



**DIAGNÓSTICO DA CORROSÃO DAS ESTRUTURAS METÁLICAS NAS TORRES
DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO ACARAY-OVIEDO**

N. Díaz Mora* **J. M. Silva**** **E. C. Velázquez *****

R. Coronel**** **M. B. Stecanella*** **O. N. Shinya*******

*** UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná**

**** LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento**

***** Usina Hidrelétrica de Itaipu**

****** ANDE - Administración Nacional de Eletricidad**

******* UCA - Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”**

RESUMO

Com crescente aumento dos níveis de exigência na entrega de energia ao consumidor final, especialmente no que diz respeito à qualidade e continuidade do fornecimento, torna-se necessário aumentar e/ou melhorar o controle de fatores ligados ao envelhecimento das linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão. Um dos principais fatores, se não o mais importante, é a corrosão dos materiais que compõem as linhas de transmissão, uma vez que, a queda de uma torre de linha de transmissão significará consideráveis perdas econômicas e uma advertência de que sucessivos casos possam vir a ocorrer.

Numa inspeção visual na linha de transmissão em 220kV Acaray-Oviedo (de propriedade da Administración Nacional de Electricidad – ANDE do Paraguai) foram constatados casos de corrosão de pés e oxidação das ferragens aéreas das estruturas. Atualmente, essa corrosão é apenas registrada como um detalhe da inspeção sem que, entretanto, tenha sido feito algum estudo sistemático para determinar as causas, formas e os mecanismos de corrosão destas estruturas. Baseando-se em ensaios físico-químicos, neste trabalho é apresentado um diagnóstico da corrosividade do solo de aterramento de algumas torres dessa linha de transmissão. Visando alguma contribuição com a adoção de soluções para os problemas de corrosão nas linhas da ANDE, pretende-se, também, por intermédio deste trabalho, suscitar alguma troca de experiências entre a ANDE e empresas do setor elétrico brasileiro, uma vez que no Brasil já estão bastante consolidados os métodos de diagnóstico e diversas técnicas para o monitoramento e controle da corrosão de linhas.

Deve destacar-se que a Linha de Transmissão Acaray-Oviedo integra o sistema interconectado nacional do Paraguai, que transporta ao redor de 25% da energia subministrada pela Itaipu Binacional. Deriva daí a importância de controlar-se, na medida do possível, os parâmetros que influenciam na confiabilidade, disponibilidade e vida útil dessas instalações.

PALAVRAS-CHAVE:

Linhas de transmissão, corrosão, pés de torre, solos.



1. INTRODUÇÃO

Uma pilha de corrosão é caracterizada por uma corrente elétrica devido à condução iônica no eletrólito, condução eletrônica no metal e transferência de cargas através de reações eletroquímicas na interface metal/solo [1,2].

As duas principais reações que caracterizam a corrosão de estruturas enterradas é a dissolução anódica do material metálico e a redução catódica dos íons hidrogênio e/ou oxigênio dissolvido na umidade do solo. Na região anódica (ânodo), ocorre a reação de corrosão do metal, de acordo com a seguinte reação:



Na região catódica (cátodo), ocorre a reação de redução de uma espécie presente no eletrólito. No caso dos solos, as principais reações de redução que ocorrem no cátodo são:

A reação de redução do oxigênio:



A reação de redução do hidrogênio em solo ácido:



A reação de redução do hidrogênio em solo levemente ácido:



Quando a corrosão está correlacionada com a redução do oxigênio, os parâmetros físico-químicos mais importantes a serem considerados são a resistividade do solo juntamente com a quantidade de cloretos e o potencial de corrosão. Quando a corrosão está relacionada com a redução do hidrogênio, o pH e a acidez total do solo passam a ser os parâmetros físico-químicos mais importantes a serem analisados.

As regiões anódicas e catódicas das pilhas de corrosão podem surgir de maneira aleatória por toda a superfície metálica em contato com o solo, ocasionando corrosão generalizada ou de maneira preferencial, denominada corrosão localizada. No caso da corrosão localizada é necessário levar em conta a medida da aeração do solo.

A corrosão dos metais pelo solo é de natureza eletroquímica, o que significa que ocorre a formação de pilhas de corrosão, com o aparecimento, na superfície do metal, de áreas anódicas e catódicas. A corrosão de estruturas enterradas pode ser causada tanto pelas propriedades físico-químicas e biológicas do solo (agressividade específica) como por fatores externos que interferem no processo de corrosão (agressividade relativa).

