



SENSORES GALVÂNICOS DE MÚLTIPLOS ELETRODOS PARA MONITORAMENTO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: ESTADO DA ARTE.

CALVO VALDÉS, Analiet (1); ROQUE, Polyana de Jesus (2); MEDEIROS, M. H. F. (3)

Universidade Federal do Paraná, Engenheira Mestranda¹, analietcv@yahoo.es; Universidade Federal do Paraná, Iniciação científica², polyanaolegario@gmail.com; Universidade Federal do Paraná, Professor Doutor³.

RESUMO

Um sistema de monitoramento da corrosão da armadura baseado somente em simples inspeções visuais, embora seja a base da maioria dos programas de gestão de pontes ou de outras estruturas de grande importância social, pode detectar deteriorações apenas em estágios bastante avançados do fenômeno. Entretanto, os sensores como parte integrada de um sistema de monitoramento permitem estimar o período de iniciação da corrosão na armadura principal de forma precoce, evitando desta forma os grandes investimentos associados às ações de recuperação ou substituição. O sensor galvânico é um dos equipamentos existentes no mercado internacional para monitoramento da corrosão através da medição da corrente galvânica. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é resumir aspectos teóricos fundamentais sobre os sensores galvânicos e a grandeza que medem (corrente galvânica) assim como mostrar a utilidade de um sensor galvânico de múltiplos eletrodos para a realização de prognósticos a partir do modelo simplificado da difusão de Tutti (1982). Para isso, se descreve um caso hipotético de uma estrutura instrumentada sujeita a ataque por íons cloretos. Os sensores galvânicos considerados nessa simulação foram confeccionados nos laboratórios de materiais da UFPR com materiais brasileiros inspirado em um equipamento comercial. Através dos sensores galvânicos com múltiplos pode-se acompanhar a progressão de agentes agressivos para o interior da estrutura e conhecer a qual profundidade eles se encontram o que possibilita relatar um prognóstico do tempo que levará para a armadura sofrer corrosão. Os sensores galvânicos medem a corrente galvânica através da técnica *Zero Resistance Ammeter (ZRA)*.

Palavras-chave: Sensor galvânico. Corrente galvânica. Modelo de previsão de vida útil.

ABSTRACT

*An steel corrosion monitoring system based only on simple visual inspections, although it is the basis of most bridge management programs or other structures of great social importance, can detect deteriorations only at very advanced stages of the phenomenon. However, the sensors as an integrated part of a monitoring system allow to estimate the period of initiation of corrosion in the main armature at an early stage, thus avoiding the large investments associated with recovery or replacement actions. The galvanic sensor is one of the existing equipment in the international market for corrosion monitoring through galvanic current measurement. In this context, the objective of the present study is to summarize fundamental theoretical aspects about the galvanic sensors and the magnitude that they measure (galvanic current) as well as to show the usefulness of a multi-electrode galvanic sensor for the realization of prognoses from the simplified diffusion model of Tutti (1982). For this, a hypothetical case of an instrumented structure subject to attack by chloride ions is described. The galvanic sensors considered in this simulation were made in the materials laboratories of UFPR with Brazilian materials inspired in a commercial equipment. Through the galvanic sensors with multiples can be followed the progression of aggressive agents into the structure and know how deep they are, which makes it possible to assess the prognosis of time that will cause the armor to suffer corrosion. Galvanic sensors measure the galvanic current through the *Zero Resistance Ammeter (ZRA)* technique.*

Keywords: Galvanic sensor. Galvanic current. Prediction of useful life.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de estruturas de concreto pode ter duas abordagens básicas que podem ser usadas em conjunto em alguns casos: a primeira é relativa ao comportamento estrutural e a segunda ao comportamento do material e sua interação com o meio ambiente. A escolha de uma ou outra define desde os tipos de sensores usados até o tipo de informação que se obtém. A abordagem relativa ao comportamento estrutural fornece informações relativas à resposta da estrutura a cargas aplicadas, confirmação de comportamento previsto em projeto, modificações no sistema estrutural, entre outras. Normalmente é usado em conjunto com modelos matemáticos da estrutura para comparação de valores teóricos com valores medidos em campo. A abordagem relativa ao comportamento do material e sua interação com o meio ambiente produz principalmente informações relativas ao concreto armado, ou seja, tipo de material da estrutura, grau de envelhecimento, estado de degradação, modificação química de componentes, umidade, temperatura, entre outras (NERY, 2013).

O projeto de monitoramento é responsável por acompanhar o desenvolvimento de uma ou mais grandezas que permitam avaliar a evolução de mecanismos de degradação, garantindo que estes não provoquem dano e fornecendo informações relevantes para a manutenção da estrutura. Para projetar um sistema de monitoramento deve-se respeitar três etapas fundamentais: a primeira é definir o objetivo do monitoramento (NERY, 2013); que consiste em identificar o provável mecanismo de degradação incidente e os riscos associados (INAUDI, 2009). Na segunda etapa é definida a abordagem a ser usada, relativa ao material ou relativa à estrutura. Com a abordagem definida é possível determinar o tempo de aplicação do monitoramento, as grandezas e abrangências a serem monitoradas e o nível até o qual irá chegar o Sistema de Monitoramento. Na terceira são escolhidos os sensores de acordo com a durabilidade, tecnologia, precisão, resolução e exigências do local de aplicação (INAUDI, 2009; NERY, 2013).

