AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTUDO DOS PROCESSOS DE CORROSÃO DE AÇOS API 5L X70 EM CONTATO
COM ALGUNS DOS SOLOS DO BRASIL**

Sérgio Luís de Jesus

**Tese apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear – Materiais**

Orientador: Dr. Jesualdo Luiz Rossi

SÃO PAULO

2007

À Danielle, sempre ao meu lado à despeito da previsão do tempo!

Agradecimentos

Ao Dr. Jesualdo Luiz Rossi pela compreensão em todos os momentos e a gratuidade em dividir conhecimento.

Ao Professor Doutor Virgílio Franco do Nascimento Filho pela referência ética que trago comigo e a percepção em abordar os problemas.

À Dra. Isolda Costa pelo ritmo incansável e as correções sempre oportunas.

Ao Professor Dr. Ricardo Espíndola Romero que também representa o Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, pela amizade, pelo incentivo nos primeiros passos em ciência dos solos e a serenidade com que recebe a todos.

Ao Professor Dr. Antonio Carlos de Azevedo pelos debates sempre primorosos e o constante entusiasmo com que me apoiou, aproveito para desejar sucesso na sua recente empreitada.

Ao Dr. Edson Souza de Jesus Filho pela amizade desde que cheguei ao IPEN, pelas observações acuradas neste trabalho e as posturas autênticas que o caracterizam.

Ao Engenheiro Agrônomo Dr. Luis Fernando Sanglade Marchiori - Administrador da Fazenda Areão – ESALQ/USP - pela ajuda prestimosa aos experimentos e o legado de esforço e organização que se percebe na Unidade.

Ao Mestre Eduardo Almeida, Químico do Laboratório de Instrumentação Nuclear – CENA/USP, pela participação nos experimentos e a disposição de encarar o desafio.

À Dra. Camila Beig Jordão pela participação nas análises e o apoio recebido.

Ao Engenheiro Agrônomo Jaedson Mota pelo positivismo contagiante e o auxílio nas interpretações dos solos.

Aos Drs. Lalgudi Venkataraman Ramanathan, Pedro Kunihiro Kiyohara e Fulvio Siciliano pelas inestimáveis contribuições e pelo incentivo nas avaliações.

À equipe do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS/CNPq) pelo acesso aos equipamentos e apoio técnico.

À equipe da Empresa Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais SA - USIMINAS pela doação da chapa de aço API 5L X70 e o profissionalismo com o qual fomos tratados em todos os momentos.

ESTUDO DOS PROCESSOS DE CORROSÃO DE AÇOS API 5L X70 EM CONTATO COM ALGUNS DOS SOLOS DO BRASIL

Sérgio Luís de Jesus

Resumo

Polidutos, tanques de armazenamento de combustíveis e outras estruturas metálicas estão em constante contato com diferentes tipos de solos, diversos horizontes ou camadas, expostos à ação corrosiva nessa interação. Isso possibilita a ocorrência de danos de consequências expressivas ao ambiente e à expectativa de trabalho, podendo implicar em contaminações derivadas por vazamento dos produtos de estocagem, derramamento durante transporte, acidentes causados por tubulações sem adequada manutenção além das perdas financeiras associadas. Conhecer a dinâmica de interações entre as superfícies metálicas e o entorno é fundamental a fim de prever comportamentos e desenvolver materiais melhor aplicados. Os aços classe API são utilizados em tubulações de alta e baixa pressão mantendo características de elevada resistência mecânica e à corrosão e, ainda assim, são suscetíveis de ocorrências do processo corrosivo, dado que, estão em contato com diferentes ambientes desde regiões de mangue até atmosferas industriais. No presente caso, avaliou-se como se comportam aços API 5L X70 em contato com diferentes horizontes de alguns solos no Brasil. O estudo correlacionou a presença de espécies químicas como íons formados em solução, minerais primários e secundários. Além disso, foram avaliadas as características físicas e químicas como pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, entre outras, com as respostas quanto à resistência e formas de corrosão. Para tanto, foram utilizadas técnicas como difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura, fluorescência por raios X por reflexão total, análise de injeção de fluxo além de análises de granulometria e gravimetria, dentre outras. Isto foi feito com a finalidade de obter a caracterização dos solos, a identificação dos produtos de corrosão, a análise da solução dos solos, a avaliação dos metais ensaiados e a classificação das formas e tipos de corrosão. Os resultados demonstraram que diferentes horizontes dos solos, assim como os diversos tipos de solos analisados, produzem um ataque diferenciado na estrutura metálica evidenciando essa seletividade. Também, o estudo demonstrou que tais respostas podem ser rapidamente obtidas com o emprego da solução do solo como meio analítico em comparação às avaliações usuais.

STUDY OF API 5L X70 STEEL CORROSION PROCESSES WHEN IN CONTACT WITH SOME BRAZILIAN SOILS

Sérgio Luís de Jesus

Abstract

Pipelines, fuel storage tanks and other metallic structures are in permanent contact and exposed to different types of soils, of horizons or layers, or of soil aggressiveness. This interaction may cause expressive damages to the environment and to the planned work. Contamination may occur due to leakage of stored products, splitting during transportation, accidents caused by pipelines without extensive maintenance. The result of these accidents could be, among others, some financial losses. In order to recognize the dynamic interactions between metallic surfaces and the environment it is crucial to have preventive actions and to develop better-applied materials. API steel 5L X70 has been used in structures of low and high pressure with high mechanical strength and corrosion and, even so, it is susceptible to etching corrosion since it is in contact with different environments from mangrove regions to industrial environments. The present case evaluated the role of 5L X70 API steel in contact with different soil horizons representative of the Brazilian soil. This investigation correlated chemical species with solute ions in soil solution, secondary and primary phase minerals besides physical and chemical characteristics as pH, electric conductivity, total dissolved solids, among others, to the results of corrosion resistance and ways of corrosion. The evaluation was carried out using x-ray diffractometry, scanning electron microscopy, total reflection x-ray fluorescence, fuel injection flow besides texture and gravimetric analyses to soil characterization and mineralogy, identification of corrosion products, soil solution analyses, evaluation of tested materials and classification of ways and types of corrosion. This was an attempt to integrate the data to a better understanding of the process involving reagents and products. The results showed that different soil horizons such as different types of analyzed soils produce specific etching in metallic structures showing this selectivity. The study also shows that these results can be readily obtained with soil solution as an analytical means in comparison with nowadays evaluations.

Lista de ilustrações	Pag.
Figura 1 – Hastes após os cortes e jateamento para enterramento.....	29
Figura 2 – Exemplos dos corpos-de-prova produzidos para ensaios com solução do solo.....	29
Figura 3 – Perfurações para coleta de amostras de solo e como guia de enterramento.....	30
Figura 4 – Esquema indicando as profundidades de coletas e a haste enterrada (destaque em preto).....	30
Figura 5 – Hastes à meia altura durante processo de enterramento.....	32
Figura 6 – Detalhe da haste enterrada.....	32
Figura 7 – Imagem da região do experimento Areão I.....	32
Figura 8 – Imagem da região do experimento Areão II.....	32
Figura 9 – Imagem da região do experimento Areão III.....	33
Figura 10 – Imagem da região do experimento Fortaleza I.....	33
Figura 11 – Croqui de instalação do experimento Areão I.....	34
Figura 12 – Croqui de instalação do experimento Areão II.....	34
Figura 13 – Croqui de instalação do experimento Areão III.....	34
Figura 14 – Croqui de instalação do experimento Fortaleza I.....	34
Figura 15 – Perfuração lateral para extração das barras.....	35
Figura 16 – Detalhe da haste com furo na extremidade utilizado como apoio na extração.....	35
Figura 17 – Ferramentas utilizadas para extração das hastes.....	35
Figura 18 – Acondicionamento para transporte das hastes após desenterramento.....	35
Figura 19 – Escovamento das hastes para limpeza grosseira.....	36
Figura 20 – Secagem das hastes para limpeza por ataque químico.....	36
Figura 21 – Diagrama de produção para solução do solo.....	38

Figura 22 – Linha de vácuo utilizada na obtenção de solução do solo.....	38
Figura 23 – Solução do solo obtida e as medições realizadas.....	38
Figura 24 – Diagrama de controle das amostras ensaiadas.....	39
Figura 25 – Bateria de testes em soluções dos solos e corpos-de-prova.....	40
Figura 26 – Destaque para o precipitado de fundo muito fino e sobrenadante.....	40
Figura 27 – Sobreposição dos difratogramas de raios X da série de repetições de análise de calibração.....	41
Figura 28 – Difratograma de raios X para análise de resolução do equipamento e desvio angular.....	41
Figura 29 – Preparo da lâmina com coleta de material por espátula.....	42
Figura 30 – Preparo da lâmina por gotejamento.....	42
Figura 31 – Vista geral do acelerador Síncrotron.....	43
Figura 32 – Porta-amostra preparado para irradiação da amostra.....	43
Figura 33 – Diagrama de ajuste do condutivímetro.....	45
Figura 34 – Posto Agrometeorológico ESALQ/USP.....	49
Figura 35 – Aspecto das hastes do grupo Areão após a segunda etapa de desenterramento (da base para o topo: AI, AII, AIII).....	53
Figura 36 – Aspecto das hastes do grupo Areão após o último desenterramento (da esquerda para direita: AI, AII, AIII).....	53
Figura 37 – Aspecto da haste FI-1 – primeira etapa de desenterramento após procedimentos de limpeza.....	54
Figura 38 – Aspecto da haste FI-3 – última etapa de desenterramento antes do processo de limpeza.....	54
Figura 39 – Gráfico de controle de aferição das massas das 09 hastes enterradas (experimento Areão I, II, III).....	55
Figura 40 – Gráfico de controle de aferição das hastes após desenterramento (experimento Areão I, II, III).....	55
Figura 41 – Gráfico de controle de aferição das massas das três hastes enterradas (experimento Fortaleza).....	55

