Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
39-48

(1) Oz, Lda, R. Pedro Nunes, Nº 45,1º Esq., 1050-170 Lisboa
e-mail: cgmesquita@oz-diagnostico.pt

METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO E ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DE ESTRUTURAS AFETADAS POR CORROSÃO DE ARMADURAS

Artigo submetido em Setembro de 2011 e aceite em Maio de 2012

Carlos Mesquita[1]

Resumo

Descrevem-se as ferramentas de diagnóstico, mais usuais, que permitem avaliar, através de ensaios não destrutivos "in-situ", o estado de conservação das estruturas de betão armado afetadas por corrosão das armaduras. Podem ser usadas em qualquer fase da vida da estrutura, quer no contexto de uma política pró-ativa de manutenção/conservação, quer no contexto duma política reativa.

A natureza e importância da corrosão das armaduras podem ser avaliadas simplificadamente, numa primeira abordagem, através de 3 parâmetros: o recobrimento das armaduras, a profundidade de carbonatação do betão e o teor de cloretos no betão a várias profundidades.

O levantamento de anomalias é outra ferramenta complementar para se avaliar a importância e extensão das zonas visivelmente afetadas pela corrosão das armaduras.

Apresenta-se um caso prático do diagnóstico efetuado numa escola secundária onde, estranhamente, só parte da estrutura de betão armado encontrava-se severamente afetada por corrosão das armaduras. Visando o diagnóstico de tal deterioração diferenciada e, consequentemente, a definição das medidas corretivas apropriadas, foi levado a cabo um conjunto de ensaios não destrutivos ou reduzidamente intrusivos.

Palavras-chave: Estruturas de Betão Armado, Corrosão, Deterioração, EN 1504, Ensaios não Destrutivos, Diagnóstico

INSPECTION AND TESTING METHODOLOGIES FOR ASSESSMENT OF THE CONSERVATION STATUS OF THE STRUCTURES AFFECTED BY CORROSION OF REINFORCEMENT

Abstract

It describes the most common diagnostic tools that allow evaluating, through non-destructive tests "in-situ", the conservation status of reinforced concrete structures affected by reinforcement corrosion. Can be used at any stage of the structure cycle life, whether in the context of a pro-active maintenance/conservation or in the context of a reactive policy.

The nature and importance of reinforcement corrosion can be evaluated simply, as first approach, through the 3 parameters only: the rebar's cover, the carbonation's depth in the concrete and the chloride contents of concrete from different depths.

The survey of anomalies is another complementary tool to assess the importance and the extent of the areas affected by reinforcement corrosion.

It presents a study of diagnosis a secondary school where, strangely, only part of the reinforced concrete structure found it severely affected by reinforcement corrosion. With the aim of diagnostic of the deterioration differentiated and therefore the definition of appropriate corrective action, was carried out a series of non-destructive tests or low intrusive.

Keywords: Reinforced Concrete Structures, Corrosion, Deterioration, EN 1504, Non-destructive Testing, Diagnosis

1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras é o principal mecanismo de deterioração das estruturas de betão armado e pré-esforçado. Afeta, inclusive, as estruturas reparadas mais do que seria expetável. Um estudo, algo abrangente, promovido pela rede CONREPNET [1] concluiu que os desempenhos das reparações analisadas são dececionantes: 20 % falharam em 5 anos; 55 % falharam em 10 anos e 90 % falharam em 25 anos. O seu controlo é pois essencial para a satisfação das exigências de durabilidade, de resistência e de funcionalidade.

Logo na fase do projeto da obra é fundamental conceber a estrutura e seus componentes, adotando uma geometria regular, de modo a favorecer boas condições de betonagem, optando por elementos com densidade de armaduras equilibrada, adotando espessuras adequadas de recobrimento para a proteção dos varões, etc. [2].

Também, a escolha dos tipos e quantidades de ligante do betão deve ser cuidadosamente observada, bem como, claramente, especificados todos os requisitos relacionados com os restantes materiais a empregar e a sua colocação em obra, para que a sua execução seja eficazmente controlada.

O acompanhamento da evolução da corrosão das armaduras, ao longo do tempo, pode, também, ser previsto logo na fase de elaboração do projeto através de um plano de monitorização onde são definidos os parâmetros chave a monitorar como, por exemplo, o potencial elétrico e a velocidade de corrosão das armaduras, a carbonatação do betão, o teor de cloretos, a resistividade elétrica do betão, a temperatura e a humidade.

O projeto deverá, também, incluir o programa de manutenção/conservação da obra, onde devem constar a periodicidade das inspeções, quer as de rotina, quer as mais completas, os ensaios a realizar, as medidas corretivas a implementar quando se verificarem certos parâmetros previstos, bem como os prazos para a substituição dos diversos componentes, quer os estruturais, quer os não estruturais.

Descrevem-se, a seguir, metodologias de inspeção e ensaios em que se articulam diferentes técnicas de diagnóstico, umas simples, outras mais sofisticadas, que permitem a avaliar o estado de conservação da estrutura afetada por corrosão das armaduras, focando-se, também, a importância da qualificação dos agentes envolvidos.

2. FACTORES QUE CONDICIONAM A CORROSÃO DAS ARMADURAS

Vários fatores influenciam a despassivação do aço das armaduras [3]. Os principais parâmetros que influenciam a evolução da corrosão das armaduras são a espessura de betão de recobrimento das armaduras, a profundidade de carbonatação do betão e o teor excessivo de cloretos do betão.

2.1. Recobrimento das armaduras

A proteção das armaduras é conferida, fundamentalmente, pelo betão de recobrimento, que depende diretamente de 2 fatores, da espessura e da qualidade do betão, ambos definidos regulamentarmente [4-6],

VOLTAR AO INÍCIO

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

função do tipo de elemento estrutural (fundação, viga, pilar, parede ou laje) e do tipo de exposição (ambientes seco, húmido, marítimo, etc.).

A qualidade do betão é controlada, ao nível do fabrico, fundamentalmente, através da dosagem de ligante, da relação água/cimento e da classe de resistência. Para se alcançar maior durabilidade do elemento estrutural, para além da espessura de recobrimento mais adequada, o betão deverá ter, também, uma dosagem rica em ligante, uma baixa relação água/cimento (fraca permeabilidade) e, consequentemente, elevada resistência.

2.2. Carbonatação do betão

A carbonatação, reação natural do betão, é um dos agentes principais responsáveis pela despassivação do aço (início da propagação da corrosão) [3]. Simplificadamente, resulta da reação do dióxido de carbono atmosférico, na presença de água, com o hidróxido de cálcio, com formação de carbonato de cálcio. A carbonatação, que vai progredindo da superfície para o interior da secção (Fig. 1), provoca a diminuição do pH do betão para cerca de 8,5, valor para o qual o filme de passivação do aço deixa de ser termodinamicamente estável.

Fig. 1 - Avanço da frente de propagação da carbonatação do betão ao longo do tempo (secção parcial dum elemento estrutural).

A progressão da frente de carbonatação depende fundamentalmente, da permeabilidade do betão, tipo de ligante e das condições de exposição. Pode ser, simplificadamente, traduzida pela fórmula:

$$x = k \times \sqrt{t}$$

em que: x - profundidade de carbonatação (mm).
k - constante (dependente da humidade e permeabilidade do betão).
t - idade do betão (anos).

2.3. Teor de cloretos no betão

Outro agente, principal, catalisador da corrosão das armaduras, inclusive com maior severidade, é o teor elevado de cloretos ao nível dos varões. A sua presença surge por incorporação no fabrico do cimento, normalmente, controlada, ou externamente, por contaminação do betão, normalmente associado a ambientes marítimos [3]. Nas estruturas marítimas as partes mais afetadas pelos cloretos são as localizadas na zona de maré, conforme ilustra a fig. 2.

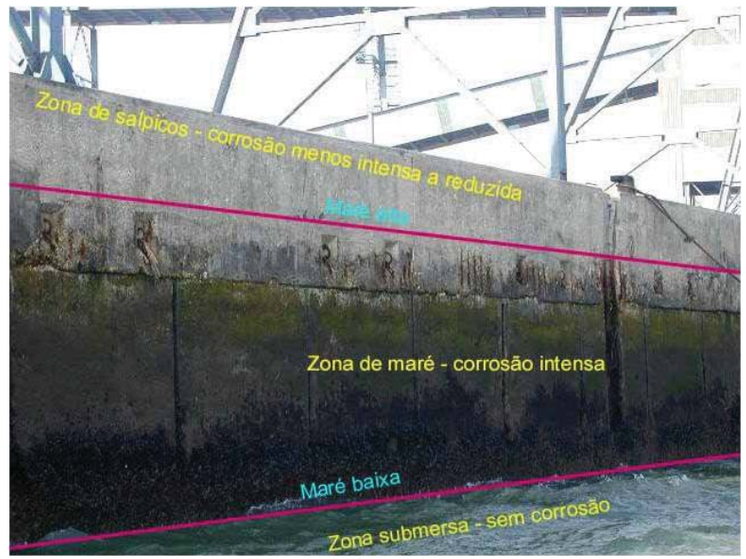


Fig. 2 - Severidade da corrosão influenciada por cloretos.

A velocidade da progressão da contaminação do betão por cloretos, provenientes do exterior da secção, segue, tal como a carbonatação, uma lei função da raiz quadrada do tempo, também, dependente duma constante.

A regulamentação nacional [6], define limites para os quais o risco de corrosão é reduzido, sendo, em geral, de 0,4 % da massa de cimento no caso de armaduras ordinárias e 0,2 % no caso das armaduras de pré-esforço.

2.4. Outros fatores

Referem-se outros fatores que condicionam a corrosão das armaduras, que interligam com os atrás indicados, como por exemplo, a natureza e a resistência do aço (aço de pré-esforço mais sensível à corrosão), o diâmetro dos varões (menor diâmetro é mais sensível à corrosão), a qualidade do projeto e da execução da estrutura e ausência ou inadequada manutenção/conservação.

3. AVALIAÇÃO SUMÁRIA DA CORROSÃO DAS ARMADURAS

A parte 9 da norma NP EN 1504 [7] é esclarecedora quanto à necessidade do diagnóstico das anomalias presentes nas estruturas para a definição clara e objetiva da estratégia de intervenção. Em particular define as etapas a observar no processo de avaliação:

a) Inspeção visual para levantamento do estado aparente da estrutura;
b) Realização de ensaios não destrutivos para caracterização do betão e das armaduras;
c) Análise do projeto original;
d) Caracterização do ambiente a que a estrutura está sujeita;
e) Pesquisa do historial da estrutura;
f) Caracterização dos tipos de uso;
g) Definição dos requisitos futuros.

Nesse sentido, numa primeira abordagem, a importância da corrosão das armaduras duma dada estrutura pode ser avaliada através da confrontação de apenas 3 parâmetros: a espessura de recobrimento das armaduras (medida com o pacómetro, fig. 3) [8], a profundidade da frente de carbonatação do betão (determinada com uma solução alcoólica de fenolftaleína, fig. 4) [9] e o teor de cloretos no betão a várias profundidades (recolha de amostras de pó (fig. 5) e ensaio com elétrodo específico de cloretos) [10].

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

Fig. 3 - Zona de ensaios com as malhas de armaduras levantadas com o pacómetro. Medição do recobrimento.

Fig. 4 - Aspersão da solução alcoólica de fenolftaleína para medição da profundidade de carbonatação do betão.

Fig. 5 - Recolha de pó do betão a diferentes profundidades para determinação do perfil de cloretos.

3.1. Recobrimento das armaduras

Importa referir a importância da fiabilidade das medições, assegurada através da calibração do pacómetro, feita por pessoal qualificado.

Para uma mais completa análise dos resultados do ensaio de medição do recobrimento das armaduras é conveniente a representação esquemática das malhas de armaduras levantadas nas várias faces do elemento estrutural, com indicação dos valores medidos, conforme ilustrado na fig. 6, dum ensaio dum pilar.

Dessa forma, é possível verificar o grau de proteção das armaduras função do recobrimento medido. Por exemplo, na fig. 6, as armaduras das faces "A" e "B" têm valores de recobrimento claramente superiores aos das faces opostas "C" e "D", significando um deficiente

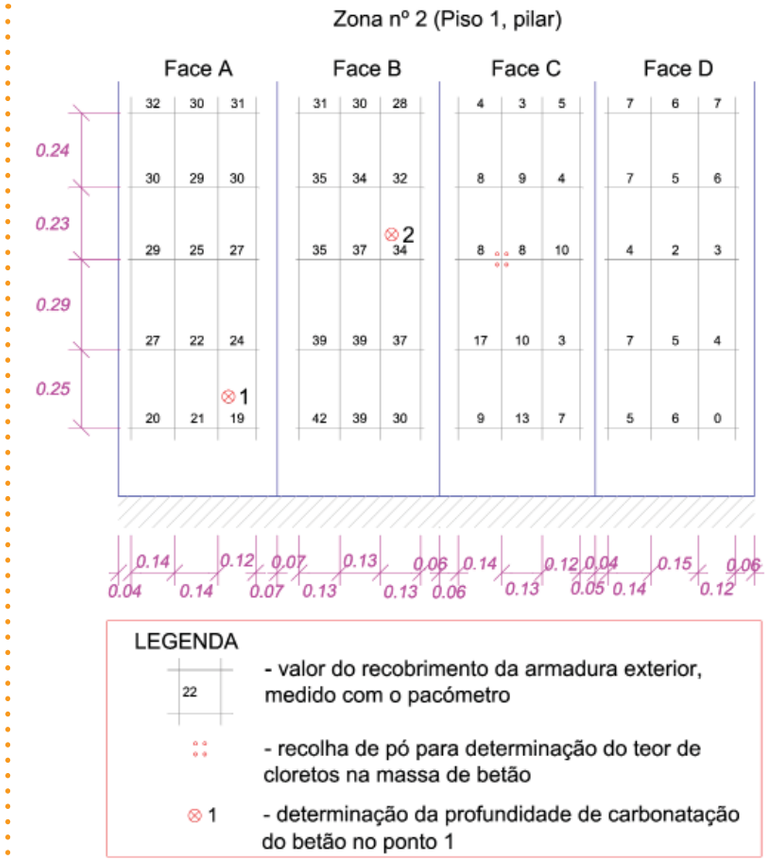


Fig. 6 - Representação esquemática da disposição das malhas de armaduras num pilar, detetadas com o pacómetro, com indicação dos valores de recobrimento e localização de outros ensaios.

posicionamento das armaduras na secção aquando da execução do pilar. Resulta do exemplo a importância de fazer incidir o ensaio de medição do recobrimento das armaduras em todas as faces do elemento estrutural e, também, logo na fase da construção da estrutura para controlo da qualidade de execução, conforme previsto na parte 10 da norma EN 1504 [7].

VOLTAR AO INÍCIO

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

3.2. Recobrimento *versus* carbonatação

A fig. 7, ilustra a confrontação gráfica dos resultados da medição do recobrimento das armaduras com a profundidade de carbonatação do betão, da zona de ensaio num pilar, ilustrada na fig. 6 [11]. Através do gráfico, é possível constatar, por um lado, que cerca de 55 % dos valores medidos do recobrimento das armaduras são inferiores ao valor mínimo regulamentar (*c min.*) assumido no projeto, refletindo inadequada proteção e, por outro lado, que cerca de 47 % dos valores medidos do recobrimento das armaduras são inferiores ao valor médio da profundidade de carbonatação do betão (*PH2*), refletindo a despassivação do aço.

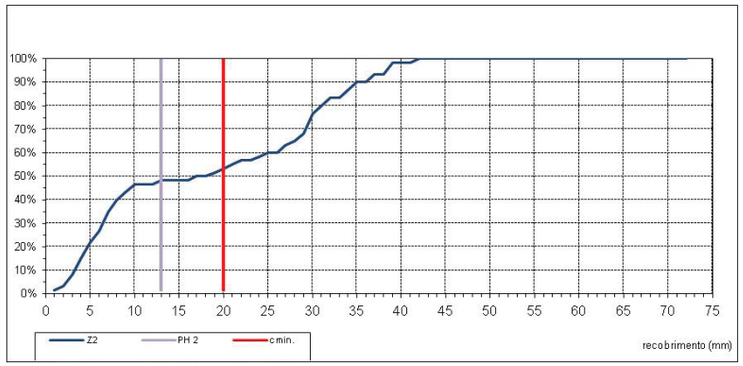


Fig. 7 - Representação gráfica da frequência acumulada dos valores de recobrimento, medidos com o pacómetro, da profundidade de carbonatação e do recobrimento mínimo.

Outro dado importante, que se pode inferir a partir do recobrimento das armaduras e da profundidade de carbonatação dos betões, é a previsão do tempo que falta para ocorrer a despassivação das armaduras, através da fórmula referida no ponto 2.2. O gráfico da fig. 8 ilustra a curva de progressão de carbonatação do betão, da zona de ensaio num pilar, ilustrada na fig. 6. Verifica-se, por exemplo, que aos 30 anos de idade da estrutura a profundidade de carbonatação do betão atingirá, expectavelmente, os 21 mm de profundidade, significando, através do gráfico da fig. 7, que só cerca 45 % dos valores medidos do recobrimento das armaduras corresponderão à situação do aço passivado (fase da iniciação).

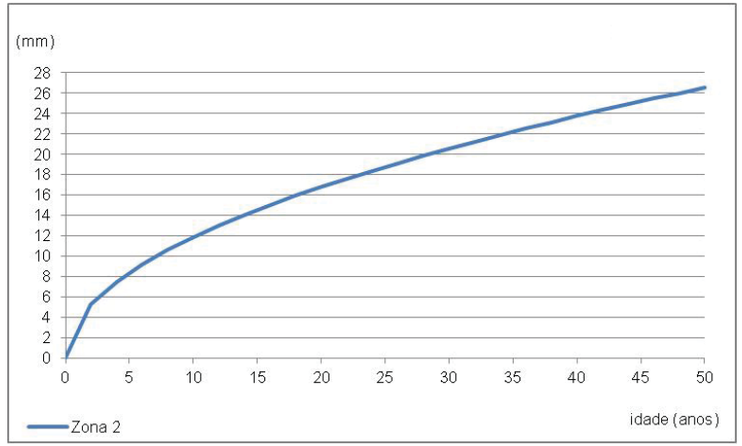


Fig. 8 - Representação gráfica da evolução da profundidade de carbonatação do betão.

3.3. Recobrimento *versus* cloretos

A despassivação do aço das armaduras devida à presença de cloretos em excesso no betão [3, 11], pode, também, ser aferida através da sua determinação a diferentes profundidades, conforme referido em 2.3 (perfis de cloretos, figuras 9 e 10). Feita periodicamente permite, também, prever quando ocorrerá a despassivação, bem como validar eventuais modelos de previsão, adotados no projeto. A fig. 9 ilustra o perfil típico dum betão corrente, sem cloretos em excesso, com teores na massa de cimento inferiores ao teor crítico regulamentar de armaduras ordinárias.

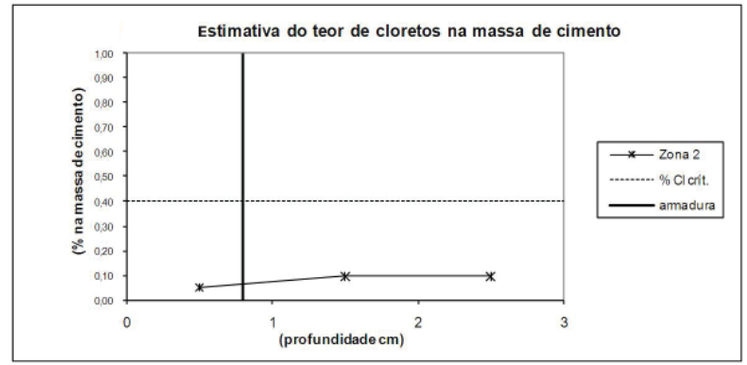


Fig. 9 - Perfil de cloretos, típico de um betão corrente, sem cloretos em excesso.

A fig. 10 ilustra o perfil típico dum betão corrente de estrutura marítima contaminado por cloretos, traduzido pela diminuição dos teores da superfície para o interior da secção. No caso, ao nível da armadura (recobrimento de 2,9 cm) o valor do teor na massa de cimento é da ordem de grandeza do teor crítico regulamentar para armaduras ordinárias.

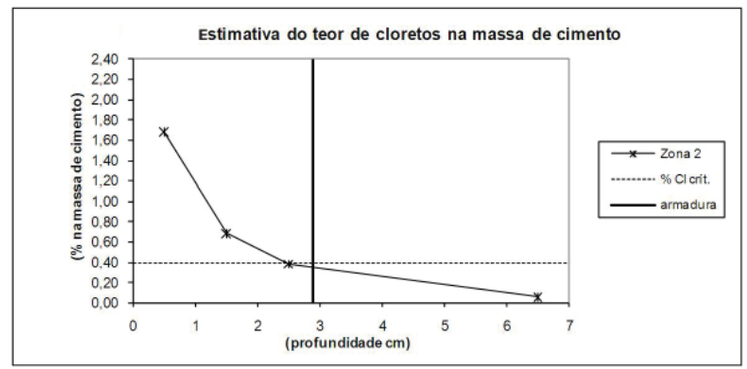


Fig. 10 - Perfil de cloretos típico dum betão de estrutura marítima, contaminado por cloretos.

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

4. AVALIAÇÃO DO RISCO DE CORROSÃO DAS ARMADURAS

Para o aprofundamento do diagnóstico da corrosão das armaduras é habitual o recurso a ensaios complementares, nomeadamente, a medição do potencial elétrico das armaduras conforme ASTM C876 [12], da resistividade elétrica do betão (fig. 11) e da intensidade de corrosão, por exemplo através da técnica da resistência de polarização (fig.12) [13].

Fig. 11 - Medição do potencial elétrico das armaduras e da resistividade elétrica do betão.

Outros parâmetros que influenciam a corrosão das armaduras como a humidade do betão e a temperatura e a humidade relativa ambiente devem ser, também, avaliados para serem tidos em conta na análise dos resultados.

4.1. Medição do potencial elétrico das armaduras

A medição de potenciais elétricos permite avaliar a probabilidade da ocorrência de corrosão ativa das armaduras, especialmente, em estruturas contaminadas com cloretos [12]. No entanto, a técnica não permite avaliar quantitativamente a intensidade da corrosão das armaduras.

Dado a simplicidade e rapidez das medições, podem ser efetuados mapeamentos do potencial elétrico das armaduras, em particular em elementos estruturais com superfícies mais extensas, permitindo localizar e quantificar as áreas com risco de corrosão ativa, conforme critério da Tabela 1 [12].

Fig. 12 - Medição da intensidade de corrosão das armaduras através da técnica da resistência de polarização.

Tabela 1 – Critério para avaliação do risco de corrosão ativa das armaduras função dos potenciais elétricos (elétrodo de cobre/sulfato de cobre (CSE)).

Potencial elétrico (mV) *vs* CSE	Risco de corrosão ativa
$E_{corr} > -200$	< 10 %
$-350 < E_{corr} < -200$	50 % (inconclusivo)
$E_{corr} < -350$	> 90 %

4.2. Medição da resistividade elétrica do betão

A medição da resistividade elétrica do betão, normalmente feita em conjunto com a medição do potencial elétrico permite, também, inferir sobre o estado de corrosão das armaduras, distinguindo entre zonas ativas e passivas e avaliando indiretamente os níveis de corrosão, conforme a Tabela 2 [13]. No entanto, é necessário ter presente que a medição é diretamente influenciada pelo teor de humidade do betão, pelo que esse parâmetro tem que ser devidamente controlado durante a preparação da zona de ensaio.

Tabela 2 – Critério complementar para avaliação do risco de corrosão.

Resistividade (kOhm.cm)	Níveis de corrosão
$R_e > 100 – 200$	Taxa de corrosão muito baixa mesmo em betão carbonatado ou contaminado com cloretos
$50 < R_e < 100$	Taxa de corrosão baixa
$10 < R_e < 50$	Taxa de corrosão moderada a elevada
$R_e < 10$	A resistividade não é um parâmetro relevante para a taxa de corrosão

4.3. Medição da intensidade de corrosão das armaduras

A quantificação da taxa de corrosão das armaduras de elementos de betão armado pode ser estimada, por exemplo, através da técnica da resistência de polarização [13], também utilizável em betões

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

muito carbonatados ou com elevado teor de cloretos, permitindo acompanhar, por monitorização, a evolução do estado duma estrutura e avaliar o seu futuro desempenho.

Em linhas gerais, a metodologia consiste na aplicação de uma reduzida corrente elétrica nos varões e na medição da variação do potencial em relação a um elétrodo de referência. Sendo a resistência de polarização (R_p) a relação entre a diferença de potencial e a corrente aplicada, a intensidade de corrosão pode ser obtida com base na fórmula de "Stern and Geary", sendo B uma constante:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p},$$

Dado o equipamento possuir um sensor com um anel de proteção controlado, é possível confinar com precisão a área de medição. Desta forma, a intensidade de corrosão é medida não numa área indefinida mas apenas na área onde se efetua a medição, conduzindo a resultados mais verosímeis.

Com base na experiência, obtiveram-se os valores de referência constantes no Tabela 3 [13].

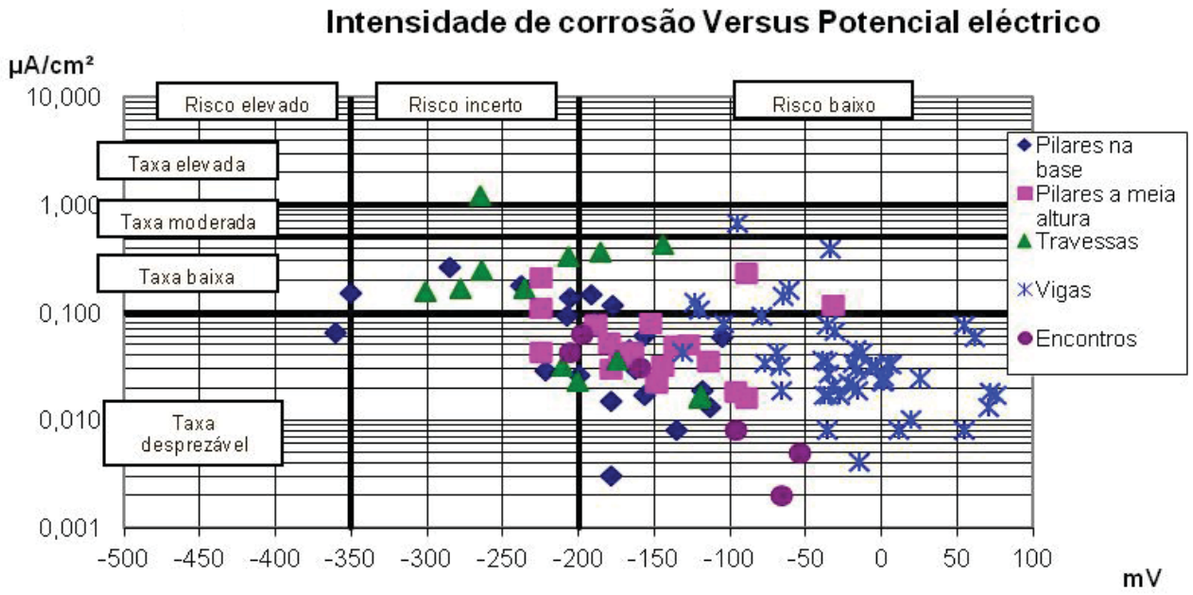
Tabela 3 – Critério para a avaliação do nível de corrosão através da medição da intensidade de corrosão.

Taxa de corrosão (μA/cm²)	Nível de corrosão
$I_{corr} < 0,1 - 0,2$	Desprezável
$0,1 < I_{corr} < 0,5$	Baixo a moderado
$0,5 < I_{corr} < 1$	Moderado a elevado
$I_{corr} > 1$	Elevado

A figura 13 ilustra a aplicação da técnica numa ponte localizada na orla marítima no âmbito do estudo da sua reabilitação estrutural.

Fig. 13 - Medição da intensidade de corrosão das armaduras através da técnica da resistência de polarização.

Fig. 14 - Viaduto com estrutura de betão armado pré-esforçado.



A fig. 15 ilustra a confrontação entre os resultados da intensidade de corrosão e potencial elétrico das armaduras, medidos em diferentes zonas de ensaios da estrutura da ponte. Analisando-a, é possível constatar que a avaliação da importância da corrosão apenas com os resultados da medição do potencial elétrico pode ser sobrevalorizada, resultando, portanto numa avaliação incorreta.

Fig. 15 - Confrontação dos resultados da intensidade de corrosão face aos do potencial elétrico das armaduras.

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

5. LEVANTAMENTO DE ANOMALIAS RELACIONADAS COM A CORROSÃO

Para se avaliar a importância e extensão das zonas visivelmente afetadas pela corrosão das armaduras é fundamental o levantamento de anomalias. Consiste na identificação e classificação das anomalias visíveis, a sua disposição e extensão nos elementos da construção, através de referenciação em desenhos.

Devem ser utilizados dispositivos de inspeção, nomeadamente, a régua de fissuras, fita métrica, paquímetro, escala decimétrica para o registo fotográfico de pormenores e, para deteção de descontinuidades superficiais (por amostragem), um martelo ligeiro.

Os sintomas da corrosão das armaduras, normalmente, a ter em atenção, são, por ordem de ocorrência:

- Fissuras de delaminação, eventualmente com manchas de óxido superficiais, fig. 16;
- Lacunas do betão devidas a delaminação;
- Lacunas do betão, eventualmente, com exposição das armaduras fig. 17 a 19;
- Redução significativa da secção dos varões, fig. 18 e 19.

Fig. 16 - Fissuras de delaminação, coincidentes com os varões.

Fig. 17 - Lacunas do betão, com exposição dos varões, cuja corrosão originou o destacamento dos revestimentos.

Fig. 18 - Lacunas do betão com exposição dos varões afetados por corrosão severa, alguns com perda total da secção (contaminação por cloretos).

Fig. 19 - Pormenor da fig. 18, evidenciando a redução da secção dos varões (segurança estrutural comprometida).

Os sintomas de corrosão presentes em elementos estruturais com armaduras de pré-esforço deverão ser devidamente esclarecidos dado o risco de rotura frágil, com elevada probabilidade de colapso. As figuras 20 e 21 ilustram vigas pré-esforçadas de tabuleiros onde, num caso, são visíveis fissuras de delaminação coincidentes com o traçado dos cabos e, noutro caso, num estágio mais avançado, é visível o cabo de pré-esforço. Perante tal constatação deverá ser equacionada a necessidade de interdição da estrutura até serem implementadas medidas corretivas efetivas.

Fig. 20 - Fissuras de delaminação coincidentes com cabos de pré-esforço.

Fig. 21 - Lacuna extensa do betão com exposição do cabo de pré-esforço (risco de rotura frágil).

VOLTAR AO INÍCIO

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

A representação gráfica das anomalias visíveis das estruturas, figuras 22 e 23, permite avaliar a sua extensão e importância e servir de suporte para definição e localização dos diferentes tipos de soluções de reparação, função das características da estrutura e das anomalias.

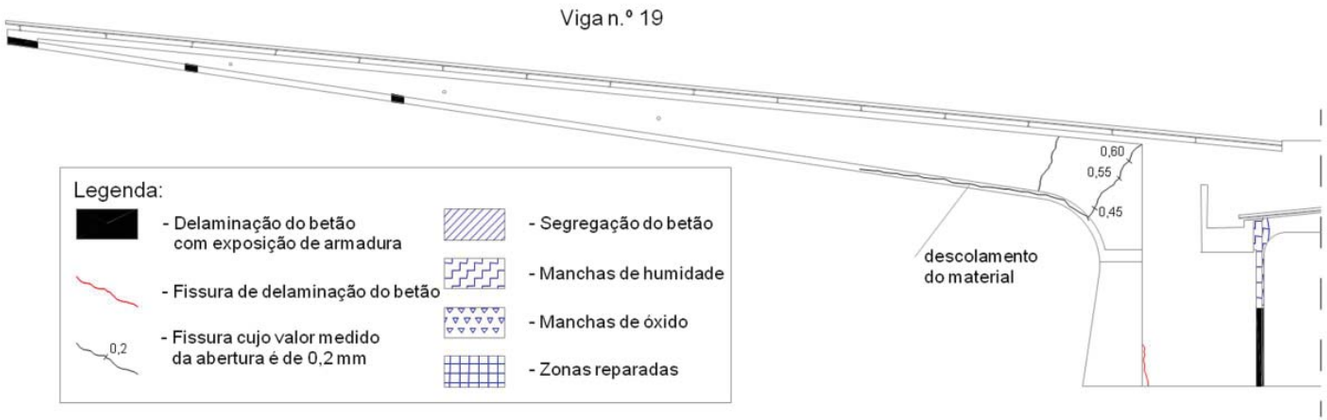


Fig. 22 - Levantamento das anomalias duma asna de betão armado pré-esforçado da cobertura dum estádio.

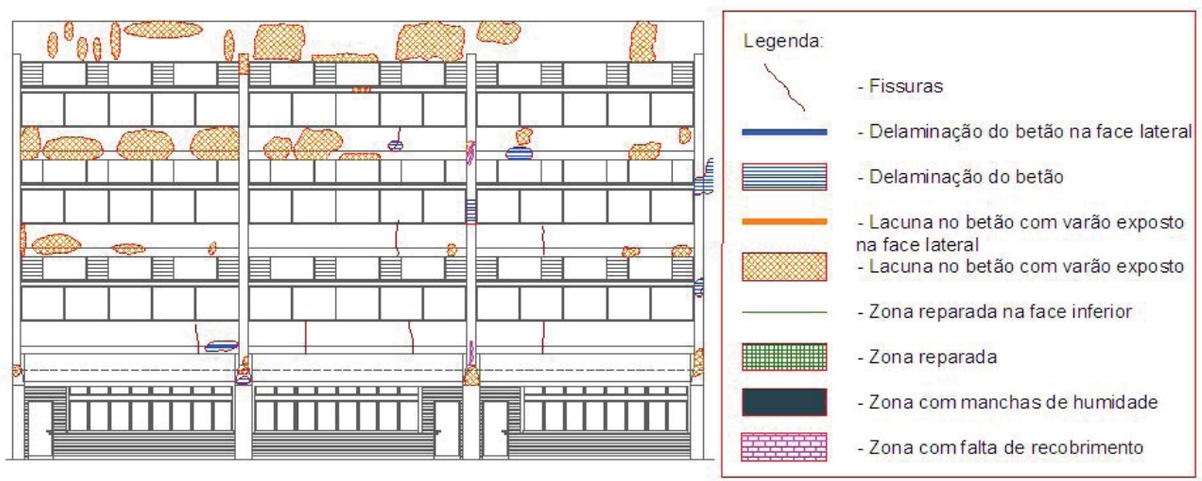


Fig. 23 - Levantamento das anomalias de parte dum alçado dum edifício, com estrutura de betão aparente.

6. QUALIFICAÇÃO DOS AGENTES

Apesar do carácter informativo das partes 9 e 10 da norma EN 1504 [7], a competência dos agentes envolvidos deve ser assegurada de modo que os objetivos da intervenção sejam alcançados da forma mais eficaz e eficiente possível. A via a seguir é o estabelecimento dum Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ), de acordo com a NP EN ISO 9001:2008 [14]. A sua implementação na atividade da inspeção e ensaios coloca algumas questões, que a seguir se destacam.

- Os Planos Anuais de Formação envolvem todos os colaboradores e prevêem ações internas e externas. Concretamente, as internas incidem sobre o SGQ e sobre as Técnicas de Observação e Ensaios, incluindo o período de aprendizagem teórica e prática e, posteriormente, o período de avaliação.
- Todo o SGQ está suportado documentalmente através do Manual da Qualidade, Procedimentos Funcionais e Instruções Detalhadas e é divulgado através da distribuição desta documentação e em ações de formação aos colaboradores.
- O equipamento de inspeção, medição e ensaio foi previamente identificado, técnica a técnica, e foi definida a exatidão necessária para cumprir com as especificações em termos de rigor das leituras obtidas (critério de aceitação).
- O Plano da Qualidade descreve "como", "quando", "onde", "o quê" e "quem", no ciclo do serviço, tem de comprovar a conformidade das diferentes operações com os requisitos aplicáveis.

7. CASO DE ESTUDO

No âmbito do presente artigo, destaca-se um caso de estudo de diagnóstico atípico de corrosão das armaduras, levado a cabo em edifícios escolares.

7.1. Enquadramento

Antes do projeto da intervenção dos edifícios foi feito um diagnóstico preliminar do estado das estruturas que conclui do bom estado aparente das estruturas, não recomendando quaisquer medidas específicas. Durante a obra foi realizado um estudo visando a caracterização estrutural de elementos estruturais principais e, simultaneamente, do estado de corrosão das armaduras.

Posteriormente, com o decorrer da obra, quando foram removidos os materiais de revestimento dos pavimentos, detetaram-se sinais

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

de corrosão severa das armaduras superiores da laje do 1º piso, que causaram alguma estranheza, pelo que foi decido aprofundar-se o diagnóstico com a realização de trabalhos complementares.

7.2. Ensaios

Na primeira fase do estudo foram realizados os ensaios, por amostragem, a seguir listados, que incidiram em paredes e na face inferior de bandas maciças da laje do 1º piso (figuras 24 e 25):

- Deteção de armaduras e medição do seu recobrimento, incluindo a abertura de roços de sondagem para confirmação do diâmetro das armaduras;
- Determinação da profundidade de carbonatação do betão;
- Determinação do teor de cloretos presente na massa do betão;
- Determinação da resistência à compressão do betão através de ensaios de rotura à compressão uniaxial sobre provetes cilíndricos;
- Ensaios com esclerómetro.

Fig. 24 - Zona de ensaios.

As figuras 26 e 27, ilustram parte dos resultados obtidos, mais significativos.

Fig. 25 - Determinação da profundidade de carbonatação. No caso, a frente de carbonatação encontra-se por trás dos varões (despassivação do aço).

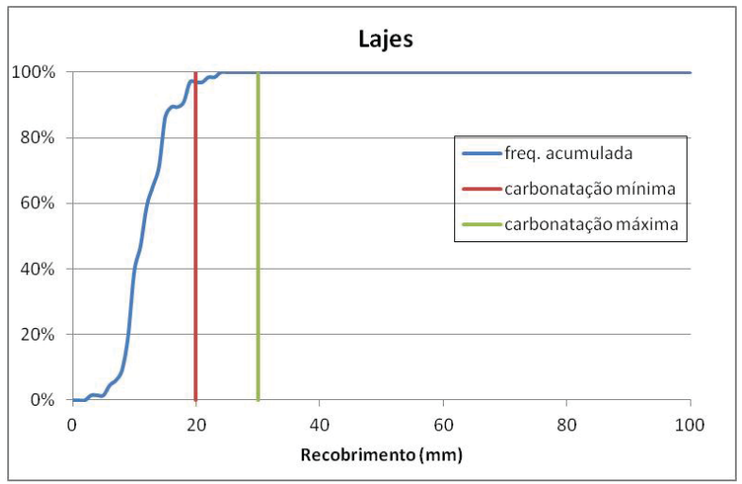


Fig. 26 - Frequência acumulada dos valores de recobrimento medidos com o pacómetro e profundidade de carbonatação do betão.

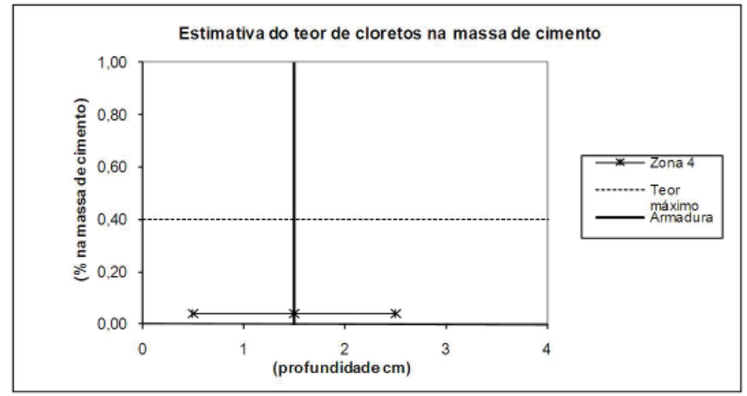


Fig. 27 - Perfil de cloretos do ensaio da face inferior duma banda maciça da laje.

Na segunda fase do estudo para aprofundamento do diagnóstico, foram realizados trabalhos complementares de diagnóstico que consistiram na realização de ensaios de determinação do teor de cloretos na face superior da laje do 1º piso e o levantamento das zonas visivelmente afetadas e outras com delaminação do betão superficial, detetadas através de ensaios de percussão (figuras 28 e 29). A figura 30 ilustra o perfil típico obtido dos ensaios de determinação do teor de cloretos da face superior da laje.

Fig. 28 - Extração de carotes para determinação do teor de cloretos da face superior da laje.

Corros. Prot. Mater., Vol. 31, Nº 2 (2012)
C. Mesquita / 39-48

Fig. 29 - Levantamento das anomalias visíveis da face superior da laje.

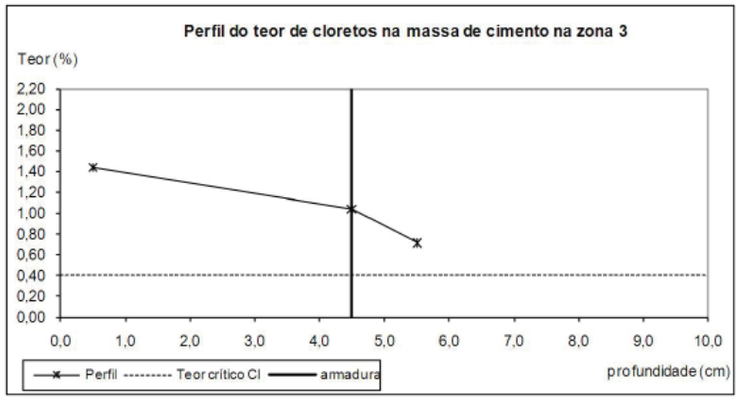


Fig. 30 - Perfil típico de cloretos do betão da face superior da laje, com valores muito superiores ao teor crítico regulamentar.

7.3. Diagnóstico

As conclusões principais do aprofundamento do diagnóstico apontaram, com elevada probabilidade, a contaminação por cloretos dos betões da laje do piso elevado dos edifícios escolares, com origem nos materiais de revestimento da face superior, que foram removidos na obra em curso.

Do levantamento das anomalias da laje do piso elevado, relacionadas com a corrosão das armaduras, concluiu-se também que, em geral, a localização das zonas mais afetadas tinham maior incidência sobre as zonas maciças da laje, nomeadamente, as bandas maciças dos alinhamentos dos pilares e das paredes e do bordo da laje, coincidentes com secções com maior densidade de armaduras da face superior.

A severidade da corrosão das armaduras era tal que a segurança estrutural da laje do 1º piso encontrava-se diminuída.

7.4. Estratégia de intervenção

Face às conclusões atrás e face à intervenção geral em curso nos edifícios da escola, foi recomendado que a durabilidade da reparação da corrosão das armaduras da laje do 1º piso deveria ser a máxima possível. Nesse sentido para além da reparação das zonas visivelmente afetadas deveriam ser eliminados os sais em excesso nos betões da laje através de tratamento eletroquímico de dessalinização ou, em alternativa optar pela introdução de proteção catódica das armaduras.

8. CONCLUSÕES

A deterioração das estruturas de betão armado e pré-esforçado devida a corrosão das armaduras pode e deve ser controlada desde a fase de projeto, na execução, até à fase de exploração. A regulamentação promove esse controlo, embora ao nível da execução e ao nível da exploração das estruturas as práticas estejam ainda pouco implementadas, havendo ainda muito a progredir. Por exemplo, ao nível das competências dos técnicos e das metodologias de inspeção e ensaios não destrutivos "in-situ", do modo como se articulam entre si.

Através de técnicas simples de diagnóstico, integradas num plano de inspeção e ensaios, é possível avaliar os principais parâmetros responsáveis pela corrosão das armaduras, nomeadamente, a espessura de recobrimento das armaduras, a profundidade de carbonatação do betão e o teor de cloretos no betão a várias profundidades. Posteriormente, para uma melhor avaliação da importância, presente e futura, do mecanismo de corrosão, poderão ser adotadas técnicas de diagnóstico mais sofisticadas.

O caso de estudo apresentado ilustra a importância da fiabilidade e da oportunidade do diagnóstico das anomalias de forma a atingirem-se os objetivos da intervenção sem sobrecustos imprevistos.

REFERÊNCIAS

[1] CONREPNET - Thematic network on performance-based remediation of reinforced concrete structures (Concrete repairs: Performance in service and current practice). (Programme: Promoting, competitive and sustainable growth).

[2] NP ENV 13670-1:2007 (Execução de estruturas em betão – Parte 1: Regras Gerais), IPQ, Caparica, Portugal (2007).

[3] O. T. Rincón, A. R. Carruyo, C. Andrade, P. R. L. Helene, y I. Díaz (Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado), Ibero-America, CYTED, Red DURAR, Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura, Abril (1998).

[4] R.E.B.A.P., Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (1983).

[5] EN 1992-1-1:2007 (PT) (Eurocódigo 2, Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios), CEN, Brussels, Belgium (2007).

[6] NP EN 206-1:2007 (Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade), IPQ, Caparica, Portugal (2007).

[7] NP EN 1504:2006 (Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão), IPQ, Caparica, Portugal (2006).

[8] BS 1881-204:1988 (Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters), BSI, UK (1988).

[9] BS EN 14630: 2006 (Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method) (2006).

[10] BS EN 14629: 2007 (Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of chloride content in hardened concrete) (2007).

[11] CEB Bulletin No. 243 (Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion) (1998).

[12] ASTM C876-91 (1999) (Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete), ASTM, Philadelphia, USA (1999).

[13] C. Andrade and C. Alonso, *Construction and Building Materials*, 10, 315 (1996).

[14] NP EN ISO 9001:2008 (Sistemas de Gestão da Qualidade. Requisitos), IPQ, Caparica, Portugal (2008).