

Reabilitação de Estruturas de Betão Armado Utilizando Técnicas Electroquímicas

Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures Using Electrochemical Techniques

Zita Lourenço

PhD, Directora Geral, ZetaCorr Lda, Torres Vedras, zita.lourenco@netc.pt

José Paulo Costa

Engº Civil, Administrador, Stap, S.A., Lisboa, info@stap.pt

Sumário: A principal causa da deterioração das estruturas de betão armado é a corrosão das armaduras devido à carbonatação da camada de recobrimento e/ou à contaminação do betão por cloretos. As técnicas mais utilizadas para reabilitar estruturas que sofrem do problema de corrosão das armaduras são: a reparação convencional e as técnicas electroquímicas; a protecção catódica, a dessalinização e a realcalinização. Embora a reparação localizada de estruturas contaminadas por cloretos seja uma técnica bastante utilizada, é pouco eficaz a longo prazo. A aplicação dos métodos electroquímicos resulta em soluções mais eficazes e económicas de controle da corrosão. Contudo, a selecção do método mais apropriado a utilizar numa dada estrutura é função de vários factores que terão de ser tidos em consideração. Este artigo descreve sumariamente os fundamentos em que se baseiam as técnicas de instalação destes métodos electroquímicos, e apresenta casos práticos da sua aplicação.

PALAVRAS CHAVE: protecção catódica, dessalinização, realcalinização, ânodo, cátodo.

Summary: The major cause of deterioration of reinforced concrete structures is the corrosion of the reinforcing steel caused by carbonation of the concrete cover and or chloride contamination of the concrete surrounding the steel. The most commonly used rehabilitation techniques are: conventional patch repair and the electrochemical based techniques, such as cathodic protection, realkalization and chloride extraction. Although the patch repair technique is one of the most used, it is not a long last economic and effective solution. The electrochemical techniques are considered economic and long-term solutions for structures suffering corrosion of the reinforcing steel. However, the selection of the most appropriate technique to rehabilitate a structure is a function of various factors, which need to be taken in consideration. This paper outlines the theory of these techniques, presents methods of installation and illustrates case studies of practical application of these techniques.

KEYWORDS: cathodic protection, chloride extraction, realkalization, anode, and cathode.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras é de grande importância na durabilidade das estruturas de betão armado, pois pode provocar não só a sua deterioração, mas também afectar a sua integridade estrutural. Devido à alta alcalinidade da solução existente nos poros do betão, com valores de pH rondando 12.6, as armaduras embebidas em betão de boa qualidade, não são susceptível de sofrer corrosão. A alta alcalinidade é devida essencialmente à

concentração de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , produto resultante da hidratação do cimento. Quando o aço está em contacto com uma solução alcalina de pH desta ordem de grandeza, o metal está no estado passivo, i.e., forma-se à sua superfície uma película de óxido que impede a corrosão. A passivação é portanto o mecanismo natural de protecção da armadura e a corrosão só ocorre se houver deterioração e/ou contaminação do betão.

Alguns dos factores que podem contribuir para a corrosão das armaduras nas estruturas de betão armado são: redução do pH resultante da carbonatação do betão; contaminação do betão por cloretos; técnicas de construção inadequadas, etc. A corrosão pode ser o resultado de um desses factores ou a combinação de vários. A contaminação do betão por cloretos foi identificada como uma das maiores causas de deterioração das estruturas de betão armado em todo o mundo. As técnicas mais utilizadas para reabilitar estruturas em que a corrosão é devida ao elevado teor de cloretos são: a reparação convencional; a protecção catódica, a desalinação e o uso de inibidores de corrosão. No caso de estruturas carbonatadas as técnicas mais utilizadas são a reparação convencional e a realcalinização. A reparação convencional envolve a remoção mecânica do betão contaminado seguido da sua substituição por material novo. Esta reparação não é, frequentemente, uma solução durável uma vez que novas degradações surgem nas áreas vizinhas da reparação.

O objectivo da protecção catódica é o de controlar a corrosão através da aplicação permanente de uma corrente continua externa. O objectivo da dessalinização e da realcalinização é o de eliminar o agente agressor, através da aplicação temporária de um campo eléctrico. Alguns aspectos relacionados com a teoria e aplicação destas técnicas electroquímicas ao betão armado irão ser, aqui, discutidos.