Dentre os fatores externos, os de maior importância são as correntes de fuga e a presença de metais dissimilares em contato. No primeiro caso, a avaliação das correntes pode ser feita utilizando-se a medição do potencial de corrosão. No segundo caso, a avaliação deverá ser feita por meio de inspeção local ou de análise dos dados de projeto sobre os materiais utilizados.

A agressividade específica por sua vez, está intimamente ligada às propriedades locais do solo, tais como: resistividade elétrica, teor de umidade, acidez ou alcalinidade, permeabilidade, presença de sais solúveis, microorganismos e outras. Estes fatores atuam de forma conjunta e por este motivo a corrosividade dos solos não deve ser avaliada com base em propriedades isoladas.



Neste trabalho, são descritos os ensaios realizados em laboratório, sobre os principais parâmetros que influenciam a corrosividade do solo de aterramento de algumas torres da linha de transmissão Acaray-Oviedo. Ao mesmo tempo, são fornecidos alguns métodos e critérios básicos para a avaliação da mesma. Estes métodos e critérios não são únicos, havendo várias proposições que apresentam, na maioria dos casos, resultados satisfatórios. No entanto, nenhum desses métodos envolve todas as variáveis que atuam no processo de corrosão pelo solo, devendo ser sempre analisadas caso a caso, verificando qual o mais adequado para cada situação.

A caracterização física e química do solo da região de afloramento dos pés das torres foi realizada com base na referência [3] e em um estudo preliminar do solo da região de Foz do Iguaçu e Ciudad del Este, realizado no LAMAT - Laboratório de Materiais da UNIOESTE - Campus de Foz do Iguaçu [5].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 A linha Acaray-Oviedo

A Linha de Transmissão em 220kV Acaray-Oviedo, que integra o sistema interconectado nacional do Paraguai, constitui um trecho da linha Acaray-San Lorenzo com uma extensão de 305Km. Esta linha entrou em operação em dezembro de 1988 e atualmente transporta uma grande parte da energia subministrada pela Itaipu Binacional, o que torna de vital importância manter e/ou melhorar a disponibilidade, controlando os parâmetros que influenciam na confiabilidade e conseqüente vida útil das instalações.

Para a realização do trabalho aqui detalhado, inicialmente foi realizado um levantamento dos pontos de corrosão nas ferragens e nos pés de torres da linha em estudo, tomando-se o cuidado de registrar o ambiente no qual as mesmas estavam instaladas. A análise física e química foi iniciada com a coleta de amostras do solo dos pés de torre dos números: 500, 520, 550, 570, 589, 606 e 806. Com essas amostras foram realizados ensaios de resistividade do solo em função da umidade, pH, capacidade de retenção de água, preparação de extrato aquoso e determinação de sais dissolvidos no extrato aquoso.

2.2 Coleta de amostras e preparação das amostras

O solo foi coletado a uma profundidade de 20cm da superfície e retirado com uma pá. A amostra, de aproximadamente 3Kg foi colocada em saco plástico limpo e impermeável ao ar. As amostras de solo foram estocadas em um ambiente seco e em temperatura ambiente para retardar possíveis alterações devido a reações químicas e biológicas. As amostras foram colocadas na estufa para secagem por 24 horas. Depois de secas foram destorroadas e peneiradas, posteriormente alíquotas foram utilizadas para ensaios de resistividade do solo em função da umidade, pH, capacidade de retenção de água e preparação de extrato aquoso e o extrato de KCl.

2.3 Umidade

Na determinação da umidade do solo, foi adicionado 50ml de água para uma quantidade pré determinada de solo. A cada adição de água, retirava-se uma pequena quantidade da amostra, pesava-se num recipiente pré-pesado antes de ir para secagem em estufa por 12 horas. Após esse período era realizada a pesagem da amostra, sendo os resultados expressos em porcentagem de perda de peso devido a evaporação da água.

2.3.1 Curva de resistividade do solo

Foi medido o valor da resistividade através de caixa padrão "soil box" com instrumentos adequados, voltímetro de alta impedância e fonte de corrente alternada. A cada medida realizada adicionava-se 50ml de água destilada a quantidade de amostra utilizada para a medição da resistividade. E a cada teor de água mediu-se os valores de resistividade.