Figura 42 – Gráfico de controle de aferição das hastes após desenterramento (experimento Fortaleza).....	55
Figura 43 – Gráfico de perda percentual em massa ao final do experimento Areão.....	56
Figura 44 – Gráfico de perda percentual em massa ao final do experimento Fortaleza.....	56
Figura 45 – Gráfico de perda percentual em massa após 30 dias de ensaio em SS – Observação: Amostras 1, 2 e 3 – Areão I; 4, 5 e 6 – Areão II; 7, 8 e 9 – Areão III; 10, 11 e 12 – Fortaleza	62
Figura 46 – Gráfico de perda percentual em massa após 90 dias de ensaio em SS – Observação: Amostras 1, 2 e 3 – Areão I; 4, 5 e 6 – Areão II; 7, 8 e 9 – Areão III; 10, 11 e 12 – Fortaleza	62
Figura 47 – Gráfico de controle de aferição das massas dos corpos-de-prova antes do ensaio.....	63
Figura 48 – Gráfico de controle de aferição das massas dos corpos-de-prova após ensaio (90 dias).....	63
Figura 49 - Gráfico da concentração de íons cloreto em solução dos solos – Observação: 1 – Solução do solo Areão I; 2 – SS Areão II; 3 – SS Areão III; 4 – SS Fortaleza	67
Figura 50 - Gráfico da concentração de íons sulfato em solução dos solos - Observação: 1 – Solução do solo Areão I; 2 – SS Areão II; 3 – SS Areão III; 4 – SS Fortaleza	68
Figura 51 - Gráfico da concentração de íons nitrato em solução dos solos - Observação: 1 – Solução do solo Areão I; 2 – SS Areão II; 3 – SS Areão III; 4 – SS Fortaleza	68
Figura 52 – Micrografia eletrônica de varredura demonstrando a superfície do corpo-de-prova imerso em SS Fortaleza – amostra FI-2.....	71
Figura 53 – Micrografia eletrônica de varredura destacando região com formação de produtos de corrosão.....	71
Figura 54 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando o aspecto geral do corpo-de-prova imerso em SS Areão I – amostra AI-2.....	72
Figura 55 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando a superfície do corpo-de-prova em região adjacente à região da figura 51.....	72
Figura 56 - Espectroscopia por dispersão em energia (EDs) da região observada na figura 51.....	73

Figura 57 - Espectroscopia por dispersão em energia (EDs) da região observada na figura 49.....	73
Figura 58 – Difrátograma de raios X dos produtos de corrosão na SS das amostras Areão I em triplicata – Observação: Lp – Lepidocrocita; Mg – Maghemita; Mn – Magnetita.....	74
Figura 59 – Difrátograma de raios X dos produtos de corrosão na SS das amostras Areão II. Observação: Lp – Lepidocrocita; Mg – Maghemita; Mn – Magnetita.....	75
Figura 60 – Difrátograma de raios X dos produtos de corrosão na SS das amostras Areão III. Observação: Lp – Lepidocrocita; Mg – Maghemita; Mn – Magnetita.....	76
Figura 61 – Difrátograma de raios X dos produtos de corrosão na SS das amostras Fortaleza I. Observação: Lp – Lepidocrocita; Mg – Maghemita; Mn – Magnetita.....	77
Figura 62 – MEV - Aspecto geral dos produtos de corrosão na amostra AI – 1 – representativo.....	78
Figura 63 – MEV - Aspecto geral dos produtos de corrosão na amostra FI – 2 – representativo.....	78
Figura 64 – Detalhe das fases na amostra AII – 2.....	79
Figura 65 – Análise por EDS da região na figura 45.....	79
Figura 66 - Detalhe das fases na amostra AII – 2.....	80
Figura 67 - Análise por EDS da região na figura 47.....	80
Figura 68- Gráfico da distribuição de tamanho de partículas nos horizontes dos solos avaliados.....	83
Figura 69 – Difrátograma de raios X do solo identificado como Areão I – obs.: K – caulinita; Q – quartzo; H – hematita; profundidade em centímetros.....	85
Figura 70 – Difrátograma de raios X do solo identificado como Areão II - obs.: K – caulinita; Q – quartzo; H – hematita; profundidade em centímetros.....	86
Figura 71 – Difrátograma de raios X do solo identificado como Areão III - obs.: K – caulinita; Q – quartzo; H – hematita; profundidade em centímetros.....	87
Figura 72 - Difrátograma de raios X do solo identificado como Fortaleza - obs.: Q – quartzo; profundidade em centímetros.....	88
Figura A73 – Gráfico da precipitação média na região da Base Meteorológica	122

em Piracicaba (BM).....	
Figura A74 – Gráfico da quantidade de dias de chuva por mês na BM absolutos e média histórica.....	122
Figura A75 – Gráfico indicando a evaporação em milímetros em tanque Classe A.....	122
Figura A76 – Gráfico da umidade relativa na BM por mês e média histórica.....	122
Figura A77 – Gráfico da insolação na BM por mês e média histórica.....	122
Figura A78 – Gráfico da radiação global na BM por mês e média histórica.....	123
Figura A79 – Climograma das médias comparado à média histórica na BM.....	123
Figura A80 – Climograma das mínimas comparado à média histórica na BM.....	123
Figura A81 – Climograma das máximas comparado à média histórica na BM.....	123
Figura A82 – Gráfico da precipitação média na região da Base Meteorológica em Piracicaba (BM).....	123
Figura A83 – Gráfico da quantidade de dias de chuva por mês na BM absolutos e média histórica.....	123
Figura A84 – Gráfico indicando a evaporação em milímetros em tanque Classe A.....	124
Figura A85 – Gráfico da velocidade média de vento na BM.....	124
Figura A86 – Gráfico da umidade relativa na BM por mês e média histórica.....	124
Figura A87 – Gráfico da insolação na BM por mês e média histórica.....	124
Figura A88 – Gráfico da radiação global na BM por mês e média histórica.....	124
Figura A89 – Climograma das médias comparado à média histórica na BM.....	124
Figura A90 – Climograma das mínimas comparado à média histórica na BM.....	125
Figura A91 – Climograma das máximas comparado à média histórica na BM.....	125

Lista de tabelas	Pág.
Tabela 1 – Composição química da liga utilizada (grau API5LX70) fornecida pela Empresa USIMINAS S/A	29
Tabela 2 – Coordenadas geográficas da área dos experimentos em UTM (m) e graus (°).....	31
Tabela 3 - Massas das hastes enterradas.....	57
Tabela 4 – Medida do pH dos solos e das soluções dos solos avaliados.....	59
Tabela 5 – Medidas de condutividade elétrica dos solos e das soluções avaliadas.....	59
Tabela 6 – Medida de sólidos totais dissolvidos nas soluções dos solos avaliados.....	62
Tabela 7 - Massas (g) dos corpos-de-prova antes do ensaio - após 30 e 90 dias de ensaio.....	64
Tabela 8– Avaliação da demanda bioquímica de oxigênio das soluções dos solos.....	66
Tabela 9 – Concentrações dos elementos químicos nas amostras de solução dos solos (ppm).....	69
Tabela 10 – Análise granulométrica dos solos estudados.....	82
Tabela A11 – Dados meteorológicos de Dezembro 2005.....	109
Tabela A12 – Dados meteorológicos de Janeiro 2006.....	110
Tabela A13 – Dados meteorológicos de Fevereiro 2006.....	111
Tabela A14 – Dados meteorológicos de Março 2006.....	112
Tabela A15 – Dados meteorológicos de Abril 2006.....	113
Tabela A16 – Dados meteorológicos de Maio 2006.....	114
Tabela A17 – Dados meteorológicos de Junho 2006.....	115
Tabela A18 – Dados meteorológicos de Julho 2006.	116
Tabela A19 – Dados meteorológicos de Agosto 2006.	117
Tabela A20 – Dados meteorológicos de Setembro 2006.	118
Tabela A21 – Dados meteorológicos de Outubro 2006.	119

Tabela A22 – Dados meteorológicos de Novembro 2006.	120
Tabela A23 – Dados meteorológicos de Dezembro 2006.	121
Tabela B24 – Sinopse das características e propriedades dos solos e soluções relacionadas ao potencial corrosivo dos solos.	126

Lista de abreviaturas e siglas

Aa – Argissolo Amarelo

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

API – American Petroleum Institute

ASTM – American Society for Testing Materials

AWWA – American Water Works Association

BSR – Bactéria sulfato-redutoras

CIPRA - Cast Iron Pipe Research Association

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO - Demanda bioquímica de oxigênio

DIN – Deutsches Institut für Normung

DQO – Demanda química de oxigênio

DRX – Difração de raios X

EDS – Energy-dispersive spectrometry

EIS – Electrochemical impedance spectroscopy

EPA – Environmental Protection Agency

FTIR – Fourier transform infrared spectroscopy

GASBOL – Gasoduto Bolívia – Brasil

GPS - Global position system

ICDD - International Center for Diffraction Data

IRS – Infrared spectrometry

JCPDS - Joint Committee for Powder Diffraction System

Lv – Latossolo Vermelho

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

NBS - National Bureau of Standards

Nq – Neossolo Quartzarênico

Nv – Nitossolo Vermelho

OD – Oxigênio dissolvido

pH – Potencial hidrogeniônico

PIXE – Particles-induced x-ray emission

SCC – Stress corrosion cracking

SEM – Scanning electron microscopy

SS – Solução do solo

USDA-SCS – United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service

XPS – X-ray photoelectron spectroscopy

μ XANES – Micro x-ray absorption near-edge spectrometry

μ XRD – Micro x-ray diffraction

Lista de símbolos

m	metro
m ²	metro quadrados
m ³	metro cúbicos
rad	radiano
s	segundo
Hz	hertz
m.s ⁻¹	metro por segundo

kg	quilograma
kg.m ⁻³	quilograma por metro cúbico
mol	mol
N	newton
Pa	pascal
J	joule
W	watt
A	ampère
C	coulomb
V	volt
Ω	ohm
S	siemen
F	farad
°C	graus Celsius
K	kelvin
cd	candela
lm	lúmen
lx	lux
k	quilo
d	deci
c	centi
m	mili
μ	micro
n	nano
p	pico

Sumário

1. Introdução	1
2. Revisão bibliográfica	4
3. Experimental	29
3.1 Aspectos gerais e preparo dos corpos-de-prova	29
3.2 Coleta de amostras de solo	30
3.3 Enterramento das hastes	31
3.4 Desenterramento das hastes	34
3.5 Preparo da solução do solo	37
3.6 Ensaio dos corpos-de-prova em solução do solo	39
3.7 MEV – corpos-de-prova e produtos de corrosão	40
3.8 Caracterização mineralógica dos solos por difração de raios X	40
3.9 Caracterização dos produtos de corrosão por difração de raios X	42
3.10 Análise multi-elementar por SR-TRXRF das soluções dos solos	42
3.11 Medidas de condutividade elétrica e sólidos suspensos das soluções	44
3.12 Análise granulométrica dos solos	45
3.13 Condutividade elétrica dos solos	46
3.14 Medidas de pH dos solos e das soluções	46
3.15 Análise de demanda bioquímica de oxigênio das soluções	47
3.16 Análise dos ânions por injeção em fluxo	47
3.17 Análise gravimétrica das hastes e corpos-de-prova	48
3.18 Tipos de solos	49
3.19 Coleta de dados meteorológicos	49
3.20 Metrologia aplicada aos equipamentos e resultados	50
3.21 Análise estatística aplicada ao experimento	51
4. Resultados e discussão	52
5. Conclusões	93
Referências bibliográficas	95

Bibliografía consultada	105
Anexo	108
Dados Meteorológicos	109
Gráficos de datos metereológicos	122

1. Introdução

Além de uma extensa malha de aquedutos, oleodutos e eletrodutos existem, aproximadamente, 30 mil postos de gasolina no país sendo que 8,4 mil estão localizados na Grande São Paulo. No município de São Paulo há 2,8 mil postos, bem como, diversas construções metálicas em constante contato com solos [ANP, 2004].

