

MEDIDAS DE POTENCIAL DE CORROSÃO DE ESTACAS DE AÇO CRAVADAS EM SANTOS

Luciano Soares de Oliveira – Coordenador do Segmento de Fundações

Fabio Domingos Pannoni, Ph.D. – Consultor Técnico

RESUMO

A corrosão de estacas de aço em solos naturais é considerada, em geral, insignificante. Ainda assim, a introdução de técnicas que permitam avaliar in situ o desempenho destas estacas frente à corrosão tem enorme importância prática. Este trabalho descreve resultados da medida do potencial de corrosão de estacas de aço cravadas em diferentes locais da cidade de Santos, SP. Os resultados sugerem que a baixa disponibilidade de oxigênio no solo aliada à formação de uma película protetora constituída de produtos de corrosão associados às partículas de solo são os responsáveis por este desempenho excepcional das estacas de aço.

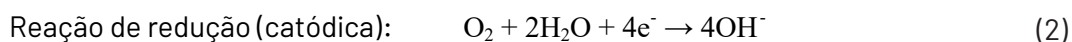
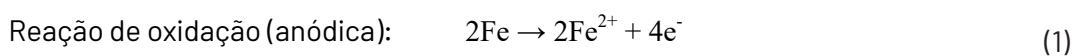
ABSTRACT

Corrosion of steel piles in natural soil is considered, in general way, negligible. Even so, the introduction of any technique to assess their performance against corrosion, in situ, has enormous practical importance. This paper describes corrosion potential measurements of steel piles driven in different locations in the city of Santos, SP. The results suggest that the low oxygen availability in the soil coupled with the formation of a protective film consisting of corrosion products associated with soil particles are responsible for this exceptional performance.

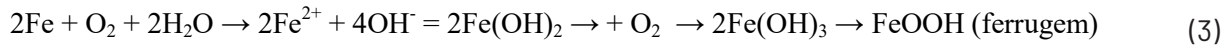
INTRODUÇÃO

Estacas de aço têm sido utilizadas em todo o mundo há mais de 120 anos e sua durabilidade tem excedido todas as estimativas teóricas de durabilidade, especialmente em solos muito agressivos ou contaminados com produtos químicos. Esta extraordinária resistência tem sido justificada pela pequena difusão do oxigênio no solo.

Aços estruturais expostos à atmosfera e ao solo apresentam, fundamentalmente, o mesmo mecanismo de corrosão – conhecido como mecanismo eletroquímico. Este mecanismo pressupõe a existência de reações de oxidação e de redução ocorrendo sobre o mesmo substrato metálico. Em ambientes aquosos (eletrólitos) cujo pH seja superior a 4, teremos [1]:



Estas regiões podem estar separadas por micrometros ou mesmo quilômetros. Enquanto elétrons fluem dentro do metal (das regiões anódicas para as catódicas), íons ferrosos e hidroxilas fluem no eletrólito, precipitando, após seu encontro, o hidróxido ferroso que, na presença de oxigênio dissolvido (no eletrólito), se converte à hidróxido férrico, insolúvel. Este, por fim, lentamente se transforma em ferrugem. A reação resultante pode ser descrita de modo sucinto como:



A Figura 1 ilustra o fenômeno do mecanismo eletroquímico [2]:

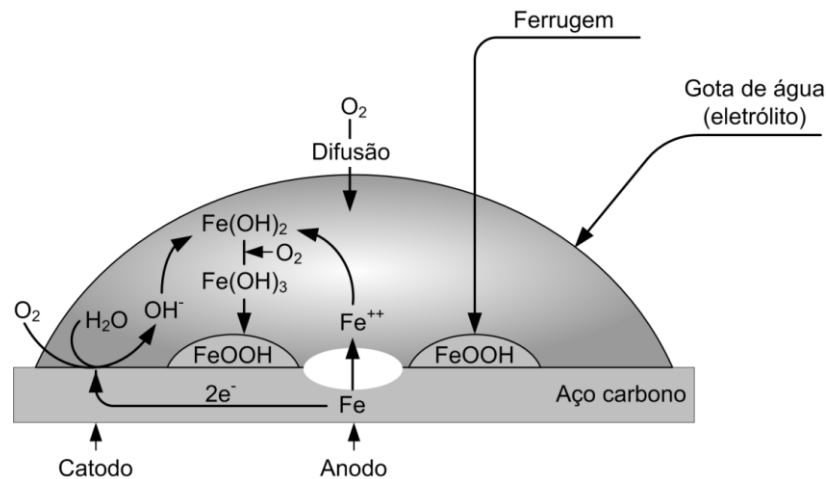


Figura 1: Representação do mecanismo eletroquímico. As reações anódica e catódica operam graças a um fluxo de elétrons no metal e de íons no eletrólito [2].

