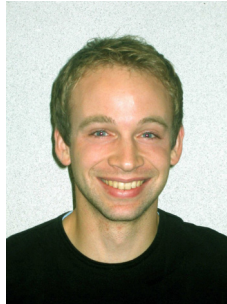


## CONTROLO DE CORROSÃO EM PONTES E PARQUES DE ESTACIONAMENTO



**J. H. MORK**  
V.P. R&D  
maxit Group



**R. HAUG**  
Technique  
maxit Group



**K. ROSENBOM**  
Dir. Técnico  
maxit Portugal

### RESUMO

Durante os últimos anos têm vindo a ser descobertos danos cada vez mais extensos e mais graves em parques de estacionamento, devido à presença de cloretos.

Em alguns casos os cloretos têm sido utilizados como aceleradores durante a aplicação do betão e noutros casos os veículos transportam os cloretos presentes nos saís que servem para descongelar as estradas. O último caso obviamente é mais destinado ao Norte de Europa.

Os danos da corrosão podem ser bastante graves e dispendiosos para os proprietários das estruturas, em parte devido aos trabalhos de reparação propriamente ditos, e por outro lado devido ao facto de a capacidade do parque de estacionamento ter de ser reduzida devido aos trabalhos de reparação.

Uma forma de controlar os danos provocados pela corrosão é a protecção catódica da estrutura, que vai alimentar as armaduras ou cabos de ferro com uma corrente suficiente de modo a evitar a continuação do processo corrosivo.

Este artigo visa a apresentação de um conceito, o sistema CarboCath<sup>®</sup> da maxit, para protecção ou prevenção catódica de parques de estacionamento, pontes e outras estruturas armadas usando uma malha altamente condutora, para a distribuição da corrente.

O conceito pode ser aplicado nas lajes, no tecto ou nas paredes/colunas e pode ser eficiente em relação à tempo de instalação / montagem. São apresentados alguns casos de instalações, demonstrando que a protecção pode ser alcançada a baixos potenciais e densidades de corrente.

### 1. INTRODUÇÃO

Os primeiros sinais da existência de corrosão a nível da armadura em estruturas de betão são normalmente o aparecimento de ligeiras fissuras na cobertura e/ou manchas de ferrugem. Esta fase inicial é seguida pela formação de mais fissuras e eventualmente a cobertura irá sofrer delaminação e/ou desmoronamento. À medida que o betão se torna mais fraco e mais exposto

(através das fissuras) a introdução de contaminantes aumenta e tal facto irá contribuir para o processo de degradação. Em casos extremos, a perda de perfil transversal do aço pode levar a uma redução da resistência de tensão da armadura e finalmente interromper a integridade da estrutura. No entanto, em alguns casos, o resultado do processo corrosivo pode ser apenas a queda de fragmentos soltos de betão ou limitado a não mais do que um problema estético. Apesar de tudo, deve-se realçar o facto das fases iniciais do processo se poderem desenvolver significativamente num período de tempo relativamente curto.

A aplicação de aço em betão normal sem nenhum contaminante, não irá apresentar corrosão devido à passividade. O aço encontra-se num estado em que a taxa de corrosão é praticamente negligenciável, sendo este facto explicado pela existência de uma fina película atómica de ferro na superfície do aço, mantida estável devido ao elevado pH do betão. A passividade do aço pode ser perdida (tendo como consequência o aparecimento de corrosão) através de dois mecanismos, desde que existam quantidades suficientes de humidade e oxigénio [1]:

- Introdução de dióxido de carbono, que reduz o pH para valores próximos de 9 (carbonatação), causando uma perda da passividade mais ou menos uniforme (corrosão generalizada).
- Presença de iões cloreto, que quebram pontualmente a película passiva dando início à corrosão por *pitting*; o cloreto pode aparecer como contaminante, como um acelerador aplicado ou pode penetrar através do meio envolvente (sais de descongelamento das estradas, brisa marítima, etc.).

Tradicionalmente as estruturas de betão que sofrem de corrosão da armadura têm sido reparadas através da remoção do betão fissurado e substituição do aço corroído. Em casos em que os danos são limitados e/ou a pesquisa demonstre claramente que o problema é localizado, este procedimento pode ser suficiente. No entanto, em muitos casos, este método torna necessária a remoção de grandes quantidades de betão estruturalmente saudável. Outro problema é prever a eficácia a longo prazo deste tipo de reparação.

