não depende da resistividade da argamassa que é usada para preencher o trecho de recuperação (Lozinguez, et al 2018; Christodoulou, et al 2014) para resolver o problema de corrosão incipiente dos ânodos.

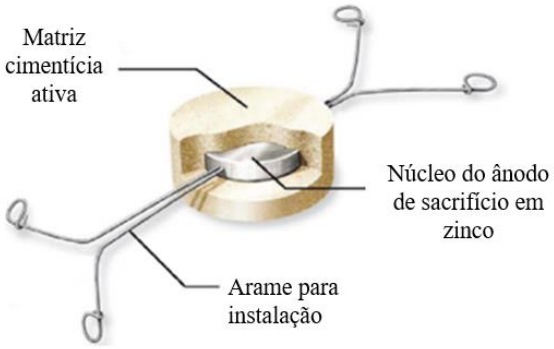

Figura 14. Corte de um ânodo para instalação em um trecho de recuperação.

Figura 15. Ânodos a serem instalados na área adjacente de um trecho de recuperação.

A tecnologia de ânodo galvânico para proteção contra corrosão de concreto armado está disponível há mais de 20 anos.

Sergi George (George et al, 2010) demonstraram, a partir de vários experimentos de campo, a durabilidade a longo prazo desses ânodos e uma boa correlação entre sua vida útil estimada (a partir do consumo do ânodo) e a medição real do zinco residual restante no disco após 10 anos.

Ânodos colocados em áreas de reparo requerem o uso de uma argamassa de reparo de baixa resistência, o que infelizmente também limita o nível de qualidade da argamassa.
Quando os ânodos são colocados no concreto original fora dos trechos de recuperação, ou seja, fora, mas nas suas proximidades, os trabalhos de recuperação podem ser executados com argamassa de alta qualidade, uma vez que não há limitação da resistividade da argamassa. Em Cancun, no México, foi realizado um teste de campo, instalando ânodos dentro do concreto para proteger o aço da armadura contra o efeito incipiente da corrosão do ânodo. As medições no local mostraram o nível de proteção dos ânodos instalados (figura 16).

Figura 16. Instalação de ânodos no concreto com verificação de instalação em Cancún, México.

Alguns trabalhos independentes (Lozinguez, et al 2018; Christodoulou, et al 2014) demonstraram a importância de se instalar os ânodos no concreto original das proximidades e não nas zonas de recuperação.
Trata-se de um sistema relativamente seguro, mas eficaz para evitar o desenvolvimento de ânodos incipientes, mesmo na presença de altos teores de cloreto em concreto são de boa qualidade. Se os ânodos forem instalados dentro do trecho recuperado, a argamassa de reparo para preenchimento deve ter uma resistividade específica. Caso contrário, se desejar usar os ânodos que estão perto do trecho, pode usar uma argamassa de alta qualidade.

2.4.2.2. Prevenção da corrosão com ânodos discretos

Estes ânodos são instalados em concreto contaminado e depois são unidos para produzir a corrente galvânica como se pode ver na foto da figura 17, onde se pode ver a preparação para a instalação destes ânodos e a sua união.
Algumas questões têm sido levantadas (Holmes et al, 2011) sobre a eficácia deste sistema, especialmente em estruturas de concreto com forte corrosão existente. Observou-se que, operando exclusivamente em modo galvânico, na presença de cloretos elevados, a corrente de saída dos ânodos é igual à dos ânodos colocados em concreto sem cloretos. Isso significa que a eficiência de ânodos discretos pode ser limitada se usada para interromper a corrosão em áreas de corrosão induzida por alto teor de cloreto.

Figura 17. Ânodos discretos em um parapeito de ponte.

O uso de ânodo galvânico é um sistema seguro, mas com limitações em zonas de alta corrosão induzidas por cloreto, pois no nível da corrente galvânica que libera os ânodos pode não ser suficiente para extrair os cloretos e, consequentemente, repassivar o aço.

