

Estratégia de Monitorização da degradação de uma estrutura de betão armado – caso de estudo



Paulo Brito¹



Luiz Rodrigues¹



Paulo Cunha²

RESUMO

Neste trabalho é apresentada a estratégia de monitorização da degradação da estrutura em betão armado de um túnel ferroviário com possibilidade de sofrer efeitos corrosivos combinados de agentes agressivos provenientes do ar, solos e águas circundantes e eventuais correntes vagabundas resultantes do funcionamento da linha ferroviária. Trata-se do túnel do metro à entrada da estação do aeroporto Francisco Sá Carneiro, no Porto, onde foram montados ao longo da estrutura três anéis de sensores que avaliam o estado de corrosividade do betão em relação às armaduras do túnel em zonas sensíveis à presença de correntes vagabundas ou de outros factores aceleradores da corrosão do aço, tais como a poluição do ar e a agressividade dos solos envolventes. Os sensores instalados em rede medem semanalmente quatro grandezas importantes do ponto de vista corrosivo: a temperatura, a resistividade do betão, os potenciais de corrosão da armadura a três níveis de profundidade e a velocidade de corrosão instantânea da armadura por dois métodos diferentes, LPR e corrente de célula livre. As medições são feitas de forma automática e os resultados são enviados via GSM para um computador com o software apropriado que faz o tratamento dos resultados obtidos pelos sensores.

Neste trabalho são apresentados resultados que mostram como este tipo de registo contínuo e sistemático das grandezas referidas pode ajudar a traçar um cadastro mais completo e útil de estruturas desta natureza bem como prever, bastante antecipadamente, problemas de durabilidade e qualidade de estruturas sujeitas a este tipo de situação agressiva.

PALAVRAS-CHAVE

Corrosão betão armado, obras ferroviárias, monitorização, gestão da manutenção.

¹ Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Portalegre, Instituto Politécnico de Portalegre, Lugar da Abadessa, Apartado 148, 7301-901 Portalegre, Portugal, pbrito@estgp.pt

² Icorr, Investigação e Consultoria em Corrosão, Lda., icorr@icorr.pt

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de betão armado inseridas em troços ferroviários sofrem, adicionalmente aos efeitos sentidos por estruturas similares implantadas em ambientes de agressividade corrosiva equivalente, problemas acrescidos de degradação em função das vibrações a que estão sujeitas aquando da passagem das composições ferroviárias. Mesmo com o uso de mecanismos para atenuação dos efeitos das vibrações estas são suficientes para causar micro-fissurações nos elementos de betão armado que, por sua vez, contribuem para um ingresso mais facilitado de agentes cuja natureza depende do tipo de ambiente em que a estrutura está inserida, como sejam, cloretos, em ambientes marítimos, dióxido de carbono em ambientes urbanos ou microclimas causados por actividade biótica em determinadas zonas da estrutura e sulfatos em ambientes predominantemente industriais.

As consequências de um acesso facilitado de agentes como cloretos, dióxido de carbono e sulfatos à superfície das armaduras são sobejamente conhecidas[1-2], mas nunca é demais salientar os custos de manutenção e riscos de segurança que podem estar associados à degradação de estruturas relacionadas com o tráfego de pessoas e bens, como são as infra-estruturas ferroviárias, tais como pontes, túneis, passadiços, etc. Segundo os proprietários de infra-estruturas de caminhos de ferro, a corrosão das armaduras é a principal causa da degradação de pontes em betão armado[3] e dos principais factores de risco para a segurança e capacidade de serviço das mesmas [4]. Por outro lado, com o envelhecimento das estruturas a manutenção torna-se numa fracção significativa dos custos totais das obras[5]. Uma gestão anticorrosiva criteriosa de uma rede ferroviária, mesmo que constituída por um número pouco significativo de obras de arte, exigirá por parte do dono de obra ou dos responsáveis da manutenção um conhecimento antecipado e o acompanhamento progressivo dos problemas de corrosão que podem acontecer das estruturas principais que constituem a rede. As enormes poupanças que podem ser conseguidas com o uso de sistemas de monitorização da corrosão de estruturas de betão armado foi claramente demonstrado no caso de um parque de estacionamento num país que utilize saís para descongelamento da neve[5]. Uma transposição para o caso de estruturas ferroviárias instaladas junto à costa ou em ambientes aquáticos especialmente agressivos produziria, certamente, resultados muito similares.

