

Comparação entre Métodos Analíticos e as Recomendações das Normas sobre Corrosão de Estacas Metálicas

Malcom Barbosa Bispo

Departamento de Geotecnia, EESC, USP, São Carlos, Brasil, malcombarbosa@usp.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Departamento de Geotecnia, EESC, USP, São Carlos, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

RESUMO: O aumento no uso de estacas metálicas em fundações tem tornado o estudo de corrosão enterrada mais importante, objetivando garantir evitar a ruptura antecipada dos elementos de forma mais econômica. O estado da arte atual utiliza metodologias que têm sido insuficientes para um avanço econômico e seguro no dimensionamento de estacas metálicas, por isso o presente trabalho sugere mudanças, como a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura somado à espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS) na caracterização do produto da corrosão e o método de TrabANELLI na classificação de agressividade do solo. Outro ponto crucial discutido, é a comparação a partir de um caso fictício, no tocante à previsão de espessuras de sacrifício, da norma vigente no Brasil (NBR 6122) com as de outros países e com os dados empíricos obtidos por outros autores, expondo a necessidade de flexibilização da NBR 6122 para apoiar tal abordagem e metodologia.

PALAVRAS-CHAVE: Taxa de Corrosão Enterrada, Classificação de Agressividade do Solo.

1 INTRODUÇÃO

O valor de depreciação da infraestrutura de um país, devido à corrosão, representa um valor considerável, chegando a 3,6% do PIB americano em 2002. (SERRA, 2006) A corrosão enterrada condiz a uma parcela significativa de todo esse valor e tende a crescer, uma vez que é vista a utilização de infraestruturas subterrâneas metálicas aumentando, como em: gasodutos, minerodutos e fundações de estacas metálicas. Dentre esses usos, as estacas se destacam por resistirem aos carregamentos mecânicos das estruturas, ou seja, a perda de área da seção transversal corroída pode causar ruptura do elemento e comprometer toda a estrutura. Então, em uma análise de durabilidade seu uso deve considerar o risco de corrosão e por isso se faz necessário conhecimento abrangente dos parâmetros que influenciam esse processo. Sejam parâmetros do

eletrólito, o solo, ou externos, como contaminantes no solo, fuga de corrente, processo de instalação das estacas e etc....

Os casos de corrosão em estacas metálicas, presentes na literatura, sempre foram analisados por uma perspectiva enviesada, que consiste na classificação de agressividade do solo, às vezes pouco abrangente, pela caracterização dos parâmetros em função da profundidade, mas sem alcançar uma conclusão de como aquele processo corrosivo se deu ou irá ocorrer ao longo do tempo.

Decker, Rollins, Ellsworth (2008), Ohsaki (1982) e Romanoff (1962) desenvolveram estudos para estacas metálicas cravadas e em solos não tropicais, com classificações de agressividade distintas, com medição dos possíveis fatores influentes e medição das taxas de corrosão apreciadas em idades diferentes, ao longo da profundidade. Esse tipo de abordagem se mostrou plausível, mas incapaz de indicar

como a corrosão se desenvolveu.

Partindo do presente estado da arte, esse artigo pretende propor uma forma de analisar problemas de corrosão enterrada de uma maneira distinta da atual, onde o problema é analisado por duas perspectivas, uma química e outra geotécnica. A motivação é que dessa forma seja possível identificar como ocorreu o processo corrosivo, e assim orientar a análise do eletrólito, o solo, quando da classificação de sua agressividade.

A análise química visa identificar os elementos químicos presentes nos produtos da corrosão e no solo através de métodos, como imagens de microscopia eletrônica com ensaio de energia dispersiva (MEV/EDS). Ele serve para delimitar os possíveis mecanismos causadores da corrosão e assim eleger os parâmetros mais influentes.