Para o monitoramento da corrosão nas estruturas de concreto armado são necessários sensores embebidos no concreto que medem parâmetros relacionados com esse fenômeno deletério da armadura, designadamente: potencial de corrosão; resistividade do concreto; corrente galvânica; resistência à polarização. Ou seja, sensores baseados nos mesmos princípios de funcionamento das técnicas eletroquímicas tradicionalmente usadas nos laboratórios para o monitoramento da corrosão da armadura no concreto armado. Entretanto, as diferentes técnicas eletroquímicas usadas possuem várias limitações teóricas e práticas, principalmente quando estas forem aplicadas ao sistema aço-concreto, devido à complexidade deste sistema. Desta forma, algumas precauções são necessárias para assegurar uma boa análise quando se integram sensores em um sistema de monitoramento.

Os sensores galvânicos, em particular, consistem na medição da corrente galvânica que se desenvolve no circuito gerado entre dois metais diferentes. A magnitude da corrente galvânica depende primariamente no valor de diferença de potencial de polarização dos eletrodos submersos no concreto, mas também

é afetada pela resistividade do concreto, teor de oxigênio disponível, umidade, temperatura assim como outros fatores decorrentes da interação da estrutura com o meio no qual está inserida.

Portanto, a correta interpretação dos resultados obtidos através dos sensores galvânicos assim como o princípio de funcionamento deles, ainda são temas sujeitos a discussão. Neste contexto, o presente estudo têm como objetivo é resumir aspectos teóricos fundamentais sobre os sensores galvânicos e a corrente galvânica. O trabalho apresenta também um prognóstico baseado na corrosão por íons cloretos das barras no interior de estruturas instrumentadas com sensores galvânicos criados nos laboratórios de materiais da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

2. CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

O uso de sensores para monitoramento do avanço da corrosão é atualmente uma vertente que tem assumido progressivamente grande importância na área da construção civil em procura de maior durabilidade e sustentabilidade do parque de obras de arte da infraestrutura pública. A corrosão é um processo natural de degradação dos metais e leva à perda de massa de aço e às alterações dimensionais. No final da construção, as armaduras nas estruturas de concreto armado são fisicamente protegidas contra a corrosão pela barreira imposta pelo concreto e por uma camada passiva protetora formada em torno das barras. Em condições normais, a proteção pelo concreto inibe o início da corrosão: (1) o pH do concreto é muito alto (pH em torno de 13); e (2) sua condutividade elétrica é baixa. No entanto, durante a vida estrutural ações externas como a penetração de espécies agressivas Cl^- ; SO_4^{2-} ; CO_2 ; H_2O ; O_2 favorecem a corrosão eletroquímica (M. TORRES-LUQUE *et al.*, 2014).

A partir do ingresso desses agentes agressivos na superfície dos metais, se produzem zonas de diferentes níveis de energia que propiciam a formação de uma cela ou pilha eletroquímica (MADRID *et al.*, 2001). A superfície da armadura passa a funcionar como um eletrodo misto, composto por ânodo e cátodo eletricamente conectados pelo próprio metal, sobre o qual as reações anódicas e catódicas ocorrem. A solução aquosa presente nos poros de concreto age como um eletrólito, cujas propriedades (pH e presença de contaminantes iônicos) controlam a ocorrência da reação anódica. De forma análoga, a reação catódica é limitada pelo pH da solução de poros, bem como pela disponibilidade de oxigênio junto a barra. Havendo as condições propícias para a ocorrência de ambas as reações de meia-célula, a corrosão do aço é estabelecida (AHMAD, 2003; QIAOeOU, 2007 *apud* PORTELLA, 2014).

Dos agentes agressivos que promovem esse processo patológico na armadura, a penetração de íons cloreto através dos poros de concreto representa um dos mecanismos de degradação mais preocupantes no setor da construção civil, porque tende a promover a corrosão da armadura reduzindo o tempo de vida útil da estrutura como um todo (HELENE, 1993; MEDEIROS *et al.*, 2015).

Os íons cloreto que ingressam no concreto podem estar de três formas: (1) íons livres, os quais possuem maior mobilidade iônica e tendem a atingir a armadura, iniciando o processo corrosivo; (2) íons adsorvidos nas partículas de cimento e agregado, os quais, em ciclos de molhagem e secagem podem ser liberados e convertidos na primeira forma citada; e (3) os íons quimicamente combinados

aos hidratos de cimento, na forma de sais de Friedel ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ou $6\text{CaO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot\text{CaCl}_2\cdot 24\text{H}_2\text{O}$) (HOPPE FILHO *et al.*, 2013; MERCADO, LORENTE. e BOURBON, 2012 *apud* PORTELLA, 2014).

A corrosão do concreto armado exposto aos íons cloreto é propiciada, então, pela presença e difusão de íons Cl^- livres, os quais se deslocam através dos espaços vazios e caminhos condutores da matriz cimentícia até atingir a barra de aço. A chegada de cloretos nas proximidades da armadura, por si só, não representa o início do processo de corrosão. A película passiva protetora do aço sofrerá danos quando o conteúdo de Cl^- em torno da barra de aço atingir o conteúdo crítico. Em seguida, a corrosão será iniciada na presença de água e oxigênio no aço (JIN *et al.*, 2017).