Como conseqüências desses contatos entre estruturas metálicas e solos podem ocorrer danos por corrosão o que implicam em contaminações do ambiente causadas por vazamento dos produtos de estocagem em tanques, derramamentos durante transporte em dutos, liberação de metais pesados além de outros acidentes causados por tubulações sem adequada manutenção.

Oportuna se faz a breve menção aos dutos ou polidutos que englobam gasodutos, oleodutos, minerodutos e tubos de transportes de materiais sob ou sobre superfície, construídos de acordo com normas internacionais de segurança e que, ainda assim, sucumbem à ação do meio. Uma vez que estão em contato com diferentes tipos de ambientes, até mesmo conectando-os, como é o caso de dutos transportando derivados de petróleo de píeres marítimos a estações refinadoras, a ocorrência de falhas por corrosão torna-se mais complexa e de difícil controle.

Estudos de corrosão são conduzidos com o intuito de propor alternativas de controle, prevenção, tratamento e interrupção de danos mais sérios. Estes estudos são temas constantes de trabalhos envolvendo a interação de solos e polidutos [Gardiner e Melchers, 2002; Bradford, 2000; Kim e Kim, 2001; Palmer, 1989]. Aspecto semelhante ocorre com tanques de gasolina, de álcool, de óleo diesel e demais produtos químicos os quais estão expostos aos ataques corrosivos dos materiais contidos e no contato com solo no preenchimento externo, dando causas a vazamentos perenes de difícil detecção.

Atualmente, usando jaquetamento de tanques, isto é, tanques com paredes duplas, tais ocorrências têm sido minimizadas juntamente com a normatização adequada e a crescente fiscalização [Cole, 1992; EPA, 2004; CONAMA, 2006; ASTM, 2005], além das práticas de revestimento interno e externo das tubulações. Entretanto, alguns problemas persistem e

continuam sob foco de avaliação de diversas fontes com trabalhos propondo novas alternativas em relação à estocagem, detectores de vazamentos e técnicas de acondicionamento estrutural [EPA, 2004; Hudak, DAVID e HUNTER 1999; Leavenworth, 1987].

Daí observa-se que outras áreas têm ligação expressiva com o assunto cujos desdobramentos do estudo da corrosão de polidutos podem influenciar positivamente. É o caso das redes de cabeamentos elétricos, telefônicos, linhas de transmissão e dutos de transporte de água, esgoto e efluentes, entre outros.

De igual maneira, outra vertente que demanda atenção e trabalhos intensos são as instalações e recipientes para o uso na indústria nuclear. Instalações essas, usadas no transporte de produtos ou rejeitos na planta nuclear e no armazenamento de resíduos. Neste caso, pressupõe-se que o estoque do material seja por longos períodos e que estas instalações fiquem em contato com solo não podendo sequer considerar-se o derrame ou contaminação do produto no mesmo ou em lençóis freáticos. Isto é devido ao longo período de decaimento (ou meia-vida) do produto e a toxidade produzida [Corbett e Jenkins, 1989; Savoye et al., 2001].

Também, outra linha de estudo que soma esforços na compreensão da ação do solo em materiais metálicos advém do estudo de objetos arqueológicos. Face à natureza e preciosidade, no momento da escavação ou na preservação, requerem o entendimento dos processos de corrosão nessas estruturas [Gerwin e Baumhauer, 2000].

Uma boa parte dos trabalhos atualmente tem se concentrado no estudo da corrosão dos metais em contato com solo quanto aos parâmetros que relacionam maior ou menor agressividade do meio. Ou ainda, nas formas de inibição da corrosão como proteção catódica, revestimento, ligas mais resistentes, etc. [Cole, 1992; Parker e Peatie, 1984].

Dentre os estudos mencionados, poucos abordam os mecanismos de corrosão que envolve a ação intrínseca dos constituintes do solo, suas propriedades e características. E é isto que pode diferenciar os comportamentos dos materiais sob corrosão nos solos.

Diversos estudos publicados não abordam a formação do solo como elemento definidor da potencial agressividade corrosiva. Dada a complexidade da discussão, as contribuições têm sido feitas de forma gradativa e lenta quando comparadas à evolução de conhecimento sobre os outros meios de corrosão. Como exemplo, pode-se citar os ambientes úmidos, contatos entre sólidos, atmosferas gasosas, líquidas e semelhantes. No entanto, o problema da ação do solo como agente corrosivo em contato com superfícies metálicas está documentado emprestando significado e atenção de tal forma que as perspectivas de expansão no setor sugerem o incremento dos problemas de manutenção e prevenção.

Portanto, fica indicada a importância desse estudo na expectativa de melhor compreender os mecanismos da ação agressiva dos solos em metais e a proposição das formas de controle e prevenção da corrosão.

Objetivo do trabalho

Demonstrar a dependência entre a intensidade da corrosão eletroquímica em metais e os diversos horizontes de perfil de alguns solos característicos do Brasil.

Relacionar a influência das características e propriedades físico-químicas dos solos estudados nos processos de corrosão no aço API 5L X70.

Desenvolver metodologia adequada para avaliações dessa natureza e testar a solução dos solos como meio eletrolítico provendo um método rápido e eficaz de avaliação do potencial de corrosividade de cada solo estudado.

2. Revisão bibliográfica

O uso de dutos como alternativa logística de transporte e estocagem de substâncias combustíveis e químicas teve um grande avanço no século XX com a tecnologia de produção de aços. Entretanto, o aprimoramento continua na expectativa de encontrar ligas com maior resistência mecânica e à corrosão e um fato bem evidente acerca disso é que os diâmetros de tubulações fabricadas aumentaram expressivamente, além da qualidade dos revestimentos de proteção que são aplicados aos dutos e tanques enterrados. Como exemplo, o trabalho de **HULKA** (2001) analisa o desenvolvimento histórico dos aços utilizados em tubulações atribuindo às vantagens econômicas o uso de aços de alta resistência para operação com diâmetros maiores no escoamento do material de interesse. Segundo o autor, um grande salto ocorreu na década de 1970 quando o processo de laminação termomecânica foi introduzido e o elemento nióbio se tornou essencial em micro ligas. O desenvolvimento de aços aplicados a tubulações teve como foco o processamento, a microestrutura e as propriedades caracterizadas por um contínuo refinamento de grão.

No Brasil, artigo de **PRATES, PIEROBON e FIGUEIREDO** (2006) avalia o cenário atual sobre o setor de gás o qual tem impacto intenso no setor de polidutos destacando os aspectos econômicos em perspectiva histórica.

A partir de 1999 o setor recebeu um incremento gradativo em virtude do início das operações do Gasoduto Bolívia – Brasil (GASBOL) e o percentual de participação da oferta de gás no país subiu de 5,4% para 9,3%. Porém, a recente nacionalização da produção de gás natural na Bolívia produziu incertezas e restrições de tal ordem que novas estratégias vão sendo desenvolvidas em resposta às ações políticas. Dentre essas, a expansão da malha de transporte que conta com 5,4 mil km de extensão pouco, se comparada à malha norte americana com 150 mil km, sugerindo a enorme expectativa de crescimento para esse modal.

Há diversos projetos em fase de estudos no Brasil e merece destaque o Projeto Malhas (**PRATES, PIEROBON e FIGUEIREDO**, 2006) que ampliará significativamente a oferta nas regiões Sudeste e Nordeste. Consequentemente, há uma relação entre a expansão da malha de

transporte e as redes de distribuição que fazem o produto chegar ao consumidor final que contam atualmente com aproximadamente 12,9 mil km de extensão. Conjugados esses fatores, além de outros aspectos, a perspectiva é promissora em vista da necessidade de amplo investimento no setor para atender a demanda conquistada.

No entanto, estruturas metálicas em contato com solos são alvos fáceis ao fenômeno da corrosão, tanto que **CREIG-SMITH** (2001) argumenta que tubulações de água não revestidas interna e externamente irão corroer após um período de tempo, externamente onde está em contato com o solo e internamente devido ao contato com a água. Por conta disso, as paredes dos dutos se tornarão mais finas com a conseqüente redução da resistência mecânica e, finalmente, a possível ruptura da tubulação. Dessa forma, a integridade de antigas tubulações foi examinada pelo autor a partir de uma série de testes destrutivos e não-destrutivos a fim de determinar as condições do revestimento interno e externo da tubulação. A partir daí, sugere que decisões podem ser tomadas avaliando a melhor alternativa entre substituição ou reparo da tubulação evitando custos desnecessários.

Outro problema significativo para dutos revestidos é a presença de CO_2 e este é um dos temas estudados por **SONG et al.** (2002). Este tipo de ataque corrosivo ocorre frequentemente na presença de precipitados de FeCO_3 ou de Fe(OH)_2 , carbonato de ferro e hidróxido de ferro, respectivamente. Embora nenhum desses precipitados produza barreiras ao transporte de O_2 , CO_2 e íons uma vez que são porosos, os precipitados podem afetar o andamento da corrosão visto que altera o pH na superfície do metal. Para a corrosão de aços em região com ruptura de revestimentos há uma pressão crítica na razão de O_2 e CO_2 que separa os precipitados. Quando a difusão de O_2 através do revestimento controla a taxa de corrosão a razão é de 9/20 acima disso o precipitado é Fe(OH)_2 . Do contrário, o precipitado é FeCO_3 . Portanto, o objetivo do estudo foi explorar as condições de formação desses precipitados e entender o mecanismo que regula o processo de corrosão.

