

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

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

Estudo da Corrosão por Solos Amazônicos através de Técnicas Eletroquímicas **Clairon L. Pinheiro¹, Marcelo C. Santos², José C. Cardoso Filho³**

Abstract

Soil corrosivity close ten towers of transmission line power located in the Amazon was examined by electrochemical techniques using aqueous extracts of these soils and the results were compared with Steinrath index (corrosivity index) of each soil. Tests of corrosion potential, polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were performed in aqueous extracts. The polarization curves at voltages of $\pm 100\text{mV}$ showed similar corrosion mechanisms (slopes of the Tafel straight lines without significant changes) and corrosion rates relatively low (around $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$). In the spectrum used in the tests EIS (1000 to 0.03 Hz), all Nyquist diagrams showed a capacitive arc in the form of a distorted semicircle. These diagrams were influenced by the difference in resistivity among the aqueous extracts (" Z_{REAL} " ranging from 3600 to 25000 $\Omega\cdot\text{cm}^2$) and from the simulation experimental data of EIS, it was observed that R_p ranged between 3.3 and 5.7 $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$. The Steinrath index associated with electrochemical tests showed satisfactory results for evaluation of the soils corrosivity, which can be considered as "low corrosivity soils".

Resumo

A corrosividade de solos próximos a dez torres de uma linha de transmissão de energia elétrica localizada na Amazônia foi analisada por técnicas eletroquímicas utilizando seus extratos aquosos e os resultados foram confrontados com o índice de corrosividade de Steinrath (IS) de cada solo. Os ensaios de potencial de corrosão, polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foram realizados nos extratos aquosos. As curvas de polarização para sobretensões de $\pm 100\text{mV}$ mostraram mecanismos de corrosão praticamente semelhantes (inclinações das retas de Tafel sem variações significativas), assim como taxas de corrosão relativamente baixas (da ordem de $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$). No espectro utilizado nos ensaios de EIE (1000 a 0,03Hz), todos os diagramas de Nyquist apresentaram um arco capacitivo na forma de um semicírculo distorcido. Tais diagramas foram influenciados pela diferença de resistividade entre os extratos aquosos (variação de " Z_{REAL} " entre 3600 e 25000 $\Omega\cdot\text{cm}^2$) e a partir da simulação dos dados experimentais de EIE, observou-se que R_p variou entre 3,3 e 5,7 $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$. Os índices de Steinrath associados aos ensaios eletroquímicos mostraram resultados satisfatórios para a avaliação da corrosividade de solos analisados, os quais podem ser considerados como "solos de baixa corrosividade".

Palavras-chaves: corrosão pelo solo, índice de Steinrath, polarização, impedância eletroquímica.

¹Mestre, Engenheiro Químico – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

²Mestrando, Engenheiro Químico – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

³Doutor – Professor – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

1. Introdução

A investigação do grau de corrosividade do solo é um assunto relevante em várias atividades e está associada à vida útil de materiais, equipamentos e estruturas, especialmente aquelas relacionadas à transmissão de energia elétrica, como as torres, que são estruturas vitais, sendo imperioso manter a sua integridade física (LABEGALINI *et al.*, 1992).

O Estado do Pará e a região Amazônica têm um papel importante na matriz brasileira de energia elétrica (onde a hidroeletricidade corresponde a 73,15%), por suas bacias hidrográficas apresentarem elevado potencial hidrelétrico. Assim, projetos de construção de novas usinas hidrelétricas (UHE) e linhas de transmissão (LTs) estão sendo realizados e, apesar da importância do assunto, são poucos os trabalhos científicos que abordam a corrosividade do solo na região Norte do Brasil (BRASIL, 2009).

A corrosividade de um solo pode ser mensurada por meio de índices de corrosividade (IC), onde parâmetros do solo como: resistividade elétrica, teor de umidade, pH, entre outros, são avaliados e índices parciais de corrosividade lhes são atribuídos. Tais índices parciais variam conforme a faixa de valores do parâmetro. Então, com o conhecimento destes valores, obtém-se o IC do solo e a aplicação de outras técnicas, como as eletroquímicas, pode fornecer informações complementares a esse respeito (ROBERGE, 1999; LOUREIRO *et al.*, 2006).

As técnicas eletroquímicas são importantes ferramentas que podem ser utilizadas para avaliar a corrosividade de solos e possíveis mecanismos que atuam nesse processo (OLIVEIRA, 2007). Na aplicação destas técnicas, monta-se uma célula de corrosão contendo um corpo-de-prova (CP) metálico enterrado em uma amostra de solo *in natura* ou imerso em seu extrato aquoso, realizam-se ensaios eletroquímicos como os de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e, a partir dos resultados obtidos, avalia-se a corrosividade do solo em questão. Assim, o objetivo deste trabalho foi aplicar estas técnicas em solos previamente selecionados de regiões próximas às torres de uma LT de energia elétrica e os resultados confrontados com os índices de Steinrath destes solos.

2. Experimental

Dez torres de uma linha de transmissão de energia elétrica localizada na região Amazônica foram selecionadas (identificadas de A a J) para se fazer o monitoramento da corrosão causada pelo solo em estruturas enterradas destas torres. Para isto empregaram-se procedimentos em campo: medida da resistividade elétrica do solo; do potencial redox e; coleta de amostras de solo, assim como procedimentos em laboratório: determinação do teor umidade; preparo dos extratos aquosos; ensaios para determinação do índice de Steinrath; confecção do corpo-de-prova do aço USI SAC 300 e; ensaios eletroquímicos.

2.1. PROCEDIMENTOS EM CAMPO

2.1.1. Resistividade Elétrica

Na medida da resistividade elétrica do solo empregou-se a metodologia adotada por Ferreira (2005) e Oliveira (2007) referente ao método de Wenner (norma ASTM G57 – 95a). Um terrômetro (marca Megabrás, modelo MTD20Kwe) forneceu a resistência elétrica do solo (R) em Kilo-Ohms (KΩ) e calculou-se sua resistividade elétrica (ρ_{campo}) através da equação (01), que representa a resistividade elétrica do solo contido em uma semi-esfera de raio “a”.

$$\rho_{\text{campo}} = \frac{4\pi \cdot R \cdot a}{\left\{ 1 + \left[\frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} \right] - \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + p^2}} \right] \right\}} \quad (01).$$

Onde:

- ρ_{campo} – resistividade elétrica do solo (KΩ.cm);
- R – resistência elétrica do solo (KΩ);
- a – distancia entre as estacas enterradas citadas no método (cm);
- p – profundidade de cravamento das estacas citadas no método (30cm).

2.1.2. Potencial Redox

Para medir o potencial redox (E_H) empregaram-se metodologias adotadas por Ferreira (2005) e Brasil *et al.* (2007), utilizando-se um multímetro (marca Minipa modelo ET-2702), um eletrodo de cobre-sulfato de cobre (ECSC) como eletrodo de referência (ER) e um contra-eletrodo (CE) de platina (lâmina). O valor do potencial encontrado foi corrigido para o eletrodo padrão de hidrogênio (EPH) pela equação (02).

$$E_H = E_p + E_r + 60 \cdot (pH - 7) \quad (02).$$

Onde:

- E_H – Potencial redox em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio (mV-EPH);
- E_p – Potencial medido experimentalmente em relação ao ECSC (mV-ECSC);
- E_r – Potencial do ECSC (mV) (340,2mV-EPH);
- pH – pH da suspensão solo-água (1:2,5).

Para calcular E_H , mediu-se o pH de uma suspensão solo-água na proporção de uma (1) parte de solo para duas partes e meia (2,5) de água destilada (1:2,5), cujo procedimento de preparo será descrito a posteriori.