Existem duas abordagens possíveis para prevenir a ocorrência de corrosão a nível da armadura:

- Manter a passividade;
- Controlar a taxa de corrosão.

Estão disponíveis vários métodos diferentes, todos tendo em comum o efeito das reacções ânodo-cátodo, resistência do betão, o meio químico que rodeia o aço e o potencial electroquímico do aço. A prevenção catódica tem como objectivo manter a passividade e é o único meio activo de prevenir a corrosão da armadura.

## 2. CORROSÃO DA ARMADURA

A corrosão é um fenómeno electroquímico, no qual o potencial do aço e a troca de corrente eléctrica entre o aço e a solução existente nos poros do betão desempenham um papel importante.

No estado passivo, o potencial do aço é relativamente positivo, devido à reacção do oxigénio à superfície daquele, que leva ao consumo de electrões (reacção catódica). Quando a passividade é perdida, o ferro passa para a solução como iões ferrosos, deixando um excesso de electrões no aço, o que torna o seu potencial mais negativo; esta reacção é denominada anódica. As diferenças de potencial entre as áreas catódica e anódica provoca o fluxo da corrente no líquido

existente nos poros do betão, servindo de suporte e acelerando assim a reacção de dissolução do aço, ver figura 1.

Os iões ferrosos reagem com os iões hidróxido formados no cátodo quando este se encontra disponível, com mais oxigénio, de modo a formar vários produtos de corrosão sólidos, correntemente denominados de ferrugem. Os produtos de corrosão oxidados são mais volumosos que o aço original (5 a 7 vezes mais volumosos). A consequência prática desta reacção é a expansão, que introduz resistências de tensão na cobertura de betão adjacente. Após relativamente pequenas quantidades de aço terem sido transformadas em produtos de corrosão, o betão fissa e ocorre a delaminação do mesmo [1]. Este efeito é mostrado na figura abaixo, onde a seta que aponta para cima indica o ponto de ruptura.

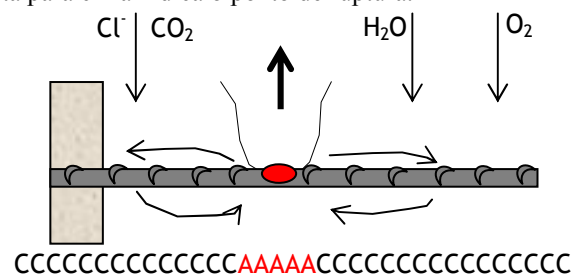


Figura 1: Mostra a entrada de cloreto e/ou dióxido de carbono, humidade e oxigénio, criando uma célula de corrosão. Fluxo da corrente de áreas anódicas (A) para áreas catódicas (C).

A Figura 1 mostra que a área anódica pode ser relativamente pequena quando comparada com a área catódica. Uma vez que o potencial é mais negativo nas áreas A e a área C é significativamente maior, a corrosão desenvolve-se rapidamente. Este efeito pode ser medido como taxa de corrosão, expressa quer em termos de perda de metal por unidade de superfície quer por fluxo de corrente ( $\mu\text{A}$ ).

Grandes áreas catódicas e anódicas concentradas localmente são típicas da corrosão induzida pelo cloreto (normalmente denominada de corrosão de macrocélulas). Isto também explica o porquê de elevadas taxas de corrosão estarem frequentemente associadas com a corrosão induzida pelo cloreto na vizinhança de fissuras; o cloreto penetra no betão através das fissuras e actua localmente. O resultado pode ser a formação dos denominados *pits*, onde o aço (localmente) é completamente penetrado. No caso do cloreto se apresentar misturado (por exemplo  $\text{CaCl}_2$  contendo determinados aceleradores), a corrosão aparecerá mais dispersa, mas os *pits* característicos da corrosão induzida pelo cloreto são frequentemente identificáveis.

A taxa à qual a corrosão se irá propagar está dependente do ambiente ao qual o aço está exposto; essencialmente a temperatura e a humidade são vistas como factores decisivos (altas temperaturas e elevado teor de humidade levam a uma taxa de corrosão mais elevada).