A maioria das normas estrangeiras fixam os teores de Cl^- em relação à massa de cimento. Embora seja um ponto bastante polêmico o valor de 0,4% em relação à massa de cimento é um consenso na maioria das normas (CASCUDO, 1997). A norma NP EN 206, por exemplo, adota o valor de 0,4% como teor crítico de cloreto com relação ao teor de cimento do concreto (SILVA, 2016).

3. CORRENTE GALVÂNICA. ASPÉCTOS TEÓRICOS

Baseado no modelo simplificado do circuito elétrico formado durante a corrosão de uma macro-célula, a corrente elétrica total (I_{ME} 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 eletrólito (R_{EL}), da resistência de polarização anódica (R_A) e da resistência de polarização catódica (R_C) (ANDRADE *et al.*, 2008), conforme mostra a Equação 1.

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

A corrente galvânica aparece quando, em um mesmo meio condutivo, se faz o contato elétrico entre dois metais distintos com potencial eletroquímico diferentes, o que forma um sensor galvânico. Essa grandeza pode ser mensurada sem aplicar uma corrente externa (MCCARTER, VENNESLAND, 2004) ou potencial. Para essa medição, usa-se um amperímetro de resistência zero, conhecido como técnica Zero Resistance Ammeter (ZRA) (ARAÚJO *et al.*, 2013). Essa técnica tem sido utilizada pontualmente como uma forma de monitoramento da corrosão no concreto (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

Em concreto íntegro, a corrente galvânica é desprezível, ou seja, muito baixa. Isso porque as barras de aço-carbono estão em estado passivo, portanto, apresentam uma diferença de potencial pequena e estável em relação ao cátodo também passivo. O mesmo não ocorre quando um processo corrosivo é estabelecido nas barras. Nesse caso, a corrente galvânica apresenta um valor significativo em decorrência da variação do potencial do ânodo, que assume valores mais negativos em relação ao obtidos inicialmente, em seu estado passivo (ARAÚJO *et al.*, 2013; LACERDA e MULLER, 2015). Teoricamente, um aumento da corrente galvânica, acompanhado por uma diminuição do potencial de circuito aberto, indica claramente que um nível crítico de íons cloreto foi atingido ou que a frente de carbonatação alcançou as barras do ânodo do sensor

(ANDRADE *et al.*, 2008; ARAÚJO *et al.*, 2013). Entretanto o valor da corrente galvânica estará em função dos metais envolvidos no par galvânico, como evidenciado na Tabela 1. Andrade *et al.*, (2008) estudou o comportamento do sensor de múltiplos eletrodos da *Force Technology* no qual o cátodo é uma tela de titânio ativado e os ânodos são de aço carbono, mostrado na Figura 1. Para esse par galvânico em uma 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 ($<2\mu\text{A}/\text{cm}^2$). À medida que os agentes agressivos vão penetrando na camada de revestimento do concreto criam-se condições para a despassivação do primeiro ânodo, ânodo mais próximo da superfície, gerando-se uma corrente galvânica mais elevada, isto é, superior a $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ANDRADE *et al.*, 2008).

No trabalho de Pereira *et al.*, (2009) citam como o valor indicativo da condição passiva do armadura $I_{gal} < 0,14 \text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ e $I_{gal} > 1 \text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ como indicativo da elevada taxa de corrosão. Nesse estudo o eletrodo de trabalho era uma barra de aço carbono e o eletrodo de referência uma barra de aço inox.

Tabela 1: Valores de corrente galvânica segundo os metais do par galvânico.

| Artigo | Par (ânodo / cátodo) | Intervalo de corrente |
|--------------------------------|-------------------------------|--|
| Pereira <i>et al.</i> , (2009) | Aço carbono/aço inox | $< 0.00014 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ $> 0.001 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ |
| Andrade <i>et al.</i> , (2008) | Aço carbono / titânio ativado | $< 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ $> 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ |
| Park <i>et al.</i> , (2005) | Aço carbono / cobre | $< 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ $> 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ |
| Pereira e Salta, (2012) | Aço carbono/ aço inox | $0 \mu\text{A}$ $-25 \mu\text{A}$ |

Fonte: Autores.

O material utilizado como ânodo na pesquisa de Park *et al.*, (2003) foi o aço padrão (KS) D 3504 e como materiais catódicos foram utilizados o aço inoxidável tipo 304 (UNS S30400) e o cobre puro. Sendo que, a corrente galvânica do par aço/cobre foi maior que a do par aço/aço inoxidável, ou seja, o sensor de aço/cobre é mais adequado para um ambiente de alta resistividade. Nesse trabalho o valor de corrente galvânica no par aço/cobre ficou no intervalo de $10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$ a $10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2$ ($1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Porém, não chega a estabelecer valores indicativos da condição do aço.