Para que um tal acompanhamento seja possível é necessária a instalação permanente de sistemas de monitorização da corrosão em tempo real e que tenham, de preferência, mecanismos sensores relacionados, tanto quanto possível, com o próprio mecanismo do fenómeno físico-químico que causa a corrosão. Estas premissas apontam, em primeira instância para sistemas de monitorização de natureza electroquímica uma vez que muitos dos fenómenos de corrosão associados a estruturas de betão armado têm como base fenómenos electroquímicos. O uso de sistemas de monitorização de natureza electroquímica representa uma enorme vantagem não só ao nível do diagnóstico do problema de corrosão e da identificação dos agentes e factores causadores ou aceleradores do fenómeno corrosivo, como também ao nível da selecção e monitorização das medidas correctivas a assumir.

No presente trabalho exemplifica-se o uso de sistemas de monitorização da corrosão de estruturas de betão armado de base electroquímica compreendendo, nomeadamente, a medição de potencial de corrosão da armadura e de sensores de aço similar ao das armaduras, da condutividade electrolítica do betão e da velocidade de corrosão de sondas de aço macio similar ao das armaduras.

Para além disso, o sistema proposto, ao possibilitar a medição dos 3 parâmetros referidos quase em simultâneo, pode permitir a detecção mais facilitada de correntes vagabundas, frequentes em estruturas desta natureza, por simples conjugação dos gráficos de variação temporal dos 3 parâmetros com os mapas de ocupação da via onde o sistema está instalado, num dado período.

2. METODOLOGIA

Com o objectivo de avaliar a durabilidade do betão armado do túnel do metro junto ao aeroporto de Sá Carneiro, no Porto, foram concebidos 3 anéis de monitorização espaçados de 150 m. O túnel tem 600 m de comprimento e foi construído em estacaria e paredes moldadas de betão armado.

Cada anel de monitorização instalado aos quilómetros 0,05; 0,2; e 0,45 é constituído por 5 sistemas de monitorização da corrosão, da marca Monicorr, que permitem a medição em tempo real de 4 parâmetros diferentes que controlam ou estão relacionados com o processo corrosivo do betão armado.

Os sistemas de monitorização instalados fazem a medição dos potenciais de corrosão de sensores de aço macio e da armadura a três níveis diferentes na camada de recobrimento, da resistividade do betão e da velocidade de corrosão instantânea por duas técnicas diferentes: a da resistência à polarização linear (mais conhecida pela sigla *LPR* na literatura anglo-saxónica) e a da corrente da célula galvânica.

A localização e colocação dos sensores antes da betonagem foi discutida com o dono de obra, a Metro do Porto e com o empreiteiro tendo-se monitorizado preferencialmente as zonas teoricamente mais propensas ao desenvolvimento de fenómenos corrosivos. As áreas escolhidas para monitorização foram, nomeadamente, as zonas por baixo dos carris devido à possibilidade do aparecimento de correntes vagabundas, o tecto do túnel devido à possibilidade de indução de correntes na armadura e as paredes laterais e laje principal pela eventualidade do desenvolvimento de fenómenos de corrosão de qualquer espécie originados, por exemplo, por infiltrações de águas, contaminação dos solos por agentes agressivos ou até por fissuração da estrutura por problemas estruturais causados por vibrações aquando da passagem das composições.

O esquema seguinte apresenta a distribuição dos sensores colocados alternadamente na posição A e B por cada anel de monitorização (Figura 1.).