2.1.3. Coleta de Amostras do Solo

A coleta e preservação das amostras de solo basearam-se em metodologia adotada por Ferreira (2005). As amostras de solo foram coletadas a um raio máximo de 1m da estrutura da torre em contato com o solo, à profundidade de 0,5 a 1m com o auxílio de um trado em quantidades de 1kg, aproximadamente. Após, colocou-se a amostra em saco plástico estanque, vedou-o com fita adesiva, identificou-o e levou-o ao laboratório. As dez amostras de solo coletadas foram identificadas por ordem alfabética com as letras maiúsculas de A até J, representando a localização das suas respectivas torres e com a data da coleta.

2.2. PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

2.2.1. Determinação do Teor de Umidade das Amostras de Solo

Para determinar o teor de umidade dos solos (U_{SOLO}) enviados ao laboratório, empregou-se a metodologia gravimétrica (NUSSEGERGER, 2005 *apud* OLIVEIRA, 20007, p. 33) baseando-se na secagem de solo descrita por Ferreira (2005). Utilizaram-se duas (2) placas de petri para cada amostra, balança de precisão (marca Gehaka modelo AG200) e uma estufa (marca SOC. FABBE) a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Pesou-se a placa de petri, anotou-se sua massa (M_1) e tarou-se a balança. Em seguida, pesou-se cerca de 50g de amostra de solo sobre a placa de petri e anotou-se sua massa (massa de solo úmido ou M_2). Após estas pesagens, a amostra de solo foi colocada na estufa à temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas e, após este período, pesou-se o conjunto placa de petri mais solo seco e anotou-se sua massa (M_3). De posse das massas M_1, M_2, M_3 , utilizou-se a equação (03) para o cálculo do teor de umidade (U_{SOLO}).

$$U_{SOLO} = \left[\frac{M_2 - M_3 - M_1}{M_2} \right] . 100\% \quad (03).$$

Onde:

U_{SOLO} – Teor de umidade da amostra de solo

M_1 – Massa da placa de petri (g);

M_2 – Massa da amostra de solo úmido (g);

M_3 – Massa da amostra de solo seco mais a massa da placa de petri (g);

Este procedimento foi feito em duplicata para cada uma das amostras de solo e tirou-se a média para se encontrar o teor de umidade.

2.2.2. Procedimento de Preparação do Extrato Aquoso

2.2.2.1. Secagem, Cominuição e Peneiramento

O procedimento de preparo do extrato aquoso baseou-se em metodologias adotadas por Ferreira (2005), Loureiro *et al.* (2006), Silva *et al.* (2006) e Brasil *et al.* (2007). Cada uma das amostras de solo *in natura* foi colocada em bandejas metálicas e, em seguida, secas a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas em estufa. Após este período, as amostras secas foram deixadas para esfriar a temperatura ambiente. Em seguida, aquelas que apresentaram granulometria elevada e dificuldade de fragmentação manual foram britadas e depois moídas manualmente na própria bandeja metálica com o auxílio de um pistilo, enquanto as demais foram diretamente moídas na bandeja metálica. Logo após a operação de cominuição (britagem seguida de moagem), as amostras foram passadas em uma peneira Tyler (abertura de 0,84mm ou mesh #20). O material retido foi estocado, enquanto que o passante foi armazenado, conforme a quantidade produzida, para ser utilizado na preparação dos extratos aquosos.

2.2.2.2. Preparação do Extrato Aquoso

Após as operações descritas anteriormente, utilizou-se o material passante (solo com granulometria menor ou igual a 0,84mm) para preparar o extrato aquoso do solo. Deste modo, pesou-se 240g da amostra de solo em balança analítica e colocou-se em um becker de 1000mL. Adicionou-se 600mL de água destilada; homogeneizou-se a mistura solo-água (1:2,5) e, após esta mistura inicial, utilizou-se um agitador magnético durante 15 minutos. Após este período, a mistura solo-água foi deixada em repouso por 30 minutos, em seguida agitou-a por mais 15 minutos, seguido de repouso por 30 minutos e, antes da filtração a vácuo, mediu-se o pH desta suspensão solo-água, o qual foi utilizado nos cálculos do índice de Steinrath (IS) e do potencial redox (E_H). Feita a homogeneização da mistura solo-água, procedeu-se à filtração a vácuo, utilizando-se uma bomba de vácuo, um funil de buchner, um kitassato e papel-filtro. O filtrado desta operação é o extrato aquoso da amostra de solo.

2.2.3. Determinação do pH Solo e da Resistividade Elétrica do Extrato Aquoso

O pH utilizado nos cálculos do IS e do E_H foi medido na suspensão solo-água (mistura solo-água antes de passar pela filtração a vácuo) com um pHmetro (marca WTW, modelo pH 330i), baseando-se na metodologia adotada por Loureiro *et al.* (2006) e Brasil *et al.* (2007).

A resistividade elétrica do extrato aquoso (ρ_{EA} em $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$) foi determinada pelo inverso da condutividade elétrica (κ em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), que foi medida através de um condutivímetro de bancada (marca QUIMIS, modelo Q-405M2) e calculada pela equação (04). A determinação de ρ_{EA} a partir de κ obtida em laboratório teve como finalidade compará-lo à resistividade elétrica do solo medida em campo (ρ_{campo}) e discutir a respeito dos valores encontrados.

$$\rho_{EA} = \frac{1}{\kappa} \quad (04).$$

2.2.4. Determinação de Concentração de Íons Cloreto, Sulfato e Sulfeto

Na determinação da concentração de íons cloreto (Cl^-) utilizou-se a volumetria de precipitação através do método Argentométrico (Método de Mohr) do APHA (1995). Foi necessário descolorir algumas amostras por apresentarem coloração. Para isto, adicionou-se 3mL de hidróxido de alumínio [$\text{Al}(\text{OH})_3$] para cada 100mL de extrato aquoso, agitando-se esta mistura vigorosamente por alguns minutos, deixou-a decantar por 24 horas e, após este período, passando-a em filtro a vácuo.

Na determinação de íons sulfato nos extratos aquosos, utilizou-se o método turbidimétrico, conforme APHA (1995) e na determinação de íons sulfeto, empregou-se a metodologia sugerida por Vogel (1981).

2.2.5. Determinação do Índice de Steinrath

Para a avaliação qualitativa da corrosividade do solo, utilizou-se o índice de Steinrath que se baseia em sete (7) parâmetros ou características físico-químicas do solo que são: resistividade elétrica (ρ_{campo}), potencial redox (E_H), potencial hidrogeniônico (pH), teor de umidade (U_{SOLO}) e as concentrações dos íons cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) e sulfeto (S^{2-}). Para cada uma destas propriedades atribui-se um índice parcial de corrosividade e o somatório destes fornece o índice de Steinrath (Tabelas 01 e 02).

2.2.6. Ensaio Eletroquímico

Nos ensaios eletroquímicos utilizou-se um corpo-de-prova do aço USI SAC 300 como eletrodo de trabalho (ET).

Na realização dos ensaios eletroquímicos, obtenção e análise de dados utilizou-se: um Potenciostato / Galvanostato e o software ESA400, ambos da Gamry Instruments, além do programa Microsoft Excel 2003 para tratamento de dados e plotagem de gráficos.

O monitoramento do potencial de corrosão foi feito durante 120 minutos com leituras a cada 2s.