O limiar de cloreto é a quantidade máxima de cloreto que o aço pode suportar sem perder a passividade. Geralmente este valor está fortemente ligado ao potencial do aço, como mostrado na figura 2. Esta ligação forma as bases para a prevenção e protecção catódica como se passa a explicar na próxima secção.

A introdução/entrada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no betão é geralmente conhecida por carbonatação, um processo que leva à redução do pH do betão de 13 para 9 ou mesmo para valores inferiores. Todas as estruturas expostas ao ar irão sofrer carbonatação até um certo ponto (profundidade). A taxa à qual o  $\text{CO}_2$  irá penetrar está fortemente dependente da

densidade do betão (compactação, conteúdo em cimento e hidratação) assim como de defeitos existentes tais como fissuras, “ninhos de inertes”, etc. O betão submerso ou muito molhado irá carbonatar de forma insignificante.

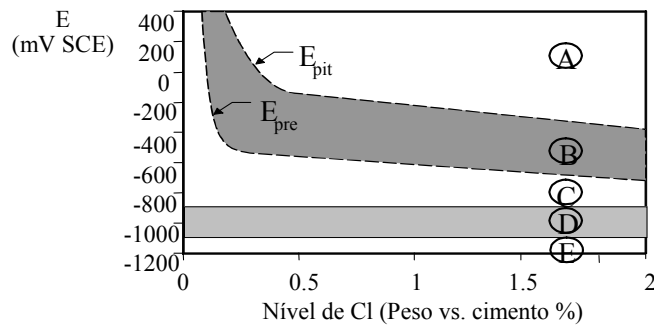


Figura 2: Potencial do aço em função do conteúdo de cloreto: (A) O *pitting* inicia-se e propaga-se, (B) O *pitting* não se inicia mas propaga-se, (C) o *pitting* não se inicia nem se propaga, (D) Fragilização do hidrogénio no aço de elevada resistência, (E) Redução da ligação aço/betão [2].

À medida que a frente de carbonatação progride através da cobertura de betão, e eventualmente atinge o aço, é de esperar que ocorra um ataque uniforme. Formam-se pequenas células de corrosão em toda a superfície do aço. A corrosão induzida pela carbonatação é normalmente denominada de corrosão geral. A taxa de corrosão é geralmente baixa, mas devido à forma como se distribui pode dar origem a uma grave delaminação do betão. Especialmente em superfícies horizontais (tectos), áreas relativamente grandes podem ser delaminadas e tornarem-se soltas.

### 3. PREVENÇÃO E PROTECÇÃO CATÓDICA

Como método para impedir o avanço da corrosão, a protecção catódica (ProC) provou a sua eficácia num número significativo de instalações de sucesso.

A prevenção catódica (PreC) usada de forma pró-activa, também tem sido aplicada a estruturas em todo o mundo, desde que as primeiras instalações tiveram lugar em Itália (no final dos anos 80), usando vários tipos de matérias como ânodo, mas ainda não teve o sucesso da ProC em estruturas de betão. Uma conhecida estrutura equipada com prevenção catódica é a Casa da Ópera em Sidney.

Em princípio, a PreC é instalada na estrutura virgem antes da ocorrência de corrosão, enquanto que a ProC é instalada após a estrutura ter sido completada e o *pitting* ou a corrosão se terem iniciado. O principal efeito da prevenção catódica é introduzir uma alteração ao potencial eletroquímico do aço,  $E$ , para valores mais negativos (mV), como pode ser observado na figura 3. O aço é levado a um estado de passividade onde a corrosão não irá mais surgir nem propagar-se. A súbita alteração no potencial do aço é introduzida bastante antes de uma quantidade crítica de cloreto se acumular a nível da armadura. Além disso, pode-se verificar que, ao manter-se este potencial artificial, a corrosão é prevenida apesar do fornecimento contínuo de cloreto. Para além da alteração a nível do potencial, o pH irá ser mantido na

armadura e a entrada de cloreto será minimizada devido aos potenciais dos eléctrodos assim como ao fluxo de corrente associado.