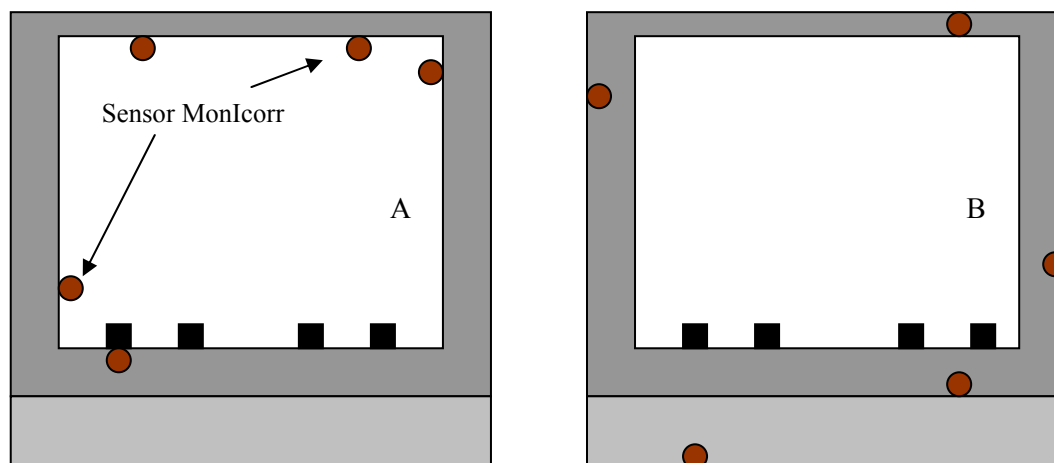


Figura 1. Representação esquemática da distribuição dos sensores em cada um dos tipos de anel de monitorização (A e B).

Os sensores de corrosão Monicorr (Figura 2.) são constituídos por 2 sondas de aço macio igual ao aço da construção colocadas a dois níveis diferentes da camada de recobrimento, por 2 sondas de aço inoxidável 316 L colocadas aos mesmos dois níveis e por uma pseudo referência de grafite. Um troço de varão de aço macio permite o contacto mecânico e eléctrico directo com varão da armadura da obra, possibilitando a monitorização desta. Todo este conjunto encontra-se imobilizado num bloco de resina epoxídica para resistir ao ambiente químico no interior do betão, bem como as condições mecânicas da betonagem. As sondas de aço macio e inoxidável acima da armadura têm áreas de 11,2 cm², cada uma, enquanto que o varão de aço macio que permite o empalme à armadura tem um comprimento de cerca de 10 cm.

