

# INSPECÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO DETERIORADAS POR CORROSÃO DAS ARMADURAS

Eng.º Carlos Mesquita

Eng.º V. Córias e Silva

Eng.º António Vicente

Oz

Gerente - Oz  
Lisboa, Portugal

Oz

## Sumário

A realização de inspecções periódicas com vista a assegurar a durabilidade duma estrutura, cumprindo as exigências funcionais para que foi concebida, ou duma inspecção pontual tendo em vista a avaliação e diagnóstico das anomalias existentes numa dada altura do período de vida da estrutura, é factor primordial para se poder intervir atempada e correctamente na sua preservação. No caso das estruturas de betão armado e pré-esforçado, deterioradas pela corrosão das armaduras, têm vindo a ser desenvolvidas técnicas não destrutivas, que permitem avaliar e julgar acerca da importância das causas que estão na origem da corrosão e desta forma promover a estratégia adequada à sua eliminação. A presente comunicação visa dar uma pequena contribuição no âmbito das inspecções e ensaios "in-situ" de estruturas de betão armado deterioradas, nomeadamente, por corrosão das armaduras.

## Introdução

Parece evidente que qualquer intervenção correctiva numa estrutura debilitada deverá ser precedida de uma inspecção que permita enquadrar com confiança os problemas existentes. Na realidade, muitas reparações têm-se revelado mal sucedidas devido à simples inexistência de um estudo que aponte soluções correctivas realmente eficazes para tratar os problemas existentes.

Actualmente, existem inúmeras técnicas não destrutivas ou pouco intrusivas para as estruturas, que permitem caracterizar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais constituintes com fiabilidade, [1]. Dentre aquelas que são mais utilizadas na prevenção da corrosão das armaduras, nomeadamente, "in-situ", destacam-se, as seguintes:

- Detecção e medição do recobrimento de armaduras
- Medição da profundidade de carbonatação no betão
- Determinação do teor de cloretos na massa de ligante a várias profundidades (perfis)
- Medição da resistividade eléctrica do betão
- Medição do potencial eléctrico das armaduras
- Medição da intensidade de corrosão das armaduras (técnica recente)

As técnicas referidas, normalmente, são articuladas com outras com vista a completar a recolha de informação sobre a estrutura em estudo, como por exemplo:

- Ensaio de ultra-sons
- Ensaio esclerométrico
- Ensaio laboratorial sobre carotes para determinação da resistência do betão
- Ensaio laboratorial de absorção e capilaridade sobre provetes de betão
- Ensaio de permeabilidade ao ar e à água
- Análise petrográfica do betão
- Determinação do teor de sulfatos
- Levantamento da fissuração e medição da abertura das fissuras, etc.

São apresentados dois casos típicos de deterioração de estruturas por corrosão das armaduras. A metodologia adoptada para a inspecção e ensaios em cada estrutura foi semelhante tendo sido definida após uma visita preliminar às obras. Na sua definição teve-se em conta as patologias existentes, a informação existente (historial da estrutura, elementos de projecto, etc.), a utilização da estrutura, o ambiente que a rodeia e demais condicionalismos à efectivação da inspecção e ensaios

### **Caso 1-Silo de matérias primas de uma fábrica de rações**

A obra, concluída em 1980, é constituída por uma bateria de 12 células cilíndricas com diâmetro interior de 6,5 m e 50 m de altura, dispostas em 3 fiadas de 4 células com interespaços e por uma torre de equipamento com altura máxima de 62 m. A estrutura construída em betão armado, localiza-se a curta distância do mar, sendo batida por ventos predominantemente fortes. Na sua construção foram utilizados agregados da região, apresentando como principais características elevada porosidade e leveza.

A construção tem vindo a manifestar, há já alguns anos, sinais de deterioração acentuada, sobretudo delaminação generalizada do betão devida a corrosão das armaduras. Algumas zonas deterioradas foram alvo de reparações em 1986 e 1992, tendo sido utilizadas argamassas de reparação. Em 1994, mais zonas foram intervencionadas, tendo sido utilizado como material de reparação uma argamassa rica em cimento. Estas intervenções não pararam o processo de deterioração, que se tem vindo a manifestar cada vez com maior intensidade.