Quando a protecção catódica é aplicada, o *pitting* já teve início e o controlo da corrosão visa agora alterar o potencial para um estado onde a corrosão já não se propague. A figura 3 mostra a alteração que ocorre ao levar-se o potencial a um estado em que a corrosão não se irá propagar e mostra ainda que o potencial absoluto para a ProC é maior do que para a PreC. Com o tempo, um processo benéfico de realcalinização terá lugar à volta das armaduras (cátodo).

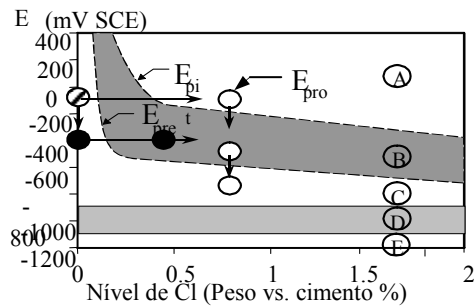


Figura 3: Potencial do aço em função do conteúdo de cloreto: (A) O *pitting* inicia-se e propaga-se, (B) O *pitting* não se inicia, mas propaga-se, (C) O *pitting* não se inicia nem se propaga, (D) Fragilização do hidrogénio em aço de elevada resistência, (E) Redução da ligação aço/betão [2]. Os caminhos para a PreC e a ProC estão indicados com passividade restaurada (área B) ou taxa de corrosão reduzida (área C) após se ter iniciado o processo corrosivo (área A).

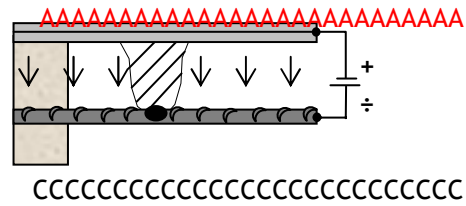


Figura 4: Esquema demonstrando a aplicação da corrente no sistema de prevenção / protecção catódica. O potencial do aço é diminuído fazendo da armadura o cátodo (C) relativamente a um ânodo externo.

Considerando um eventual efeito de carbonatação, foi demonstrado que, aplicando a PreC o pH mantém-se a cerca de 13 na área circundante à armadura [4]. Em ambos os casos, PreC e ProC, após a instalação de eléctrodos de referência e outros sensores, deve ser aplicado um ânodo externo à superfície do betão. Na figura 4, apresenta-se o princípio aplicado para usar um ânodo superficial.

O passo seguinte é ligar um rectificador entre a “gaiola” de ferro da armadura (÷) e a rede anódica (+). Apesar do princípio utilizado para a ProC ser o mesmo, a PreC pode ser atingida mais facilmente: os custos de instalação são menores e é mais fácil prevenir a corrosão por *pitting* do que suprimir este tipo de corrosão já instalada. O reduzido nível do potencial é atingido por aplicação de uma ligeira corrente directa (DC), que assenta tipicamente na ordem de 0,5-2,0 mA/m<sup>2</sup> para a PreC e 2,0-20,0 mA/m<sup>2</sup> para a ProC, ao aço, durante o restante tempo de utilização da estrutura. No que respeita à prevenção catódica, as linhas directoras definidas pela Norma Europeia EN 12696-2000 para a protecção catódica [3] podem ser usadas.

**4. CASO 1 - PROTECÇÃO CATÓDICA DE UM PARQUE DE ESTACIONAMENTO**

Um parque de estacionamento em Oslo apresentava graves danos de corrosão, essencialmente devido ao facto dos veículos transportarem para dentro do parque sal utilizado no

descongelamento das estradas. A neve derretida, o gelo e o sal misturam-se e penetram no betão atingindo a armadura. O parque de estacionamento em questão apresentava essencialmente danos visuais, delaminação do betão, visualização da armadura e ferrugem.

Para controlar o avanço da corrosão, foi decidido instalar um sistema de protecção catódica no estacionamento, com dimensão aproximada de 2000 m<sup>2</sup>. Os danos eram particularmente visíveis na zona superior e inferior dos tabuleiros, colunas e paredes.

O sistema escolhido, maxit CarboCath<sup>®</sup>, é um sistema de camada fina e leve que consiste num tecido de malha carbónica altamente flexível e um selante-ânodo à base de cimento especialmente fabricado, que serve para fixar a rede ao suporte, numa espessura de 3-4 mm. Foi também criado especialmente um pavimento industrial auto-nivelante, ABS 410, que foi utilizado nos pavimentos, com uma espessura de 5-10 mm.