Expandindo essa linha de raciocínio em outro trabalho **SONG, KIRK e CORMACK** (2005) discutem um modelo que prevê a corrosão em sistemas de transmissão de óleo e gás em poldutos a partir de três cenários: corrosão sem aeração por CO_2 , com aeração por CO_2 e, por

fim, com proteção catódica em meio aerado. Para os autores, a presença de CO_2 está associada à ocorrência de falhas por corrosão sob tensão (SCC, em inglês) e à corrosão galvânica tanto interna, quanto externamente às tubulações. Internamente, pelo fato de CO_2 ser usado como gás diluente e, externo ao poliduto, o contato com a espécie química presente na fase gasosa do solo. O modelo esclarece a dependência entre a difusão de H^+ e H_2CO_3 uma vez que resulta da dissociação desse último. Por fim, o modelo mostra-se como uma ferramenta adequada para a prevenção de corrosão na presença de CO_2 tendo sido testado em experimentos independentes.

A ação de substâncias húmicas, componentes típicos da matéria orgânica no solo, foram testadas em contato com amostras de aço API 5L X56 e ASTM 283C, aplicados a dutos e tanques, a fim de avaliar o comportamento desses aços diante dos processos de corrosão relacionando também a parâmetros físico-químicos de solos coletados na região de instalação de um oleoduto localizado entre as cidades de Osório e Canoa (RS). De acordo com os autores (**RODRIGUES e DICK, 2003**), a presença de microorganismos, substâncias húmicas e outros parâmetros físico-químicos não são estáveis, como já é bem conhecido, o que explica a dificuldade em prever a agressividade de solos. Os corpos-de-prova dos aços foram testados em células de três eletrodos ao serem colocados em contato com ácidos húmicos extraídos de substâncias húmicas. As observações por MEV indicaram o ataque localizado nos corpos-de-prova em regiões de inclusões complexas ricas em enxofre.

A discussão sobre corrosão de tubulações metálicas em contato com solos envolve diversas abordagens ou estratégias de estudo. Uma vez que se pretende minimizar os efeitos da agressividade do solo em metais, pesquisas em diferentes campos do conhecimento trazem contribuições ao tema, como no caso dos estudos de artefatos arqueológicos e as diversas técnicas de caracterização de produtos de corrosão. Dessa forma, compreender o que ocorre com o metal em contato com o solo, a exata caracterização dos produtos de corrosão, tipos de proteção e quais os materiais metálicos que se encontram em contato com solo e exibem problemas semelhantes permitem melhor compreensão sobre esse complexo fenômeno.

Com relação a tubulações metálicas, alguns países encontram-se em estágio avançado de controle na malha de polidutos em respeito à manutenção preventiva, preditiva e corretiva. Esse

é o caso do Canadá, em especial a cidade de Toronto que conta com um programa extenso na abordagem desse tipo de problema. Em um desses trabalhos **SEICA et al. (2002)** analisaram falhas comuns na rede de tubulações da cidade de Toronto que conta com 5.347 km de extensão durante um programa de três anos visando à análise de 100 amostras exumadas de tubulações e ao mesmo tempo amostras de solos extraídas dos locais de enterramento analisadas e classificadas quanto à agressividade por corrosão. Segundo os autores, para desenvolver um plano adequado de contingenciamento de falhas e manutenção de tubulações é necessária a abordagem e conhecimento de três aspectos fundamentais:

- o estado de deterioração do sistema;
- o mecanismo pelo qual o sistema falhou;
- a identificação da rede que requer serviços na forma de reparo ou manutenção.

O trabalho demonstrou que 95% das tubulações analisadas apresentaram corrosão variando de dano moderado a severo e sugerindo alternativas de reparos nas diferentes condições. Ressaltam que, embora a cidade de Toronto não seja caracterizada pela presença de solos agressivos, ainda assim existem áreas com elevado potencial de corrosividade. Diferentes formas de falhas foram identificadas com preponderâncias para rupturas circunferenciais, longitudinais e furos de escape. Dai que propõem a formação de um banco de dados envolvendo propriedades mecânicas, histórico de falhas de tubulações e a distribuição de propriedades de solos através de Sistemas de Informação Geográfica (GIS) em multicamadas, entre outros aspectos. Tal projeto continua em desenvolvimento e devido a sua repercussão tem sido motivo de recomendações a novos estudos.

Em trabalho posterior e continuando o estudo já citado a partir dos dados coletados com as amostras **DOYLE, SEICA e GRABISKY (2003)** estendem a discussão a fim de propor uma explicação para a intensidade da corrosão externa em tubulações no distrito de Etobocoke em relação ao distrito de Toronto aventando como uma das possíveis causas a presença de bactérias sulfato-redutoras (BSR) induzindo à corrosão microbiológica em vista das elevadas concentrações de sulfetos nas amostras avaliadas após análises espaciais. Uma vez que utilizaram o sistema de classificação de corrosividade de solos da *American Water Works*

Association (AWWA) puderam constatar a limitação em produzir uma avaliação adequada, especialmente, na previsão de solos não-corrosivos. Além disso, concluíram que a resistividade do solo é a propriedade mais relacionada à taxa média de presença de pites na porção externa das tubulações.

Evidentemente, dutos que não têm a devida proteção ou perda de recobrimento estão sujeitos às falhas devido à corrosão. **BURSTEIN et al.** (2004) discutem a corrosão por pite (pitting corrosion, em inglês) em vista de ser uma das formas mais intensas de corrosão que geram falhas de mecanismos. A falha por pite em metais ocorre devido à perfuração do metal e também pode causar a falha por ruptura devido à tensão mecânica.

Mesmo que os pites tenham escala microscópica normalmente nucleiam atingindo escalas macroscópicas e, portanto, também debatem os mecanismos de nucleação. Dessa forma entendem o processo por pite em passos consecutivos.

O estudo é conduzido a partir de eletrólitos contendo cloro e argumentando que o evento de nucleação é um processo violento, ainda que microscópico, e é devido à migração do íon cloreto do eletrólito para a interface metálica. A partir desse raciocínio estendem a discussão aos demais passos abordando os diferentes estágios da corrosão por pite.

Outro fator que concorre para falhas nas tubulações é a corrosão induzida microbiologicamente. O foco do estudo de **DUAN, HOU e YU** (2005) prende-se à constatação de que comunidades microbiológicas têm atuação importante nos processos de corrosão de aços expostos em ambientes aquáticos e em solos.

Acredita-se que a biomineralização influenciada por microorganismos seja responsável pela formação de produtos de corrosão através de um caminho complicado de transferência de elétrons entre as células microbiológicas e o metal. As espécies orgânicas e inorgânicas de sulfetos em filmes passivos em aços inoxidáveis foram observadas em microscópio epifluorescente, MEV / EDS e XPS. Logo, a transformação de óxidos metálicos em sulfetos metálicos influenciados pela BSR é enfatizada no estudo. Além disso, os processos de corrosão

nas superfícies dos metais estão associados aos microorganismos ou aos produtos metabólicos das atividades incluindo enzimas, exopolímeros, ácidos orgânicos e inorgânicos, assim como, compostos voláteis como amônia ou sulfeto de hidrogênio. Isso pode afetar reações catódicas ou anódicas alterando a eletroquímica na interface biofilme / metal. Diferentes mecanismos de biocorrosão refletindo a variedade das atividades fisiológicas conduzidas por diferentes tipos de microorganismos foram identificados e recentes proposições foram revistas nesses mecanismos.

As atuais investigações têm focado a influência microbiológica na corrosão de ligas de ferro e cobre e os microorganismos de particular interesse têm sido as bactérias sulfato-redutoras e bactérias depositoras de metal (especialmente manganês).

BEECH e CHRISTINE (1999) enfatizam a importância da conjunção microbiológica e o papel de substâncias poliméricas extracelulares na biocorrosão. Além dos aspectos citados, o estudo desses autores também discute o uso de técnicas analíticas como microscopia de força atômica, espectroscopia de emissão de raios X, emissão Auger, Mössbauer entre outras, como ferramentas adequadas para a abordagem desses problemas.

Diante de tantas possibilidades de danos às estruturas uma linha de pesquisa intensa trata das proteções às tubulações, tanques, etc. **OCÓN et al.** (2005) obtiveram um revestimento de polipirrole através de galvanoplastia por eletropolimerização em eletrodos de aço doce em solução aquosa. As respostas eletroquímicas dos eletrodos revestidos no estado dopado e não-dopado foram comparadas com eletrodos em forma de barras de aço doce sendo que os eletrodos não-dopados com polipirrole se mostraram mais resistentes aos processos de corrosão.

Também, amostras de tubulações protegidas por revestimentos depositados por galvanoplastia no trabalho de **SHEIKH** (2005) foram submetidas a avaliações por microscopia eletrônica de varredura e analisados diante das caracterizações de solos nas regiões onde o material foi suscetível a ataques por pites. Os resultados indicaram que a proteção por galvanização provê condições ideais para a proteção dos aços devido à versatilidade de aplicação sob condições normais de exposição. Isso ocorre por causa do comportamento do zinco, normalmente utilizado em proteção catódica. Entretanto, quando o revestimento é

danificado inicia-se o processo de corrosão na superfície metálica e, em caso de ataque por bactérias, são produzidos pites em diversas profundidades. A formação de íons sulfetos como resultado da ação de bactérias anaeróbicas ou a formação de ácido nítrico devido a bactérias aeróbicas também pode dissolver o revestimento de zinco e, portanto, pites são formados. O trabalho conclui afirmando que o processo por pite é devido ao ataque de bactérias.

Tais falhas geram preocupações sociais e é dessa forma que **MOSCHINI, SANTOS e PIRES** (2005) demonstram tais apreensões no estudo com o mapeamento de postos de combustível na área urbana da cidade de São Carlos/SP - Brasil. O diagnóstico final relaciona os tipos de solos e a contaminação de água superficial e do lençol freático devido a vazamentos de combustível em acidentes ou por tanques de estocagem sub-superfície. Segundo os autores, conhecer a distribuição de tais unidades auxilia nas políticas de controle e normatização do setor reduzindo os riscos de eventuais acidentes com prejuízos ao ambiente.

