

## REABILITAÇÃO DE UMA ESTRUTURA CONTAMINADA POR IÕES CLORETO UTILIZANDO A TÉCNICA DA DESSALINIZAÇÃO

Artigo submetido em Agosto de 2012 e aceite em Novembro de 2012

Henrique Alves<sup>(1)</sup>, Zita Lourenço<sup>(1)(\*)</sup> e Pedro Colaço<sup>(2)</sup>

### Resumo

As técnicas mais utilizadas para reabilitar estruturas em que a corrosão é devida à contaminação do betão por iões cloreto, são a reparação localizada e os métodos electroquímicos, como a protecção catódica e a dessalinização. Embora a reparação localizada seja uma técnica bastante utilizada, a sua aplicação na reabilitação de estruturas contaminadas por iões cloreto, é pouco eficaz a longo prazo. Isto porque, se a reparação não remover todo o betão contaminado, novas áreas de corrosão são formadas nas regiões adjacentes às zonas reparadas, designadas por ânodos incipientes, dando assim continuação à deterioração. A aplicação dos métodos electroquímicos resulta em soluções mais eficazes e económicas no controlo da corrosão.

Este artigo descreve o processo de reabilitação de um edifício escolar, em que parte da estrutura de betão armado se encontrava severamente afectada por corrosão das armaduras devido à contaminação do betão por iões cloreto. Como técnica de reabilitação foi implementada a dessalinização, com o objectivo de diminuir o teor de cloretos do betão junto às armaduras, para valores aceitáveis, eliminando assim a causa da corrosão. O recurso a esta técnica possibilitou a reabilitação integral da parte afectada da estrutura de betão armado sem recorrer à remoção do betão contaminado.

**Palavras-Chave:** Betão Armado, Corrosão, Dessalinização, Técnicas Electroquímicas

### REHABILITATION OF A REINFORCED CONCRETE STRUCTURE USING CHLORIDE EXTRACTION

### Abstract

The most common techniques to treat chloride contaminated concrete are mechanical removal of contaminated concrete and electrochemical techniques such as cathodic protection and chloride extraction, also known as desalination. Although the mechanical removal approach is

still often used, is unlikely to be a very long term effective solution. If the repair does not remove all chloride contaminated concrete from around reinforcing bars, then new corroding areas known as incipient anodes, can be formed in the neighbouring regions. Electrochemical techniques offer a more efficient, economic and environmental friendly solution.

This article describes the rehabilitation process of a school building, where part of the reinforced concrete structure was severely affected by corrosion of the reinforcement, due to contamination of the concrete by chloride ions. As a rehabilitation technique, the desalination treatment was implemented, in order to reduce the chloride content of the concrete near the reinforcement, to acceptable values, thus eliminating the cause of corrosion. The use of this technique has allowed the complete rehabilitation of the affected part of the concrete structure, without the need to remove the contaminated concrete.

**Keywords:** Reinforced Concrete, Corrosion, Desalination, Electrochemical Techniques

### 1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras é uma das principais causas da degradação das estruturas de betão armado, normalmente, associada ao fenómeno da carbonatação ou à contaminação do betão por cloretos. Estes fenómenos estão na maioria dos casos associados ao ambiente envolvente. A carbonatação deve-se a teores elevados de dióxido de carbono, facilmente encontrados em ambientes industriais e citadinos, enquanto a contaminação por cloretos está, normalmente, associada à proximidade de ambientes marítimos. No entanto, a contaminação por cloretos pode também ter origem nos inertes utilizados na construção, em resíduos industriais ou em fluidos de processo. Em qualquer das situações, pode ocorrer despassivação das armaduras devido à destruição do filme passivo (camada de óxidos), que no caso do aço carbono se forma naturalmente em meios alcalinos, como o betão. O

pH do betão, não contaminado, varia entre 12 e 14, essencialmente devido à presença de hidróxido de cálcio na sua composição. O filme passivo é estável para valores de pH superiores a 9,5 em betão não contaminado. É de salientar que, para valores de pH inferiores a 9,5 pode ocorrer corrosão mesmo sem a presença de iões cloreto, desde que exista humidade suficiente [1].

Na presença de iões cloreto, ocorre a dissolução local do filme passivo, originando ânodos localizados. Iniciando-se o processo de corrosão localizada, a sua propagação é autocatalítica dado que os iões cloreto não são consumidos no processo. Este tipo de corrosão leva à perda de secção do aço podendo atingir níveis que comprometem a estabilidade da estrutura.