A preparação do sistema antes da instalação consistiu na remoção manual do betão deteriorado, limpeza com jacto de areia e chama aberta para remover óleos. O suporte foi então homogeneizado com o sistema de reparação da maxit. Foram instalados conectores entre a rede de carbono e os cabos secundários de cobre, a uma distância de 3 metros, de acordo com o esquema da figura 5.

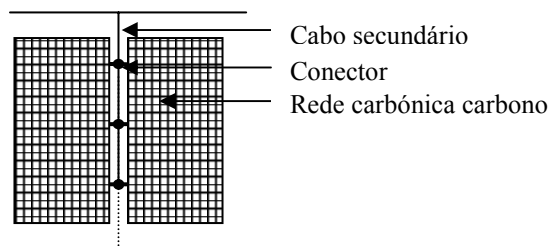


Figura 5: Configuração da instalação.

O selante-ânodo foi pulverizado no suporte tendo sido utilizado um pincel nas zonas mais delicadas. Posteriormente, a rede foi ligeiramente comprimida no selante-ânodo por um rolo de pintar. Após a fase de secagem e endurecimento, foi utilizada uma 2<sup>a</sup> camada de selante-ânodo como cobertura, excepto nos tabuleiros onde foi aplicado o pavimento industrial auto-nivelante com uma resistência à abrasão especialmente elevada, uma vez que os pneus de inverno frequentemente utilizados possuem picos matálicos. A instalação é fácil e rápida. O material do pavimento pode ser entregue por um camião de bombagem e bombeado directamente para a área desejada. A corrente é alimentada a partir de um rectificador do sistema e um processador de dados monitoriza continuamente os valores de polarização das células de referência, potenciais e correntes nas diferentes zonas. O sistema pode facilmente ser expandido com um controlo remoto, que também pode transferir valores. O sistema está em funcionamento a 1,8 V. A despolarização é superior a 100 mV para a maioria das células de referência, tendo sido uma exigência do proprietário. Tal representa um bom resultado, tendo em consideração que a medição dos valores foi feita em Setembro após o estacionamento ter secado durante o Verão.

## 5. CASO 2 - PROTECÇÃO / MANUTENÇÃO CATÓDICA EM PONTES COSTEIRAS

A Ponte de Runde está localizada num dos ambientes mais agressivos na costa oeste da Noruega, tendo como vizinho mais próximo o Oceano Atlântico.

As colunas tinham sido reparadas 3 vezes anteriormente. Por duas vezes os danos ocorridos durante 10 anos tinham sido diagnosticados e reparados. No entanto, esta não se revelou como uma solução eficaz e duradoura. Após a reparação, os danos reapareciam num período de 3 a 4 anos. Em 1998, os 3 metros inferiores das colunas foram protegidos com tinta condutiva. Este processo parecia produzir bons resultados, mas após 2 anos a tinta tinha sido descascada em virtude das severas condições climáticas. A tinta utilizada tinha sido especialmente fabricada para enfrentar ambientes agrestes, mas não era suficientemente “forte” para suportar estas condições tão especiais. De forma experimental, foi instalada uma rede de titânio embebida em argamassa numa das colunas. Esta aplicação mostrou-se durável, mas apresentou desvantagens a nível dos elevados custos e da morosidade da instalação. A rede de titânio é bastante dispendiosa e apresenta algumas limitações no que respeita à sua instalação.



Fotografia 1 – Ponte de Runde.



Fotografia 3 - Ponte de Sykkylven.

Em 2001 foi decidido instalar o sistema Carbocath<sup>®</sup> nas colunas da ponte. Este sistema providencia uma distribuição uniforme e suave da corrente em toda a estrutura, mesmo nas zonas mais difíceis e não é necessário que o suporte esteja seco, como acontece na aplicação das tintas condutivas.