Park *et al.*, (2005) deram continuidade ao anterior trabalho. Nesta ocasião os autores observaram que a corrente galvânica se manteve estável e perto de zero, entretanto os íons cloretos não tinham atingido as barras de aço do sensor. Após 80 dias a corrente galvânica começou a apresentar valores negativos sinal de que o aço atuava como cátodo enquanto o aço inox e/ou cobre atuavam como ânodos. Após 217 a corrente ficou positiva e maior do que $0,04 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Pereira e Salta, (2012) apresentam resultados de um sistema de sensores instalado durante 10 anos em uma obra. A partir da análise dos resultados ficou evidente que em decorrência da evolução da microestrutura do concreto

aumentou a resistividade do material, o potencial de corrosão (E_{CORR}) apresentou um ligeiro aumento ao longo do tempo, indicativo do estado de passivação das armaduras e a corrente galvânica medida (I_{gal}) se manteve muito baixa, próxima de $0 \mu A$ e também indicativa de que as armaduras se encontravam no estado passivo. Os autores Ribeiro e Cunha, (2014), destacam que a corrente galvânica é da ordem de décimos de micro-amperes.

Em outro estudo apresentado pelos autores Pereira e Salta, (2012) onde se detectou a contaminação do concreto com agentes agressivos a 1 cm de cobrimento e uma análise química mostrou a presença de cloretos no material em uma percentagem de cloretos 1% relativo ao teor de cimento, o valor de corrente galvânica que indicou a despassivação do reforço foi de $-25E+05$ amperes o que corresponde a $-25 \mu A$. O artigo sugere que os pares galvânicos implementados estavam formados por aço carbono/aço inox.

Sendo assim, não há uma faixa fixa de valores de corrente galvânica que caracterizam o estado ativo das barras de aço-carbono do ânodo. Isso porque existe uma variedade de interferências na corrente circundante, como a área dos elétrodos, a qualidade do concreto e o teor de íons cloreto no material (RAUPACH e SCHIESSL, 2001). Assim sendo, não é o valor absoluto da corrente que deve ser considerado, mas sim a variação de seus valores ao longo do tempo. (ARAÚJO *et al.*, 2013).

Valores negativos de corrente galvânica indicam que o aço de reforço está atuando como um cátodo, enquanto o metal mais nobre está agindo como ânodo devido ao estado passivo do reforço; condição na qual o potencial do aço é superior ao do metal mais nobre (PARK *et al.*, 2005) e a corrente galvânica permanece pequena.

Usualmente, recomenda-se que a leitura da corrente galvânica seja feita poucos segundos após o estabelecimento do contato elétrico entre o ânodo e o cátodo, já que essa corrente não é estável ao longo do tempo de medição (POLDER; PEELEN; LEEGWATER, 2008 *apud* ARAÚJO *et al.*, 2013). De fato, o registro dessa corrente não é fácil, já que vai decaindo ao longo da medição, demonstrando um comportamento capacitivo (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

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 determinado 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 fato 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 (ANDRADE *et al.*, 2008).

Alguns autores afirmam que, quando ambos os metais da célula de corrosão estão fortemente oxidados, a intensidade da corrente que circula na célula não é representativa do estado de corrosão em que se encontram as armaduras. A justificativa para esse argumento parte do princípio de que uma célula de corrosão pressupõe a existência de um ânodo e de um cátodo cuja diferença de potencial origine a "corrente de corrosão". No caso de ambas as armaduras estarem claramente oxidadas de forma uniforme, ambas irão se comportar como

ânodos e, por isso, não haverá formação de célula de corrosão entre as duas armaduras (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

Na realidade a corrente galvânica medida numa macrocélula representa apenas parte da corrente de corrosão, motivo pelo qual a determinação da velocidade de corrosão a partir da corrente galvânica não é exata (ANDRADE *et al.*, 2007; ANDRADE *et al.*, 2008).

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 eletrólito (R_{EL}), conforme Equação 1. Isso significa, que a intensidade de corrente que flui entre o ânodo e o cátodo, colocados em contato através do meio eletrolítico, pode apresentar valores bastante baixos também no caso do teor de oxigênio do eletrólito ser muito baixo ($R_C \rightarrow \infty$) ou no caso do concreto se encontrar bastante seco ($\rho \rightarrow \infty$) (M. RAUPACH e SCHIESSL., 2001; ANDRADE *et al.*, 2008).

O teor de oxigênio determina inclusive a distância entre o ânodo e o cátodo. Normalmente, o cátodo é instalado próximo do ânodo, em região de concreto aerado, em que há acesso de oxigênio. No caso de o concreto da região estar sujeito à saturação por longos períodos (como em componentes submersos e expostos à variação de maré), em que já há naturalmente restrição do acesso de oxigênio, a distância entre o ânodo e o cátodo deve ser maior, visto que há consumo de parte do oxigênio pelo cátodo. No caso de concretos de baixa resistividade elétrica, a distância entre o ânodo e o cátodo pode chegar a alguns metros (MCCARTER e VENNESLAND, 2004 *apud* ARAÚJO *et al.*, 2013).

Então, independentemente de a magnitude da corrente galvânica depender primariamente no valor de diferença de potencial dos eletrodos submersos em um eletrólito e da cinética do ânodo e do cátodo, também é afetada pela resistividade do eletrólito e o teor de oxigênio disponível. Esses fatores podem reduzir a corrente galvânica a zero (HUAFU *et al.*, 2015).