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foi realizada em duplicata após 2 horas de imersão do ET no extrato aquoso de uma das amostras de solo. A faixa de frequência utilizada variou de 1000 a 0,03Hz com voltagem (em corrente alternada) de 5mV e 10 pontos por década. Os dados experimentais foram analisados (simulados) através do circuito equivalente com um elemento de fase constante (EFC) (Figura 01), onde: R_{EA} e R_P são as resistências do extrato aquoso e de polarização, respectivamente; Z_{EFC} a impedância do EFC e; S representa a solução (extrato aquoso).

A polarização foi realizada após a EIE aplicando-se uma sobretensão de 100mV tanto para a região catódica, quanto para a anódica, com uma velocidade de varredura de 0,333 mV/s com intervalos de medição de 5s.

3. Resultados e Discussão

3.1. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Os Gráficos 01.a, 01.b, 01.c e 01.d mostram os resultados dos ensaios de determinação do teor de umidade, resistividade elétrica do solo, pH e potencial redox, respectivamente.

De modo geral, a umidade situou-se entre 11,3 e 24,7% e as amostras *A*, *B* e *D* foram as que apresentaram umidade igual ou superior a 20% (linha vermelha tracejada), sendo o índice parcial de corrosividade igual a “-1” e para as demais amostras foi igual a “0” (zero).

As amostras *H* e *C* foram as mais resistivas e as amostras *A* e *B* as mais condutoras (menos resistivas) tanto nas três distâncias (parâmetro “a” da equação 01), quanto na média geral. Assim, as amostras *A* e *B* podem apresentar caráter corrosivo superior às demais.

Os índices parciais de corrosividade para a resistividade elétrica de oito das dez amostras foi igual a “0” (zero), pois a resistividade elétrica foi superior a 12K Ω .cm (linha vermelha tracejada). No entanto, as amostras *A* e *B* apresentaram valores inferiores a este, contribuindo com os índices parciais de corrosividade “-1” e “-4”, respectivamente.

As amostras que apresentaram as menores resistividades elétricas foram as que tiveram os maiores teores de umidade (*A* e *B*), indicando que o aumento no teor de umidade provocou a diminuição da resistividade elétrica dos solos. Além disso, esta relação entre teor de umidade e resistividade pode ser observada nas demais amostras, porém menos acentuada.

As amostras *A* e *D* foram as que apresentaram os menores valores de pH e as amostras *B* e *I* os maiores. Também se observou que todas as amostras apresentaram pH ácido (inferior a 7,0), variando entre 3,5 e 5,9, concordando com Roberge (1999), o qual afirma que o pH de solos se situa entre 3,0 e 8,5.

Referente aos índices parciais de corrosividade, as amostras *B*, *C*, *G* e *I* apresentaram índice parcial “0” (zero), pois seus valores de pH foram superiores a 5,0 (linha vermelha tracejada), enquanto que nas outras o índice parcial foi igual a “-1” (pH abaixo de 5,0).

Os valores de pH têm influência nos de potencial redox, pois os dados obtidos em campo em relação eletrodo de cobre-sulfato de cobre são corrigidos para o eletrodo padrão de hidrogênio com o auxílio do pH.

Os resultados do potencial redox das amostras de solo em relação ao EPH variaram entre 324,16 e 510,22mV-EPH. As amostras *H* e *J* apresentaram os maiores valores e as amostras *A* e *D* os menores.

As amostras *A*, *F*, *H* e *J* apresentaram potencial redox entre 200 e 400mV-EPH (abaixo da linha vermelha tracejada), indicando uma ligeira tendência à corrosão microbiológica de estruturas enterradas nestes solos, sendo o índice parcial deles igual a “0” (zero).

As amostras *B*, *C*, *D*, *E*, *G* e *I* apresentaram E_H superior a 400 mV-EPH (acima da linha vermelha tracejada), dando um indicativo de que não tendem a causar processos corrosivos de

origem microbiológica em estruturas nelas enterradas. Além disso, o índice parcial destas amostras foi igual a “+2”, devido ao E_H encontrado.

A Tabela 03 mostra a concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto nas amostras de solo coletadas.

A Tabela 04 apresenta as resistividades elétricas dos extratos aquosos (ρ_{EA}) obtidas a partir da condutividade elétrica (κ) medida em laboratório, que serão discutidos em conjunto com as resistividades dos solos medidas em campo (ρ_{campo}).

3.2. ÍNDICE DE STEINRATH

A partir dos resultados dos sete parâmetros (Gráficos 01.a, 01.b, 01.c e 01.d e a Tabela 03) determinou-se o índice de Steinrath das amostras de solo e as classificações quanto a corrosividade (Tabela 05).

As amostras *A* e *B* apresentaram índices de Steinrath iguais a “-3”, recebendo a classificação “baixa corrosividade”. A baixa resistividade elétrica do solo associada à umidade superior a 20% teve influência significativa na classificação destas duas amostras.

As amostras *F*, *H* e *J* foram classificadas como solos de “baixa corrosividade”, mas com índices de Steinrath iguais a “-1”. Esta classificação ocorreu pelo fato do parâmetro pH contribuir com índice parcial igual a “-1”, enquanto os outros seis parâmetros contribuíram com valores iguais a “0”, diferentemente do que ocorreu com as amostras *A* e *B*, onde os parâmetros resistividade, umidade, pH e potencial redox tiveram influencia direta.

As amostras *C*, *D*, *E*, *G* e *I* foram classificadas como “sem corrosividade”, pois apresentaram índice de Steinrath maior ou igual a “0” (zero), tendo influência direta do potencial redox para as amostras *C*, *G* e *I*; do E_H associado ao apenas pH (amostra *E*) e destes dois parâmetros associados ao teor de umidade (amostra *D*).

3.3. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

3.3.1. Potencial de Corrosão

O comportamento do potencial de corrosão (E_{CORR}) do eletrodo de trabalho (em relação ao eletrodo de calomelano saturado) por um período de 120 minutos imerso nos extratos aquosos das “cinco primeiras” amostras (*A*, *B*, *C*, *D* e *E*) e das “cinco últimas” (*F*, *G*, *H*, *I* e *J*) são mostrado nos Gráficos 02.a e 02.b, respectivamente.

As curvas de E_{CORR} obtidas experimentalmente apresentaram, de maneira geral, três comportamentos diferentes: queda exponencial nos primeiros 20 minutos de ensaio; instabilidade do E_{CORR} entre 20 e 100 minutos; e estabilidade após 100 minutos. Este comportamento foi semelhante aos encontrados por Carson e Orazem (1999) e Yan *et al.* (2008) e se deve ao início, avanço e estabilização do processo corrosivo causado pelos extratos aquosos dos solos na superfície do corpo-de-prova.

Observando-se o comportamento isolado de algumas amostras, notou-se-se que *A* e *E* apresentaram uma diminuição mais suave do E_{CORR} até 60 minutos de ensaio. Após a estabilização foi possível realizar os ensaios eletroquímicos de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e polarização.

3.3.2. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Os resultados dos ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) após 2 horas de imersão do corpo-de-prova em extratos aquosos dos solos das amostras *A* até *E* são mostrados no Gráfico 03 em forma de diagramas de Nyquist e dois aumentos (Gráficos 04 e 05) neste gráfico foram feitos para uma melhor visualização dos resultados. O Gráfico 06 mostra os diagramas de Nyquist para amostras *F* até *J* após 2 horas de imersão. Os resultados experimentais estão representados por figuras geométricas (\bar{f} , Δ , \circ , etc.) e as simulações por curvas contínuas.

Na faixa de frequência utilizada nos ensaios de EIE (1000 a 0,03Hz), todos os diagramas de Nyquist apresentaram um arco capacitivo com a forma de um semicírculo distorcido e que não toca o eixo " Z_{REAL} ". Estes resultados se assemelham aos encontrados por Pernice *et al.* (1990) e Oliveira (2007), indicando que a corrosão do aço em extratos aquosos de solos e, conseqüentemente, em solos não foi controlada apenas pela transferência de carga, mas por outros processos como a transferência de massa e a formação de um filme superficial.