A OXIGENAÇÃO DO SOLO

O que diferencia a corrosão do aço na atmosfera e no solo é a transferência de massa dos reagentes e produtos de reação até aço, especialmente o oxigênio. Existem 3 mecanismos básicos de aeração do solo:

1. O oxigênio dissolvido na água de chuva percola o solo. A contribuição deste mecanismo é considerada como sendo pequena, devido à baixa solubilidade do oxigênio na água (0,028 ml/ml, à 25°C e 1 atm);
2. Fluxo de massa dos gases, devido às alterações de pressão, de 0,1 - 0,2 kPa, criado por turbulência dos ventos sobre a superfície do solo;
3. Difusão das moléculas de gás através de porosidades existentes no solo.

A difusão das moléculas de gás (O_2) através das porosidades do solo é considerada como sendo o mecanismo principal, sendo o fluxo difusivo (J_g) dado por [3]:

$$J_g = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4)$$

onde J_g é o volume de gás que atravessa uma área unitária perpendicular à direção da difusão por unidade de tempo, $\partial C / \partial z$ é a mudança da concentração de gás C (ml/ml de espaço preenchido por ar) por unidade de distância z (profundidade do solo) e D é o coeficiente de difusão do gás. Quando combinada aos requisitos para conservação de massa, a equação (4) leva à equação de continuidade (5):

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial J_g}{\partial z} R_t \quad (5)$$

onde R_t é a velocidade de consumo do O_2 . A concentração do O_2 é expressa como ml gás/ml ar e R_t em ml gás/cm³ solo/s. Combinando (4) e (5), temos:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial C}{\partial z^2} - R_t \quad (6)$$

Assumindo que condições de equilíbrio sejam atendidas (isto é, $\partial C / \partial z = 0$) e que R_t não mude significativamente com a profundidade, a integração de (6) nos fornece a alteração da concentração do O_2 (ΔC) da fase gasosa com a profundidade z :

$$\Delta C = \frac{R_t z^2}{2D_e} \quad (7)$$

Para solos úmidos, bem agregados, nos quais $\varepsilon = 0,2$ e $\alpha = 0,4$, podemos substituir $R_t = 2 \times 10^{-7}$ ml gás/cm³ solo/s, $z = 100$ cm e $D_e = 0,0184$ cm²/s, obtendo como resultado o valor da alteração da concentração de O_2 entre a superfície e 1 m de profundidade de 0,054 ml/ml de volume de ar. Utilizando a Lei de Dalton (a Lei das Pressões Parciais), esta mudança mostra-se correspondente à alteração da pressão parcial de O_2 de 0,054 bars (5 kPa). Assim, a pressão parcial de oxigênio cairá de 21 kPa (na superfície) para 16 kPa à 1m de profundidade. Assim, menos e menos oxigênio será encontrado com o aumento da profundidade.

Abaixo da linha d'água, a quantidade de oxigênio disponível é ainda menor. A difusão gasosa é ainda mais complicada em solos pouco drenados e saturados em água por períodos consideráveis ao longo do ano – como é o caso dos solos de Santos, SP. Neste caso, a difusão ocorre através do ar e da água em graus variados. A concentração de oxigênio na água em equilíbrio com a pressão parcial de oxigênio na atmosfera à 25°C é de $0,21 \times 0,028 = 0,0059$ ml O_2 /ml de água – um valor consideravelmente baixo. Assim, para que a reação catódica possa ocorrer, o oxigênio deverá se difundir através da água – um processo lento, ocasionado pela baixa solubilidade e pequeno coeficiente de difusão do oxigênio na água ($2,6 \times 10^{-5}$ cm²/s).

O que ocorrerá na região de variação do lençol d'água? Nestas regiões, ambientes anaeróbicos são desenvolvidos, no centro de agregados maiores que certo tamanho, quando estes agregados se mantêm molhados por certo período de tempo. Assumindo que o agregado seja esférico (assim, o raio r é substituído por z) e que condições de equilíbrio possam ser aplicadas, a equação (6) pode ser integrada, fornecendo:

$$r = \sqrt{\frac{6\Delta C D_e}{R_r}} \quad (8)$$

Onde ΔC é a diferença de concentração de O_2 entre a superfície do agregado e o seu centro, D_e é o coeficiente de difusão efetivo do O_2 através da fase aquosa e R_r é o coeficiente de consumo de oxigênio dentro do agregado. Se a pressão parcial do O_2 no espaço de ar na superfície do agregado for assumido como sendo 21 kPa, enquanto que no centro do agregado ela for zero, a equação (6) pode ser resolvida para uma faixa de valores de R_r , fornecendo o raio mínimo do agregado em cujo centro ocorre condições anaeróbicas. Quando D_e tem o valor de $1,5 \times 10^{-5}$ cm²/s, o resultado indica que para raios de agregado menor do que 1,0 cm, sempre haverá condições anaeróbicas no centro do agregado.

Finalmente, o que se passa na interface aço-solo? A reação global que descreve o enferrujamento de uma estaca cravada em um solo com $\text{pH} \approx 7-8$ pode ser descrita pelas mesmas reações descritas anteriormente (eq. 1 – 3).