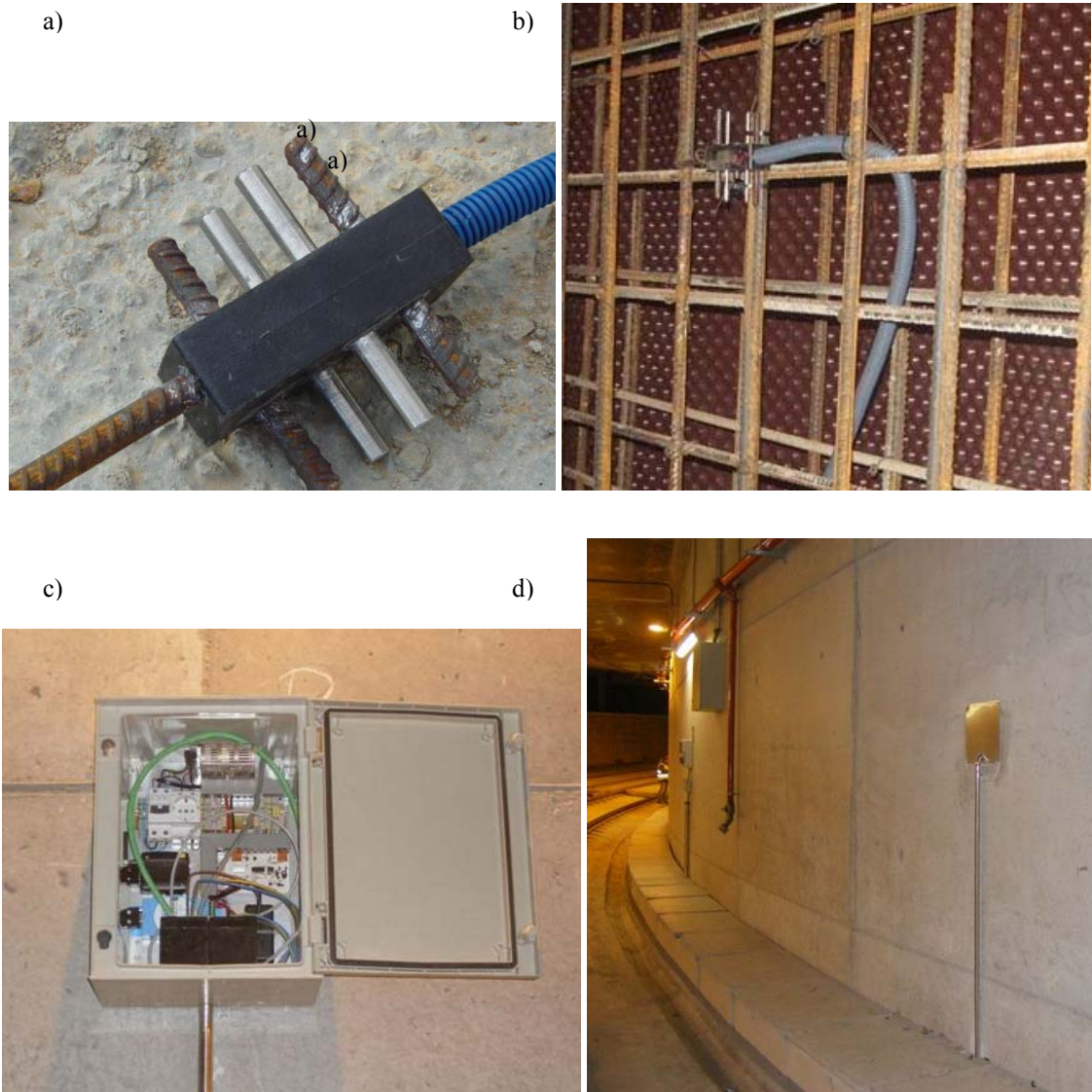


Figura 2. a) Vista parcial dos elementos sensores de aço macio, nas extremidades do bloco de resina epoxídica, e de aço inoxidável, ao centro do bloco, do sistema MonIcorr, podendo-se também ver o troço de varão de ligação à armadura, à esquerda, e o tubo de saída da cablagem para os dispositivos de leitura, à direita. b) Montagem do sistema em obra. c) Sistema de aquisição de sinal. d) Caixa de leitura

A medição da diferença de potencial entre a pseudo referência e cada uma das sondas de aço macio, bem como a armadura, permite medir o potencial de corrosão da própria armadura e a dois níveis diferentes na camada de recobrimento.

Por outro lado, as sondas de aço inoxidável funcionam como um par de eléctrodos inertes para a medição da resistividade do betão utilizando-se para isso uma onda quadrada com 12V, pico a pico, a 108 Hz. O factor de célula (razão entre o comprimento e a superfície) nas sondas de aço inoxidável é de 5,7.

Finalmente, a velocidade de corrosão instantânea é determinada por LPR utilizando a sonda de aço macio como eléctrodo de trabalho e a de aço inoxidável como eléctrodo auxiliar e a pseudo referência. A velocidade de polarização utilizada é de 0,1 mV/s, numa extensão de até ± 10 mV em torno do potencial de corrosão. A velocidade de corrosão foi calculada utilizando para a constante de Tafel com o valor de 59 mV.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições foram feitas semanalmente de forma automática, aos Domingos entre às 4 e às 6 da manhã, desde Dezembro de 2006. Nos gráficos seguintes, o tempo aparece em mês e os valores que aí aparecem representam, por isso, uma média mensal de 4 ou 5 medições conforme o mês a que correspondem e dizem respeito aos valores obtidos entre Abril de 2007 e Fevereiro de 2008.

