



## COTEQ-091 INFLUENCIA DA AGRESSIVIDADE DO SOLO NA CORROSÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO PARAGUAIO

José M. Silva<sup>1</sup>, Nora Díaz Mora<sup>2</sup>, Mayara B. Stecanella<sup>3</sup>,  
Eduardo V. Castillo<sup>4</sup>, João C. Sihvenger<sup>5</sup>, Raúl Coronel<sup>6</sup>

Copyright 2007, ABENDE, ABRACO e IBP

Trabalho apresentado durante a 9ª. COTEQ – Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, em Salvador/BA, no mês de junho de 2007.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

### Sinopse

---

Parte importante da energia gerada por Itaipu Binacional é transportada pela Linha de Transmissão em 220kV Acaray–Oviedo (circuito 1), da Administración Nacional de Electricidad - ANDE do Paraguai, assim é necessário controlar, na medida do possível, os parâmetros que influem na confiabilidade, disponibilidade e vida útil destas instalações. Esta linha, que entrou em operação em dezembro de 1988 e constitui um trecho da linha Acaray-San Lorenzo, tem uma extensão de 305 km e conta com um total de 723 torres. Enquanto que no Brasil, as empresas do setor elétrico geralmente contam com um setor de corrosão encarregado da prevenção, manutenção e correção dos efeitos causados pela corrosão, no Paraguai verifica-se que a corrosão tanto nas estruturas enterradas como nas estruturas expostas a atmosfera é apenas registrada como um detalhe da inspeção. Com base nos resultados de ensaios físicos e químicos de amostras do solo de pés de torres da Linha Acaray–Oviedo é apresentada aqui uma classificação qualitativa da agressividade do mesmo com a intenção de auxiliar a ANDE no controle da corrosão dessas torres.

Esta pesquisa foi desenvolvida por uma equipe interinstitucional e binacional na qual estão envolvidos pesquisadores da UNIOESTE - Campus de Foz do Iguaçu, do LACTEC, da ANDE e da Itaipu Binacional.

### Introdução

---

A corrosão de estruturas enterradas pode ser causada tanto pelas propriedades físico-químicas e biológicas do solo (agressividade específica) como por fatores externos<sup>(01)</sup> que interferem no processo de corrosão (agressividade relativa). 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<sup>(02,03)</sup> não deve ser avaliada com base em propriedades isoladas. A presente proposta descreverá os ensaios realizados em laboratório, sobre os principais parâmetros que influenciam a corrosividade dos solos e fará avaliação da mesma, sempre analisando caso a caso e verificando o mais adequado para cada situação.

---

<sup>1</sup>Doutor, Químico – LACTEC

<sup>2</sup>Doutora, Engenheira Química - UNIOESTE (Universidade Estadual do Oeste do Paraná)

<sup>3</sup>Acadêmica de Engenharia Mecânica – UNIOESTE (Universidade Estadual do Oeste do Paraná)

<sup>4</sup> Mestre, Engenheiro Eletricista - ITAPU BINACIONAL

<sup>5</sup>Químico – ITAPU BINACIONAL

<sup>6</sup>Engenheiro Eletricista - ANDE

## 1. Procedimentos Experimentais

---

### 1.1 *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 consequente 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, 553, 570, 589, 606, 682, 783, 788, 798 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.

### 1.2 *Coleta de amostras e preparação das amostras*

O solo foi coletado a uma profundidade de 20 cm da superfície e retirado com uma pá. A amostra, de aproximadamente 3 kg 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, capacidade de retenção de água e preparação de extrato aquoso e o extrato de KCl.

### 1.3 *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 à evaporação da água.

#### 1.3.1 *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<sup>(04)</sup> a quantidade de amostra utilizada para a medição da resistividade. E a cada teor de água mediu-se o valor de resistividade.

#### 1.3.2 *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 5 cm 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.

#### 1.4 *Preparação e medição do pH do extrato aquoso*

Em um becker de 100ml, foi adicionado 10g de terra fina<sup>(04)</sup> e seca, juntamente com 25ml de água destilada, agitou-se durante 10 minutos em agitador magnético. Em seguida, foi feita a calibração do pH-metro, 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.

#### 1.5 *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<sup>(04)</sup> 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.

#### 1.6 *Determinação de cloretos*

Foi retirado 25ml do extrato de saturação, adicionou-se 5 gotas do cromato de potássio<sup>(04)</sup> e titulou-se com solução de nitrato de prata 0,05N até a formação de coloração vermelha persistente.