A etapa seguinte consiste na caracterização da agressividade do solo através da classificação de TrabANELLI, que considera diversos parâmetros do solo como influentes, tais como: umidade, resistividade, pH, potencial de oxidação e concentração de sais (Sulfato, Sulfeto e Cloreto). (SERRA, 2006)

Em paralelo, o atual trabalho almeja comparar a normatização brasileira, NBR 6122 (ABNT, 2009), referente às estacas metálicas, no que tange o cálculo da espessura de sacrifício, com normas estrangeiras, Eurocode 3 Parte- 5 (EUROCODE-3, 2007) e R 27 (AASHTO, 2007), e com trabalhos experimentais feitos por Ohsaki (1982) e Decker, Rollins e Ellsworth (2008) e Wong e Law (1999).

Para situar as abordagens normativas se faz necessário delimitar um caso de estudo. O caso de estudo fictício constitui-se por uma torre de linha de transmissão de energia com fundação em estaca metálica helicoidal com hastes circulares de 101mm de diâmetro externo e 7,1mm de espessura, aparafusada em solo natural e vida útil de 30 anos.

2 MÉTODOS PARA ANÁLISE DE CORROSÃO

O trabalho descrito é uma revisão do estado da arte sobre corrosão enterrada de estacas metálicas, propondo mudança nos processos de análise e avaliando as exigências das normativas vigentes.

2.1 Espessura de Sacrifício

Com posse das informações do estudo de caso proposto, é possível, através das normas, delimitar as imposições necessárias para a espessura de sacrifício e então compará-las com as taxas de corrosão resultantes das equações propostas pelos autores.

Atualmente, no Brasil, a corrosão de estacas metálicas é regida pela norma NBR 6122 (ABNT, 2010). Essa norma postula que “As estacas de aço que estiverem total e permanentemente enterradas, independentemente da situação do lençol d'água, dispensam tratamento especial, desde que seja descontada a espessura indicada na Tabela 1”.

Tabela 1 - Espessura de Compensação de Corrosão
Espessura Mínima de
Sacrifício (mm)

Classe	Espessura Mínima de Sacrifício (mm)
Solos em estado natural e aterros controlados	1,0
Argila orgânica; solos porosos não saturados	1,5
Turfa	3,0
Aterros não controlados	2,0
Solos contaminados	3,2

No Eurocode 3 – Parte 5 (EUROCODE, 2007) é apresentada a Tabela 2, nessa tabela são dados os valores de perda de espessura em função das condições do solo e da vida útil necessária.

Decker, Rollins, Ellsworth (2008), Ohsaki (1982) e Wong e Law (1999) desenvolveram fórmulas que traduzem o comportamento da corrosão em estacas cravadas metálicas, estudadas por eles, através do tempo.

Decker e contribuintes chegaram à Equação 1, para a máxima espessura perdida, com um intervalo de confiança de 95%, ou seja, 95% das medidas estavam dentro desse intervalo.

Tabela 2 - Valor recomendado para a perda de espessura (mm) devido à corrosão de estacas e estacas prancha em solos, com ou sem nível d'água

Vida Útil de Projeto	5 anos	25 anos	50 anos	75 anos	100 anos
Solo natural	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Solos naturais poluídos e siltes industriais	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Solo natural agressivo	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Aterros não compactados e não agressivos	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Aterros agressivos e não compactados	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

$$\Delta e = 120t^{0,95} \quad (1)$$

Posteriormente chegou-se à Equação 2 para a espessura média perdida.

$$\Delta e = 59t^{0,67} \quad (2)$$

Onde:

Δe é a espessura perdida, em μm
 t é o tempo, em anos.

Ohsaki, por sua vez, utilizou os valores médios e máximos da taxa de corrosão medidos para os anos de estudo, 2,14, 5 e 10,17 anos, chegando a dois segmentos de reta dentro dos intervalos.