Desde que haja livre-trânsito dos íons no solo, teremos a combinação, na fase aquosa contígua à estaca, dos íons Fe^{2+} e OH^- , formando o $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Havendo algum oxigênio disponível, esta espécie química será rapidamente transformada em FeOOH (ferrugem) sobre a superfície metálica. Assim, assume-se, a princípio, que a velocidade de corrosão seja controlada tanto pelo processo anódico quanto catódico [4].

Para que a corrosão aconteça, entretanto, o agente oxidante deve chegar à superfície do aço. Do mesmo modo, os produtos de reação devem ser eliminados da superfície metálica através do transporte para o interior do eletrólito, isto é, da água existente entre as partículas constituintes do solo. Se o transporte de massa dos reagentes ou produtos for lento, a concentração de espécies químicas próxima da superfície da estaca será consideravelmente diferente daquela verificada no interior do solo, distante da estaca.

Sob estas novas condições, as reações envolvidas no processo de corrosão acabam por consumir espécies químicas que, devido à difusão, *não são repostas rapidamente*. Os primeiros produtos de corrosão formados, precipitados entre as partículas constituintes do solo, no eletrólito, dificultam em muito a difusão das espécies envolvidas no processo de corrosão. Devido ao fato de que a velocidade da reação catódica é proporcional à concentração do reagente na superfície metálica, a velocidade da reação será limitada pela diminuição da concentração do oxidante. Desse modo, o processo de corrosão será totalmente controlado pelo transporte de massa.

Três mecanismos contribuem para o transporte de massa no interior do eletrólito: difusão, convecção e migração. Para espécies neutras tais como o oxigênio dissolvido e para espécies iônicas presentes em pequenas quantidades no solo, as contribuições da migração e da convecção são desprezíveis. O transporte ocorre, basicamente, por difusão. A descrição do transporte por difusão é feita, em geral, pelo modelo da camada de difusão de Nerst (uma simplificação da Equação de Fick), que postula que o volume de eletrólito pode ser dividido em duas regiões.

O oxidante (O) será transportado à uma velocidade que é proporcional ao gradiente do perfil concentração-distância. Este é o postulado da primeira lei de Fick, que se aplica sob condições de equilíbrio, isto é, a concentração do oxidante e o gradiente de concentração são constantes com o tempo (equação 4). A linha contínua na Figura 2 representa o perfil de concentração calculado pela Lei de Fick [1]:

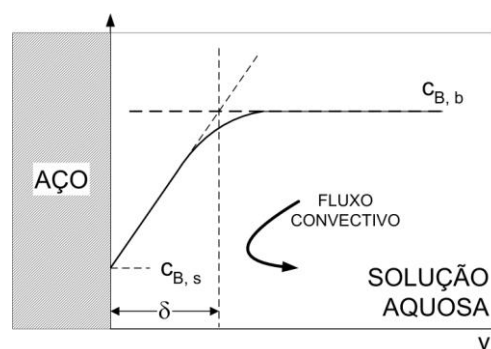


Figura 2: Perfil concentração-distância para o reagente catódico O, exaurido na superfície da estaca metálica [1]. A linha sólida mostra o tratamento de Fick, e a linha tracejada indica a aproximação conhecida como Camada de difusão de Nerst.

Uma análise simplificada pode ser obtida através da linearização do perfil concentração-distância, de acordo com o tratamento conhecido como camada de difusão de Nerst [1]. A resistência ao transporte de massa acontece dentro da camada de difusão e a linearização fornece uma clara demarcação na distância d a partir da superfície metálica, de modo que, para $x > \delta$, a concentração do oxidante no solo é mantida por processos de convecção (que não ocorrem de modo apreciável). Em contraste, para $x \leq \delta$, o reagente O é transportado até a superfície somente por difusão. Utilizando o tratamento simplificado, a eq. (4) pode ser escrita como:

$$J = \frac{-D(C_{\text{superfície}} - C_{\text{seio}})}{\delta} \quad (9)$$

onde $C_0^{\text{superfície}}$ é a concentração do oxigênio (reagente catódico) na superfície $x = 0$ e C_0^{seio} é a concentração para $x \geq \delta$. Para que o estado de equilíbrio seja mantido, todo o reagente transportado deve reagir eletroquimicamente, gerando uma corrente:

$$\frac{i_{\text{catódico}}}{nF} = \frac{-D(C_0^{\text{superfície}} - C_0^{\text{seio}})}{\delta} \quad (10)$$

Sob a condição limite $C_0^{\text{superfície}} \rightarrow 0$, uma corrente máxima é obtida:

$$(i_{\text{catódico}})_{\text{limite}} = \frac{nFD_0 C_0^{\text{superfície}}}{\delta} \quad (11)$$

Como esta é a máxima corrente catódica que pode fluir, ela também representa a máxima velocidade de corrosão que pode ser atingida:

$$(i_{\text{corrosão}})_{\text{máximo}} = (i_{\text{catódico}})_{\text{limite}} = \frac{nFD_0 C_0^{\text{superfície}}}{\delta} \quad (12)$$

A equação acima indica que, para uma reação catódica controlada pelo transporte de massa, a velocidade é diretamente proporcional à concentração do reagente catódico e é inversamente proporcional à espessura da camada de difusão, que é determinada pela velocidade do fluido.