O teor de cloretos considerado crítico para a indução de corrosão, em estruturas de betão armado, varia entre 0,3 e 0,4 % (massa de cimento) [1]. No entanto, estes valores não devem ser aceites em todas as situações, especialmente se já foram efectuados tratamentos electroquímicos no passado ou ainda estão a ser aplicados no momento.

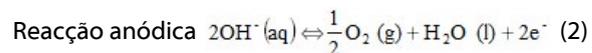
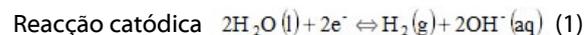
A reabilitação de estruturas nestas condições é efectuada essencialmente pelo método tradicional da reparação localizada ou por métodos electroquímicos, tais como a protecção catódica e a dessalinização. A reparação localizada, envolvendo apenas as zonas visivelmente deterioradas, nem sempre é eficaz, para além de poder ser um processo moroso e originar grandes quantidades de detritos. A corrosão pode propagar-se às zonas adjacentes, contaminadas por cloretos, mas não reparadas, dando assim continuidade ao processo de deterioração. Estas novas áreas de corrosão, formadas nas regiões adjacentes às zonas reparadas, são designadas por ânodos incipientes [2]. Os métodos electroquímicos representam uma alternativa economicamente mais atractiva, menos morosa e amiga do ambiente.

### DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização é um método electroquímico, que se aplica temporariamente, para controlar a corrosão das armaduras em betão

contaminado por cloretos. A implementação da técnica consiste na aplicação de corrente eléctrica contínua, entre a armadura do betão (cátodo - polo negativo) e uma malha metálica externa (ânodo - polo positivo). A malha é aplicada na superfície do betão e embebida numa solução electrolítica. Esta técnica envolve processos físico-químicos tais como: electrólise, electromigração iónica e electro-osmose. Embora, ocorram todos em simultâneo, devido à aplicação de corrente eléctrica entre o ânodo e o cátodo, a electrólise e a electromigração são os mais relevantes neste tratamento.

Ambos os processos contribuem para a redução do rácio de iões  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  na interface aço/betão, que desfavorece o fenómeno de corrosão. Na electrólise ocorre formação de iões hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) na interface aço/betão (reação catódica 1), originando um ambiente alcalino, que conduz à repassivação das armaduras e produção de oxigénio no ânodo (reação anódica 2).



Na electromigração, os iões cloreto livres ( $\text{Cl}^-$ , carregados

negativamente) são atraídos para o ânodo externo (carregado positivamente) e os iões sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (carregados positivamente) são atraídos para o cátodo (armaduras - carregadas negativamente). Deste modo, os iões cloreto são removidos da interface aço/betão, na direcção do ânodo externo, podendo mesmo ser removidos do betão. Simultaneamente, o enriquecimento em metais alcalinos, na proximidade das armaduras, desempenha um papel importante na preservação da alcalinidade na interface aço/betão após o tratamento. Este facto deve-se à capacidade destes iões formarem compostos com grande parte dos iões hidróxido formados no processo de electrólise. O princípio de funcionamento da dessalinização é esquematicamente representado na Figura 1.

É de salientar que o fenómeno da electromigração é um processo lento, mas determinante na duração do tratamento, normalmente compreendido entre três a sete semanas [1, 3 - 5].

### Ânodo

Podem ser utilizados dois materiais como ânodo: titânio activado e malha de aço carbono. Os ânodos de titânio activado são mais comuns

devido não só ao seu baixo consumo durante o processo, podendo mesmo ser reutilizados em vários tratamentos, mas também pela ausência de resíduos associados ao seu consumo. A malha de aço, que é consumida no processo, deve ser dimensionada de modo a conter massa suficiente em toda a sua extensão até ao final do processo. O consumo do ânodo produz grandes quantidades de produtos ferrosos, afectando o aspecto do acabamento final, que por vezes, torna inviável a sua aplicação. A principal vantagem dos ânodos consumíveis relativamente aos inertes é de natureza económica.