Da mesma forma, tanques de armazenamento de combustíveis, quando vazam, frequentemente contaminam solos urbanos e água, conforme **HUDAK, DAVID e HUNTES** (1999). Com um Sistema de Informação Geográfica mapearam 1068 tanques de armazenamento de combustível em Denton County, Texas, USA. A localização dos tanques foi comparada com solos que apresentavam minerais secundários e potencial de corrosividade. Altos percentuais de vazamentos de tanques foram observados nos solos expansivos e corrosivos. O estudo demonstrou a utilidade do Sistema de Informação Geográfica para sobrepor camadas de dados que podem afetar a integridade de tanques sub-superfície. Essas sobreposições podem auxiliar nas políticas para identificar regiões de perigo potencial onde se encontram instalados tais tanques.

Também, há intensa aplicação de dutos na área nuclear e esforços têm sido direcionados a fim de evitar acidentes de qualquer natureza. Por exemplo, **CANTRELL et al.** (2006) caracterizaram fases minerais contaminadas por vazamento de tanques enterrados contendo rejeito nuclear. Diversas técnicas como análises por fusão, extração seletiva, medidas de solubilidade e modelamento termodinâmico foram utilizadas também na quantificação dessas espécies minerais. A importância do estudo reside no fato de que a estocagem de rejeito nuclear

envolve longos períodos de meia-vida dos radionuclídeos e, em caso de derrame, ou rompimento das paredes de contenção dos tanques pode levar à contaminação dos lençóis freáticos e dos solos em vista da alta mobilidade dos contaminantes em solos oxidados. Para isso, o estudo propõe formas de dissolução das fases minerais nos radionuclídeos eventualmente liberados.

Por outro lado, uma alternativa eficaz de estocagem de rejeitos radioativos é através da fusão do material com vidro e posterior estocagem em container à base de borosilicatos acondicionados em recipientes de aço inoxidável.

OJOVOAN et al. (2006) analisaram vidros borossilicatados usados na imobilização de rejeitos radioativos após 16 anos de estocagem contidos em recipientes de aço inoxidável em solo argiloso e os resultados indicaram baixa taxa de corrosão nos recipientes e as condições de segurança quanto aos radionuclídeos. O trabalho experimental é extensivo inclusive pelo detalhamento das caracterizações que também se concentrou nas camadas não-homogêneas na superfície do recipiente de vidro. A camada analisada indicou pequenas inclusões cristalinas e amorfismo em sua maior parte. O pH da lâmina de água em contato com o vidro radioativo variou de 7,5 a 7,9 e a lâmina se apresentou levemente contaminada com ^{137}Cs , um dos produtos estocados. Por fim, o trabalho demonstra o decréscimo da contaminação do meio com o tempo o que justifica os estudos atuais com esse tipo de técnica de estocagem de resíduos nucleares.

Outro aspecto que auxilia a compreensão dos fenômenos de corrosão em tubulações é a caracterização dos produtos de corrosão. É dessa forma que o trabalho de **RODRIGUES HERNANDEZ** e **GONZALES** (2003) foi conduzido para identificação de produtos de corrosão em aço carbono exposto a atmosferas rural, urbana, marinha e marinho-industrial utilizando técnicas de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura tendo êxito na identificação das fases como akaganeita seguida de lepidocrocita, goethita e magnetita. Também, segundo os autores, outra fase não identificada na forma de ferrugem verde II foi detectada. De acordo com o estudo a capacidade de proteção da superfície aumenta no primeiro ano e, após isso, decai. Uma expressão matemática hiperbólica foi utilizada para modelar o

efeito da proteção da camada contendo os produtos de corrosão apresentando valores de regressão bem ajustados.

A influência do nível de oxigênio e bicarbonato na corrosão de aços foi examinada por **SAVOYE et al.** (2001) durante os primeiros estágios de estocagem de discos de ferro a 90 °C em solução com níveis diferentes de oxigênio e concentrações de carbonato. A natureza dos produtos de corrosão formados foi investigada por FTIR, espectroscopia Raman e microscopia eletrônica de varredura. Foi mostrado que o alto conteúdo de bicarbonato promove a formação de siderita qualquer que seja o nível de oxigênio. Diminuindo o conteúdo de bicarbonato é favorecida a formação de $\text{Fe II (OH)}_x(\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-})_y$ com o acréscimo de x e decréscimo de y. Tais espécies podem transformar-se em ferrugem verde GR1 (espécies intermediárias) na forma de um precipitado em gel, magnetita ou lepidocrocita dependendo do nível inicial de oxigênio.

A suscetibilidade à corrosão de aços enterrados em solos e simulados em laboratório foi avaliada pelas técnicas de perda de peso e contagem de produtos de corrosão no trabalho desenvolvido por **OGUZIE, AGOCHUKWU e ONUCHUKWU** (2004). Os resultados permitiram a classificação quanto à quantidade de produtos de corrosão provenientes dos solos em: argila >> areia > silte. Na ausência de íons associados aos processos corrosivos, faixas semelhantes de pH, aeração limitada e elevada umidade, a profundidade do solo e a textura foi corroborada pela alta suscetibilidade à corrosão para os aços enterrados. Portanto, a técnica de contagem de produtos de corrosão, segundo os autores, pode ser utilizada para estimar as taxas de corrosão dessas estruturas. Também, o estudo mostra que a ordem de corrosividade baseada na textura dos solos é dada por: argiloso >> arenoso < siltoso.

Por sua vez, **LEVLIN** (1996) avaliou solos a fim de identificar células de aeração diferencial consistindo de placas de aço carbono na forma de ânodos enterrados em blocos de argila e a parte catódica enterrada em material de enchimento. Foram usadas duas células de aeração, uma delas com uma placa catódica de mesmo tamanho da placa anódica e outra placa catódica 10 vezes maior do que a placa do experimento anterior. Portanto, a relação ânodo-catodo de 1:1 e no segundo caso 1:10. Como referência, o potencial de corrosão das placas sem nenhuma conexão com células de aeração também foram medidas. A corrosão das placas

anódicas foi calculada para a corrente de célula de 31,7 $\mu\text{m/ano}$ e 5,0 $\mu\text{m/ano}$ para a célula com razão de área de 10 e de 1, respectivamente. A diferença entre as correntes de células aumentou com o tempo de 3 vezes no começo para aproximadamente 8 vezes maior. Segundo o autor isso pode ser explicado pela deposição de produtos de corrosão nas placas catódicas causando intensa dissolução anódica para ser transferida à placa anódica.

Em outra abordagem **SRIKANTH et al.** (2004) investigaram falhas causadas por corrosão em tubulações de aço recobertos com betúmem. Caracterizações químicas e metalúrgicas das regiões corroídas e os produtos de corrosão não apresentaram dados incomuns. O solo adjacente à tubulação foi caracterizado como medianamente agressivo em termos de potencial redox, pH, cloretos e sulfatos solúveis, concentração de bactérias sulfato-redutoras e ácidos produzidos por bactérias na extensão da tubulação. Entretanto, o gradiente de potencial na superfície do solo e a tubulação em várias regiões em função do tempo indicaram a presença de correntes diretas. Vale observar que rápidas e freqüentes falhas constatadas são promovidas por correntes diretas que provocam corrosão, como indicou o estudo.

Por outro lado, a abordagem eletroquímica produz um refino de informações expressivo ao ser aplicada a casos semelhantes. Alguns sistemas operacionais de transmissão por dutos desenterrados desenvolveram corrosão superficial não detectável visualmente.

O comportamento da corrosão eletroquímica de tubulações de baixo carbono em soluções de teste de solo NS4 foi investigado com uso de espectroscopia de impedância por **BENMOUSSAT e HADJEL** (2005). O fenômeno da corrosão é acentuado pela influência dos parâmetros dos solos como resistividade, pH, temperatura, conteúdo de umidade e composição química dos eletrólitos contidos no solo. Os resultados mostraram que a corrosão de aços aumenta consideravelmente em ambientes de pH ácido. A densidade de corrente de corrosão aumenta expressivamente com a temperatura na faixa de 20 a 60 °C. A energia de ativação associada foi determinada e as curvas de impedância mostraram que a resistência de transferência de carga (R_t) aumenta com a duração de imersão.

Parâmetros como densidade de corrente de corrosão (I_{corr}), resistência de polarização (R_p) e resistividade do solo (ρ) podem servir de parâmetros para a avaliação da corrosividade do solo. Assim, de acordo com o trabalho, a corrosão em estruturas metálicas ocorreu, principalmente, com a presença de umidade em solos argilosos e com a atividade de bactérias com forte influência das propriedades físico-químicas dos solos.

BLENGINO et al. (1995) direcionaram seus estudos para as camadas de corrosão desenvolvidas na superfície de ferros em meio contendo carbonato-bicarbonato na região potencial ativo-passiva e relacionado com fraturas por corrosão devido à tensão. Diversas técnicas de caracterização como EIS, IRS, MEV e EDS permitiram identificar as finas camadas formadas de siderita e complexos óxidos férricos e ferrosos, sendo o primeiro o principal componente. De acordo com o estudo, a formação dessas espécies químicas pode estar relacionada à corrosão intergranular sugerindo mais estudos nesse aspecto.

Em especial, os efeitos do dióxido de carbono dissolvido e as reações eletroquímicas em dois tipos de aços usados em dutos: aço de baixa liga e aço inoxidável contendo 13% Cr são descritos por **LINTER e BURNSTEIN** (1999). Segundo o estudo, o gás dissolvido reage com o ferro nesses aços de tal forma a contribuir com a despassivação. O mecanismo proposto é que ao complexar com o Fe II no filme hidróxido produz carbonato de ferro e dissolve o complexo formado. O efeito é inexpressivo para o aço 13% Cr, mas contribui para a corrosão do aço de baixa liga. O regime catódico do hidrogênio também é afetado pela presença do dióxido de carbono dissolvido. A baixos potenciais catódicos isso parece aumentar a ação neutralizadora no pH. A elevados potenciais há evidências que os componentes do dióxido de carbono são reduzidos, provavelmente a monóxido, e isso reduz a taxa de evolução do hidrogênio. Dessa forma, o dióxido de carbono dissolvido em soluções aquosas acelera a dissolução de aços de baixa liga pela desestabilização dos filmes óxidos. O efeito do CO_2 dissolvido produz reação de neutralização com a água produzindo ácido carbônico e íons bicarbonato. Todavia, existe uma série de variáveis que interferem nos processos de corrosão. Dentre essas, estão os meios porosos os quais contribuem significativamente para tais processos.

