

Desempenho do kit-sensor de corrosão na monitorização da durabilidade de estruturas de betão



Helena Figueiras¹



**Joana Sousa
Coutinho²**



Carmen Andrade³



Carlos Félix⁴

RESUMO

Até agora o conceito geralmente associado à manutenção das estruturas consistia em inspecções periódicas, mas novos métodos e técnicas para monitorizar estruturas têm emergido podendo já ser usados com elevado grau de automação. A utilização de sensores de embeber no betão para monitorizar a durabilidade das estruturas começa a difundir-se, contudo rodeada de grandes incertezas no que concerne à interpretação dos seus resultados e à eficácia da sua utilização.

Este trabalho pretende ser um contributo para a interpretação e análise de dados recolhidos dos sensores de durabilidade, em particular dos sensores de corrente galvânica e potencial de corrosão. Apresenta-se um dispositivo designado por kit-sensor de corrosão que integra um sensor de corrente galvânica, um eléctrodo de referência e um sensor de temperatura. A sua instalação em estruturas de betão armado permite monitorizar a profundidade de penetração dos agentes agressivos e prever o início da corrosão das armaduras. Contudo a interpretação dos seus resultados carece de ser analisada e interpretada de forma cuidada e à luz das informações disponíveis sobre as condições ambientais envolventes (temperatura, humidade, carbonatação). Durante o trabalho é abordado o princípio de funcionamento destes sensores, a metodologia de análise dos resultados e a influência, numa fase inicial de serviço, de parâmetros como a temperatura e a humidade nesses resultados. Posteriormente é apresentado a implementação deste dispositivo no sistema de monitorização da durabilidade da Ponte da Lezíria, aportando-se alguns dos resultados obtidos durante o processo construtivo e a fase de exploração.

PALAVRAS-CHAVE

durabilidade, kit-sensor de corrosão, corrente galvânica, potencial de corrosão, condições ambientais.

¹ LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. hfig@fe.up.pt

² LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465, Portugal. jcouti@fe.up.pt

³ Instituto de Ciências de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, Espanha. andrade@ietcc.csic.es

⁴ LABEST, Instituto Superior de Engenharia Porto, 4200-072 Porto, Portugal. cfelix@fe.up.pt

1. INTRODUÇÃO

Depois de décadas em que o objectivo prioritário no que se refere às estruturas de betão, consistia em melhorar a resistência do material, verifica-se actualmente que as questões relacionadas com a durabilidade são as que carecem de mais urgente resolução. Uma acção mais interventiva na prevenção e manutenção da durabilidade deste material torna-se fulcral para que sejam atingidos tempos de serviço mais longos e com baixos custos de manutenção. A implementação de sistemas de monitorização dos parâmetros de durabilidade constitui uma valiosa ferramenta, possibilitando no caso de novas estruturas, apoiar e sustentar a decisão e a programação de eventuais campanhas de inspecção e intervenção e, no caso de estruturas sujeitas a reparações, avaliar a eficácia dessas mesmas reparações. Dentro deste contexto têm vindo a ser desenvolvidos sistemas de monitorização, baseados em sensores de embeber no betão e em sistemas de aquisição automática, que possibilitam a medição contínua de parâmetros específicos que aferem a durabilidade da estrutura. Os sensores desenvolvidos destinam-se fundamentalmente à avaliação da corrosão das armaduras através de medidas de potencial e velocidade de corrosão e à monitorização do estado da qualidade do betão de recobrimento usando medidas como a resistividade, teor em cloretos ou pH. Nos sistemas de monitorização da durabilidade é particularmente adequado incluir sensores para medição dos parâmetros ambientais (temperatura, humidade) dada a influência destes parâmetros nos processos de deterioração do betão e corrosão das armaduras.

A monitorização da durabilidade de estruturas por aplicação de sensores de embeber no betão tem sido contudo relativamente escassa, havendo ainda um longo caminho a percorrer no que diz respeito à verificação da fiabilidade dos seus resultados, à interpretação dos dados e à correcta e atempada tomada de decisão em termos de intervenções de reabilitação. Este trabalho pretende abordar o princípio de funcionamento e as metodologias de análise e interpretação de resultados do designado *kit-sensor de corrosão*. O kit-sensor de corrosão é um dispositivo que integra um sensor de corrente galvânica (sensor 1), um sensor eléctrodo de referência (sensor 2) e um sensor de temperatura (sensor 3), ver Fig.1. A sua instalação na estrutura fornece medidas de intensidade de corrente galvânica, potencial de corrosão e temperatura, que permitem monitorizar a entrada dos agentes agressivos no betão de recobrimento, prever o período de iniciação da corrosão e avaliar o estado de corrosão da armadura mais próxima da superfície. A interrogação, aquisição e transferência do sinal do kit-sensor de corrosão é realizada de forma contínua e automática, através de dataloggers ligados a um equipamento desenvolvido especialmente para a leitura destes sensores.