Um ponto fundamental deve ser ressaltado: para que a corrosão da estaca aconteça, em solos cujo pH esteja situado entre 4 e 10 (isto é, quase que a totalidade dos solos naturais encontrados), torna-se necessária a presença simultânea de água e oxigênio. *Na ausência de um deles, a corrosão não acontecerá.*

É justamente esta a situação verificada na quase totalidade dos solos naturais. A pressão parcial de oxigênio na camada de solo "seco" (acima da linha d'água) é menor do que aquela encontrada na atmosfera contígua à superfície do solo; a concentração de O_2 dissolvido na água, abaixo da linha d'água é diminuta. Finalmente, a precipitação de componentes férricos entre as partículas de solo contíguas à estaca promove uma enorme dificuldade adicional – os reagentes necessários à ocorrência do processo catódico (redução do oxigênio) não podem atingir a superfície metálica. São estes três fatores os responsáveis pela resistência à corrosão das estacas de aço. A Figura 3 resume este conceito.

Além dos fatores expostos acima, mais um merece atenção. Quando cravadas em solos granulares, pouco ou medianamente compactados, como as areias finas, solos arenosos siltosos ou argiliosos, as estacas de aço causam uma pequena densificação destes solos, na medida em que o volume da

estaca acarreta certa redução do índice de vazios contíguo à estaca. Algum excesso de poropressão pode ocorrer durante o processo de cravação, e a dissipação desses excessos ocorrerá após a execução da estaca, contemplando o processo de densificação. O processo de cravação destas estacas, próximas entre si, em grupos, também auxilia na redução da porosidade e compressibilidade do solo dentro e em torno do grupo. Todo este efeito é, assim, benéfico tanto do ponto de vista do comportamento da estaca (obtem-se maior capacidade de carga e menos recalques) quanto do ponto de vista da resistência frente à corrosão (diminuindo o volume para a difusão de espécies e para a precipitação de compostos férricos - produtos da corrosão da estaca).

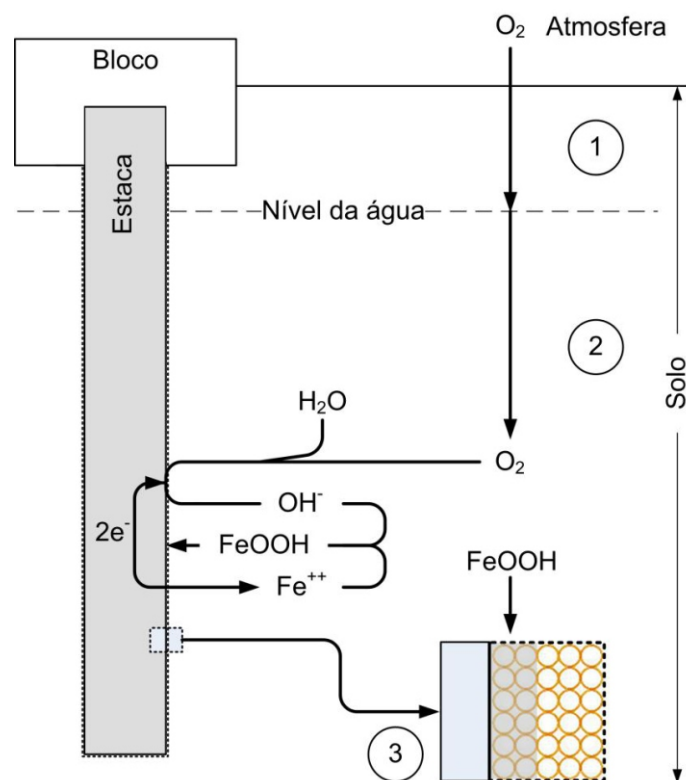


Figura 3: Resumo dos principais processos envolvidos na proteção frente à corrosão de estacas cravadas em solos naturais: <1>- A quantidade de oxigênio presente no primeiro metro de solo decai rapidamente devido à difusão (a pressão parcial de oxigênio cairá de 21 kPa na superfície para 16 kPa); <2>- A quantidade de oxigênio dissolvida na água é diminuta (0,0059 ml O₂/ml de água) e é pequeno o seu coeficiente de difusão na água (2,6 x 10⁻⁵ cm²/s); <3>- A precipitação de produtos de corrosão entre as partículas do solo contíguo à estaca cria uma barreira à difusão das espécies envolvidas no processo de corrosão - especialmente o oxigênio.

Finalmente, o que diz a Norma Brasileira a respeito da corrosão das estacas metálicas? A NBR 6122, em sua última versão, prescreve, para fins de proteção da estaca frente à corrosão, uma espessura de sacrifício escolhida em função do tipo e da agressividade do solo. Estacas de aço total e permanentemente enterradas em solos naturais e aterros controlados, independentemente da situação do lençol d'água, podem dispensar tratamento especial, desde que seja descontada uma espessura de sacrifício mínima de 1,0 mm. A parte superior da estaca, que fica desenterrada, deve ser obrigatoriamente protegida através do encamisamento em concreto ou outro recurso de proteção.