No estudo conduzido por **GARDINER e MELCHERS** (2002) os autores propõem uma modelagem matemática a fim de explicar a influência e a previsão da intensidade do processo corrosivo nesses meios porosos. Utilizando corpos-de-prova de aços aplicados na construção de navios em contato com partículas de carvão ou partículas de aço o estudo simulou a mistura de diferentes tamanhos de partículas e concluiu que para o mesmo meio poroso é desejável manter a umidade abaixo de 50% ou acima de 80% da máxima capacidade de umidade do meio.

Entretanto, não é somente em tubulações que os processos de corrosão em estruturas metálicas produzem perdas e impactos ambientais. Por exemplo, um dos problemas enfrentados pela indústria nuclear é a dose de radiação encontrada em tubulações de sistemas de remoção de calor em reatores nucleares devido à acumulação de precipitados e produtos de corrosão na superfície de aço carbono. A fim de reduzir tal dose de radiação, avaliações feitas por **AIZAWA et al.** (2002) nos dados da planta nuclear KK-5 em Kashiwazaki-Kariwa, Japão, e experimentos na deposição de escoria, espécies iônicas em aço carbono e balanço de massa em produtos de corrosão radioativos, concluíram que os depósitos de espécies iônicas em aço-carbono são maiores do que os depósitos de escórias de corrosão. O acúmulo de espécies iônicas, que é dependente da temperatura, pode ser analisado com modelos de cálculos utilizados para reações de desidratação de produtos de corrosão gerados durante o período de lavagem. Por fim, a quantidade de deposições pode ser reduzida de 1/2,5 quando a temperatura de trabalho é diminuída de 155 °C para 120 °C.

A fim de minimizar o impacto dos processos de corrosão é comum a utilização da proteção catódica nas instalações envolvendo polidutos. Estudos foram desenvolvidos com a finalidade de aprimorar essas proteções de forma que no trabalho de **KIM e KIM** (2001) os autores investigaram o efeito da temperatura no critério de proteção catódica de tubulações na faixa de temperatura de 25 a 95 °C no que denominaram de lençol freático sintético (synthetic ground water, em inglês).

Por sua vez, **AHAMMED e MELCHERS** (1997) apresentam um modelo não-linear para a análise de tubulações enterradas sob tensão no sentido longitudinal e circunferencial devido a diversos fatores como pressão interna do fluido de escoamento, carga de tráfego em

rodovias e do solo circundante, temperatura e tensão em curvaturas do duto, dentre outros aspectos. Um modelo de corrosão não-linear foi usado para representar a perda de material na parede do tubo e o conseqüente afinamento da parede. Para permitir as incertezas no projeto com as variáveis foi usada uma análise de confiança que conduziu ao cálculo da contribuição de variáveis randômicas e das probabilidades de falhas. O trabalho ressalva que para tubulações antigas os parâmetros de corrosão parecem ser mais significantes do que outras variáveis envolvidas e, portanto, deve ser dada especial atenção para uma determinação segura. Para elevadas temperaturas não foi possível obter suficiente proteção a $-0.85 V_{cse}$ necessitando potenciais mais negativos. Para determinar o potencial de proteção em cada temperatura foram utilizadas as linhas anódicas de Tafel. Portanto, à medida que a temperatura se tornou mais negativa aumentou o potencial necessário para proteção de tal forma que a temperatura a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ correspondeu ao potencial de -1.346 mV_{sce} com taxas de corrosão aceitáveis para esse potencial.

RIEMER e ORAZEM (2005) aplicaram um modelo utilizado na proteção catódica para tubulações para lidar com tampo inferior de tanques de estocagem enterrados. Um tanque foi modelado, assim como a proteção feita por um ânodo instalado à distância infinita do tanque, uma série de ânodos distribuídos ao redor da circunferência do tanque e por uma grade diretamente abaixo do tampo inferior. A influência da barreira isolante associada com o segundo compartimento de contenção de derrame também foi modelada. Os resultados revelaram que o desempenho da proteção efetiva é dependente da posição do ânodo, do conteúdo de oxigênio no solo e com a presença de barreiras de isolamento e compartimentos de contenção.

Porém, uma vez que a implantação de proteção catódica em tubulações é complexa devido à contribuição de diversas variáveis que fazem oscilar o fluxo de corrente, a correta proteção deve levar em conta a resistividade do solo, o tamanho da tubulação e a qualidade do revestimento externo.

MANOLATOS et al. (1998) avaliaram a influência da proteção catódica e a absorção de hidrogênio por tubulações em meios contendo tiosulfato. A permeação eletroquímica de hidrogênio em meio simulando solo foi testada em diferentes concentrações de tiosulfato, assim como, o efeito do potencial aplicado para fins de proteção do metal. Os precipitados formados

durante a polarização catódica na superfície do metal foram avaliados por MEV e DRX sendo que os resultados confirmaram o efeito catalítico na absorção de hidrogênio. No entanto, isso pode ser evitado com elevados potenciais negativos no eletrodo associados à deposição de cálcio-magnésio que podem inibir essa reação catalítica. Segundo os autores, o mecanismo de inibição parece ser único e foi atribuída a distância efetiva das espécies catalíticas eletronegativas e a superfície metálica devidos tanto ao campo elétrico ou por barreiras físicas criadas pela deposição.

Uma alternativa prática para controle de corrosão em tubulações foi testada por **BARLO** (1996) com o uso de cupons metálicos extraídos de dutos enterrados a fim de sugerir melhores condições para a proteção catódica dos dutos. O potencial de polarização, a taxa de corrosão, a profundidade esperada dos pites e os níveis de proteção podem ser obtidos através desse procedimento quando um grupo de corpos-de-prova é extraído periodicamente e analisado usando métodos estatísticos e analíticos. Assim, o tempo para um pite penetrar a parede do tubo para um determinado nível de proteção e a mínima modificação na proteção catódica com o tempo pode ser avaliada para diferentes taxas de formação de pites. O estudo conclui com a correlação de dependências logarítmicas entre as variáveis avaliadas.

Quanto ao aspecto econômico **MARSHALL, SMITH e WARNER** (1997) fazem um estudo comparativo entre a viabilidade econômica do emprego de proteção catódica a partir de sistemas distribuídos e contínuos ao longo de uma malha de dutos. De acordo com os autores a proteção catódica distribuída (os eletrodos são colocados em pontos específicos na linha dutoviária) é mais difícil em solos com alta resistividade em especial quando se trata de tubulações de grandes diâmetros.

Por outro lado, a proteção contínua com aterramento de ânodos provê melhor distribuição de corrente e baixa resistência quando comparada com o aterramento de ânodos distribuídos. No entanto, apesar das vantagens técnicas, os elevados custos de instalação da proteção contínua em oposição à distribuída tem sido a razão pela não adoção dessa alternativa tecnológica. O estudo indica que devido às baixas resistências utilizadas na proteção contínua

associada ao dispêndio de energia para manutenção do sistema é muito menor se comparada ao outro sistema, o que reduz expressivamente os custos de operação.

De fato, as economias provenientes do uso da proteção contínua sobrepõem, em muitos casos, os custos de instalações adicionais. Logo, em vista da proteção contínua oferecer melhor distribuição de corrente como menores resistências de aterramento, o uso dessa técnica é a melhor opção econômica quando são considerados os custos de manutenção.

OSELLA e FAVETTO (2000) estudaram o efeito de campos geomagnéticos como indutores de corrente em tubulações como outra causa possível das flutuações de corrente. Um modelo teórico para correntes induzidas foi testado em trabalhos anteriores e os efeitos durante períodos com distúrbios foram quantificados. O modelo indicou que a intensidade das correntes induzidas em tubulações pelos campos magnéticos variáveis depende da intensidade e taxa de mudança do campo e da resistividade elétrica do solo. Dessa forma a corrente induzida está em equilíbrio com a corrente total e não há escape de corrente entre a tubulação e o meio na extensão da tubulação até que a resistividade elétrica se modifique durante essa extensão. Quando a resistividade elétrica varia ocorre fuga de corrente entre a tubulação e o solo a fim de estabelecer um novo equilíbrio. É justamente essa corrente de fuga fluindo entre a tubulação e o meio é que causa problemas de corrosão. Portanto, o estudo geofísico determinou as descontinuidades de resistividade no solo, campos geomagnéticos e fugas de corrente em diferentes sítios de Terra do Fogo e os resultados foram consistentes com as previsões teóricas.

Em continuação a trabalho anterior, novos experimentos foram aplicados em laboratório para estudos de efeito de corrosão devido à indução de correntes em tubulações em ambientes com descontinuidades de resistência elétrica (**LOPEZ, OSELLA e MARTINO**, 2005). Ânodos de sacrifício foram conectados em tubos enterrados e as taxas de corrosão foram estimadas pela medida da perda de massa em cada ânodo. Foram considerados campos de indução de 1 e 50 Hz e os efeitos produzidos nos tubos foram comparados com casos de estudos de campo. Nos casos dos tubos afetados pela indução de correntes, os ânodos mais corroídos ocorreram em solos com elevada condutividade elétrica independente da frequência aplicada ou do tipo de solo devido ao fato dessas áreas atuarem como áreas anódicas possibilitando a perda de elétrons. Observou-se

um aumento na percentagem de perda de massa em ânodos enterrados na proximidade onde a resistividade contrastava sendo que os danos puderam ser avaliados no revestimento da interface da seção atacada. Foi constatada a dependência do efeito da frequência, ou seja, enquanto frequências de 1 Hz provocaram aumento de aproximadamente 26%, para 50 Hz o efeito foi de aproximadamente 20%.

