

Corrosão em estacas metálicas de torres de energia elétrica

Corrosion in metallic piles of electric power towers

Alexandre Evangelista Rodrigues Vilhena¹, Renata Godinho Pinto¹,
Rafaela Reis da Costa¹, Marcelo de Souza Picanço¹,
Alcebíades Negrão Macêdo²

¹ Laboratório de Engenharia Civil, LEC/PPGEC/UFPA, CEP: 66075 -110, Belém, Pará, Brasil.

e-mail: alexervilhena@gmail.com, renatagp@ufpa.br, rafaela_reis.costa@hotmail.com, marcelosp@ufpa.br

² Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia CEP: 66075-110, Belém, Pará, Brasil.

e-mail: anmacedo@ufpa.br

RESUMO

Para se manter a qualidade e continuidade do fornecimento de energia é essencial monitorar a integridade da estrutura das torres de transmissão usualmente executadas em aço. Por isso, avaliou-se a corrosividade do solo na região amazônica no trecho Vila do Conde-Tucuruí, no estado do Pará. Foi analisado a resistividade, potencial estrutura-solo, potencial redox, pH, concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto, além do índice de Steinrath e da taxa de corrosão de corpos de prova instalados no solo estudado. Os dados foram coletados no período seco e no chuvoso enquanto que os corpos-de-prova foram removidos após 12 meses de exposição. Os solos da região apresentaram resistividade superior a 20 kΩ.cm, caracterizando-se como pouco corrosivos; o potencial redox de 100 a 300 mV indicou solos ligeira a moderadamente corrosivos; o potencial estrutura-solo permaneceu na faixa de -0,4 a -0,7 V/ECS estando dentro do intervalo considerado normal; o índice de Steinrath classificou os solos em pouco corrosivos a sem corrosividade e as taxas de corrosão dos corpos de prova indicaram elevada corrosão a três metros de profundidade. Baseando-se nos resultados de cada método de avaliação utilizado pode-se concluir que a corrosividade do solo da região estudada aumenta com profundidade, além de ser favorável ao ataque de corrosão microbológica.

Palavras-chave: corrosão, corrosividade do solo, índice de Steinrath, taxas de corrosão.

ABSTRACT

In order to maintain the quality and continuity of the power supply it is essential to monitor the integrity of the structure of the transmission towers usually executed in steel. This study evaluated soil corrosivity in the Amazon region in the Vila do Conde-Tucuruí stretch, state of Pará. The resistivity, potential soil structure, redox potential, pH, chloride, sulphate and sulfate concentration, besides the Steinrath index and the quantification of the soil corrosivity through the installation of test specimens in the studied soil. The data were collected in the dry and rainy period while the specimens were removed after 12 months of exposure. The soils of the region presented resistivity higher than 20 kΩ.cm, characterizing as few corrosives; the redox potential of 100 to 300 mV indicated mild to moderately corrosive soils; the potential soil structure remained in the range of -0.4 to -0.7 V/ECS being within the range considered normal; the Steinrath index classified the soils into little corrosive to non-corrosive and the corrosion rates of the test specimens indicated high corrosion at 3 meters depth. Based on the results of each evaluation method used it can be verified that the soil corrosivity increases with the depth, besides being favorable to the attack of microbiological corrosion.

Keywords: corrosion, soil corrosivity, index of Steinrath, corrosion rates.

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade dos sistemas de transmissão é fundamental para o fornecimento satisfatório de energia elétrica. Diversos são os modelos de torres de transmissão disponíveis e quase a totalidade apresenta o aço como principal componente estrutural [1]. Como já foi identificado, o aço, quando exposto, tende a sofrer desgastes

de diversas naturezas e possivelmente a mais preocupante delas seja pela corrosão, que consiste na deterioração de um material, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo estar aliado ou não a esforços mecânicos [2]. Dentre os fatores que levam à corrosão, a mais conhecida é a ocasionada pela atmosfera, mas existem outras formas específicas, como a corrosão quando o elemento portante (fundações da torre) está em contato com o solo [3].