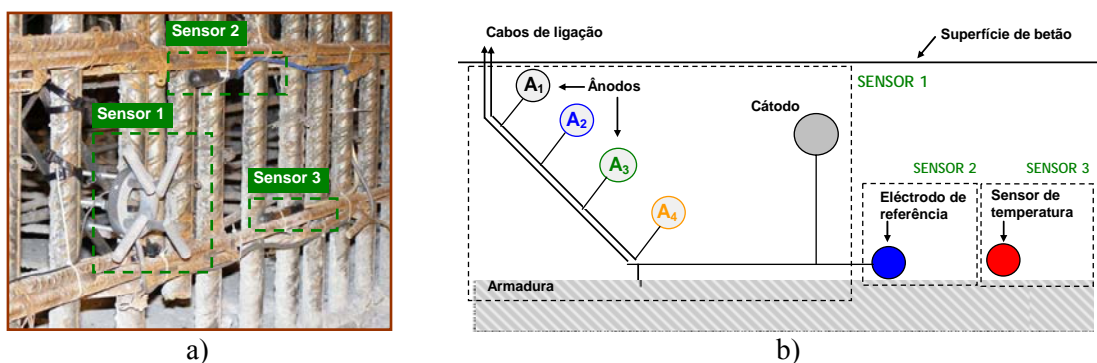


Figura 1. Kit-sensor de corrosão: a) Instalação em obra; b) Representação esquemática

2. KIT-SENSOR DE CORROSÃO

2.1 Sensor de corrente galvânica

O princípio de funcionamento de um sensor de corrente galvânica baseia-se na medição da intensidade de corrente de uma macrocélula formada por dois metais com potenciais eléctricos diferentes, colocados em contacto através de um electrólito, por exemplo o betão (ver Fig. 2a). A corrente

eléctrica que flui entre o metal menos nobre, denominado por ânodo, e o metal que recebe os electrões, cátodo, constitui uma medida indicativa da velocidade do processo de corrosão.

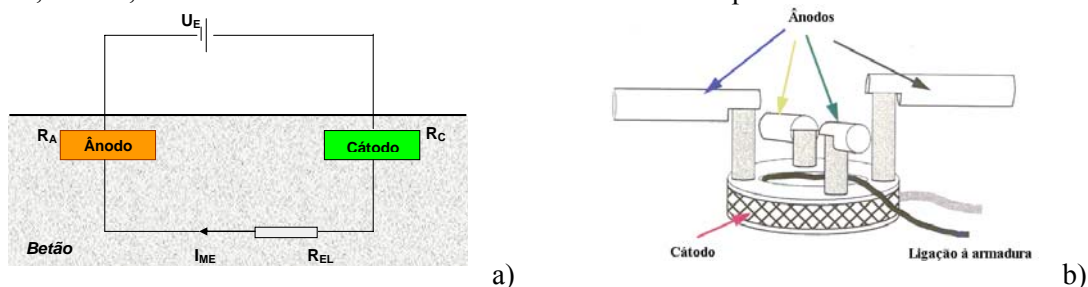


Figura 2. a) Modelo do circuito eléctrico formado durante a corrosão de uma macrocélula, onde o meio electrolítico é o betão, b) Representação esquemática do sensor de corrente galvânica [1]

Assim, baseado no modelo simplificado do circuito eléctrico formado durante a corrosão de uma macrocélula, a corrente eléctrica total (*corrente galvânica*) formada entre o ânodo e o cátodo é dada pela diferença de potencial ($U_E = U_C - U_A$) dividida pelo somatório da resistência do electrólito (R_{EL}), resistência de polarização anódica (R_A) e resistência de polarização catódica (R_C) (ver Eq. 1) [2] [3] [4]:

$$I_{ME} = \frac{U_C - U_A}{R_{EL} + R_A + R_C} = \frac{U_C - U_A}{k\rho + R_A + R_C} \quad (1)$$

Atendendo à equação anterior verifica-se que a corrente galvânica formada durante a corrosão de uma macrocélula depende não só dos processos anódico e catódico ($U_C - U_A$) mas também da resistência anódica (R_A), resistência catódica (R_C) e da resistência do electrólito (R_{EL}). Significa por isso, que a intensidade de corrente que flui entre o ânodo e o cátodo, colocados em contacto através do meio electrolítico betão, pode apresentar valores bastante baixos no caso do metal que funciona como ânodo se encontre ainda passivado ($R_A \rightarrow \infty$), no caso do teor de oxigénio do electrólito ser muito baixo ($R_C \rightarrow \infty$) ou no caso do betão se encontrar bastante seco ($\rho \rightarrow \infty$) [4]. A resistividade do betão é, na verdade, influenciada não só pela humidade mas também pela porosidade (razão w/c, grau de hidratação) e temperatura. A influência da temperatura na resistência do electrólito e portanto, na intensidade da corrente galvânica, pode ser quantificada utilizando a seguinte equação:

$$I = \frac{I_0}{e^{a\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}} \quad (2)$$

Onde I é a intensidade de corrente à temperatura T (A), I_0 a intensidade de corrente à temperatura T_0 (A), T e T_0 a temperatura (K) e a uma constante que depende do grau de saturação do betão (K).

Pergunta

Conhecendo a corrente que flui entre o ânodo e o cátodo e recorrendo à *lei de Faraday* é possível determinar a velocidade de corrosão, isto é, a quantidade de metal que se corrói por unidade de área durante um certo intervalo de tempo. Contudo, a determinação da velocidade de corrosão da armadura a partir da medição da corrente galvânica ainda não é consensual na comunidade científica. Uma das correntes de investigação defende que o facto dos sensores de corrente galvânica possuírem uma razão A_C/A_A (área do cátodo/área do ânodo) relativamente pequena não permite validar a proporcionalidade entre a intensidade de corrente medida na macrocélula e a velocidade de corrosão [5]. Na realidade a corrente galvânica medida numa macrocélula representa apenas parte da corrente de corrosão, pelo que a determinação da velocidade de corrosão a partir da corrente galvânica não é exacta [2] [3].