4. SENSOR GALVÂNICO

Existem vários tipos de sistemas de macrocélulas usados para monitorar o avanço da corrosão das armaduras em estruturas de concreto ou o tempo até a iniciação da corrosão: através de ânodos isolados ou usando múltiplos ânodos em profundidades diferentes (chamados arranjos de escada) (MCCARTER, VENNESLAND, 2004).

A medição da corrente galvânica criada entre os ânodos, instalados a diferentes profundidades da camada de cobertura, e o cátodo permite conhecer o instante em que ocorre a despassivação do metal que funciona como ânodo por contaminação do concreto. O monitoramento 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 (ANDRADE *et al.*, 2008). Quando a frente de despassivação é detectada nos pequenos eléctrodos de aço pode ser decidida a aplicação de sistemas de proteção adicionais como a aplicação de revestimentos de proteção (PEREIRA e SALTA, 2012).

Em geral, como ânodos, utilizam-se barras de aço carbono. Como cátodo utilizam-se aços inoxidáveis altamente resistentes à corrosão e aos íons cloreto, ou ainda titânio revestido com platina ou com mistura de óxidos de metais nobres (MMO) (ARAÚJO *et al.*, 2013). Por definição, em uma macro-célula, o ânodo e o cátodo são espacialmente separados e o termo "macro" tenta indicar que a distância entre ânodo e cátodo é de natureza macroscópica e pode atingir vários decímetros (ANGST, U. e BUCHLER M., 2015). Alguns sensores disponíveis no mercado estão mostrado na Figura 1. Comercialmente segundo Araújo *et al.*, (2013) o número de fornecedores ainda pode ser considerado limitado.

Figura 1: Sensores galvânicos comerciais. De esquerda a direita e de cima para baixo: Sensor escada (Anode Ladder), Sensor de anéis expansivos (Expansion Ring Anode), Sensor 900 (Concrete Multi-Depth Sensor, Model 900) e Sensor de múltiplos elétrodos (CorroWhatch -Force Technology)



De acordo com Araújo *et al.*, (2013) no Sensor escada (Anode Ladder) da empresa Sentsortec e no Sensor 900 (*Concrete Multi-Depth Sensor, Model 900*), da empresa *Rohrback Cosasco Systems*, as barras de aço-carbono constituintes do ânodo são retas e estão posicionadas em paralelo. No sensor de anéis expansivos (*Expansion Ring Anode*), também da empresa *Sentsortec* em lugar de barras são usados anéis que estão posicionados uns sobre os outros.

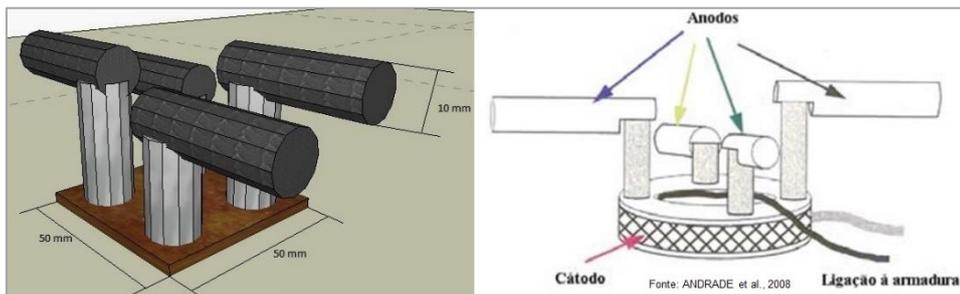
No Sensor escada e no Sensor de anéis expansivos, uma barra de titânio revestido com MMO é usada como cátodo, sendo esta posicionada na proximidade das barras de ânodo quando da instalação do sensor. No sensor 900, o cátodo são as barras de aço inoxidável, as quais estão posicionadas no mesmo alinhamento das barras do ânodo.

No sensor de múltiplos elétrodos, as barras do ânodo são retas e estão posicionadas em altura e ângulos diferentes em relação a uma base circular. No sensor de múltiplos elétrodos, uma tela de titânio ativado, fixada na base de apoio das barras do ânodo, é usada como cátodo (FORCE TECHNOLOGY, 2012) e um cabo que permitirá realizar uma ligação à armadura da estrutura para que esta funcione como último ânodo do sensor.

Assim sendo, este sensor quando instalado de forma isolada numa estrutura admite a realização de 5 medições de intensidade de corrente galvânica (ANDRADE *et al.*, 2008). O sensor de múltiplos elétrodos foi desenvolvido para o monitoramento do risco de corrosão em construções novas, como túneis, pontes, fundações e outros tipos de construções (FORCE TECHNOLOGY, 2012).

Tomando como referência este sensor de múltiplos eletrodos foi confeccionado um sensor galvânico nos laboratórios do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná com materiais brasileiros. No ânodo foram usadas barras de aço-carbono (CA 50) em diferentes alturas e instalados sobre uma placa de cobre (cátodo). Um esquema do sensor galvânico confeccionado é mostrado na Figura 2. Este projeto é um dos trabalhos que estão sendo desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa “Patologia e Reabilitação das construções”, o qual engloba representantes de várias instituições nacionais e internacionais.