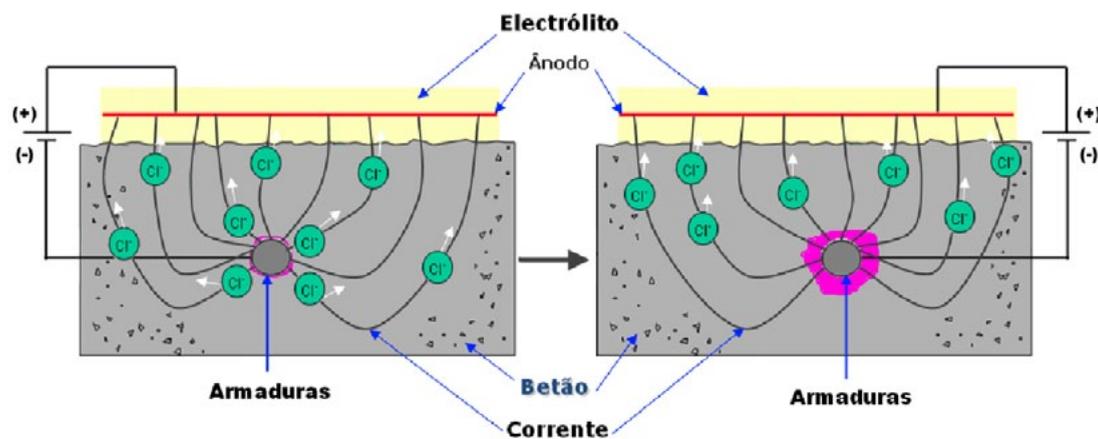


Fig. 1 - Representação esquemática da dessalinização.

### Solução Electrolítica

A água é a solução mais utilizada devido ao seu baixo custo e fácil acesso. No entanto, a tendência da solução aquosa para acidificar pode provocar um decréscimo no pH e promover a libertação de cloro gasoso nos ânodos inertes. Caso o pH tenda a ser inferior a 6, a água poderá ser substituída por soluções aquosas de hidróxido de sódio ou de borato de lítio.

Para garantir a presença de solução electrolítica em toda a extensão do tratamento é utilizado um suporte, designado suporte de electrolito, que pode ser constituído por fibra de celulose projectada, manta de feltro ou outro material polimérico que assegure essa função.

### Crítérios de Aplicabilidade

A aplicação da técnica de dessalinização pressupõe o cumprimento de quatro critérios impostos pela norma [3]:

- 1) A existência de contaminação suficiente, garantindo que uma aplicação local ou geral de tratamento retarde a contaminação à *posteriori*;
- 2) A presença de água na estrutura seja controlável durante o tratamento de modo que a densidade de corrente aplicada possa ser mantida e controlada, especialmente, em estruturas marítimas. Por exemplo, este tratamento não é adequado para as zonas da maré e de salpicos;
- 3) Não exista aço pré-esforçado, na área de tratamento, que possa ser susceptível ao fenómeno de fragilização por hidrogénio. No caso da existência de aço pré-esforçado, o seu potencial eléctrico durante o tratamento não deve ser mais negativo que -1100 mV vs. eléctrodo de  $\text{CuSO}_4$ ;
- 4) Qualquer susceptibilidade à ocorrência de reacções alcalis salicilicas deve ter em consideração o risco de propagação deste tipo de reacções e, caso seja necessário, utilizar um electrolito apropriado.

## Critérios de Finalização de Tratamento

Para que se possa dar como concluído o tratamento, de acordo com a norma [5], é necessário que seja cumprido pelo menos um dos seguintes critérios:

- 1) Teor de cloretos no betão: o tratamento deve decorrer até que o teor de cloretos no betão, na proximidade das armaduras, varie entre 0,2 e 0,4 % (massa de cimento);
- 2) A quantidade de carga por unidade de área: os valores recomendados variam entre 600 A.h/m<sup>2</sup> e 1500 A.h/m<sup>2</sup>;
- 3) Rácio Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>: utilizando este critério, o rácio Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> deve ser inferior a 0,6.

Este artigo apresenta um caso prático de aplicação de dessalinização num edifício escolar, em que parte da estrutura de betão armado se encontrava severamente afectada por corrosão das armaduras, devido à contaminação do betão por cloretos.