O estudo sobre a corrosividade do solo é importante devido ao uso global em larga escala de aços enterrados para atividades de abastecimento de água, gás, petróleo, dentre outras [4]. Sendo que este controle demanda grandes gastos monetários, principalmente no que diz respeito à manutenção e/ou substituição dessas estruturas metálicas [5]. Além disto, o desgaste por corrosão em torres de energia pode provocar o colapso parcial ou total da estrutura, tendo como consequência a interrupção da transmissão de energia elétrica [6].

A região Amazônica é a que possui a maior concentração de sistemas de menor porte não conectados ao Sistema Interligado Nacional, os chamados sistemas isolados, as torres das linhas de transmissão (LT) estão localizadas em áreas de difícil acesso e na maioria dos casos, alagadas, limitando as práticas de inspeção e manutenção das fundações [7]. Dessa forma, vem-se buscando conhecimento sobre como prolongar a vida útil dos seus componentes, investigando principalmente os mecanismos de deterioração e técnicas de diagnósticos [8].

Segundo NORHAZILAN *et al.* [9], o solo quando comparado com outros ambientes é de difícil classificação quanto ao seu potencial corrosivo devido à sua grande complexidade. Há muitos fatores que controlam a corrosividade do solo, tais como a porosidade (aeração), resistividade ou condutividade elétrica, sais dissolvidos incluindo despolarizantes ou inibidores, umidade, pH, bactérias ativas de formação de sulfato e outros [10]. Cada um destes itens pode afetar as características de polarização anódica e catódica de um metal no solo, tendendo ao aumento da taxa de corrosão [11].

Este estudo foi conduzido em conjunto com a Universidade Federal do Pará - UFPA e a Empresa Paraense de Transmissão de Energia S.A. - ETEP. Tem-se como objetivo determinar o grau de corrosividade do solo nas proximidades da LT Vila do Conde - Tucuruí, para isso, sendo analisados os valores de resistividade, potencial estrutura-solo, potencial redox, pH, concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto, o índice de Steinrath e a taxa de corrosão de corpos de prova.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar a taxa de corrosão de corpos de prova no solo próximo às torres de transmissão foi implantado um sistema de monitoramento (Figura 1), baseado em um modelo desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), que é constituído por hastes de suporte feitas de aço carbono e pelos corpos de prova, executados em aço USI-SAC300, que apresenta a mesma composição química das estacas existentes nas torres. Também foi utilizado hastes complementares em aço USI-SAC300 para medir o potencial estrutura-solo e para complementar os testemunhos na proximidade das bases das torres selecionadas.

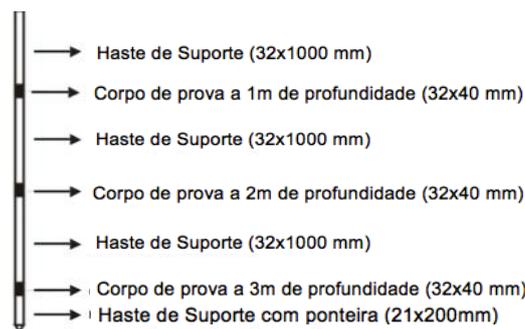


Figura 1: Esquema do sistema de monitoramento.

Para esse sistema foram produzidos 36 hastes de suporte em aço carbono com 32mm de diâmetro e 1000mm de comprimento, 12 hastes de suporte no mesmo material, com 21x200mm, 33 corpos de prova com 32x40mm utilizando chapa metálica USI-SAC300, 10 hastes complementares do mesmo material e um tripé em tubos de aço MR-250 com 3" de comprimento e 3 mm de espessura. O aço USI-SAC300 apresenta composição química conforme a Tabela 1, cuja caracterização foi realizada pelo Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará por meio de um espectrômetro de emissão óptica Shimadzu modelo PDA7000.

Tabela 1: Composição química do USI-SAC300.