Apesar de as medições terem sido realizadas em diferentes ao longo da estrutura, nos gráficos que se seguem são apresentados os valores registados para os potenciais de corrosão, resistividade do betão e velocidade de corrosão instantânea das sondas de aço macio pela técnica *LPR* em dois dos pontos de monitorização, apenas como ilustração das capacidades/potencialidades dos presentes sistemas de monitorização.

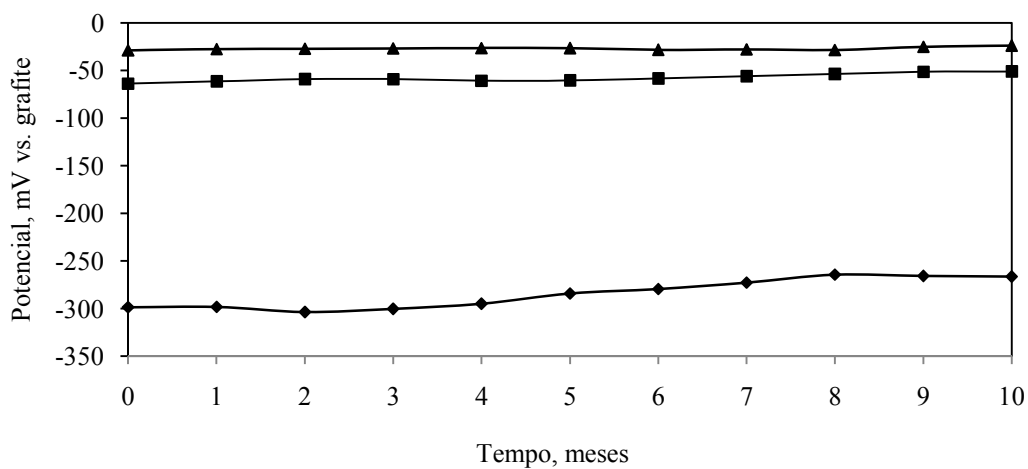


Figura 3. Variação dos potenciais de corrosão registados pelo sistema de monitorização nº 6 ao longo dos 10 meses de monitorização. Potenciais são referidos ao eléctrodo de grafite. ◇- armadura; ▲- sensor de aço macio colocado a 1 cm da superfície externa do betão e ■ - sensor de aço macio colocado a 1 cm da superfície interna do betão.

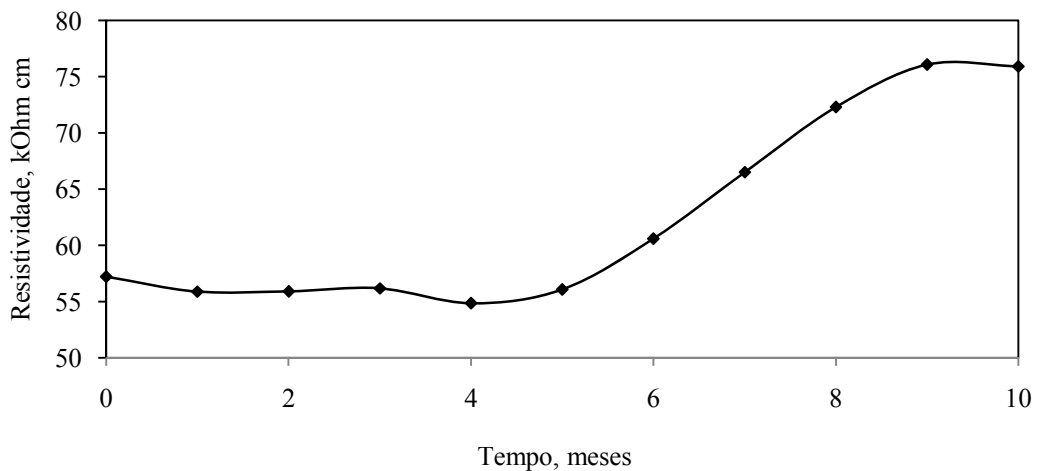


Figura 4. Variação da resistividade do betão a cerca de 2 cm de profundidade da camada de recobrimento registada pelo sistema nº 6 ao longo dos 10 meses de monitorização.