Para os dados da máxima taxa de corrosão, o primeiro trecho, com o tempo variando entre 0 e 5 anos, foi traduzido pela Equação 3 e o segundo trecho, onde o tempo varia entre 5 e 10,17 anos, foi pela Equação 4.

$$Tx = -0,01280t + 0,1229 \quad (3)$$

$$Tx = -0,0056t + 0,0871 \quad (4)$$

Sendo:

Tx a taxa de corrosão, em mm/ano

t o tempo, em anos

Para obter a espessura perdida, essas equações (4 e 5) foram integradas em função do tempo (t) e com isso foram alcançadas a Equação 5 e a Equação 6.

$$\Delta e = -0,0064t^2 + 0,1229X \quad (5)$$

$$\Delta e = -0,0028t^2 + 0,0871X \quad (6)$$

Para a taxa média de corrosão, os trechos de reta tiveram os mesmos intervalos de tempo, variando entre 2,14, 5 e 10,17 anos. O primeiro trecho, entre 2,14 e 5 anos, representado pela Equação 7 e o segundo trecho, entre 5 e 10,17 anos, expresso pela Equação 8.

$$Tx = -0,0027t + 0,0408 \quad (7)$$

$$Tx = -0,0033t + 0,0438 \quad (8)$$

Repetindo o mesmo processo de integração em função do tempo (t) das Equações 7 e 8 são encontradas a Equação 9 e a Equação 10, respectivamente.

$$\Delta e = -0,0013t^2 + 0,0408X \quad (9)$$

$$\Delta e = -0,0016t^2 + 0,04384X \quad (10)$$

Wong e Law (1999) chegaram à uma taxa média anual de 0,011mm/ano e uma taxa máxima anual de 0,018mm/ano.

Com essas informações podemos determinar as espessuras de sacrifício apresentadas pelos 5 métodos e assim se os postulados das normas são obrigatoriamente seguros e econômicos.

2.2 Análise Química de Amostras Corroídas

A primeira etapa do problema é identificá-lo. Qual o tipo de estaca metálica, quanto tempo está ali, sua profundidade, o tipo de aço, se existem outros elementos metálicos enterrados nas proximidades, se existe risco de contaminação, entre outros.

Para realização da análise química é essencial que se tenha amostras já corroídas do mesmo material, nas proximidades das localizações representativas.

Em casos de novas linhas de transmissão de energia, o tempo entre os estudos de viabilidade até o projeto básico pode durar alguns anos. Isso pode prover o tempo necessário, por volta de 4 anos, para que estacas experimentais sejam alocadas em pontos representativos e depois exumadas para análise. Já no caso de modernização dessas linhas, é possível utilizar as estacas previamente instaladas para o estudo.

A retirada das amostras das estacas que serão analisadas deve ser feita com cuidado, para que não haja contaminação das mesmas e principalmente para que sejam de pontos representativos da corrosão na estaca.

A definição dos pontos de retirada pode ser feita visualmente.

O tamanho dessas amostras precisa ser condizente com o ensaio que será feito, no caso com o do compartimento de amostras do microscópio (MEV) e pode variar de um equipamento para outro, por volta de 6cm².

Analisando o produto da corrosão é possível restringir as hipóteses de como ela ocorreu. Para isso é feito algum ensaio de caracterização química do produto.

No presente estudo é sugerida a microscopia eletrônica de varredura somada à espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS), permitindo uma análise morfológica, topográfica e fazendo um mapeamento da composição química com análise qualitativa e semi-quantitativa, informações essas utilizadas para caracterizar como ocorreu o processo corrosivo.

Esse equipamento funciona a partir da emissão de feixes de elétrons que incidem na amostra, sendo possível aumentar a imagem em até 300 mil vezes. Essa condição permite a visualização morfológica e topográfica perfeita da estrutura da amostra corroída.

O MEV pode ser utilizado com a técnica EDS acoplada, ela consiste na emissão de raio-x na amostra para então fazer uma análise qualitativa dos elementos na superfície.

Essas informações permitem visualizar se a corrosão é generalizada ou por pites, se possui resquícios de excrementos metabólicos de bactérias ou não, e etc, permitindo identificar as possibilidades causadoras daquela ocorrência. A limitação é interessante para orientar as próximas análises dos possíveis parâmetros influentes, sejam do solo, ou externos, como contaminações químicas ou correntes de fuga.