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (% EM MASSA)	ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (% EM MASSA)
C	0,548	Cr	2,209
Si	11,374	Cu	1,065
Mn	2,511	Al	0,443
P	0,390	V	0,024
S	0,114	Ti	0,044
Ni	0,196	Fe	81,083

O critério de escolha das torres para análise se baseou na resistividade do solo e na identificação daquelas que possuíam estacas testemunhos. Distribuídas ao longo da linha de transmissão foram registradas 168 torres, conforme levantamento realizado pela empresa DM – Geologia e Geotecnia LTDA. Dentre estas foram selecionadas dez para objeto deste estudo, cujos solos apresentavam menores valores de resistividade (Torres 096, 102, 238, 267, 334, 420, 504, 558, 586 e 657).

Com o fim do processo de usinagem dos elementos, os corpos de prova (Figura 2) receberam tratamento da superfície (decapagem) com a remoção dos óxidos existentes com ação mecânica. Em seguida, realizou-se a decapagem ácida em solução composta por Ácido Nítrico (HNO_3) e Ácido Clorídrico (HCl) com água destilada na proporção volumétrica de 1:3:8. Os corpos de prova foram submetidos à nova abrasividade e limpos com água destilada para serem submetidos ao desengraxamento e à pesagem.

**Figura 2:** Corpos-de-prova depois de fabricados.

Utilizando um software para desenvolvimento de sistemas de informações geográficas (SIG) e de posse das informações cartográficas vetoriais disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [12], o sistema de monitoramento com corpos de prova fixados em três alturas foi instalado nas proximidades das torres, assim como as hastes auxiliares (Figura 3). Após o período de 12 meses de exposição, os corpos de prova foram removidos utilizando um tripé e foram transportados ao Laboratório de Engenharia Química da UFPA para análise.

**Figura 3:** Instalação das hastes auxiliares.

Em junho de 2008 e março de 2009 foi verificado a resistividade do solo, o potencial redox, o potencial estrutura-solo, o pH e as concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto. Segundo PEREIRA *et al.* [13], a

avaliação da resistividade indica o quanto corrosivo um solo pode ser para o metal nele enterrado. As classificações das gravidades adotadas para corrosão conforme YAJIMA *et al.* [14] são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação da corrosão baseado na resistividade do solo.

RESISTIVIDADE DO SOLO (OHMS-CM)	CLASSIFICAÇÃO DA CORROSIVIDADE
> 20.000	Essencialmente não corrosivo
10.000-20.000	Ligeiramente corrosivo
5.000-10.000	Moderadamente corrosivo
3.000-5.000	Corrosivo
1.000-3.000	Altamente corrosivo
<1.000	Extremamente corrosivo

Fonte: YAJIMA *et al.* [14]

A avaliação do potencial redox seguiu a classificação de GENTIL [15], onde resultados inferiores a 100mV indicam corrosividade severa, entre 100-200mV moderada, entre 200-400mV ligeira e valores maiores que 400mV indicam solo não corrosivo. Segundo PINHEIRO [16], o potencial estrutura-solo é a diferença de potencial entre a estrutura metálica enterrada e o solo que a envolve medida contra um eletrodo de referência, valores normais se situam entre -700 e -100 mV/ECS. A avaliação da agressividade do solo pelo índice de Steinrath utilizou os índices parciais de corrosividade para cada um dos parâmetros considerados, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros relacionados por Steinrath para avaliação da corrosividade do solo.

PARÂMETROS DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL	PARÂMETROS DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
Resistividade elétrica (Ω.cm):		Potencial redox (mV/NHE):	
Maior que 12000	0	Maior que 400	+2
Entre 12000 e 5000	-2	Entre 400 e 200	0
Entre 5000 e 2000	-1	Entre 200 e 0	-2
Menor que 2000	-4	Valor sendo 0	-4
pH:			
Maior que 5	0	Sulfeto (ppm):	
Menor que 5	-1	Ausente	0
Umidade (%):		Menor que 0,5	-2
Menor que 20	0	Maior que 0,5	-4
Maior que 20	-1		
Cloreto (ppm):		Sulfato (ppm):	
Menor que 100	0	Menor que 200	0
De 100 a 1000	-1	De 200 a 300	-1
Maior que 1000	-4	Maior que 300	-2

Fonte: TRABANELLI *et. al.* (1972, apud LOPES, 2012, p. 26) [17].