2.3.2 Capacidade de retenção de água do solo

Esta propriedade foi obtida através do procedimento da norma ASTM D 2017 e expressa em porcentagem. Em um funil de "buchner" de aproximadamente 5cm de diâmetro e 2,5cm de profundidade, coberto com um papel de filtro qualitativo, foi adicionada uma quantidade de amostra até o topo. Esta amostra foi compactada e nivelada com uma espátula. Colocou-se o funil cheio em um becker de capacidade de 400ml, retendo-o em posição para cima, pelas bordas do funil. Adicionou-se água ao becker a uma altura ligeiramente superior à do papel de filtro. Esperou-se até a amostra umidificar por capilaridade de modo a evitar encapsulamento de ar na coluna. Quando a parte superior da amostra de solo apresentava sinais de umidade, adicionava-se mais água até seu nível aproximar-se do topo do funil. Cobriu-se o becker, deixando amostra do solo umedecida no mínimo por 12 horas. Colocou-se o funil coberto em um frasco de sucção e após 15 minutos, remove-se o funil do frasco de sucção, transferindo-se a amostra do solo em um recipiente previamente tarado e determina-se o teor de umidade em porcentagem.

2.4 Preparação e medição do pH do extrato aquoso

Em um becker de 100ml, foi adicionado 10g de terra fina e seca, juntamente com 25ml de água destilada, agitou-se durante 10 minutos em agitador magnético. Em seguida, foi feita a calibração do pHmetro, ligando o mesmo e deixando-o estabilizar por 15 minutos. Logo após, lavou-se com água destilada e enxugou com papel-lenço. Na sequência, o eletrodo combinado é mergulhado na amostra, esperou-se estabilizar o valor e anotou-se o valor obtido do extrato aquoso.

2.5 Acidez total

Uma amostra de 16g do solo (seco e finamente moído) foi depositada em um becker de 150ml e foi adicionado um volume de 40ml de KCl, 1N, agitou-se o conjunto durante meia hora com agitador magnético e, em seguida, foi deixado repousando por uma hora. Após a decantação, retirou-se 15ml do sobrenadante, que foi aquecido até a fervura, esfriado e titulado com NaOH, 0,1N. Na titulação deve ser usado fenolftaleína como indicador.

2.6 Determinação de cloretos

Foi retirado 25ml do extrato de saturação, adicionou-se 5 gotas do cromato de potássio e titulou-se com solução de nitrato de prata 0,05N até a formação de coloração vermelha persistente.

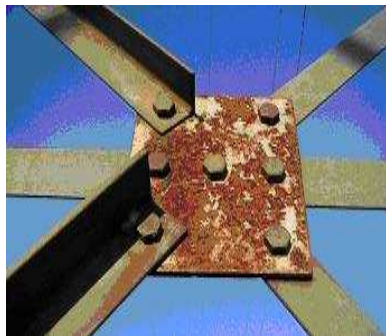
2.7 Determinação de carbonatos/bicarbonatos

Na determinação de carbonatos, foi retirado 10ml do extrato de saturação, adicionou-se 3 gotas de fenolftaleína (em presença de carbonato ou base a coloração é vermelha) e titulou-se com solução de ácido sulfúrico 0,025N até a viragem para incolor (fica ácido).

Na determinação de bicarbonatos, em 10ml do sobrenadante adicionou-se 4 gotas de metil orange e titulou-se com ácido sulfúrico até a viragem na cor rósea seja persistente.

3. RESULTADOS

De uma inspeção visual das estruturas aéreas e das fundações de 19 torres da linha em estudo, foram registradas evidências de corrosão em algumas dessas torres. Na Figura 1 são apresentadas fotografias de parte da estrutura aérea das torres nº. 648 e do pé de torre de nº. 570, respectivamente.



(a)



(b)

FIGURA 1: Evidências de corrosão na Linha de Transmissão Acaray-Oviedo: (a) na estrutura da torre n°. 648; (b) no pé de torre de n°. 570.

3.1 Análise química

Os resultados da análise química referente às torres estudadas são apresentados a seguir. Na Tabela 1, são apresentados os resultados das medidas de acidez total e pH.

TABELA 1 : Parâmetros químicos determinados em algumas torres da LT 525kV Acaray-Oviedo.