Face a esta situação foi decidido pelo dono de obra proceder a um estudo mais rigoroso das anomalias existentes, tendo em vista a tomada de decisão quanto à reabilitação da estrutura. O estudo solicitado foi dividido em inspecção e ensaios, relatório de diagnóstico e projecto de reabilitação.

Foram ensaiadas, por amostragem, 24 zonas distribuídas pelas células e torre de equipamento (a diferentes cotas), tendo incidido em locais com mais e com menos anomalias, por forma a se poderem estabelecer comparações. Foram realizados os seguintes ensaios:

- Detecção de armaduras e medição do seu recobrimento
- Ensaio de ultra-sons
- Determinação da profundidade de carbonatação
- Avaliação do risco de corrosão activa (potenciais eléctricos)
- Determinação do teor de cloretos a várias profundidades
- Ensaio esclerométrico
- Ensaio de compressão uniaxial sobre carotes de betão
- Análise petrográfica do betão
- Ensaio de absorção e capilaridade sobre provetes de betão
- Ensaio de permeabilidade sobre provetes de betão

#### *Análise dos principais resultados obtidos*

##### Recobrimento das armaduras e profundidade de carbonatação

Analisando os resultados constantes no quadro I, verifica-se, que os valores da espessura do recobrimento variam bastante. Os valores médios, medidos com o detector de armaduras, encontram-se compreendidos, em geral, entre 16 e 35 mm, com maior incidência no intervalo dos 26 a 30 mm (cerca de 30% dos valores).

Analisando os valores das profundidades da frente de carbonatação verifica-se, que variam desde 10 a 65 mm, indiciando grande heterogeneidade do betão, inclusive na mesma zona de ensaio. Em termos médios mais de metade dos valores obtidos (cerca de 62%), estão compreendidos entre 20 e 35 mm de profundidade. Verifica-se, também, que em 3/4 dos casos (onde foram expostas armaduras), a profundidade de carbonatação é igual ou superior ao recobrimento das armaduras.

Notas sobre o quadro I:

- a coluna designada por "c", contém o valor da espessura de recobrimento das armaduras no ponto de ensaio da carbonatação do betão,
- (\*), profundidade de carbonatação medida em carotes.

Quadro I - Resultados dos ensaios de medição do recobrimento das armaduras e da profundidade das frentes de carbonatação

Zona	Recobrimento (mm)			Profundidade da frente de carbonatação em vários locais (mm)									
	Mín.	Méd.	Máx.	PH1	c	PH2	c	PH3	c	PH4	PH5		
1	20	30,8	39	10 a 25	-	10 a 15 (*)	-	10 a 20 (*)	-	10 a 25 (*)	10 a 18 (*)		
2	25	42,0	60	25 a 40 (*)	-	22 a 32 (*)	-	23 a 38 (*)	-	20 a 32 (*)	-		
3	18	31,0	44	10 a 20	-	-	-	-	-	-	-		
4	11	21,6	29	15 a 30	-	-	-	-	-	-	-		
5	10	20,4	32	10	10	15 a 35	35	-	-	-	-		
6	12	26,4	37	30 a 35	20	-	-	-	-	-	-		
7	10	18,1	26	25 a 40	25	15 a 35	10	-	-	-	-		
8	12	18,0	27	15 a 20	22	-	-	-	-	-	-		
9	14	23,1	33	15 a 20	33	20 a 25	13	-	-	-	-		
10	14	32,5	65	17	15	-	-	-	-	-	-		
11	21	28,2	45	17 a 40	25	18 a 38	22	-	-	-	-		
12	16	21,3	29	20	20	10	20	-	-	-	-		
13	18	25,5	41	30 a 50	28	25 a 37	27	20 a 30	22	-	-		
14	24	31,0	45	20	35	15 a 28	44	-	-	-	-		
15	18	30,2	54	35 a 40	24	33	23	-	-	-	-		
16	17	21,8	29	25 a 30	30	20 a 50	25	-	-	-	-		
17	33	46,8	67	15 a 20	65	15 a 20	50	-	-	-	-		
18	22	43,4	61	55 a 65	35	20 a 30	45	-	-	-	-		
19	22	30,2	35	20	20	15 a 20	30	23 a 30	30	-	-		
20	16	27,1	51	20 a 25	10	10 a 30	20	15 a 30 (*)	-	20 a 30 (*)	-		
21	17	32,4	37	28 a 45	24	28 a 35	27	-	-	-	-		
22	18	26,5	33	15 a 19	25	7 a 14 (*)	-	12 a 25 (*)	-	15 a 30 (*)	-		
23	10	21,1	26	10 a 20	20	12 a 17 (*)	-	-	-	-	-		
24	14	23,3	38	23 a 35	35	20 a 35	20	-	-	-	-		

#### Teor de cloretos na massa de ligante

Os resultados obtidos indicam que o teor de cloretos junto à superfície varia desde 0,1 a 0,7 % da massa de ligante, junto às armaduras varia desde 0,5 a 1,4 %, e por detrás das armaduras variam desde 0,2 a 1,3 %. Nalgumas zonas (6 zonas), o teor de cloretos é mais elevado no interior da secção do que à superfície, indiciando que a composição do betão deveria conter uma percentagem de cloretos excessiva.

### Avaliação do risco de corrosão activa através da medição de potenciais eléctricos

Os resultados obtidos indicam, que em apenas 3 zonas, o risco de corrosão é mínimo, [2]. Nas restantes zonas a generalidade dos resultados dos pontos de medição não são conclusivos, ou seja, a probabilidade da ocorrência de corrosão activa na altura da medição foi de 50%.

### Conclusões

Do estudo efectuado ressalta o seguinte:

- a malha de armaduras é muito irregular e o seu recobrimento nalgumas zonas é diminuto, sendo, em geral, inferior ao preconizado pela regulamentação actual [3], [4], (4 cm), atendendo ao facto de as estruturas estarem expostas a um ambiente marítimo;
- o betão apresenta-se, normalmente, muito heterogéneo à superfície;
- as frentes de carbonatação atingem, em muitos casos, as armaduras;
- o teor de cloretos na massa de ligante é elevado, sendo superior ao teor crítico definido pela regulamentação [5], (0,4%). Crê-se que parte significativa da percentagem de cloretos presente no betão se deve à sua composição, nomeadamente a utilização de areia do mar (por lavar);
- nalguns casos a corrosão das armaduras conduziu à redução significativa da secção das armaduras;
- o betão do ponto de vista da resistência, é também heterogéneo, apresentando resistências baixas numas zonas e elevadas noutras. Por este motivo não é possível atribuir uma classe ao betão. Em termos médios a sua resistência equivalente estará, presumivelmente, compreendida entre um betão da classe B20 e um da classe B25, [6];
- o betão apresenta uma razão A/C variável entre 0,35 e 0,50, e elevada porosidade. A microfissuração existente facilita o ingresso dos agentes agressivos e a sua mobilidade no betão;
- do ponto de vista da durabilidade o betão pode-se classificar de qualidade fraca a média, [1];
- a deterioração abrange grandes áreas.

Desta forma, tendo por base as conclusões atrás referidas a principal causa da deterioração existente, é devida a corrosão generalizada das armaduras. As zonas que apresentam menores recobrimentos, ou betão de inferior qualidade, ou a frente de carbonatação ao nível das armaduras, ou, ainda, teor de cloretos elevado, são potenciais zonas de deterioração do betão por corrosão das armaduras, [7]. A percentagem excessiva de cloretos nalgumas zonas acelera o mecanismo da corrosão.

As medidas correctivas a adoptar terão como objectivo repor, não só as condições aceitáveis de desempenho estrutural, mas também as condições de durabilidade da estrutura, por forma a prolongar a vida útil. Para tal, podem ser seguidas duas estratégias:

- a) Repassivação das armaduras nas zonas afectadas através da remoção do betão deteriorado, reconstituindo as secções com material de reparação de características apropriadas. Revestimento de protecção adequado.
- b) Tratamento electroquímico de dessalinização/realcalinização do betão da estrutura. Revestimento de protecção adequado, [8], [9].

A primeira estratégia será a curto prazo mais vantajosa do ponto de vista económico, porque abrange menores áreas, mas não eliminará o problema, uma vez que este surgirá novamente, vindo da vizinhança da área reparada (atente-se ao teor elevado de cloretos no interior do betão). A segunda estratégia revelar-se-á mais duradoura uma vez que prevê a remoção dos cloretos em excesso e o restabelecimento da alcalinidade do betão.

As figuras 1 e 2, ilustram alguns exemplos de ensaios.

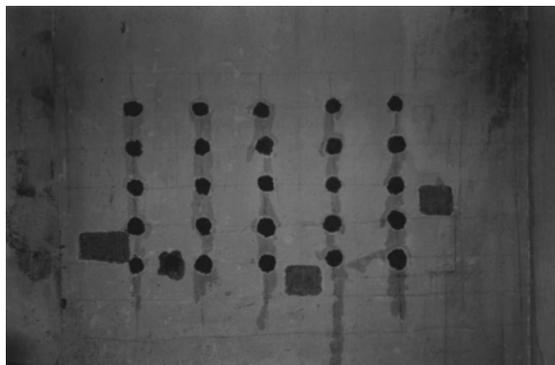


Figura 1 - Malha de armaduras detectada, malha para medição do potencial eléctrico das armaduras e ensaios esclerométricos. Figura 2 - Ensaio para determinação da profundidade de carbonatação numa carote.

### **Caso 2 - Edifício de escritórios**

O edifício, construído há cerca de 20 anos, numa zona suburbana, é formado por 2 dois blocos adjacentes comportando o bloco mais elevado 5 pisos (2 enterrados e 3 elevados). A estrutura dos pisos é constituída, em geral, por lajes fungiformes aligeiradas de betão armado. Nas fachadas do bloco A (mais elevado) e na parte inferior do bloco B, existem elementos de betão armado salientes (platibandas, bordo das lajes de pisos, face lateral de vigas e de pilares).

Na visita preliminar efectuada, verificou-se a existência de algumas anomalias nos elementos de betão armado à vista nas fachadas do edifício, tais como delaminação do betão, fissuração e corrosão com exposição de armaduras.

Foi decidida a realização de uma inspecção e ensaios para caracterização das anomalias existentes e avaliação da sua extensão com vista à elaboração de um projecto de reparação tendo por base a informação existente.

Foram ensaiadas, por amostragem, 18 zonas distribuídas por pilares, lajes e vigas em locais previamente seleccionados. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- detecção e medição do recobrimento das armaduras exteriores;
- extracção de carotes para ensaios de compressão uniaxial;
- realização de ensaios esclerométricos;
- determinação da profundidade das frentes de carbonatação;
- determinação do teor de cloretos a várias profundidades (perfis de cloretos);
- medição da intensidade de corrosão das armaduras e da resistividade eléctrica do betão através da técnica da "polarização linear", [10].

A última técnica referida representa uma valiosa ferramenta para o estudo de estruturas de betão armado deterioradas por corrosão das armaduras, dado permitir a medição da intensidade de corrosão das armaduras. Resumidamente, consiste na aplicação de uma pequena corrente à armadura e na medição das mudanças provocadas no potencial da meia-

célula. A resistência de polarização,  $R_p$ , consiste na mudança do potencial, medida pela unidade de leitura, e dividida pela corrente aplicada. A taxa de corrosão,  $I_{corr}$ , é obtida através da resistência de polarização pela relação de “Stern e Geary”. Dado o equipamento utilizado possuir um anel de protecção controlado do sensor, permite confinar rigorosamente a área de medição. Isto significa que as medições da taxa de corrosão não são obtidas sobre uma área indefinida, mas mostram a verdadeira taxa de corrosão no local da medição efectuada.

Permite, ainda, a medição de outros parâmetros como sejam, o potencial electroquímico das armaduras, a resistividade eléctrica do betão, a temperatura ambiente e a humidade relativa.

#### *Análise dos principais resultados obtidos*

##### Recobrimento das armaduras e profundidade de carbonatação

Analisando os resultados constantes no quadro II, verifica-se, que os valores da espessura do recobrimento variam bastante (elevada co-variância). Os valores médios, medidos com o detector de armaduras, encontram-se compreendidos, em geral, entre 14 e 63 mm.

Verifica-se, ainda, que os resultados da profundidade da frente de carbonatação no betão são relativamente elevados situando-se, normalmente, entre os 13 e 40 mm de profundidade com uma média de 20 mm. Em cerca de 40% dos resultados a profundidade de carbonatação encontra-se pelo menos ao nível das armaduras.

Quadro II - Resultados dos ensaios de medição do recobrimento das armaduras e da profundidade das frentes de carbonatação

Zona	Elemento	Recobrimento (mm)					Profundidade de carbonatação (mm)
		Mín.	Méd.	Máx.	D.P.	Covarian. (%)	
1	Viga	0	20,2	70	17,3	0,85	25
2	Viga	8	24,1	34	6,3	0,26	13
3	Viga	10	23,7	35	8,2	0,35	25
3	Parede	9	63,6	110	26,3	0,41	40
4	Parede	1	17,1	36	8,9	0,52	17
5	Pilar	0	22,8	35	7,2	0,31	18
6	Viga	20	40,3	75	17,3	0,43	20
6	Pilar	9	16,6	24	4,5	0,27	23
6	Parede	9	14,9	18	3,3	0,22	35
7	Viga	6	39,7	87	22,2	0,56	20
7	Pilar	10	25,9	40	6,5	0,25	27
8	Viga	16	51,7	88	19,9	0,38	20
8A	Pilar	17	28,6	41	7,9	0,28	40
9	Viga	13	29,8	64	11,6	0,39	20
10	Viga	26	53,9	67	8,5	0,16	23
10	Viga	14	17,3	22	2,9	0,17	20
11	Viga	11	36,3	61	15,5	0,43	18
12	Viga	19	39,9	77	14,1	0,35	15
13	Viga	0	15,9	37	7,0	0,44	15
14	Pilar	9	34,0	57	9,7	0,29	20
15	Viga	9	39,3	68	17,6	0,45	10
15	Viga	2	19,3	40	10,8	0,56	20
16	Viga	7	38,4	68	15,1	0,39	20
16	Pilar	13	32,6	44	9,5	0,29	20
17	Pilar	3	20,8	40	10,1	0,48	15

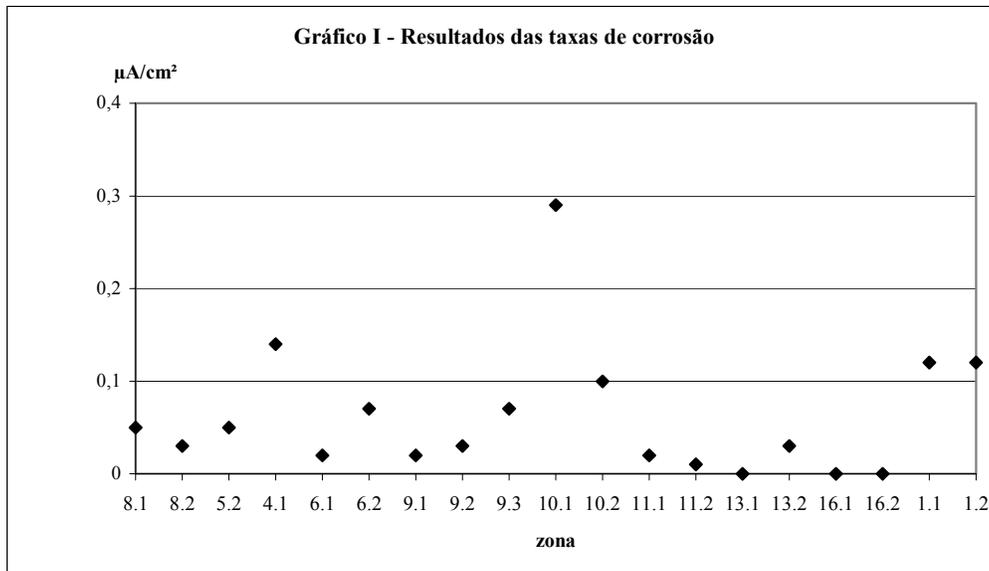
### Teor de cloretos na massa de ligante

Refira-se, que este ensaio foi realizado apenas com o objectivo de despistar a eventual contaminação do betão pelo ião de cloretos. Os resultados obtidos indicam que o valor máximo do teor de cloretos a diferentes profundidades é de 0,16% da massa de ligante.

### Medição da taxa de corrosão das armaduras, de potenciais eléctricos e da resistividade eléctrica do betão

Analisando os resultados constantes no gráfico I, verifica-se que, em geral, os valores da intensidade de corrosão correspondem a um nível de corrosão das armaduras negligível a baixo [10].

Os resultados da intensidade de corrosão, aparentemente, não traduzem a deterioração existente. Deve-se notar que a taxa de corrosão é influenciada pelas condições ambientais, nomeadamente, o aumento da temperatura ambiente e da humidade relativa conduz a um aumento da taxa de corrosão. Desta forma, a altura do ano em que se fazem as leituras, bem como a localização do próprio ponto de ensaio são factores a ter em conta na interpretação dos resultados.



Os resultados obtidos da medição da resistividade eléctrica do betão são em geral elevados corroborando os resultados da medição da intensidade de corrosão.

### Conclusões

Da análise dos resultados dos ensaios e considerações anteriores, pode-se concluir o seguinte:

- nalgumas zonas o recobrimento das armaduras é diminuto, sendo, inferior ao previsto pela regulamentação actual, [3], [4];
- o betão apresenta-se, normalmente, homogéneo à superfície;
- a frente de carbonatação atinge, em diversos casos, as armaduras;
- o teor de cloretos estimado é, em geral, inferior ao limite crítico indicado pela regulamentação, [5];
- a resistência à compressão do betão estará compreendida entre a classe B20 e a classe B25, [6];

- na maioria das zonas ensaiadas taxa de corrosão é baixa, no entanto, convém salientar que as leituras foram efectuadas com o tempo seco e humidade relativa baixa, [10];
- nas zonas em que a frente de carbonatação atinge as armaduras, o betão deixou de oferecer protecção às armaduras permitindo o início da corrosão, que na maioria das zonas já se verifica. Existem alguns casos em que a corrosão conduziu a redução significativa da secção das armaduras, enfraquecendo a capacidade resistente da secção de betão armado;

Desta forma, os dados obtidos indiciam que o mecanismo de deterioração em curso está associado à corrosão das armaduras, sendo a origem deste processo, muito provavelmente, a despassivação das armaduras resultante da elevada profundidade de carbonatação do betão ou insuficiente recobrimento, [7]. A idade da estrutura, a falta de protecção das superfícies de betão, dispositivos construtivos menos adequados são factores intervenientes no processo.

A extensão das zonas deterioradas com fissuração, manchas de óxido, delaminação do betão e corrosão visível das armaduras, aliada à elevada profundidade de carbonatação do betão, indicia um avançado estado de deterioração nos elementos estruturais exteriores das fachadas, em especial daqueles que se encontram mais salientes.

As medidas correctivas a adoptar terão como objectivo repor, não só as condições aceitáveis de desempenho da estrutura, mas também manter ou aumentar a durabilidade inicialmente prevista. Para tal, poderão ser seguidas duas estratégias:

- Reposição das condições de protecção das armaduras nas zonas afectadas através da remoção do betão deteriorado, reconstituindo as secções com material de reparação de características apropriadas. Revestimento de protecção adequado.
- Tratamento electroquímico de realcalinização do betão, [9]. Revestimento de protecção adequado.

As figuras 3 e 4, ilustram alguns exemplos dos ensaios realizados.



Figura 3 - Malha de armaduras detectada e ensaios para determinação da profundidade de carbonatação.



Figura 4 - Malha de armaduras detectada e medição da intensidade de corrosão.

### Considerações finais

Os dois casos resumidamente apresentados ilustram a necessidade de se proceder previamente ao estudo das deficiências existentes nas estruturas de betão armado pré-esforçado a fim de facilitar a tomada de decisão quanto ao tipo de estratégia correctiva mais adequada a adoptar.

## Referências Bibliográficas

---

1. CEB, "Bulletin d'information N° 192 - Diagnosis and assessment of concrete structures", 1989.
2. ASTM C876-91, "Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel en Concrete", 1991.
3. R.E.B.A.P., "Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado", 1983.
4. Eurocódigo 2, "Projecto de estruturas de betão - Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios (versão Portuguesa)", 1991.
5. NP ENV 206, "Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade", 1996.
6. Concrete Society Technical Report No. 11, "Concrete core testing for strength", 1976.
7. ACI 222R-89, "Corrosion of metals in concrete", 1989.
8. McFarland, B. J., "Electrochemical Concrete Repair Technology", Martech Services Ltd., Ref.: R0029.MSL, Huntingdon, UK, April 1995.
9. Farinha, M. B.; Silva, V. C., "Tratamento de realcalinização electroquímica de estruturas de betão armado. Primeiro caso de aplicação prática realizado em Portugal", in Betão Estrutural 1996 - 6º Encontro Nacional sobre Estruturas Pré-Esforçadas. Ed. By LNEC, Novembro de 1996.
10. C. Andrade and C. Alonso: "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on site", 1995.