Figura 2: Sensor galvânico de múltiplos eletrodos. De esquerda a direita: Sensor confeccionado nos laboratórios da UFPR e Sensor CorroWatch Multisensor.



Fonte: Autores.

Fonte: Andrade *et al.*, 2008.

Teoricamente, o potencial de um par (E_{PAR}) é resultado da combinação dos potenciais dos metais envolvidos, conforme Equação 2, é determinado pelo ponto onde a corrente anódica ou de oxidação é igual à corrente catódica ou de redução; esta condição leva à polarização de ambos os metais para um potencial combinado (E_{PAR}) e assegura a estabilidade desse último no tempo (PAWLICK *et al.*, 1998).

$$E_{célula} = E_{cátodo} - E_{ânodo} \quad (2)$$

A estabilidade do potencial do par está em função da relação entre a área do cátodo e a área do ânodo (A_c/A_a). O efeito da área no potencial do par segue a tendência da teoria de mistura de potenciais; a qual expõe que um cátodo de grande área pode conduzir o potencial do par para valores mais nobres. De maneira semelhante, um ânodo com uma área grande tende a puxar o potencial do par na direção ativa (PAWLICK *et al.*, 1998). Sendo que, quanto maior for a relação entre a área do eletrodo que atua como cátodo e do eletrodo que atua como ânodo, mais intensa será a corrosão do ânodo (SOUSA, 2014). Através da relação entre as áreas pode-se otimizar o período de vida útil do sensor.

5. ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL A PARTIR DA RESPOSTA DO SENSOR

O concreto armado é considerado um material que possui alta durabilidade, quando sua armadura está em estado passivo, ou seja, não há presença de agentes agressivos na camada de cobrimento do concreto. A partir do momento que os agentes agressores como o dióxido de carbono que diminui o pH da solução dos poros, ou a presença de íons cloretos em teores críticos, penetram na camada de cobrimento ocorre o fenômeno da despassivação, causando a

deterioração do concreto armado, comprometendo de forma direta a durabilidade e por consequência, a diminuição de sua vida útil.

Determinar o período de vida útil da estruturas logo em sua concepção evita grandes investimentos que usualmente são necessários para recuperação ou substituição da estrutura ou parte dela. Resulta interessante associar essa previsão na fase de projeto com o uso de sensores para monitoramento contínuo. Isso porque, os sensores permitiram avaliar avaliação o desempenho da estrutura com base em valores diretamente medidos in situ, permitindo a verificação das teorias de comportamento estrutural consideradas na modelação e análise dessa estrutura, bem como a detecção precoce de eventuais deficiências estruturais e de durabilidade frente ao meio ambiente em que esteja a estrutura inserida.

Com o intuito de estimar o tempo de vida útil, é necessário conhecer qual o tipo de degradação à qual a estrutura está submetida; é preciso saber as suas causas, para que sejam tomadas as medidas necessárias a evitá-las. Além disso, é importante conhecer o seu nível de ocorrência na estrutura, para a manutenção ou recuperação adequada.

Portanto, se faz necessário utilizar um modelo, existem inúmeros modelos disponíveis, cada um possui parâmetros e métodos de obtenção do resultado bem específicos. O modelo escolhido pelo grupo para este trabalho é o modelo simplificado da difusão de Tutti (1982), mostrado na Equação 3, que embora não seja tão preciso quanto os modelos mais novos, a grande maioria dos modelos mais modernos são variações em função deste modelo simplificado segundo Raisdorferet *al.*, 2015. O modelo também é conhecido como modelo da raiz quadrada do tempo (MEDEIROS *et al.*, 2011).

$$x = k\sqrt{t} \quad (3)$$

Onde x é a profundidade de penetração do agente agressivo; k coeficiente de durabilidade que engloba todas as variáveis dependentes da agressividade ambiental e do próprio concreto e t é o tempo em anos. Conhecendo, os valores de K_{CO_2} e K_{Cl^-} , é possível prever, o tempo que o agente agressivo tardará em chegar até a armadura: o tempo de iniciação. É possível calcular a constante K_{CO_2} ou K_{Cl^-} de uma estrutura conhecendo a idade da estrutura e o perfil de penetração das concentrações de cloreto ou o frente de carbonatção (MEDEIROS *et al.*, 2011).

Dentro deste contexto, um sensor galvânico é uma ferramenta útil já que a profundidade de penetração dos agentes agressivos pode-se determinar a partir das profundidades dos ânodos do sensor no interior da estrutura de concreto armado. Os cobrimentos das barras do sensor que funcionam como ânodos são menores do que a armadura geralmente. Um sensor galvânico emitirá uma alerta no instante em que ocorre a despassivação do ânodo instalado a menor profundidade com relação à superfície exposta de concreto.