Conforme Trabanelli *et. al.* (1972, apud GIAROLA, 2016, p. 26) [18], a determinação da agressividade absoluta é fornecida após a soma algébrica dos índices parciais. O resultado 0 indica solo sem agressividade, entre -1 e -8 pouca agressividade, entre -8 e -10 média agressividade e menor que -10 alta agressividade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistividade do solo

Os dados para o período de junho de 2008 (Tabela 4) mostram que, as torres 96 e 102 estão em solos com resistividade inferiores a 3 k Ω .cm, logo, altamente corrosivos [14]. Porém, o modelo destas torres diferem das torres em estudo por apresentar fundações que não usam a estaca helicoidal, portanto não entram na avaliação da pesquisa. A menor resistividade encontrada foi de 11,92 k Ω .cm na torre 334, indicando que o solo é ligeiramente corrosivo, entretanto as demais apresentaram valores superiores a 20 k Ω .cm, considerado solo essencialmente não corrosivo.

Tabela 4: Resultado da análise laboratório do material coletado em junho de 2008.

TORRE	RESISTIVIDADE (k Ω .cm)			pH	Cu/CuSO ₄		UMIDADE (%)	CLORETO (ppm)*	SULFATO (ppm) ¹	SULFETO (ppm) ²
	1m	2m	3m		ESTRUTURA-SOLO (V/ECS)	REDOX (mV - EPH)				
096	2,39	2,09	2,67	3,49	-0,635	126,11	24,75	<100	3,9	Ausente
102	1,67	1,84	2,32	5,61	-0,654	257,15	23,32	<100	29,7	Ausente
238	72,23	100,44	79,77	5,14	-0,696	229,13	13,79	0,0	79,60	Ausente
267	44,84	47,09	35,89	3,81	-0,579	149,28	20,09	<100	11,5	Ausente
334	11,92	16,44	18,83	4,88	-0,638	186,54	14,56	0,0	28,90	Ausente
420	45,56	51,13	55,80	4,43	-0,690	247,76	11,71	0,0	24,89	Ausente
504	47,49	54,13	65,00	5,45	-0,680	247,76	18,00	<100	1,44	Ausente
558	99,41	224,1	94,53	4,81	-0,724	209,28	15,31	<100	19,76	Ausente
586	63,22	97,05	79,38	5,93	-0,679	276,15	12,99	<100	3,48	Ausente
657	23,10	28,44	29,14	4,41	-0,659	185,18	11,25	<100	11,2	Ausente

Em março de 2009 (Tabela 5), pode-se observar um aumento nos valores de resistividade do solo, sendo a situação mais desfavorável encontrada na torre 657 com 26,89 k Ω .cm, enquadrado como solo essencialmente não corrosivo.

Tabela 5: Resultado da análise laboratório do material coletado em março de 2009.

TORRE	RESISTIVIDADE (k Ω .cm)			pH	Cu/CuSO ₄		UMIDADE (%)	CLORETO (ppm)*	SULFATO (ppm) ¹	SULFETO (ppm) ²
	1m	2m	3m		ESTRUTURA-SOLO (V/ECS)	REDOX (mV - EPH)				
096	6,29	3,37	2,65	3,70	-0,602	142,76	26,82	<100	11,40	Ausente
102	11,01	2,74	1,34	3,65	-0,543	139,48	20,65	<100	4,60	Ausente
238	116,64	135,53	145,72	4,34	-0,550	180,87	18,57	<100	<0,01	Ausente
267	70,80	51,00	48,13	4,65	-0,478	199,46	19,59	<100	9,20	Ausente
334	139,96	52,83	56,76	3,81	-0,554	149,16	15,20	<100	<0,01	Ausente
420	57,21	47,87	60,21	4,07	-0,527	164,81	17,24	<100	16,50	Ausente
504	42,19	51,53	61,17	3,69	-0,570	141,72	20,01	<100	10,70	Ausente
558	99,55	189,14	150,33	4,31	-0,544	179,05	16,88	<100	16,70	Ausente
586	95,19	32,87	76,12	5,55	-0,475	253,44	12,13	<100	<0,01	Ausente
657	26,89	82,96	129,43	5,95	-0,637	277,21	15,72	<100	6,10	Ausente