Torre	500	520	550	570	589	606	806
Acidez Total/(mEq/100gsolo)	1,88	2,66	2,5	2,19	2,19	2,82	3,76
pH	6,1	5,2	5,4	5,7	5,8	5,2	5,1

A partir da Tabela 1, obteve-se a Figura 2, que relaciona a acidez total (obtida com o uso do extrato KCl 1M) com o pH do extrato aquoso.

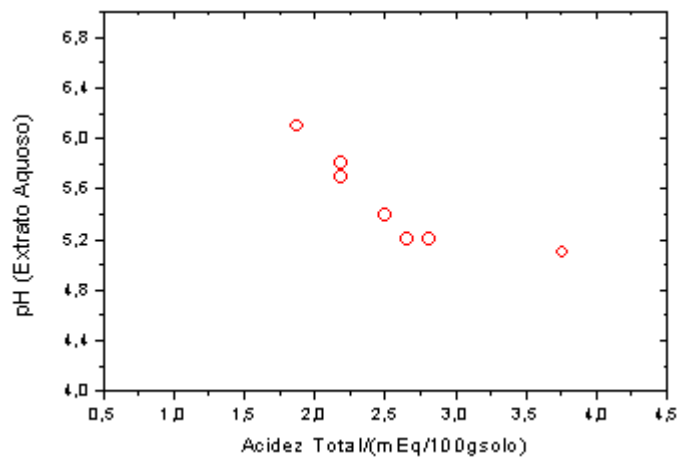


FIGURA 2: Acidez total (em extrator KCl 1M) com o pH do extrato aquoso.

Sabe-se que grande parte da corrosão de materiais encontra-se associada à concentração de íons dissolvidos na umidade do solo, assim, os íons mais importantes para serem analisados são : o cloreto e hirogrênio e algumas vezes o íon bicarbonato, o qual pode apresentar alguma influência. Entretanto, neste trabalho, para todas as amostras de solo analisadas, o teor de bicarbonatos e cloretos foi da ordem de 8ppm e 2ppm respectivamente.

3.2 Análise física

Grande parte da corrosão de materiais encontra-se associada à parâmetros obtidos do gráfico de resistividade do solo em relação a porcentagem de água. Esses parâmetros foram determinados e podem ser verificados na Tabela 2.

TABELA 2 : Parâmetros físicos determinados em algumas torres da LT 525kV Acaray-Oviedo.

Torre	500	520	550	570	589	606	806
Resistividade inicial	170000 Ω.m	900000 Ω.m	260000 Ω.m	500000 Ω.m	800000 Ω.m	450000 Ω.m	500000 Ω.m
Capacidade de Retenção de água (CRH2O)	42 %	42 %	32%	42 %	35%	40%	38%
Resistividade na (CRH2O)	220	300	700	1000	320	220	600
Resistividade mínima	220	250	250	1000	300	220	300

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Da observação da Figura 1(a), é possível levantar algumas hipóteses sobre as causas da corrosão na estrutura da torre nº. 648. Por encontra-se instalada numa região agroindustrial, é provável que a corrosão observada seja resultado das características dessa atmosfera particular. Sabe-se que nesse tipo de atmosfera estão presentes além de efluentes gasosos como o SO₂, partículas de pó que são capturadas pela umidade formando substâncias ácidas que se depositam nas superfícies expostas, propiciando a formação de possíveis células de aeração diferencial. Entretanto, uma análise mais apurada sobre os mecanismos da corrosão das estruturas externas destas torres escapa aos objetivos deste trabalho.

A discussão dos resultados das análises químicas e físicas foi baseada nas quantidades de cloretos, bicarbonatos e acidez. Das análises físicas, observou-se os valores de : resistividade mínima; resistividade na capacidade de retenção de água; ponto de retenção de água; pH e acidez. Estas análises foram feitas através da técnica de função dose resposta.

4.1 Teor de cloretos e de bicarbonatos

O teor de cloretos, obtido nas amostras analisadas foi de 2ppm. Este valor é baixo e portanto o íon cloreto não é um fator muito importante na análise dos solos em questão. O teor de bicarbonatos, obtido nas amostras analisadas foi de 8ppm. Este valor é baixo e portanto o íon bicarbonato não é um fator muito importante na análise dos solos em questão.