ARRANJO EXPERIMENTAL

O acompanhamento da evolução da corrosão ao longo do tempo das estacas de aço foi feito através da medida de potencial de corrosão (conhecido também como potencial de circuito aberto) e corresponde a uma diferença de potencial desenvolvida entre a estaca e um eletrodo de referência (meia cela) posicionado em solo próximo da estaca. Este potencial nos dará indícios do comportamento frente à corrosão da estaca em dado momento.

Um metal sob corrosão, imerso em uma solução de baixa resistividade elétrica, assume, após certo tempo, um potencial característico, conhecido como potencial de corrosão. O potencial de corrosão é um dos parâmetros eletroquímicos de mais fácil determinação experimental. Como se trata de um potencial assumido pelo metal que compõe a estaca, é suficiente proceder a medida direta desse potencial com relação a um eletrodo de referência, conforme ilustrado na Figura 4. O eletrodo cobre-sulfato de cobre é, quase sempre, o eletrodo escolhido e é comumente empregado na medição do potencial de estruturas enterradas.

O procedimento normal para a medida é o de conectar o terminal negativo de um voltímetro de alta impedância (capaz de medir pequenas tensões sem consumir corrente) à estaca, e o terminal positivo a uma meia cela constituída de um eletrodo de cobre/sulfato de cobre (eletrodo de referência), que é colocado próximo da estaca. O eletrodo Cu/CuSO_4 atua como catodo e a estaca como anodo. A diferença de potencial entre a meia cela de referência e a estaca é, em geral, de $-0,55\text{V}$ quando as conexões são feitas. A leitura do voltímetro indica, assim, o potencial de circuito aberto estrutura-solo [7].

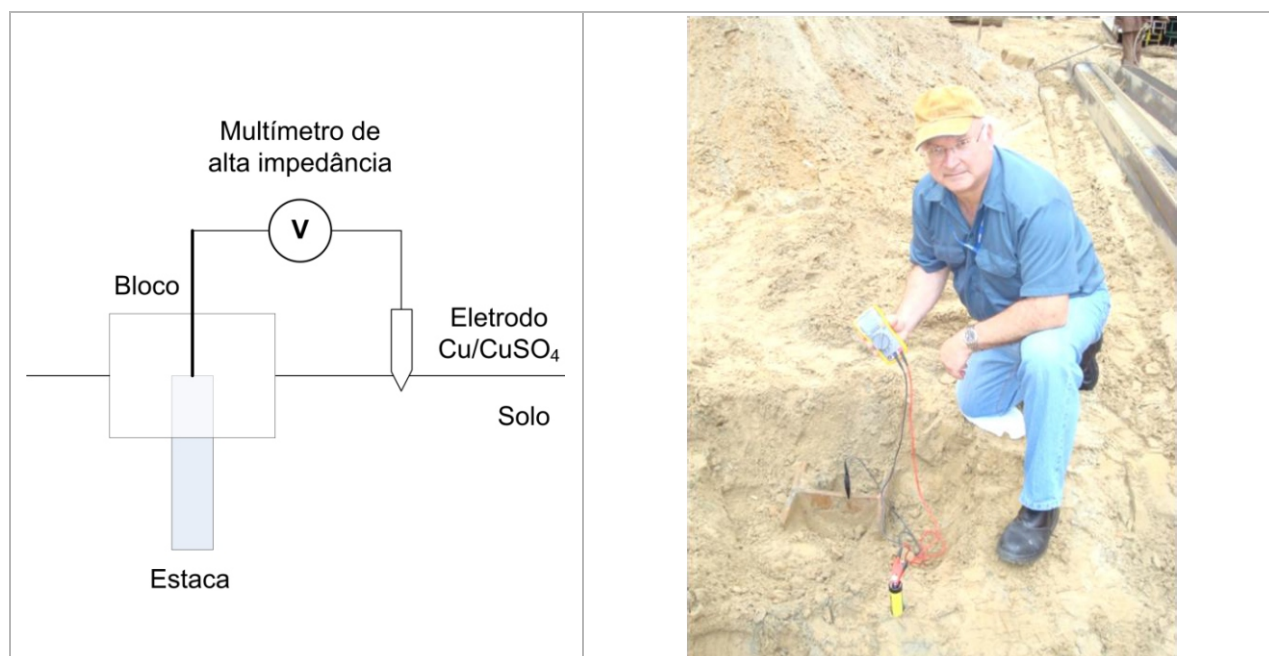


Figura 4: Arranjo experimental para a determinação do potencial de corrosão de uma estaca metálica.

Quanto mais alto o potencial medido, isto é, mais positivo, mais protetora é a camada de ferrugem precipitada nos poros que entremeiam as partículas do solo. Em outras palavras, a estaca é menos susceptível à corrosão.