O princípio da medição da intensidade de corrente galvânica gerada por uma macrocélula tem vindo a ser empregue no desenvolvimento de sensores para monitorizar a profundidade de betão contaminado com agentes agressivos. Estes sensores são fundamentalmente constituídos por pequenos troços de metal que actuarão como ânodos e um troço de um metal mais nobre que actuará como cátodo, ver Fig. 1b. A medição da corrente galvânica criada entre os ânodos, instalados a diferentes profundidades da camada de recobrimento, e o cátodo permite conhecer o instante em que ocorre a despassivação do metal que funciona como ânodo por contaminação do betão. A monitorização permanente da corrente galvânica nos sucessivos ânodos permite assim, conhecer em qualquer instante a profundidade de

penetração dos agentes agressivos e, utilizando modelos de previsão da vida útil, estimar o período de iniciação da corrosão nas armaduras da estrutura [6]. O sensor de corrente galvânica utilizado no kit-sensor de corrosão é constituído por quatro ânodos de aço de carbono, montados a diferentes alturas num suporte circular, um cátodo de titânio activado, posicionado ao longo do perímetro do suporte, e um cabo que permitirá realizar uma ligação à armadura da estrutura para que esta funcione como último ânodo do sensor, ver Fig. 2b. Assim sendo, este sensor quando instalado de forma isolada numa estrutura admite a realização de 5 medições de intensidade de corrente galvânica, ver Fig. 1b.

2.2. Eléctrodo de referência

A corrosão de um metal num meio electrolítico, como é o caso da corrosão da armadura embebida no betão, é um processo electroquímico que envolve ganho e perda de electrões (reacções químicas) e movimento de cargas por um condutor (corrente eléctrica) [7]. De modo simplificado poderá dividir-se a corrosão em dois processos, por um lado a oxidação do ferro (processo anódico) e por outro lado, a redução do oxigénio (processo catódico). Junto da zona mais activa da armadura (ânodo) verifica-se a dissolução do ferro, isto é, a formação de iões Fe^{2+} , com a libertação de electrões. Estes electrões movem-se pela armadura até ao cátodo onde se combinam com o oxigénio e a água aí presentes, formando iões hidroxilo (OH^-). Por sua vez os iões OH^- deslocam-se através do electrolito, neste caso o betão, até ao ânodo, reagindo com o ião ferro. O potencial de corrosão constitui uma medida indicativa da probabilidade de corrosão, permitindo avaliar se a armadura se encontra num estado de corrosão passivo ou activo. O potencial de corrosão é determinado pela diferença de potencial entre a armadura, ou qualquer outro eléctrodo de teste, e um eléctrodo de referência embebido no betão [8].

Ao kit-sensor de corrosão foi acoplado um eléctrodo de referência de dióxido de manganês (MnO_2), designado pelo fabricante por ERE 20 [1]. Este eléctrodo, especialmente concebido para embeber em estruturas de betão, utiliza uma solução de MnO_2 e um gel de NaOH, com um pH de 13.5. O contacto electrolítico com o betão é realizado através de uma matriz cimentícia porosa que assegura uma boa ligação ao betão e permite um contacto estreito com a solução intersticial dos seus poros. O facto do pH da solução interior do eléctrodo (NaOH) ser bastante próxima do pH da solução intersticial do betão minimiza os potenciais de junção através da matriz cimentícia, contudo a existência destes potenciais de junção líquida tornam o eléctrodo sensível a alterações do pH da solução de contacto (solução intersticial dos poros de betão), variando cerca de 30mV por unidade de pH ($\partial E / \partial \text{pH} = -30\text{mV}$) [9]. O valor do potencial do eléctrodo de MnO_2 , calibrado com um eléctrodo de calomelano numa solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 23°C, é de aproximadamente +160mV (+160mV vs SCE), igual a +405mV na escala de hidrogénio (+405mV vs NHE). A inclusão deste sensor no kit-sensor de corrosão permitirá monitorizar de forma automática o potencial de corrosão da armadura e de cada um dos ânodos que compõem o sensor de corrente galvânica, ver Fig1b.

2.3 Temperatura

O interesse em medir a temperatura da camada de recobrimento do betão prende-se com a influência deste parâmetro nos processos de deterioração do betão e corrosão das armaduras e portanto nas medidas de potencial de corrosão e corrente galvânica. A cada kit-sensor de corrosão é acoplado um sensor de temperatura do tipo resistivo, que permite conhecer a temperatura do betão ao nível da armadura mais próxima da superfície.