4.2 Acidez total em relação ao pH do extrato aquoso

No presente trabalho, observou-se uma perfeita correlação entre os valores da acidez total com o pH do extrato aquoso. O gráfico (Figura 2) apresentou uma curva característica que pode ser correlacionada. Esta correlação é perfeitamente conhecida através da análise de uma curva exponencial decrescente de primeira ordem. Como resultado dessa correlação pode-se classificar a agressividade do solo, em termos de pH pelo critério de Stratfull [5] e/ou acidez total pelo critério de Girard, assim como, pode-se usar o pH para checar o valor da acidez e vice-versa.

4.3 Análise da corrosividade do solo através da função dose-resposta

Da Tabela 2 foram extraídos os dados de resistividade no ponto de retenção de água, na capacidade de retenção de água, no pH e na acidez total. Com esses valores foi feito um tratamento matemático através da função dose-resposta.

A função dose-resposta tem sido muito útil no comportamento da corrosão atmosférica dos metais e tem sido observado um comportamento muito similar para o estudo da corrosividade de solos, através da equação:

$$C = K \cdot t^n$$

Equação 5



Onde: (C) representa a perda de espessura média do metal em μm ; (t) é o tempo de exposição em anos; (K) e (n) são as constantes calculadas pela linearização logarítmica da Equação 5. A constante (K) representa a corrosão em μm para o primeiro ano; e, a constante (n) sugere o efeito passivador do solo, o qual depende diretamente do metal, das condições físico-químicas do solo e de condições de exposição. Essas constantes são determinadas empiricamente a partir da extrapolação bilogarítmica dos dados experimentais de corrosão (μm) vs tempo (anos) conforme a Equação 6.

$$\text{LogP} = \log K + n \cdot \log t \quad \text{Equação 6}$$

A representação em coordenadas log-log da Equação 5 evidenciada pela Equação 6 é uma linha reta. Por meio da regressão linear utilizando-se o método dos mínimos quadrados calculam-se as constantes K (intercepto) e n (inclinação) da reta.

É possível também determinar a constante K com base nos teores de acidez total, porcentagem da retenção de água e do valor da resistividade no ponto de retenção de água, por meio da regressão linear múltipla que resulta em uma equação do tipo:

$$K' = a_0 + a_1 \cdot [R] + a_2 \cdot [RA] + a_3 \cdot [AT] \quad \text{Equação 7}$$

Onde os coeficientes (a_0 até a_3) são as constantes calculadas; (K') é a corrosão anual em μm ; [R] é a resistividade do solo no ponto de retenção de água em $\Omega \cdot \text{m}$; [RA] é a retenção de água em porcentagem e [AT] é a acidez total em meq/100gsolo.

Com esse tratamento obtém-se a função dose resposta que exprime a perda de espessura média dos metais enterrados, conforme as equações abaixo:

$$K1 = a_0 + a_1 \cdot [R] + a_2 \cdot [RA] + a_3 \cdot [AT] \quad \text{Equação 8}$$

$$K2 = a_0 + a_1 \cdot [R][RA] + a_3 \cdot [AT] \quad \text{Equação 9}$$

$$K3 = a_0 + a_1 \cdot [R] + a_2 \cdot [RA] + a_3 \cdot [AT] + a_4 [R][RA] + a_5 [RA][AT] + a_6 [R][AT] + a_7 [R][RA][AT] \quad \text{Equação 10}$$

$$K4 = a_0 + a_1 \cdot [R]^{-0,5} + a_2 \cdot [RA] + a_3 \cdot [AT] + a_4 [R][RA] + a_5 [RA][AT] + a_6 [R][AT] \quad \text{Equação 11}$$

Estas equações foram aplicadas em um banco de dados contendo informações de aproximadamente 500 amostras de solos. Para amostras do banco, a taxa de corrosão é sabida através da realização da técnica de resistência de polarização linear, juntamente com a resistividade na retenção de água, com a porcentagem de capacidade de retenção de água e com a acidez total.

Uma vez correlacionados esses valores para o banco de dados existente, desenvolve-se uma relação, de modo que, é possível saber se a corrosão de amostras novas sem o parâmetro “taxa de corrosão a partir das resistências de polarização linear”, desde que, sejam conhecidos os valores dos outros parâmetros acima mencionados. Assim, verificou-se que o solo pertencente a torre 570 é o menos agressivo e o solo pertencente a torre 606 é o mais agressivo. Para os solos de agressividades intermediárias a ordem crescente (do solo menos agressivo para o solo mais agressivo) é a seguinte : 550<520<806<589<500.