Por exemplo, no momento que seja registrado um aumento significativo da corrente galvânica em um ânodo de um sensor galvânico como o mostrado na Figura 2, com cobertura de 1,6 cm, pode-se afirmar que a profundidade de penetração dos agentes agressivos naquela área da estrutura é 16mm (X_{Cl^-}). Assumindo que a estrutura no momento da vistoria tenha 12 anos de idade (t_x)

e trate-se de contaminação por íons cloretos, o coeficiente é obtido através da Equação 4 fundamentada na Equação 3. De forma tal que K_{Cl^-} é igual a $4,62 \text{ mm}/(\text{ano})^{-1/2}$.

$$K_{Cl^-} = \frac{X_{Cl^-}}{\sqrt{t_x}} \quad (4)$$

Se o cobrimento da estrutura é 30 mm (x) segundo dados de projeto, o tempo de iniciação (t_i) da corrosão por íons cloretos na armadura pode-se determinar através da Equação 5 também fundamentada na Equação 3. Dessa forma, t_i seria 42 anos. A partir desses dados pode-se estimar o tempo para a despassivação da armadura (t_p) conforme a Equação 6, tal que t_p seria igual a 30 anos.

$$t_i = (x/K_{Cl^-})^2 \quad (5)$$

$$t_p = t_i - t_x \quad (6)$$

Assim, através do sensor galvânico é possível realizar um prognóstico precoce da estrutura com base em parâmetros medidos diretamente nela e em tempo real antes mesmo da aparição fissuras, manchas de corrosão, deslocamentos de cobrimentos e deformações excessivas entre outras deteriorações típicas de um estado avançado de corrosão da armadura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão bibliográfica pode-se constatar que um sensor galvânico é um equipamento de monitoramento da corrosão através do qual mede-se a corrente galvânica que circula em um circuito formado por dois metais distintos com potencial eletroquímico diferentes, em contato através da solução aquosa presente nos poros do concreto. Para a medição da corrente galvânica usa-se a técnica *Zero Resistance Ammeter (ZRA)*. O valor da corrente galvânica estará em função dos metais envolvidos no par galvânico e é influenciado por fatores relacionados com a durabilidade e características do concreto, a saber: resistividade do concreto, teor de umidade, teor de oxigênio, pH do material e temperatura.

Através dos sensores galvânicos com múltiplos eletrodos instalados a profundidades menores do que o cobrimento estipulado por projeto para a armadura principal pode-se acompanhar a progressão de agentes agressivos para o interior da estrutura. Quando a frente de despassivação é detectada nos pequenos eléctrodos de aço não ligado instalados no concreto de cobrimento a diferentes profundidades, pode ser feito um prognóstico do tempo que levará para a armadura sofrer corrosão através de modelos de previsão de vida útil. Assim, a partir da análise dos resultados obtidos decidir a aplicação de sistemas de proteção adicionais.

Entretanto, a forma de aplicação, princípio de funcionamento e interpretação de resultados são aspectos ainda passíveis de discussão já que possuem várias limitações teóricas e práticas que dificultam a normatização desses equipamentos para o monitoramento contínuo de estruturas. Na medida que seja melhor compreendida a forma de funcionamento desses sensores menores

os custos associados à importação de equipamentos comerciais já que poderiam ser confeccionados no país com materiais brasileiros.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LAME-DCC-UFPR), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC-UFPR), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

NERY, G. **Boletim Técnico: Monitoração na construção civil B5**. *Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*.ALCONPAT. p 1-18. 2013

INAUDI, D. *Integrated Structural Health Monitoring Systems for Bridges*. In: ASCP'09 - 1o Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP. Lisboa. 2009. **Anais**. p 1-14

M. TORRES-LUQUE, E. BASTIDAS-ARTEAGA, F. SCHOEFS, M. SÁNCHEZ-SILVA, J.F. OSMA. Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges. **Construction and Building Materials**. ed Elsevier, 2014. v 68. p 68 -81

MADRID, M.M; LÓPEZ, T.P.; MORENO, A. V. **El fenomeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado**. *Publicación técnica No.182. Secretaria de comunicaciones y transporte. Instituto mexicano del transporte*. p 1-88. 2001

PORTELLA B. MARIANA D'OREY GAIVÃO. **Avaliação e monitoramento dos mecanismos de deterioração do Concreto exposto aos íons cloreto e sulfato e o efeito da Adição de nano-Fe₃O₄ por espectroscopia de impedância Eletroquímica**. Dissertação de mestrado. Universidade federal do Paraná. Paraná. 2014

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; YAZIGI, R.; MEDEIROS, M. H. F. Carbonation depth in 57 years old concrete structures. **Steel and Composite Structures**, v. 19, p. 953-966, 2015.

HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E. ; HELENE, P. ; ISAIA, G. C. High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. **Journal of Materials in Civil Engineering** , v. 25, p. 411-418, 2013.

JIN, MING; JIANG, LINHUA; ZHU, QIAO. Monitoring chloride ion penetration in concrete with different mineral admixtures based on embedded chloride ion selective electrodes. **Construction Building Materials**. v 143. Páginas 1-5. 15 julho, 2017.

CASCUDO, OSWALDO. Corrosão de armaduras em concreto. In: **O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas**. Primeira versão. 1997. cap 2. p 39-61.

CASCUDO, OSWALDO. Potenciais de corrosão. In: **O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas**. Primeira versão. 1997. cap 8. p 137-153.

SILVA, PEDRO NETO ROBERTO. Ataque em estruturas de concreto por ação de cloretos. **Linked**. 2016. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/ataque-em-estruturas-de-concreto-por-a%C3%A7%C3%A3o-cloretos-roberto-silva>> Acesso em: janeiro, 2017.

ANDRADE, CARMEN; FÉLIX, CARLOS; FIGUEIRAS, HELENA; COUTINHO, JOANA SOUSA. Desempenho do kit-sensor de corrosão na monitorização da durabilidade de estruturas de betão. In: BE2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural. 5,6,7 novembro / 2008. Guimarães. **Anais**. p 1-10.

MCCARTER, W. JOHN; VENNESLAND, ØYSTEIN. Sensor systems for use in reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v 18, p 351–358. 2004

RIBEIRO, VÉRAS. DANIEL.; CUNHA, TEIXEIRA. MANUEL PAULO. Técnicas de Corrosão em **Estruturas de Concreto Armado**. 2014. cap 8, p 215.

ARAÚJO, ADRIANA D.; PANOSSIAN, ZEHBOUR; PORTELLA, PEDRO D.; BÄSSLER, RALPH. Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto: sensor galvânico. **Revista Técnica (PINI)**. Edição 194. Maio / 2013

LACERDA, M. D. MARIANNA; MÜLLER RENATA. Uso de sensor de taxa de corrosão instantânea como técnica de monitoramento da corrosão em estruturas de concreto. **Obra24horas**. Entrada em: 17/11/2015. Disponível em: <<http://www.obra24horas.com.br/artigos/concreto/uso-do-sensor-de-taxa-de-corrosao-instantanea-como-tecnica-de-monitoramento-da-corrosao-em-estruturas-de-concreto>>. Acesso em: janeiro / 2017.

PEREIRA, ELSA V.; FIGUEIRA, RITA B.; SALTA, MARIA MANUELA L.; FONSECA, INÊS TEODORA ELIAS D. A Galvanic Sensor for Monitoring the Corrosion Condition of the Concrete Reinforcing Steel: Relationship Between the Galvanic and the Corrosion Currents. **Journal of Sensor**. n 9. p 8391-8398. 2009. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/sensors>. DOI: 10.3390/s91108391; ISSN 1424-8220. Acesso em: janeiro, 2017

PARK, ZIN-TAEK; CHOI, YOON-SEOK; KIM, JUNG-GU; CHUNG, LAN. Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structure. Part 1. Laboratory tests to correlate galvanic current with actual damage. **Cement and Concrete Research**, 33. p 2057 – 2062, 2003.

PARK, ZIN-TAEK; CHOI, YOON-SEOK; KIM, JUNG-GU; CHUNG, LAN. Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structure. Part 2. Laboratory electrochemical testing of sensors in concrete. **Cement and Concrete Research**, 35. p 1814 – 1819. 2005.

PEREIRA, ELSA V.; SALTA, M. MANUELA. Monitorização permanente da corrosão em estruturas de betão armado. Resultados a longo prazo. In: Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012. FEUP. 24-26 de outubro de 2012. Portugal. **Anais**. p 1-10.

M. RAUPACH; P. SCHIESSL. Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures. **NDT E INTERNATIONAL**. 34(6). 2001. p. 435-442.

HUAFU PEI, ZONGJIN LI, JINRUI ZHANG, QIAN WANG. Performance investigations of reinforced magnesium phosphate concrete beams under accelerated corrosion conditions by multi techniques. **Construction Building Materials**. v 93. p 982-994. 2015.

ANGST, U. AND BUCHLER, M. On the applicability of the Stern–Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion. **Materials and Corrosion**, 66, No. 10. 2015.

FORCE TECHNOLOGY. **Catalogue for Products related to Corrosion Monitoring in Concrete**, 2012.

PAWLICK, L.A.; STONER, GLEN E.; CLEMEÑA, GERARDO G. Development of na embeddable reference electrode for reinforced concrete structures. **Virginia transportation research council**. 1998.

RAISDORFER, J. W.; SOUZA, D. J.; KRUCHELSKI, N.; NIKKEL, S.; TORRE, E. M.; LENCZUK, B.T.; MEDEIROS, M. H. F. Carbonatação – previsão da vida útil das obras de artes especiais. In: 4ª ExpoPavimentação. 18 ao 21 de agosto do 2015. Foz de Iguaçu-PR. **Anais**. p 1 – 14.

MEDEIROS, MARCELO HENRIQUE FARIAS DE.; ANDRADE, JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA.; HELENE, PAULO. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: **Concreto: Ciência e tecnologia**. ed IBRACON. 2011. cap 22.

ALMEIDA, P. A. O.; NETO, G. N. A.; FIGUEIREDO, E. P. Monitoração de estruturas de concreto do livro Concreto: Ciência e tecnologia. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v II. 2011. cap 35. p 1232-1281.

SANTOS, L. O. Monitoramento e ensaio de pontes. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. 21,22 e 23 de Maio / 2014. Rio de Janeiro. **Anais**. p 1-14. 21-23.

HOOKE, J. M.; VARMA, S.; PROCTOR, G. D. Proceedings of the National Bridge Management. In: Inspection and Preservation Conference. St Luis Missouri. **Anais** 01-02 November del 2011