## 2. TRATAMENTO ELECTROQUÍMICO

### 2.1 Estrutura e condições

Durante o projecto de reabilitação do edifício escolar, após a remoção dos materiais de revestimento dos pavimentos, detectaram-se sinais de corrosão severa das armaduras superiores da laje do 1º piso. Consequentemente, foi elaborado um estudo com o objectivo de caracterizar os elementos estruturais principais, avaliar a extensão da deterioração e determinar as causas da corrosão.

Relativamente à extensão da deterioração e suas causas, as principais conclusões do estudo indicaram [6]:

- as zonas que apresentavam maior deterioração do betão eram as partes maciças das lajes, com maior densidade de armadura;
- a corrosão das armaduras foi causada pela elevada contaminação de cloretos no betão ao nível das armaduras superiores;

- o perfil de cloretos (variação da concentração de cloretos com a profundidade) obtido nas duas faces da laje, diminuindo para o interior e de baixo valor na face inferior da laje, sugere que a sua origem terá sido o material de revestimento da face superior, constituído por uma betonilha feita com agregados salgados, removida durante os trabalhos de reabilitação.

Relativamente às técnicas a adoptar para a reabilitação da laje, e tendo em conta que a contaminação do betão por cloretos ao nível das armaduras era elevado, considerou-se que a reparação local não seria eficaz nem aconselhável, dado que seria necessário demolir todo o betão envolvente das armaduras, betão contaminado. Este procedimento arriscaria a segurança estrutural na fase de reparação e poderia alterar significativamente a distribuição de tensões na estrutura. Em alternativa, foram consideradas duas opções: a protecção catódica e a remoção electroquímica de cloretos. Concluiu-se que a metodologia mais adequada para a reabilitação da laje, seria a remoção electroquímica dos cloretos, eliminando-se, deste modo, o agente causador da corrosão, e dispensando a monitorização periódica, inerente aos sistemas de protecção catódica.

A reabilitação da estrutura consistiu numa intervenção múltipla que incluiu a substituição do betão nas zonas degradadas, a correcção do recobrimento das armaduras em áreas consideradas deficientes, a implementação do tratamento de dessalinização na face superior das lajes e a aplicação de um esquema de pintura na face inferior.

### 2.2 Aplicação da dessalinização

Antes da aplicação do tratamento de dessalinização, foi necessário reparar adequadamente as áreas que apresentavam betão deteriorado. Em algumas zonas, devido à extensão da deterioração, foi necessário repor as armaduras corroídas através da sua substituição por armaduras novas.

O tratamento das lajes dos três blocos, que constituem o edifício, foi faseado de modo a que cada bloco fosse tratado individualmente. A instalação do sistema compreendeu as seguintes etapas:

- Realização de ensaios preliminares: verificação da continuidade eléctrica das armaduras, determinação do teor de cloretos em áreas consideradas de controlo, etc.;

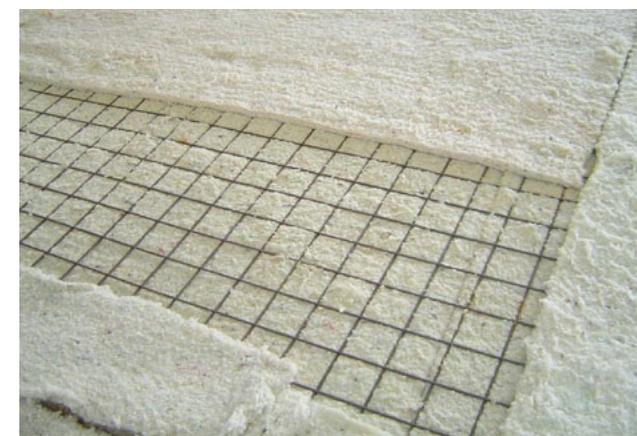


Fig. 2 - Instalação da malha de aço (ânodo) entre camadas de feltro.



Fig. 3- Ligações às armaduras (catódicas) e à malha de aço (anódicas).

- Aplicação do ânodo, composto por uma malha de aço electrossoldado, entre camadas de feltro (Figura 2);
- Realização das ligações anódicas e catódicas (armaduras) (Figura 3);

- Montagem de um sistema de "rega" que garantiu a humidade adequada e uniforme do material de suporte do ânodo (feltro), para assegurar a distribuição uniforme da corrente eléctrica a toda a superfície do betão a tratar em cada zona eléctrica (Figura 4);
- Realização de testes para verificação da ausência de curto circuitos entre o ânodo e o cátodo;
- Aplicação de corrente eléctrica (Figura 5) e monitorização da funcionalidade de todo o sistema;
- Monitorização da amperagem (A.h), em cada zona, para determinação da carga total;
- Extracção de carotes, em áreas consideradas representativas, para determinação do teor de cloretos ao nível das armaduras.