2. PROTECÇÃO CATÓDICA

2.1 Princípio de funcionamento do processo

O principal objectivo da protecção catódica (CP) é reduzir ou eliminar a corrosão das armaduras, tomando o potencial eléctrico do aço mais negativo, i.e. catódico. O abaixamento do potencial eléctrico do aço é obtido através da passagem duma corrente continua de baixa intensidade, de um ânodo exterior através do betão para o aço. A corrente poder ser aplicada de duas maneiras: 1) ligando o aço a um ânodo sacrificial, que se dissipa gradualmente - ânodos sacrificiais, 2) ou usando um ânodo inerte e uma fonte externa de alimentação - corrente imposta ou impressa. Os sistemas de corrente imposta são os mais utilizados em estruturas de betão armado. Os componentes básicos de um sistema de protecção catódica por corrente imposta são: ânodo, cátodo (armaduras), betão (electrólito) e a fonte de alimentação.

Para além de inverter o processo da corrosão, a passagem da corrente eléctrica também induz outras modificações químicas no betão, que ocorrem principalmente perto do ânodo e das armaduras. A Figura 1 ilustra o diagrama das reacções que ocorrem no ânodo e no cátodo. A reacção principal que ocorre na interface aço/betão é a redução do oxigénio e a produção de iões hidróxido. Se o potencial do aço se tornar muito negativo também pode ocorrer a libertação de hidrogénio. Em qualquer dos casos, o resultado é a produção de iões hidróxido, aumentando assim a alcalinidade e o estabelecimento do filme passivo na superfície do metal. Na interface ânodo/betão a principal reacção que ocorre é a oxidação da água para formar oxigénio. Outras reacções podem também ocorrer dependendo do tipo de ânodo e das tensões aplicadas (1). Também como resultado da tensão aplicada, os iões negativos (cloretos, hidróxidos, sulfatos) são repelidos pelo cátodo (armaduras) e os iões positivos são repelidos pelo ânodo. Assim, o efeito da aplicação de protecção catódica não

é só o da eliminação ou redução da corrosão, mas também o da restauração do filme passivo e da remoção dos iões cloreto, eliminando assim o agente agressor.

Figura 1- Representação esquemática do mecanismo de protecção catódica

A protecção catódica requer a aplicação contínua de uma densidade de corrente da ordem de 5-20 mA/m² da superfície de metal a proteger (2). A avaliação da eficácia da protecção catódica faz-se por métodos indirectos, i.e. através da utilização de critérios baseados na medição do potencial eléctrico das armaduras. Os mais utilizados são:

- Para estruturas aéreas, a obtenção de no mínimo 100 mV de polarização/despolarização (the “100mV potential shift criterion” (3)). Se for medido como decaimento do potencial, depois da corrente ser interrompida, e a partir do potencial (Inst. Off), o período de despolarização, varia normalmente de 4h a 72 horas ou mais, dependendo do tipo de estrutura e do ambiente de exposição (4).
- Para estruturas submersas ou enterradas a estrutura considera-se protegida se o potencial polarizado (inst. off) for mais negativo que -720 mV Ag/AgCl.
O potencial deverá ser mais positivo que -900 mV e -1100 mV Ag/AgCl, para aço normal e aço sob tensão respectivamente.

2.2 Tipos de Ânodos

O tipo de ânodos a utilizar varia conforme o tipo de estrutura e as condições ambientais a que a estrutura está sujeita, i.e., condições submersas ou enterradas, completa ou parcialmente, estruturas contendo electrólitos ou completamente expostas à atmosfera. Para o caso de estruturas enterradas ou submersas, os ânodos poderão ser: ânodos sacrificiais ou de corrente imposta, em que o ânodo pode ser instalado no solo ou na água.

Para a protecção da parte atmosférica, os ânodos mais utilizados na protecção catódica por corrente impressa são: malha de titânio revestida com uma camada de óxido (“Activated Titanium Mesh”), polímeros condutores (“Conductive coatings”), ânodos de titânio platinado inseridos numa pasta de grafite (“Internal Anodes”) e fitas de malha de titânio revestida com uma camada de óxido (“Ribbon anodes”). Na selecção do ânodo mais apropriado para um determinado tipo de estrutura é normalmente considerado a facilidade de instalação, os efeitos da instalação do ânodo na estrutura, o custo e a estética. Combinações de diferentes ânodos podem também ser utilizadas de modo a obter-se a solução mais económica e eficaz.