BOTELER (2000), por sua vez, discute que variações geomagnéticas produzem campos elétricos direcionando correntes elétricas na terra em redes de condutores como tubulações instaladas em solos. Essas correntes induzidas criam diferenças de potencial entre o solo e o meio e isso leva a corrosão das tubulações. Teorias de transmissão de linhas em fontes distribuídas são usadas para entender o fenômeno e expressões matemáticas são derivadas para tubulações-solos como função do campo elétrico e características das tubulações. Os maiores potenciais tubulação-solo são mostrados nos terminais, nas curvas e descontinuidades, como as junções. A combinação desta informação com estatísticas de atividade geomagnética provê uma maneira de determinar a frequência com que o potencial tubulação-solo nessas regiões oscila de -850 a 1150 mV para a melhor proteção catódica.

Quanto a processos de fraturas por corrosão, utilizando aços da classe API X-65, **CHEN et al.** (2003) procuraram entender o comportamento do material em condições de carregamento pré-cíclico e fraturas por corrosão sob tensão (SCC) quando em contato com solução de solo sintético e pH aproximadamente neutro. Dessa forma constataram a presença de pites de corrosão em descontinuidades metalúrgicas e contornos de grãos. De acordo com o estudo, o ataque seletivo de corrosão nessas descontinuidades metalúrgicas ocorre devido à natureza galvânica dessas áreas em relação às áreas vizinhas. Dessa forma, conseguiram simular período intenso de uso de tubulações com até 20 anos de uso, enquanto **LAZZARI et al.** produziram discos de corpos-de-prova do aço API X80 e constataram a melhora das propriedades mecânicas e soldabilidade para aplicação em tubulações o que, em princípio, poderia melhorar as respostas a fraturas por SCC.

Considerando o tema mais genérico de corrosão em metais em contato com solos, um dos problemas na arqueologia envolve a conservação de materiais metálicos após escavação.

Pesquisas com essa abordagem têm trazido maiores conhecimentos nos processo de corrosão. O enfoque a problemas dessa natureza se prende pelo fato de que artefatos metálicos permanecem durante longos períodos de contato com solos, dos mais diversos, e a exata identificação dos produtos de corrosão pode remeter a correlações importantes de características de corrosão devido a solos. De fato, considerável esforço tem sido despendido a fim de evitar a deterioração de artefatos, tanto que os resultados dos estudos demonstram que os processos de corrosão mais intensos ocorrem quando artefatos estão em contato com solos arenosos, solos ácidos e solos urbanos podendo ocorrer, inclusive, a total destruição do material em contato com solos com baixa capacidade tampão. Uma das hipóteses aventadas para a alta agressividade de solos urbanos é a concentração de cloro, assim como a concentração de sais em solos em geral (**GERWIN e BAUMHAUER**, 2000).

Na década de 1990 uma série de escavações em Nydam, Dinamarca, produziu mais de 16.000 artefatos arqueológicos o que resultou na suspensão de mais escavações a partir de 1997 em vista da possibilidade do processo corrosivo se intensificar, como explica **MATHIESEN et al.** (2004). Dessa forma, um pormenorizado estudo foi iniciado a fim de preservar as peças escavadas. A estratégia do trabalho compreendeu três aspectos:

- a) estudos dos materiais escavados incluindo a composição dos produtos de corrosão e o mapeamento do estado exato de preservação;
- b) uso de amostras de ferro em solos para estudos de perda de massa, potencial de corrosão, espectroscopia de impedância eletroquímica e resistividade elétrica;
- c) medidas de parâmetros ambientais como nível de água, potencial redox, concentração de oxigênio, pH dos solos e a concentração de espécies dissolvidas em poros contendo água.

Com o estudo foi possível compreender como a taxa de corrosão afeta os artefatos e o histórico de corrosão, ou seja, os padrões de deterioração e os produtos de corrosão formados.

BERTHOLON (2001) discute a preservação de artefatos e como as condições originais antes dos processos de corrosão auxiliam a compreensão dos estudos arqueológicos. Devido à

heterogeneidade das peças à base de ferro, bronze ou cobre, a corrosão se manifesta em diferentes intensidades para o mesmo tipo de solo sendo que alguns mecanismos de corrosão podem levar à fossilização das superfícies originais, ou seja, mantém os constituintes metálicos da peça envoltos em produtos de corrosão. Como se observa, estudos na corrosão de metais envolve avaliações de materiais arqueológicos onde a preservação dos materiais desenterrados, a restauração e o estudo das peças em sua forma original são de fundamental importância.

NEFF et al. (2001) enfocam a deterioração de artefatos arqueológicos escavados associando a presença do elemento cloro como um componente importante no processo de corrosão. Segundo os autores a compreensão desse processo deve ser abordada pelo estudo das propriedades morfológicas e físico-químicas dos produtos de corrosão. De acordo com o estudo, tal abordagem deve ser feita com auxílio de diferentes técnicas de caracterização como análises de composição (EDS/MEV) e análises para obtenção de informações estruturais como μ XRD, micro-análise por espectrometria Raman e experimentos de absorção de raios X (μ XANES). Os resultados obtidos nas amostras avaliadas revelaram a presença de produtos comuns de corrosão como siderita, goethita e magnetita além de akaganeita. De acordo com os autores, para desenvolvimento de métodos de dessalinização é necessário levar em conta a presença das outras fases identificadas.

Posteriormente, os autores (2004) abordam técnicas de avaliação de produtos de corrosão de peças de diferentes sítios arqueológicos a fim de esclarecer melhor como ocorrem tais processos. Nesse estudo identificam produtos de corrosão de artefatos arqueológicos utilizando diferentes técnicas como microscopia eletrônica de varredura, espectrometria por fluorescência de raios X por dispersão em energia, microsonda eletrônica, micro-análise por difração de raios X, espectroscopia Ramann e microscopia óptica. Tal análise pretendia a caracterização precisa de óxidos e hidróxidos com ênfase especial na validação da técnica de espectroscopia Raman e introdução de metodologia apropriada, entretanto, o estudo não é conclusivo e limita-se a indicação da técnica analítica como uma alternativa à identificação das fases produzidas.

NOVAKOVA, GENDLER e MANYUROVA (1997) identificaram as fases constituintes dos produtos de corrosão formados em artefatos arqueológicos caracterizando

camada por camada utilizando espectroscopia Mössbauer, difração de raios X, análise química e termomagnética identificando fases predominantes como magnetita e hematita.

À medida que se aproximaram da superfície da amostra a quantidade de magnetita diminuiu e virtualmente desapareceu. Hematita pode ser encontrada na superfície da amostra somente na forma dispersa enquanto a concentração de ferro-enxofre e ferro-fosfato aumenta. Segundo os autores, este modelo pode ser explicado somente pela atividade de bactérias sulfato-redutoras que atuam nos processos de corrosão.

BALASUBRAMANIAM, KUMAR e DILLMANN (2003) utilizaram diversas técnicas na caracterização de produtos de corrosão de materiais ferrosos em contato com a atmosfera com a finalidade de mostrar a aplicação das técnicas analíticas. Dentre as técnicas utilizadas, estão: análise microestrutural – microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica; análise composicional – espectrometria por dispersão em energia, microsonda eletrônica, micro análise por emissão de raios X induzida por partículas carregadas (μ PIXE) além de técnicas espectroscópicas como espectroscopia Raman, espectroscopia na região do infravermelho e espectroscopia Mössbauer.

DILLMANN e BALASUBRAMANIAM (2001) avaliaram dados obtidos de análises composicionais e estruturais obtidas com as técnicas de espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão em energia, micro-análises por difração de raios X e por emissão de raios X induzida por partículas carregadas em amostras arqueológicas de materiais ferrosos coletados em sítios na Índia. Nessas análises o conteúdo de fósforo (P) na matriz metálica se mostrou muito heterogêneo com baixos conteúdos de P nas regiões corroídas nas imediações de inclusões metálicas. Esse resultado foi correlacionado com a capacidade de desfosforização dos produtos de corrosão sendo que as fases foram identificadas como wustita e favalita com composições relativamente homogêneas.

Um típico produto de corrosão em metais arqueológicos é o mineral akaganeita, um óxido-hidróxido que pode conter o elemento cloro em sua estrutura. Com o intuito de obter a superfície do metal livre de produtos de corrosão **GIL et al. (2003)** propõem um ataque

eletrolítico na superfície com a finalidade de remover o cloro e, conseqüentemente, desestruturar o óxido. As análises dos produtos de corrosão antes e após o tratamento foram obtidas com auxílio da difratometria de raios X, espectrometria por emissão spark, microscopia eletrônica e fluorescência de raios X. O refinamento e interpretação dos resultados foram conduzidos com o Método de Rietveld e se mostrou apropriado ao tipo de análise.

Por outro lado, **VEGA, BERGER e DILLMANN (2005)** apresentam uma hipótese que explica o mecanismo de corrosão em artefatos arqueológicos que envolvem a difusão de oxigênio dissolvido na solução do solo e nas porosidades dos produtos de corrosão. Segundo os autores, reações de corrosão anódicas e catódicas podem ocorrer na interface óxido / metal. Para verificar essa assertiva os autores conduziram experimentos utilizando traçadores a partir de ^{18}O a fim de visualizar onde ocorrem reações de corrosão. Amostras arqueológicas de ferro foram colocadas juntamente com seus produtos de corrosão formados em água previamente livre de oxigênio e equilibrada com ^{18}O a pressão de 1,2 atm. Após o tempo de exposição, secções transversais das amostras foram mapeadas com reações $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{alfa})^{15}\text{N}$. A presença de ^{18}O revelou a precipitação de novos produtos de oxidação e confirmou a localização de reação catódica na interface metal / óxido.

Outros projetos têm sido conduzidos a fim de entender os mecanismos de corrosão em artefatos arqueológicos como é o caso de:

- processos de decapagem e limpeza de produtos de corrosão com ácido sob proteção catódica (**ANKERSMIT e LANGH, 2006**). Uma vez que o ácido pode atacar até mesmo a superfície metálica o uso de proteção elimina a ação agressiva;

- análise de eficiência de estocagem à seco de artefatos escavados e avaliação de processos de conservação e aclimatização. As superfícies são avaliadas e a mineralogia dos produtos identificada por espectroscopia Raman, FTIR, MEV e DRX. A umidade relativa dos solos avaliada através do pH, íons solúveis, condutividade e testes de corrosão acelerados (**THICKETT, 2006**).