2.4.2.3. Prevenção da corrosão com sistemas híbridos

Há mais de 15 anos, uma empresa com sede no Reino Unido patenteou e lançou no mercado um sistema híbrido que combina a corrente induzida e a proteção galvânica.

Durante a fase de corrente induzida (extração eletroquímica de cloretos, que é usada frequente e inicialmente durante 1 ou 2 semanas, em função da tensão utilizada), a armadura de aço torna-se passiva devido à formação de íons de hidróxido devido à saída de corrente induzida, enquanto os cloretos são eliminados do líquido poroso circundante. Uma vez que o aço fique passivo, desconecte a corrente e conecte os ânodos para que o sistema funcione no modo galvânico puro.

No estudo previamente mencionado, Holmes (Holmes et al, 2011), figura 18 comparou a atividade de um determinado ânodo de zinco contendo 2,5% de cloreto, operando em modo 100% galvânico, com o mesmo ânodo que havia sido previamente ativado por uma semana por uma corrente externa. Estes dois sistemas são comparados com a atividade do mesmo ânodo galvânico colocado em concreto sem cloreto. O estudo mostra que o ânodo que funciona em modo galvânico puro gera tanta corrente quanto o ânodo colocado em concreto sem cloreto, o que demonstra sua ineficácia para proteger o aço. Enquanto o ânodo que foi previamente ativado está muito ativo, devido à presença de cloreto. Se sacrifica no lugar do aço ao seu redor (veja a figura 19).

Caso necessário, pode-se instalar sistemas de monitoramento semelhantes aos instalados no sistema de proteção catódica por corrente induzida, usando um eletrodo de referência e seguir as recomendações da norma EN ISO 12696.