FERNANDES *et al.* [19] relacionam a resistividade do solo com a concentração de sais solúveis, afirmando que solos com alta concentração de sais são mais corrosivos e apresentam menor resistividade elétrica do que aqueles com menores concentrações. Desta forma, o aumento da resistividade nas torres 238, 267, 334, 420 e 586 mostra-se coerente com o período chuvoso na região, onde os sais minerais são diluídos pelo elevado índice pluviométrico registrado de dezembro a abril em muitas regiões do estado. É importante observar, porém, que em algumas áreas do estado apresentam o fenômeno chamado “veranico” caracterizado por um baixo índice pluviométrico local por longo período, o que explicaria a pequena ou nenhuma variação

na resistividade do solo das demais torres.

Apesar dos solos com pH entre 4 e 10 serem considerados menos corrosivos [20], segundo PANNONI [21], na presença de água e oxigênio, simultaneamente, é possível a ocorrência de corrosão em estacas de aço enterradas. Por outro lado, estacas imersas em solos com $\text{pH} < 4$, necessitam de proteção contra ataque corrosivo, pois o ataque independe da existência de oxigênio [22]. O solo estudado apresentou uma variação de pH entre 3,49 e 5,95. Entretanto como a maioria das amostras apresentaram pH acima de 4, é de se esperar que não deva ocorrer um ataque corrosivo, pois as estacas estudadas possuem no primeiro metro um envolvimento de concreto.

3.2 Potencial redox

O potencial redox (Figura 4) pelos parâmetros de GENTIL [15], classifica o solo como moderado a ligeiramente corrosivo. Pode-se definir que o solo é considerado corrosivo desde a superfície e tende a se tornar mais agressivo do ponto de vista do redox, a medida que se aprofunda, tornando-se propenso a ataque de corrosão microbiológica.

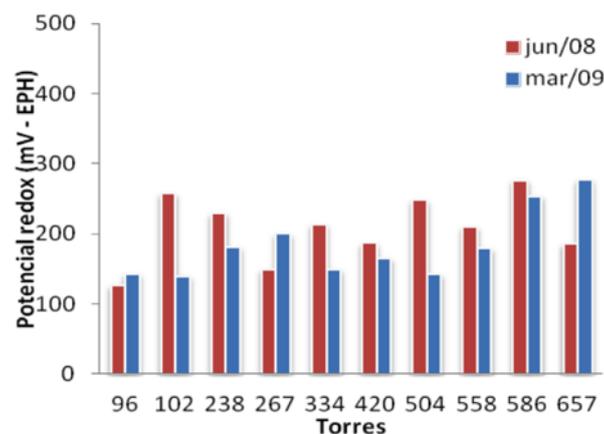


Figura 4: Resultado do potencial redox nos períodos de jun/08 e mar/09.

3.3 Potencial estrutura-solo

As medições de potencial estrutura-solo são mostradas na Figura 5, estes resultados indicam que durante a estiagem ocorre uma elevação do seu potencial se comparado ao período de constante precipitação pluviométrica. A variação em ambos os períodos ficou entre -0,475 e -0,724 V/ECS, indicando que as torres permaneceram dentro do intervalo considerado normal (entre -700 e -100 mV/ECS). Conforme PINHEIRO [16], valores fora desta faixa ou dentro dela, mas oscilantes, são um indicio de que a estrutura está sob ação de correntes de fuga.