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como referido anteriormente, o kit-sensor de corrosão fornece informação sobre a intensidade de corrente galvânica e potencial de corrosão de pequenos ânodos dispostos ao longo da camada de recobrimento e da armadura mais próxima da superfície. A medição do potencial informa sobre a probabilidade de corrosão da armadura, uma vez que a passagem do estado passivo para o estado activo está associada a uma diminuição do potencial da armadura para valores mais negativos. O

quadro seguinte [Quadro 1] constitui um guia de referência das gamas de valores espectáveis para o potencial de corrosão associadas à probabilidade de corrosão (Norma ASTM C876). Os valores do potencial de corrosão devem ser considerados como valores orientativos e de validade estritamente qualitativa, sem que se possa estabelecer de uma forma generalista e para qualquer condição de exposição da estrutura, uma relação constante entre o potencial de corrosão e a cinética do processo. A corrosão iniciada por carbonatação é uma das situações onde os valores de potencial devem ser analisados com especial cuidado. O aço no estado passivo, embebido no betão, actua como um eléctrodo de oxigénio que altera o seu potencial com as variações do pH da solução intersticial dos poros de betão, $\partial E / \partial pH = -60 \text{ mV}$ (a 25°C) [8]. O potencial de armadura ficará assim mais positivo devido à carbonatação do betão.

Quadro 1 – Classificação do risco de corrosão segundo o valor do potencial de corrosão

Probabilidade de corrosão (P_{CR})	Potencial (mV vs CSE)	Potencial (mV vs MnO_2)
Corrosão baixa <10%	>-200 mV	>-290 mV
Corrosão intermédia	-200 a -350 mV	-290 a -440 mV
Corrosão alta >90%	<-350 mV	<-440 mV

Por seu lado, a medição da corrente galvânica permite avaliar o estado de corrosão dos ânodos e desta forma monitorizar a profundidade de penetração dos agentes agressivos. Numa fase inicial, enquanto a profundidade dos agentes agressores não tiver atingido a posição do primeiro ânodo, as correntes geradas entre os ânodos e o cátodo são relativamente baixas, isto é, permanecem na gama das correntes típicas do estado passivo ($<2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Nesta fase as variações que ocorrem no valor da corrente galvânica e do potencial de corrosão devem-se fundamentalmente às alterações das condições ambientais, nomeadamente temperatura, humidade do betão e disponibilidade de oxigénio. À medida que os agentes agressivos vão penetrando na camada de recobrimento do betão criam-se condições para a despassivação do primeiro ânodo, ânodo mais próximo da superfície, gerando-se uma corrente galvânica francamente mais elevada (I_1), superior a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, e um decréscimo significativo do potencial de corrosão (P_1).

Ressalta-se a importância dos valores do potencial de corrosão e de corrente galvânica serem correctamente interpretados à luz da informação disponível sobre as condições ambientais envolventes. As experiências realizadas evidenciam existir grandes oscilações destas grandezas durante os ciclos diários e sazonais a que estão expostas as estruturas. A monitorização permanente assume por isso um papel de grande relevância, permitindo conhecer os efeitos das condições ambientais nos resultados do kit-sensor de corrosão e proceder à respectiva compensação.

4. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E HUMIDADE

Com o intuito de avaliar a influência da temperatura e humidade nos valores do potencial de corrosão e da corrente galvânica foi elaborado o programa de ensaios descrito no gráfico da Fig. 3a. Para o efeito foi betonado um provete prismático de betão armado com as dimensões de $30 \times 50 \times 10 \text{ cm}$, onde foi instalado o kit-sensor de corrosão. O referido provete foi submetido a temperaturas que variaram entre os 20°C e os 40°C e humidades ambiente que variaram entre os 40% e os 80%. No gráfico da Fig. 3b é possível observar a evolução do potencial de corrosão nos 4 ânodos do sensor de corrente galvânica. Analisando os resultados verifica-se que à medida que aumenta a temperatura os potenciais ficam mais negativos, diminuindo em termos médios de -185 mV para -223 mV . Na gama de temperaturas estudadas (20 a 40°C) os potenciais variaram cerca de 1.9 mV por cada $^\circ\text{C}$.

Segundo *Pepénar et al* [10], o efeito da temperatura no potencial está relacionado com o teor em oxigénio no betão, isto é, um aumento da temperatura provoca uma diminuição da quantidade de oxigénio dissolvido na solução intersticial e consequentemente ocorre uma diminuição do potencial de corrosão. Na realidade, da variação da temperatura no betão resultam alterações em vários parâmetros, tal como o conteúdo em água, pelo que o efeito global da temperatura no processo de corrosão é bastante complexo e controlado por uma série de outros factores. Da observação do gráfico poderá

ainda referir-se que a variação da humidade relativa, para a gama de humidades ambiente estudadas (40 a 80%) e tempo de exposição aplicado, parece não reproduzir qualquer alteração nos valores de potencial de corrosão. Menciona-se contudo, que apesar de se tratar de um plano de ensaios onde se tentou simular situações verosímeis a que uma estrutura real poderá estar sujeita, o efeito da variação da humidade relativa ambiente nos resultados do kit-sensor de corrosão deveria ter sido estudado aplicando tempos de exposição mais prolongados, com vista atingir um estado de equilíbrio de trocas de humidade.