O sistema foi dimensionado de modo a fornecer uma densidade de corrente média de 1 A/m<sup>2</sup> de aço das armaduras. O sistema anódico, em cada módulo, foi dividido em múltiplas zonas, electricamente independentes, e cada zona foi alimentada por uma saída independente da fonte de alimentação, de modo a assegurar um controlo adequado da corrente a toda a superfície do betão. A duração do tratamento em cada módulo (com cerca de 500 m<sup>2</sup> de área de betão) variou de 4 a 7 semanas.

Os critérios utilizados para determinação do fim do tratamento basearam-se nas normas aplicáveis [3 - 5] e foram:

- redução do teor de cloretos no betão junto às armaduras para valores inferiores a 0,4 % (massa de cimento);
- a quantidade de carga por unidade de área mínima fornecida durante o tratamento foi de 600 A.h/m<sup>2</sup> de aço.

No final do tratamento, o ânodo, o material de suporte e equipamento (ligações) foram removidos e a superfície do betão limpa dos vestígios do tratamento.



Fig. 4 - Instalação do sistema de rega para manter a humidade.



Fig. 5 - Exemplo das ligações às fontes de alimentação.

### 3. RESULTADOS

Os resultados da determinação do teor de cloretos nas carotes extraídas antes e durante o tratamento, são apresentados nas figuras 6, 7 e 8, para os módulos A4, A3 e A2, respectivamente.

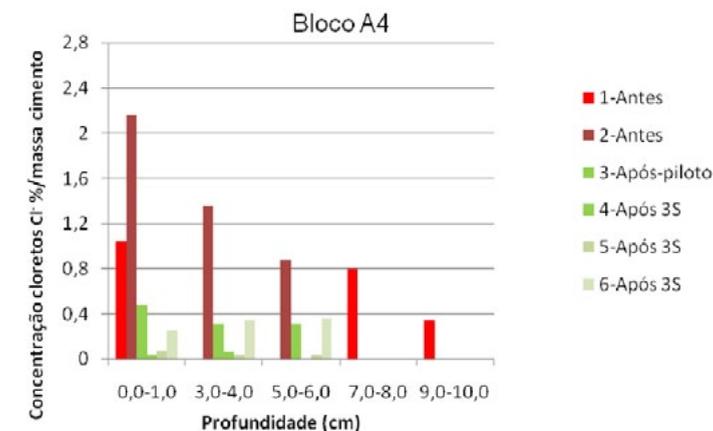


Fig. 6 - Variação do teor de cloretos com a profundidade, antes e após o tratamento, no Bloco A4.

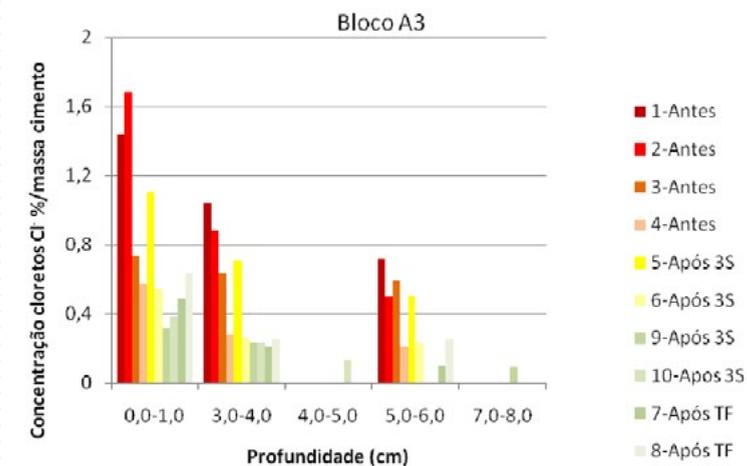


Fig. 7 - Variação do teor de cloretos com a profundidade, antes, durante e após o tratamento, no Bloco A3.

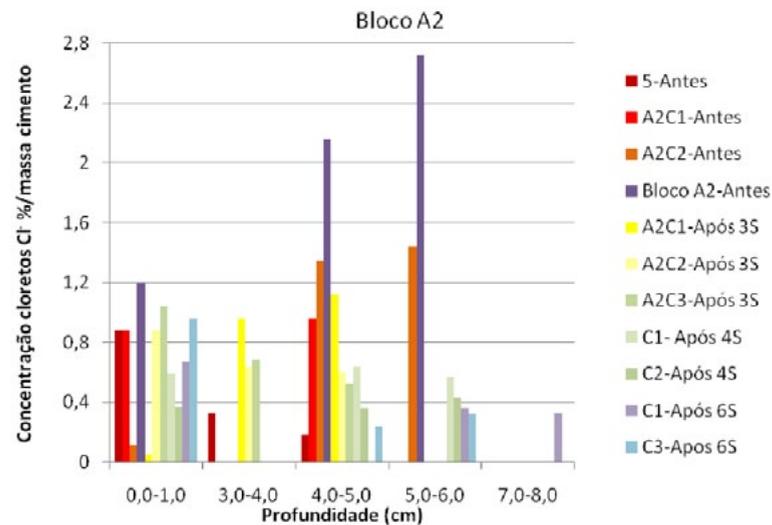


Fig. 8 - Variação do teor de cloretos com a profundidade, antes, durante e após o tratamento, no Bloco A2.

A duração do tratamento foi de 4 semanas nos Blocos A4 e A3 e de 7 semanas no Bloco A2. No Bloco A2, os resultados obtidos antes do início do tratamento indicaram um teor de cloretos muito elevado, tanto no betão superficial como ao nível das armaduras. Valores da ordem de 2,7 % foram encontrados a 5-6 cm de profundidade. Devido à elevada contaminação inicial do betão na laje deste bloco, comparativamente aos Blocos A3 e A4, o tratamento neste bloco foi mais prolongado. Nos Blocos A3 e A4 ao fim de 4 semanas de tratamento, o teor de cloretos ao nível das armadura (4-5 cm de profundidade) era inferior ao valor crítico, 0,4 % (massa de cimento). Contudo, no Bloco A2, para que se verificasse a diminuição de iões cloreto ao nível das armaduras, foi necessário um tratamento de 7 semanas.

Os resultados demonstraram a eficácia da aplicação da dessalinização na remoção dos iões cloreto ao nível das armaduras do betão das lajes, em todos os blocos tratados.

#### 4. CONCLUSÕES

Na reabilitação de estruturas de betão armado é fundamental que a estratégia de intervenção a adoptar seja baseada no conhecimento das causas e extensão da deterioração, de modo a permitir a selecção dos métodos tecnicamente e economicamente mais apropriados a cada situação.

No caso do edifício em estudo, a reparação localizada não seria eficaz nem aconselhável estruturalmente. A aplicação da dessalinização demonstrou ser eficaz no controle da corrosão, contribuindo para um menor enfraquecimento da estrutura, uma vez que o betão removido (e recolocado) foi confinado às áreas deterioradas.

#### NOTAS FINAIS

A inspecção e diagnóstico da estrutura foi realizado pela Oz, Lda. Os trabalhos de reparação e instalação do tratamento foram realizados pela Stap, S.A. O projecto e supervisão técnica do tratamento eletroquímico foi realizado pela Zetacorr, Lda.

#### REFERÊNCIAS

- [1] B. Miller John (Electrochemical chloride extraction and realkalisation - Part 1: Principles, durability, experience and post treatment), in *Proceedings do Seminário Ordem dos Engenheiros*, Outubro, Lisboa (2006).
- [2] M. Forsyth and M. Z. Lourenço, *Corrosion & Materials*, 22, 13 (1997).
- [3] CEN/TS 14038-2:2010. (Electrochemical Re-alkalization and chloride extraction treatments for reinforced concrete-Part 2: Chloride Extraction), CEN, Brussels, Belgium (2010).
- [4] NACE SP0107-2007. (Electrochemical Realkalization and Chloride Extraction for Reinforced Concrete), NACE (2007).
- [5] NACE Item 24214 (Electrochemical Chloride Extraction from Steel Reinforced Concrete - A State-of-the-Art Report (2001).
- [6] C. Mesquita (Metodologias de Inspeção e Ensaio para Avaliação do Estado de Conservação de Estruturas Afectadas por Corrosão de Armaduras), Relatório da OZ, Lda (2011).