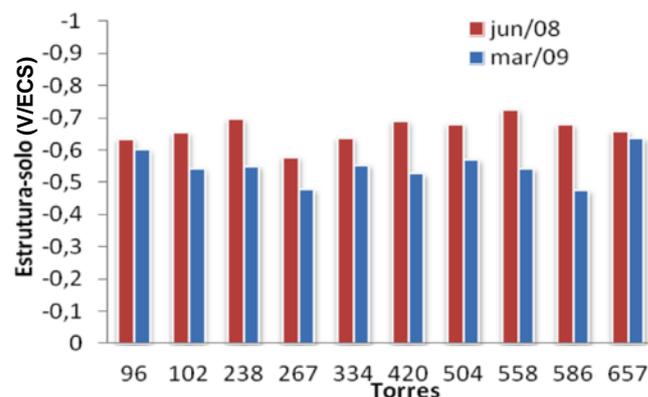


Figura 5: Resultado do potencial estrutura-solo nos períodos de jun/08 e mar/09.

3.4 Avaliação da corrosividade pelo índice de Steinrath

O resultado dos índices totais de Steinrath (Tabela 6) mostra que os solos avaliados foram classificados em pouco agressivo à sem agressividade [18]. A comparação com as demais informações obtidas neste estudo demonstra que os solos estudados apresentam baixa corrosividade. Porém, esta avaliação só é válida para os solos mais próximos da superfície, pois as amostras retiradas não alcançaram os horizontes mais profundos, o que impossibilita correlacionar os resultados dos métodos investigativos que alcançaram maiores profundidades.

Tabela 6: Índices total de Steinrath do solo das amostras de junho/2008 e março/2009.

TORRE	ÍNDICE		CLASSIFICAÇÃO	
	2008	2009	2008	2009
96	-3	-3	Pouca agressividade	Pouca agressividade
102	-5	-4	Pouca agressividade	Pouca agressividade
238	0	-1	Sem agressividade	Pouca agressividade
267	-2	-1	Pouca agressividade	Pouca agressividade
334	-1	-1	Pouca agressividade	Pouca agressividade
420	1	-1	Sem agressividade	Pouca agressividade
504	0	-2	Sem agressividade	Pouca agressividade
558	1	-1	Sem agressividade	Pouca agressividade
586	0	0	Sem agressividade	Sem agressividade
657	-1	0	Pouca agressividade	Sem agressividade

3.5 Taxa de corrosão

Na tabela 7 estão os resultados das taxas de corrosão dos corpos de prova, pode-se ver que aqueles colocados a três metros de profundidade apresentaram elevada taxa de corrosão. Isso aponta para duas explicativas, a primeira é decorrente de uma elevada acidez no solo, conforme PANNONI [21], a outra advém do surgimento de microfissuras nos corpos de prova consequentes dos impactos de penetração, interferindo assim nestas projeções de tempo.

Tabela 7: Taxa de corrosão obtida com os corpos-de-prova.

CP	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	ΔW (g)	ÁREA (cm ²)	TC (mm/ano)	TC (µm/ano)	PROFUND. (m)
7-1	169,331	168,196	1,135	43,176	0,0339	33,92	1
7-2	164,258	163,952	0,305	42,963	0,0092	9,17	2
7-3	166,118	164,158	1,960	44,464	0,0569	56,87	3
5-1	167,183	167,056	0,127	44,119	0,0037	3,71	1
5-2	166,993	166,220	0,773	44,038	0,0227	22,65	2
5-3	167,085	161,372	5,713	42,264	0,1744	174,37	3
2-1	164,927	164,811	0,116	43,646	0,0034	3,425	1
2-2	166,752	165,815	0,937	43,285	0,0279	27,93	2
2-3	168,206	164,968	3,238	42,372	0,0986	98,55	3

4. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos, pode-se constatar que a resistividade, superior a 20 kΩ.cm, indicou solos essencialmente não corrosivos, o aumento da resistividade verificado em março pode ser explicado pelo elevado índice pluviométrico do período que provoca a diluição dos sais minerais do solo. O resultado para o potencial redox, de 100 a 300 mV estabeleceu tendência a solos com corrosividade ligeira a moderada com o aumento da profundidade, tornando-se favorável ao ataque de corrosão microbiológica.