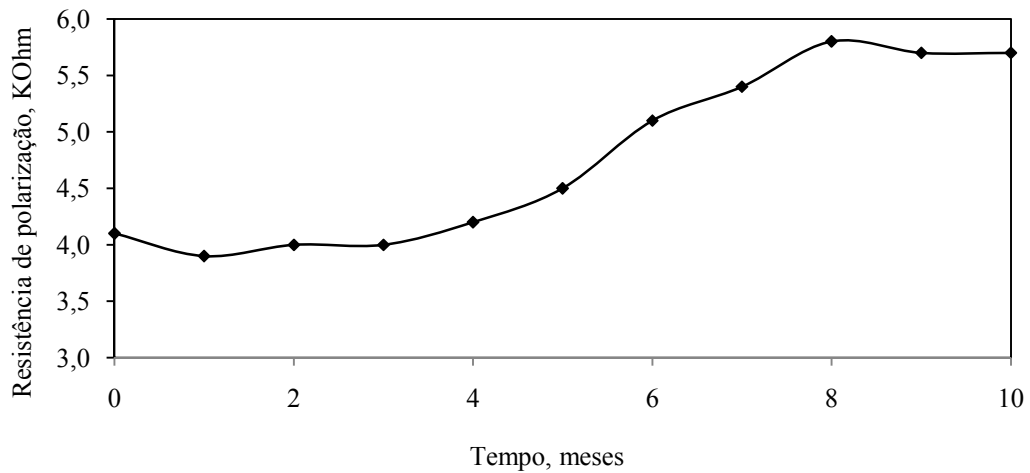


Figura 5. Variação da resistência à polarização linear do sensor de aço macio colocado a 1 cm de profundidade da camada de recobrimento registada pelo sistema nº 6 ao longo dos 10 meses de monitorização.

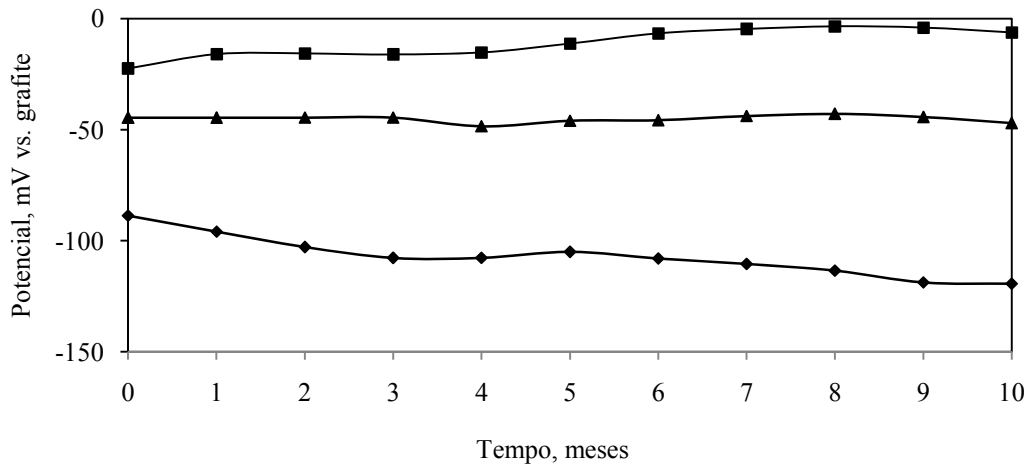


Figura 6. Variação dos potenciais de corrosão registados pelo sistema de monitorização nº 14 ao longo dos 10 meses de monitorização. Potenciais são referidos ao eléctrodo de grafite. ◇- armadura; ▲ – sensor de aço macio colocado a 1 cm da superfície externa do betão e ■ - sensor de aço macio colocado a 1 cm da superfície externa do betão.