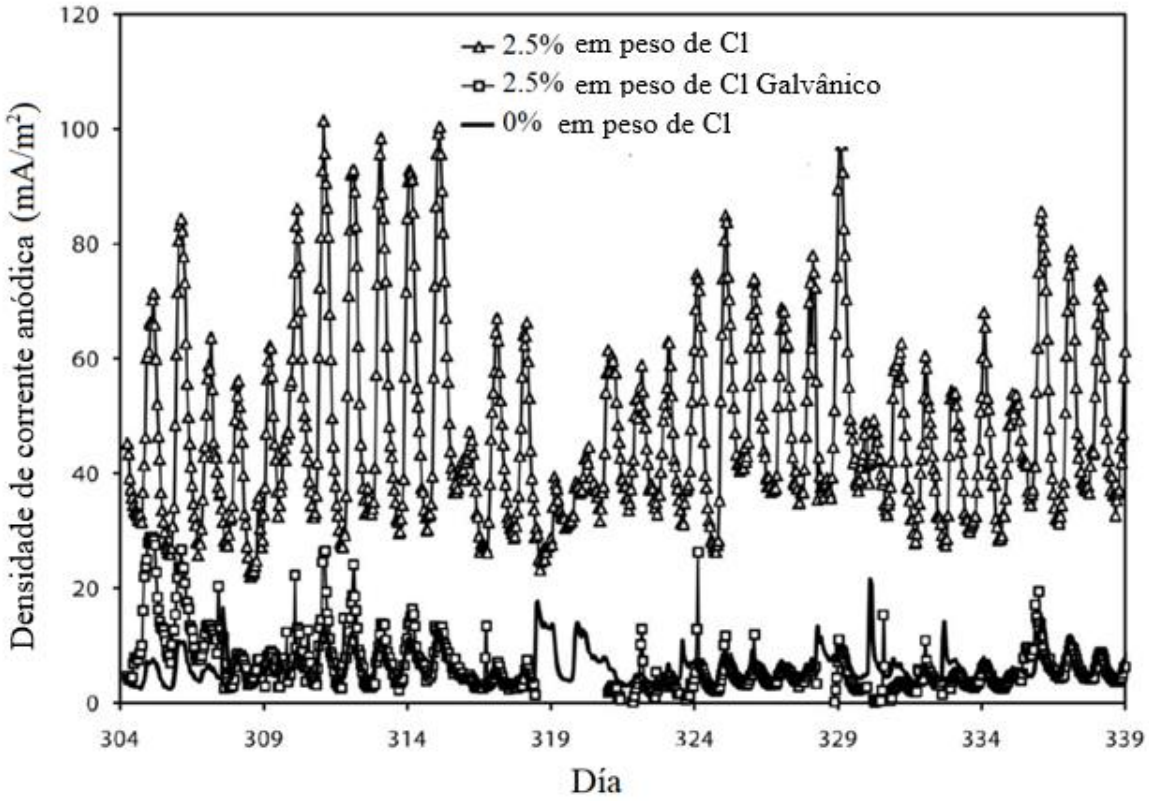

Figura 18. Comparação entre o ânodo (2,5% Cl. galvânico) funcionando no modo galvânico puro e o ânodo (2,5% Cl.) sendo ativado pela corrente induzida durante um curto período de tempo antes de funcionar no modo galvânico (Holmes e outros, 2011).

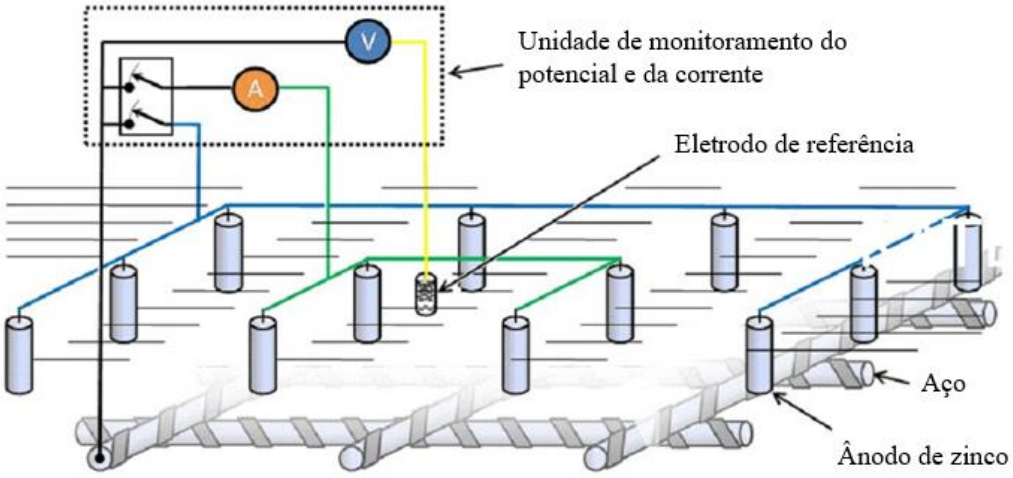

Figura 19. Descrição esquemática do sistema de monitoramento por eletrodo de referência

Instalado na Whiteadder Bridge, Escócia, Reino Unido, esse sistema híbrido permanece responsivo ao ambiente muito tempo depois de instalado (Dodds, 2018).

O sistema híbrido é bastante atrativo, conforme ilustrado na figura 20, pois oferece certo nível de garantia de funcionamento, como os oferecidos pelo sistema de proteção catódica de corrente induzida, pois é menos complexo e não exige os mesmos níveis de manutenção a longo prazo com ajuste constante da entrada de corrente, conforme exigido pelo PCCI.