A instalação decorreu facilmente sem quaisquer problemas. Uma semana após a instalação, todos os potenciais iniciais foram medidos em todas as células de referência. O sistema funcionou sem problemas e de forma estável a um potencial de 1,8 V. A distribuição da corrente é de cerca de 10-15 mA/m<sup>2</sup>. Todas as células de referência são despolarizadas mais do que 100 mV em 24 horas. Todos os critérios pré-definidos foram preenchidos.

## 6. CASO 3 - PREVENÇÃO CATÓDICA DE UMA PONTE COSTEIRA

A construção da ponte de Sykkylven, ver figura 3, que atravessa o fiorde entre Ikornes e Vik, perto da cidade de Ålesund, na costa oeste Norueguesa foi concluída em 2000. A estrutura consiste em 15 vãos / suportes de 2x42 metros, 2x58 metros e 11x60 metros. Foi utilizado na produção do betão, cimento especial com uma resistência aproximada de 50 MPa.

A experiência obtida a partir de outras pontes existentes na área, indicava que o ambiente agressivo podia levar à ocorrência de corrosão após um período de tempo relativamente curto. Foi assim instalado um sistema PreC numa secção da ponte, baseado numa rede-ânodo de tecido carbónico. A rede de carbono foi fixada à cofragem com uma pistola em duas larguras e os cabos de carbono ligavam a rede ao cabo secundário. Foram então instaladas as células de referência.

No geral, a instalação do sistema foi fácil e não interrompeu qualquer outra operação que estava a ser levada a cabo em simultâneo. O betão foi aplicado de uma forma convencional, sem qualquer preparação prévia ou procedimento especial. O sistema opera hoje em dia a uma voltagem aplicada de 1,8 V. Foram instalados vários eléctrodos de referência, todos mostrando valores de degradação superiores a 130 mV (ao longo de 24 horas). Uma vez que uma secção limitada da ponte foi equipada com o PreC, foi fácil julgar o aspecto final da ponte; não foram observadas fissuras visíveis resultantes de retracção. Pôde-se constatar também que a rede era invisível.

No seu todo a experiência foi positiva e é de esperar que este sistema e um procedimento similar venham a ser aplicados em futuras instalações.

## 7. CONCLUSÃO

A protecção catódica provou a sua capacidade de controlar a corrosão instalada, na realidade é um dos poucos métodos que a longo termo e com custos moderados pode combater a corrosão. O método tem sido usado com sucesso em diferentes tipos de construção tais como: paredes, portos, pontes, plataformas petrolíferas, fachadas, parques de estacionamento, etc.

A prevenção catódica é um meio pró-activo de prevenir a corrosão do aço em estruturas de betão armado, desde a sua construção. Apesar do método (hardware, etc) ser similar à protecção catódica, existem também uma série de diferenças nomeadamente no que respeita às condições de funcionamento. A densidade da corrente aplicada, sendo um factor importante na instalação PreC, situa-se normalmente num intervalo de valores entre 0,5 e 2,0 mA/m<sup>2</sup>.

O sistema CarboCah da maxit, demonstrou que é possível aplicar uma solução de protecção catódica fina, de baixo peso e com alterações mínimas a nível das dimensões da estrutura. A instalação é rápida, fácil e bem aceite por parte dos construtores. O sistema é especialmente desenvolvido e testado com produtos de reparação da maxit. O uso de pavimentos industriais auto-nivelantes ABS da maxit, providencia uma solução duradoura, fina e resistente para os tabuleiros dos parques de estacionamento.

Se se utilizar um ânodo de carbono como prevenção catódica, este pode ser aplicado directamente na cofragem. A experiência demonstrou que a rede se tornará invisível depois descofragem. Um efeito colateral benéfico é que a rede irá travar qualquer tendência para haver fissuras de retracção.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Polder, R.B., 2002, COST 521 Final Workshop Luxembourg, Final report on maintenance methods, Weydert, R. Ed., Luxembourg.
- [2] Pedferri, P., "Cathodic Protection and Cathodic Prevention", Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, 1996, pp. 391-402
- [3] CEN/ TC 219, EN 12 696- 2000 Cathodic Protection of Steel in Concrete - Part 1; Atmospherically Exposed Structures.
- [4] Pedferri, P., 2002, Prevention of Corrosion in Concrete, Keynote, 15 International Corrosion Congress 15thICC 2002, September 23 – 27, Granada Spain.