As medidas de potencial de corrosão foram efetuadas em estacas cravadas em sites de obras existentes na cidade de Santos, no período compreendido entre 02/12/2010 e 24/08/2011. Para tal, utilizou-se um multímetro da marca Fluke, modelo 115, e um eletrodo Cu/CuSO_4 da marca Tinker & Rasor, modelo 65.

A Tabela 1 fornece informações relativas aos locais e períodos em que as medidas de potencial de corrosão foram efetuadas.

Tabela 1: Locais onde foram efetuadas as medidas dos potenciais de corrosão de estacas.

Construtora	Local da obra	Período de obtenção de resultados
Vistamar	Rua Alexandre Herculano, 65	02/12/2010 a 24/02/2011
Enzafer	Rua Euclides da Cunha, 68	02/12/2010 a 24/02/2011
Besmon	Rua Dr. Tolentino Filgueiras, 15	09/12/2010 a 24/02/2011
Predcenter	Rua Marechal Rondon, 60	14/04/2011 a 24/08/2011
Plano e Forma	Rua Manuel Vitorino, 60	02/06/2011 a 18/08/2011

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 e a Figura 5 fornecem os resultados das medidas obtidas de potencial de corrosão.

Tabela 2: Resultados das medidas de potencial de corrosão.

Semana	$E, V_{Cu/CuSO_4}$				
	Vistamar	Enzafer	Besmon	Predcenter	Plano e Forma
1	-0,02	0,07	-0,05	0,08	-0,04
2	0,03	0,08	0,06	0,09	0,06
3	0,05	0,02	0,17	0,12	0,05
4	0,18	0,06	0,22	0,22	0,12
5	0,14	0,35	0,31	0,41	0,36
6	0,39	0,42	0,42	0,47	0,47
7	0,42	0,41	0,47	0,58	
8		0,45	0,51	0,61	
9			0,54	0,54	
10				0,55	
11				0,55	
12				0,58	
13				0,51	
14				0,55	
15				0,58	
16				0,62	

A medida do potencial de corrosão das estacas revela que, deste o instante inicial de cravação, o potencial se desloca, continuamente, de valores negativos para valores positivos. De modo geral, quanto mais elevado for o potencial medido, mais protetora é a camada formada pelos produtos de corrosão precipitados entre os grãos de materiais que compõe o solo. Quanto mais eficiente a camada desenvolvida ao longo do tempo sobre a estaca, maior será o potencial medido.

A Figura 6 ilustra o diagrama potencial-pH (Diagrama de Pourbaix) para o sistema Fe-H₂O contendo 335 ppm de cloretos, à 25°C [6]. O aço da estaca, imerso em um eletrólito de pH situado entre 7 e 8, como em nosso caso, apresentará diferentes domínios de estabilidade. Os primeiros potenciais de corrosão medidos, situados em potenciais próximos de 0V, indicam que as estacas, nas primeiras semanas, estão sofrendo corrosão generalizada. A elevação do potencial com o tempo, entretanto, mostra que produtos de corrosão estão protegendo a estaca da continuidade do ataque. Os potenciais iniciais medidos nas estacas estão situados ao redor da base da seta inserida na figura. Com o passar das semanas, o potencial se eleva gradativamente até a região em que a passividade, em maior ou menor grau, ocorre. Isto está representado pelo local da ponta da seta.

A Figura 7 apresenta a velocidade do fornecimento de oxigênio em diferentes situações usuais de corrosão [8]. No caso da corrosão em uma solução aquosa comum, o acesso do oxigênio à superfície

do aço é dependente da mistura/convecção. Na corrosão atmosférica, o acesso é dependente da espessura da película de umidade. No caso do solo, o acesso do oxigênio à superfície metálica depende da estrutura do solo e do teor de umidade. A Figura indica que, no caso da corrosão de uma estaca cravada no solo, a disponibilidade de oxigênio é cerca de 3, quatro ou 5 ordens de magnitude, isto é, dezenas de milhares de vezes menor do que a corrosão atmosférica ou em solução.