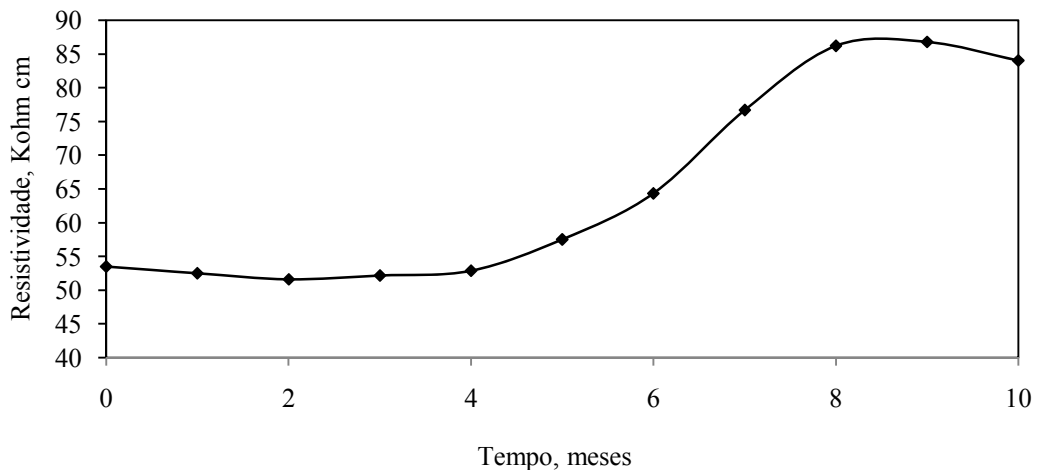


Figura 7. Variação da resistividade do betão a cerca de 2 cm de profundidade da camada de

recobrimento registada pelo sistema nº 14 ao longo dos 10 meses de monitorização.

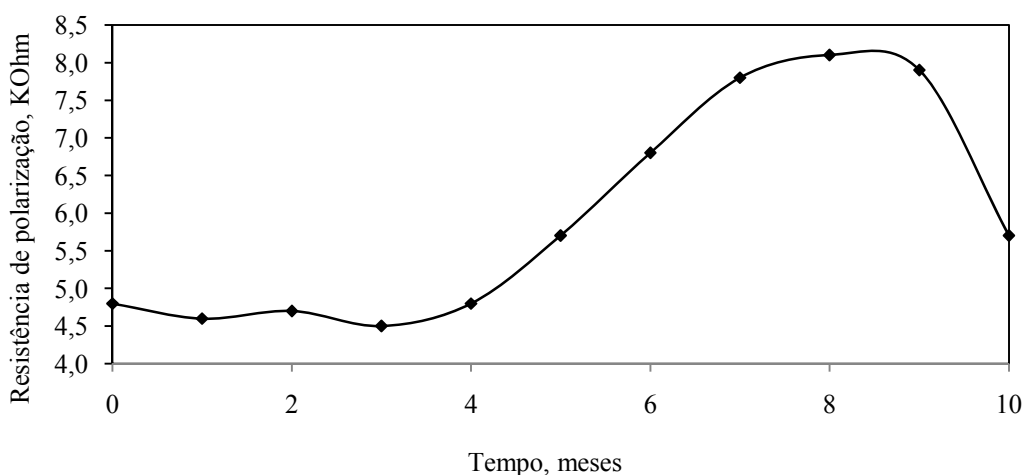


Figura 8. Variação da resistência à polarização linear do sensor de aço macio colocado a 1 cm de profundidade da camada de recobrimento registada pelo sistema nº 14 ao longo dos 10 meses de monitorização.

Os resultados da medição de potenciais de corrosão indicam que as sondas se encontram na sua grande generalidade no intervalo activo-passivo ou até passivo em algumas zonas. Tal significa que o óxido formado sobre a superfície dos varões tem na grande maioria dos casos características protectoras do aço. A variação do potencial com a profundidade parece estar relacionado com polarização/despolarização relacionada com maior ou menor abundância de oxigénio a diferentes profundidades.