2.3 Classificação da Agressividade do Solo

A classificação de agressividade do solo é uma prática bem comum no estudo de corrosão enterrada, pois norteia as decisões de projetos tomadas para um determinado empreendimento.

Existem diversos métodos de classificação, no entanto o método de Trabanelli é considerado um dos mais completos. (SERRA, 2006)

O método leva em consideração a resistividade, o pH, o potencial de redox, a umidade e a presença de sais, como: Cloreto, Sulfeto e Sulfato.

Para cada um dos parâmetros é dado um índice parcial de -4 a +2, por fim, o critério delimita faixas onde classifica o solo como não agressivo (0), ligeiramente agressivo (-1 a -8), medianamente agressivo (-8 a -10) e muito agressivo (<-10), como pode ser visto na Tabela 4 e na Tabela 3.

Tabela 3 - Critério de Agressividade do Solo, Segundo Trabanelli

Classificação do Solo	Índice Total de Agressividade
Não Agressivo	0
Ligeiramente Agressivo	-1 a -8
Medianamente Agressivo	-8 a -10
Muito Agressivo	< -10

Tabela 4 - Índices Parciais de Agressividade do Solo, Segundo Trabianelli

Parâmetros do Solo	Faixa	Índice Parcial
Resistividade (ohm.cm)	> 12000	0
	12000 a 5000	-1
	5000 a 2000	-2
	< 2000	-4
E redox (mV/ENH)	> +400	2
	+400 a +200	0
	+200 a 0	-2
	< 0	-4
pH	> 5	0
	< 5	-1
Umidade (%)	< 20	0
	> 20	-1
Cl ⁻ (mg/kg)	< 100	0
	100 a 1000	-1
	> 1000	-4
Sulfato (mg/kg)	< 200	0
	200 a 300	-1
	> 300	-2
Sulfeto (mg/kg)	Ausente	0
	< 0,5	-2
	> 0,5	-4

2.3.1 Resistividade

A resistividade é um parâmetro importante, pois relaciona-se com a dificuldade que uma corrente terá de ir de um ponto a outro, no eletrólito. Segundo Romanoff (1962), se trata de um dos parâmetros mais importantes no estudo da corrosão.

Em um processo eletroquímico temos a movimentação dos elétrons do ânodo para o cátion, que são a região oxidada e a reduzida, respectivamente. Essa movimentação dos elétrons de um ponto até o outro terá uma dificuldade maior quanto maior for a resistividade, por isso quanto menor a resistividade mais intensa será a corrosão.

Para sua medição deve ser utilizado o ensaio de piezocone com medição de resistividade (RCPT-U). Ele consiste na análise da resistividade de acordo com a cravação do cone.

Esse ensaio é a melhor opção para medição de resistividade por se tratar de um ensaio prático, rápido e que mede diversos outros parâmetros úteis para o desenvolvimento de um projeto de

fundações, tais como: resistência lateral e resistência de ponta.

O equipamento possui de 2 a 8 sensores, sendo que o sensor da ponta emite uma corrente elétrica, o sensor mais distante é o sensor aterrado, possuindo potencial nulo, e os sensores intermediários são responsáveis pela medição da diferença de potencial.

2.3.2 pH

A determinação se faz necessária, pois o comportamento da corrosão em metais varia bastante de acordo com o pH do eletrólito.

Em meios ácidos a corrosão tende a ser generalizada, enquanto em meios neutros e básicos essa corrosão se dá de forma generalizada ou pontual.

Para a medição do pH utiliza-se o método sugerido pela Embrapa, que consiste na imersão de eletrodo em solução feita a partir da diluição de amostra de solo em meio aquoso, com proporção solo:água de 1 para 2,5. (EMBRAPA, 1997) O eletrodo no caso é um phmêtro.

2.3.3 Umidade

A umidade é um parâmetro que se relaciona com outros, como por exemplo a resistividade, embora seja de fácil medição possui uma variação muito grande ao longo do tempo e de acordo com o clima.