#### 1.7 *Determinação de carbonatos/bicarbonatos*

Na determinação de carbonatos, foi retirado 10ml do extrato de saturação<sup>(04)</sup>, 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<sup>(04)</sup>, 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.

## 2. Resultados Experimentais

---

### 2.1 – *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 : Acidez Total e pH de amostras do solo de aterramento de algumas torres da LT 525kV Acaray-Oviedo.

Torre	500	520	550	553	570	589	606	682	783	788	798	806
Acidez Total/(mEq/100gsolo)	1,88	2,66	2,5	1,7	2,19	2,19	2,82	1,2	1,5	1,2	1	3,76
pH	6,1	5,2	5,4	5,6	5,7	5,8	5,2	5,7	5,7	5,8	6,3	5,1

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 hidrogênio 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.

### 2.2 – *Análise física*

Na maioria dos materiais a corrosão encontra-se associada a parâmetros obtidos do gráfico de resistividade do solo em relação à porcentagem de água. Estes parâmetros foram determinados e são apresentados na TABELA 2.

TABELA 2: Dados físicos de amostras do solo de aterramento de algumas torres da LT 525kV Acaray-Oviedo.

Torre	$\rho_s$ inicial em mil $\Omega.m$	Umidade Inicial em %	C.R.H <sub>2</sub> O em %	$\rho_s$ na C.R.H <sub>2</sub> O( $\Omega.m$ )	$\rho_s$ mínima ( $\Omega.m$ )	Umidade na $\rho_s$ mínima em %
500	170	6	42	220	228	37
520	900	12	42	300	240	47
550	260	12	32	700	240	43
553	40	7	34	200	160	34
570	500	12	42	1000	1000	36
589	800	12	35	320	290	40
606	450	10	40	220	220	38
682	40	7	34	200	160	34
783	80	10	41	90	70	44
788	175	10	45	160	150	45
798	400	12	37	200	190	38
806	500	10	38	600	280	40

$\rho_s$  = Resistividade

C.R.H<sub>2</sub>O = Capacidade de retenção de água

### 2.3 – Resistividade vs umidade

A variação da resistividade com o teor de umidade do solo foi determinada para as torres mencionadas na TABELA 2. A FIGURA 1 apresenta os resultados obtidos.

Verifica-se que quando os solos estão com teores de umidade abaixo de 20%, aproximadamente, a resistividade é muito alta, decrescendo rapidamente com o aumento do conteúdo de água no solo até alcançar o ponto de resistividade mínima. O decréscimo da resistividade é função do aumento do teor de umidade que por sua vez é responsável pela solubilidade dos sais existentes.

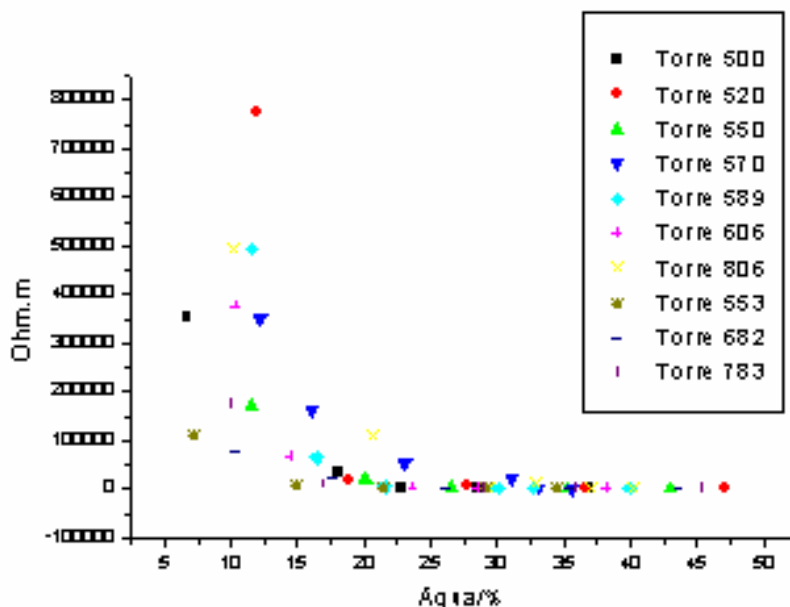


FIGURA 1: Resistividade (-100000 a 800000 Ohm.m) versus teor de umidade (5 a 50%) de amostras do solo de aterramento de algumas torres da LT 525kV Acaray-Oviedo.

## 2.4 – Agressividade do solo devido a sua textura física

Os valores de resistividade obtidos para as torres 520 e 553 são apresentados na Figura 2. Observa-se que ao trabalhar com a torre 553, os valores de resistividade se mantiveram abaixo dos valores obtidos para a torre 520 para todos os teores de umidade.

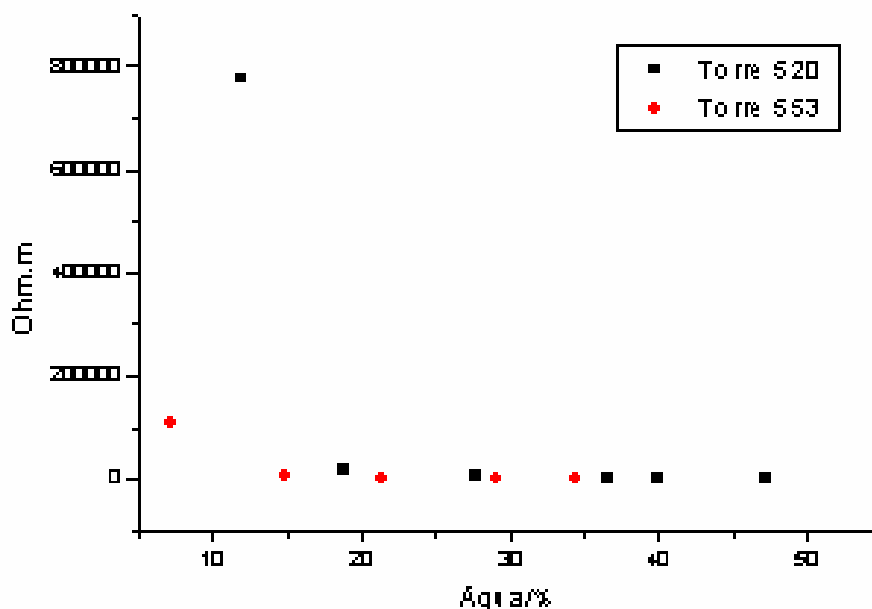


FIGURA 2: Resistividade (0 a 300000 Ohm.m) versus teor de umidade (10 a 50%) para as torres 520 e 553.

## 2.5 – Agressividade devido à estrutura química do solo (intensidade da redução do gás oxigênio dissolvido na umidade)

Num solo, só parte do volume total é ocupada pelas partículas sólidas, que se acomodam formando uma estrutura. O volume restante costuma ser chamado de vazios, embora esteja ocupado por água ou ar. O comportamento de um solo em particular depende da quantidade relativa de cada uma das fases (sólidos, ar e água). Pode-se resumir que em uma curva de resistividade em função do teor de umidade, existem dois fenômenos competitivos. Um estabelecido pela estrutura (condutividade por área de contato) quando o solo está com umidade abaixo da (C.R.H<sub>2</sub>O), e outro, estabelecido pela presença de água. Para teor de umidade acima da (C.R.H<sub>2</sub>O), quanto mais íons dissolvidos nessa umidade menor será a resistividade do solo e este fenômeno é o mais importante quando se deseja analisar a agressividade corrosiva de um solo, pois essa resistividade está relacionada com a reação catódica de redução do gás oxigênio dissolvido na umidade do solo. Os valores de resistividade mínima obtidos para as torres 570 e 682 são diferentes (vide FIGURA 3). A torre 570 apresenta 1000 Ω.m para a resistividade mínima, enquanto que a torre 682 apresenta 70 Ω.m para a resistividade mínima.

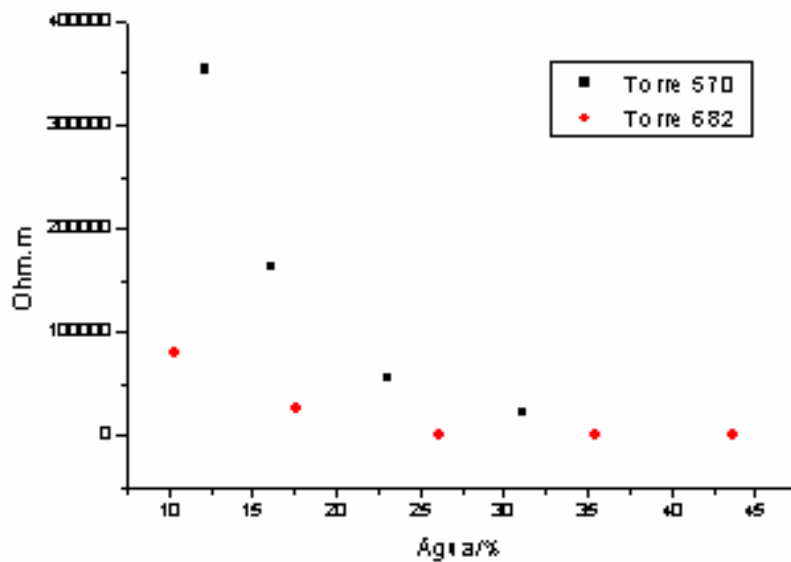


FIGURA 3: Resistividade (0 a 400000 Ohm.m) versus teor de umidade (10 a 45%) para as torres 570 e 682.

### 2.6 – Agressividade devido à estrutura química do solo (intensidade da redução do íon hidrogênio dissolvido na umidade)

Assim como a reação catódica do oxigênio, para teores de umidade acima da (C.R.H<sub>2</sub>O) é muito importante fazer análise da agressividade corrosiva de um solo pela reação catódica de redução do íon hidrogênio e esta reação é facilitada quanto maior for a acidez do solo. O valor de pH para a torre 798 é 6,30 enquanto que para a torre 806 é 5,10 (vide Fig.4).

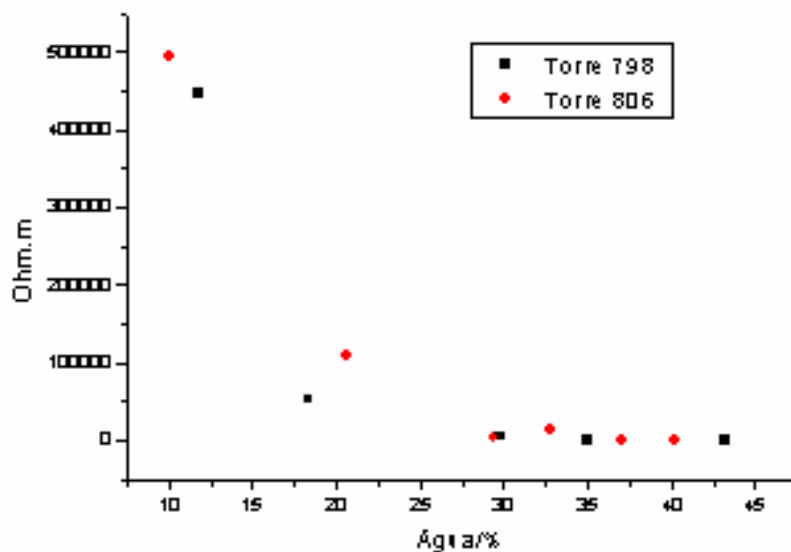


FIGURA 4: Resistividade (0 a 500000 Ohm.m) versus teor de umidade (10 a 45%) para as torres 798 e 806.

## 3. Discussão dos Resultados

A condutividade em solos com baixo teor de umidade (vide FIG.1) ocorre através da área de contato entre partículas, pois não há quantidade suficiente de água em poros interconectados e, nesse caso a estrutura do solo é um fator relevante. Por outro lado, em solos com teor de umidade alto, próximo à saturação do material, a condutividade elétrica ocorre mais facilmente pelos sais dissolvidos na fase líquida do solo. Estes dois fenômenos agem paralelamente, de modo que, nas condições iniciais a área de contato é que determina a resistividade, mas para a região de saturação é a dissolução de sais que determina o valor da resistividade.

Na referencia <sup>(07)</sup> foi definido o termo “aeração” como sendo a diferença entre a capacidade de retenção de água de um solo e sua umidade de saturação, nessa definição a umidade de saturação do solo é o teor de umidade correspondente à saturação do solo indeformado<sup>(05,06)</sup>, e a capacidade de retenção do solo é definida através de ensaio de laboratório em amostras deformadas. Cabe ressaltar que enquanto a umidade de saturação é um valor teórico, a capacidade de retenção é um valor empírico, determinado através de um procedimento padrão. Os solos têm por característica apresentar estruturas peculiares ao seu processo de formação. O arranjo entre partículas sólidas forma poros interconectados e poros isolados dentro da massa de solo. Se a estrutura não for destruída, alguns desses poros não têm conexão com o meio externo. Portanto, durante a saturação do solo, podem não ser preenchidos por água. Ao contrário, em um solo deformado, não existem vazios com ar no interior da massa. Ao se misturar água a um solo deformado todas as partículas sólidas entrarão em contato com a água. Portanto, é de se esperar que a capacidade de retenção de água tenha um valor superior ao teor de umidade de saturação de um solo indeformado. Na FIGURA 2, observa-se que a torre 553 está em um solo mais aerado que o solo da torre 520. Esta aeração está relacionada com uma menor intemperização deste solo em relação ao solo da torre 520. Esta pequena intemperização do solo na torre 553 é tão pronunciada, a tal ponto que, o solo em questão pode estar preenchido por defeitos homogêneos contendo grãos porosos e isto faz com que a capacidade de retenção de água (C.R.H<sub>2</sub>O) deste solo seja baixa (em torno de 30%), bem menor que a (C.R.H<sub>2</sub>O) do solo da torre 520 que é próximo de 50%. O solo da torre 520 é muito intemperizado, essa intemperização do solo na torre 520 é tão pronunciada, a tal ponto que, o solo dessa torre pode estar preenchido por defeitos heterogêneos contendo cimentação. Em termos de aeração, pode-se concluir que o solo da torre 553 é menos agressivo que o solo da torre 520, e ainda, neste solo as estruturas parcialmente enterradas, podem apresentar uma menor corrosão por aeração diferencial, na interface solo/ar, que em solos similares ao da torre 520.

Na FIGURA 3 são apresentados os valores de resistividade e porcentagem de água para a torre 570 e para a torre 682. Como pode ser observada, a torre 682 apresenta uma menor resistividade mínima (70 Ω.m) que a torre 570 (1000 Ω.m), sendo que a (C.R.H<sub>2</sub>O) e a porcentagem de água na resistividade mínima, para ambos solos dessas torres, foram similares e em torno de 40%. O pH destes solos, também foram similares (pH=5,7). A menor resistividade mínima na torre 682, faz com que a reação catódica de redução do oxigênio no solo dessa torre esteja bem mais facilitada que a redução do oxigênio no solo da torre 570.

Na FIGURA 4 são apresentados os valores de resistividade e porcentagem de água para a torre 798 e para a torre 806. A resistividade mínima, para ambos os solos dessas torres, foram similares. A porcentagem de água na resistividade mínima, para ambos os solos dessas torres, também foram similares e em torno de 40%. A aeração do solo nessas torres também pode ser considerada similar. O solo da torre 798 tem o pH de 6,30 enquanto que o pH da torre 806 é de 5,10. O menor pH da torre 806 faz com que a reação catódica de redução do íon hidrogênio no solo dessa torre esteja bem mais facilitada que a redução do íon hidrogênio no solo da torre 798.

## **Conclusões**

---

De uma análise geral envolvendo os efeitos de agressividade do solo devido: a sua textura física e a sua estrutura química, ora pela reação de redução do gás oxigênio, ora pela reação de redução do íon hidrogênio, pode-se classificar qualitativamente o solo de pés de torres da Linha Acaray–Oviedo do Paraguai.

Para este trabalho, o solo foi classificado em 2 grupos de agressividade:

Grupo 1 (solos poucos agressivos) compostos pelas seguintes torres: 500, 570, 589, 798, 553, 783, 788 e 789, 520, 550, 606 e 806.

Grupo 2 (solo agressivo) composto pela torre 682.

Para o solo do grupo 2, a torre composta de cantoneiras de 6 a 10 mm de espessura, terá vida útil próximo de 20 anos, desde que não seja feita manutenção. Caso seja feita algum tipo de

manutenção, até mesmo, somente o processo de pintura na região de afloramento, esse tempo de vida aumentará. Com relação ao galvanizado dessa torre, pode-se concluir que em 10 anos de exposição nesse solo, haverá perda da galvanização e aparecimento de corrosão vermelha, além do comprometimento mecânico do metal base (aço carbono).

### **Referências bibliográficas**

---

- (01) E.T.SERRA – Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPTEL – Rio de Janeiro (2006) 169p.
- (02) 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.
- (03) 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.
- (04) GCOI/SCM. (1995). Obtenção da curva característica de resistividade em relação a porcentagem de água em solos. In: III Encontro Técnico de Corrosão e Proteção. Recomendação Técnica.
- (05) Z.S. ABU-HASSANEIN; C.H.BENSON; L.R.BLOTZ - Electrical Resistivity of Compacted Clays. Journal of Geotechnical Engineering, v. 122, n. 5, (1996) p. 397-406.
- (06) R.G.CAMPANELLA; I.WEEMEES - Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies. Canadian Geotechnical Journal, v. 27, (1990)p. 557-567.
- (07) BOSZCZOWSKI, R. B.; SILVA, J. M - Avaliação da Resistividade Elétrica de um Perfil de Solo Residual em Função do Intemperismo e Teor de Umidade - Congresso Brasileiro de Mecânica das Rochas e Engenharia Geotécnica, 2006, Curitiba. Anais do XIII COBRAMSEG, 2006. v. 1. p. 119-124.