Relativamente aos valores da resistividade do betão medidos ao longo destes 10 meses salienta-se o perfil de comportamento praticamente semelhante em todos os sensores e os valores bastante acima dos 20 k Ω ·cm que é geralmente aceite como a fronteira inferior para um betão menos resistivo e por isso permissivo ao desenvolvimento de fenómenos corrosivos. Salienta-se, em todas as situações, que a resistividade aumenta de forma quase abrupta de um patamar inferior para um outro 10 – 40 k Ω ·cm acima.

A variação da resistividade do betão parece concordar de forma muito próxima com a variação da resistência à polarização linear da sonda de aço macio colocada a 1 cm de profundidade da camada de recobrimento. Esta concordância parece fazer todo o sentido, uma vez que o aumento da resistividade a partir do 5-6 mês de ensaio deverá ter como consequência uma redução da velocidade de corrosão (inversamente proporcional à resistência à polarização linear) do sensor de aço macio. O aumento da resistividade do betão poderá ficar a dever-se a perda de humidade e/ou colmatção de porosidades ao longo do tempo.

Embora, no presente trabalho, não se tenha estudado de forma sistemática as influências da temperatura e da humidade na variação dos 3 parâmetros medidos, é de prever que amplitude de variação de ambos os factores seja relativamente estreita para afectar significativamente os valores lidos, uma vez que o próprio túnel e a camada de betão onde os sensores estão instalados poderão ter um efeito tamponizante em relação a variações de temperatura e humidade no interior do betão.

4. CONCLUSÕES

A corrosão das armaduras é causa principal da degradação de estruturas de betão armado. No caso de obras de arte de redes ferroviárias o risco de corrosão é acrescido pelo facto de a passagem das

próprias composições causar microfissurações que facilitam o ingresso de agentes agressivos ao interior do betão. As consequências da interacção química desses agentes com o ferro das armaduras são sobejamente conhecidas: corrosão, tensões internas acrescidas, aumento da fissuração e aceleração do próprio processo corrosivo.

Do ponto de vista dos donos de obras a corrosão é uma questão difícil de tratar por falta de instrumentos objectivos que os informe, a cada momento, sobre o estado de corrosão das estruturas, permitindo antecipar ou preparar as intervenções com redução de riscos e custos. Existe pois a necessidade de instrumentos adequados que permitam avaliar os riscos de corrosão, a progressão da degradação corrosiva e as consequências da resposta estrutural. Só uma monitorização, em tempo real, baseada em sensores embebidos permanentemente na estrutura e associados a sistemas informáticos de aquisição, processamento e transmissão de dados poderá permitir uma gestão racional da corrosão de estruturas de betão armado.

No presente trabalho foi ilustrada a aplicação de um sistema de monitorização da corrosão de estruturas de betão armado a túnel de um troço da rede do metro do Porto. O sistema baseado em sensores electroquímicos permite determinar a corrosividade do betão em cada momento da vida da estrutura e a própria velocidade de corrosão de sensores colocados a diferentes profundidades da camada de revestimento.

5. REFERÊNCIAS

- [1] G.S.D. Brito, L. Rodrigues e P. Cunha, “Apresentação de um Sistema de Monitorização da Degradação de Estruturas de Betão Armado”, *Ingenium* 98 (2007).
- [2] G. Horrigmoe, I. Sæther, Bjørnar Sand, “Corrosion and Bond in RC - Railway Bridge Structures”, *Sustainable Bridges, Workshop I on Inspection and Condition Assessment of Railway Bridges*, BAM, Berlin, October 23 – 24 (2006).
- [3] M. Plos, K. Lundgren, K. Gylltoft, WP4 Workshop on Structural assessment of concrete railway bridges, May 2007, Berlin.
- [4] J.B. Menzies, *Structural Assessment of Railway Bridges*”, [Consultada em 30/07/2007] Available on the WWW:<URL: www.rail-reg.gov.uk/upload/pdf/railwaybridge.pdf>.
- [5] R. Polder, W. Peelen, O. Klinghoffer, J. Eri, J. Leggedoor, “Use of advanced corrosion monitoring for risk based management of concrete structures”, *Heron*, **52**, Vol. 4, 239 (2007).