As frequências máximas dos diagramas não mostraram variações significativas, indicando que os processos na interface metal-extrato aquoso são idênticos, independentemente da amostra de solo, concordando com as curvas de polarização.

Os extratos aquosos dos solos deslocaram de forma significativa os diagramas, devido às diferenças de resistividade elétrica. Estes resultados estão apresentados no Gráfico 07, a partir do qual observou-se que as diferenças de resistividade elétrica entre os extratos aquosos deslocaram de forma significativa os diagramas e constatou-se que extratos aquosos apresentaram variações menores de resistividade elétrica (ρ_{EA}), quando comparados com os resultados de campo (ρ_{campo}). Contudo, os diagramas de Nyquist foram influenciados de forma significativa, onde se encontrou Z_{REAL} na faixa de 3600 a 25000 $\Omega.cm^2$ e se observou uma variação de R_p entre 3,3 e 5,7K $\Omega.cm^2$ (Tabela 06) indicando a ausência de diferenças entre as resistências calculadas e constatando-se que o comportamento cinético não apresenta mudanças significativas entre as amostras de solo analisadas.

3.3.3. Polarização

Os Gráficos 08.a e 08.b mostram os resultados obtidos nos ensaios de polarização após 120 minutos de imersão do eletrodo de trabalho no extrato aquoso de cada amostra de solo.

Os resultados da polarização mostraram que o comportamento eletroquímico do aço USI SAC 300 foi praticamente igual em todos os extratos aquosos, indicando mecanismos de corrosão semelhantes em sobretensões anódicas e catódicas de 100mV, com exceção das amostras *I* e *J*, que em torno de 900mV-ECS apresentaram diferenças das demais.

O método de extrapolação da reta de Tafel foi utilizado para encontrar as inclinações das retas (β_a e β_c), o E_{CORR} e o I_{CORR} e o da resistência de polarização para R_p (Tabela 07).

As inclinações das partes catódicas e anódicas das retas de Tafel para um extrato aquoso apresentaram valores próximos entre si com exceção das inclinações das amostras *D* e *I*, onde a inclinação da curva anódica foi, aproximadamente, 10mV/década inferior à da curva catódica. Apesar destas diferenças, quando se comparam as inclinações de ambas as curvas entre as 10 amostras, observa-se que as inclinações anódicas variaram entre 16,3 e 44,1mV/década e as catódicas entre 17,6 e 45,1mV/década, ou seja, houve uma variação em torno de 28mV/década entre as amostras, não sendo considerado uma grande variação e confirmando que o comportamento eletroquímico do aço USI SAC 300 foi praticamente semelhante em todos os extratos aquosos, além de indicar que os mecanismos de corrosão foram iguais para as sobretensões aplicadas.

As correntes de corrosão ou taxas de corrosão foram relativamente baixas da ordem de $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. A amostra *G* foi a que apresentou o maior valor ($1,09\mu\text{A}/\text{cm}^2$), seguida da amostra *I* com I_{CORR} de $0,87\mu\text{A}/\text{cm}^2$ e, ao observar os parâmetros β_a e β_c , notou-se que a amostra *G* apresentou os maiores valores dentre todas as amostras para ambos os parâmetros e a curva de polarização da amostra *I* teve inclinações relativamente elevadas. Deste modo, pode-se inferir que I_{CORR} está diretamente relacionado ao mecanismo de corrosão do aço nestes extratos aquosos. Por outro lado, o extrato aquoso da amostra *E* foi o que apresentou menor inclinação da curva de polarização catódica e baixo valor da anódica e, conseqüentemente, teve menor I_{CORR} , sendo a amostra de baixa corrosividade.

A resistência de polarização confirma a relação das inclinações das curvas e do I_{CORR} com a corrosividade dos extratos aquosos, havendo uma relação inversa entre R_p e I_{CORR} . Logo, amostras com baixos I_{CORR} apresentaram elevados valores de R_p .

3.4. CORROSIVIDADES: ÍNDICE DE STEINRATH E TAXA DE CORROSÃO (POLARIZAÇÃO)

Os Gráficos 09 e 10 mostram os índices de Steinrath (IS) e as taxas de corrosão (TC) das amostras de solo coletadas, respectivamente, fazendo-se um comparativo entre as mesmas. As linhas vermelhas tracejadas representam valores do IS.

Pode-se observar que as amostras *A*, *B*, *F*, *H* e *J* foram classificadas como “baixa corrosividade” e apresentaram TC entre $0,46$ e $0,60\mu\text{A}/\text{cm}^2$. As amostras *C* e *E* tiveram TC iguais a $0,11$ e $0,22\mu\text{A}/\text{cm}^2$ e foram classificadas como “sem corrosividade” pelo IS. Logo, as TC destas amostras foram inferiores às das amostras *A*, *B*, *F*, *H* e *J*, concordando com a classificação dada pelo IS. No entanto, para as amostras *D*, *G* e *I* não houve concordância, pois foram classificadas como “sem corrosividade” e apresentaram TC iguais a $0,48$, $1,09$ e $0,87\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente, sendo superiores aos encontrados para as amostras classificadas como de “baixa corrosividade”.

As discordâncias envolvendo a classificação pelo IS e as TCs ocorreram pelo fato daquele índice não considerar a associação entre os parâmetros que influenciam o processo corrosivo, além de avaliá-los de modo qualitativo (índices parciais de corrosividade a dados quantitativos).

Uma classificação de corrosividade do solo baseada apenas no IS deve ser acompanhada de um método eletroquímico que forneça a TC da estrutura metálica enterrada no solo, pois um solo que tenha a classificação “sem corrosividade” poderá apresentar uma baixa taxa de corrosão.

Embora as dez amostras de solo tenham apresentado diferenças entre si nas suas taxas de corrosão (o maior valor é 10 vezes o menor, aproximadamente) e tenham ocorrido algumas discordâncias entre classificação pelo IS e TC, os solos analisados praticamente não apresentam corrosividade, oferecendo baixo risco de danos às estruturas enterradas nos mesmos.

Conclusões

O índice de Steinrath classificou as amostras de solo *A, B, F, H* e *J* como de “baixa corrosividade” e as amostras *C, D, E, G* e *I* como “sem corrosividade”.

As curvas de E_{CORR} apresentaram três comportamentos: queda exponencial nos primeiros 20 minutos; instabilidade do E_{CORR} entre 20 e 100 minutos; e estabilidade após 100 minutos, exceto para as amostras *A* e *E*, que apresentaram uma queda exponencial mais suave até 60 minutos.

Os resultados de polarização mostraram que: as taxas de corrosão dos extratos aquosos das amostras de solo foram baixas e se situaram na escala de $\mu A \cdot cm^{-2}$, indicando que os solos não apresentam elevada corrosividade; o comportamento eletroquímico do aço foi igual em todos os extratos aquosos, indicando mecanismos de corrosão semelhantes em sobretensões de $\pm 100mV$.

A comparação entre os índices de Steinrath e as taxas de corrosão mostrou que alguns solos classificados como “sem corrosividade” apresentaram caráter corrosivo e taxas de corrosão superiores a solos classificados como de “baixa corrosividade”.

A polarização confirmou os resultados dos índices de Steinrath, indicando que de modo geral os solos apresentaram baixa corrosividade.

Todos os diagramas de Nyquist apresentaram um arco capacitivo com a forma de um semicírculo distorcido, que não toca o eixo “ Z_{REAL} ”, indicando que a corrosão do aço em extratos aquosos de solos e, conseqüentemente, em solos não foi controlada apenas pela transferência de carga, mas por outros processos como a transferência de massa e a formação de um filme superficial. Além disto, as frequências máximas correspondentes a cada diagrama não mostraram variações significativas, dando um indicativo de que os processos na interface metal-extrato aquoso são idênticos, independentemente da amostra de solo, concordando com as curvas de polarização.

A associação entre o índice de Steinrath (ensaios clássicos e não eletroquímicos) e os ensaios eletroquímicos mostrou resultados satisfatórios no que tange a avaliação da corrosividade de solos próximos às dez torres da linha de transmissão de energia elétrica Tucuruí – Vila do Conde, pois não ocorreram diferenças significativas entre as duas metodologias, a partir das quais se pode concluir que os solos analisados apresentaram baixa corrosividade e que estruturas do aço USI SAC 300 enterradas nestes solos não tenderão a corroer, caso as características daqueles solos sejam mantidas em curto e médio prazo. Porém, há a necessidade de monitoramento constante do caráter corrosivo dos solos com os objetivos de avaliar a corrosividade do solo em longo prazo, preservar as torres e prolongar a sua vida útil.

Agradecimentos

À Empresa TBE (Transportadoras Brasileiras de Energia) pela disponibilidade de recursos humanos, técnicos e financeiros, assim como por informações imprescindíveis à execução deste trabalho.

Ao Grupo de Análise Experimental de Estruturas e Materiais (GAEMA – UFPA) pelo fornecimento de informações bibliográficas, dados de campo e coleta das amostras de solo.

À Professora Samira Leão, ao Laboratório de Processos Ambientais (LPA – UFPA) pela realização de ensaios importantes para este trabalho.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará (UFC) por uma análise de caracterização essencial.

Referências bibliográficas

AMERICAN PUBLIC HEALTH OF WATER AND WASTEWATER – AWWA – APHA - WPCI. **Standard method for examination of water and wastewater**. 19^a ed. Washington: American Public Health Association, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method**: ASTM G57 – 95a (revised), 1995.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2009 – Ano base 2008: Resultados Preliminares**. Rio de Janeiro: EPE, 2009, p. 19 – 20. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2009.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2009.

BRASIL, S. L. D. C.; OLIVEIRA, J. V. D.; DA SILVA, J. M. Estudo de Características Físico-Químicas e Eletroquímicas de Solos. In. 9^a CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 2007, Salvador. **Anais...** Salvador: (2007) COTEQ_081.

CARSON, S. L. e ORAZEM, M. E. Time-dependent polarization behaviour of pipeline grade steel in low ionic strength environments. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 29 (1999) p. 703 – 717.

FERREIRA, C. A. M. **Estudo da corrosão pelo solo – Avaliação da corrosividade de amostras de solo do continente Antártico e da região Sudeste do Brasil**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1992.

LOUREIRO, A. M. V., YOKOYAMA, L. e BRASIL, S. L. D. C., Avaliação da corrosividade de solos contaminados por substâncias químicas. In. CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CORROSÃO, 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: (2006) LATINCORR2006_127.

OLIVEIRA, J. R. **Aplicação de Métodos Eletroquímicos para Determinação da Corrosividade do solo**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

PERNICE, P.; ARPAIA, M; CONSTANTINI, A. Steel corrosion rate in soils by a.c. and d.c. electrochemical methods. **Materials Chemistry and Physics**, v. 26 (1990) p. 323 – 330.

ROBERGE, P.R. **Handbook of Corrosion Engineering**., p. 142-154. McGraw-Hill, 1999.

TRABANELLI, G.; ZUCCHI, F.; ARPAIA, M. **Methods of Determination of Soil Corrosiveness with Respect to Metallic Structures**, *Annali Dell'Università Di Ferrara*, vol. III, n. 4, p. 43-60, 1972.

VOGEL, A. **Química Analítica Quantitativa**. 5. ed. São Paulo: Mestre Jou, 1981.

YAN, M; WANG, J.; HAN, E; KE, W. Local environment under simulated disbanded coating on steel pipelines in soil solution. **Corrosion Science**, v. 50, (2008) p. 1331 – 1339.

Tabelas

Tabela 01 – Parâmetros relacionados por Steinrath para avaliação da corrosividade do solo

PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL	PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
ρ_{campo} (K Ω .cm)		Sulfato (ppm)	
Maior que 12	0	Menor que 200	0
Entre 12 e 5	-2	De 200 a 300	-1
Entre 5 e 2	-1	Maior que 300	-2
Menor que 2	-4		
		Sulfato (ppm)	
		Ausente	0
E_H (mV – EPH)		Menor que 0,5	-2
Maior que 400	+2	Maior que 0,5	-4
Entre 400 e 200	0		
Entre 200 e 0	-2	Cloreto (ppm)	
Igual a 0	-4	Menor que 100	0
		De 100 a 1000	-1
		Maior que 1000	-4
pH			
Maior que 5	0	Umidade (%)	
Menor que 5	-1	Menor que 20	0
		Maior que 20	-1

Fonte: Trabanelli (1972)

Tabela 02 – Índice total de corrosividade do solo pelo índice de Steinrath

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	ÍNDICE STEINRATH
Sem Corrosividade	Maior ou igual a “0”
Baixa Corrosividade	Entre “-1” e “-8”
Média Corrosividade	Entre “-8” e “-10”
Alta Corrosividade	Menor que “-10”

Fonte: Trabanelli (1972)

Tabela 03 – Concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto

AMOSTRA	CLORETO (ppm)	SULFATO (ppm)	SULFETO (ppm)
A	<100	3,9	Ausente
B	<100	29,7	Ausente
C	<100	76,9	Ausente
D	<100	11,5	Ausente
E	<100	28,9	Ausente
F	<100	24,9	Ausente
G	<100	19,8	Ausente
H	<100	1,4	Ausente
I	<100	3,5	Ausente
J	< 100	11,2	Ausente

Tabela 04 – Resistividade elétrica dos extratos aquosos

AMOSTRA	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ρ_{EA} (K Ω .cm)	14,0	6,6	27,0	14,4	15,8	9,8	6,4	11,2	7,7	7,5

Tabela 05 – Índices de Steirath e a classificação quanto à corrosividade

AMOSTRA	ÍNDICE	CLASSIFICAÇÃO
A	-3	BAIXA CORROSIVIDADE
B	-3	BAIXA CORROSIVIDADE
C	2	SEM CORROSIVIDADE
D	0	SEM CORROSIVIDADE
E	1	SEM CORROSIVIDADE
F	-1	BAIXA CORROSIVIDADE
G	2	SEM CORROSIVIDADE
H	-1	BAIXA CORROSIVIDADE
I	2	SEM CORROSIVIDADE
J	-1	BAIXA CORROSIVIDADE

Tabela 06 – Parâmetros obtidos da simulação

AMOSTRA	R_p (K Ω .cm ²)
A	4,53
B	3,59
C	5,67
D	4,16
E	4,04
F	3,31
G	3,33
H	4,16
I	4,98
J	3,44

Tabela 07 – Parâmetros de Tafel e resistências de polarização

AMOSTRA	β_a (mV/década)	β_c (mV/década)	E_{CORR} (mV-ECS)	I_{CORR} (μ A/cm ²)	R_p (Ω)
A	34,8	34,5	-738	0,515	2327
B	26,4	27,9	-775	0,598	1506
C	16,3	19,5	-790	0,110	4863
D	40,2	30,5	-771	0,480	2503
E	17,9	17,6	-848	0,218	2476
F	28,6	26,0	-835	0,460	1999
G	44,1	45,5	-811	1,087	1450
H	33,6	34,2	-789	0,577	2028
I	33,3	43,2	-841	0,873	1504
J	25,6	24,3	-829	0,517	1598

Figuras

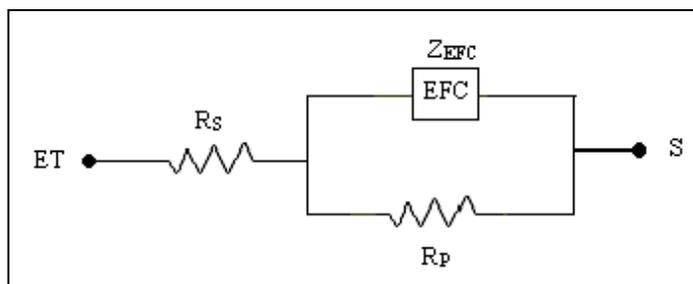
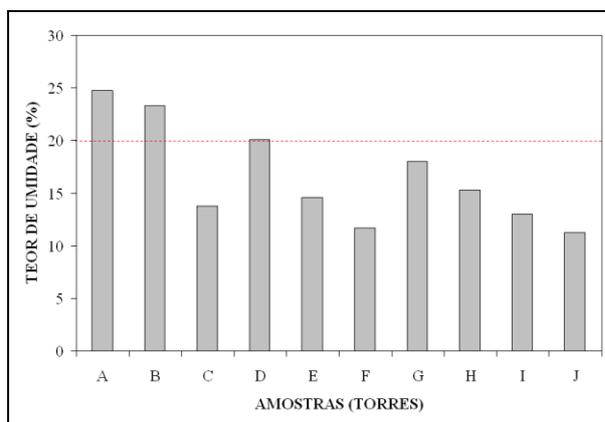
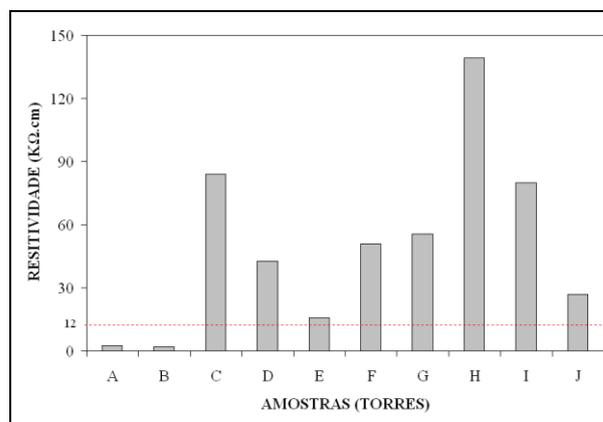


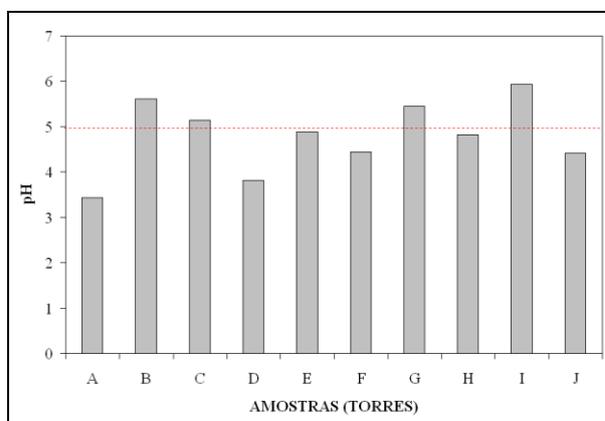
Figura 01 – Circuito equivalente com EFC (Gamry Instruments, 2007)



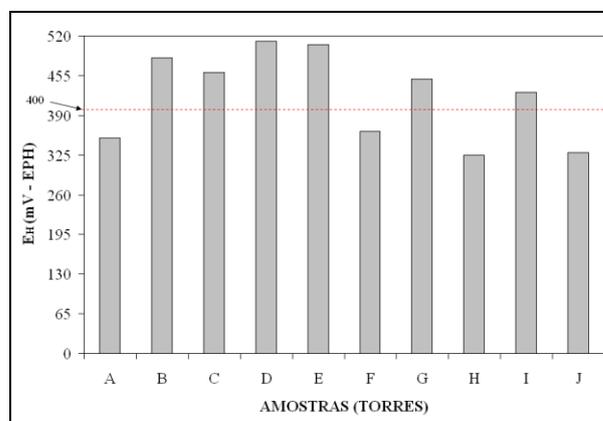
(a)



(b)



(c)



(d)

Gráfico 01 – Teor de umidade (a); Resistividade elétrica (b); pH (c) e; Potencial redox (d)

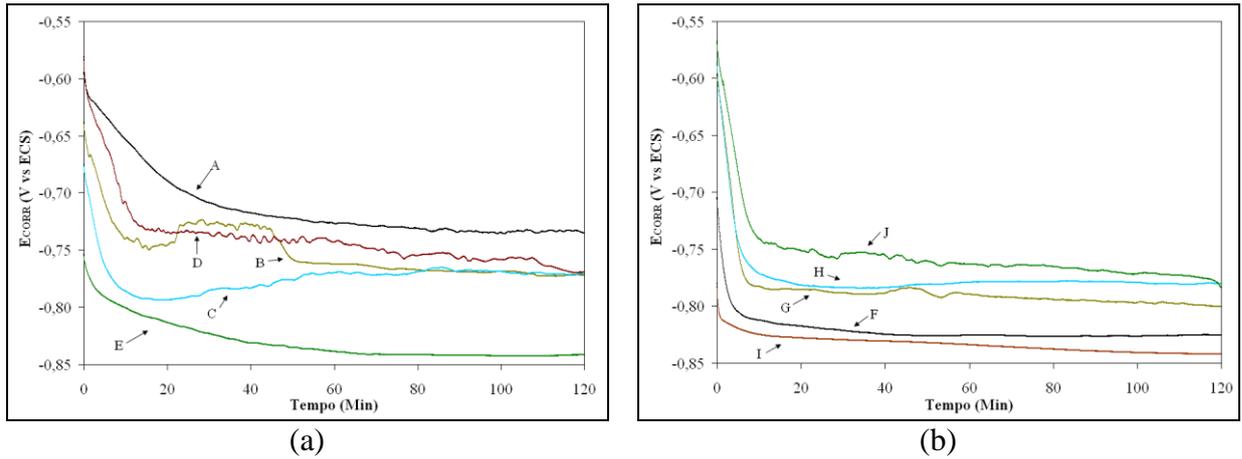


Gráfico 02 – Potenciais de corrosão em extratos aquosos de solos (cinco primeiras) (a) e das cinco últimas (b) amostras de solo

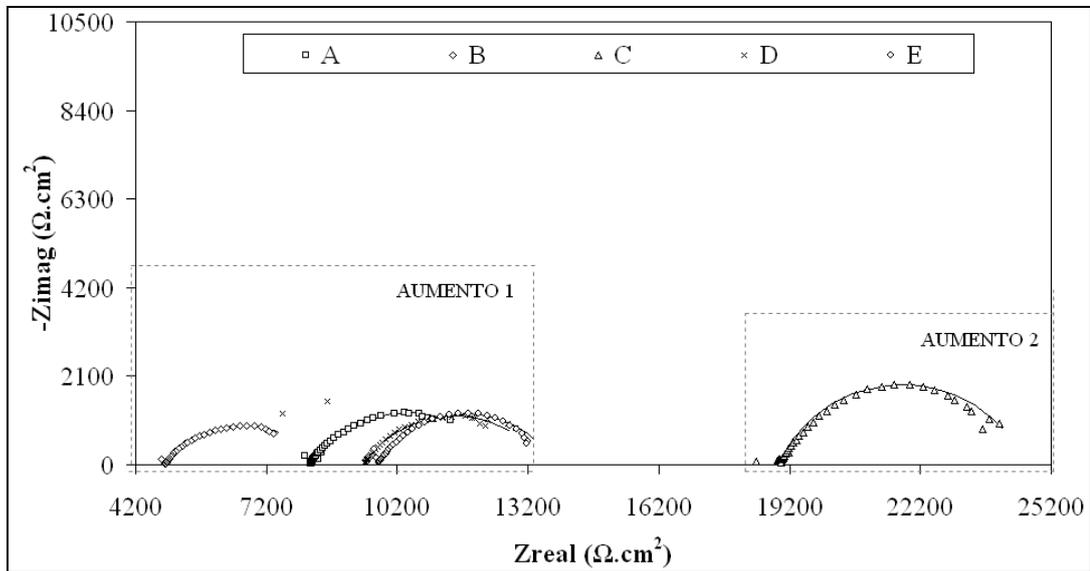


Gráfico 03 – Diagramas de Nyquist após 2 horas para as amostras A até E

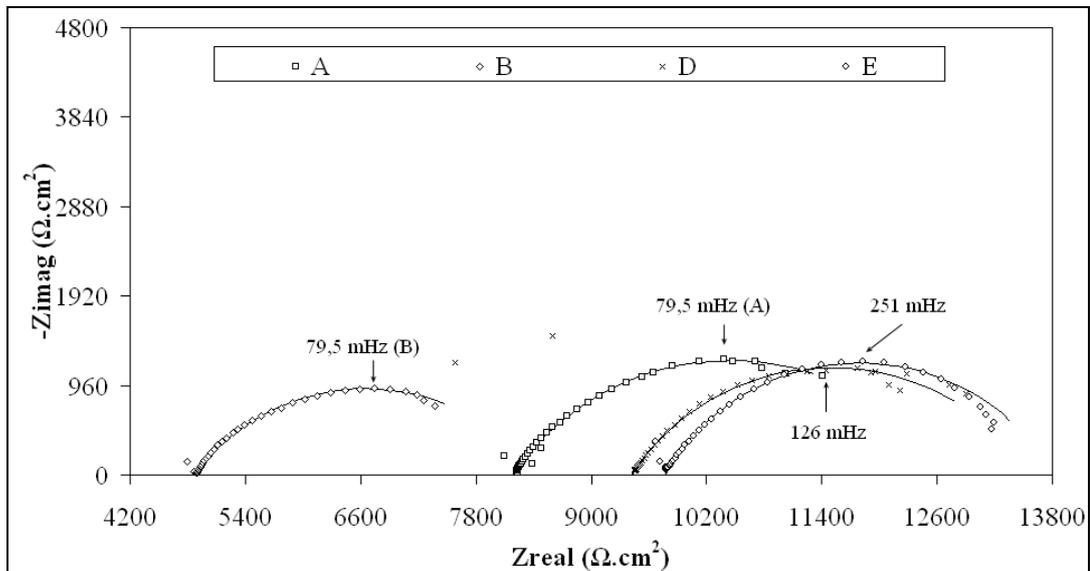


Gráfico 04 – Diagramas de Nyquist após 2 horas para amostras A até E (aumento 1)

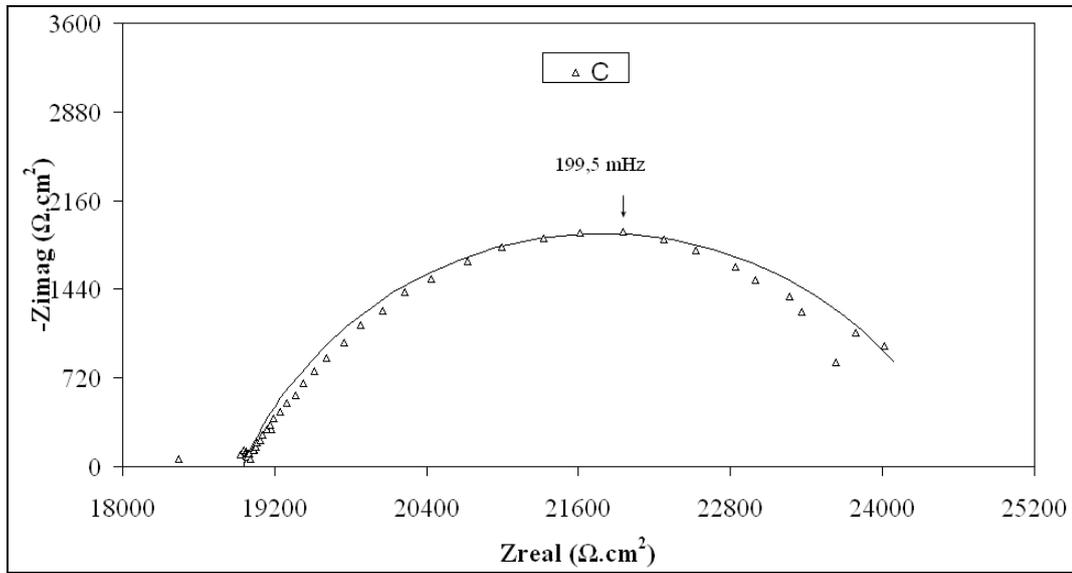


Gráfico 05 – Diagramas de Nyquist após 2 horas para amostras A até E (aumento 2)

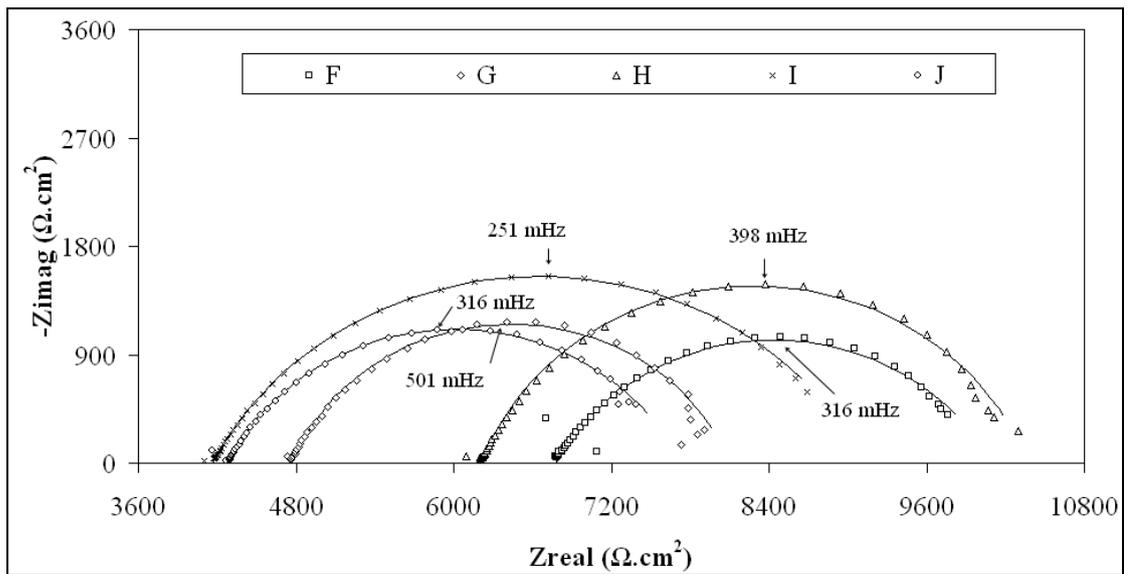


Gráfico 06 – Diagramas de Nyquist após 2 horas para as amostras F até J

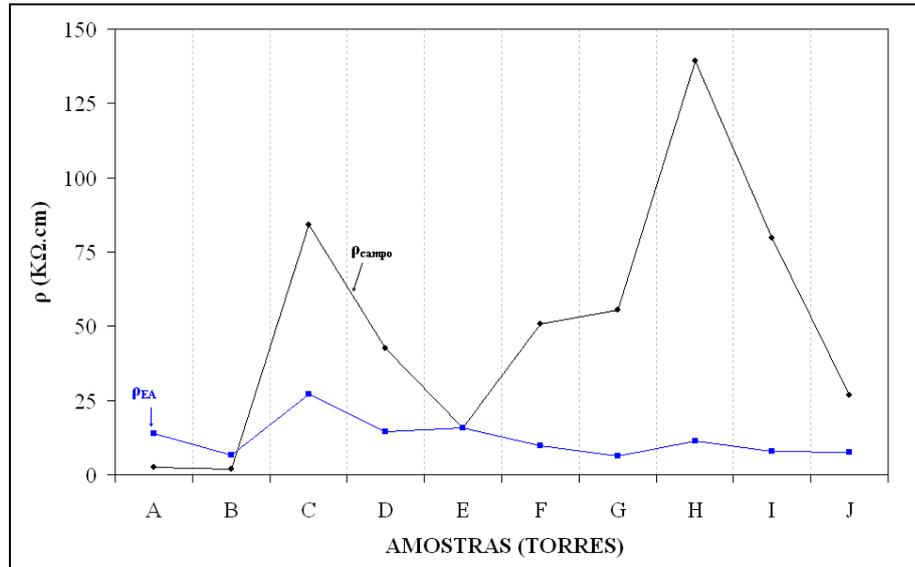


Gráfico 07 – Comparação entre resistividades do solo, do extrato aquoso e da solução por EIE

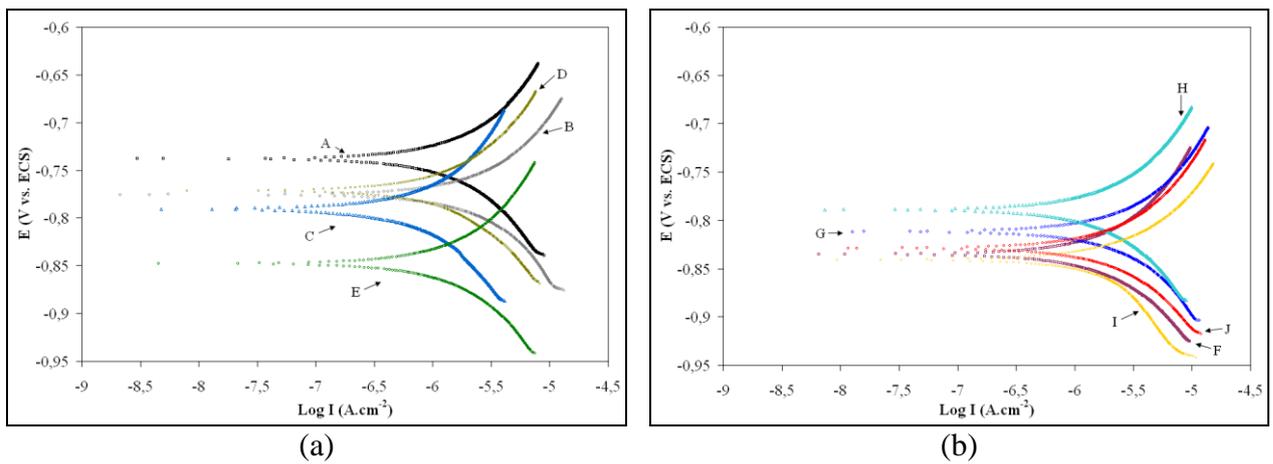


Gráfico 08 – Curvas de polarização do aço em extratos aquosos das amostras A até E (a) e das amostras F até J (b)

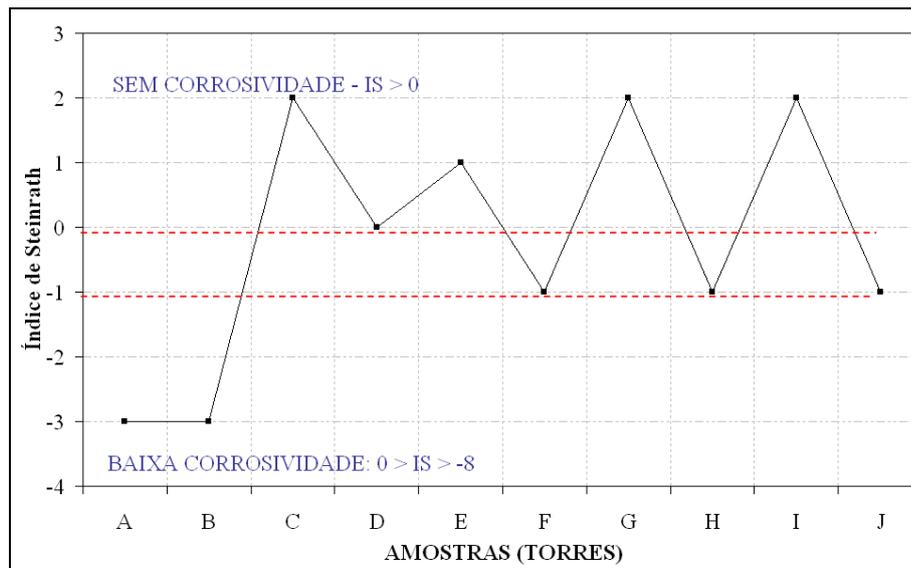


Gráfico 09 – Índices de Steinrath

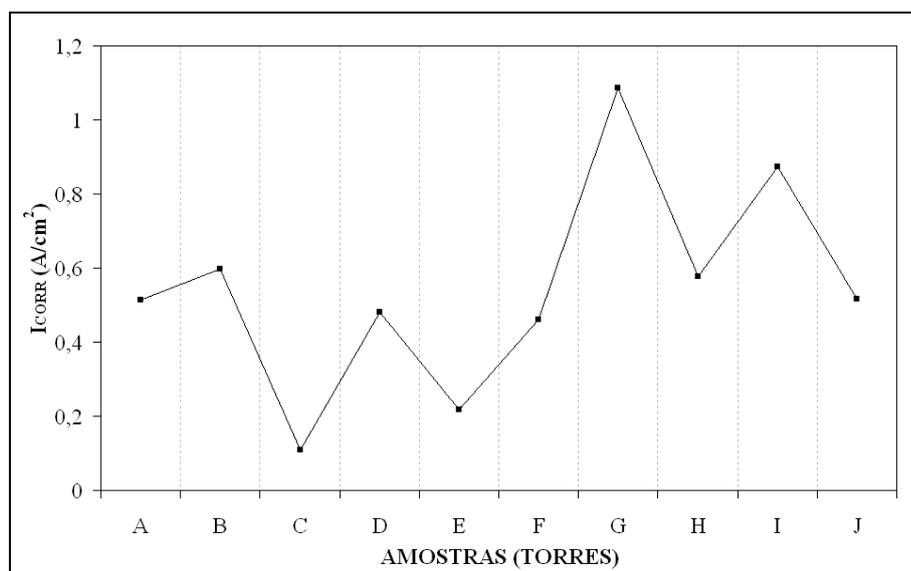


Gráfico 10 – Taxas de corrosão