Todos os solos analisados podem ser classificados como solo de pouca agressividade, isto é, solo com tendência de taxa de corrosão entre 10 a 100 $\mu\text{m}/\text{ano}$. Isto significa que as torres (cantoneiras de 6 a 10 mm de espessura) localizadas nesses solos terão vida útil próximo de 40 anos, desde que não seja feita manutenção. Caso seja feito algum tipo de manutenção, até mesmo, somente o processo de pintura na região de afloramento, esse tempo de vida aumentará. Com relação ao material galvanizado dessas torres,



pode-se concluir que em 10 anos de exposição nesse solo, haverá perda da galvanização, podendo haver aparecimento de corrosão vermelha.

Todos os solos analisados apresentam um alto grau de intemperização, pois todos eles apresentaram valores de resistividades iniciais maiores que $100.000\Omega.m$. Todos os solos analisados mostraram ser poucos aerados, pois todos eles apresentaram uma pequena diferença entre a porcentagem de água na resistividade mínima e a porcentagem de água no ponto de retenção de água. Isto indica que todos os solos analisados apresentam alta tendência para a corrosão por aeração diferencial, isto é, alto grau de agressividade na interface solo/ar (região de afloramento).

Os solos analisados indicaram pouca porosidade, pois todos eles mostraram que a capacidade de retenção de água apresentou porcentagem de água maior que a porcentagem de água na umidade de saturação. O solo da torre 570 apresentou a maior resistividade mínima, enquanto que o solo da torre 606 apresentou a menor resistividade mínima. Todos os solos analisados apresentaram umidade de saturação acima de 30%, com exceção do solo próximo a torre 550 que apresentou uma umidade de saturação de 27%.

5. CONCLUSÃO

De uma inspeção visual realizada, foram levantados problemas evidenciais de corrosão nas estruturas aéreas e nas fundações de 19 torres da linha de Transmissão em 220kV Acaray-Oviedo. Com base num estudo quantitativo realizado pelos autores, foi possível elaborar um diagnóstico da corrosividade do solo proveniente da região de afloramento de 7 pés de torres dessa linha.

Para este trabalho, foi feita uma classificação em ordem crescente de agressividade do solo entre as torres estudadas sem a preocupação de mostrar os valores da taxa de corrosão. Assim, verificou-se que o solo pertencente a torre 570 é o menos agressivo e o solo pertencente a torre 606 é o mais agressivo. Para os solos de agressividades intermediárias a ordem crescente (do solo menos agressivo para o solo mais agressivo) é a seguinte : 550<520<806<589<500.

Todos os solos analisados podem ser classificados como solo de pouca agressividade, isto é, solo com tendência de taxa de corrosão entre 10 a $100\mu m/ano$. Isto significa que as torres (cantoneiras de 6 a 10 mm de espessura) localizadas nesses solos terão vida útil próximo de 40 anos, desde que não seja feita manutenção. Caso seja feito algum tipo de manutenção, até mesmo, somente o processo de pintura na região de afloramento, esse tempo de vida aumentará. Com relação ao galvanizado dessas torres, pode-se concluir que em 10 anos de exposição nesse solo, haverá perda da galvanização, podendo haver aparecimento de corrosão vermelha.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SERRA, E. T. **Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo**. Rio de Janeiro: CEPTEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), 2006, 169p.
- [2] GENTIL V. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- [3] SILVA, J. M.; LÁZARIS, J.; TERSARIOL, L. H. **Avaliação da corrosividade de solos pertencentes a região de afloramento de pés de torres de linhas de transmissão**. ERIAC - X Encuentro Regional Latinoamericano de la Cigré 18 a 22 de mayo, Puerto Iguazú, Argentina, 2003.
- [4] BURIN, E. L. K.; DÍAZ MORA, N.; SIHVENGHER, J. C. **Estudo da corrosividade do solo em pés de torre de linhas de transmissão**. EAIC - XIII Encontro Anual de Iniciação Científica 29 de agosto a 1 setembro, Londrina, Paraná, Brasil, 2004.
- [5] ASTM. **Hydrogen embrittlement testing**: STP-543. Plenum Press, 1974.