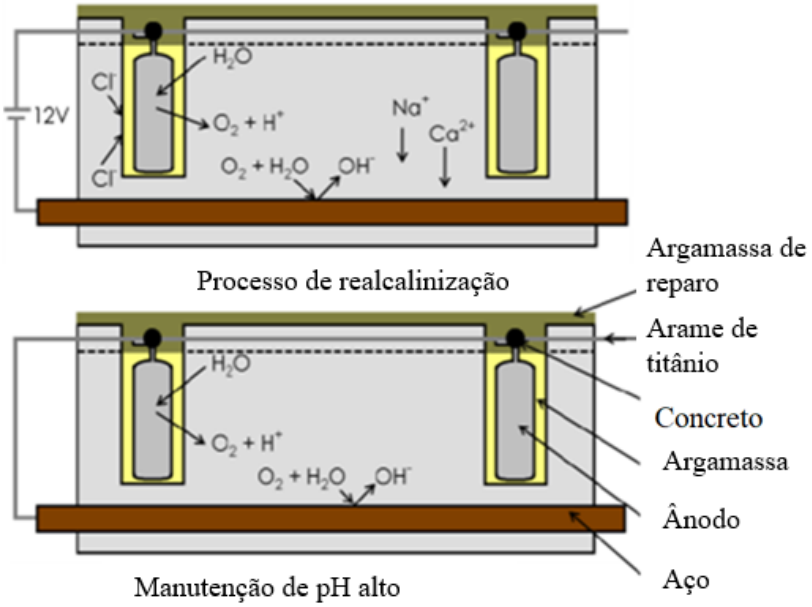

Figura 20. Sistema híbrido que funciona em duas etapas.

Além disso, também pode ser utilizado em estruturas protendidas, uma vez que a alta corrente de saída é inicialmente fornecida apenas por um período muito limitado, o que não é suficiente para promover a fragilização por hidrogênio (Dodds, 2018).

3. CONCLUSÃO

Dependendo dos requisitos da estrutura, da sua exposição, dos níveis de corrosão existentes, da extensão de vida adicional necessária e, claro, do orçamento, existem diferentes técnicas de mitigação da corrosão disponíveis no mercado.

Para proteger as estruturas contra a corrosão induzida por carbonatação, os sistemas de proteção ativos baseados em inibidores de corrosão, empregados isoladamente ou em combinação com um revestimento protetor que permite a respiração do substrato, mas evita a penetração de água líquida, são sistemas simples, de custo razoável em relação ao aumento da durabilidade que proporcionam.

Para proteger as estruturas contra a corrosão induzida por cloretos, se a corrosão não estiver muito avançada e o substrato tiver a possibilidade de secar, o uso de inibidores de corrosão passivos é uma solução eficaz e duradoura.

Para evitar o desplacamento de grandes quantidades de concreto contaminado e, ao mesmo tempo, prevenir os efeitos indesejáveis do efeito “halo”, a utilização de ânodos galvânicos colocados no concreto fora da zona a reparar é uma solução possível.

Para a prevenção e controle da corrosão em concreto são, mas contaminado (especialmente contaminado com cloretos), a proteção catódica é a solução mais eficaz.

A solução com o sistema híbrido que combina correntes parasitas e correntes galvânicas é um bom compromisso entre a necessidade de supervisão permanente dos sistemas de proteção contra correntes parasitas e a simplicidade dos sistemas galvânicos.

É necessária uma estreita colaboração com todos os participantes no projeto de recuperação para garantir a seleção da técnica e dos sistemas de mitigação mais adequados, bem como a sua instalação e supervisão quando necessário.

4. REFERÊNCIAS

Angst, U.; Moro, F.; Geiker, M.; Kessler, S.; Beushausen, H.; Andrade, C.; Lahdensivu, J.; Köliö, A.; Imamoto, K.- ichi; von Greve-Dierfeld, S.; Serdar, M. (2020), *Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a practical review by RILEM TC 281-CC.* RILEM Technical Letters, Vol. 5, 85-100, DOI: https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.127

Bertolini, L., Elsener, B., Pedeferri, P., Redaelli, Elena., Polder, R. B. (2004), *Corrosion of steel in concrete, prevention, diagnosis, repair.* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, DOI: https://doi.org/10.1002/3527603379

Brem, M., Lohner, J., Büchler, M. (2022), A long-term study on the effect of a hydrophobic treatment on the moisture balance and durability of a reinforced concrete structure in a road tunnel. MATEC Web of Conferences 364, 04005, ICCRRR, DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/202236404005

Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., Glass, G. K., Webb, J. (2012). *Assessing the long-term durability of silanes on reinforced concrete structures* (Version 1). Loughborough University. https://hdl.handle.net/2134/10925

Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., Webb, J., Glass, G. K. (2013), *Diagnosing the cause of incipient anodes in repaired reinforced concrete structures.* Corrosion Science, Volume 69, Pages 123-129, DOI: https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.032

Christodoulou, C., Goodier, C. I., Austin, S. A. (2014): *Site performance of galvanic anodes in concrete repairs.* IN: Grantham, M, etal (eds). Concrete Solutions 2014. Proceedings of Concrete Solutions, the 5thInternational Conference on Concrete Repair, 1st-3rd September 2014, Belfast.Boca Raton, Fl: CRC Press, pp. 167-172, https://dspace.lboro.ac.uk/2134/16552

Dodds, W., Christodoulou, C. (2018), *Hybrid anode concrete corrosion protection – independent study*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 171(4), pp: 149-160, DOI: https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00024

Guy, T. (2000), *CEBTP, France, report No 2393.6.100.*

Heiyantuduwa, R., Alexander, M. G., Mackechnie, J. R. (2006), *Performance of a Penetrating Corrosion Inhibitor in Concrete Affected by Carbonation-Induced Corrosion.* Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, Issue 6, DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(842)

Holmes, S., Glass, G. K., Wilcox, G. D., Robins, P. J., Roberts, A. C. (2011), *The Response of Protective Current to Environmental Conditions During Hybrid Anode Concrete Repair Treatments.* NACE Conference Papers, 11005.

Lozinguez, E., Barthélémy, J. -F., Bouteiller, V., Desbois, T. (2018), *Contribution of Sacrificial Anode in reinforced concrete patch repair: Results of numerical simulations*. Construction and Building Materials, Volume 178, 30, Pages 405-417, DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.063

Mozaryn, T., Kokowska, J. (2009), *Service life of coating systems applied on cooling towers - A laboratory study and in-situ investigations.* Book title: NUCPERF 2009 - Long Term Performance of Cementitious Barriers and Reinforced Concrete in Nuclear Power Plants and Waste Management. Editor(s): V. L'Hostis, R. Gens, C. Gallé. Publisher: RILEM Publications SARL.

Page, C. L., Treadaway, K. W. J. (1982), *Aspects of the electrochemistry of steel in concrete*, Nature, 297, 109-115, DOI: https://doi.org/10.1038/297109a0

Page, C. L., Sergi, G. (2000), *Developments in cathodic protection applied to reinforced concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 12, Issue 1, 8-15. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(8)

Qian, S., Zhang, J., Qu, D. (2006), *Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures*, Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 8, Pages 685-695, DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.010

Rodum, E., et al, (2012), The Norwegian Public Roads Administration, Trondheim, Norway, effect of different surface treatment products after 10 years of field exposure, presented at ICDC conference in June, Norway

SAMARIS (2003-2005), *Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure*, European, URL: https://trimis.ec.europa.eu/project/sustainable-and-advanced-materials-road-infrastructure

Sergi, G., Whitmore, D. (2010), *Performance of Zinc Sacrificial Anodes For Long-term Control of Reinforcement Corrosion.* NACE - International Corrosion Conference Series.

Silva, N. (2013), *Chloride Induced Corrosion of Reinforcement Steel in Concrete.* Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy.

Tilly, G. P., Jacobs, J. (2007) *Concrete repairs – Performance in service and current practice*. CONREPNET, ISBN 978-1-86.81-974-2.

Tritthart, J. (2003), *Transport of a surface applied corrosion inhibitor in cement paste and in concrete.* Cement and Concrete Research, 33(6):829-834, DOI: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01067-0

Transportation Research Board of the National Academies (2009), *NCHRP SYNTHESIS 398, Cathodic Protection for Life Extension of Existing Reinforced Concrete Bridge Elements A Synthesis of Highway Practice*, CONCORR Inc, NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM.