

16_20

TÉCNICAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE ESTRUTURAS METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO E ENSAIOS PARA DIAGNÓSTICO DA CORROSÃO DE ARMADURAS DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

Carlos Mesquita

Eng.º Civil

Diretor Técnico, Oz – Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda.
cgmesquita@oz-diagnostico.pt

A corrosão das armaduras, principal causa de deterioração das estruturas de betão armado e pré-esforçado, acarreta custos diretos e indiretos muito elevados. Segundo a CONRENET [1], metade do orçamento anual da Europa é gasto na reabilitação e reparação das estruturas existentes, pelo que interessa avaliar, também, o desempenho das intervenções. O estudo efetuado [1] concluiu que os desempenhos das reparações analisadas são decepcionantes: 20% falharam em 5 anos; 55% falharam em 10 anos; e 90% falharam em 25 anos. O controlo dos mecanismos de deterioração das estruturas é, pois, essencial para a satisfação das exigências de durabilidade, de segurança e de funcionalidade, desde logo da fase da conceção [2].

Na fase de projeto deverá ser elaborado o programa de manutenção/conservação da construção, onde devem constar a periodicidade das inspeções, quer as de rotina, quer as principais, os tipos e as quantidades dos ensaios a realizar, as medidas corretivas e preventivas 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, simples, ou mais sofisticadas, que permitem avaliar o estado de conservação das estruturas de betão armado afetadas por corrosão das armaduras, focando-se, também, a importância da qualificação dos agentes envolvidos.

FATORES QUE CONDICIONAM A CORROSÃO DAS ARMADURAS

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 presentes no betão [3].

Recobrimento das armaduras

A proteção das armaduras, conferida, pri-

maria mente, pelo betão de recobrimento, depende diretamente de 2 fatores, a espessura e a qualidade do betão, ambos definidos regulamentarmente [4], [5], [6], função do tipo de elemento estrutural e do tipo de exposição.

Carbonatação do betão

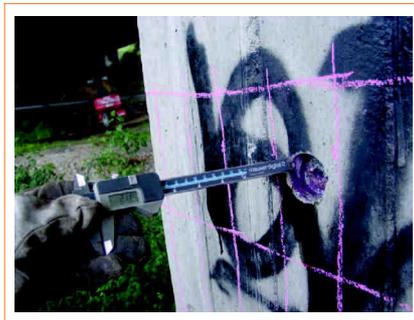
A carbonatação, reação natural do betão, é outro dos agentes principais responsáveis pela despassivação do aço (início da propagação da corrosão), [3]. A carbonatação, que vai progredindo da superfície para o interior da secção, provoca a diminuição do pH do betão para cerca de 8,5, valor para o qual o filme de passivação do aço deixa de ser termodinamicamente estável.

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

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



> 1



> 2



> 3

em que:

x – profundidade de carbonatação (mm);
k – constante (dependente da humidade e permeabilidade do betão)
t – idade do betão (anos).

Teor de cloretos no betão

Outro agente, principal, catalisador da corrosão das armaduras, inclusive com maior severidade, é o elevado teor de cloretos no betão ao nível dos varões. A sua presença surge por incorporação no fabrico do cimento, normalmente controlada, ou, externamente, por contaminação do betão, geralmente associada a ambientes marítimos [3].

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

A regulamentação nacional [6] define limites do teor de cloretos no betão em estruturas novas, 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.

Outros fatores

Referem-se outros fatores, que condicionam a corrosão das armaduras e os seus efeitos

nas estruturas, que interligam com os atrás indicados, como por exemplo a natureza e a classe de resistência do aço, o diâmetro dos varões, qualidade do projeto e da execução da estrutura e ausência ou inadequada manutenção/conservação.

AVALIAÇÃO SUMÁRIA DA CORROSÃO DAS ARMADURAS

A parte 9 da NP EN 1504 [7] é esclarecedora quanto à necessidade do diagnóstico das anomalias presentes nas estruturas existentes 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 numa dada estrutura pode ser avaliada através da confrontação de apenas 3 parâmetros, os atrás referidos: a espessura de recobrimento das armaduras (medida com o pacómetro

[Figura 1] [8], a profundidade da frente de carbonatação do betão (determinada com uma solução alcoólica de fenolftaleína [Figura 2] [9] e o teor de cloretos no betão a várias profundidades (recolha de amostras de pó [Figura 3] [10].

Medição do recobrimento das armaduras com o pacómetro

Para a análise mais completa 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 Figura 4, dum ensaio numa viga.

Recobrimento das armaduras versus profundidade de carbonatação

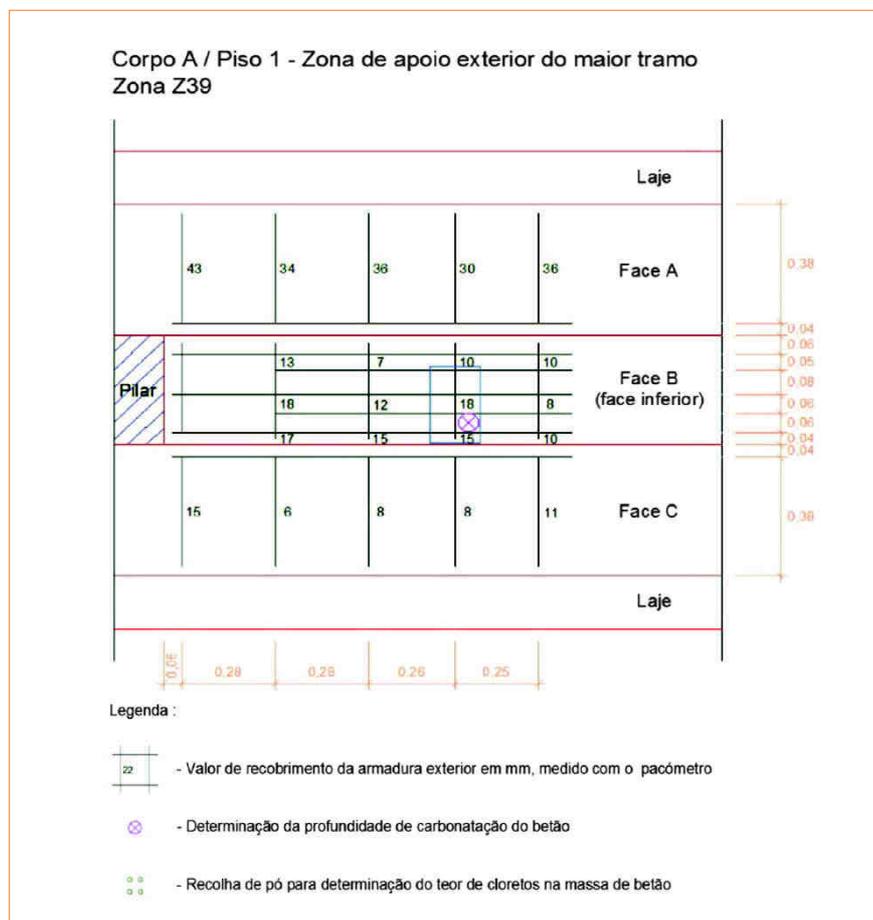
A Figura 5 ilustra a confrontação gráfica dos resultados da medição do recobrimento das armaduras com a profundidade de carbonatação do betão, da zona de ensaios da viga, ilustrada na Figura 4 [11]. Através do gráfico, é possível constatar, por exemplo, que cerca de 80% dos valores medidos do recobrimento das armaduras são inferiores ao valor mínimo regulamentar (*c min.*) assumido no projeto, refletindo inadequada proteção.

Outro dado importante, que se pode inferir

> Figura 1: Detecção e medição do recobrimento das armaduras com o pacómetro.

> Figura 2: Medição da profundidade de carbonatação do betão após a aspersão da solução alcoólica de fenolftaleína.

> Figura 3: Recolha de amostras de pó do betão a diferentes profundidades para determinação do perfil de cloretos.