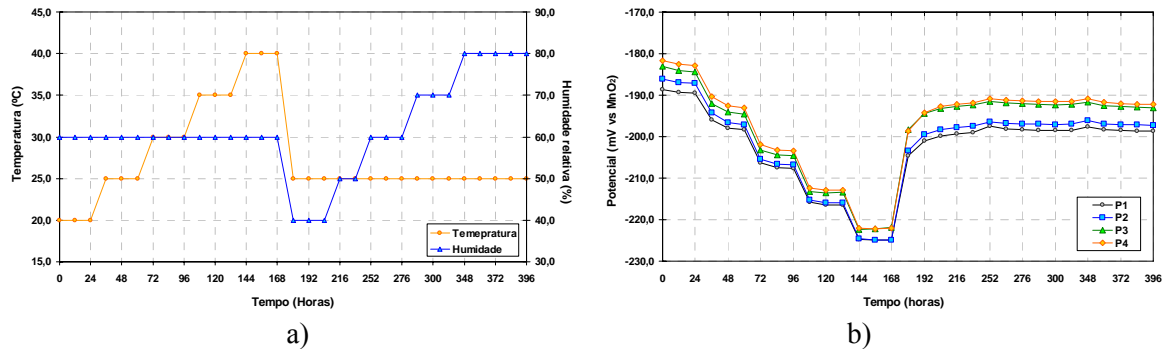


Figura 3. a) Evolução da temperatura e humidade ao longo do ensaio; b) Evolução do potencial de corrosão dos 4 ânodos do sensor de corrente galvânica

Durante este programa de ensaios foi simultaneamente monitorizado a intensidade de corrente galvânica gerada entre os 4 ânodos do sensor e o cátodo, ver gráfico da Fig. 4b. Refira-se que os dados apresentados no gráfico dizem respeito ao valor da intensidade de corrente 5 segundos após o início da curva de descarga.

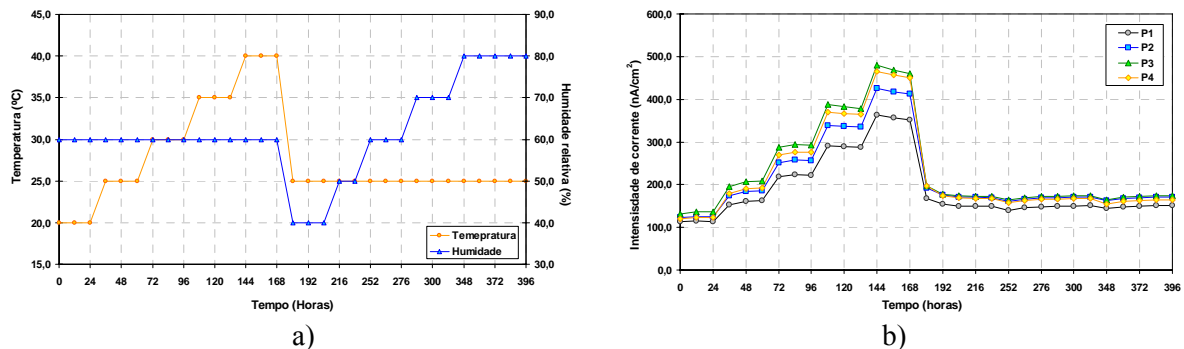


Figura 4. a) Evolução da temperatura e humidade ao longo do ensaio; b) Corrente galvânica gerada entre o cátodo e os 4 ânodos do sensor de corrente galvânica para 5seg da curva de descarga

Tal como no potencial de corrosão, os resultados indicam que para a gama de humidades estudadas e tempo de exposição o valor da intensidade de corrente parece não ser afectado, mas que a temperatura tem uma clara influência neste parâmetro. A variação da temperatura entre os 20°C e os 40°C provocou uma variação da intensidade de corrente, em termos médios, entre os 124.9nA/cm² e os 433.8nA/cm², o que significa um aumento médio de 15.4nA/cm²/°C.

5. MONITORIZAÇÃO DOS PARÁMEROS DE DURABILIDADE NA PONTE DA LEZÍRIA

5.1 Sistema de monitorização implementado

A monitorização da durabilidade baseada em sensores instalados pontualmente em alguns locais da estrutura requer uma definição cuidada da sua localização para que a informação recolhida seja representativa do comportamento global da estrutura. A distribuição dos sensores na estrutura deve ter

fundamentalmente em atenção as diferentes condições de exposição ambiental e o tipo de elementos estruturais, nomeadamente a sua geometria e comportamento estrutural. No caso da Ponte da Lezíria a concepção estrutural adoptada é, na prática, um conjunto de três soluções estruturais distintas, adaptadas às características de cada zona da travessia, ver *Portugal et al* [11]. Assim, ao longo da travessia sobre o rio Tejo foram instalados 15 kit-sensor de corrosão em 3 zonas distintas, nomeadamente, numa secção dos viadutos de acesso do lado norte, numa secção da Ponte e em duas secções nos viadutos de acesso do lado sul.

A interrogação e aquisição de dados do kit-sensor de corrosão é realizada, de forma contínua e automática, através de um datalogger (sistema geral de medição de sensores utilizados na monitorização estrutural), ligado a um equipamento concebido especialmente para a leitura deste dispositivo. Este equipamento opera simultaneamente como voltímetro de elevada impedância e amperímetro de resistência zero, permitindo a leitura do potencial de corrosão e da corrente galvânica, respectivamente. O equipamento desenvolvido foi ainda dotado de um sistema de desmultiplexagem de canais que possibilita a leitura sequencial de todos os kit-sensor de corrosão instalados numa dada secção utilizando apenas um único canal de leitura do datalogger.