2.3 Aplicação de Protecção Catódica a um Edifício

Um caso prático da aplicação da protecção catódica foi realizado num edifício de 15 andares, de 41 apartamentos, situado à beira mar. A deterioração observada na estrutura foi causada pela contaminação do betão por cloretos. Ao longo dos seus 25 anos, esta estrutura foi sujeita a várias reparações devido à corrosão das armaduras induzida pelos cloretos. Antes da instalação da protecção catódica, a estrutura foi extensivamente inspeccionada para quantificação das zonas deterioradas. Os resultados da investigação indicaram que a causa da deterioração observada era a combinação de reduzidas espessuras de recobrimento aliada a carbonatação e contaminação por cloretos. As zonas mais afectadas eram as zonas mais expostas, as varandas, principalmente nos andares inferiores do prédio. Algumas das partes interiores do edifício também apresentavam deterioração, principalmente as zonas junto às janelas. Para reparação das diferentes áreas foram utilizadas 2 técnicas:

Zonas mais degradadas - Reparação localizada das zonas visivelmente deterioradas e aplicação de protecção catódica.

Zonas menos degradadas. Reparação localizada seguida da aplicação de um revestimento protector contra a carbonatação e resistente à penetração de cloretos.

O tipo de ânodo utilizado foi a tela de titânio revestida com uma camada de óxido ("Activated Titanium Mesh e fitas de malha de titânio revestida com uma camada de óxido. No dimensionamento do sistema foram tidos em consideração os seguintes factores; os diferentes elementos, as diferentes condições de corrosão das várias zonas/elementos, variações na resistividade do betão e a extensão da deterioração. Devido à variedade de factores o sistema foi dividido em 45 zonas, electricamente independentes, que permitiram uma polarização uniforme em toda a superfície a proteger. Para controle e monitorização do processo foi utilizado um sistema computadorizado que permite que o controle e a monitorização possa ser efectuada automaticamente.

3. DESSALINIZAÇÃO E REALCALINIZAÇÃO

3.1 Princípio de Funcionamento do Processo

A dessalinização e realcalinização são tratamentos electroquímicos destinados a eliminar a causa da corrosão. O objectivo da dessalinização é de remover os cloretos do betão contaminado até valores aceitáveis. A realcalinização é utilizada para aumentar o pH do betão carbonatado e assim restabelecer o filme de óxido protector.

A implementação destas técnicas consiste na aplicação de um campo eléctrico entre a armadura do betão e um ânodo externo embebida numa solução (electrólito). Os componentes básicos destes dois tratamentos consistem em ânodo temporário embebido num electrólito alcalino e uma fonte de alimentação de corrente contínua, capaz de fornecer até 20V e 2A/m² de superfície a tratar. Durante a dessalinização os iões de cloro (carregados negativamente) migram para fora do betão. Simultaneamente dá-se um fenómeno de electrólise na superfície da armadura que produz um ambiente alcalino e a sua re-passivação. A atracção de iões positivos para a zona da armadura tem ainda como efeito o adensamento e impermeabilização do betão envolvente das armaduras. A realcalinização do resulta de vários processos que ocorrem simultaneamente mas a velocidades diferentes; produção de iões hidróxido à superfície das armaduras, resultando num aumento do pH, transporte do electrólito alcalino no betão por electro-osmose e por absorção, e migração iónica. O funcionamento destes tratamentos é esquematicamente representado nas Figuras 2 e 3.

Na realcalinização utiliza-se geralmente como electrólito uma solução de carbonato de sódio, enquanto que na dessalinização se utiliza uma solução de hidróxido de cálcio. A densidade da corrente utilizada varia entre 0.5 A/m^2 – 2 A/m^2 de superfície de betão a tratar. O tempo de tratamento na realcalinização varia geralmente entre 1-2 semanas enquanto que na dessalinização é tipicamente de 4 a 8 semanas, dependendo das condições de cada estrutura. Na realcalinização o fim do tratamento é estabelecido quando a carbonatação foi reduzida por valores próximos de zero. Os testes são efectuados utilizando como indicador a solução de fenolftalaina. Vários critérios são utilizados na dessalinização para determinação do fim do tratamento, nomeadamente; redução da concentração de cloretos para valores inferiores a 0.2 - 0.4% por peso de cimento e quantidade mínima de carga eléctrica total fornecida durante o tratamento de $600\text{-}1500 \text{ A.h/m}^2$ (5).