Essa variação tende a ser mais importante nas camadas superficiais do que nas mais profundas. Isso ocorre porque a evaporação fica dificultada em profundidade. Tal variação na superfície não é de grande importância.

A umidade do solo é medida, em laboratório, a partir de amostras retiradas do campo, pesadas (massa úmida) e colocadas em estufa, submetendo-as ao forno à 105°C por 24h, pesando-as novamente depois (massa seca). (ABNT, 2016)

2.3.4 Concentração de Sais

Os sais são elementos químicos na forma iônica e por isso suas concentrações são importantes, pois influem diretamente na resistividade, mas também pode indicar a ocorrência de bactérias, que promovem corrosão, e até a presença de contaminantes no solo.

Os sais mais importantes para serem analisados, são: cloreto, sulfeto e sulfato.

A determinação desses sais é feita através da retirada de amostras de solo e diluição das mesmas em soluções aquosas posteriormente misturadas com reagentes. Os reagentes variam de acordo com o tipo de sal que se pretende medir a concentração.

3 RESULTADOS

Os resultados apresentados são obtidos a partir do, já apresentado, caso de estudo, que possui vida útil de 30 anos, estacas metálicas helicoidais, com hastes de 7,1mm de espessura e alocada em solo natural.

Para esse caso a NBR 6122 exige uma espessura mínima de sacrifício de 1,00mm, enquanto no Eurocode 3, por uma interpolação linear, exigiria 0,36mm.

Pela equação de máxima espessura perdida, desenvolvida por Decker, Rollins e Ellsworth, o valor corroído calculado seria de 3,04mm e pela fórmula de espessura média seria 0,58mm.

Pelo equacionamento desenvolvido por Ohsaki, considerando apenas a corrosão que aconteceria até 10,17 anos, uma vez que a extrapolação para 30 anos da Equação 6 e 10 resultariam em valores negativos que são inapropriados para o cálculo, a espessura máxima corroída seria de 0,68mm e a espessura média de 0,27mm.

Utilizando, para comparação, os dados de taxas de corrosão encontrados por Wong e Law (1999), onde foram apresentadas taxa média e máxima de 0,011 e 0,018mm/ano, ambas consideradas baixas, respectivamente, o que em 30 anos resultariam em 0,33mm e 0,54mm.

Na Tabela 5 estão resumidas as espessuras indicadas pelas normas, as experimentadas pelos autores e as porcentagens que representariam do nosso perfil de referência, com 7,1mm de espessura. Nela pode ser visto como a variação da corrosão é alta, na formulação de Decker, Rollins e Ellsworth a relação da máxima com a média ultrapassa 5 vezes.

Tabela 5 - Espessura Sacrificada (mm) e Porcentagem da Seção Perdida

Fonte	Máx. (mm)	%	Média (mm)	%	Mín. (mm)	%
NBR 6122	-	-	-	-	1	14,1
Eurocode 3-Parte 5	-	-	-	-	0,36	5,1
Ohsaki (1982)	0,68	9,6	0,27	3,8	-	-
Decker, Rollins, Ellsworth (2008)	3,04	42,8	0,58	8,2	-	-
Wong e Law (1999)	0,54	7,6	0,33	4,7	-	-

Dependendo do mecanismo de ruptura considerado mais desfavorável e do tipo de elemento, a perda de seção se torna ainda mais importante.

4 CONCLUSÃO

O atual trabalho considera a utilização do MEV/EDS uma ótima nova ferramenta para caracterização de processos corrosivos, já que a metodologia da literatura atual se mostra insuficiente para identificar os processos causadores da corrosão e o uso de tal equipamento tem sido de grande ajuda em análises de caracterização de solos e rochas, na geotecnia, e de metais, na indústria metalúrgica.

O uso do método de TrabANELLI para classificação de agressividade do solo pode munir o projetista com maior número de informações, permitindo assim uma análise mais profunda da corrosividade dele.