5.2 Resultados

5.2.1 Fase construtiva

Durante a fase de construção da travessia foi possível realizar em determinadas situações a aquisição do sinal do kit-sensor de corrosão. Uma das fases do processo construtivo monitorizada correspondeu à operação de betonagem e endurecimento do betão de um dos troços do tabuleiro do viaduto norte V2N. Em dois dos sensores instalados, KSC-T-V2N-P11P12-1S e KSC-T-V2N-P11P12-1I foi realizada uma aquisição contínua e automática dos valores do potencial de corrosão e da temperatura, durante a fase de betonagem e nos 34 dias subsequentes. De salientar que em cada kit-sensor foram registados os potenciais de apenas três, dos cinco níveis disponíveis, P₁, P₂ e P₅, isto é, potencial do ânodo mais próximo da superfície (P₁), potencial do segundo ânodo mais próximo da superfície (P₂) e potencial da armadura mais próxima da superfície (P₅), ver Fig. 1b. Nas figuras 5a e 5b apresenta-se, simultaneamente, a evolução do potencial de corrosão e da temperatura no kit sensor KSC-T-V2N-P11P12-1S e KSC-T-V2N-P11P12-1I, respectivamente. Refira-se que a betonagem do tabuleiro realizou-se no dia 29/12/2006 por volta das 7:00 da manhã e a descofragem ocorreu apenas no dia 19/01/2007, altura que terá coincidido com o segundo corte de energia que impossibilitou a aquisição de dados durante alguns dias.

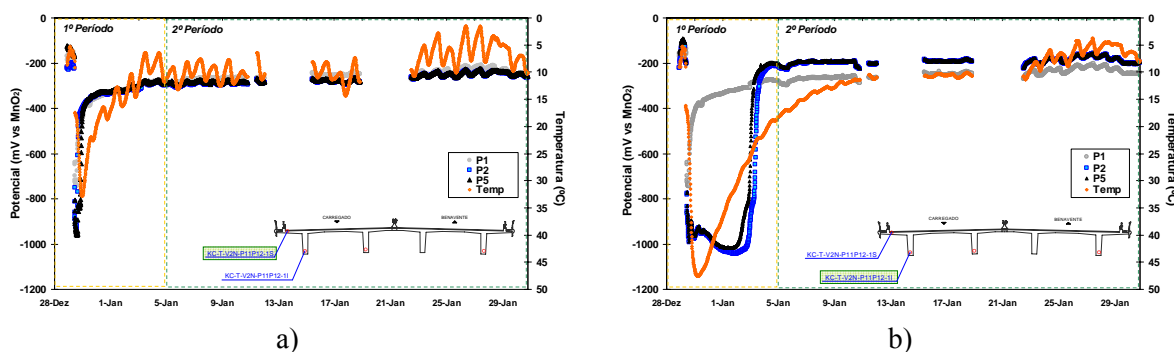


Figura 5. Leituras de potencial durante a fase de betonagem e endurecimento do betão: a) KSC-T-V2N-P11P12-1S; b) KSC-T-V2N-P11P12-1I

A observação das curvas da temperatura registadas pelos sensores permite constatar que a evolução do calor gerado devido às reacções de hidratação difere consoante a ponto da secção que está a ser monitorizado. A temperatura máxima verificada junto do KSC-T-V2N-P11P12-1S foi de 32.8°C e ocorreu 15.5 horas após a betonagem, enquanto que no KSC-T-V2N-P11P12-1I foi registada uma temperatura máxima de 47.6°C às 4:30 do dia seguinte, isto é, 21.5 horas após a betonagem. Da mesma forma, a evolução da temperatura do betão para temperaturas próximas da temperatura

ambiente também parece depender da zona da secção analisada, verificando-se uma recuperação francamente mais lenta no caso do KSC-T-V2N-P11P12-II.

A análise da evolução do potencial ao longo do período de endurecimento do betão pode ser dividida basicamente em dois períodos. Os primeiros 7 dias após betonagem correspondem a um período onde o valor do potencial sofre variações significativas, Fig. 6a, enquanto que no segundo período o valor médio do potencial aumenta ligeiramente e adquire um valor praticamente constante, apenas variável com os ciclos diários, ver gráfico da Fig. 6b.

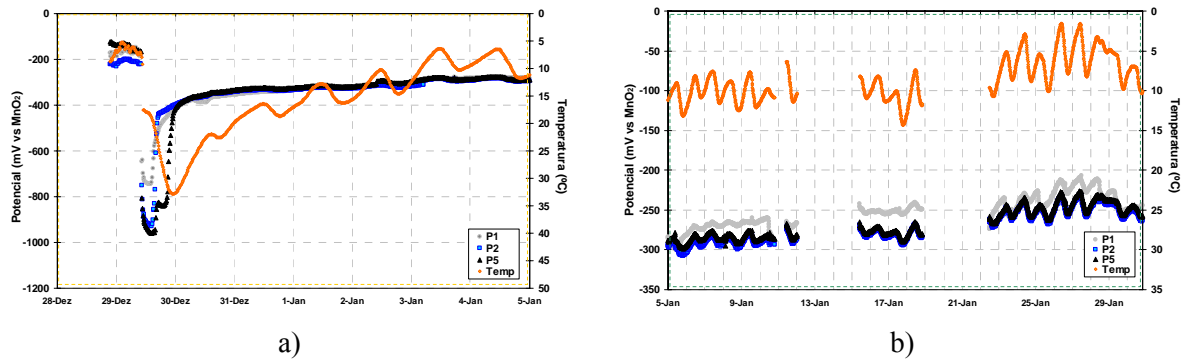


Figura 6. Potenciais de corrosão do KSC-T-V2N-P11P12-1S: a) 1º Período; b) 2º Período

Nos gráficos apresentados na Fig. 5 - 1º Período, é possível observar que os valores mínimos do potencial de corrosão do KSC-T-V2N-P11P12-1S ocorrem cerca de 14 horas após a betonagem, atingindo o valor de -745.2mV no ânodo mais próximo da superfície (P1), -929.3mV no segundo ânodo (P2) e -958.8mV na armadura (P5). No caso do sensor KSC-T-V2N-P11P12-II a evolução, nas primeiras horas após a betonagem, do potencial de corrosão P2 e P5 parece acompanhar a evolução da temperatura, sendo que o seu potencial permanece com valores da ordem dos -1030mV durante 4 dias. Pelo contrário, o ânodo mais próximo da superfície (P1), recupera para valores bastante menos negativos cerca de 1dia após a betonagem. Vários factores têm vindo a ser apontados para explicar as variações de potencial nos primeiros dias após a betonagem [12]. O pH da solução intersticial do betão, que nas primeiras horas varia desde do pH neutro da água até valores de aproximadamente 13, é um dos factores que poderá contribuir para as variações do potencial. A formação da película passivante, que se inicia logo que o betão fresco entra em contacto com a armadura, confere ao aço um potencial de corrosão mais nobre, isto é, um potencial menos negativo. Mas se por um lado se observa uma alteração na estrutura química das armaduras por outro lado, o próprio meio electrolítico (betão) sofre grandes transformações durante os primeiros dias, nomeadamente no que diz respeito ao pH, temperatura, humidade, microestrutura e até mesmo a polaridade e mobilidade dos iões e cargas no betão. De forma simplificada a matriz do betão pode ser descrita como um circuito eléctrico caracterizado pela resistividade e permissividade do betão. O aumento de resistividade que se verifica nos primeiros dias está relacionado com a diminuição do conteúdo em água livre à medida que progridem as reacções de hidratação do cimento, diminuição do volume de poros capilares e com o facto do espaço entre as partículas de cimento ser progressivamente preenchido por um gel. Por seu lado a permissividade descreve de que forma o campo eléctrico é afectado pelas propriedades dieléctricas do meio envolvente, assumindo um valor próximo de 80 no caso de água e de 4 no caso de betão seco. Estudos desenvolvidos por alguns autores indicam que a permissividade do betão durante as primeiras horas cresce rapidamente, atingindo um valor máximo cerca de 16horas após a betonagem no caso de um betão com uma razão w/c de 0.45, altura em que o potencial de corrosão adquire valores mínimos (valores mais negativos) [12].

Os dados apresentados no gráfico da Fig. 6b, referentes ao 2º Período, permitem observar de que forma as variações térmicas diárias se reflectem no valor do potencial. Por exemplo, nas condições actuais de saturação do betão, o valor do potencial da armadura que constitui o último ânodo do kit-sensor KSC-T-V2N-P11P12-1S varia mais de 34mV quando no sensor de temperatura é registada uma variação de cerca de 9°C.

5.2.2 Fase de exploração

Os resultados que a seguir se apresentam dizem respeito aos dados recolhidos no KSC-T-V2N-P11P12-1S já após a finalização da construção da Ponte, ver Fig. 7. Tal como se havia verificado nos ensaios realizados em laboratório, as amplitudes térmicas diárias reflectem-se directamente na amplitude do potencial de corrosão e da intensidade de corrente. Em termos médios, e para as condições envolventes deste sensor, poderá dizer-se que o potencial de corrosão diminui cerca de $1.6\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ enquanto que a intensidade de corrente varia de aproximadamente $10.0\text{nA}/\text{cm}^2/^{\circ}\text{C}$. Tratam-se de valores bastante concordantes com os que haviam sido encontrados no programa de ensaios realizado em laboratório. Salienta-se que esta análise só foi possível por se considerar que a humidade relativa do betão se manteve praticamente constante durante o período em estudo, uma vez que não foi registado precipitação significativa.

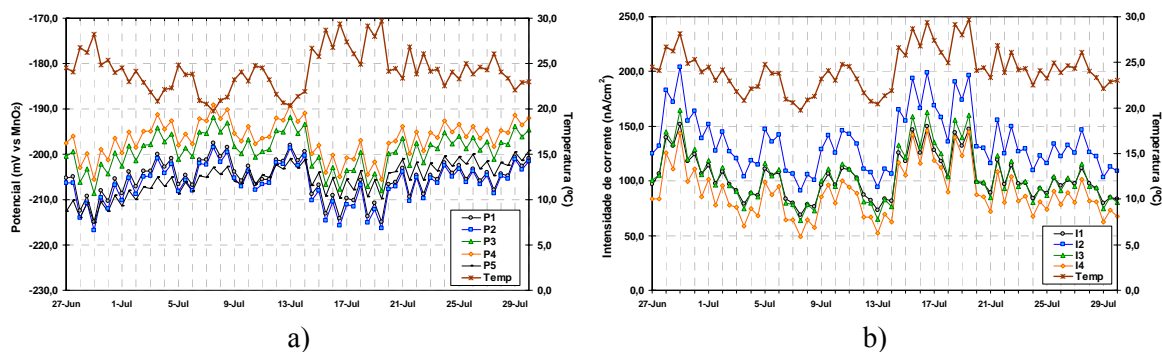


Figura 7. Registos dos dados observados no KSC-T-V2N-P11P12-1S durante a fase de exploração: a) Potenciais de corrosão e temperatura; b) Intensidade de corrente e temperatura

6. CONCLUSÕES

A dificuldade de acesso a alguns locais da estrutura e a necessidade de registos mais contínuos para fazer face à grande variabilidade das acções ambientais a que as estruturas estão sujeitas tem fomentado o desenvolvimento de sensores de embeber no betão para monitorização da durabilidade das estruturas. O dispositivo apresentado neste trabalho apresenta como principal vantagem, relativamente a outros sensores de durabilidade, o facto de permitir não só saber o instante em que a armadura começa a corroer, mas também possibilitar a previsão antecipada do início dessa corrosão. Trata-se de um sistema que monitoriza directamente a profundidade de penetração dos agentes e que com recurso a modelos de previsão da vida útil permite antever o início de corrosão das armaduras. O kit-sensor de corrosão revelou-se tratar de um sistema robusto durante as operações de betonagem, com dimensões compatíveis com a sua aplicação em obra, isto é, a profundidade dos ânodos é ajustável à espessura de recobrimento, e com possibilidade de uma aquisição automática e integrada com a monitorização estrutural. A facilidade de integração dos dois sistemas de monitorização representa uma economia na instalação e gestão de todo o sistema, mas permite fundamentalmente, uma melhor compreensão do comportamento global da estrutura. É contudo essencial que a análise e interpretação dos resultados fornecidos pelo kit-sensor de corrosão seja realizada de forma bastante cuidada. Resultados recolhidos quer de sensores instalados em provetes em laboratório, quer de sensores instalados em obra, revelaram que a intensidade de corrente galvânica e o potencial de corrosão são parâmetros extremamente influenciáveis pelas condições ambientais. No caso particular deste trabalho foi possível verificar uma grande influência da temperatura nos resultados do kit-sensor de corrosão apesar de não ter sido possível realizar um estudo biunívoco entre a humidade e o conteúdo em água do betão, já que apenas foi controlado a humidade relativa do ambiente. No que diz respeito à humidade relativa, para a gama de humidades estudadas e tempo de exposição aplicados não foi encontrada uma grande influência deste parâmetro, contudo carecem ser realizados mais estudos para que se possam ser tecidas conclusões. Salienta-se o facto deste estudo ter sido realizado em sensores no estado passivo não se tendo abordado ainda a influência das condições ambientais após ter iniciado a corrosão.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/25552/2005 concedida ao primeiro autor. Agradece-se igualmente o apoio do consórcio construtor da Ponte da Lezíria – TACE, da empresa NewMensus (instrumentação) e da Eng^a Zita Lourenço. Agradece-se ainda à Brisa pelo apoio e abertura dada na implementação deste sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] FORCE Technology, Brøndby - Park Allé 345, 2605 Brøndby, Denmark
- [2] ANDRADE, C.; MARIBONA, I.R.; FELIU, S.; GONZALEZ, J.A; FELIU, S. Jr. - The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements. *Corrosion Science*, Vol 33, No 2, pp 237-249, 1992
- [3] FELIU, V.; GONZALEZ, J.A; ANDRADE, C.; FELIU, S. - Equivalent circuit for modelling the steel concrete interface. Part I: Experimental evidence and theoretical predictions. *Corrosion science*, Vol 40, No 6, pp 975-993, 1998.
- [4] RAUPACH, M. – Chloride induced macrocell corrosion of steel in concrete – theoretical background and practical consequences. *Construction and Building Materials*, Vol 10, No 5, pp 329-338, 1996.
- [5] BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; Pedferri, P.; Polder, R. - Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2004.
- [6] CIGNA, R.; ANDRADE, C., NURNBERGER, U.; POLDER, R.; WEYDERT, R. - COST 521 - Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures, Final Report, 2002
- [7] MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. – Handbook on non destructive testing of concrete. 2nd ed. CRC Press, 2004. ISBN 0-8031-2099-0
- [8] RILEM TC 154-EMC, 'Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion – Half-cell potential measurements – Potential mapping reinforced concrete structures', *Materials and Structures*, vol. 36, 461-471, 2003.
- [9] ARUP, H.; KLINGHOFFER, O.; MLETZ, J. – Long term performance of MnO₂ – Reference electrodes in concrete, Corrosion 97, Paper No. 243, NACE International, Houston, USA, 1997.
- [10] PEREIRA, E. - Monitorização da Corrosão do Betão Armado: Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2004. 275 p. Tese de Doutoramento.
- [11] PORTUGAL, A.; CÂMARA, A.; VIRTUOSO, F.; REBELO, V. – Nova travessia do Tejo no Carregado. Acta das 4^a Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa, 2006. 366 p.
- [12] POURSAEE, A.; HANSSON, C. - Reinforcing Steel Passivation in Mortar and Pore Solution. *Cement and Concrete Research*, nº 37, pp 1127-1133, 2007.