Em relação ao potencial estrutura-solo, na faixa de -0,4 a -0,7 V/ECS, demonstrou que não há ocorrência de corrente de fuga, portanto, classificado dentro do intervalo considerado normal. O índice de Steinrath apresentou resultados que classificam os solos em pouco agressivos a sem agressividade, enquanto que a taxa de corrosão dos corpos de prova se mostrou elevada aos três metros o que indica aumento da corrosividade em solos mais profundos.

O índice de Steinrath, é um dos métodos de avaliação da corrosividade mais completos pois leva em consideração diversas características do solo, tais como: resistividade, potencial redox, pH, teor de umidade e concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto. Apesar do resultado obtido para esse índice indicar que os solos se apresentam pouco corrosivos a sem corrosividade, esta análise não leva em consideração os diversos horizontes de solo em que as estacas estão imersas. A análise da taxa de corrosão dos corpos de prova inseridos em diferentes profundidades no solo obteve resultados divergentes apontando indícios de ocorrência de corrosão nas estacas.

Embora, os corpos de prova tenham identificado que a acidez do solo seja uma variável de ação corrosiva localizada, as estacas, diferentemente, são constituídas de uma única peça e normalmente atravessa diversos horizontes e condições do solo, o que pode submetê-las a situações mais agravantes de corrosividade, existindo a possibilidade de ocorrência de corrosão galvânica, por aeração diferencial, entre outros.

A associação dos resultados obtidos nos diferentes métodos utilizados pode constatar que o solo próximo às torres da linha de transmissão de energia elétrica Vila do Conde - Tucuruí é pouco corrosivo na superfície ocorrendo o aumento da corrosividade com o incremento da profundidade, além de, baseado nos resultados para o potencial redox, em maiores profundidades o solo é favorável ao ataque de corrosão microbiológica.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] BRAGA, G.E. *Avaliação da integridade estrutural e gestão dos ativos fundações metálicas de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica devido a corrosão*, Tese de D.Sc, Curso de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, MG, Brasil, 2016.
- [2] MOURA, J. S., SILVA, M. D. F., MIRANDA, P. P. O. P., *et al.*, “Corrosão: colunas de perfuração de poços de petróleo”, *Cadernos de Graduação*, Maceió, v. 3, n. 1, pp.65-74, nov. 2015.
- [3] SILVA, A. N., FERNANDES, A. M. S., OLIVEIRA, A. M., *et al.*, “Análise da Composição do solo e sua Influência no Processo Corrosivo de Postes Metálicos na UFERSA, Campus Caraúbas-RN”, *Blucher Chemistry Proceedings*, São Paulo, v. 3, n. 1, pp.1-10, nov. 2015.
- [4] YAN, M., SUN, C., XU, J., *et al.*, “Role of Fe oxides in corrosion of pipeline steel in a red clay soil”, *Corrosion Science*, v. 80, pp.309-317, mar. 2014.
- [5] BATTHARAI, J., “Study on the Corrosive Nature of Soil Towards the Buried-Structures”, *Scientific World*, v. 11, n. 11, July 2013.
- [6] NOVO, L. R. G. S. L., *Desenvolvimento de método para detecção de desgaste ou corrosão em hastas de âncora de torres estaiadas de linhas de transmissão de energia elétrica*, Tese de D.Sc., Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2015.
- [7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, Anuário Estatístico de Energia Elétrica, MME – Ministério de Minas e Energia, Anuário, 2014.
- [8] CAMPOS, J., SANTOS, T., SILVA, G., *et al.*, “Análise de sistemas de corrosão em diferentes meios”, *Perspectivas*, Campo dos Goytacazes, v. 6, n. 15, p.19-24, 2016. <http://www.seer.perspectivasonline.com.br>. Acessado em agosto de 2017.
- [9] NORHAZILAN, M.N., NORDIN, Y., LIM, K.S., *et al.*, “Relationship between Soil Properties and Corrosion of Carbon Steel”, *Journal Of Applied Sciences Research*, Malaysia, v. 3, n. 3, p.1739-1747, jan. 2012.
- [10] NOOR, E. A., AL-MOUBARAKI, A., H., “Influence of Soil Moisture Content on the Corrosion Behav-