Uma análise mais profunda se justifica com suporte das normas e na possível economia sem diminuição da segurança. No entanto, a normatização brasileira (NBR 6122) se mostra defasada e rigorosa quando comparada com a norma europeia (Eurocode 3, parte-5), já que determina uma espessura mínima de sacrifício de 1mm, independente da vida útil esperada do elemento, contra 0,36mm da europeia para o caso de 30 anos.

A diferença entre as espessuras mínimas de sacrifício, sugeridas pelas normas, tende a diminuir com o aumento da vida útil até inverter-se. No entanto, a norma europeia sugere valores próximos de 1mm apenas quando o tempo de vida útil do elemento se aproxima dos 90 anos, tempo fora da faixa normalmente utilizada em estacas de fundações de torres de linha de transmissão de energia nos Estados Unidos que é entre 50 e 75 anos (A.B. Chance Co., 2006). Porém, vale salientar que ambas sugerem uma abordagem pouco científica em suas utilizações, uma vez que tabelam espessuras de sacrifício, independentemente dos valores dos parâmetros influentes.

Como pode ser visto nos resultados experimentais dos diferentes autores, os valores de corrosão podem variar bastante para uma mesma estaca (máxima e média), por isso é esperado que em diferentes locais esses valores variem ainda mais drasticamente, não tendo sentido uma abordagem inflexível como a das normas. Sendo assim, se faz necessária a apresentação de mecanismos de flexibilização que permitam a redução da espessura mínima de sacrifício, e consequentemente da rigidez das normas, desde que o projetista faça um estudo detalhado do problema.

No caso da norma americana AASHTO - R27, há a permissão, em casos de solos mais agressivos, para a adoção de sonda para monitoramento da corrosão. Essa sonda terá seus resultados interpretados por um especialista na área de corrosão, que poderá, munido da condição presente da taxa de

corrosão e do critério de falha das estacas, dizer o tempo restante de serviço.

O especialista indicará se elas irão satisfazer suas vidas úteis (tempo de serviço \geq vida útil de projeto), se precisam ser reparadas ou trocadas (tempo de serviço = 0) ou se a corrosão ainda pode ser mitigada (tempo de serviço < vida útil de projeto).

No caso de estacas metálicas helicoidais, como o cenário considerado, que precisam transmitir o carregamento de tração para a hélice, uma perda importante da seção, em qualquer profundidade, poderia ser mais grave do que em uma estaca cravada e comprimida, por exemplo, uma vez que a corrosão diminuiria ou acabaria com o vínculo das hastes com a hélice.

A partir das considerações necessárias fica mais claro que a flexibilidade, com embasamento científico, das normas em obras de grande porte pode ser proveitosa, acarretando uma economia sensível sem no entanto representar perda de segurança.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro, à Escola de Engenharia de São Carlos e ao Departamento de Geotecnia por concederem acesso ao conhecimento necessário para o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. R 27 – Assessment of Corrosion of Steel Pilling for Non-Marine Applications. Em: Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, D. C.: AASHTO, v. 2, 2008.
- A.B. CHANCE COMPANY. Appendix A: Corrosion – An Overview. Em: Design Technical Manual, A.B. Chance Company, Centralia, MO, 2006.
- ABNT. NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, p. 91, 2010.
- ABNT. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, p. 12, 2016.
- DECKER, J. B.; ROLLINS, K. M.; ELLSWORTH, J. C. Corrosion Rate Evaluation and Prediction for Piles

- Based on Long-Term Field Performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Reston, v. 134, n. 3, p. 341–351, 2008.
- EUROCODE 3. Design of steel structures Part 5: Piling. Brussels: CEN, 2007.
- OHSAKI, Y. Corrosion of Steel Piles Driven in Soil Deposits. *Soils and Foundations Journal*, v. 22, p. 57-76, 1982.
- ROMANOFF, M. Corrosion of Steel Pilings in Soils. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, v. 66, n. 3, 1962.
- SERRA, E. T. *Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo*. Rio de Janeiro: CEPEL, 2006.
- WONG, I. H.; LAW, K. H. Corrosion of Steel H Piles in Decomposed Granite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Reston v. 125, n. 6, p. 529 - 532, 1999.