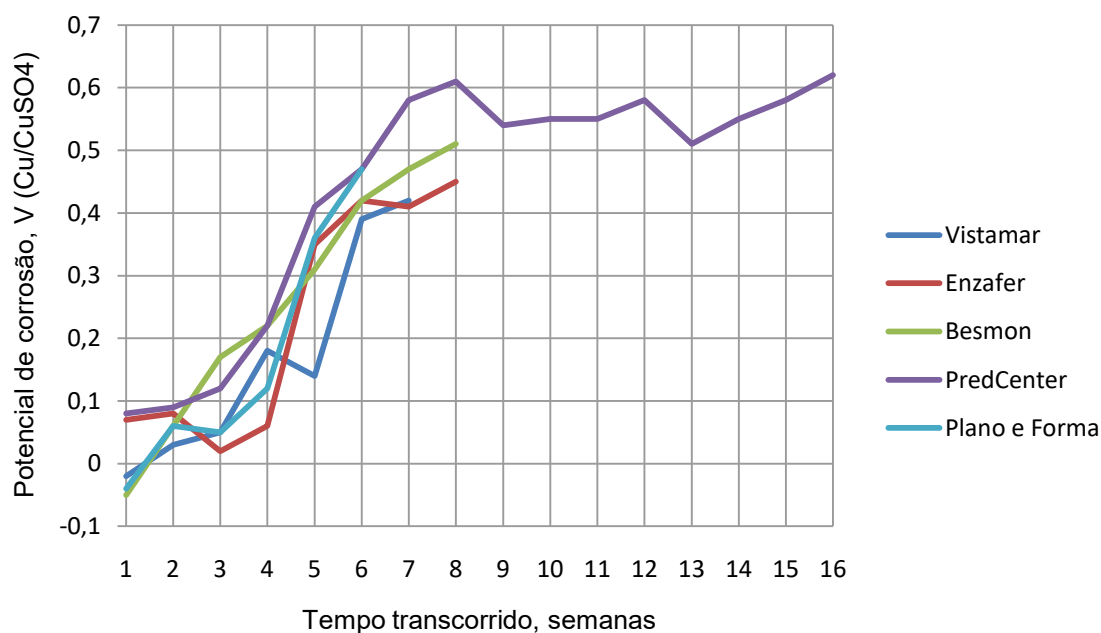


Figura 5: Potencial de corrosão medido em função do tempo transcorrido, para as diferentes obras.

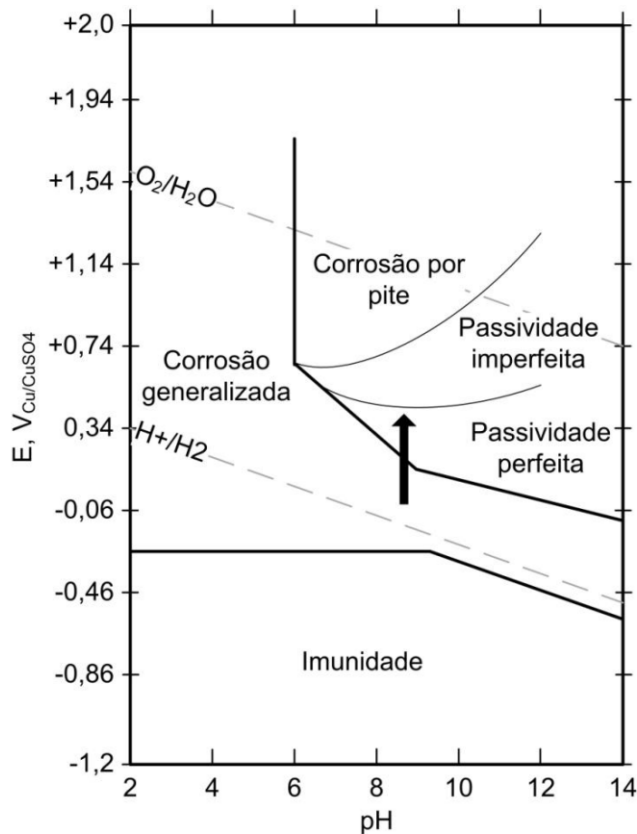


Figura 6: Condições de pH e potencial para o aço na presença de uma solução de pH próximo à 8 contendo 335 ppm de cloretos [6]. A seta indica a movimentação de potencial ao longo do experimento, indo de uma região onde a corrosão da estaca se dá de forma generalizada para outra região, onde a passividade se desenvolve, e o processo de corrosão é em muito diminuído.

Para solos naturais (excluindo os solos muito porosos e muito secos, ou camadas finas de solo depositadas sobre o metal), a corrosão eletroquímica é controlada catódicamente. Isto é semelhante àquela situação encontrada quando mergulhamos o aço em um eletrólito estático. Para solos bem densos e úmidos, o grau de controle catódico é ainda maior – caso verificado em Santos.

Para solos muito porosos e secos, que apresentam grande penetração de oxigênio, a transição ocorre gradualmente do controle catódico para o controle predominantemente anódico. O controle da corrosão, nestes tipos de solo, se aproxima daquela observada na corrosão atmosférica.