Antes da aplicação destes tratamento é necessário reparar as áreas visivelmente deterioradas com material de reparação compatível com o betão original. Utiliza-se geralmente como ânodo malhas de Titânio activado ou de aço. A instalação do ânodo e o fornecimento do electrólito pode ser realizado através de diferentes processos. O mais utilizado consiste na fixação da malha de titânio à estrutura por pregos de plástico (material isolante) e mantida a uma distancia de 3 cm da superfície de betão por meio de régua de madeira (Fig. 4). Seguindo-se o seu revestimento por projecção de fibras de celulose embebidas na solução do electrólito. Neste caso é necessário manter a fibra de celulose húmida durante o tratamento. Em superfícies horizontais, em vez de fibras de celulose também se pode utilizar o ânodo envolto em feltro embebido no electrólito. No final do tratamento, o circuito eléctrico é interrompido, o ânodo é removido e a superfície limpa dos vestígios de tratamento antes da aplicação da pintura ou revestimento final.

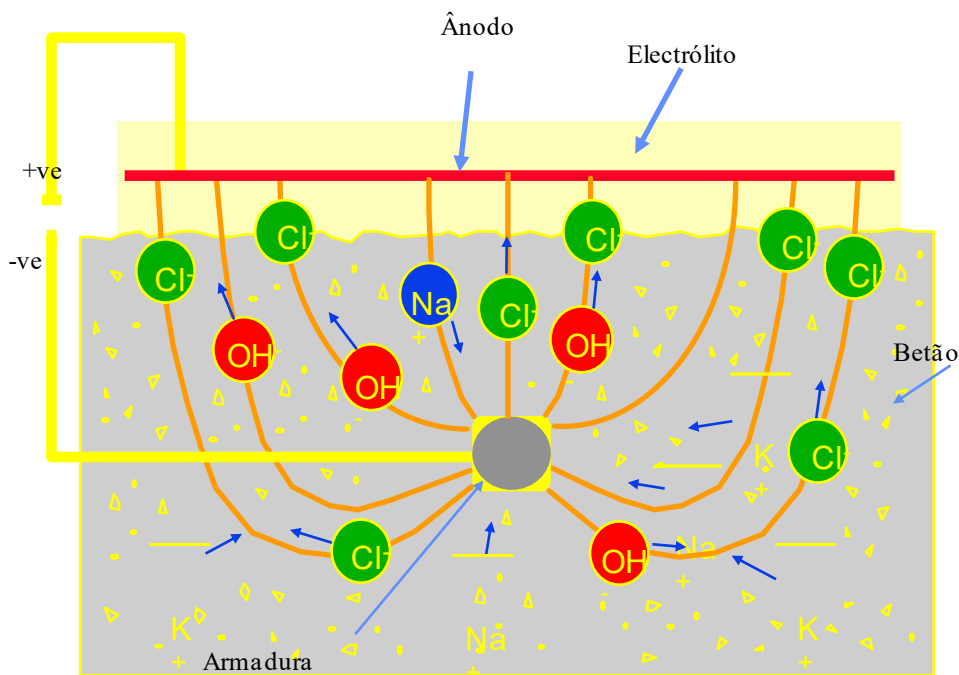


Figura 2 – Princípio de funcionamento da dessalinização.

Figura 3 – Princípio de funcionamento da realcalinização.



Figura 4 – Instalação do ânodo.

3.2 Aplicação de Dessalinização Electroquímica num Viaduto

3.2.1 A obra

O Viaduto de Acesso ao Terminal Petrolífero da Administração do Porto de Sines, obra de arte em betão armado pré-esforçado, desenvolve-se em curva numa extensão de 155 m, apresentando uma secção contínua em caixão com vigas longitudinais interiores pré-esforçadas, apoiando-se em cinco pilares maciços de betão armado de alturas variáveis e em dois encontros. O viaduto situa-se em Sines a poucas dezenas de metros do mar.

Precedendo a intervenção de reabilitação foi elaborado o estudo de diagnóstico e projecto de reabilitação. Esse estudo evidencia, como causa principal do estado de degradação do betão, o elevado teor de cloretos ao nível das armaduras, provenientes do ambiente marítimo em que se insere a estrutura, associado a um recobrimento com pequena espessura, estando então instalado um processo de deterioração por corrosão das armaduras. Verificou-se ainda que a profundidade de carbonatação do betão era muito reduzida, não atingindo as armaduras.

Foi então especificada a reabilitação da estrutura seguindo uma estratégia de intervenção múltipla, caracterizada pela substituição do betão deteriorado nas zonas anódicas, pela correcção do recobrimento das armaduras e finalmente pela protecção da estrutura por pintura apropriada.

Ficava no entanto a dúvida quanto ao risco de o elevado teor de cloretos existentes no interior da estrutura, nas zonas não reparadas, poder continuar com a nefasta acção destrutiva da camada passivante das armaduras. Por forma a prolongar substancialmente a vida útil da estrutura foi realizado o trabalho complementar de dessalinização electroquímica da estrutura.

3.2.2 Trabalhos preparatórios

Por forma a permitir o sucesso da dessalinização procedeu-se à verificação inicial dos critérios de aplicabilidade do processo. Nesse sentido, verificou-se a **continuidade eléctrica das armaduras**, tendo especial atenção à continuidade dos cabos de pré-esforço com a armadura passiva. Se tal critério não se verificasse haveria que promover ligações através de cabos eléctricos por forma a que em cada zona a dessalinizar todas as armaduras estivessem electricamente ligadas.

Uma vez que em algumas zonas o **recobrimento das armaduras** era inferior a 10mm, procedeu-se à sua correcção.

As zonas da estrutura delaminadas foram reparadas. Por picagem com martelos pneumáticos ligeiros foi removido o betão de recobrimento que envolvia as armaduras com indícios de corrosão. Os produtos de corrosão foram removidos por jacto de areia húmida e finalmente o betão de recobrimento reposto por projecção por via seca, garantindo-se um recobrimento mínimo de 40mm.

3.2.3 Estabelecimento das células de dessalinização

No caso particular do Viaduto de Acesso ao Terminal Petrolífero, optou-se pela utilização de um sistema automático de monitorização da dessalinização. Para tal, a estrutura foi dividida em zonas de 40m², subdivididas em sub-zonas de 10 m². Cada uma das zonas de 40m² constituiu uma célula de dessalinização com quatro pontos de controlo e introdução de corrente contínua permanente.

O controlo de cada célula foi feito por uma unidade RD2, unidade rectificadora de corrente controlada por computador. Em tempo real o sistema de controlo alerta o operador do

processo para avarias ou circunstâncias susceptíveis de serem resolvidas por forma a continuar com segurança e eficiência o processo.

O sistema anódico, polarizado positivamente pelo conversor de corrente alterna / corrente contínua (unidade RD2), foi constituído por uma malha de titânio fixada à estrutura por pregos de plástico (material isolante) e mantido a uma distancia de 3 cm da superfície de betão por meio de régua de madeira. A malha de titânio foi revestida por projecção de fibras de celulose, que mantidas húmidas constituem o electrólito do processo.

3.2.4 Tratamento electroquímico – controlo do processo

Durante a dessalinização o operador é alertado em tempo real pelo sistema automático de controlo para os indicadores de evolução do processo, como sejam a resistência, a intensidade de corrente, a quantidade de Amperes hora por m² de armadura até então fornecidos às células.

Toda a informação é registada no disco rígido do computador do sistema e é visualizável no monitor sob a forma de histogramas, gráficos e alertas, permitindo a avaliação da evolução do processo e a consequência de ocorrências como seja por exemplo a falta de energia eléctrica.

Ocorrências como cabos partidos (circuito aberto) ou resistências muito baixas (curto-circuito), são imediatamente detectadas e assinaladas pelo sistema de controlo automático, permitindo ao operador facilmente localizar e corrigir situações que se poderiam de outra forma traduzir em danos sérios causados à estrutura.

O controlo do processo para além da componente automática permanente realiza-se diariamente mediante o seguimento de uma lista de verificações e registo de acções. Com a periodicidade de cerca de uma semana são colhidas amostras do betão da estrutura para a determinação do teor de cloretos.

A decisão final de conclusão do tratamento foi tomada mediante a análise do relatório produzido pelo sistema de controlo automático, a análise dos registos diários de controlo e principalmente pela constatação da obtenção do teor de cloretos pretendido, inferior a 0,3% do peso de cimento neste caso.

3.2.5 Resultados Obtidos

A área total de 2000m² dessalinizada apresentou, num período de funcionamento do sistema de cinco semanas por cada fase, um abaixamento significativo do teor de cloretos. Obtiveram-se valores ao nível das armaduras da ordem de 0,2% do peso de cimento contra valores iniciais da ordem dos 0,6%, (Fig.5).

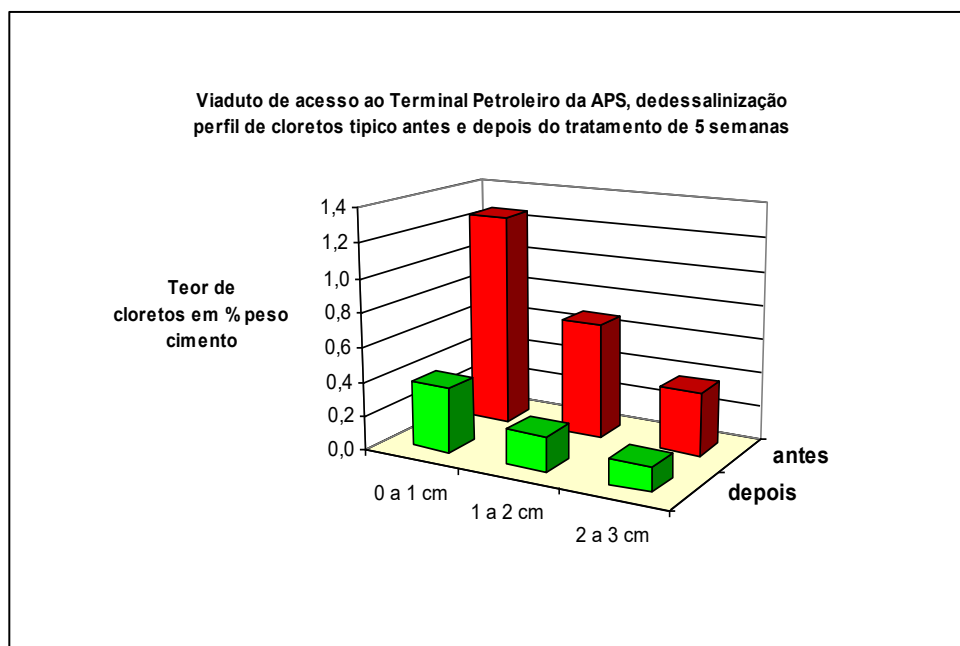


Figura 5 – Valores do teor de cloretos antes e depois do tratamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vários factores têm de ser considerados quando se planeia a metodologia de reabilitação de uma estrutura. Estes incluem; conhecimento das causas e da extensão da deterioração nos diferentes elementos da estrutura, o ambiente de exposição, factores económicos, funcionamento da estrutura, tempo de vida útil esperado. Assim, antes de se seleccionar a técnica mais apropriada é necessário a realização de um estudo que permita fazer um levantamento das patologias, assim como identificar as causas e extensão da deterioração. Só com base num estudo se poderá seleccionar os métodos mais adequados para cada estrutura ou para as diferentes partes de cada estrutura.

As técnicas electroquímicas apresentam vantagens significativas relativamente à reparação tradicional. Dependendo de cada projecto estas incluem:

- Maior eficiência na prevenção à corrosão;
- Maior tempo de vida útil a esperar da estrutura;
- Custos mais baixos, principalmente a longo prazo;
- Menor tempo de execução;
- Menor interferência com o uso da estrutura, menos ruído, etc.;
- Menor enfraquecimento estrutural.

REFERÊNCIAS

- 1 M. Forsyth, M.Z. Lourenco, “*Corrosion and Protection of Steel in Concrete*”, Corrosion and Materials, Volume 22, 4, 1997.
- 2 CEN – EN 12696, “*Cathodic Protection of Steel in Concrete*”, 2000.

- 3 NACE-RP0290-2000, “Impressed Current Cathodic Protection of Reinforced Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures”, Nace, Houston.
- 4 Lourenco, Z. “Depolarization Characteristics of Cathodically Protected Reinforced Concrete Structures”, Corrosion Engineering-online. Edition July 2002. <http://www.corrosionsource.com/corrosioneering/index.htm>
- 5 NACE, Item 24214, “Electrochemical Chloride Extraction from Steel Reinforced Concrete-State-of-the-Art-Report”, 2001, Nace Houston.
- 6 M.B. Farinha, J. P. Costa , “Reparação de Viaduto Rodoviário em Betão Pré-esforçado por Meio de Dessalinização Electroquímica – Primeiro Caso de aplicação em Portugal”, JPPE 98