> 4



> 5

a partir dos resultados da medição 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 relativo à carbonatação do betão. O gráfico da Figura 6 ilustra a curva de progressão de carbonatação do betão da zona de ensaio numa viga, ilustrada na Figura 5. Importa referir que, sendo o recobrimento e a profundidade de carbonatação parâmetros que apresentam uma certa variabilidade, a avaliação em causa deve ter um carácter probabilístico.

Recobrimento das armaduras versus cloretos no betão

A despassivação do aço das armaduras devido à presença de cloretos em excesso no betão [3] [11] pode, também, ser aferida através da determinação do seu teor a diferentes profundidades, conforme referido no ponto relativo ao teor de cloretos no betão. Feita periodicamente permite, também, prever quando ocorrerá a despassivação, bem como validar eventuais modelos de previsão, adotados no projeto.

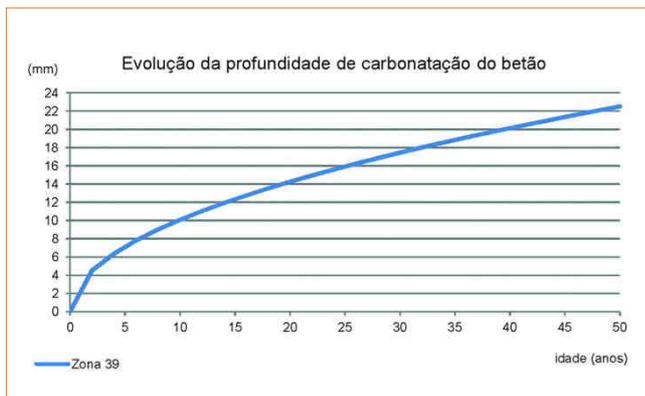
A Figura 7 ilustra o perfil típico dum betão corrente de estrutura marítima contaminado por cloretos, traduzido pela diminuição dos teores da superfície para o interior da secção.

AValiação do risco de corrosão das armaduras

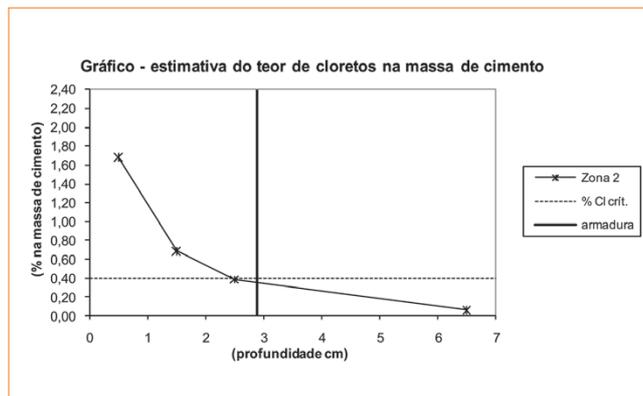
Para o aprofundamento do diagnóstico da corrosão das armaduras é habitual o recurso a ensaios complementares, nomeadamente a medição do potencial eléctrico das armaduras conforme ASTM C876 [12], da resistividade eléctrica do betão e da intensidade de corrosão, por exemplo através da técnica da resistência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

> Figura 4: Representação esquemática da disposição das malhas de armaduras das faces de uma viga, detetadas com o pacómetro, com indicação dos valores de recobrimento e localização de outros ensaios.

> Figura 5: Representação gráfica da frequência acumulada dos valores de recobrimento, medidos com o pacómetro, da profundidade de carbonatação do betão e do recobrimento mínimo das armaduras.



> 6



> 7

Medição do potencial elétrico das armaduras

A medição de potenciais elétricos permite avaliar o risco 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.

Dada a simplicidade e rapidez das medições, podem ser efetuados mapeamentos do potencial elétrico das armaduras, permitindo localizar e quantificar as áreas com risco de corrosão ativa, conforme critério do quadro I [12].

> **Quadro 1:** Critério para avaliação do risco de corrosão ativa das armaduras função dos potenciais elétricos (eléctrodo de cobre/sulfato de cobre [CSE]).

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

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], permitindo acompanhar a evolução do estado da estrutura e avaliar o seu futuro desempenho, conforme critério do quadro II [13].

> **Quadro 1:** Critério para a avaliação do nível de corrosão através da medição da intensidade de corrosão.

Taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	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

LEVANTAMENTO DE ANOMALIAS RELACIONADAS COM A CORROSÃO

O levantamento de anomalias permite avaliar a importância das zonas visivelmente afetadas pela corrosão das armaduras. Consiste na identificação e classificação das anomalias visíveis, a sua disposição e extensão nos

elementos da construção, através de referência 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 (Figura 8).

Os sintomas de corrosão presentes em elementos estruturais com armaduras de pré-esforço deverão ser bem diagnosticados dado o risco de rotura frágil, com elevada probabilidade de colapso da estrutura.

A representação gráfica das anomalias visíveis das estruturas (Figura 9) 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.

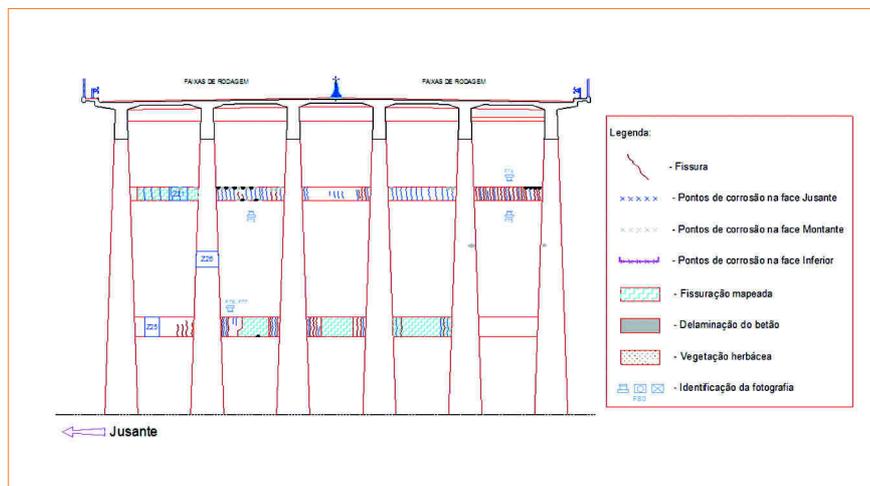


> 8

> **Figura 6:** Representação gráfica da evolução da profundidade de carbonatação do betão.

> **Figura 7:** Perfil de cloretos típico no betão de uma estrutura em ambiente marítimo, contaminado por cloretos.

> **Figura 8:** Lacunas do betão com exposição dos varões afetados por corrosão severa, alguns com perda total da secção (contaminação por cloretos).



> 9

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 preveem ações internas e externas, nomeadamente sobre as Técnicas de Observação e Ensaios.
- Todo o SGQ está suportado documentalmente através do Manual da Qualidade, Procedimentos Funcionais e Instruções Detalhadas.
- O equipamento de inspeção, medição e ensaio é previamente identificado, técnica a técnica, e é 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, comprovando a conformidade das diferentes operações com os requisitos aplicáveis.

CONCLUSÕES

A deterioração das estruturas de betão armado e pré-esforçado devido à 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.

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. ■

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CONREPNET - Thematic network on performance-based remediation of reinforced concrete structures. [Concrete repairs: Performance in service and current practice].
- [2] NP ENV 13670-1:2007 (Execução de estruturas em betão – Parte 1: Regras Gerais) [2007].
- [3] O. T. Rincón, A. R. Carruyo, C. Andrade, P. R. L. Helene, 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] Eurocódigo 2, Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios [2007].
- [6] NP EN 206-1:2007 (Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade) [2007].
- [7] NP EN 1504:2006 (Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão) [2006].
- [8] BS 1881-204:1988 (Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters), August [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 - (Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete), ASTM, [1999].
- [13] C. Andrade, C. Alonso (Corrosion rate monitoring in the laboratory and on site) in Construction and Building Materials, Vol.10, Nº5, p. 315-328 [1996].
- [14] NP EN ISO 9001:2015 (Sistemas de Gestão da Qualidade), ISO, [2015].

> Figura 9: Levantamento das anomalias de parte do alçado dos pilares duma ponte.