- ior of X60 Steel in Different Soils”, *Arabian Journal For Science And Engineering*, v. 39, n. 7, p.5421-5435, 30 abr. 2014.
- [11] FRAUCHES-SANTOS, C., ALBUQUERQUE, M. A., OLIVEIRA, M. C. C., *et al.*, “A corrosão e os agentes anticorrosivos”, *Revista virtual de química*, v. 6, n. 2, p.293-309, 2014.
- [12] IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Bases Cartográficas e Referenciais do Território, <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais>. Acessado em agosto de 2017.
- [13] PEREIRA, R. F. C., OLIVEIRA, E. S. D., LIMA, M. A. G. A., *et al.*, “Corrosion of Galvanized Steel Under Different Soil Moisture Contents”, *Materials Research*, v. 18, n. 3, p.563-568, jun. 2015.
- [14] YAJIMA, A., WANG, H., LIANG, R. Y., CASTANEDA, H., “A clustering based method to evaluate soil corrosivity for pipeline external integrity management”, *International Journal Of Pressure Vessels And Piping*, v. 126-127, p.37-47, fev. 2015.
- [15] GENTIL, V., *Corrosão*. 6. ed. Rio de Janeiro, Ltc, 2011.
- [16] PINHEIRO, C. L., *Avaliação da corrosividade de solos na região amazônica através de técnicas eletroquímicas de polarização e impedância eletroquímica*, Dissertação de M.Sc., Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2010.
- [17] LOPES, I. M. F., *Avaliação do desempenho frente à corrosão de um aço galvanizado em extratos aquosos de solo*, Dissertação de M.Sc., Curso de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 2012.
- [18] GIAROLA, J. M., *Avaliação de soluções sintéticas e amostras de solos no processo de corrosão no aço APIX65*, Tese de D.Sc., Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del Rei, São João del-Rei, Brasil, 2016.
- [19] FERNANDES, A. M. S., SILVA, A. N., OLIVEIRA, A. M., *et al.*, “Influência do solo na corrosão de hastes de âncora utilizadas no estaiamento de redes elétricas”, *Blucher Chemistry Proceedings*, São Paulo, v. 3, n. 1, p.1-10, nov. 2015.
- [20] SAUPI, S. R. A., SULAIMAN, M. A., MASRI, M., “Effects of Soil Properties to Corrosion of Underground Pipelines: A Review”, *Journal of Tropical Resources And Sustainable Science*, v. 3, pp.14-18, 2015.
- [21] PANNONI, F. D., *Sobre a durabilidade de estacas metálicas*, São Paulo, [s.n.], 2008.
- [22] MACHADO, L., *Análise da distribuição dos potenciais tubo/solo em gasodutos enterrados de aço carbono API 5L protegidos catódicamente por corrente impressa: influência da proximidade do leito de ânodos*, Dissertação de M.Sc., Curso de Mestrado em Energia, UNIFACS Universidade Salvador, Salvador, Bahia, 2015.

ORCID

Rafaela Costa	https://orcid.org/0000-0002-6902-8410
Renata Godinho	https://orcid.org/0000-0001-9340-3324
Alexandre Vilhena	https://orcid.org/0000-0002-9933-1429
Marcelo Picanço	https://orcid.org/0000-0001-7313-1229
Alcebíades Macêdo	https://orcid.org/0000-0002-4580-6679