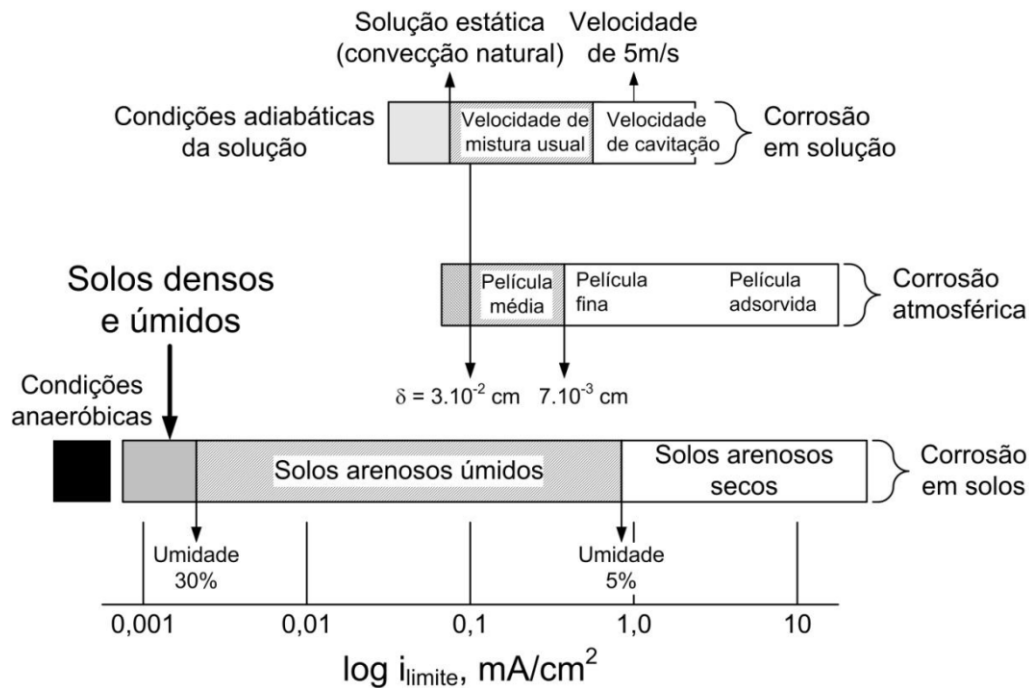


Figura 7: Características da penetração do oxigênio em diferentes situações de corrosão [8].

Outra observação importante diz respeito ao tempo transcorrido para a elevação de potencial. Após cerca de oito semanas imersão no solo, as estacas apresentaram certa tendência à estabilização dos valores de potencial. Estes potenciais, muito mais positivos do que aqueles medidos no início dos experimentos, sugere que o processo de corrosão tenha se estabilizado ou, muito provável, tenha sido interrompido. Isto após somente dois meses de exposição ao solo.

A medida realizada, de potencial de corrosão, não permite inferir a perda de massa verificada nas estacas. Entretanto, podemos fazer algumas considerações que entendemos válidas. Qual seria a perda de espessura de aço, em dois meses de exposição, para uma estaca de aço não protegida sujeita à imersão continuada em água do mar? Uma situação certamente muito mais agressiva do que aquela verificada em nosso caso.

O Eurocode 3 [9] nos fornece um valor de 0,25mm para 5 anos de exposição, correspondente a aproximadamente 0,0083 mm para dois meses de exposição – menos do que 1% daquela exigência normativa prescrita pela NBR 6122, que é de 1 mm.. No caso das estacas de Santos, por se tratar de um meio que dificulta a difusão de espécies e ainda pela menor concentração de cloretos, a perda de massa (estimada) deve ser ainda menor.

CONCLUSÕES

A medida do potencial de corrosão de estacas de aço cravadas em solos naturais é uma técnica rápida, simples e eficiente para o acompanhamento ao longo do tempo do desempenho de estacas de aço frente à corrosão.

As medidas obtidas em cinco diferentes obras em Santos nos permitem dizer que o processo de corrosão da estaca vai sendo gradualmente desestimulado ao longo do tempo de utilização da estaca. Isto deve ser causado pela baixa concentração de oxigênio no solo (e na água contida no solo) que, associado à precipitação de produtos de corrosão entre as partículas que compõe o solo contíguo à estaca, controlam todo o processo.

Uma alteração significativa do potencial de corrosão ocorre durante os primeiros meses após a cravação da estaca. O potencial de corrosão torna-se mais positivo, indicando o desenvolvimento de uma camada de produtos de corrosão aglomerados às partículas do solo, que possui a capacidade de isolar de modo eficiente, a estaca de seu ambiente.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o Eng. Luciano Martins Aleixo, da Sodecoin Serviços de Engenharia e Fundações, pelas sugestões apresentadas no desenvolvimento deste trabalho assim como pela valiosa discussão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]: PANNONI, F.D.; Durabilidade de estacas metálicas cravadas no solo. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE VI. 3 a 5 de novembro de 2008. São Paulo. Contido nos Anais do evento, v.2, PP. 91 – 103.

[2]: SILVA, V.P e PANNONI, F.D.; Estruturas de aço para edifícios – aspectos tecnológicos e de concepção, Blucher, São Paulo, p.66, 2012.

[3]: WHITE, R.E.; Principles and practice of soil science, 4th ed., Blackwell, Malden, MA, p. 162, 2009. [4]: PANNONI, F.D.; A difusão do oxigênio como fator limitante da corrosão de estacas metálicas. V Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, Pelotas, 2009.

[6]: POURBAIX, M.; Potential-PH diagrams and metallic corrosion, p. 673, in: Handbook on corrosion testing and evaluation, ed. W.H.Ailor, John Wiley and Sons, New York, 1971.

[7]: WOLYNEC, S.; Técnicas eletroquímicas em corrosão, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 74, 2003.

[8]: TOMASHOV, N.D.; Theory of corrosion and protection of metals – The science of corrosion, MacMillan, New York, p. 420, 1966.

[9]: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 5: Piling (1993), European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium.