



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

CLAIRON LIMA PINHEIRO

**AVALIAÇÃO DA CORROSIVIDADE DE SOLOS DA REGIÃO
AMAZÔNICA ATRAVÉS DE TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS DE
POLARIZAÇÃO E IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA**

BELÉM
2010

CLAIRON LIMA PINHEIRO

**AVALIAÇÃO DA CORROSIVIDADE DE SOLOS DA REGIÃO AMAZÔNICA
ATRAVÉS DE TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS DE POLARIZAÇÃO E IMPEDÂNCIA
ELETROQUÍMICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências, área de Engenharia Química.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processos Industriais Inorgânicos – Corrosão

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Carlos Cardoso Filho.

**BELÉM
2010**

CLAIRON LIMA PINHEIRO

**AVALIAÇÃO DA CORROSIVIDADE DE SOLOS DA REGIÃO AMAZÔNICA
ATRAVÉS DE TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS DE POLARIZAÇÃO E IMPEDÂNCIA
ELETROQUÍMICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências, área de Engenharia Química.

Área de concentração: Processos Industriais Inorgânicos – Corrosão

DATA DA AVALIAÇÃO: ____ / ____ / ____

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos Cardoso Filho
(FEQ – ITEC – UFPA)

Prof. Dra. Samira Maria Leão Carvalho
(FEQ – ITEC – UFPA)

Prof. Dr. Pedro de Lima Neto
(DQAFQ – CC – UFC)

DEDICATÓRIA

Ao nosso Deus pela vida, saúde e paz, pelos bons dias e por dar-me forças no cumprimento dos meus objetivos e na superação de percalços.

À minha mãe, Marta Lima, e ao meu pai, Claudenor Pinheiro, por todo o apoio dado durante minha vida e por me proporcionarem coisas que nunca me serão tirados: a Educação e o Aprendizado, além dos conselhos e “puxadinhas de orelha” que jamais esquecerei.

À Andressa Sizo, pelo seu amor, carinho, companheirismo, conselhos, dedicação, apoio nos momentos de dúvidas e dificuldades e por estar ao meu lado nos bons momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor José Carlos Cardoso Filho pelas excelentes orientações na iniciação científica, no TCC, em publicações e na dissertação de mestrado e pela sua disponibilidade de tempo.

À Equipe do Laboratório de Corrosão (FEQ – ITEC – UFPA) pela ajuda, apoio e amizade.

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.

À minha família.

Aos meus amigos e colegas do PPEQ.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro.

EPÍGRAFE

Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio o previne.
Albert Einstein.

RESUMO

A corrosividade de solos de regiões próximas a dez torres de uma linha de transmissão de energia elétrica foi analisada empregando-se técnicas eletroquímicas. Extratos aquosos destes solos foram utilizados como eletrólito e os resultados foram confrontados com ensaios clássicos e não-eletroquímicos (índice de Steinrath). Medidas de campo foram realizadas em junho de 2008 e referiram-se aos seguintes parâmetros: potencial redox, potencial estrutura-solo e resistência elétrica. Em laboratório realizaram-se os seguintes procedimentos: correção do potencial redox e cálculo da resistividade elétrica, medidas de umidade, pH, condutividade, concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto. Assim, pode-se determinar o índice de Steinrath de cada solo. Com o extrato aquoso das amostras de solo realizaram-se ensaios de potencial de corrosão, espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e polarização. As curvas de polarização para sobretensões de ± 100 mV mostraram que os mecanismos de corrosão nos extratos aquosos foram praticamente semelhantes, pois as inclinações das retas de Tafel (β_a e β_c) não apresentaram grandes variações. As resistências de polarização (R_p) foram relativamente altas (da ordem de k Ω). Na faixa de frequência utilizada nos ensaios de EIE (1000 a 0,03 Hz), todos os diagramas de Nyquist apresentaram um arco capacitivo com a forma de um semicírculo distorcido e que não toca o eixo “ Z_{REAL} ”. 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. As diferenças de resistividade elétrica entre os extratos aquosos deslocaram de forma significativa os diagramas e constatou-se que eles apresentaram variações menores de resistividade elétrica (ρ_{EA}), quando comparados com os resultados de campo (ρ_{campo}). Contudo, os diagramas de Nyquist foram influenciados significativamente, onde Z_{REAL} variou de 3,6 a 25 k $\Omega \cdot cm^2$ e, a partir da simulação dos dados experimentais a um circuito equivalente, observou-se a variação de R_p entre 3,3 e 5,7 k $\Omega \cdot cm^2$, 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. A associação entre o índice de Steinrath e os ensaios eletroquímicos mostrou resultados satisfatórios para a avaliação da corrosividade de solos analisados, os quais podem ser considerados como de “baixa corrosividade”.

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

ABSTRACT

Soil corrosivity of regions close to ten towers of transmission line power was analyzed by electrochemical techniques using aqueous extracts of these soils as electrolyte and the results were compared with conventional and non-electrochemical tests (Steinrath index). Field measurements were performed in June 2008 and referred to the following parameters: redox potential, soil-structure potential and electrical resistance. In the laboratory were done: correction of redox potential and calculation of electrical resistivity, measures moisture, pH, conductivity, concentration of chloride, sulfate and sulfide ions. Thus, one can know the Steinrath index of each soil. With the aqueous extract of soil samples were carried out tests on corrosion potential, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and polarization. The polarization curves at voltages of ± 100 mV showed that corrosion mechanisms in aqueous extracts were almost similar, because the curves slopes of Tafel (β_a and β_c) didn't show great variation. Polarization resistances were relatively high (k Ω). In frequency range used in EIS test (1000 to 0,03 Hz), all Nyquist diagrams showed a capacitive arc in the shape of a distorted semicircle and not touching the axis "Z_{REAL}". The maximum frequency diagrams did not show significant variations, indicating that the processes in interface metal-aqueous extract are identical, regardless of soil sample. Electrical resistance differences between aqueous extracts significantly shifted diagrams and it was found that they showed minor changes of electrical resistivity (ρ_{EA}) compared with field results (ρ_{campo}). Thus, Nyquist diagrams were significantly influenced, where Z_{REAL} ranged from 3,6 to 25 k Ω .cm² and, from simulation of experimental data to an equivalent circuit, there was a R_p variation from 3300 to 5700 Ω .cm², indicating the absence of differences between calculated resistances and was verified that kinetic behavior does not show significant changes in soil samples analyzed. Steinrath index associate with electrochemical tests showed satisfactory results for soils corrosivity evaluation analyzed, which can be considered as "soil of low corrosivity".

Keywords: soil corrosion, Steinrath index, polarization, electrochemical impedance spectroscopy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 01	A matriz de energia elétrica brasileira	20
Mapa 01	Regiões do SIN	21
Mapa 02	Divisão adotada pelo CNRH	22
Fotografia 01	Torre do tipo estaiada (a) e torre auto-portante (b)	24
Esquema 01	Horizontes de um solo	27
Mapa 03	Principais solos da Amazônia	32
Esquema 02	Célula de corrosão em estaca metálica enterrada	34
Esquema 03	Características corrosivas de um solo	35
Esquema 04	Método de Wenner	38
Gráfico 02	Potencial de corrosão em solo arenoso (a) e argiloso (b)	49
Gráfico 03	Curvas de potencial versus tempo de dados experimentais (a) e modelada matematicamente (b)	49
Gráfico 04	Potencial de corrosão do aço em extrato aquoso de solo	50
Gráfico 05	Curva de polarização	53
Gráfico 06	Método potenciodinâmico para obtenção de uma curva de polarização	54
Gráfico 07	Curvas de polarização do extrato aquoso de solo	54
Gráfico 08	Curva de polarização em extrato aquoso de solo da Antártida (a) e do em extrato aquoso de solo do Brasil (b)	55
Gráfico 09	Relação corrente-voltagem na frequência ω	57
Quadro 01	Elementos de circuito equivalente e suas impedâncias	59
Figura 01	Circuito equivalente de Randles	59
Gráfico 10	Diagrama de Nyquist do circuito equivalente de Randles	60
Figura 02	Circuito equivalente com EFC	61
Gráfico 11	Diagramas de Nyquist na corrosão pelo solo	62
Gráfico 12	Diagramas de Nyquist	62
Gráfico 13	Diagramas de Nyquist após 26h (a) e 1150h (b) de imersão do aço em solo argiloso com 15% de umidade	63
Mapa 04	Mapa da linha de transmissão mostrando as torres selecionadas	65
Figura 03	Medida da resistividade do solo através do método de Wenner	66

Fotografia 02	Amostras de solo secas, desagregadas e peneiradas	71
Fotografia 03	Corpo-de-prova ou Eletrodo de trabalho	76
Fotografia 04	Célula eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos	77
Quadro 02	Modo de apresentação: resultados da avaliação da corrosividade dos solos	79
Gráfico 14	Teor de umidade	80
Gráfico 15	Resistividade elétrica	87
Gráfico 16	pH do solo	88
Gráfico 17	Potencial redox	89
Gráfico 18	Potenciais de corrosão em extratos aquosos de solos A até E	93
Gráfico 19	Potenciais de corrosão em extratos aquosos de solos F até J	93
Gráfico 20	Curvas de polarização do aço em extratos aquosos das amostras A até E	95
Gráfico 21	Curvas de polarização do aço em extratos aquosos das amostras F até J	96
Gráfico 22	Curvas de polarização experimental (\square) e simulada ($-$)	97
Gráfico 23	Índices de Steinrath	99
Gráfico 24	Resistências de polarização	100
Gráfico 25	Diagramas de Nyquist após 2 horas para as amostras A até E	93
Gráfico 26	Diagramas de Nyquist após 2 horas para amostras A até E (aumento 1)	96
Gráfico 27	Diagramas de Nyquist após 2 horas para amostras A até E (aumento 2)	96
Gráfico 28	Diagramas de Nyquist após 2 horas para as amostras F até J	97
Gráfico 29	Comparação entre as resistividades elétricas dos solos medidas em campo (ρ_{campo}) e a partir do extrato aquoso (ρ_{EA})	98
Gráfico 30	Resistências de polarização pela EIE	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Grau de corrosividade baseado na resistividade elétrica do solo	43
Tabela 02	Grau de agressividade baseado na resistividade elétrica do solo	43
Tabela 03	Corrosividade em função da resistividade elétrica e do potencial estrutura-solo	44
Tabela 04	Relação entre as taxas de corrosão e o grau de danos aos materiais	44
Tabela 05	Corrosividade do solo mostrando a taxa média de corrosão para o aço	44
Tabela 06	Relação entre potencial redox e corrosão	45
Tabela 07	Agressividade do solo baseada em: resistividade, potencial redox e teor de umidade	45
Tabela 08	Parâmetros e índices parciais para avaliação da corrosividade do solo	46
Tabela 09	Índice total de corrosividade do solo pelo índice de Steinrath	46
Tabela 10	Escala numérica de corrosividade da AWWA	47
Tabela 11	Avaliação da corrosividade pelo índice de Girard	48
Tabela 12	Composição química do aço USI SAC 300	75
Tabela 13	Teores de umidades experimentais	80
Tabela 14	Concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto	84
Tabela 15	Resistividade elétrica dos extratos aquosos	84
Tabela 16	Índices parciais para os parâmetros de cada amostra de solo coletada	85
Tabela 17	Índices de Steinrath e a classificação quanto à corrosividade	85
Tabela 18	Potencial estrutura-solo para cada amostra de solo coletada	89
Tabela 19	Parâmetros de Tafel e resistências de polarização	92
Tabela 20	Parâmetros obtidos do ajuste dos dados experimentais ao circuito equivalente com um elemento de fase constante	99

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

α - Fator de simetria. Constante empírica do circuito com elemento de fase constante

β_a, β_c – Parâmetros ou inclinação das retas de Tafel, anódica e catódica, respectivamente (mV/década)

η, η_a, η_c – Sobretensão total ou aplicada. Sobretensão anódica. Sobretensão catódica (mV)

η^A – Sobretensão de ativação (mV)

η^C – Sobretensão de concentração (mV)

η^R – Sobretensão de resistência (mV)

η^X – Sobretensão de cristalização (mV)

κ – Condutividade elétrica (mV)

ρ_0 – Resistividade no ponto de saturação de água ($\Omega.cm$)

ρ_{campo} – Resistividade elétrica do solo ($\Omega.cm$)

ρ_{EA} – Resistividade do extrato aquoso medida em laboratório ($\Omega.cm$)

ϕ – Ângulo de fase (defasagem da corrente com o respectivo potencial) ($^\circ$)

Ω – Ohm (Unidade de resistência elétrica)

ω - Velocidade angular (radianos por segundo – rad/s)

a – Distância entre as estacas enterradas (m)

A – Âmpere (Unidade de corrente elétrica)

A_T – Acidez total (mg KOH / g de amostra)

AWWA – American Water Works Association

BRS – Bactérias redutoras de sulfato

C – Índice de corrosividade de Girard. Capacitância

C_{DC} – Capacitância da dupla camada elétrica (μF – micro-Farad)

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CE – Contra-eletrodo

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CP(s) – Corpo(s)-de-prova

CRA – Complexo Regional da Amazônia

d – massa específica do aço igual a $7,87 \text{ g/cm}^3$.

DHN – Divisão Hidrográfica Nacional

DNAEE – Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica

E – Diferença de potencial no método de Wenner. Potencial de eletrodo ou resultante da polarização. Sinal de voltagem senoidal (mV ou V)

E_0 – Módulo do potencial (mV)

E_{CORR} – Potencial de corrosão (mV vs. ECS)

E_{ES} – Potencial estrutura-solo (mV vs. ECS)

E_H – Potencial redox (mV vs. EPH)

E_P – Potencial medido experimentalmente em relação ao ECSC (mV vs. ECSC)

E_r – Potencial do ECSC (340,2 mV vs. EPH)

E_w – peso equivalente do aço igual a 27,92 g/equivalente

ECSC – Eletrodo de cobre-sulfato de cobre

ECS, SCE – Eletrodo de calomelano saturado

EFC – Circuito equivalente utilizado na simulação dos dados experimentais de EIE

EIE – Espectroscopia de impedância eletroquímica

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPH – Eletrodo padrão de hidrogênio

ER – Eletrodo de referência

ET – Eletrodo de trabalho

F – Constante de Faraday. Unidade de capacitância

f – Frequência de oscilação da corrente alternada (Hz – Hertz)

FAO – Organização para a Agricultura e Alimentação das Nações Unidas

Hz, mHz, KHz – Hertz (Unidade de frequência), mili-Hertz, Kilo-Hertz

I – Corrente injetada no solo no método de Wenner (A)

I_0 – Módulo da corrente (A)

I_a – Densidade de corrente de troca anódica (μAcm^{-2})

I_c – Densidade de corrente de troca catódica (μAcm^{-2})

I_{CORR} – Densidade de corrente de troca. Corrente ou taxa de corrosão (μAcm^{-2})

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IC – Índice de corrosividade

IPC – Índice parcial de corrosividade

IS – Índice de Steinrath

K – Constante igual a $3272 \text{ mm}(\text{A} \cdot \text{cm} \cdot \text{ano})^{-1}$

KWh – Kilo-Watt-hora (Unidade de energia utilizada no setor elétrico)

LT(s) – Linha(s) de transmissão

m, cm, mm, μm – Metro (Unidade de comprimento). Centímetros. Milímetros. Micrometro

p – Profundidade de cravamento das estacas constante (cm)

PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos

ppm – Partes por milhão

R – Resistência do solo no método de Wenner ($k\Omega$). Constante dos gases ($8,314 \text{ J/mol.K}$)

r – taxa de corrosão (mm/ano)

R_p – Resistência de polarização ($k\Omega.cm^2$)

R_s – Resistência da solução ou eletrólito ($k\Omega.cm^2$)

Redox – Oxirredução

RHA – Região Hidrográfica Amazônica

RHTA – Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia

S, μS – Solução. Siemens (Unidade de condutividade). Micro-Siemens

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SIN – Sistema interligado nacional

T – Temperatura do sistema

TC(s) – Taxa(s) de corrosão

U_s – Umidade de saturação do solo (%)

U_{SOLO} – Teor de umidade do solo (%)

UHE(s) – Usina(s) hidrelétrica(s)

V, mV – Volts (Unidade de potencial elétrico). mili-Volts

W, GW, MW – Watts (Unidade de potência energética). Giga-Watts. Mega-Watts

Y^o – Admitância

Z – Número de elétrons envolvidos na reação eletroquímica. Impedância

Z_{EFC} – Impedância do EFC

Z_{IM} e Z_{REAL} – Impedância imaginária e impedância real

Z_W – Impedância de Warburg

$|Z|$ – Módulo da impedância

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	OBJETIVOS	19
2.1.	OBJETIVOS GERAIS	19
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE ENERGIA	20
3.1.1.	O Setor Elétrico Brasileiro	20
3.1.2.	Potencial Hidrelétrico Brasileiro e nas Regiões Hidrográficas: Amazônica e Tocantins-Araguaia	22
3.1.3.	Distribuição de Energia Elétrica	23
3.1.3.1.	Linhas de Transmissão	23
3.1.3.2.	Confiabilidade dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	25
3.2.	SOLO – ASPECTOS GERAIS	26
3.2.1.	Características mineralógicas dos solos	28
3.2.2.	Classificação dos solos	28
3.2.3.	Solos da Amazônia	31
3.3.	CORROSÃO: CONCEITO E TIPOS	33
3.4.	CORROSÃO PELO SOLO	33
3.4.1.	Parâmetros de Avaliação da Corrosividade de Solos	35
3.4.1.1.	Aeração, Profundidade e Porosidade	35
3.4.1.2.	Teor de Umidade	36
3.4.1.3.	Resistividade Elétrica	37
3.4.1.4.	Presença de Íons Cloreto, Sulfato e Sulfeto	39
3.4.1.5.	Potencial Hidrogeniônico: pH dos Solos	40
3.4.1.6.	Potencial de Oxirredução ou Redox	41
3.4.1.7.	Potencial Estrutura-Solo	41
3.4.2.	Métodos de Avaliação da Corrosividade do Solo	42
3.4.2.1.	Classificações do Solo Quanto a Corrosividade	42
3.4.2.2.	Índices de Corrosividade	45

3.5.	TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS	48
3.5.1.	Potencial de Corrosão	48
3.5.2.	Polarização	50
3.5.3.	Corrente de Corrosão e Resistência de Polarização	55
3.5.4.	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica	56
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	64
4.1.	DEFINIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS TORRES	64
4.2.	PROCEDIMENTOS EM CAMPO	66
4.2.1.	Medida da Resistividade Elétrica do Solo	66
4.2.2.	Medida de Potencial Redox	67
4.2.3.	Medida de Potencial Estrutura-Solo	68
4.2.4.	Coleta de Amostras do Solo	68
4.3	PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO	69
4.3.1.	Determinação do Teor de Umidade das Amostras de Solo	69
4.3.2.	Procedimento de Preparação do Extrato Aquoso	70
4.3.2.1.	Secagem, Desagregação e Peneiramento	70
4.3.2.2.	Preparação do Extrato Aquoso	71
4.3.3.	Determinação do pH Solo	72
4.3.4.	Determinação da Resistividade Elétrica do Extrato Aquoso	72
4.3.5.	Determinação de Concentração de Íons Cloreto, Sulfato e Sulfeto	73
4.3.6.	Determinação do Índice de Steinrath	73
4.3.7.	Ensaio Eletroquímico	75
4.3.7.1.	Preparo do Corpo-de-Prova de Aço USI SAC 300	75
4.3.7.2.	Execução dos Ensaio Eletroquímico	77
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1.	TEOR DE UMIDADE	79
5.2.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA MÉDIA	80
5.3.	pH	82
5.4.	POTENCIAL REDOX	83
5.5.	CONCENTRAÇÃO DE ÍONS CLORETO, SULFATO E SULFETO	84
5.6.	DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE DO EXTRATO AQUOSO	84

5.7.	ÍNDICE DE STEINRATH	85
5.8.	POTENCIAIS DE CORROSÃO E ESTRUTURA-SOLO	87
5.9.	POLARIZAÇÃO	89
5.10.	CORROSIVIDADES: ÍNDICE DE STEINRATH E RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO	92
5.11.	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA	94
6.	CONCLUSÕES	100
	REFERÊNCIAS	101
	ANEXO A	106
	APÊNDICE A	107
	APÊNDICE B	108
	APÊNDICE C	109

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 estruturas vitais como as torres de transmissão de energia elétrica, sendo interessante que sua integridade física seja mantida (LABEGALINI *et. al.*, 1992).

O Estado do Pará e a região Amazônica têm um papel importante na matriz brasileira de energia elétrica pelo fato de suas bacias hidrográficas apresentarem elevado potencial hidrelétrico. Assim, projetos de construção de novas usinas hidrelétricas (UHEs) 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 lhes são atribuídos, os quais variam conforme o valor encontrado. Então, com o conhecimento de todos os parâmetros considerados, obtém-se o IC do solo e a aplicação de outras técnicas, como as eletroquímicas, pode fornecer informações complementares a esse respeito (ROBERGE, 1999; FERREIRA, 2005; 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.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Avaliação da corrosividade de solos próximos a torres da linha de transmissão de energia elétrica Tucuruí – Vila do Conde, localizada na região Amazônica (Estado do Pará - Brasil).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar os valores de oito parâmetros que influenciam a corrosividade dos solos, medidos em campo: resistividade elétrica, potencial redox, potencial estrutura-solo; e em laboratório: teor de umidade, pH e concentrações de íons cloreto, sulfato e sulfeto;
- Avaliar a corrosividade dos solos pelo Índice Steinrath, empregando-se os índices parciais obtidos dos parâmetros: resistividade elétrica, potencial redox, teor de umidade e concentrações de íons cloreto, sulfato e sulfeto;
- Avaliar a proteção natural de estruturas metálicas enterradas contra processos corrosivos a partir dos potenciais estrutura-solo.
- Determinar o potencial de corrosão do aço USI SAC 300 imerso no extrato aquoso de cada solo, em laboratório; e comparar os potenciais de corrosão aos potenciais estrutura-solo (obtidos em campo);
- Avaliar a corrosividade dos solos empregando-se as técnicas eletroquímicas de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE);
- Avaliar a corrosividade dos solos empregando-se a comparação entre o Índice de Steinrath e as técnicas eletroquímicas de polarização e EIE.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE ENERGIA

3.1.1. O Setor Elétrico Brasileiro

O Brasil possui um sistema elétrico de grande porte baseado na energia hidráulica (Gráfico 01). A implantação de UHEs deve-se, primordialmente, ao aproveitamento deste potencial hidrelétrico e à competitividade econômica que esta fonte apresenta. Atualmente, cerca de 1600 empreendimentos estão em operação, totalizando uma capacidade instalada de 96,3 GW, sendo a hidroeletricidade correspondente por 73,15% da oferta interna de energia elétrica, segundo resultados preliminares do Balanço Energético Nacional (ano base 2008) (BRASIL, 2009).

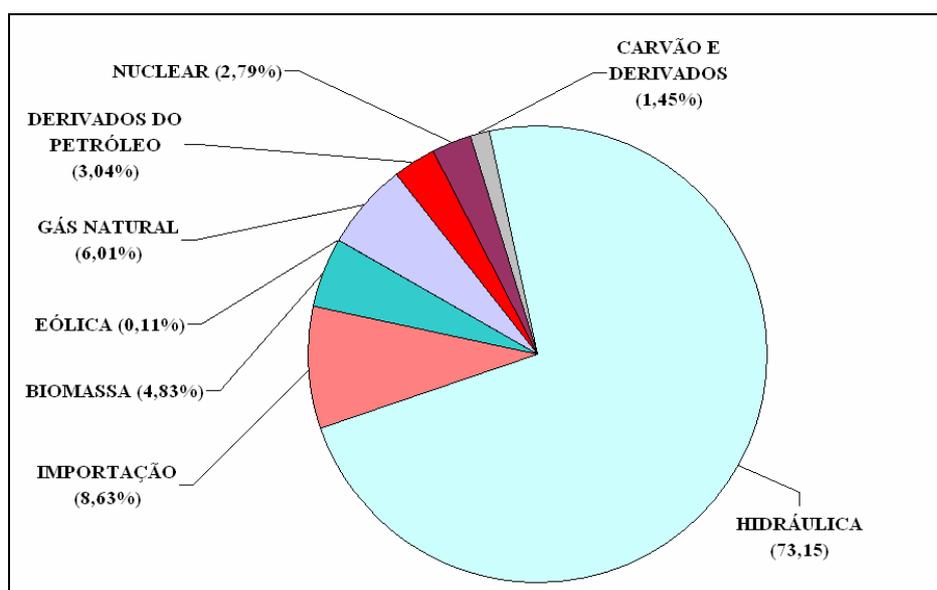
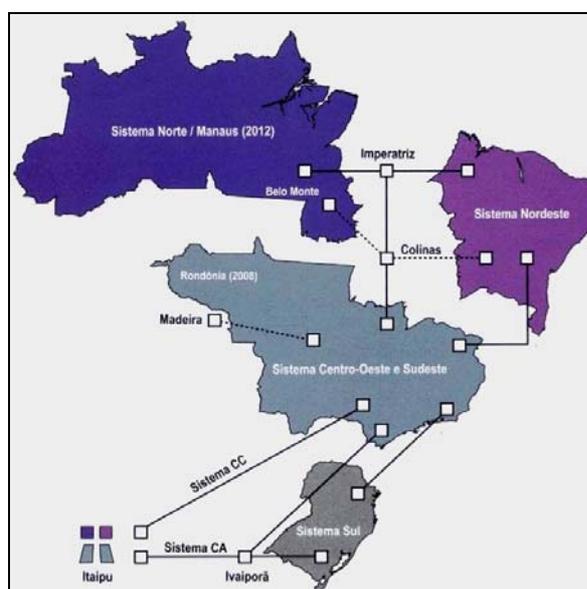


Gráfico 01 – A matriz de energia elétrica brasileira (Brasil, 2009)

Aproximadamente 96% da capacidade de produção de eletricidade estão dentro do sistema interligado e o restante sendo atendido por meio de sistemas isolados localizados predominantemente nos Estados do Norte do país. Os Sistemas Isolados Brasileiros são predominantemente térmicos (termelétricas), atendem a uma área de 45% do território e cerca de 3% da população nacional (1,3 milhões de consumidores), enquanto o Sistema Interligado

Nacional (SIN) é um sistema hidrotérmico de produção e transmissão de energia elétrica com forte predominância de UHEs com sua operação centralizada e embasada na: interdependência entre as usinas, interconexão dos sistemas elétricos, integração dos recursos de geração e transmissão no atendimento ao mercado. A utilização coordenada dos recursos hidrelétricos e termelétricos permite a maximização da disponibilidade, o aumento da confiabilidade do suprimento de energia e a redução de custos. O Mapa 01 mostra as interligações entre os subsistemas nacionais e a forma como estão sendo previstas até 2015. O subsistema Norte possui uma capacidade instalada de 9890 MW, sendo 8344 MW de UHEs e 1509 MW de termelétricas, com a maioria dos aproveitamentos hidrelétricos localizados na bacia do rio Tocantins e das usinas térmicas no Estado do Amazonas. A expansão do parque gerador da região Norte entre de 2006 e 2015 se dará com a operação das últimas unidades da UHE de Tucuruí II e nos anos finais deste período, das UHEs de Belo Monte (11182 MW) e Serra Quebrada (1328 MW) (BRASIL, 2007).



Mapa 01 – Regiões do SIN (Brasil, 2007)

3.1.2. Potencial Hidrelétrico Brasileiro e nas Regiões Hidrográficas: Amazônica e Tocantins-Araguaia

O potencial hidrelétrico atual do Brasil é de, aproximadamente, 260 GW. Deste total, 26% encontra-se em operação e está distribuído nas diversas regiões hidrográficas do Brasil (SIPOT 2005 *apud* BRASIL 2007). O setor elétrico adota a divisão das regiões hidrográficas estabelecida pelo Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE), porém, com a finalidade de orientar, fundamentar e implementar o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) instituiu uma nova Divisão Hidrográfica Nacional (DHN), a qual é mostrada no Mapa 02.



Mapa 02 – Divisão adotada pelo CNRH (Brasil, 2007)

A maior parte do potencial hidrelétrico brasileiro encontra-se na região Amazônica (41%), que engloba a Região Hidrográfica Amazônica (RHA) e parte da Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia (RHTA). Entretanto, em termos de potencial instalado, a Amazônia participa com apenas 1%, sendo possível que grande parte do potencial estimado seja ambientalmente inviável. O potencial total da RHA é de 107,1 GW, aproximadamente, onde se destacam a sub-bacia do rio Xingu, com cerca de 14% do potencial inventariado do país e as dos rios Tapajós, Madeira e Negro. Porém, aspectos como a dispersão entre os poucos centros urbanos, as grandes distâncias

dos principais centros consumidores e a geração de um passivo ambiental resultante de áreas alagadas contribuem para a predominância da geração de energia termelétrica na RHA. Na RHTA, o elevado potencial hidrelétrico e sua localização frente aos mercados consumidores da região Nordeste colocam-na como prioritária para a implantação de UHEs com potencial hidrelétrico instalado de 6,98 GW, distribuídos em 28 centrais hidrelétricas, destacando-se a UHE de Tucuruí (no baixo Tocantins) e as de Serra da Mesa, Cana Brava, Peixe Angical e Luis Eduardo Magalhães (no alto Tocantins). O Anexo A apresenta os mapas das UHEs em operação, em implantação e as previstas na RHA e RHTA, respectivamente (BRASIL, 2007).

3.1.3. Distribuição de Energia Elétrica

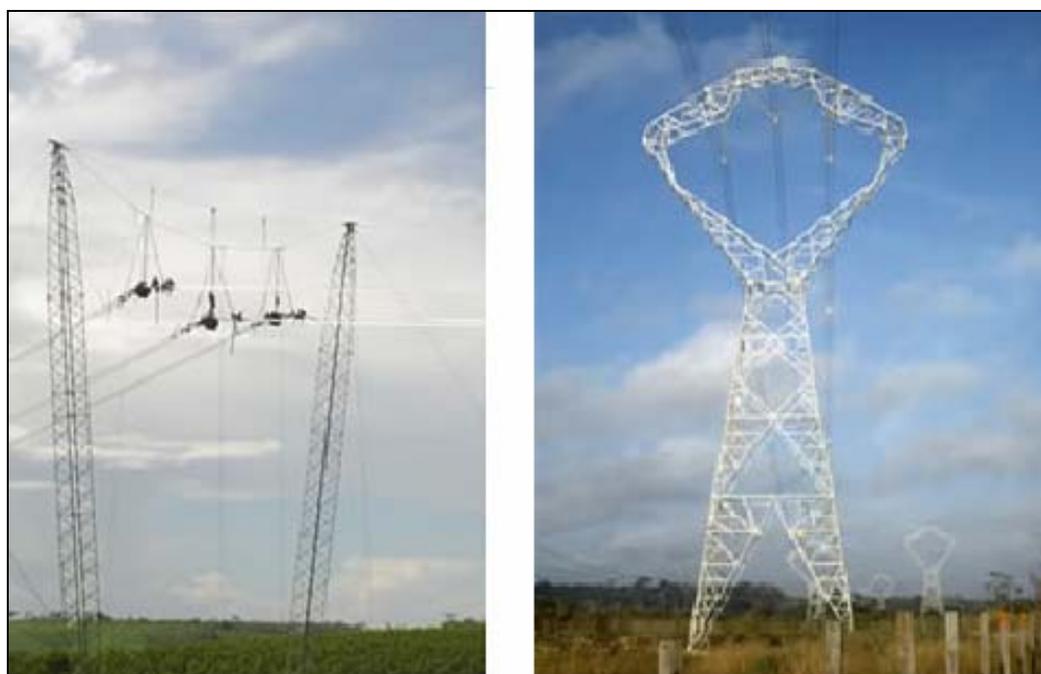
O sistema de distribuição é o último elo no complexo de sistemas de potência que distribuem energia elétrica produzida das UHEs e usinas termelétricas aos consumidores, ou seja, é a parte que está em contato direto com o usuário. Seu desempenho está relacionado à concepção, construção, qualidade dos materiais e equipamentos empregados, condições ambientais, aos danos causados por terceiros e aos trabalhos de manutenção (ELETROBRÁS, 1982) e segundo Labegalini *et al.* (1992) o desempenho das LTs está diretamente relacionado às características de seus componentes, devendo-se considerar, concomitantemente, a suportabilidade elétrica da estrutura isolante e seu desempenho técnico, assim como a capacidade de suportar as solicitações mecânicas às quais são submetidas.

3.1.3.1. Linhas de Transmissão

Uma LT de energia elétrica é composta principalmente por: torres, cabos, isoladores e subestações. Dentre os quais se destacam as torres, pois para a sua construção é necessário calcular todas as cargas possíveis de serem suportadas pela estrutura e transmitidas à fundação e o estudo das características geotécnicas do terreno. Assim, quando estes pré-requisitos são atendidos, pode-se escolher o tipo ideal, dimensionar e detalhar a fundação da torre. Além disto, para cada torre ou trecho onde serão implantadas, é necessário um estudo específico de caracterização do solo, pois ao longo de quilômetros de extensão de uma LT suas características podem variar (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Os materiais utilizados em fundações de torres de LTs são: aterro, madeira, concreto e aço. Este último é utilizado como elemento estrutural das fundações, sendo as suas modalidades: pé-de-poste, stub-cleat, hastes de âncora, grelhas e estacas. Em algumas aplicações o aço está sob tração, devido às cargas que a fundação da torre é submetida e em outras está em contato direto com o solo. Deste modo, problemas estruturais relacionados à corrosão podem surgir como corrosão sob tração e corrosão pelo solo. Além destes, pode ocorrer corrosão galvânica, que é causada pelo contato entre diferentes tipos de aço usados na fundação da torres; corrosão eletrolítica causada pela ação de correntes de fuga, entre outros tipos de corrosão. A proteção contra a corrosão é feita por diversos métodos, como a galvanização a fogo, através da qual o aço recebe uma camada de proteção de zinco por imersão das peças em banho de zinco fundido e os aços passivados, nos quais a primeira camada de óxido que se forma é estável (IBIDEM, 1992).

As torres de LTs podem ser de tipos variados, conforme mostrado nas Fotografias 01.a e 01.b (TBE, 2009), que ilustram uma torre estaiada e uma auto-portante, respectivamente.



(a) (b)
Fotografia 01 – Torre do tipo estaiada (a) e torre auto-portante (b) (TBE, 2009)

3.1.3.2. Confiabilidade dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

A importância dos sistemas de distribuição de energia elétrica leva as concessionárias de energia elétrica a se preocupar, continuamente, com a obtenção de soluções para problemas relacionados ao sistema. Estas soluções devem ser obtidas para subsidiar os diversos setores das concessionárias no sentido de: avaliar continuamente a confiabilidade histórica dos sistemas; comparar a confiabilidade do serviço atual com aquela inerente a qualquer mudança na filosofia geral de projeto, operação, manutenção, e/ou administração; identificar programas de manutenção que resultem em melhorias na confiabilidade do serviço entre outras soluções. Assim, torna-se evidente a necessidade das concessionárias procurarem métodos de qualificação (medição) do comportamento dos sistemas de distribuição (ELETROBRÁS, 1982).

O transporte de energia elétrica pelas LTs tem o caráter de prestação de serviço. Logo, ele deve ser eficiente, confiável e econômico e de todas as soluções possíveis, poucas satisfazem aos requisitos básicos do transporte de energia: permitir o “transporte de 1 kWh na distância especificada, ao menor custo, dentro de parâmetros técnicos pré-estabelecidos e com a confiabilidade necessária”. Todos os fatores que interferem na confiabilidade dos sistemas de distribuição estão relacionados com os componentes físicos das LTs (LABELAGINI, 1992).

Em sentido amplo, confiabilidade é dita como a capacidade de um item desempenhar a função exigida, sob condições estabelecidas, por um determinado período e em termos de medida de confiabilidade, admite-se que um determinado alimentador de um sistema de distribuição falhe apenas três vezes por ano. (ELETROBRÁS, 1982).

3.2. SOLO – ASPECTOS GERAIS

Os solos são materiais resultantes do intemperismo das rochas por desintegração mecânica e/ou decomposição química, podendo prevalecer um deles dependendo do local e das condições climáticas (CAPUTO, 1988).

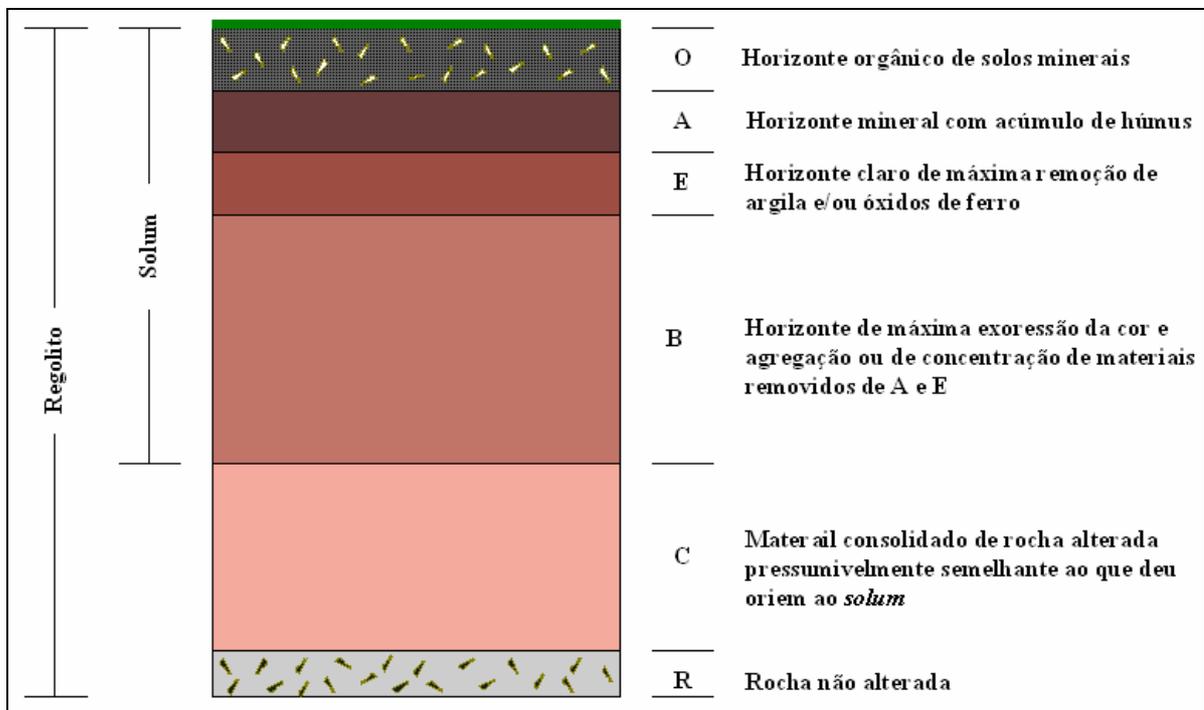
Existem várias definições para os solos, que dependem dos objetivos e enfoques científicos. Porém, de maneira generalizada, pode-se dizer que o solo é a superfície inconsolidada que recobre as rochas e mantém a vida animal e vegetal na Terra, constituído de camadas que diferem pela natureza física, química, mineralógica, morfológica e biológica (POLIVANOV, 1988).

O solo se forma a partir da ação gradativa de um conjunto de fenômenos biológicos, físicos e químicos, organizando-se em uma série de “camadas” sobrepostas de aspecto e constituição diferentes. Essas camadas são aproximadamente paralelas à superfície, sendo denominadas de horizontes e o conjunto destes, em corte vertical, que se estende da superfície até o material semelhante ao que deu origem ao solo é o perfil do solo, que para um solo completo e bem desenvolvido possui basicamente quatro tipos de horizontes, chamados horizontes principais e identificados pelas letras maiúsculas “O”, “A”, “E”, “B” e “C” (LEPSCH, 2002):

- Horizonte “O”: horizonte orgânico relativamente delgado, que recobre certos solos minerais, sendo constituído principalmente por folhas e galhos de vegetais e pelos seus primeiros produtos em decomposição. Na parte mais superficial encontram-se os detritos recém-caídos, não decompostos (subhorizonte Oo), que repousam sobre detritos mais decompostos ou em estado de fermentação (subhorizonte Od);
- Horizonte “A”: camada predominantemente mineral mais próxima à superfície, caracterizado pelo acúmulo da matéria orgânica, tanto parcial como totalmente humificada e/ou perda de materiais sólidos deslocados para o horizonte “B” mais profundo;

- Horizonte “E”: presente em alguns solos, sendo aquele mais claro onde ocorre perdas de materiais que foram deslocados para o horizonte “B” (argilas, óxidos de ferro e húmus);
- Horizonte “B”: situa-se mais abaixo do horizonte “A” ou “E”, desde que não tenha sido exposto à superfície por erosão. Apresenta o máximo desenvolvimento de cor, estrutura e/ou que possui materiais deslocados dos horizontes superiores a ele;
- Horizonte “C”: normalmente corresponde ao saprólito (rocha pouco alterada pelos processos formadores) e tem características semelhantes ao material de formação do solo.

Os horizontes do solo apresentam características como: cor, textura, estrutura, porosidade, cerosidade, consistência, cimentação, entre outras (OLIVEIRA, 2007; LEPSCH, 2002). O Esquema 01 ilustra um perfil de solo com seus horizontes principais.



Esquema 01 – Horizontes de um solo (Lepsch, 2002)

3.2.1. Características Mineralógicas dos Solos

Segundo Caputo (1988) os minerais encontrados nos solos são os mesmos das rochas de origem (minerais primários), além de outros formados na decomposição (minerais secundários). Quanto à composição química dos principais minerais componentes dos solos, pode-se agrupá-los em: silicatos (feldspato, mica, quartzo, serpentina, clorita, talco); óxidos (hematita, magnetita, limonita); carbonatos (calcita, dolomita) e; sulfatos (gesso, anidrita). Além destes, há os minerais argílicos, que são argilas de aparência amorfa constituídas de pequeníssimos minerais cristalinos, divididos em três grupos principais: caolinitas, montmorilonitas e ilitas.

3.2.2. Classificação dos solos

Lepsch (2002) mostra os princípios básicos de classificação dos solos, os primeiros sistemas naturais de classificação e sistemas modernos de classificação, dentre os quais a classificação americana, classificação da Organização para a Agricultura e Alimentação das Nações Unidas (FAO) e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS).

O SiBCS envolve dez ordens, com modificações nas ordens, alterações nos níveis de subordens, grandes grupos e subgrupos. As ordens de classificação são (OLIVEIRA, 2007):

- Argissolos: engloba a maioria dos solos vindos dos extintos Alissolos. Constituídos de material mineral, atualmente, incluem solos com horizonte textural normalmente com argila de atividade baixa e/ou ocorrência de argila de atividade alta, conjugada com saturação por bases baixas ou com caráter alítico. São considerados de forte a moderadamente ácidos. Suas subordens são: bruno-acizentados, acizentados, amarelos, vermelhos e vermelho-amarelos.
- Cambissolos: são solos rasos (0,5 a 1,5 m), em processo de desenvolvimento e com material de origem na massa do solo e ausência de argila acumulada. São moderadamente drenados, apresentando caráter aluminico. Quando possuem teor muito elevado de matéria

orgânica é chamado de húmico. Estes tipos de solo situam-se em vários relevos, podendo apresentar pedras na superfície e suas subordens são: hísticos, húmicos, flúvicos e háplicos.

- Chernossolos: solos minerais não-hidromórficos, com elevada saturação por bases e argila de alta atividade. Podem ocorrer em horizonte cálcico ou com caráter carbonático. Normalmente são pouco coloridos; podem ser bem ou imperfeitamente drenados. São solos de acidez moderada a fortemente alcalinos, predominando a presença de cálcio e magnésio em sua composição. Subordens: rëndizicos, ebânicos, argilúvicos e háplicos.

- Espodossolos: são solos minerais e arenosos ao longo do perfil, por isso tem limitação hídrica e é típico de florestas coníferas. Originalmente possuem limitação química e ocorrem nos tabuleiros costeiros da região nordeste do Brasil ou próximo ao mar. As migrações de complexos de ferro e alumínio são características deste solo, constituindo fenômeno comum em horizontes superficiais ácidos, tanto em materiais quartzíticos, quanto em rochas graníticas. Subordens: humilúvicos, ferrihumilúvicos e ferrilúvicos.

- Gleissolos: são solos hidromórficos que sofrem grande influência do excesso de umidade (permanente ou temporária), constituídos por material mineral e que apresentam horizonte dentro de 1,5 m da superfície. Caracterizam-se por apresentar horizontes com cores cinzentas ou neutras (horizonte glei). As cores indicam a formação dos solos em ambiente redutor devido o lençol freático permanecer elevado durante a maior parte do ano, podendo apresentar pequenas manchas avermelhadas, escuras ou amareladas, em decorrência da mobilização e segregação de compostos de ferro em ambiente redutor, os quais contrastam com o fundo neutro ou acizentado característico dos Gleissolos. As subdivisões deste tipo de solo caracterizam-se pelo baixo pH apresentado por eles (geralmente menor que 3,5), devido à presença de ácido sulfúrico; solos que contém sais; solos de horizonte superficial escuro, com elevado teor de matéria orgânica; solos cujas classes não se enquadram nas anteriores. Subordens: tiomórficos, sálicos, melânicos e háplicos.

- Latossolos: São solos minerais, não-hidromórfico, que se apresentam em estágio avançado de intemperização, pois não contêm minerais primários e secundários. São bastante profundos e apresentam pouca diferenciação de horizontes; muito intemperizados com argilas de baixíssima atividade, pouca retenção de bases e sem minerais primários facilmente intemperizáveis. Além disto, devido à grande lixiviação a que estão sujeitos, ocorre a remoção da sílica e de outros elementos do perfil do solo, promovendo um enriquecimento relativo de óxidos de ferro e de alumínio, que atuam como agentes cimentantes (agregantes), provocando elevada macro-porosidade, dando aspecto maciço poroso (esponjoso) à massa de solo, além de resistência à erosão. As cores predominantes do perfil variam de vermelhas muito escuras a amareladas; seus componentes granulométricos principais são a argila e areia. Quimicamente, são distróficos em sua grande maioria, ácidos e com baixos valores de capacidade de troca catiônica. Os valores de pH variam de 4,0 a 5,5, caracterizando-se como fortes e mediamente ácidos. A maior contribuição para o total de bases se deve a presença de cálcio (Ca) e a menor ao sódio (Na), que é praticamente desprezível, além de apresentar baixos teores de potássio (K). Suas subordens são: brunos, acizentados, amarelos, vermelhos e vermelho-amarelos.

- Luvisolos: são solos pouco profundos, constituídos de material mineral, não-hidromórficos e com argila em alta atividade. Podem variar entre bem e imperfeitamente drenados, sendo erosivos, principalmente quando apresentam grande diferença de argila entre os horizontes. Se ao contrário, a distribuição de argila for discreta entre os horizontes, quando subssolados logo voltam à condição original de dureza acentuada, sendo adensados abaixo da camada arável. Subordens: crômico e háplicos.

- Planossolos: são solos minerais hidromórficos ou semi-hidromórficos com mudança textural, localizados em área de relevo suave, ondulados ou planos e mal drenados. Normalmente aparecem nas margens de lagoas e rios. Apresentam elevada saturação por sódio e baixa porosidade na camada subssuperficial. Subordens: háplicos e nátricos.

- Plintossolos: presença de manchas ou mosqueados avermelhados característicos marcantes, ricos em ferro e de consistência macia, podendo ser individualizados facilmente da matriz do solo ou de nódulos ou de concreções ferruginosas duríssimas. São solos que se constituem de uma mistura argilosa, pobre em carbono orgânico, mas rica em ferro, ou ferro e alumínio com quartzo e outros minerais. Suas subordens são: pétricos, argilúvicos e háplicos.
- Vertissolos: solos compostos por material mineral com horizonte vértico entre 25 e 100 cm de profundidade. Variam entre pouco profundos a profundos com ocorrência de solos rasos. Solos de áreas planas ou pouco onduladas; pH variando de 5,5 a 6,5; textura argilosa; mal-drenados e muitos duros quando secos. Solos constituídos por: teor de argila de 30%, no mínimo, nos 20 cm superficiais, depois de misturados; fendas verticais no período seco. Subordens: hidromórficos, ebânicos e cromados.

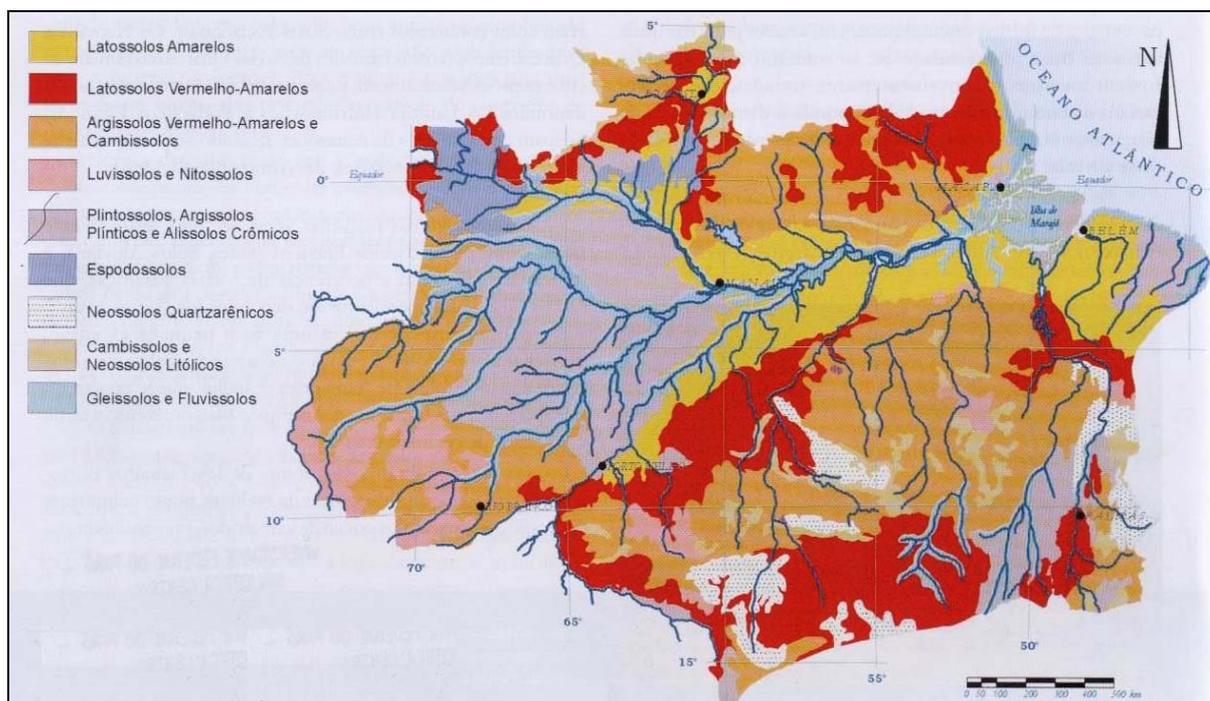
3.2.3. Solos da Amazônia

O Complexo Regional da Amazônia (CRA) corresponde a uma das três divisões territoriais adotadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), podendo ser chamada de Região Amazônica, Amazônia Brasileira ou Amazônia Legal. Esta região compreende aos Estados do Amazonas, Acre, Amapá, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, parte do norte de Mato Grosso e oeste do Maranhão. Artigos controversos foram publicados sobre o potencial e a qualidade dos solos desta região para a agricultura, principalmente na imprensa não-especializada, dando-se a idéia de uma região com dominância de solos hidromórficos (Gleissolos e Plintossolos). No entanto, sabe-se que tal concepção está errada, pois as várzeas úmidas e os pântanos estão localizados em uma faixa relativamente estreita, ao longo dos principais rios, e constituem menos de 10% da área total. A maior parte dos solos do CRA situa-se em locais bem drenados, regionalmente denominados “terras firmes” (LEPSCH, 2002).

Os mapas pedológicos da Amazônia mostram que são comuns Latossolos Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelos nas áreas de planaltos. Plintossolos ocupam cerca de 20% da

Amazônia, situando-se principalmente nas chamadas Depressões da Amazônia Ocidental e do Tocantins. Existem pequenas áreas de solos relativamente ricos e os relacionados com a ocorrência de rochas basálticas. Em uma pequena extensão ocorrem manchas de solos, que chamam bastante atenção, denominadas localmente “terra preta de índio”, caracterizado por apresentar um horizonte “A” antrópico bastante escuro e fértil, com restos de cerâmica indígena. Na parte leste, principalmente nas áreas limítrofes aos Estados de Goiás e Maranhão, existem algumas áreas em que os solos são constituídos em sua maior parte por nódulos endurecidos de óxido de ferro e classificados como Plintossolos Pétricos (IBIDEM, 2002).

O Mapa 03 mostra os principais solos da Amazônia, podendo-se observar que na região sudeste do Estado do Pará há a predominância de latossolos amarelos, latossolos vermelho-amarelo e argissolos vermelho-amarelos e cambissolos.



Mapa 03 – Principais solos da Amazônia (EMBRAPA, 1981; IBGE, 2001 *apud* Lepsch, 2002)

3.3. CORROSÃO: CONCEITO E TIPOS

Corrosão é a deterioração de um material (geralmente metálico) por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, tornando o seu uso inadequado. Este processo de deterioração é, em geral, espontâneo e contribui para que a durabilidade e o desempenho dos materiais metálicos estejam em constante diminuição (GENTIL, 2007).

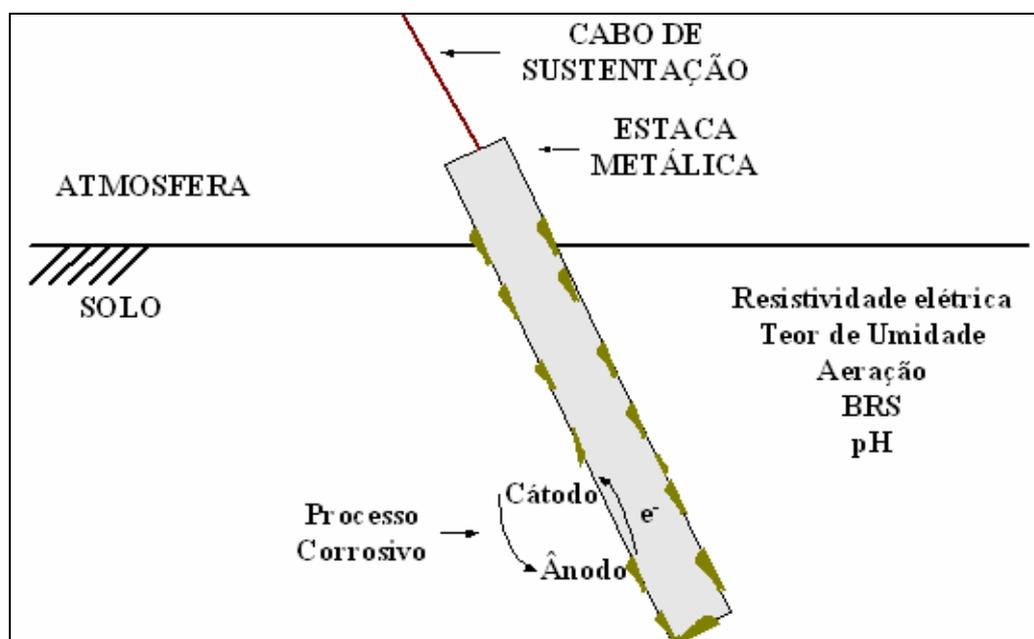
No estudo dos processos corrosivos é muito importante conhecer os diferentes tipos de corrosão, que podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque, as suas diferentes causas e seus mecanismos. Deste modo, pode-se ter corrosão quanto à morfologia, às causas ou mecanismos, aos fatores mecânicos, ao meio corrosivo e à localização do ataque (DUTRA; NUNES, 1987).

3.4. CORROSÃO PELO SOLO

Dentre os vários meios corrosivos, tem-se o solo como um meio relevante, tendo em vista a quantidade de estruturas metálicas enterradas, como tubulações, tanques, estacas metálicas, cabos de transmissão de energia elétrica e telecomunicações, fundações de torres de LTs entre outros, que ficam sujeitas à ação corrosiva deste ambiente, com conseqüente deterioração prematura. A corrosão em tubulações ou tanques contendo combustíveis pode causar perfurações gerando vazamentos e como conseqüência a contaminação do solo e dos lençóis freáticos, além do risco de acidentes, como incêndios e explosões (GENTIL, 2007).

Serra *et al.* (1979) afirmam que a corrosão pelo solo é um processo que apresenta natureza eletroquímica, ou seja, ocorre devido ao aparecimento de células (pilhas) de corrosão na superfície do metal, conforme ilustrado no Esquema 02. Segundo Trabanelli *et al.* (1972), o solo tem sua definição como eletrólito e pode ser estudado empregando-se a teoria eletroquímica. As células de corrosão podem aparecer devido aos seguintes fatores: ação de correntes de fuga,

aeração diferencial, diferença de resistividade entre dois pontos, pH, umidade, presença de microrganismos, par galvânico, entre outros.

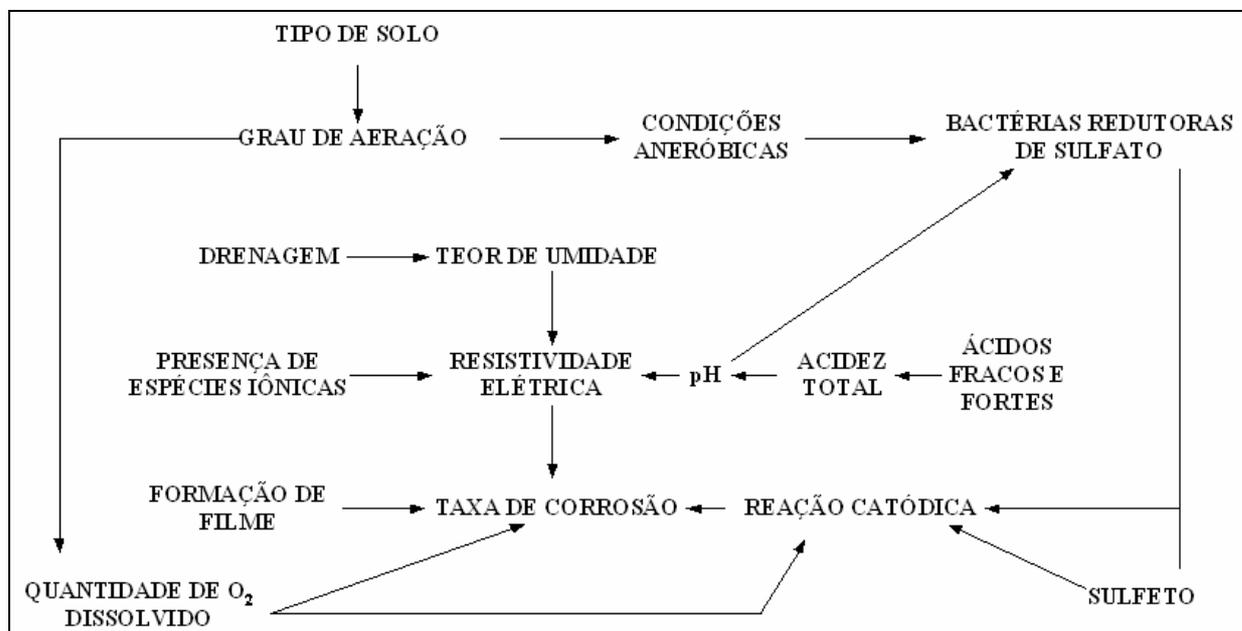


Esquema 02 – Corrosão em estaca metálica enterrada (Adaptado de Roberge, 1999)

A presença de íons em determinada profundidade do solo pode gerar um gradiente iônico ao longo da estrutura enterrada, fazendo com que as regiões de concentração salina mais elevada se tornem anódicas, ocasionando a corrosão com o tempo. Assim, os solos de pastagem e os agricultáveis facilitam, em princípio, o processo corrosivo, enquanto que os arenosos (bem aerados e baixa umidade) são indicadores de baixa corrosão. Similarmente, a aeração diferencial ao longo de uma estrutura enterrada acelera o processo corrosivo em regiões que apresentam menor aeração (HOFFMANN; SILVA, 2005).

Para estimar a taxa de corrosão (TC) de metais em solos, Serra e Mannheimer (1981) utilizaram técnicas eletroquímicas, destacando-se o de resistência de polarização. Além disto, avaliaram a TC de metais em solos empregando a técnica de perda de massa, enterrando-se CPs metálicos no solo sob investigação.

O Esquema 03 mostra a interação entre os parâmetros determinantes da corrosividade do solo.



Esquema 03 – Características corrosivas de um solo (Roberge, 1999)

3.4.1. Parâmetros de Avaliação da Corrosividade de Solos

A corrosividade de um solo pode ser definida como a capacidade deste ambiente produzir e desenvolver um processo corrosivo em uma estrutura enterrada a partir da análise de suas características físico-químicas (TRABANELLI *et al.*, 1972).

3.4.1.1 Aeração, Profundidade e Porosidade

Em solos neutros ou alcalinos, a concentração de oxigênio tem um efeito importante na TC, pois influencia a reação catódica, mas na presença de certos microorganismos, como as bactérias redutoras de sulfato (BRS), as TCs podem ser muito altas, mesmo em condições anaeróbias. Além disto, escavações podem aumentar o grau de aeração do solo, fazendo com que as TCs em solos perturbados com maior disponibilidade de oxigênio sejam maiores do que em solos não-perturbados (ROBERGE, 1999).

Gentil (2007) afirma que o processo corrosivo no solo pode ser acelerado pela presença de gases da atmosfera como oxigênio, dióxido de carbono, gás sulfídrico, óxidos de enxofre e de nitrogênio. Afirma, também, que a redução do oxigênio na área catódica tem uma ação aceleradora. Assim, tal afirmação levaria a induzir que em solos com pouca aeração ou em solos não-aerados a corrosão seria menor, o que é verdadeiro se não houver bactérias anaeróbias ou a possibilidade de formação de pilhas de aeração diferencial ao longo de uma tubulação que atravessa solos de diferentes características e porosidades. Além disto, a corrosão poder ser acentuada em função da profundidade em que uma estrutura metálica está enterrada. Desta maneira, como o teor de oxigênio é baixo em grandes profundidades, a TC será baixa, mesmo que a condutividade elétrica seja elevada e em profundidade entre 2 e 3m a resistividade é o parâmetro controlador da corrosão, mas em grandes profundidades, cerca de 10m, a difusão de oxigênio e/ou a presença de bactérias anaeróbias é o controlador.

Oguzie *et al.* (2004) estudaram a susceptibilidade de corrosão do aço enterrado em solos naturais e em simulados em laboratório com variadas. Os solos foram monitorados empregando-se as técnicas de perda de massa e de contagem do produto de corrosão. Além disto, a presença de íons, o pH razoavelmente baixo, a aeração limitada, a umidade elevada, a profundidade do solo e as suas texturas colaboraram para a alta susceptibilidade de corrosão do aço enterrado.

3.4.1.2. Teor de Umidade

A elevação do teor de umidade de um solo gera a diminuição da sua resistividade elétrica devido à dissolução de sais eventualmente presentes. Porém, pode-se admitir a solubilização dos sais pelo excesso de chuvas, que os arrasta para partes mais profundas do solo, tornando-o menos agressivo próximo à superfície devido ação lixiviante da água (BRADFORD, 2002).

Rodrigues e Dick (2006) analisaram o comportamento de solos ao longo de oleodutos da região Sul do Brasil variando-se a umidade relativa em relação à condutividade elétrica em ambiente controlado por uma câmara climática. Além disto, caracterizaram as amostras de solo

do ponto de vista físico-químico, determinando o teor de umidade, o pH e as concentrações de íons cloreto, sulfato, entre outros parâmetros.

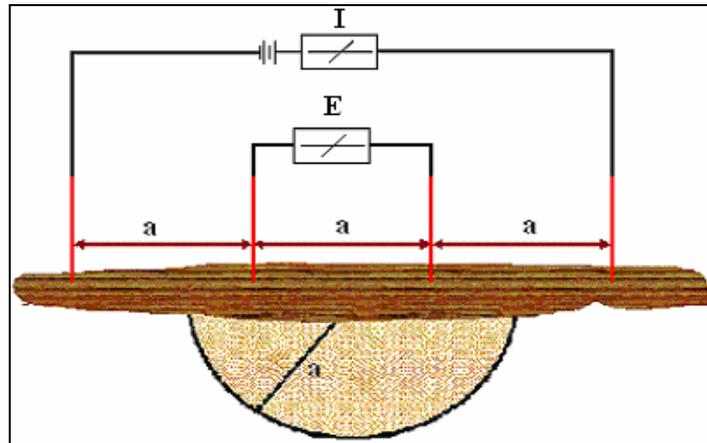
3.4.1.3. Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica do solo tem sido amplamente usada como um indicador de sua corrosividade. Considerando-se que o fluxo de corrente iônico está associado às reações de corrosão, solos com resistividade elevada geralmente apresentam baixa corrosividade, mas isto não garante a ausência de processos corrosivos. Então, para estruturas metálicas enterradas, o mérito de uma classificação de risco de corrosão baseada em um valor absoluto da resistividade do solo é limitado (ROBERGE, 1999).

Segundo Bradford (2002) a resistividade elétrica do solo é frequentemente utilizada para indicar o quanto corrosivo um solo pode ser para o metal nele enterrado e concorda com Roberge (1999), afirmando que tal medida não é suficiente para determinar a agressividade corrosiva do solo, sendo apenas um forte indicador.

A resistividade do solo pode ser medida pela técnica dos quatro pontos de Wenner empregando-se a norma ASTM G57 – 95a utilizada por Ferreira (2005) e Oliveira (2007) ou, mais recentemente, por medidas eletromagnéticas. Esta última permite medidas de maneira conveniente e em diferentes profundidades de solo. Outra opção para medidas da resistividade do solo é o método “*soil box*” (caixa de solo) (DUTRA; NUNES, 1987).

A resistividade elétrica do solo obtida pelo método de Wenner representa a resistividade média do solo contido em uma semi-esfera de raio “ a ” com centro no ponto médio do segmento que une os dois eletrodos internos. Neste método há a injeção de uma corrente elétrica “ I ” no solo através de duas estacas (eletrodos) extremas, sendo medida a diferença de potencial “ E ” entre duas estacas internas (GENTIL, 2007), conforme mostrado no Esquema 04.



Esquema 04 – Método de Wenner (Gomes, 1990)

O método de Wenner baseia-se na medida da resistência do solo R a partir dos valores de I e E utilizando-se a lei de Ohm (Eq. 01).

$$R = \frac{E}{I} \quad (\text{Eq. 01}).$$

Onde:

R – Resistência do solo (Ω);

I – Corrente injetada no solo (A);

E – Diferença de potencial (V)

Então, com o valor de R calcula-se a resistividade do solo (ρ_{campo}) pela Eq. (02):

$$\rho_{\text{campo}} = \frac{4\pi \cdot R \cdot a}{\left\{ 1 + \left[\frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} \right] - \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + p^2}} \right] \right\}} \quad (\text{Eq. 02}).$$

Onde:

ρ_{campo} – resistividade elétrica do solo ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$);

R – resistência elétrica do solo ($\text{k}\Omega$);

a – distancia entre as estacas enterradas (cm);

p – profundidade de cravamento das estacas constante (30 cm).

Silva *et al.* (2004) compararam medidas *in situ* com medidas laboratoriais de resistividade e constataram uma variação de 18% da umidade natural a 1,5 m de profundidade em relação a capacidade de retenção de água dos solos, realizada em laboratório, confirmando a possibilidade de executar este tipo de investigação.

Na avaliação de 200 milhas de dutos com 26 a 44 anos de tempo de serviço e enterrados entre 35 tipos diferentes de solo, Denilson e Ewing (1935) observaram que há formação de células de corrosão quando uma tubulação atravessa solos de diferentes resistividades, sendo que a tubulação na área de baixa resistividade torna-se anódica, enquanto a de alta resistividade comporta-se como catodo.

3.4.1.4. Presença de Íons Cloreto, Sulfato e Sulfeto

Água no estado líquido representa o eletrólito essencial requerido para as reações eletroquímicas da corrosão, pois nela estão presentes sais solúveis, que influenciam a resistividade elétrica, de modo que o aumento no teor de umidade e na concentração de sais solúveis gera a diminuição da resistividade do solo. Dentre estes sais, podem-se citar os que apresentam íons cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}) (ROBERGE, 1999).

Os íons cloreto são bastante prejudiciais aos materiais metálicos, pois participam diretamente das reações de dissolução anódica e sua presença tende a diminuir a resistividade elétrica do solo. Eles podem ser encontrados naturalmente em solos próximos aos litorais e a sua concentração varia com o teor de umidade do solo (IBIDEM, 1999).

Maslehuddin *et al.* (2007) apresentaram resultados de um estudo conduzido para avaliar os efeitos da concentração de íons cloreto no solo na corrosão de aço reforçado em concreto por um período de exposição de 18 meses, onde CPs preparados foram expostos a amostras de solo com concentração de cloretos acima de 3% e a corrosão destes foi avaliada empregando-se potências de corrosão e densidade de corrente de corrosão.

Em geral, os efeitos corrosivos dos íons sulfato em materiais metálicos são considerados mais brandos quando comparados aos dos íons cloreto. No entanto, os íons sulfato apresentam risco aos materiais metálicos, pois que podem ser reduzidos a sulfetos pelas BRS (ROBERGE, 1999).

3.4.1.5. Potencial Hidrogeniônico: pH dos Solos

A acidez do solo pode ser medida através da concentração hidrogeniônica ou potencial hidrogeniônico ($pH = -\log[H^+]$). Solos extremamente ácidos ($pH \leq 4$) causam severa corrosão na maioria dos metais enterrados. Neste caso, a corrosão acontece na ausência de oxigênio, pois o hidrogênio gasoso (H_2) pode ser liberado por difusão direta no solo. Em solos neutros e alcalinos ($pH \geq 7$) e onde não ocorra corrosão microbiológica, a resistividade do solo torna-se uma importante variável (SILVA *et al.*, 2006).

O pH dos solos situa-se normalmente entre 3 e 8,5. Os solos ácidos representam risco de corrosão para materiais de construção como aço, ferro fundido e revestimentos de zinco. A acidez de solos é provocada pela lixiviação de minerais, decomposição de plantas, desperdícios industriais, chuva ácida e certas formas de atividades microbiológicas. Por outro lado, os solos alcalinos tendem a ter elevadas concentrações de sódio, potássio, magnésio e cálcio e estes dois últimos elementos tendem a formar depósitos de calcário nas estruturas enterradas, que apresentam propriedades protetoras contra corrosão (ROBERGE, 1999).

Silva *et al.* (2006) realizaram ensaios físico-químicos e de determinação da acidez total. Além disto, fizeram medições de pH do solo e os correlacionaram a valores de pH de um banco de dados feito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), onde verificaram boa correlação entre pH em KCl 1N (cloreto de potássio a 1 Normal) com o pH em água na proporção de 1:2,5. Desse mesmo banco de dados, observaram uma correlação entre o pH em KCl 1N e a saturação de bases entre outras correlações.

3.4.1.6. Potencial de Oxirredução ou Redox

O potencial de oxirredução (redox) é, essencialmente, uma medida do grau de aeração do solo, sendo uma característica que depende da presença de águas ácidas e aeradas, circulação de ar, entre outros parâmetros. Valores elevados de potencial redox (E_H) indicam alta concentração de oxigênio (O_2), enquanto que o inverso indica uma condição para o favorecimento de atividade microbológica anaeróbica (NEVEUX, 1968; DUTRA; NUNES, 1987; ROBERGE, 1999).

A ocorrência de reações redox depende do E_H do meio subterrâneo. A concentração de íons H^+ livres (pH) pode ser utilizada na determinação do estado ácido-base do meio. Valores de E_H elevados ($E_H > 400$ mV vs. EPH) em relação ao eletrodo-padrão de hidrogênio (EPH) favorecem a existência de espécies oxidadas e possibilita a classificação do solo como aeróbico. No entanto, E_H abaixo de 100 mV vs. EPH indicam a existência de espécies reduzidas e solos anaeróbicos (KNOX, *et al.*, 1993; ROBINSON, 1993).

O E_H indica se o solo é um ambiente com caráter redutor ou oxidante. Quando E_H for elevado, o solo funciona como oxidante, e se for baixo verifica-se o oposto, ou seja, o solo funciona como redutor. Além disto, o E_H de um solo é muito importante na determinação de quais espécies estão disponíveis para adsorção, precipitação ou complexação (OLIVEIRA, 2007).

Segundo Wilmott e Diakoe (1996), o E_H apresenta uma grande variação em diferentes distâncias, sendo um fator importante, pois em determinados pontos pode indicar uma condição aeróbia e em outros, relativamente próximos, uma condição anaeróbia.

3.4.1.7. Potencial Estrutura-Solo

O potencial estrutura-solo (E_{ES}) é a diferença de potencial entre a estrutura metálica enterrada e o solo que a envolve medida contra um eletrodo de referência (ER). A medição destes potenciais é utilizada para avaliar a existência de correntes de fuga e observar se a estrutura enterrada está naturalmente protegida contra a corrosão. Caso a estrutura esteja sujeita à corrente

de fuga de intensidade flutuante, o seu potencial variará de acordo com a correspondente flutuação. Se a corrente for constante, ocorrerão potenciais negativos ou positivos, dependendo da sua intensidade e sentido. Em geral, o E_{ES} medido em relação ao eletrodo de cobre-sulfato de cobre (ECSC) situa-se entre -700 e -100 mV vs. ECSC. Valores fora desta faixa ou dentro dela, mas oscilantes, são um indício de que a estrutura está sob ação de correntes de fuga. Valores de E_{ES} superiores a -850 mV vs. ECSC indicam que a estrutura metálica enterrada não está naturalmente protegida da corrosão (DUTRA; NUNES, 1987).

3.4.2. Métodos de Avaliação da Corrosividade do Solo

3.4.2.1. Classificações do Solo Quanto a Corrosividade

Para projetar e propor a avaliação de riscos de corrosão é desejável estimar a corrosividade do solo sem efetuar exaustivos e complicados testes, pois se exige longos períodos de exposição (normalmente espera-se que estruturas enterradas durem décadas) e os solos podem ser encontrados em diversas condições. Deste modo, considerando a complexidade dos parâmetros que afetam a corrosão pelo solo, é evidente que o uso de modelos de corrosividade relativamente simples leva a imprecisões e limitações que devem ser consideradas quando se aplica qualquer uma das metodologias comuns (ROBERGE, 1999).

Uma das classificações mais simples é baseada em um parâmetro singular: a resistividade elétrica do solo. A Tabela 01 mostra a avaliação da severidade de corrosão adotada com mais frequência e, segundo ela, os solos arenosos são considerados menos corrosivos (alta resistividade), enquanto que os solos argilosos são considerados mais corrosivos, especialmente aqueles contaminados com água salgada, pois apresentam baixa resistividade. A resistividade elétrica do solo é amplamente utilizada na prática e, geralmente, é considerada a variável que mais influencia o processo corrosivo na ausência de atividade microbiana (ROBERGE, 1999).

Tabela 01 – Grau de corrosividade baseado na resistividade elétrica do solo

ρ (k Ω .cm)	GRAU DE AGRESSIVIDADE
Maior que 20	Essencialmente não-corrosivo
Entre 10 e 20	Suavemente corrosivo
Entre 5 e 10	Moderadamente corrosivo
Entre 3 e 5	Corrosivo
Entre 1 e 3	Altamente corrosivo
Menor que 1	Extremamente corrosivo

Fonte: Roberge (1999)

Neveux (1968) apresentou uma relação semelhante à de Roberge (1999) (Tabela 02). Dutra e Nunes (1987) relacionaram a corrosividade do solo com potencial estrutura-solo (E_{ES}) e a resistividade elétrica (Tabela 03). Rosenqvist (1961) afirmou que as taxas de corrosão e o grau de danos aos materiais se relacionam e classifica esta relação (Tabela 04). Wranglén (1972) afirmou que a resistividade elétrica é o parâmetro determinante da corrosividade do solo (Tabela 05). A Tabela 06 mostra uma relação entre E_H e a corrosão (STARKEY; WRIGHT, 1945 apud GENTIL, 2007). Booth e Tiller (1968) apresentaram uma relação entre a resistividade elétrica do solo, potencial redox e o teor de umidade (Tabela 07).

Tabela 02 – Grau de agressividade baseado na resistividade elétrica do solo

ρ (k Ω .cm)	GRAU DE AGRESSIVIDADE
Menor que 1	Extremamente agressivo
Entre 1 e 2	Fortemente agressivo
Entre 2 e 3,5	Moderadamente agressivo
Entre 3,5 e 5	Pouco agressivo
Entre 5 e 10	Ligeiramente agressivo
Maior que 10	Não-agressivo

Fonte: Neveux (1968)

Tabela 03 – Corrosividade em função da resistividade elétrica e do potencial estrutura-solo

E_{ES} (mV vs. ECSC)	ρ (k Ω .cm)		
	De 0,5 a 1	De 1 a 10	De 10 a 100
Maior que -400	Pouco corrosivo	Muito pouco corrosivo	Não corrosivo
De -400 a -500	Moderadamente corrosivo	Pouco corrosivo	Muito pouco corrosivo
-500 a -600	Corrosivo	Moderadamente corrosivo	Pouco corrosivo
Menor que -600	Muito Corrosivo	Corrosivo	Moderadamente corrosivo

Fonte: Dutra; Nunes (1987)

Tabela 04 – Relação entre as taxas de corrosão e o grau de danos aos materiais

GRUPOS	CLASSIFICAÇÃO	TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)
1	Corrosividade não-mensurável	Menor que 1
2	Corrosividade não-prejudicial	Entre 1 e 5
3	Corrosividade que em condições desfavoráveis pode danificar estruturas de aço	Entre 5 e 20
4	Corrosividade que em condições normais danificam estruturas de aço	Entre 20 e 100
5	Corrosividade elevada	Maior que 100

Fonte: Rosenqvist (1961)

Tabela 05 – Corrosividade do solo mostrando a taxa média de corrosão para o aço

ρ (k Ω .cm)	TEOR DE SAIS (mg/L)	CORROSIVIDADE	TAXA CORROSÃO (μ m/ano)
Menor que 0,1	Maior que 7500	Muito alta	Maior que 100
Entre 0,1 e 1	Entre 7500 e 750	Alta	Entre 100 e 30
Entre 1 e 10	Entre 750 e 75	Baixa	Entre 30 e 4
Maior que 10	Menor que 75	Muito baixa	Menor que 4

Fonte: Wranglén (1972)

Tabela 06 – Relação entre potencial redox e corrosão

E_H (mV vs. EPH)	CORROSÃO
Maior que 400	Ausência
Entre 200 e 400	Ligeira
Entre 100 e 200	Moderada
Menor que 100	Severa

Fonte: Gentil (2007)

Tabela 07 – Agressividade do solo baseada em: resistividade, potencial redox e teor de umidade

PARÂMETROS	AGRESSIVO	NÃO-AGRESSIVO
ρ (Ω .cm)	< 2000	> 2000
E_H (pH = 7) (mV vs. EPH)	< 400 (solo argiloso: < 430)	> 400 (solo argiloso: > 430)
Teor de Umidade (%)	> 20	< 20

Fonte: Booth; Tiller (1968)

3.4.2.2. Índices de Corrosividade

Ferreira (2005) e Loureiro *et al.* (2006) utilizaram um índice de corrosividade do solo em seus estudos conhecido como índice de Steinrath (IS), que é um dos mais completos, pois se baseia na determinação de sete parâmetros do solo: resistividade (ρ), potencial redox (E_H), pH, teor de umidade e concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto. Neste índice atribuem-se índices parciais de corrosividade (IPC) para cada um destes sete parâmetros, conforme mostrado na Tabela 08 e o somatório de cada índice parcial fornece o IS do solo em estudo (Tabela 09).

Roberge (1999) mostrou uma escala para avaliar a corrosividade do solo desenvolvida pela *American Water Works Association (AWWA)*. Nesta classificação, a corrosividade é medida pela atribuição de pontos a diferentes variáveis, como apresentadas na Tabela 10. Quando o total de pontos nesta escala é maior ou igual a “9”, medidas de prevenção à corrosão, como a proteção catódica, são recomendadas para as ligas de ferro.

Tabela 08 – Parâmetros e índices parciais para avaliação da corrosividade do solo

PARÂMETRO DO SOLO	IPC	PARÂMETRO DO SOLO	IPC
ρ ($k\Omega.cm$)		<i>Sulfato (ppm)</i>	
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		
		<i>Sulfeto (ppm)</i>	
		Ausente	0
E_H (mV vs. 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	<i>Cloreto (ppm)</i>	
Igual a 0	-4	Menor que 100	0
		De 100 a 1000	-1
		Maior que 1000	-4
pH		<i>Teor de Umidade (%)</i>	
Maior que 5	0	Menor que 20	0
Menor que 5	-1	Maior que 20	-1

Fonte: Trabaneli (1972)

Tabela 09 – Índice total de corrosividade do solo pelo índice de Steinrath

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	ÍNDICE DE 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: Trabaneli (1972)

Tabela 10 – Escala numérica de corrosividade da AWWA

PARÂMETRO DO SOLO	PONTOS	PARÂMETRO DO SOLO	PONTOS
ρ ($\Omega.cm$)		pH	
Menor que 700	10	Entre 0 e 2	5
Entre 700 e 1000	8	Entre 2 e 4	3
Entre 1000 e 1200	5	Entre 4 e 8,5	0
Entre 1200 e 1500	2	Maior que 8,5	3
Entre 1500 e 2000	1		
Maior que 2000	0		
		<i>Sulfetos (ppm)</i>	
E_H (mV vs. EPH)		Positivo	3,5
Maior que 100	0	Traço	2
Entre 50 e 100	3,5	Negativo	0
Entre 0 e 50	4		
Menor que 0	5		

Fonte: Roberge (1999)

Silva *et al.* (2006) utilizaram o índice de Girard para a determinação do índice de corrosividade e mostraram experimentalmente como obter os parâmetros desta equação. Este método é baseado na resistividade elétrica do solo (no ponto de saturação da água), na acidez total e na umidade de saturação do solo, sendo o índice calculado pela Eq. (03). A Tabela 11 apresenta a classificação da corrosividade baseada no índice de Girard.

$$C = A_T \cdot \left[\frac{U_S \cdot (104 - U_S)}{\rho_0} \right] \quad (\text{Eq. 03}).$$

Onde:

C – Índice de corrosividade de Girard (adimensional);

ρ_0 – Resistividade no ponto de saturação de água ($\Omega.cm$);

A_T – Acidez total (mg KOH / g de amostra);

U_S – Teor de umidade de saturação do solo (%).

Tabela 11 – Avaliação da corrosividade pelo índice de Girard

ÍNDICE DE GIRARD	CLASSIFICAÇÃO
Menor que 10	Baixa corrosividade
Entre 10 e 100	Média corrosividade
Maior que 100	Alta corrosividade

Fonte: Silva *et al.* (2006)

3.5 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS

3.5.1. Potencial de Corrosão

Um metal que sofre corrosão em uma dada solução de baixa resistividade elétrica assume um potencial característico designado de potencial de corrosão (E_{CORR}). O conhecimento deste potencial pode fornecer informações valiosas tanto em aplicações práticas de técnicas de proteção contra a corrosão como na investigação de processos corrosivos (WOLYNEC, 2003).

A medida do E_{CORR} é útil na avaliação da eficiência da proteção catódica de estruturas enterradas. Após a implantação desta proteção, efetua-se o monitoramento do E_{ES} , que é uma medida do E_{CORR} da estrutura enterrada. Quando o potencial for medido em relação ao ECSC para estruturas de aço e seu valor for inferior a -850mV-ECSC , considera-se que a proteção é satisfatória (IBIDEM, 2003).

Perdese *et al.* (1990) mostraram a variação do E_{CORR} medido em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS) com o tempo para aço em meio de solos argilosos e arenosos com 15% de umidade, conforme pode ser visualizado nos Gráficos 02.a e 02.b, observaram que o E_{CORR} apresentou-se estável a partir de 900 horas de ensaio.

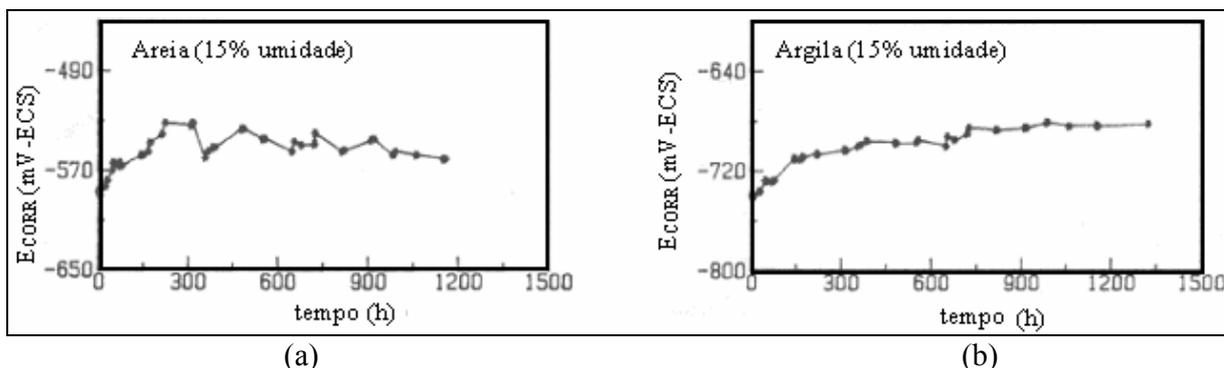


Gráfico 02 – Potencial de corrosão em solo arenoso (a) e argiloso (b) (Pernice *et al.*,1990)

Carson e Orazem (1999) avaliaram o E_{CORR} vs. ECS do aço imerso em uma solução (extrato aquoso) aerada obtida a partir de um solo relativamente rico em íons cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) e fizeram uma modelagem matemática dos dados obtidos com o objetivo de avaliar o comportamento transiente da polarização. Os Gráficos 03.a e 03.b mostram a variação do E_{CORR} com o tempo, onde se observa uma brusca diminuição deste potencial nas duas primeiras horas, seguida de outra mais suave, alcançando certa estabilidade após 20 horas de ensaio.

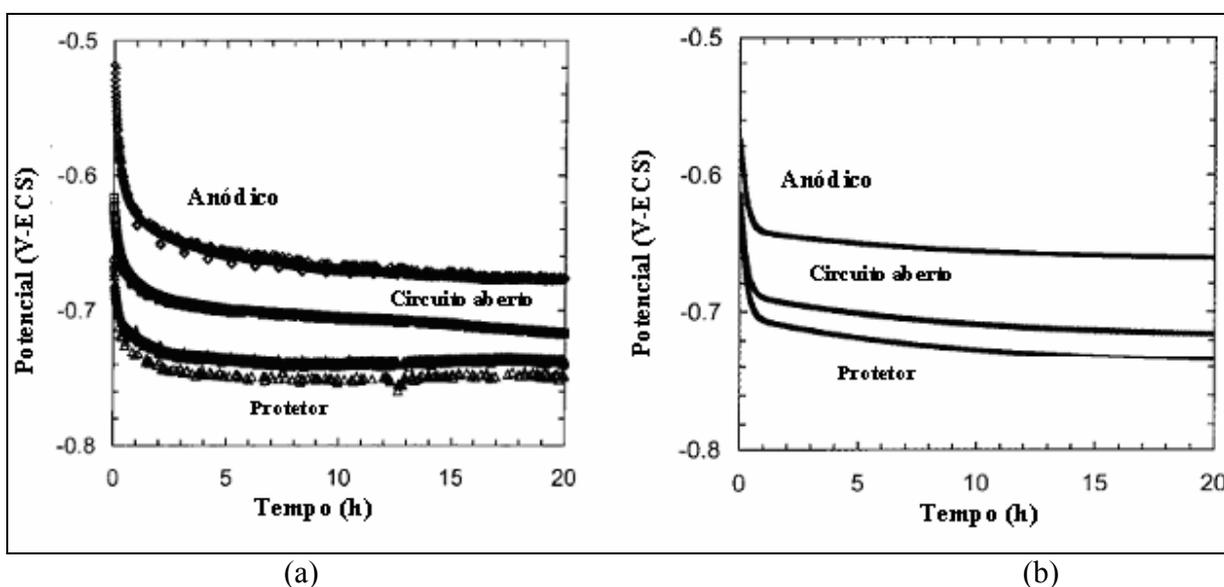


Gráfico 03 – Curvas de potencial *versus* tempo de dados experimentais (a) e modelada matematicamente (b) (Carson; Orazem, 1999)

Yan *et al.* (2008) avaliaram o E_{CORR} local do aço X70 a diferentes distâncias de uma fenda de 0,5 mm de diâmetro, imerso em uma solução de solo (extrato aquoso) borbulhada com 5% CO_2/N_2 . O Gráfico 04 mostra os resultados de E_{CORR} em relação ao tempo de ensaio, observa-se semelhanças com os resultados de Carson e Orazem (1999) no que diz respeito ao formato das curvas, pois apresentaram brusca diminuição do E_{CORR} nas primeiras horas de ensaio, seguida de um abrandamento no decorrer do ensaio.

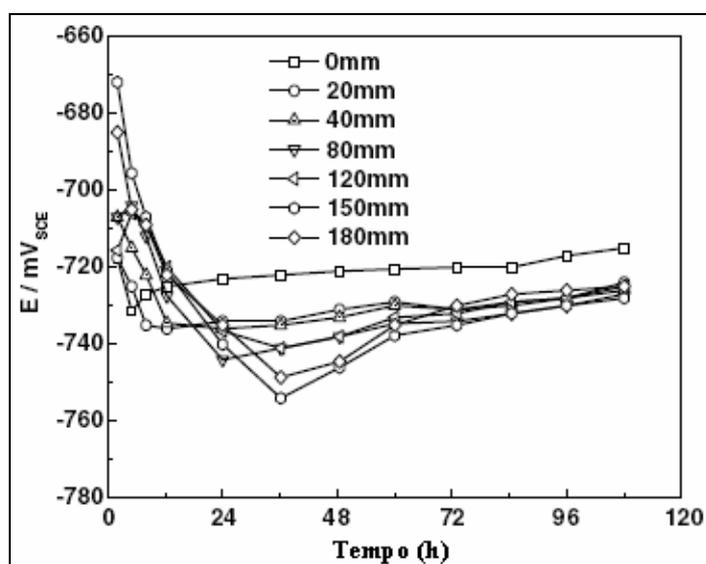


Gráfico 04 – Potencial de corrosão do aço em extrato aquoso de solo (Yan *et al.*, 2008)

3.5.2. Polarização

A polarização de um eletrodo é a alteração do E_{CORR} estabelecido através da dupla camada elétrica formada pela reação eletroquímica. Esta alteração pode ocorrer, por exemplo, pela imposição de um potencial externo (utilização de potenciostato), gerando deslocamento das reações catódica e anódica do equilíbrio e, a extensão da polarização em relação ao E_{CORR} é designada por sobretensão ou sobrepotencial (η) e calculada pela Eq. (04) (WOLYNEC, 2003).

$$\eta = E - E_{CORR} \quad (\text{Eq. 04}).$$

Onde:

E – Potencial resultante da polarização (mV vs. Eletrodo);

E_{CORR} – Potencial de corrosão ou potencial de equilíbrio (mV vs. Eletrodo).

Quando η for positivo tem-se uma polarização anódica e quando for negativo tem-se polarização catódica, sendo as sobretensões designadas por η_a (sobretensão anódica) e η_c (sobretensão catódica) (BARDAL, 2004).

O estudo da polarização está ligado ao da cinética eletroquímica, pois o fenômeno associado à intensidade de corrente elétrica no sistema está diretamente ligado à massa metálica corroída, assim como à taxa de corrosão por meio das leis de Faraday (DUTRA; NUNES, 1987).

Em um sistema, cuja taxa de reação é limitada pela sobretensão de ativação, a relação entre a densidade de corrente (I) e o potencial do eletrodo (E) é determinada pela equação geral da cinética de eletrodo (Eq. 05), chamada de equação de Butler-Volmer (BARD; FAULKNER, 2001).

$$I = I_{CORR} \cdot \left\{ \exp \left[\left(\frac{z \cdot F}{R \cdot T} \right) \cdot \alpha \cdot \eta \right] - \exp \left[- \left(\frac{z \cdot F}{R \cdot T} \right) \cdot (1 - \alpha) \cdot \eta \right] \right\} \quad (\text{Eq. 05}).$$

Onde:

I_{CORR} – Densidade de corrosão (corrente ou taxa de corrosão em A/cm²);

α – Fator de simetria (representação física da contribuição química e elétrica de um sistema eletroquímico, chamado de fator de simetria, que varia de 0 a 1);

F – Constante de Faraday (F);

R – Constante universal dos gases (8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹);

T – Temperatura do sistema (K);

z – Número de elétrons envolvidos na reação eletroquímica;

η – Sobrepotencial aplicada (mV).

Devido sua complexidade, esta equação não permite que η seja função de I , podendo ser simplificado para valores absolutos de sobretensão superiores a 30 mV (BARD e FAULKNER, 2001) ou 50 mV (BARD *et al.*, 2003).

Wolyneec (2003) deduz a equação de equação de Tafel (Eq. 06) partindo das seguintes considerações:

- Quando $\eta_a > 0,03$ V ou $\eta_a > 0,05$ V, o segundo termo do lado direito da Eq. 05 se torna desprezível em relação ao primeiro e a densidade de corrente (I) é substituída pela densidade de corrente anódica (I_a) dada em A/cm²; ou
- Quando $\eta_c < -0,03$ V ou $\eta_c < -0,05$ V, o primeiro termo do lado direito da Eq. (05) torna-se desprezível em relação ao segundo e a densidade de corrente (I) é substituída pela densidade de corrente catódica (I_c), que a mesma unidade da de I_c .

$$\eta = \beta \cdot \log \left(\frac{|I|}{I_{CORR}} \right) \quad (\text{Eq. 06}).$$

O Gráfico 05 mostra uma curva de polarização, representando E vs. $\log |I|$, sendo esta representação uma das mais utilizadas, tendo como vantagens: a validade da equação de Tafel na região reta das curvas; possibilidade de obtenção dos coeficientes de Tafel (β_a ou β_c) a partir das tangentes das inclinações das retas ($tg \gamma = \beta_c$ e $tg \theta = \beta_a$) e do valor da densidade de corrente de troca (I_{CORR}), que é o ponto de interceptação das retas com o eixo de $\log |I|$ passando pelo potencial de equilíbrio ou de corrosão (E_{CORR}), ou seja quando $\eta_c = 0$ tem-se que $\log |I| = \log |I_{CORR}|$ ($I = I_{CORR}$) (WOLYNEC, 2003).

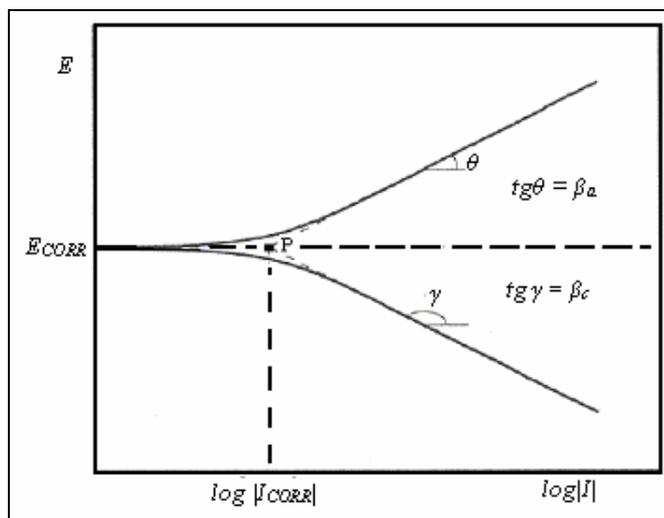


Gráfico 05 – Curva de polarização (Wolyneec, 2003)

As curvas de polarização podem ser levantadas com o auxílio de um equipamento denominado potenciostato empregando-se dois métodos convencionais: potenciostático e potenciodinâmico. No primeiro método, valores discretos crescentes ou decrescentes são aplicados ao potencial de eletrodo (E) e em cada potencial, determina-se o valor correspondente de ΔI . No segundo método, o potencial de eletrodo E é variado continuamente, registrando-se a variação de ΔI , que também varia continuamente, conforme ilustrado no Gráfico 06 e o declive da reta de variação do potencial do eletrodo representa a velocidade de varredura, podendo ser expressa em mV/min ou mV/s (WOLYNEC, 2003).

Oliveira (2007) realizou medidas de polarização do aço AISI 1020 em cinco extratos aquosos obtidos a partir de cinco solos diferentes com velocidade de varredura de 0,333 mV/s (20mV/min, aproximadamente) e em condições naturais de aeração. As medidas foram realizadas em dois momentos: 3 a 4 horas de imersão (indicadas por “A”) e 160 horas de imersão (indicadas por “B”) do eletrodo de trabalho (ET) no extrato aquoso e o eletrodo de referência (ER) utilizado foi o de calomelano saturado (ECS). As curvas de polarização de uma das amostras de solo são mostradas no Gráfico 07.

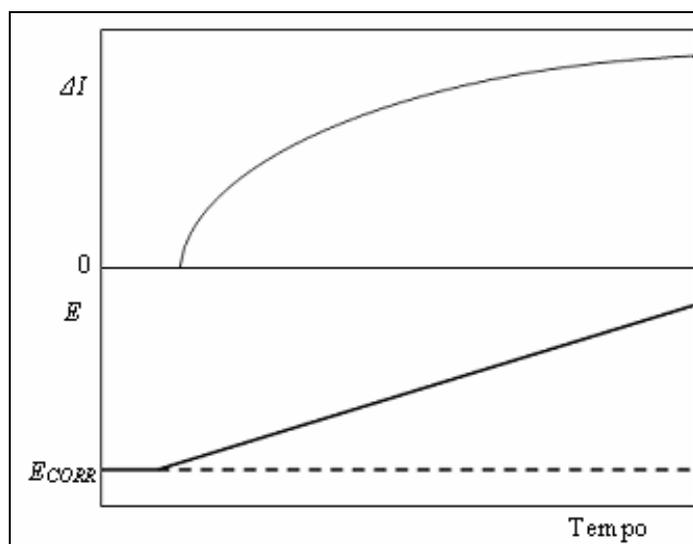


Gráfico 06 – Método potenciodinâmico para obtenção de uma curva de polarização (Wolyneç, 2003)

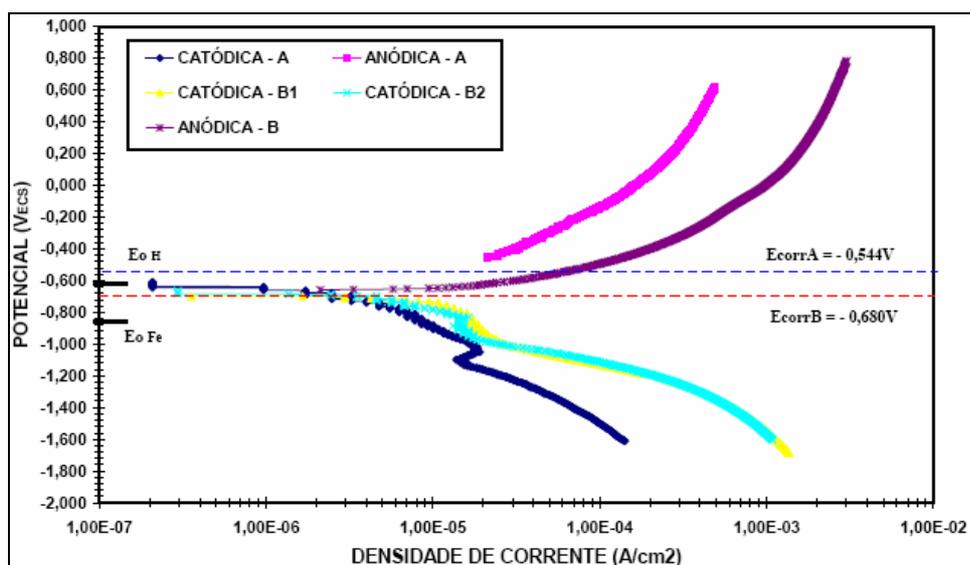


Gráfico 07 – Curvas de polarização do extrato aquoso de solo (Oliveira, 2007)

Observou-se que nas curvas de polarização do aço AISI 1020 nos extratos aquosos não apresentaram domínio de passivação em uma faixa próxima a 1000mV-ECS de polarização anódica, constatando dissolução ativa em todos os meios. Além disto, verificou-se um decaimento por volta de -950 mV vs. ECS nas curvas catódicas “B”, indicando estabilização da corrente e o fenômeno da redução do oxigênio gasoso em água e, logo após, as curvas catódicas “A” e “B” se sobrepõem na maioria dos casos, iniciando a redução dos íons H^+ em hidrogênio.

Este mesmo fenômeno ocorre com as curvas catódicas “A”, mas com decaimento de potencial um pouco abaixo de -950 mV vs. ECS (IBIDEM, 2007).

Ferreira (2005) utilizou a técnica de polarização na avaliação da corrosividade de 15 amostras de solos da Antártida e de 15 amostras de solo região Sudeste do Brasil e delas preparou extratos aquosos para utilizar como eletrólito. Nos extratos aquosos preparados com as amostras de solos brasileiros utilizou-se um ET do aço API X60 e nas amostras de solos da Antártida utilizou-se o aço ASTM A-131 grau A, além da utilização de um ECS como ER. Então, após a realização dos ensaios, notaram-se semelhanças entre as curvas de polarização para eletrólitos aerados e não-aerados de ambas as regiões estudadas, verificando-se algumas diferenças nas curvas de polarização dos solos brasileiros, possivelmente pela ação de íons cloreto e baixa resistividade. Os Gráficos 08.a e 08.b mostram uma das curvas de polarização obtidas por este autor.

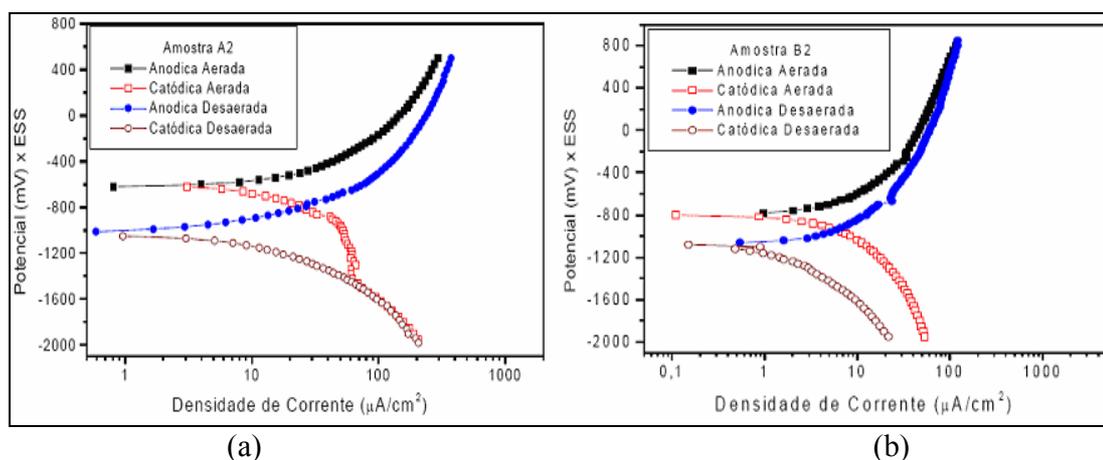


Gráfico 08 – Curva de polarização em extrato aquoso de solo da Antártida (a) e do em extrato aquoso de solo do Brasil (b) (Ferreira, 2005)

3.5.3. Corrente de Corrosão e Resistência de Polarização

No ponto P , mostrado no Gráfico 05, tem-se o E_{CORR} e a I_{CORR} que são obtidos a partir da extrapolação das retas dadas pela equação de Tafel, sendo a base para o método de extrapolação de Tafel, que é utilizado na determinação da taxa de corrosão (TC), além da utilização para determinar os parâmetros β_a e β_c da equação de Tafel a partir da inclinação das retas, conforme mostrado anteriormente (BARDAL, 2004; WOLYNEC, 2003).

Stern e Geary (1957) propuseram uma equação (Eq. 07) para calcular a corrente de corrosão (I_{CORR}) a partir das curvas de polarização:

$$I_{CORR} = \frac{\beta_a \cdot |\beta_c|}{2,303 \cdot (\beta_a + |\beta_c|)} \cdot \frac{1}{R_p} \quad (\text{Eq. 07})$$

Pode-se notar que a I_{CORR} (também pode ser chamada de taxa de corrosão - TC) é função dos parâmetros de Tafel e de um termo chamado de resistência de polarização (R_p), sendo este método chamado de polarização linear.

Wolyneec (2003) mostra como R_p é determinado e cita que no método de polarização linear não é necessário aplicar potenciais muito afastados do E_{CORR} , sendo que valores de $|\Delta E|$ iguais ou inferiores a 50 mV são suficientes. Assim, o sistema ensaiado sofre menos perturbação, pois as correntes envolvidas são bem menores e os problemas de queda ôhmica não são acentuados.

3.5.4. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Segundo Bard e Faulkner (2001), a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) é um método conveniente e eficiente de avaliação das propriedades e desempenho de sistemas eletroquímicos e de recobrimento de metais. A impedância de corrente alternada (CA) de uma célula eletroquímica pode ser determinada pela aplicação de um sinal de voltagem senoidal (E) com certa velocidade angular (ω) e a medida do fluxo de corrente (I) correspondente através da célula. A razão entre E e I é a impedância (Z) na frequência escolhida, de acordo com a lei de Ohm (Eq. 08):

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{E_0 \cdot \text{sen}(\varpi \cdot t)}{I_0 \cdot \text{sen}(\varpi \cdot t - \phi)} \quad (\text{Eq. 08}),$$

Onde:

ω – Velocidade angular $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

f – Frequência de oscilação da corrente alternada (Hz);

ϕ – Ângulo de fase ($^\circ$) (defasagem da corrente com o respectivo potencial);

E_0 – Módulo do potencial (mV);

I_0 – Módulo da corrente (A).

O Gráfico 09 mostra a defasagem entre E e I .

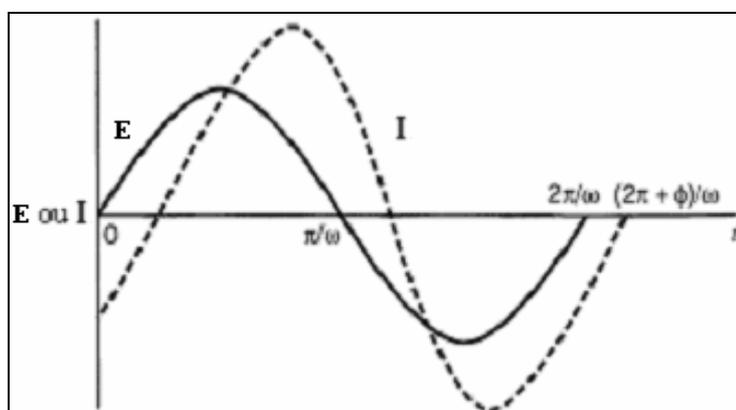


Gráfico 09 – Relação corrente-voltagem na frequência ω (Bard; Faulkner, 2001)

A impedância (Z) é dada por um número complexo com uma componente real (Z_{REAL}) e outra imaginária (Z_{IM}):

$$Z = Z_{REAL} - j \cdot Z_{IM} \quad (\text{Eq. 09}).$$

Onde $j = \sqrt{-1}$.

Kelly *et al.* (2003) fazem considerações a respeito do espectro (domínio de frequência) utilizado nos ensaios de EIE no estudo de processos corrosivos em sistemas conhecidos.

Quando comparada a outras técnicas eletroquímicas de avaliação da corrosão, a EIE apresenta vantagens como (BARD *et al.*, 2003):

- Dar informações a respeito da cinética dos processos corrosivos. O uso de sinais de CA permite a separação entre as resistências de transferência de carga da cobertura (filme de algum óxido ou orgânico) e da solução. Nas curvas de polarização apenas a resistência de polarização é medida. A possibilidade da separação de cada componente é importante, particularmente em sistemas altamente resistivos;
- Dar informações sobre o mecanismo da reação a partir do uso de circuitos equivalentes, que são circuitos eletrônicos cuja resposta é idêntica à célula em estudo;
- Prover informações sobre as propriedades da camada de recobrimento (resistência e capacitância), pois mudanças nessas propriedades estão associadas com a perda das propriedades protetoras da cobertura;
- A técnica é não-destrutiva, em contraste com as curvas de polarização em corrente contínua (CC) e dá informações instantâneas sobre o sistema.

As grandes desvantagens da técnica de EIE são: a dificuldade de interpretar o espectro em sistema desconhecido e a necessidade de controlar a área sob ataque, uma vez que todos os valores determinados são afetados pela extensão da superfície (IBIDEM, 2003).

Para a análise da EIE através de circuitos equivalentes é necessário conhecer seus componentes, conforme mostrado no Quadro 01.

Quadro 01 – Elementos de circuito equivalente e suas impedâncias

ELEMENTO DE CIRCUITO	REPRESENTAÇÃO	EQUAÇÃO DE IMPEDÂNCIA
Resistor		$Z = R - 0 \cdot j$
Capacitor		$Z = 0 - \frac{j}{\omega \cdot C}$
Indutor		$Z = 0 + j \cdot \omega \cdot L$

Fonte: Princeton Applied Research (200-)

O circuito equivalente de Randles (célula de Randles) é um dos modelos eletroquímicos de interface e ajusta muitos sistemas eletroquímicos, sendo a impedância dada pelas Eqs. (10) ou (11) e representado na Figura 01.

$$Z = Z_{REAL} - j \cdot Z_{IM} = R_S + \frac{R_p}{1 + j \cdot \omega \cdot R_p \cdot C_{DC}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$Z = R_S + \frac{R_p}{1 + \omega^2 \cdot R_p^2 \cdot C_{DC}^2} - \frac{j \cdot \omega \cdot C_{DC} \cdot R_p^2}{1 + \omega^2 \cdot R_p^2 \cdot C_{DC}^2} \quad (\text{Eq. 11}).$$

Onde R_S é a resistência da solução entre ET e ER; R_p é a resistência de polarização ou de transferência de carga na interface eletrodo-solução e; C_{DC} é a capacitância da dupla camada elétrica da interface, sendo um indicador do grau de formação do filme ou de integridade de um revestimento orgânico em alguns sistemas (WOLYNEC, 2003).

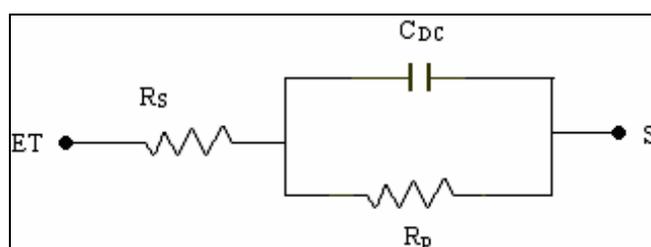


Figura 01 – Circuito equivalente de Randles (Bard *et al.*, 2003)

A análise dos resultados experimentais pode ser feita de várias formas, destacando-se o diagrama de Nyquist.

No diagrama de Nyquist (Gráfico 10), os valores experimentais são plotados em um gráfico de $-Z_{IM}$ vs. Z_{REAL} , representados por um semi-círculo de raio $0,5 \cdot R_p$ com centro em $R_s + 0,5 \cdot R_p$. Os pontos correspondentes aos baixos valores de frequência angular (ω) estão do lado direito do semi-círculo e quando $\omega = 0$, $Z_{REAL} = R_s + R_p$. Conforme ω cresce tendo ao infinito, os pontos deslocam para a esquerda e voltam a se aproximar do eixo Z_{real} no ponto indicado por R_s

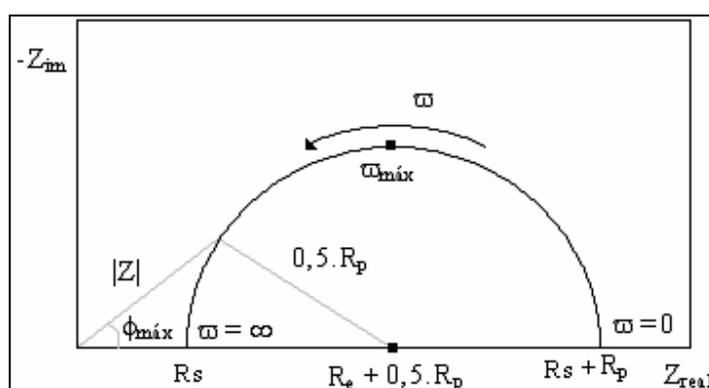


Gráfico 10 – Diagrama de Nyquist do circuito equivalente de Randles (Wolyneec, 2003)

Na modelagem de processos corrosivos pela de EIE, os capacitores ideais podem ser substituídos por um elemento de fase constante (EFC ou CPE, em inglês). Eles representam capacitores não-ideais com o objetivo compensarem a heterogeneidade no sistema. A impedância deste elemento é dada pela Eq. (12). Quando esta equação descreve um capacitor, a constante Y^o é igual a C (capacitância) e o expoente α é igual à unidade e para um EFC, “ α ” é menor que a unidade (GAMRY INSTRUMENTS, 2007; PAOLINELLI; PÉREZ; SIMISON, 2008).

$$Z_{EFC} = \frac{1}{\left[Y^o \cdot (j \cdot \omega)^\alpha \right]} \quad (\text{Eq. 12}).$$

Onde:

Z_{EFC} – Impedância do EFC ($\Omega \cdot \text{cm}^2$);

Y^0 – Admitância ou inverso da capacitância (C^{-1}) ($\mu\text{S} \cdot \text{s}^\alpha$)

A Figura 02 mostra o circuito equivalente contendo um EFC.

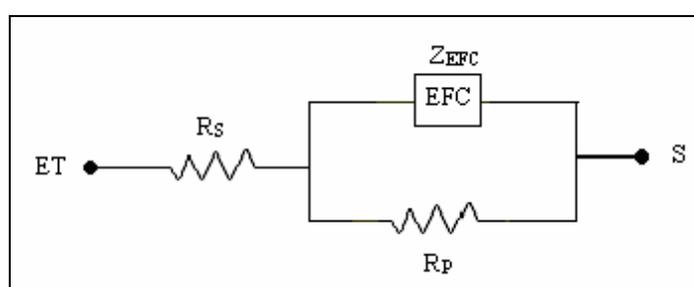


Figura 02 – Circuito equivalente com EFC (Gamry Instruments, 2007)

Muitas teorias foram propostas para explicar o comportamento não-ideal da dupla camada, mas nenhuma foi universalmente aceita. No entanto, em muitos casos, o parâmetro “ α ” pode ser tratado como uma constante empírica que fornece resultados satisfatórios, sem haver preocupações com sua interpretação física. O circuito equivalente com um EFC é o circuito de Randles com um capacitor não-ideal (GAMRY INSTRUMENTS, 2007).

Oliveira (2007) utilizou a técnica de EIE para avaliar a corrosividade de cinco solos a partir de seus extratos aquosos. Seus ensaios foram realizados com eletrodos virtuais e ECS e as medidas de EIE foram feitas em intervalos de 24 horas. O Gráfico 11 mostra os diagramas de Nyquist dos valores de impedância com diferentes ER em intervalos de, aproximadamente, 24 horas, para aço em extrato aquoso de uma das amostras de solo utilizadas em seu estudo. Observando-se os diagramas de Nyquist quando se utiliza o ER “Hp_Virt” (HP Virtual), notou-se uma diminuição da R_s com o tempo, que com 2 horas de ensaio era de, aproximadamente, $4750 \Omega \cdot \text{cm}^2$, passando para 3500, 1700 e $1200 \Omega \cdot \text{cm}^2$ após 21,5, 47 e 72 horas, respectivamente. Além disso, a R_p também diminuiu, pois com 2 horas de ensaio estava em torno de $3000 \Omega \cdot \text{cm}^2$ passando para

1500 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, aproximadamente. As diminuições de R_S e R_P com o tempo foram constatadas quando se utilizaram outros tipos de ER.

Pernice *et al.* (1990) realizaram medidas de EIE em relação ao tempo para estudar a corrosão do aço e determinar a sua taxa em solos arenosos e argilosos com 15% de umidade. O Gráfico 12 mostra os dados obtidos para aço em solo argiloso com 15% de umidade, onde se observou diminuição do arco capacitivo com o tempo sem alteração da R_S , podendo-se afirmar que houve diminuição da R_P de 8000 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ no início do ensaio para 3000 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ após 145 h.

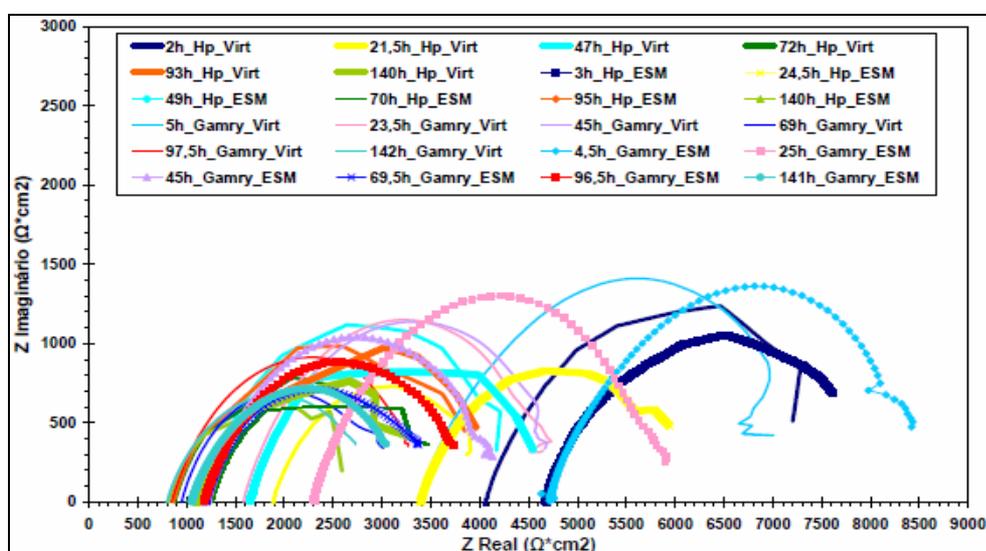


Gráfico 11 – Diagramas de Nyquist na corrosão pelo solo (Oliveira, 2007)

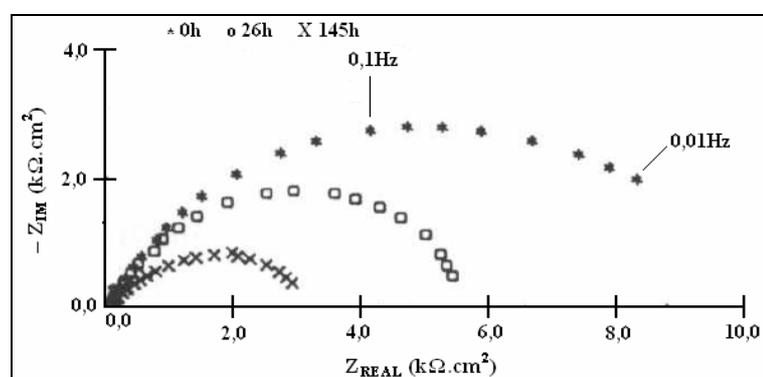


Gráfico 12 – Diagramas de Nyquist (Pernice *et al.*, 1990)

Arpaia *et al.* (1990) realizaram um trabalho semelhante ao de Pernice *et al.* (1990) utilizando solo argiloso com 15% de umidade, porém diferentemente destes, aqueles realizaram medidas de EIE para avaliar o mecanismo cinético da corrosão do aço neste meio em longos períodos de exposição e, nesta avaliação, utilizaram o circuito elétrico equivalente com impedância de Warburg para determinar os parâmetros do sistema eletroquímico a partir da comparação dos dados experimentais com os calculados pelo circuito equivalente. Os Gráficos 13.a e 13.b mostram a comparação entre os dados experimentais e os calculados para 26 h e 1150 h de imersão no meio corrosivo.

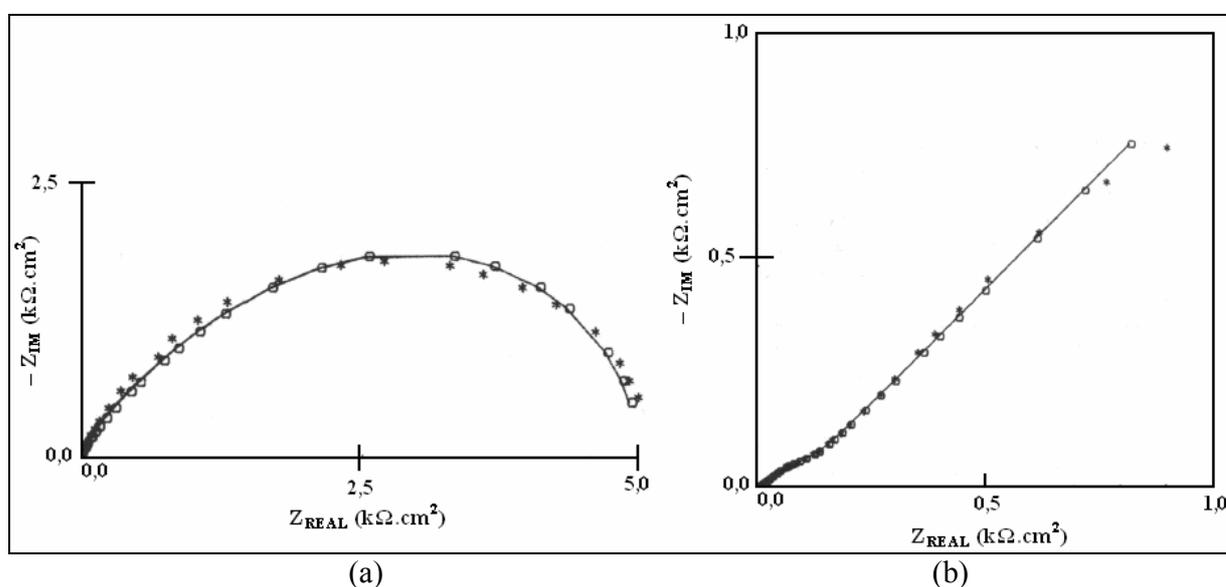


Gráfico 13 – Diagramas de Nyquist após 26h (a) e 1150h (b) de imersão do aço em solo argiloso com 15% de umidade (Arpaia *et al.*, 1990)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

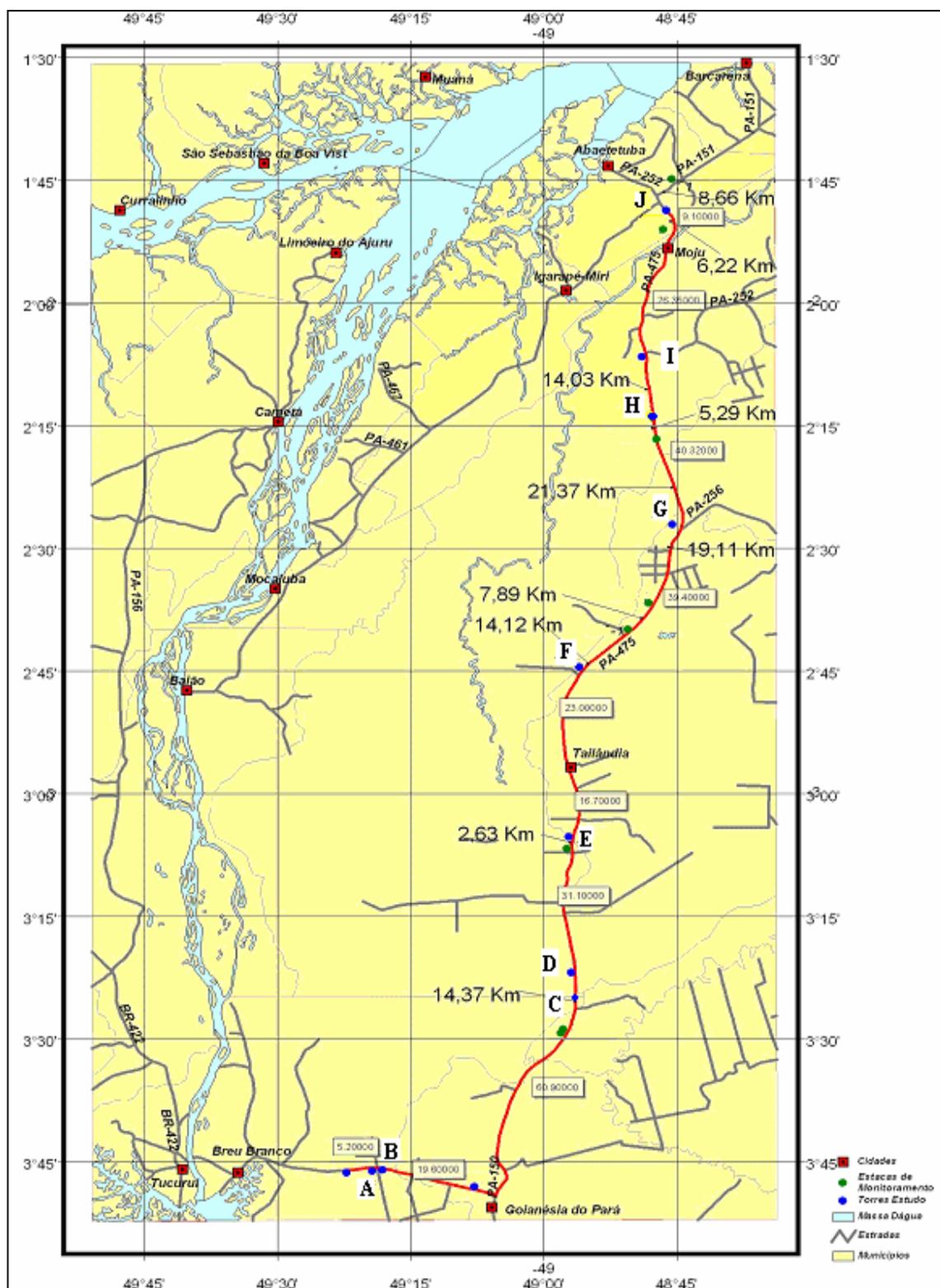
O Apêndice A mostra um fluxograma dos materiais e métodos empregados nesta dissertação com o objetivo de se ter uma visão geral da avaliação da corrosividade dos solos.

4.1. DEFINIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS TORRES

O estudo para a definição das torres a serem visitadas foi baseado em informações fornecidas pela empresa TBE (Transportadoras Brasileiras de Energia) como: relatório técnico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) originado de um trabalho encomendado pela TBE, dados sobre a resistividade do solo, parâmetros de localização geográfica das torres e a presença de testemunhos, de maneira a se ter parâmetros representativos do trecho da linha de transmissão Tucuruí - Vila do Conde, localizada no Estado do Pará.

As torres selecionadas foram aquelas cujo solo apresentou: menor resistividade elétrica (A, B, D, E, F, G e I); tendência à corrosão pelo potencial redox (J) e; testemunhos de menores comprimentos e localização geográfica das torres (C e H). Estas torres foram identificadas e suas localizações são dadas no Mapa 04, que foi desenvolvido pelo Grupo de Análise Experimental de Estruturas e Materiais (GAEMA) da Faculdade de Engenharia Civil da UFPA (FEC – UFPA) utilizando o software Arcview 3.2, uma base cartográfica elaborada pelo IBGE e as coordenadas geográficas das torres fornecidas pela TBE.

Nas dez torres selecionadas (identificadas de A a J) foi realizado o monitoramento da corrosão causada pelo solo em suas estruturas enterradas (estacas metálicas helicoidais). Este monitoramento foi feito empregando-se procedimentos em campo: medida da resistividade elétrica do solo; do potencial redox; do potencial estrutura-solo e; coleta de amostras de solo, assim como procedimentos em laboratório: determinação do teor umidade; preparo dos extratos aquosos; ensaios de caracterização para determinação do índice de Steinrath; confecção do corpo-de-prova do aço USI SAC 300 e; ensaios eletroquímicos. A partir destes procedimentos foi possível avaliar a corrosividade do solo próximo àquelas torres.



Mapa 04 – Mapa da linha de transmissão mostrando as torres selecionadas (TBE, 2007)

4.2. PROCEDIMENTOS EM CAMPO

4.2.1. Medida da Resistividade Elétrica do Solo

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). Esta medida foi realizada a uma distância de 5 m da estaca metálica que dá sustentação ao tipo de torre visita no trabalho (torre estaiada). Utilizou-se um terrômetro da marca Megabrás, modelo MTD20Kwe. Este método consistiu na cravação de quatro estacas de cobre, a certa profundidade de penetração no solo (p), bem alinhadas e com separação constante “ a ” (Figura 03). O terrômetro forneceu a resistência elétrica do solo (R) em ohms (Ω). Assim, com estes valores e os de “ a ” e “ p ”, calculou-se a resistividade elétrica pela Eq. (02).

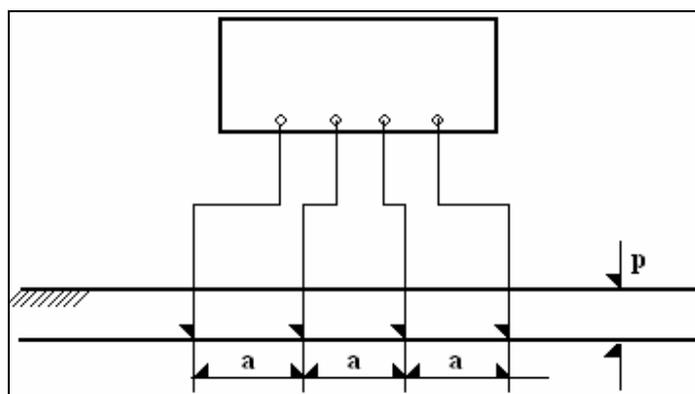


Figura 03 – Medida da resistividade do solo pelo método de Wenner (Gomes, 1990)

$$\rho_{campo} = \frac{4\pi \cdot R \cdot a}{\left\{ 1 + \left[\frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} \right] - \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + p^2}} \right] \right\}} \quad (\text{Eq. 02}),$$

Os valores de “ a ” utilizados foram 1, 2 e 3m e, para cada distância, calculou-se o valor de ρ_{campo} (k Ω .cm), tomando-se a média entre as três distâncias, conforme a Eq. (13):

$$\bar{\rho}_{\text{campo } i} = \frac{\rho_{\text{campo } i1} + \rho_{\text{campo } i2} + \rho_{\text{campo } i3}}{3} \quad (\text{Eq. 13}).$$

Onde:

$\bar{\rho}_{\text{campo } i}$ – Resistividade média do solo da torre “i” nas três distâncias;

$\rho_{\text{campo } i1}$ – Resistividade do solo da torre “i” a 1 metro;

$\rho_{\text{campo } i2}$ – Resistividade do solo da torre “i” a 2 metros;

$\rho_{\text{campo } i3}$ – resistividade do solo da torre “i” a 3 metros.

4.2.2. Medida de Potencial Redox

Para medir o potencial redox (E_H) empregaram-se metodologias adotadas por Ferreira (2005) e Brasil *et al.* (2007) e utilizou-se um multímetro da marca Minipa modelo ET-2702, um eletrodo de cobre-sulfato de cobre (ECSC) como eletrodo de referência (ER) e uma lâmina de platina como eletrodo de trabalho (ET).

A medição do E_H consistiu na determinação do potencial do CE enterrado no local de medição contra o ECSC. Esta medição foi feita em um raio de 2 m do local onde a estaca metálica helicoidal estava enterrada. O valor do potencial encontrado foi corrigido para o eletrodo padrão de hidrogênio (EPH).

A Eq. (14) foi utilizada para calcular o valor do potencial redox:

$$E_H = E_p + E_r + 60.(pH - 7) \quad (\text{Eq. 14}).$$

Onde:

E_H – Potencial redox em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio (mV vs. EPH);

E_p – Potencial medido experimentalmente em relação ao ECSC (mV vs. ECSC);

E_r – Potencial do ECSC igual a 340,2 mV vs. EPH;

pH – pH da suspensão solo-água (1:2,5).

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

4.2.3. Medida de Potencial Estrutura-Solo

Para fazer a medida do potencial estrutura-solo (E_{ES}) empregou-se metodologia semelhante à adotada por Ferreira (2005) e utilizaram-se um multímetro da marca Minipa modelo ET-2702 e um ECSC como referência. O terminal positivo do multímetro foi ligado à estaca metálica helicoidal e o negativo ao ECSC, que foi introduzido no solo após a retirada da vegetação superficial e a uma distância de 50 cm da estaca metálica helicoidal. Esperou-se a estabilização do potencial e anotou-se o seu valor.

4.2.4. Coleta de Amostras do Solo

As amostras foram coletadas em um mês do verão amazônico (junho de 2008). A coleta e preservação das amostras de solo basearam-se em metodologia adotada por Ferreira (2005). As amostras de solo foram coletadas em a um raio máximo de 1 m da estaca metálica helicoidal, à profundidade de 0,5 a 1 m com o auxílio de um trado em quantidades de 1 kg, aproximadamente. Após, colocou-se a amostra em saco plástico estanque, vedou-o com fita adesiva, identificou-se e levou-se ao laboratório.

Tomou-se o cuidado na vedação do saco plástico estanque para evitar a perda de umidade da amostra durante o transporte do campo ao laboratório. Este transporte foi feito em prazos inferiores há 48 horas e quando isto não foi possível, a amostra ficou protegida de calor excessivo com a finalidade de retardar possíveis reações químicas e biológicas.

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.

4.3. PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

4.3.1. 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, 2007, p. 33) baseando-se na secagem de solo descrita por Ferreira (2005) dentro do procedimento para preparação de extrato aquoso. Utilizaram-se duas (2) placas de petri para cada amostra de solo, balança de precisão da marca Gehaka modelo AG200 e uma estufa (marca SOC. FABBE) a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Primeiramente tarou-se a balança, em seguida pesou-se a placa de petri, anotou-se sua massa (M_1) e tarou-se a balança novamente. Logo após, pesou-se cerca de 50 g de amostra de solo sobre a placa de petri e anotou-se sua massa (massa de solo úmido ou M_2). Após estas duas pesagens, a amostra de solo foi colocada em estufa à temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Após este período, pesou-se o conjunto placa de petri mais solo seco e anotou-se sua massa (M_3).

De posse destas massas, utilizou-se a Eq. (15) para o cálculo do teor de umidade (U_{SOLO}).

$$U_{SOLO} = \frac{[M_2 - (M_3 - M_1)]}{M_2} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 15}).$$

Este procedimento foi realizado em duplicata para cada uma das amostras de solo. A umidade média é calculada pela Eq. (16).

$$\bar{U}_{SOLO i} = \frac{U_{SOLO i1} + U_{SOLO i2}}{2} \quad (\text{Eq. 16}).$$

Onde:

$\bar{U}_{\text{solo } i}$ – Teor de umidade média da amostra de solo da torre “i” (%);

$U_{\text{solo } i1}$ – Teor de umidade da primeira alíquota da amostra de solo da torre “i” (%);

$U_{\text{solo } i2}$ – Teor de umidade da segunda alíquota da amostra de solo da torre “i” (%).

4.3.2. Procedimento de Preparação do Extrato Aquoso

4.3.2.1. Secagem, Desagregação e Peneiramento

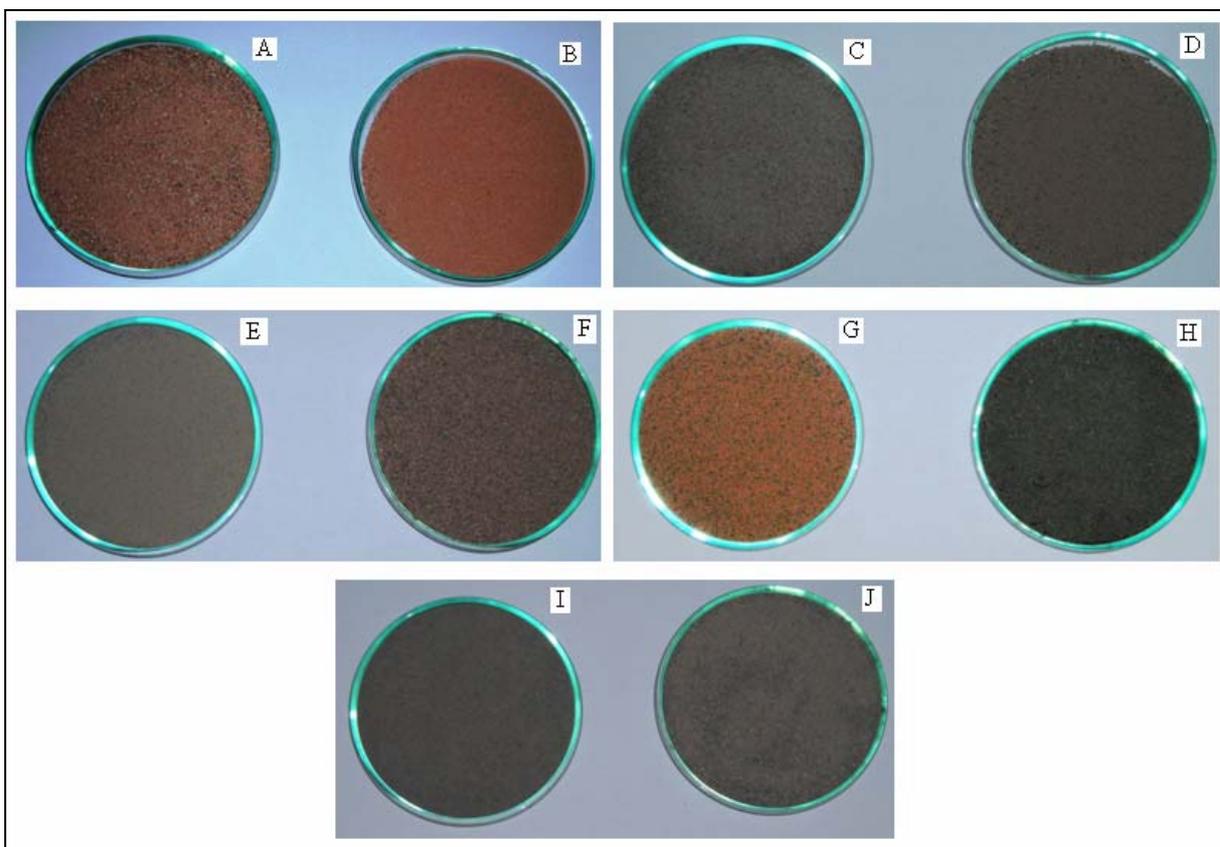
O procedimento de preparação do extrato aquoso baseou-se em metodologias adotadas por Ferreira (2005), Loureiro *et al.* (2006), Silva *et al.* (2006) e Brasil *et al.* (2007).

Cada uma das amostras de solo *in natura* foi colocada em bandejas metálicas e, em seguida, secas a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas em estufa.

Após este período, as amostras secas foram deixadas para esfriar a temperatura ambiente e desagregadas.

Após a desagregação, as amostras foram peneiradas, utilizando nesta operação uma peneira Tyler com abertura de 0,84 mm (mesh #20). O material retido foi colocado em sacos plásticos e estocado, enquanto o material passante foi armazenado, conforme a quantidade produzida, para ser utilizado na preparação dos extratos aquosos.

A Fotografia 02 mostra cada uma das amostras de solo em placas de petri após secagem, britagem, moagem e peneiramento, podendo-se observar diferenças de coloração entre elas.



Fotografia 02 – Amostras de solo secas, desagregadas e peneiradas

4.3.2.2. Preparação do Extrato Aquoso

Após as operações descritas no item 4.3.2.1, utilizou-se o material passante (solo com granulometria menor ou igual a 0,84 mm) para preparar uma solução chamada de extrato aquoso. Para preparar o extrato aquoso, pesou-se 240 g da amostra de solo em uma balança analítica da marca Gehaka modelo AG200 e colocou-se em um becker de 1000 mL. Adicionou-se 600 mL de água destilada; homogeneizou-se a mistura solo-água (1:2,5) com o auxílio de um bastão de vidro 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, que 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. A quantidade de extrato aquoso obtida foi de, aproximadamente, 500 mL para cada amostra de solo.

4.3.3. Determinação do pH do Solo

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 da marca WTW, modelo pH 330i, baseando-se na metodologia adotada por Loureiro *et al.* (2006) e Brasil *et al.* (2007).

4.3.4. Determinação da Resistividade Elétrica do Extrato Aquoso

A resistividade elétrica do extrato aquoso (ρ_{EA}) foi determinada pelo inverso da condutividade elétrica (κ), que foi medida empregando-se um condutivímetro de bancada da marca QUIMIS, modelo Q-405M2 e calculada pela Eq. (17).

$$\rho_{EA} = 1/\kappa \quad (\text{Eq. 17}).$$

Onde:

ρ_{EA} – Resistividade elétrica do extrato aquoso ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$);

κ – Condutividade elétrica do extrato aquoso ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

A determinação de ρ_{EA} a partir de κ obtida em laboratório teve como finalidade a comparação e discussão envolvendo resistividade do solo em campo (ρ_{campo}) e ρ_{EA} .

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

Os ensaios para determinação da concentração de cloreto e sulfato foram realizados pelo Laboratório de Processos Ambientais da Faculdade de Engenharia Química (UFPA).

Um procedimento de remoção da cor foi necessário para algumas amostras, pois estavam muito turvas. Para isto, adicionou-se 3 mL de hidróxido de alumínio ($\text{Al}[\text{OH}]_3$) para cada 100 mL de extrato aquoso, agitando-se esta mistura vigorosamente por alguns minutos, deixou-a decantar por 24 horas e, após este período, a suspensão foi filtrada a vácuo.

Para a determinação da concentração de íons cloreto (Cl^-) utilizou-se a volumetria de precipitação através do método Argentométrico (Método de Mohr), conforme o AWWA – APHA – WPCI (1995).

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

4.3.6. Determinação do Índice de Steinrath

Para a avaliação qualitativa da corrosividade do solo, utilizou-se o índice de Steinrath. Este índice de corrosividade é baseado em sete (7) parâmetros ou características físico-químicas do solo que são: resistividade elétrica (ρ), potencial redox (E_H), potencial hidrogeniônico (pH), umidade (U_{solo}), além da concentração dos íons cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) e sulfeto (S^{2-}). Para cada uma destas propriedades atribui-se um índice parcial e o somatório destes fornecem o índice de Steinrath. As Tabelas 08 e 09 são mostradas novamente.

Tabela 08 – Parâmetros relacionados por Steinrath para avaliação da corrosividade do solo

PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL	PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
ρ ($k\Omega.cm$)		<i>Sulfato (ppm)</i>	
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		
		<i>Sulfeto (ppm)</i>	
		Ausente	0
E_H (mV vs. 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	<i>Cloreto (ppm)</i>	
Igual a 0	-4	Menor que 100	0
		De 100 a 1000	-1
		Maior que 1000	-4
pH			
Maior que 5	0	<i>Umidade (%)</i>	
Menor que 5	-1	Menor que 20	0
		Maior que 20	-1

Fonte: Trabaneli (1972)

Tabela 09 – 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: Trabaneli (1972)

4.3.7. Ensaios Eletroquímicos

Para a realização dos ensaios eletroquímicos foi necessário preparar um corpo-de-prova e após seu preparo foi possível avaliar a corrosividade de maneira quantitativa através dos ensaios eletroquímicos.

4.3.7.1. Preparo do Corpo-de-Prova de Aço USI SAC 300

O corpo-de-prova (CP) utilizado nos ensaios eletroquímicos foi obtido a partir de uma placa do aço USI SAC 300. Esta placa foi cortada, obtendo-se pequenos cupons com dimensões: 4 cm de comprimento, 2 cm de largura e 0,6 cm de espessura.

A composição química do aço USI SAC 300 (Tabela 12) foi realizada pelo Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará em um espectrômetro de Emissão óptica *Shimadzu* modelo *PDA7000*.

Tabela 12 – Composição química do aço USI SAC 300

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	0,39	V	0,024
S	0,114	Ti	0,044
Ni	0,196	Fe	81,083

Um dos cupons obtidos foi pré-tratado para embutimento e consistiu em retirada de rebarbas metálicas deixadas pelo processo de corte; lixamento com a utilização de lixas de granulometria *mesh #80*, passando pelas lixas de *mesh #120, #240, #320, #400, #600 e #1000*. Este processo foi feito em todas as superfícies do cupom até que não apresentassem arranhões, em seguida lavou-o

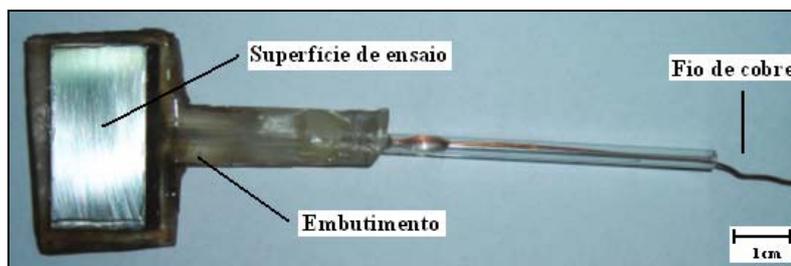
com água destilada e poliram-se suas superfícies com alumina. Após o polimento, lavou-o com água destilada e álcool etílico (95%) para desengraxe (retirada de gordura), colocou-o para secar e passou-se para o embutimento.

Antes de fazer o embutimento em resina epóxi, fez-se o contato elétrico entre o aço e um fio de cobre, utilizando para isso uma solda e colocando-se um tubo de vidro de pequeno diâmetro para cobrir o fio de cobre. Em seguida, embutiu-se o cupom com resina epóxi utilizando-se uma forma, deixando livre uma de suas superfícies, enquanto as demais ficaram embutidas e esperou-se 24 horas. O cupom embutido com o fio de cobre e tubo de vidro foi chamado de CP que tinha 6 cm^2 de superfície ativa (área sem resina).

A superfície ativa foi lixada com as lixas de granulometrias de mesh #240, #320, #360, #400, #600 e #1000. Em seguida, limpou-se com algodão e água destilada; poliu-se com alumina; desengraxou-se com álcool etílico; secou-a e na região entre o aço e a resina passou-se uma base esmalte, deixando-a secar e procedeu-se aos ensaios eletroquímicos.

O processo de lixamento e passagem de base esmalte descrito acima foram realizados no primeiro preparo do corpo-de-prova e sempre repetido quando o extrato aquoso utilizado para realizar os ensaios eletroquímicos era trocado.

O CP pronto para o ensaio eletroquímico foi chamado de eletrodo de trabalho (ET) da célula eletroquímica (ou célula de corrosão) (Fotografia 03).

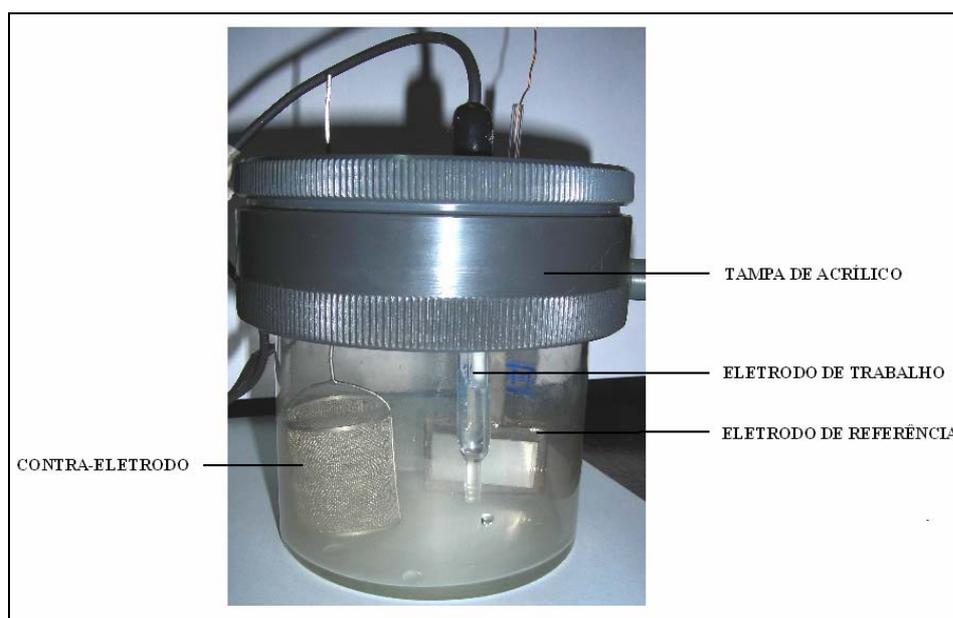


Fotografia 03 – Corpo-de-prova ou Eletrodo de trabalho

4.3.7.2 Execução dos Ensaios Eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos realizados foram: monitoramento do potencial de corrosão, espectroscopia de impedância eletroquímica e polarização potenciodinâmica com ET para cada amostra de extrato aquoso (solução ou eletrólito) dos solos coletados ao longo da LT Tucuruí – Vila do Conde, a fim de avaliar, de maneira quantitativa, a corrosividade dos mesmos.

A célula eletroquímica consistiu de uma cuba eletroquímica de 500 mL, uma tampa de acrílico com aberturas circulares, eletrodo de calomelano saturado (ECS) como referência (ER), eletrodo de trabalho (ET), uma rede de platina como contra-eletrodo (CE), o extrato aquoso da amostra de solo a ser analisada como eletrólito (solução) (Fotografia 04).



Fotografia 04 – Célula eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos

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

O monitoramento do PC foi feito durante 7200 s (120 min) com leituras a cada 2 s.

A EIE foi realizada em duplicata após 2 horas de imersão do CP nos extratos aquosos das amostras de solo. A faixa de frequência variou de 1000 a 0,03 Hz com voltagem (em corrente alternada) de 5 mV e 10 pontos por década. Os dados experimentais foram analisados (simulados) através do circuito equivalente com um elemento de fase constante (EFC) (Figura 03), onde R_{EA} é a resistência do extrato aquoso.

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

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um resumo dos objetivos e resultados desta dissertação são mostrados no Quadro 02.

Quadro 02 – Modo de apresentação dos resultados da avaliação da corrosividade dos solos

FINALIDADE	VARIÁVEIS E TÉCNICAS
Avaliar a corrosividade do solo pelo Índice de Steinrath	Teor de umidade (%); Resistividade elétrica (kΩ.cm); Potencial Redox (mV vs. EPH); pH (adimensional); Concentração de íons Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ e S ²⁻ (ppm).
Avaliar a proteção das estruturas enterradas	Potencial Estrutura-Solo (mV vs. ECSC)
Avaliar a corrosividade do solo pelas técnicas eletroquímicas	Potencial de Corrosão (mV vs. ECS x t); Polarização e EIE.

5.1. TEOR DE UMIDADE

O Gráfico 14 e a Tabela 13 mostram os resultados do ensaio para determinação do teor de umidade das amostras de solo feito em duplicata, onde se observa que as amostras *F* e *J* apresentaram as menores umidades, enquanto que as amostras *A* e *B* as maiores umidades. 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”. Para as demais amostras, o índice parcial foi igual a “0” (zero).

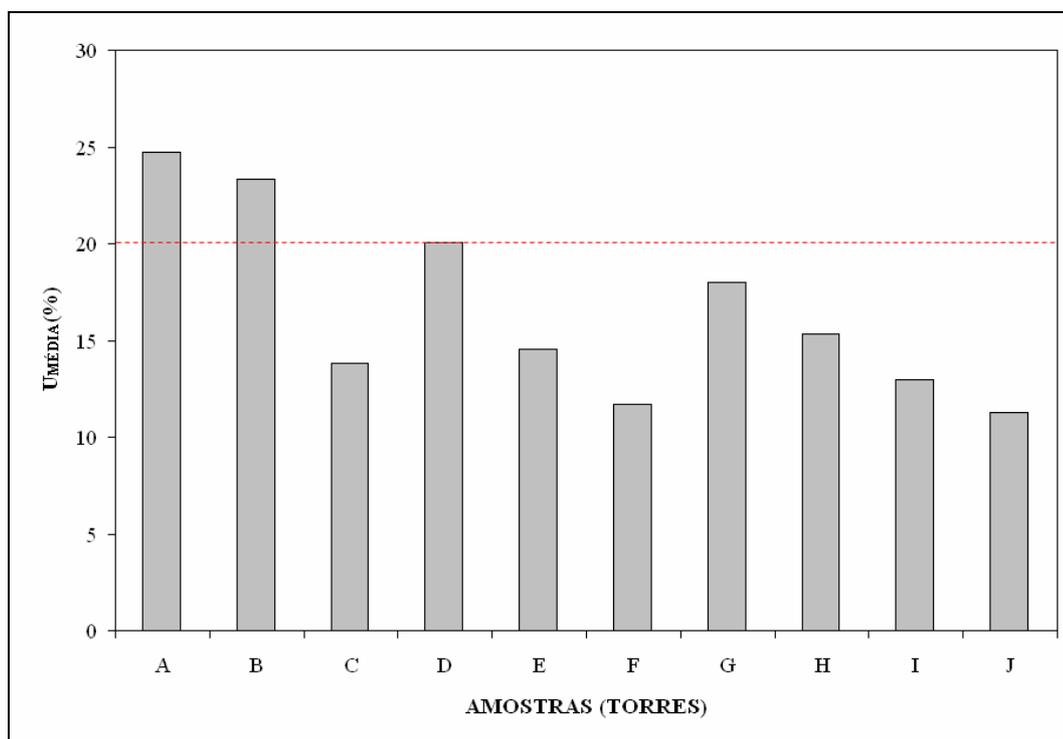


Gráfico 14 – Teor de umidade média

Tabela 13 – Teores de umidade experimentais

TORRE	U₁ (%)	U₂ (%)	U_{MÉDIA} (%)
A	25,0	24,5	24,7
B	23,4	23,2	23,3
C	13,9	13,7	13,8
D	20,4	19,8	20,1
E	14,6	14,5	14,6
F	11,9	11,5	11,7
G	17,6	18,4	18,0
H	15,5	15,1	15,3
I	12,9	13,1	13,0
J	11,4	11,1	11,3

5.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA MÉDIA

O Gráfico 15 mostra a média dos resultados das determinações de resistividade elétrica (ρ_{campo} , em $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$) dos solos próximos às torres de LT a partir das três distâncias (profundidades) utilizadas para este ensaio de campo. As amostras *H* e *C* foram as mais resistentes e as amostras *A* e *B* as mais condutoras (menos resistentes) tanto nas três distâncias, quanto na média geral. Assim,

as amostras *A* e *B* podem apresentar caráter corrosivo superior às demais, o que será confirmado ou contradito a partir dos resultados dos ensaios eletroquímicos.

Os índices parciais de corrosividade para a resistividade elétrica são correspondentes à média das distâncias (profundidades) em que este parâmetro foi medido. Assim, oito das dez amostras apresentaram índice parcial igual à zero, pois a resistividade elétrica média (ρ_{campo}) foram superiores ao valor limite de 12 k Ω .cm (linha vermelha tracejada), enquanto as amostras *A* e *B* apresentaram ρ_{campo} inferiores ao limite, contribuindo com índices parciais “-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.

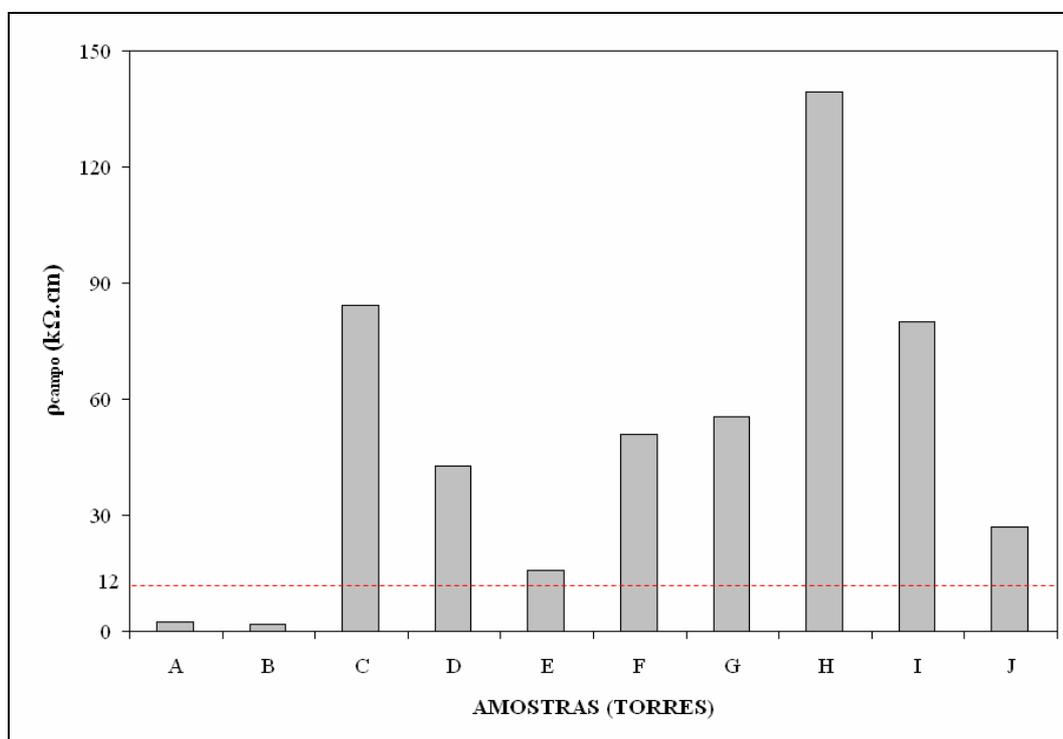


Gráfico 15 – Resistividade elétrica média dos solos em campo

5.3. pH

Os resultados encontrados no ensaio de determinação do pH das amostras de solo coletadas são mostrados no Gráfico 16. As amostras *A* e *D* foram as que apresentaram os menores valores 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 amostras o índice parcial foi igual a “-1” por estarem com pH abaixo de 5,0. Além disto, 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.

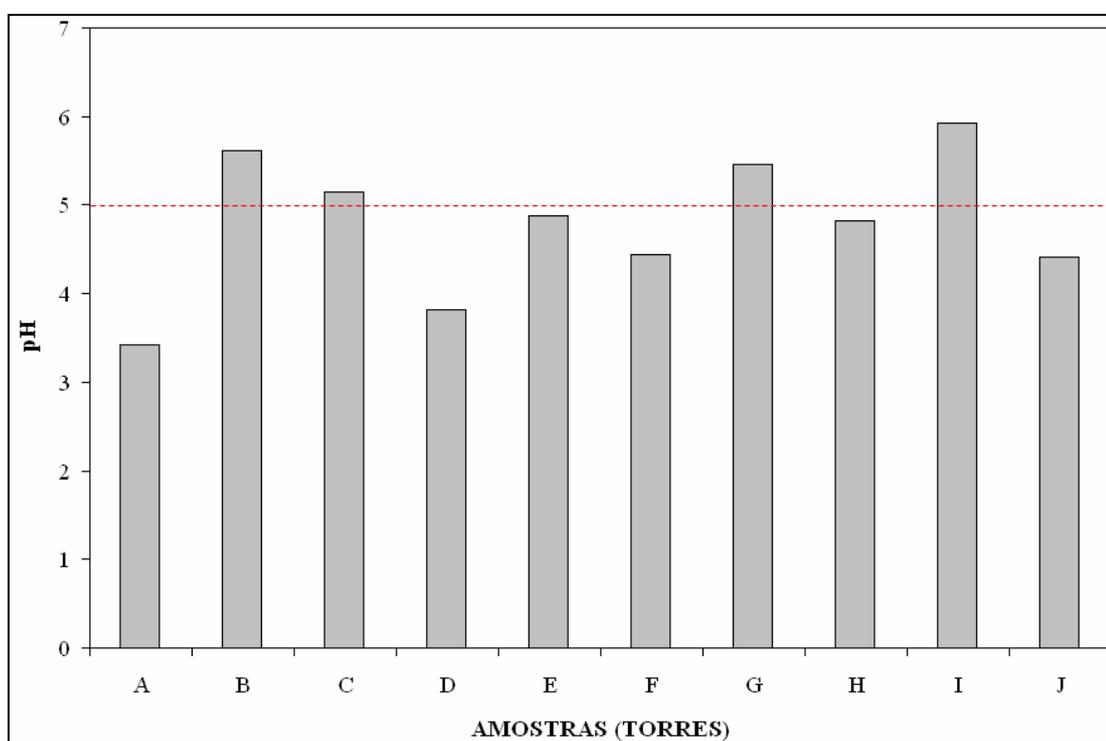


Gráfico 16 – pH do solo

5.4. POTENCIAL REDOX

O Gráfico 17 mostra os resultados do potencial redox das amostras de solo em relação ao EPH variando entre 324,16 e 510,22 mV vs. 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 vs. EPH (abaixo da linha vermelha tracejada), indicando uma tendência à ligeira corrosão microbiológica de estruturas enterradas nestes solos, sendo o índice parcial de corrosividade deles igual a “0” (zero).

As amostras *B*, *C*, *D*, *E*, *G* e *I* apresentaram E_H superior a 400 mV vs. EPH (acima da linha vermelha tracejada), dando um indicativo de que não tendem a formar processos corrosivos de origem microbiológica em estruturas nelas enterradas. Além disso, o índice parcial destas amostras foi igual a “+2”, devido o E_H encontrado.

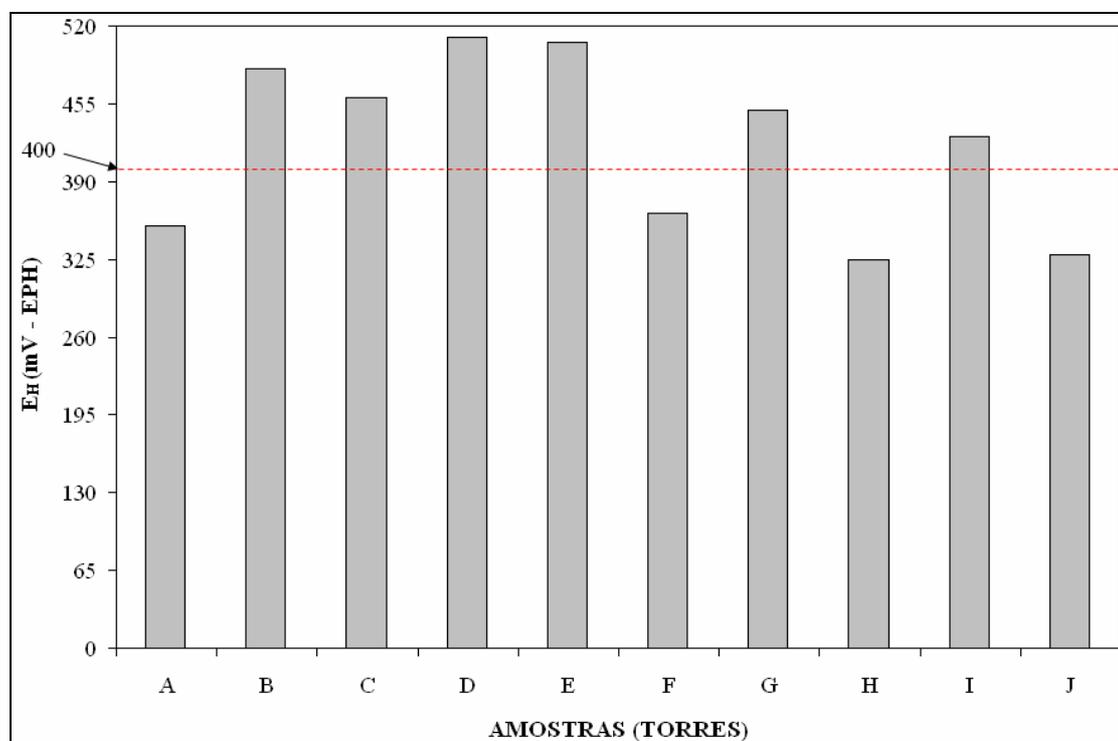


Gráfico 17 - Potencial redox

5.5. CONCENTRAÇÃO DE ÍONS CLORETO, SULFATO E SULFETO

A Tabela 14 mostra a concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto nas amostras de solo coletadas. A presença de íons cloreto e sulfato foram inferiores a 100 e 200 ppm, respectivamente. Além disto, houve ausência de íons sulfeto. Assim, os índices parciais de corrosividade destes parâmetros foram iguais a “0” (zero) para todas as amostras de solo coletadas.

Tabela 14 – Concentração de íons cloreto, sulfato e sulfeto

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

ND – Não detectado

5.6. DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE DO EXTRATO AQUOSO

A Tabela 15 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}).

Tabela 15 – 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

5.7. ÍNDICE DE STEINRATH

Na Tabela 16 são mostrados os índices parciais de corrosividade relacionando parâmetro e amostra de solo. Todas as amostras apresentaram alguma variação de índice parcial devido a um ou mais dos sete parâmetros analisados.

Tabela 16 – Índices parciais para os parâmetros de cada amostra de solo coletada

AMOSTRA	U_{média} (%)	ρ_{campo} (kΩ.cm)	pH	E_h (mV vs. EPH)	Cl⁻ (ppm)	SO₄²⁻ (ppm)	S²⁻ (ppm)
A	-1	-1	-1	0	0	0	0
B	-1	-4	0	2	0	0	0
C	0	0	0	2	0	0	0
D	-1	0	-1	2	0	0	0
E	0	0	-1	2	0	0	0
F	0	0	-1	0	0	0	0
G	0	0	0	2	0	0	0
H	0	0	-1	0	0	0	0
I	0	0	0	2	0	0	0
J	0	0	-1	0	0	0	0

Com os índices parciais de corrosividade mostrados na Tabela 16, obteve-se o índice de Steinrath (Tabela 17) e a classificação da corrosividade das amostras de solo a partir deste índice.

Tabela 17 – Índices de Steinrath 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

Tabela 17 – Índices de Steirath e a classificação quanto à corrosividade (continuação)

AMOSTRA	ÍNDICE	CLASSIFICAÇÃO
E	1	SEM CORROSIVIDADE
F	-1	BAIXA CORROSIVIDADE
G	2	SEM CORROSIVIDADE
H	-1	BAIXA CORROSIVIDADE
I	2	SEM CORROSIVIDADE
J	-1	BAIXA CORROSIVIDADE

As amostras *A* e *B* apresentaram índices de Steirath 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 Steirath iguais a “-1”. A classificação dada a essas amostras se deu pelo fato de o parâmetro pH contribuir com índice parcial igual a “-1”, enquanto os outros seis parâmetros que definem o índice de Steirath terem contribuído 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 influência direta.

As amostras *C*, *D*, *E*, *G* e *I* foram classificadas como “sem corrosividade”, pois apresentaram índice de Steirath maior ou igual à “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*).

5.8. POTENCIAIS DE CORROSÃO E ESTRUTURA-SOLO

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*) é mostrado nos Gráficos 18 e 19, respectivamente.

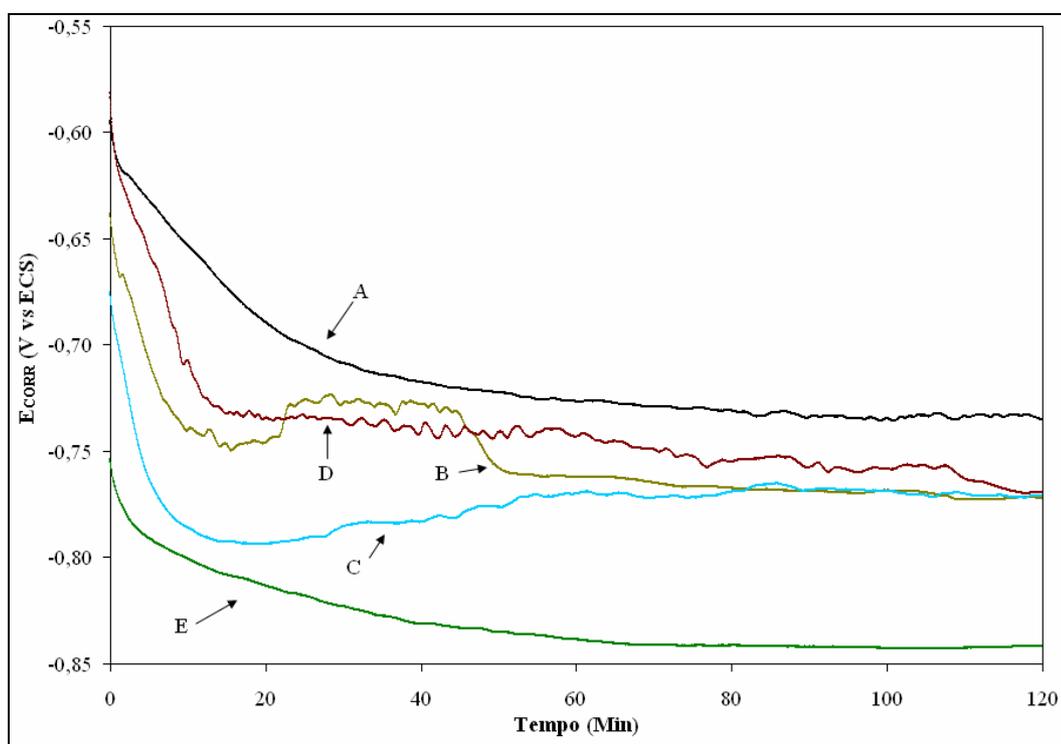


Gráfico 18 – Potenciais de corrosão em extratos aquosos de solos (A até E)

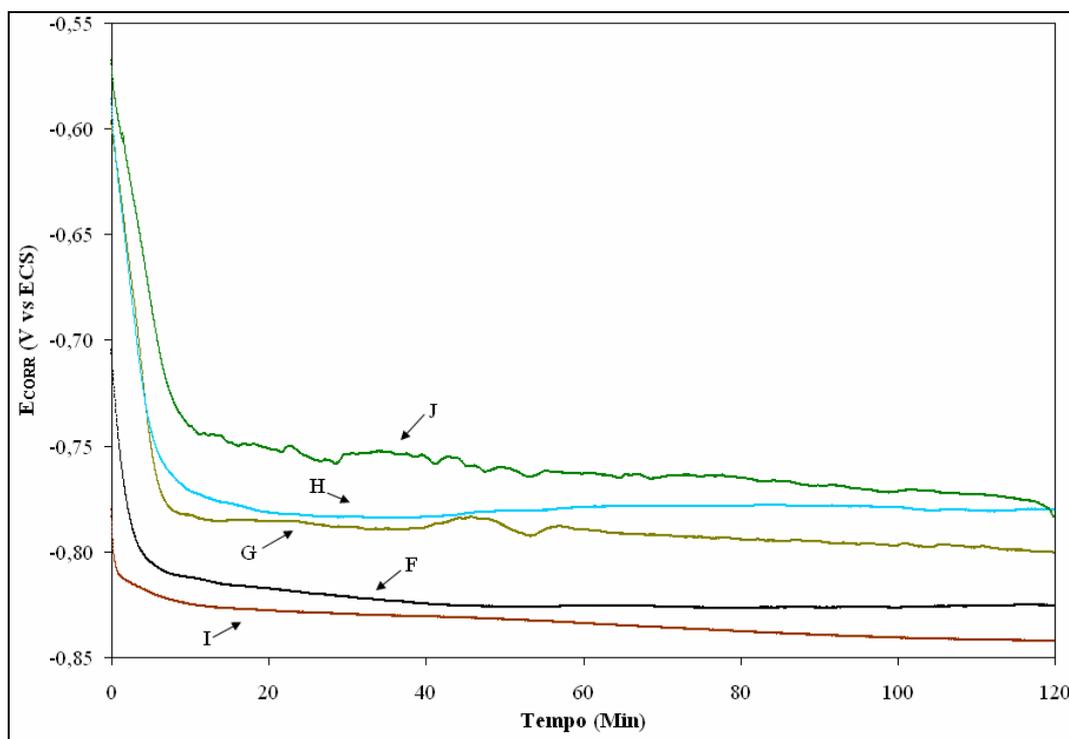


Gráfico 19 – Potenciais de corrosão em extratos aquosos de solos (F até J)

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

A Tabela 18 mostra o E_{ES} (em relação ao eletrodo de cobre-sulfato de cobre) medido em campo, a sua correção para o eletrodo de calomelano saturado (ECS), o E_{CORR} (medido em relação ao ECS) obtido através de ensaio eletroquímico e a diferença entre E_{ES} e E_{CORR} .

Tabela 18 – Potencial estrutura-solo para cada amostra de solo coletada

AMOSTRA	E_{ES} (mV vs. ECSC)	E_{ES} (mV vs. ECS)	E_{CORR} (mV vs. ECS)	$\Delta [E_{ES} - E_{CORR}]$ (mV vs. ECS)
A	-602	-522	-738	216
B	-543	-463	-775	312
C	-550	-470	-790	320
D	-478	-398	-771	373
E	-554	-474	-848	374
F	-527	-447	-835	388
G	-570	-490	-811	321
H	-544	-464	-789	325
I	-475	-395	-841	446
J	-637	-557	-829	272

Pode-se notar que os E_{CORR} foram inferiores aos E_{ES} , onde a amostra *A* apresentou a menor diferença (216 mV vs. ECS) e a *I* a maior (446 mV vs. ECS). Além disto, não houve igualdade entre E_{ES} e E_{CORR} para qualquer amostra devido às diferenças entre as condições encontradas em campo (quando se mede o E_{ES}) e no laboratório (onde se realiza o ensaio para determinar o E_{CORR}). Observou-se, também, que os E_{ES} foram superiores a -850 mV vs. ECSC, indicando que a estruturas enterradas das torres de linha de transmissão estavam sem proteção contra processos corrosivos, no entanto os E_{ES} permaneceram estáveis em todas as torres durante a medição, indicando que as mesmas não estavam sob ação de correntes de fuga.

5.9. POLARIZAÇÃO

Os Gráficos 20 e 21 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.

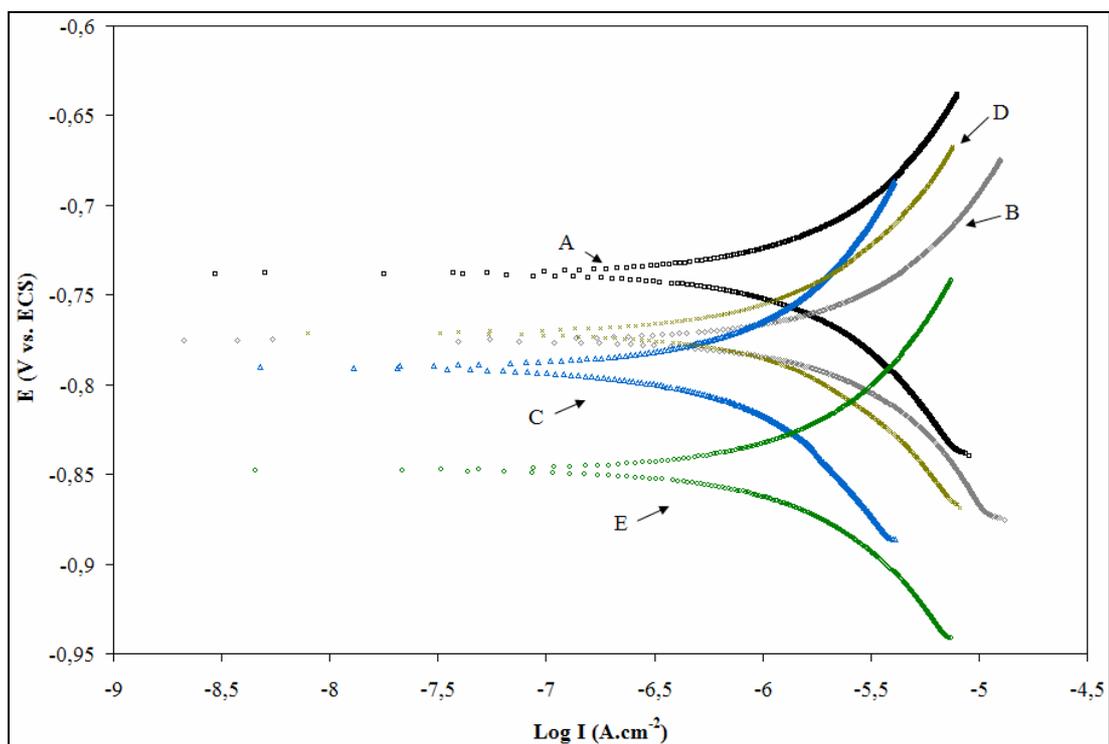


Gráfico 20 – Curvas de polarização do aço em extratos aquosos das amostras *A* até *E*

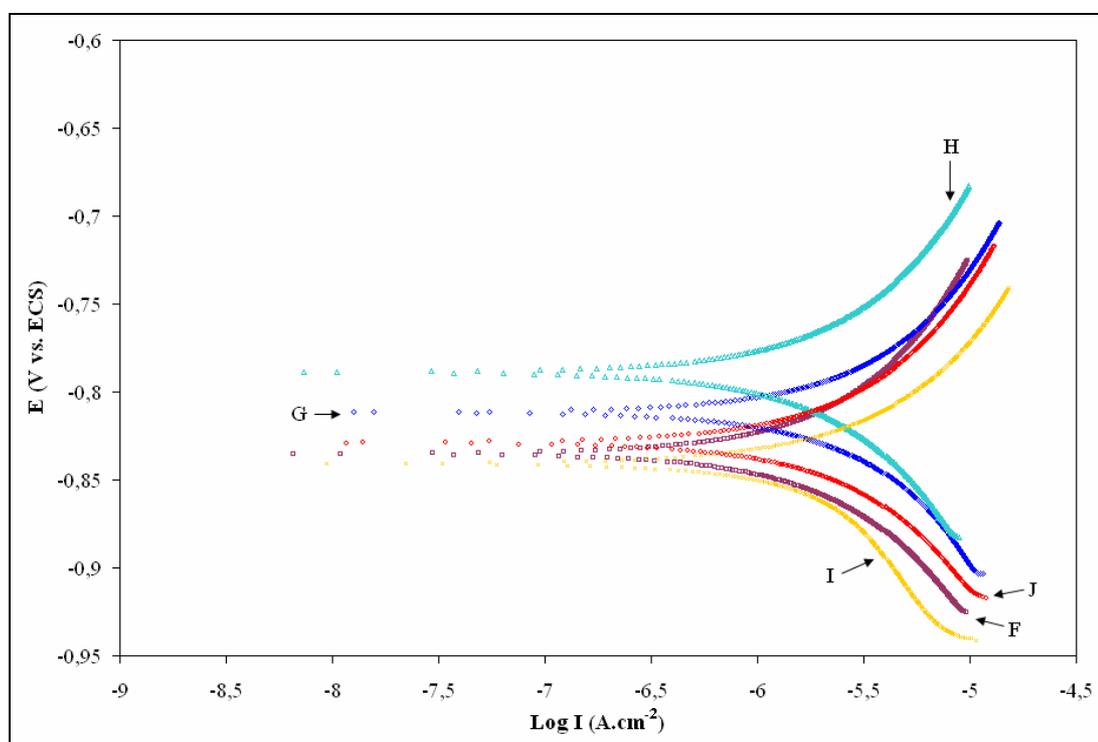


Gráfico 21 – Curvas de polarização do aço em extratos aquosos das amostras *F* até *J*

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 100 mV, com exceção das amostras *I* e *J*, que em torno de 900mV vs. ECS apresentaram diferenças das demais.

O método da resistência de polarização para R_p . O Gráfico 22 ilustra um dos dez ajustes de dados experimentais de polarização realizadas, a partir das quais foi possível obter os dados mostrados na Tabela 19.

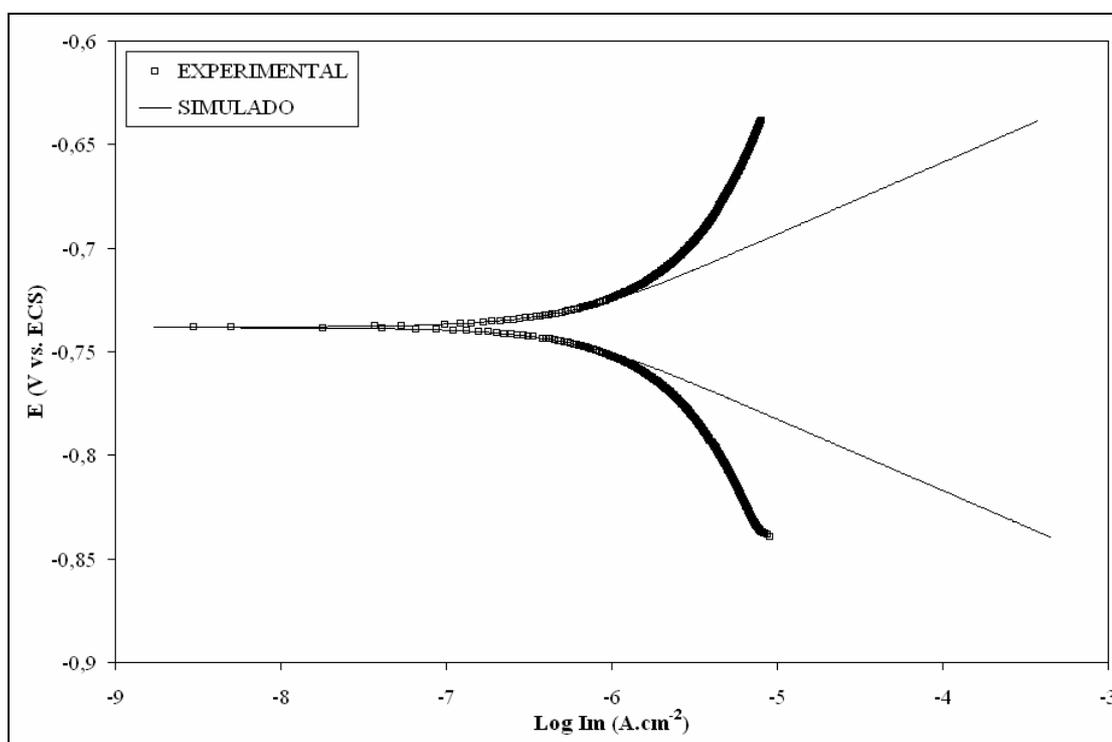


Gráfico 22 – Curvas de polarização experimental (□) e simulada (—)

Tabela 19 – Potenciais de corrosão e resistências de polarização

AMOSTRA	E_{CORR} (mV vs. ECS)	R_P (k Ω)
A	-738	2,33
B	-775	1,51
C	-790	4,86
D	-771	2,50
E	-848	2,48
F	-835	2,00
G	-811	1,45
H	-789	2,03
I	-841	1,50
J	-829	1,60

A partir dos resultados de resistência de polarização observou-se que a amostra *C* apresentou R_P igual a 4,86 k Ω , enquanto que as demais amostras apresentaram valores entre 1,45 e 2,48 k Ω , sendo o menor valor para a amostra *G*. Deste modo, pode-se afirmar que a taxa corrosão do aço imerso no extrato aquoso da amostra *C* do que na amostra *G*, pois a essa taxa é inversamente proporcional à R_P .

5.10. CORROSIVIDADES: ÍNDICE DE STEINRATH E RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO

Os Gráficos 23 e 24 mostram os índices de Steinrath (IS) e as resistências de polarização (R_P) das amostras de solo coletadas, respectivamente, fazendo-se uma comparação entre dados obtidos. As linhas vermelhas tracejadas representam valores do IS.

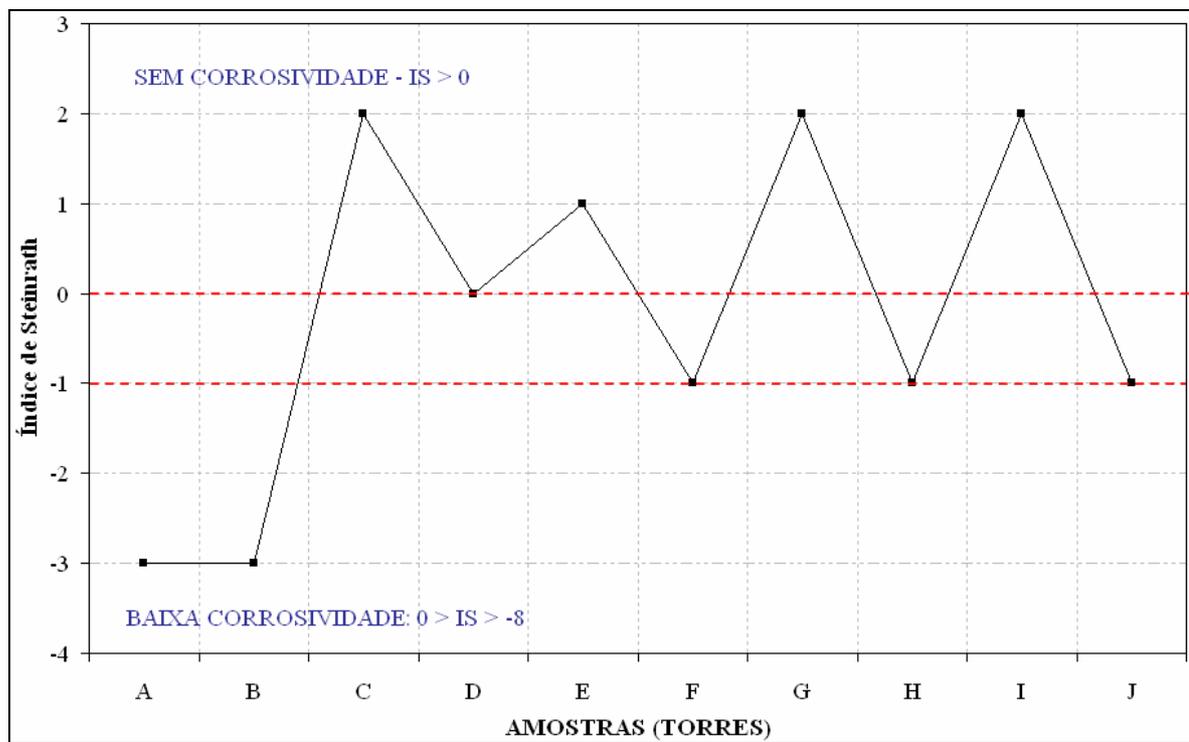


Gráfico 23 – Índices de Steinrath

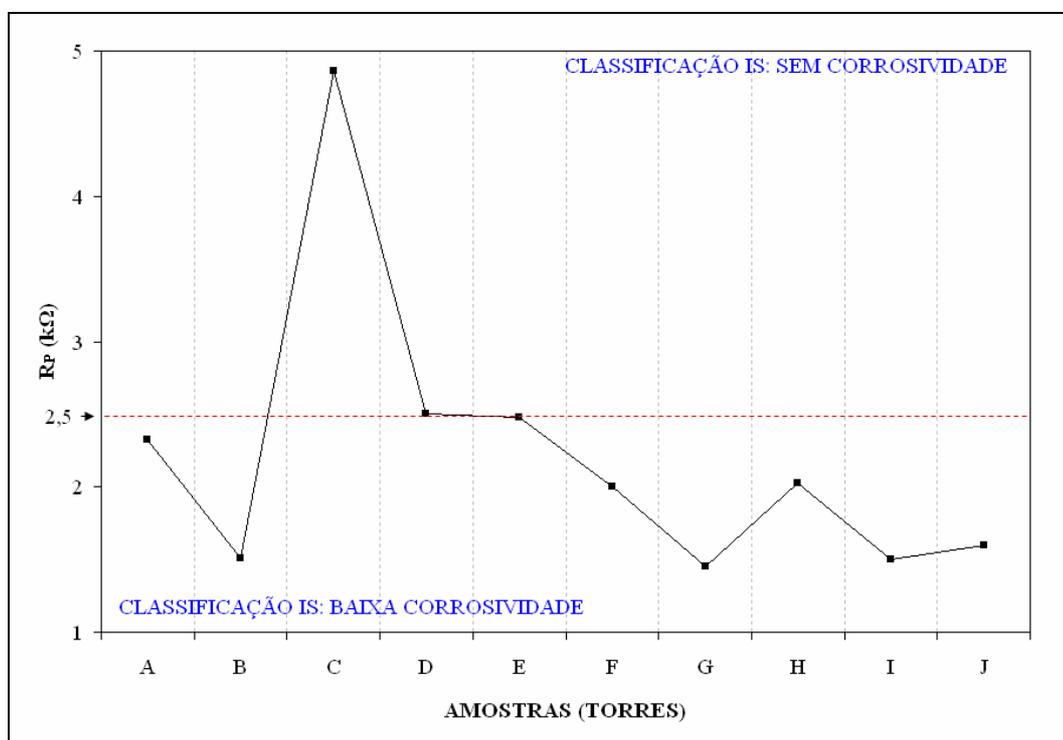


Gráfico 24 – Resistências de polarização

Pode-se observar que as amostras *A*, *B*, *F*, *H* e *J* foram classificadas como “baixa corrosividade” e apresentaram R_p abaixo de 2,5 k Ω . As amostras *C* e *E* tiveram R_p iguais a 4,86 e 2,48 k Ω , respectivamente, e foram classificadas como “sem corrosividade” pelo IS. Logo, as R_p destas amostras foram superiores 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”, conforme o IS e apresentaram R_p iguais a 2,50, 1,45 e 1,50 k Ω , respectivamente, sendo inferiores aos encontrados para as amostras classificadas como de “baixa corrosividade”, enquanto que o esperado era que seus valores de R_p fossem superiores a 2,50 k Ω .

As discordâncias envolvendo a classificação pelo IS e os valores de R_p ocorreram pelo fato do referido índice não considerar a associação entre os parâmetros que influenciam o processo corrosivo e além disso, 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 taxas de corrosão ou resistência de polarização 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 resistências de polarização e tenham ocorrido algumas discordâncias entre classificação pelo IS e R_p , os solos analisados apresentam baixa corrosividade, oferecendo baixo risco de danos às estruturas enterradas.

5.11. 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 25 em forma de diagramas de Nyquist e fez-se dois aumentos (Gráficos 26 e 27) neste gráfico para uma melhor visualização dos resultados. O Gráfico 28 mostra os diagramas de Nyquist para amostras *F* até *J* após 2 horas de imersão. Os resultados experimentais estão representados por figuras geométricas (\square, Δ, \circ , etc.) e as simulações por curvas contínuas.

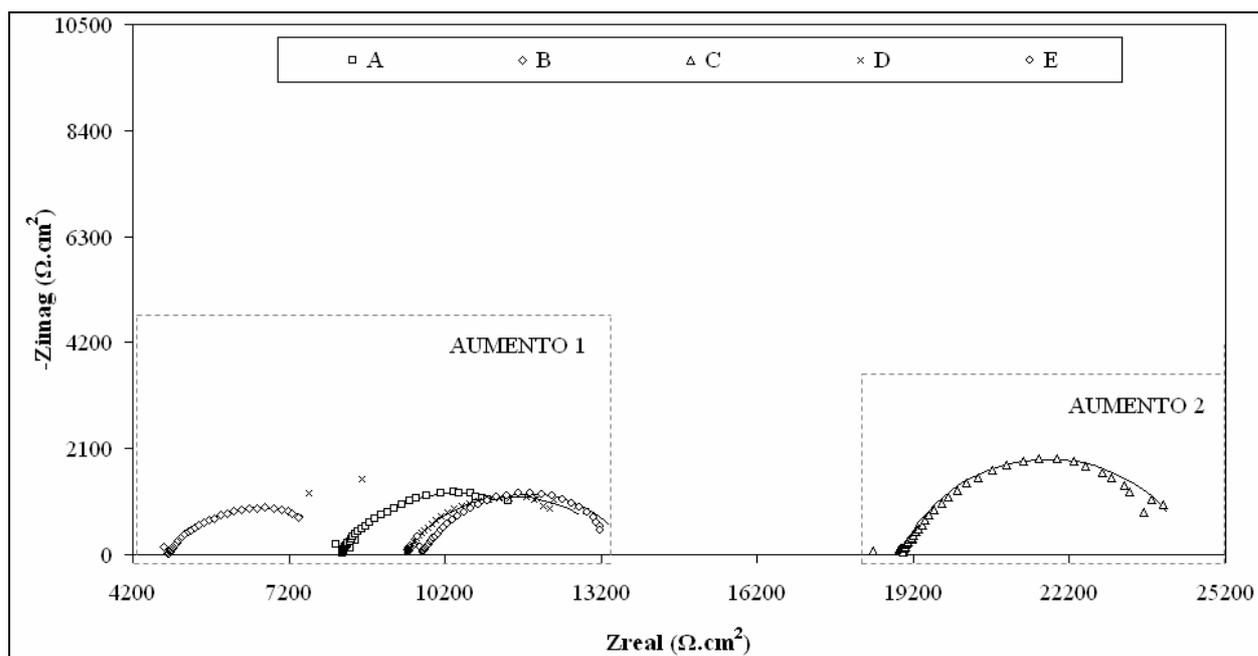


Gráfico 25 – Diagramas de Nyquist após 2 horas para as amostras *A* até *E*

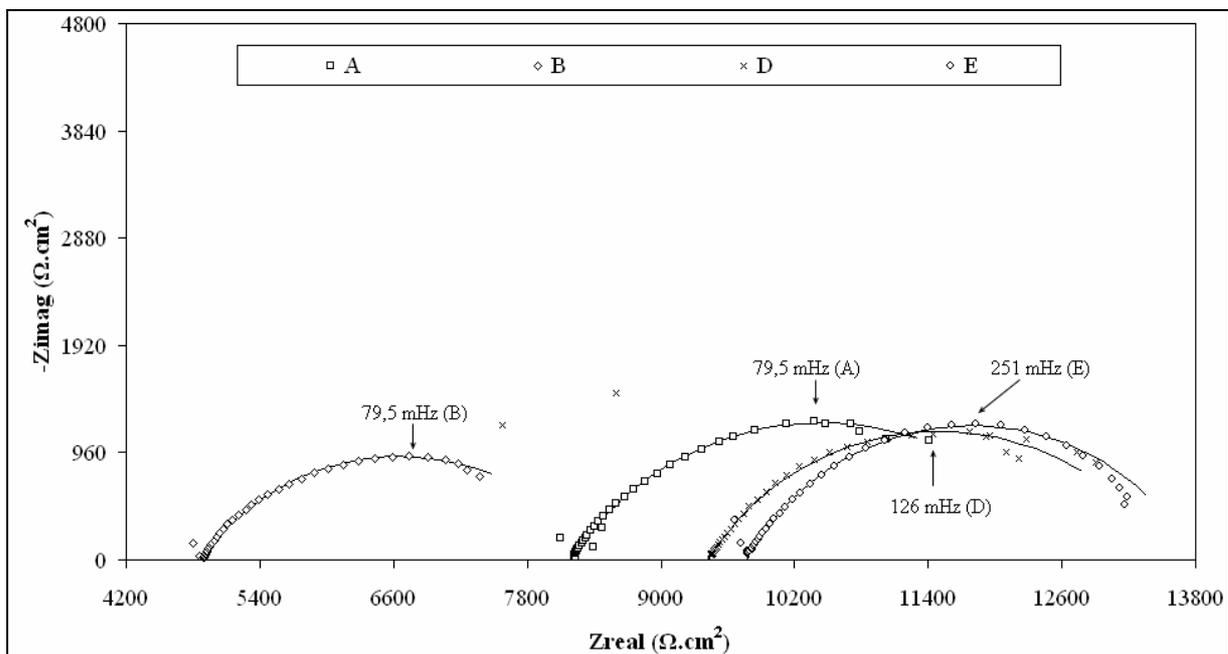


Gráfico 26 – Diagramas de Nyquist após 2 horas para amostras A até E (aumento 1)

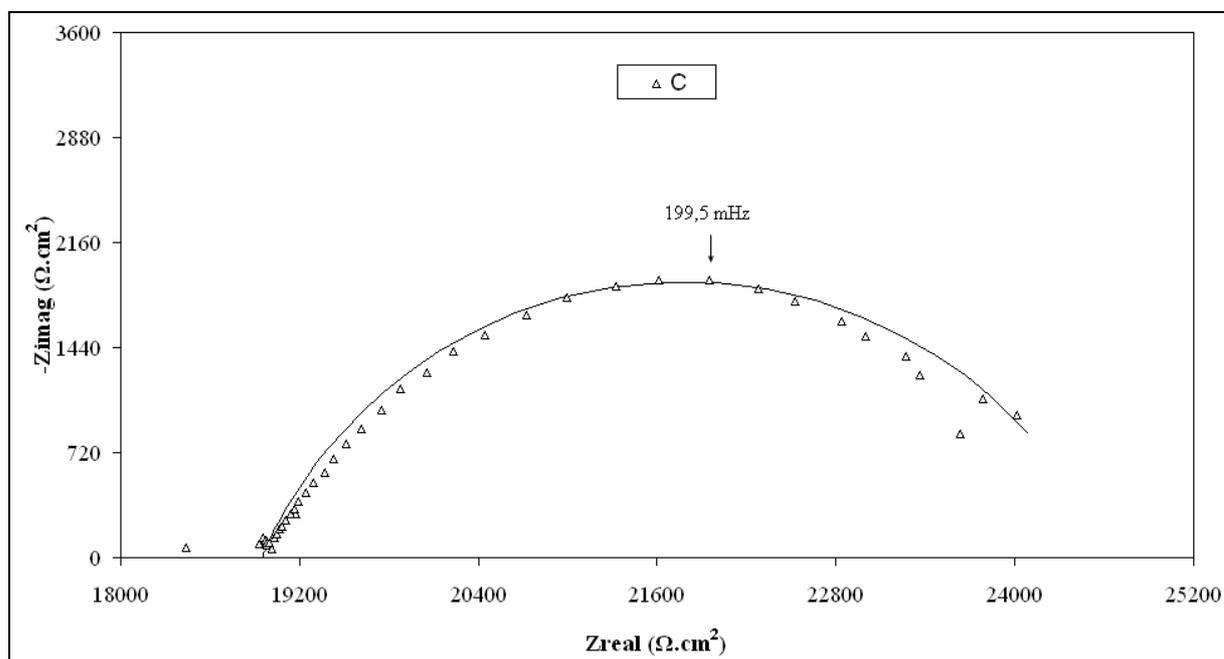


Gráfico 27 – Diagramas de Nyquist após 2 horas para amostras A até E (aumento 2)

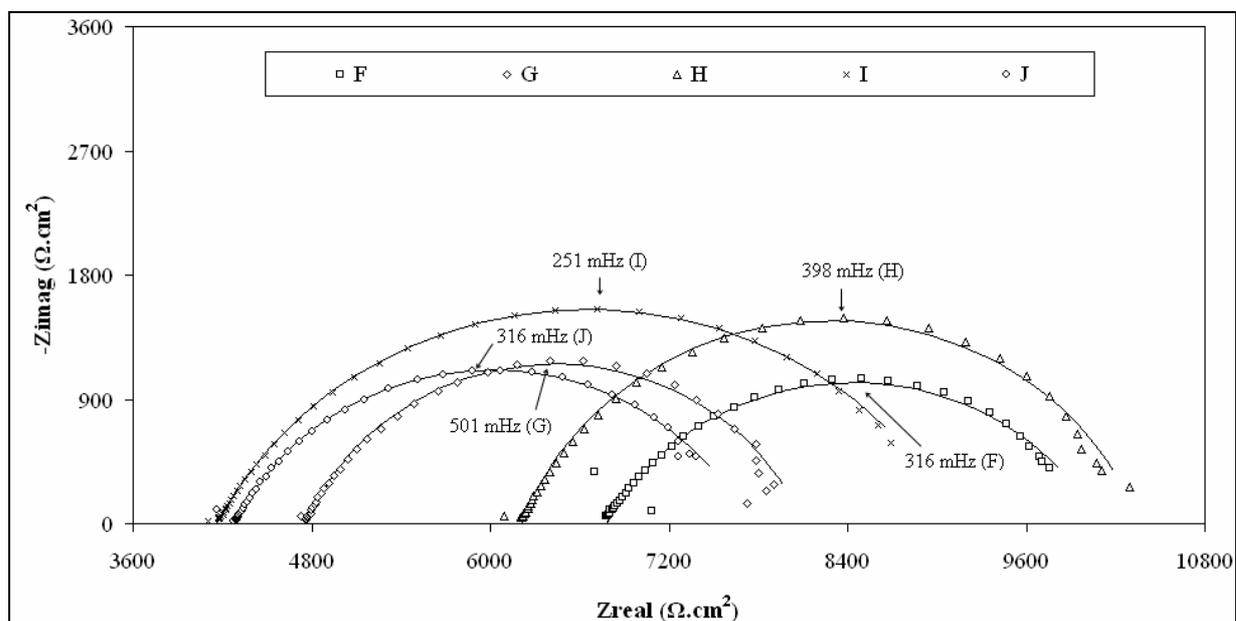


Gráfico 28 – Diagramas de Nyquist após 2 horas para as amostras *F* até *J*

Na faixa de frequência utilizada nos ensaios de EIE (1000 a 0,03 Hz), 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).

As frequências máximas em cada ensaio 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 das amostras do solo deslocaram de forma significativa os diagramas, devido às diferenças de resistividade elétrica. Estes resultados estão apresentados no Gráfico 29.

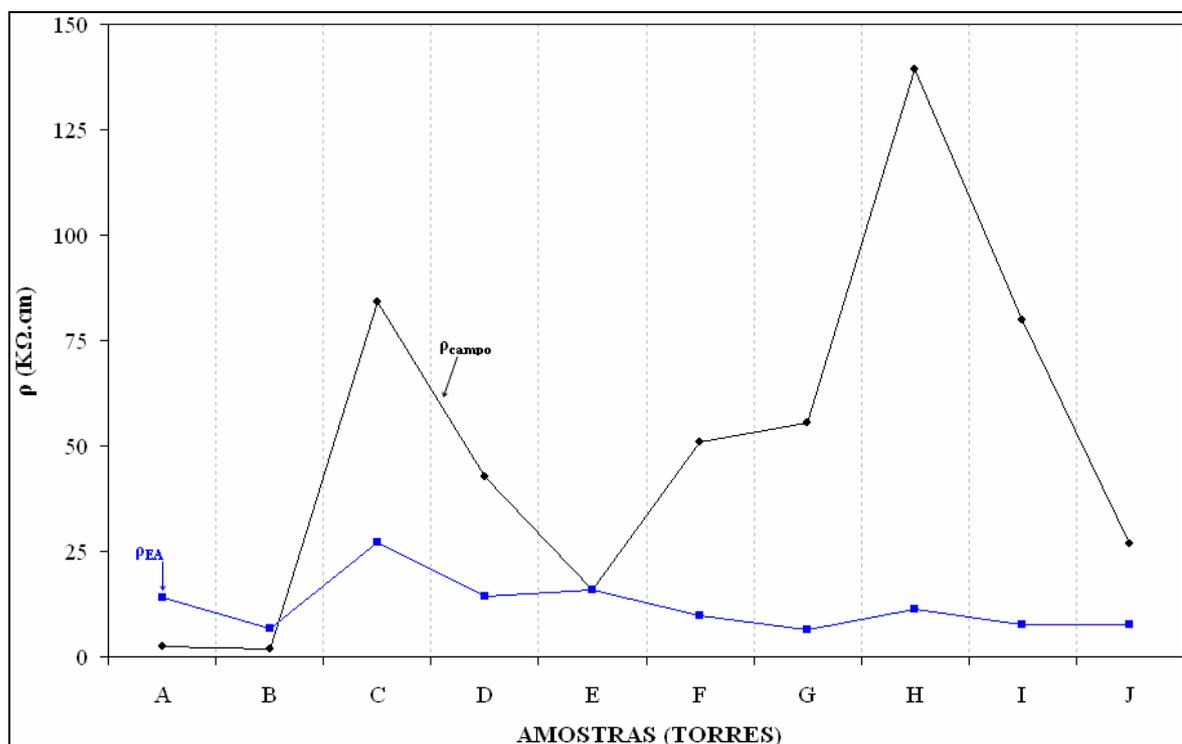


Gráfico 29 – Comparação entre as resistividades elétricas dos solos medidas em campo (ρ_{campo}) e a partir do extrato aquoso (ρ_{EA})

A partir do Gráfico 29, 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 valores menores de resistividade elétrica (ρ_{EA}), quando comparados com os resultados de campo (ρ_{campo}), porém pode-se considerar, qualitativamente, que os comportamentos dos gráficos são semelhantes. Contudo, os diagramas de Nyquist foram influenciados de forma significativa, onde se encontrou Z_{REAL} na faixa de 3600 a 25000 $\Omega.cm^2$.

A partir do ajuste dos dados experimentais (simulação) ao circuito equivalente EFC (Figura 03), obteve-se os valores dos parâmetros: resistência de polarização (R_p), resistência da solução ou extrato aquoso (R_{EA}), admitância (Y^0) e a constante empírica (α), os quais são mostrados no Apêndice C. A Tabela 20 e o Gráfico 30 mostram os valores de R_p obtidos pela EIE.

Tabela 20 – Resistências de polarização pela EIE

AMOSTRA	R_p ($k\Omega.cm^2$)
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

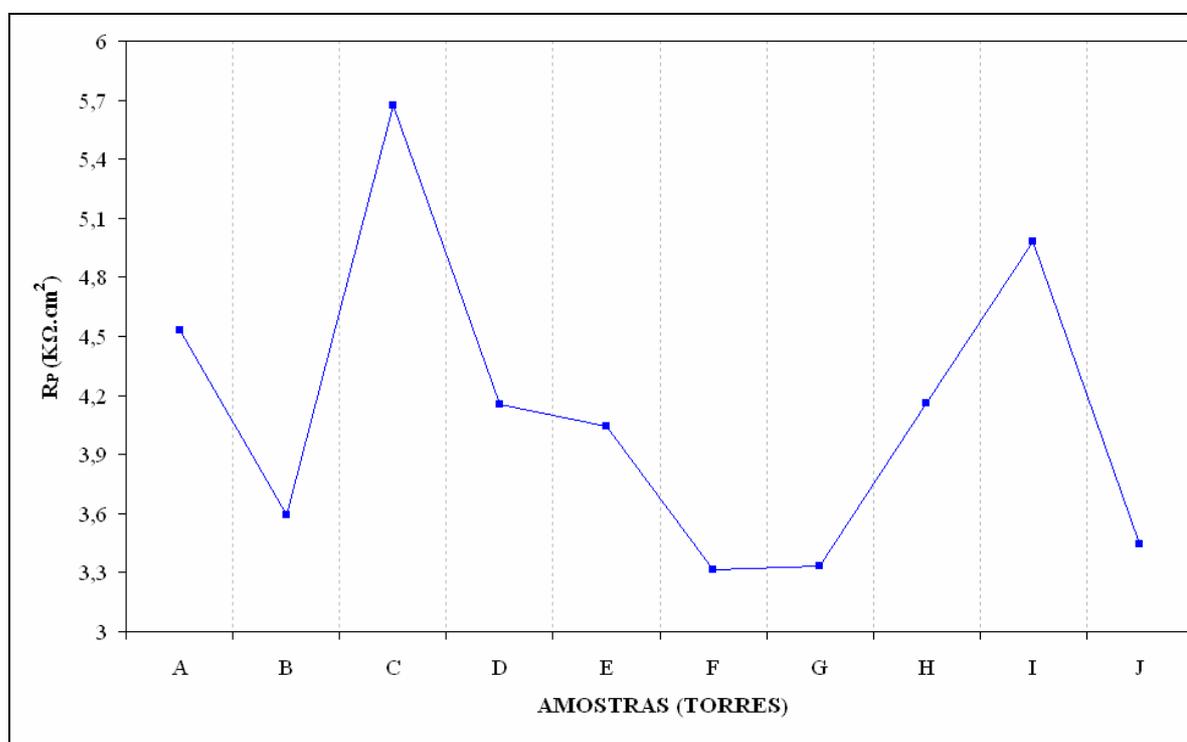


Gráfico 30 – Resistências de polarização pela EIE

Observou-se a variação de R_p entre 3,3 e 5,7 $k\Omega.cm^2$ indicando diferença pouco significativa entre as resistências calculadas e constatando-se que o comportamento cinético não apresenta mudanças significativas entre as amostras de solo analisadas.

6. CONCLUSÕES

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 analisadas neste trabalho, pois não ocorreram diferenças significativas entre as duas metodologias, a partir das quais se pode concluir que algumas das amostras de solo apresentaram classificação de “sem corrosividade” e outras a classificação de “baixa corrosividade” pelo índice de Steinrath, o que foi confirmado pelos resultados de polarização (com resistências de polarização da ordem de $k\Omega$) e pela espectroscopia de impedância eletroquímica (esta metodologia confirmou o observado na polarização e salientou a possibilidade, nas devidas proporções, de determinar em laboratório, resultados que foram obtidos em campo). Além disto, pode-se concluir que estruturas do aço USI SAC 300 enterradas nestes solos não tenderão a corroer, caso as características daqueles solos não sejam alteradas em curto e médio prazo, conforme se observou nos resultados de potencial estrutura-solo. 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 (manutenção preventiva), tendo-se em vista que, apesar de os solos analisados apresentarem o caráter de baixa corrosividade, há tendência ao desenvolvimento de processos corrosivos.

REFERÊNCIAS

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.

ARPAIA, M; PERNICE, P.; CONSTANTINI, A. Kinetic mechanism of steel corrosion in clay soils by impedance measurements. **Materials Chemistry and Physics**, v. 24 (1990) p. 373 – 382.

BARDAL, E. **Corrosion and protection**. London: Springer, 2004.

BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical methods: fundamentals and applications**. New York: John Wiley & Sons, 2^a Ed, 2001.

BARD, A. J.; STRATTMAN, M; FRANKEL, G. S. **Encyclopedia of Electrochemical**. V. 4, Corrosion and Oxide Films, Ed. Wiley – VCH, 2003.

BOOTH, G. H.; TILLER, A. K. Cathodic Characteristics of Mild Steel in Suspensions of Sulphate-Reducing Bacteria. **Corrosion Science**, v. 8, (1968), p. 583.

BRADFORD, S. A. **Practical handbook of corrosion control in soil**. Cast Publication, Canadá, 2002.

BRASIL. Agência Nacional de Águas – ANA. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. **A navegação interior e sua interface com o setor de recursos hídricos no Brasil e aproveitamento do potencial hidráulico para geração de energia no Brasil**. Brasília, 2007.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco 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.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. V. 1, 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

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

DENILSON, I. A.; EWING, S. P. Corrosiveness of Ohio soil. **Soil science**, v. 40 (1935) p. 287.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. **Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão**. Rio de Janeiro. Ed.: JR Editora Técnica Ltda, 1987.

ELETROBRÁS. **Desempenho de sistemas de distribuição**. Rio de Janeiro: Ed. Campus (Coleção Distribuição de Energia Elétrica, v. 3), 1982.

IBRAHIM, E. S. Corrosion control in electric power systems. **Electric Power Systems Research**, v. 52, (1999), p. 9 – 17.

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.

FERREIRA, C. A. M., GOMES, J. A. C. P., VAITSMAN, D. S. e PÉREZ, D. V. Avaliação da composição química de solos para determinação de índices de corrosividade. In. CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CORROSÃO, 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: (2006) LATINCORR2006_052.

FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986.

FUTURE ENERGY. **Energia no Brasil**. 2007. Disponível em: <http://www.futureenergy.com.br/images/Material_energia.pdf> Acesso em: 13 mai. 2009.

GAMRY INSTRUMENTS. Electrochemical impedance spectroscopy primer. [2007]. Disponível em: <www.gamry.com/App_Notes/EIS_Primer/EIS_Primer.htm>. Acesso em: 13 out. 2009.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2007.

GOMES, D. S. F. **Aterramento e proteção contra sobretensões em sistemas aéreos de distribuição**. Niterói: Ed.EDUFF (Coleção Distribuição de Energia Elétrica, v. 7), 1990.

HOFFMANN, J. N.; SILVA, J. M. da. Proteção Contra Corrosão nas Fundações das Torres Metálicas, Utilizando Energia Induzida pelo Campo Elétrico da Linha de Transmissão. **Espaço Energia**, edição nº 2, abril 2005.

KELLY, R.G.; SCULLY, J. R.; SHOESMITH, D. W.; BUCHHEIT, R. G. **Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering**. New York: CRC Press, 2003

KNOX, R. C.; SABATINI, D. A.; CANTER, L. W. **Subsurface transport and fate processes**. Lewis Publishers, Florida, EUA, 1993.

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.

- LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2002.
- 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.
- MASLEHUDDIN, M.; AL-ZAHRANI, M.M.; IBRAHIM, M; AL-MEHTHEL, M.H.; AL-IDI, S.H. Effect of chloride concentration in soil on reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, v.21, (2007) p. 1825–1832
- NEVEUX, M. **La Corrosion dès Conduites d'Eau et de Gás – Causes et Remedés**, Ed Eyrolles, Paris, 1968.
- OGUZIE, E.E.; AGOCHUKWU, I.B; ONUCHUKWU, A.I. Monitoring the corrosion susceptibility of mild steel in varied soil textures by corrosion product count technique. **Materials Chemistry and Physics**, v. 84 n. 1 (2004) p. 1 – 6.
- 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.
- PAOLINELLI, L. D.; PÉREZ, T.; SIMISON, S. N. The effect of pre-corrosion and steel microstructure on inhibitor performance in CO₂ corrosion. **Corrosion Science**, v. 50 (2008) p.2456 – 2464.
- 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.
- POLIVANOV, H. **Apostila de pedologia** – Departamento de Geologia – IGEO – UFRJ – 1988.
- PRINCETON APPLIED RESEARCH. **Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy**. Application note AC – 01, 200?.
- ROBERGE, P.R. **Handbook of Corrosion Engineering**, p. 142-154. McGraw-Hill, 1999.
- ROBINSON, W. C. Testing soil for corrosiveness. **Materials performance**, v. 32, n. 4 (1993) p. 56-58.
- RODRIGUES, L. M.; DICK, L. F. P. Avaliação da corrosividade de solos em ambiente controlado. In. CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CORROSÃO, 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: (2006) LATINCORR2006_385.
- ROSENQVIST, I. **The Subsoil Corrosion of Steel**. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Publication n. 42, p. 86, 1961.
- SERRA, E.T.; ARAÚJO, M. M.; MANNHEIMER, W.A. On the influence of alternating current on corrosion of aluminum and Cooper in contact with soil. Corrosion. **In. THE**

INTERNATIONAL CORROSION FORUM AND PERFORMANCE OF MATERIALS, 1979, Atlanta.

SERRA, E.T.; MANNHEIMER, W.A. On the Estimation of the Corrosion Rates of Metal in Soils by Electrochemical Measurements. **Underground Corrosion**, ASTM-STP 741, NY, 1981, p. 24-27.

SILVA, J. M.; LÁZARIS, J.; KENNY, E. D.; et al. Resistividade de solo, obtenção em laboratório e comparação com resistividade de solo obtida em campo pelo método de quatro pontos (Método de Wenner). **In. XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO**, 2004, Rio de Janeiro.

SILVA, J. M., FRIEDRICH, J., RIBAS, R.M., e TERSARIO, L. H. Determinação da acidez total em solos e classificação da sua agressividade na corrosão de materiais metálicos pelo solo. **In. CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CORROSÃO**, 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: (2006) LATINCORR2006_003.

STERN, M.; GEARY, A.L. Electrochemical polarization. I. Theoretical analysis of the shape polarization curves. **Journal of Electrochemical Society**, v. 104, n. 1 (1957) p. 56-63.

TBE. Transportadoras Brasileiras de Energia. **Fotos de torres de linhas de transmissão de energia**, 2009. Disponível em: <www.tbe.com.br>. Acesso em: 15 jun. 2009.

TBE. Transportadoras Brasileiras de Energia. **Avaliação e Monitoramento de Corrosão em Estacas Metálicas Helicoidais de Torres de Transmissão de Energia Elétrica Instaladas em Locais Alagados na Região Amazônica – Etapa 1 / Ano 1 (mês 3): Complementação da Revisão Bibliográfica**, 2009. Belém: 2007. 8p. (Relatório de atividades envolvidas em projeto pela contratante TBE)

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.

VIEIRA, L. S. **Recursos edafológicos da Região do Cãmara, Ilha do Marajó, Estado do Pará, Brasil**. Tese (Livre Docência) – Pedologia, Universidade Federal do Pará, 1976.

ZAKOWSKI, K.; DAROWICKI, K. Potential changes in an electric field and electrolytic corrosion. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 50, n. 1, (2003) p. 25–33.

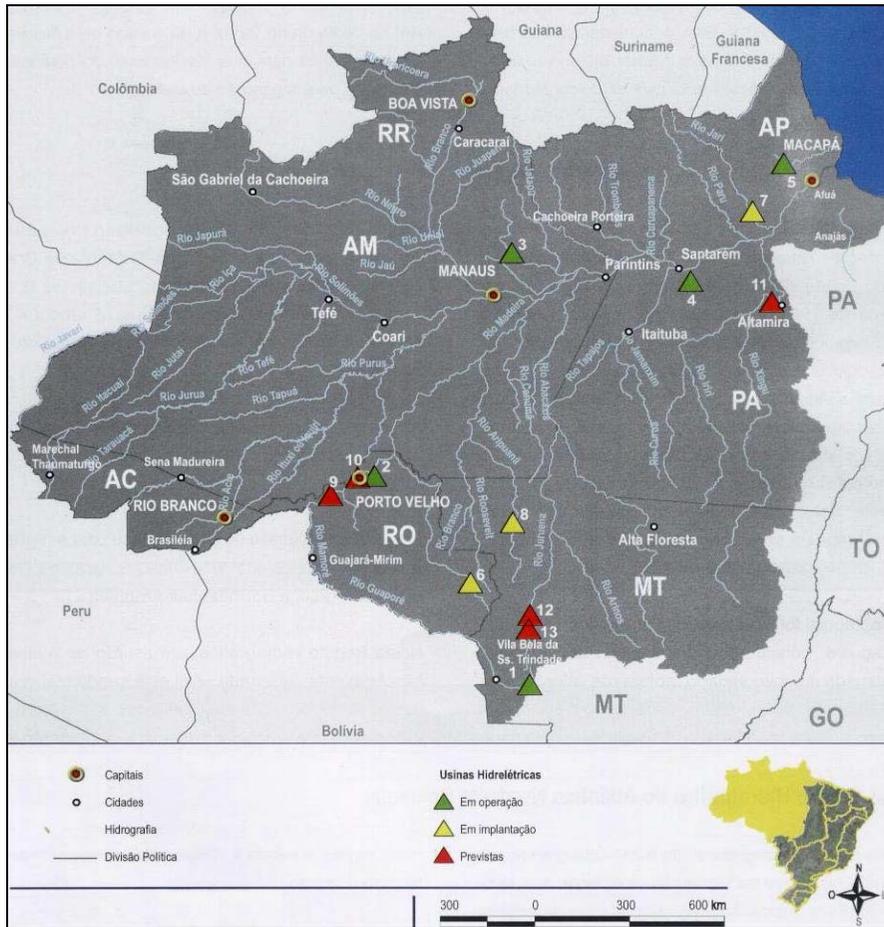
WRANGLÉN, G. **An Introduction to Corrosion and Protection of Metals**, Institut för Metallshkydd, Stockholm, 1972.

WILMOTT, M. J.; DIAKOE, D. A. Factors influencing stress corrosion cracking of gas transmission pipelines: detailed studies following a failure, parte 1: Enviromental conditions, **In: ASME Intl. Pipelines Conf.**, v.1, (1996) p. 507-524.

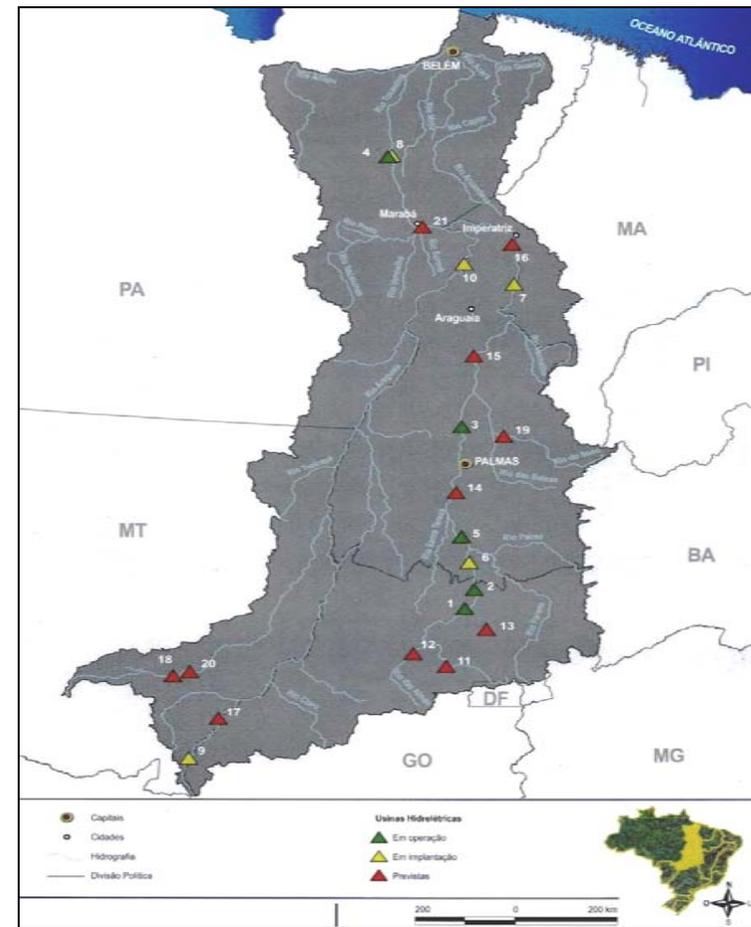
WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

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.

ANEXO A



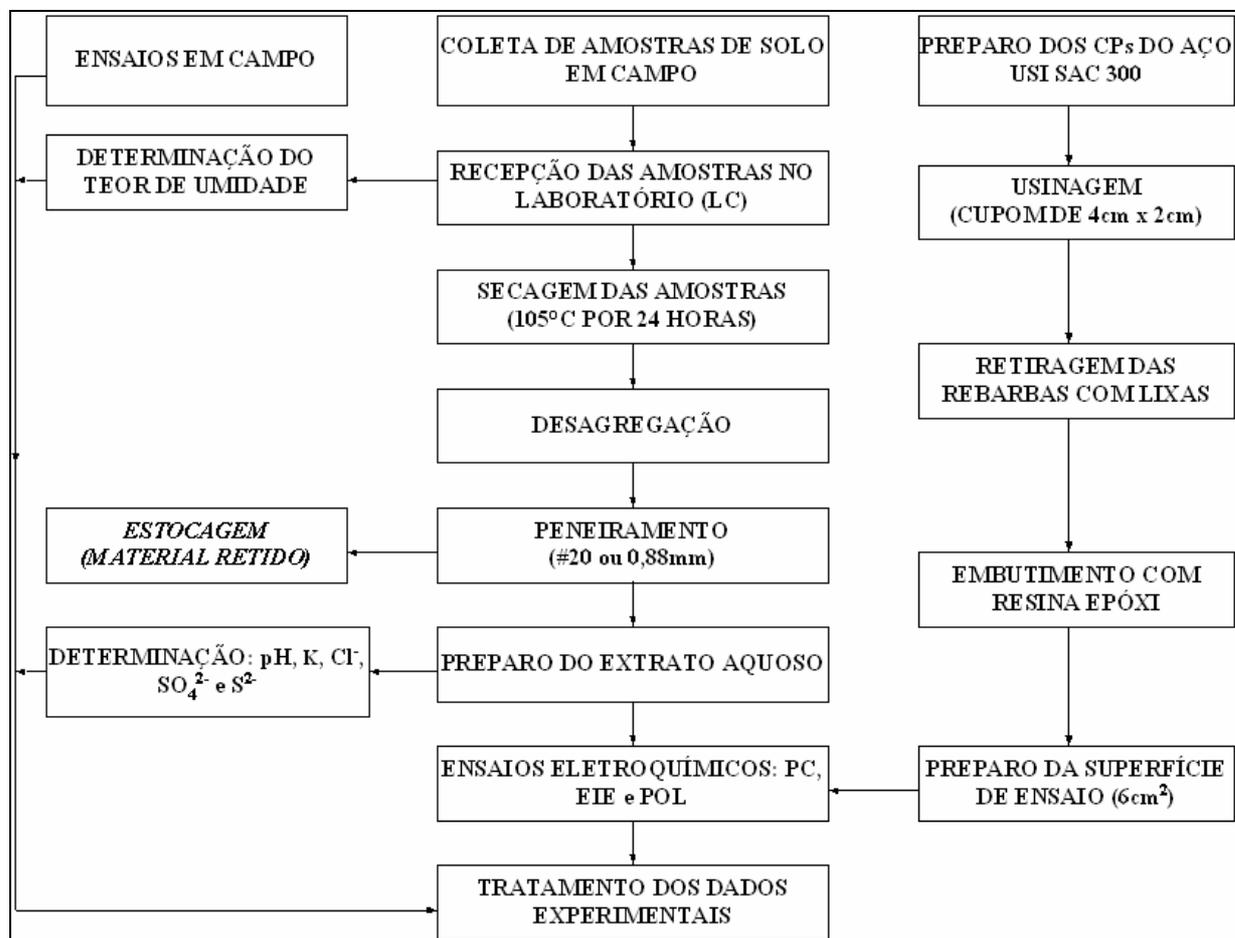
(a)



(b)

Mapas – Usinas Hidrelétricas nas Regiões Hidrográficas Amazônica (a) e Tocantins-Araguaia (b) (Brasil,2007)

APÊNDICE A



Fluxograma – Materiais e métodos empregados

APÊNDICE B

Tabela – Comparação entre os índices de Steinrath e as resistências de polarização (obtidas pela polarização) do aço imerso nos extratos aquosos

AMOSTRA	R_p (Ω)	ÍNDICE DE STEINRATH	
		ÍNDICE	CLASSIFICAÇÃO
A	2327	-3	BAIXA CORROSIVIDADE
B	1506	-3	BAIXA CORROSIVIDADE
C	4863	2	SEM CORROSIVIDADE
D	2503	0	SEM CORROSIVIDADE
E	2476	1	SEM CORROSIVIDADE
F	1999	-1	BAIXA CORROSIVIDADE
G	1450	2	SEM CORROSIVIDADE
H	2028	-1	BAIXA CORROSIVIDADE
I	1504	2	SEM CORROSIVIDADE
J	1598	-1	BAIXA CORROSIVIDADE

APÊNDICE C

Tabela - Parâmetros obtidos do ajuste dos dados experimentais ao circuito equivalente com um elemento de fase constante

AMOSTRA	$R_P (\Omega.cm^2)$	$R_S (\Omega.cm^2)$	$Y_o (\mu S.s^\alpha)$	α
A	4528	8184	2283	0,6235
B	3590	4862	2328	0,6066
C	5673	18948	808,3	0,7493
D	4156	9420	1535	0,6439
E	4042	9768	1050	0,6832
F	3313	6780	1057	0,7040
G	3332	4768	729	0,7725
H	4162	6204	651,5	0,7831
I	4984	4161	828,9	0,7090
J	3443	4285	1007	0,7299