Porém, outro tema interessante envolve as propriedades e características dos solos e a influência nos processos de corrosão. **GERWIN e BAUMHAUER** (2000) discutem a relação entre propriedades dos solos e a corrosão de artefatos arqueológicos. Destacam que tais processos têm se tornado importante uma vez que objetos escavados recentemente nos mesmos sítios arqueológicos demonstraram processo avançado de corrosão o que indicaria a modificação da ação do solo seja pela ação antropogênica, no caso de solos urbanos e solos utilizados em agricultura, seja devido à ação de chuva ácida. Também, o trabalho objetivou avaliar a eficácia da aplicação de normas na classificação do potencial de corrosividade dos solos como é o caso da norma DIN 50929, Parte 3, 1985: Corrosão de metais; Probabilidade de Corrosão de Materiais Metálicos sob Condições Externas de Corrosão; Tubulações e Partes de Componentes Estruturais em Solo e Água. Segundo os autores algumas propriedades dos solos podem influenciar na corrosão de objetos arqueológicos como, por exemplo, a acidez do solo acelerando os processos de corrosão e destruindo importantes informações da estrutura original do objeto de interesse. Inclusive, os elevados conteúdos de sais como cloretos em solos urbanos atuam de maneira similar degenerando materiais escavados.

Já **MOORE e HALLMARK** (1987) avaliaram 15 solos no Texas, Estados Unidos da América, a fim de testar o sistema indicado na classificação da corrosividade de solos do Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura daquele país (USDA-SCS, sigla em inglês). Dentre as propriedades utilizadas na avaliação, estão: condutividade elétrica, textura, acidez trocável e classe de umidade. Simultaneamente, compararam com o sistema proposto pelo Escritório Nacional de Padrões (*NBS - National Bureau Standard*) e, a partir de novas proposições, sugerem uma classificação mais restrita uma vez que, segundo o estudo, a classificação do USDA-SCS tende a subestimar a agressividade de solos de baixa e moderada corrosividade.

RHOADES, RAATS e PRATHER (1976) em um dos trabalhos clássicos no tema solução do solo estudaram a influência de diversos fatores na condutividade elétrica de quatro tipos de solos frente às variáveis como condutividade elétrica da fase líquida (C_{ew}) e o teor em água. Um dos aspectos interessantes no trabalho é os dados obtidos que permitem estimar a condutividade do solo com base na textura e mineralogia do solo. De fato, é apresentada uma

relação empírica estimando o comportamento e a dependência das variáveis. Vale lembrar que textura em Ciência dos Solos tem conotação diferente quando comparada a Ciência dos Materiais, indicando o tamanho das partículas envolvidas e não sua orientação, como é comum em cristalografia. Apesar da temática do trabalho que busca discutir a salinidade dos solos, fundamental em discussões agronômicas, o estudo mostra a validade das medidas elétricas in situ e as diferenças quando tomadas em laboratório.

FRIEDMAN (2005) confirma e estende a proposição de **RHOADES et al.** quanto à influência do teor de água, agora adjetivado com o termo volumétrico, e a ação da solução do solo como fatores de influência na condutividade elétrica do compartimento solo. A extensão do raciocínio referente à textura e mineralogia anteriormente proposto agora chega ao detalhamento da influência da não-esferecidade na forma das partículas e a larga distribuição do tamanho de partículas diminuindo a condutividade elétrica do solo analisado. Principalmente, quando partículas não-esféricas estão alinhadas o solo tende a exibir anisotropia na condutividade elétrica. Também, para solos de textura média e fina elementos adsorvidos na fase sólida tornam-se importantes contribuintes na condutividade elétrica do solo de modo que propriedades de superfícies dos minerais em última análise passam a contar no desempenho da condutividade elétrica da amostra em todo o compartimento.

Estudo conduzido por **KARE e NAHAR** (1997) a corrosividade potencial de diferentes tipos de solos foi investigada baseado nas propriedades clássicas como resistividade elétrica, pH, umidade absoluta, potencial redox, presença de sulfetos, sulfatos e cloretos sendo que as classificações de corrosividade desses solos foram baseadas no método CIPRA (*Cast Iron Pipe Research Association*) com bons resultados para solos tropicais localizados na Índia. Em acordo com outros estudos, resistividade elétrica e potencial redox se mostraram preponderantes em comparação aos demais parâmetros. Constataram que a resistividade elétrica com umidade absoluta e profundidade dos sítios analisados apresenta relação inversamente proporcional para alguns dos solos analisados. Assim, a concentração de sulfatos, sulfetos e cloretos, em vista da baixa concentração, parecem não concorrer para o aumento da corrosividade dos solos. Os autores chamam atenção para o parâmetro potencial redox uma vez que bactérias sulfato-redutoras sobrevivem em condições anaeróbicas, sendo as condições mais favoráveis a esse

desenvolvimento o pH na faixa de 5,5 a 9 reduzindo o elemento sulfato a sulfeto que, por sua vez, atua em mecanismos de corrosão. Embora o estudo não detalhe a análise dos ânions, os autores concluem que o potencial de óxido-redução apresenta relação inversa com a corrosividade dos solos e reafirmam a aplicabilidade da classificação do método CIPRA.

Com o intuito de avaliar a influência da umidade absoluta do solo na taxa de corrosão de metais ou tubulações enterradas **MURRAY** e **MORAN** (1989) utilizaram dois solos de natureza e comportamento bem diferenciados como solo argiloso e solo arenoso. No experimento em laboratório e em campo o teor de umidade foi variado amplamente desde a saturação (25 a 28 m % água) até a condição de solo seco (< 10 m % água). Amostras recobertas com revestimento à base de polietileno ou com fissuras induzidas no revestimento foram testadas com auxílio de espectroscopia de impedância durante o período de um ano. O estudo demonstra a importância do nível de umidade na taxa de corrosão e constata o aumento da resistividade do solo à medida que o solo seca. Interessante destacar que apesar da diferença dos tipos de solos e resistividades, ainda assim, apresentaram equivalentes densidades de corrosão para os mesmos níveis de umidade. Ao mesmo tempo, demonstraram que a técnica de espectroscopia de impedância é adequada na avaliação das amostras conduzidas em laboratório.

Em se tratando de análise e caracterização de solos, trabalhos conduzidos solidamente por **BROWN** (1953) e outros autores na área de ciência dos solos sempre sustentaram que a gênese do solo, o desenvolvimento do solo, tem estreita relação com a morfologia e a mineralogia, portanto, suas linhas de pesquisas foram orientadas ao preparo de amostras de solo e a investigação com auxílio da difratometria de raios X, dentre outras técnicas. **BROWN** argumentou que a potencialidade da técnica residiria nas pequenas quantidades amostradas e a qualidade dos resultados. À época, propunha que seria uma das técnicas fundamentais na relação entre micromorfologia e mineralogia com especial atenção ao estudo dos horizontes do solo e, de fato, a previsão se consumou.

Também, **SCHULZE** (1981) descreve um método de diferenciação em difração de raios X a partir de tratamentos químicos na amostra de interesse e posterior tratamento de dados dos difratogramas obtidos. Dessa forma, picos de óxidos de ferro anteriormente suprimidos ou

superpostos por outras fases minerais tornam-se mais evidentes permitindo identificação e, eventualmente, quantificação. Uma aplicação especial consiste na identificação da ferridrita, um óxido com baixa cristalinidade que se não tiver o sinal intensificado não produz adequada detecção de sinal.

Publicado na forma de capítulo de livro **KIMPE** (1993) explica com detalhes bem consolidados em literatura os processos de preparo e interpretação de resultados em difratometria de raios X de argilo-minerais nas diversas granulometrias como areia, silte e argila. Aborda a questão dos minerais interestratificados e análises semi-quantitativas em DRX, assunto sempre sensível em vista da complexidade para obtenção de resultados reprodutíveis.

BUENO et al. (2003), a fim de avaliar o nível de corrosividade, trabalharam com quatro tipos de solos baseado no Índice de Steinrath, um índice largamente utilizado, e Steinrath modificado, além das análises de curvas de polarização anódicas. O estudo relata que foram obtidas medidas físicas e químicas in situ, em laboratório e em extrato aquoso com análises químicas de cloreto, sulfeto e sulfato sem entrar no detalhamento dessas análises. Os autores chamam atenção para influência das bactérias sulfato-redutoras cujo estudo tem constante abordagem na literatura.

Nas curvas de polarização foi utilizada solução NS4 a fim de simular solo sintético, e extrato aquoso, o que acarreta distorções em resultados em vista do caráter dinâmico e reativo de qualquer solo. Tanto é que os resultados entre as técnicas destoaram para as análises de curvas de polarização, embora argumentem que uma das razões poderia ser a presença de bactérias sulfato-redutoras. Por fim, relatam que a corrosividade das amostras nos métodos Steinrath foram devidos à resistividade, a concentração de sulfatos e bactérias sulfato redutoras e concluem com os resultados negativos na análise das curvas de polarização.

FU et al. (1999) abordam a corrosão de gasodutos na China a partir da análise dos produtos de corrosão extraído do interior das tubulações avaliados com auxílio das técnicas de difração de raios X, espectroscopia de fotoelétrons e microsonda eletrônica. Simultaneamente, os autores avaliaram corpos-de-prova do material em laboratório com soluções de 3% NaCl e

8% CaCl_2 saturados com diferentes pressões parciais de CO_2 . Os resultados obtidos com as técnicas aplicadas permitiram adequada caracterização dos produtos como FeCO_3 , FeS , Fe_3O_4 e CaCO_3 . A análise com microsonda nas inclusões metálicas revelou que MnS e Al_2O_3 podem contribuir na corrosão por pites que são identificados nas tubulações, além disso, análises adicionais com a sonda nos óxidos nas imediações de corrosão (groove) indicam que tais inclusões aceleram o processo de deterioração.

Um aspecto que pode contribuir para evitar corrosão devido a solos são as ferramentas para consulta na elaboração de projetos e que presumem conhecimento bem estabelecido dos compartimentos (solos) envolvidos. Nesse sentido, mapas de solos têm aplicação profunda nos projetos de enterramento de tubulações já que os solos podem variar tanto horizontalmente quanto em profundidade. Propriedades físicas, químicas e atributos ou características dos solos são decisivos a fim de estimar quais as regiões contam com maior potencial de corrosividade.

Entretanto, durante a produção de mapas de solos e suas consultas deve se levar em conta a minimização das variâncias intra e inter-classes dos solos avaliados como descreve **WEBSTER** (1968). Dessa forma, variações de pH e resistividade, essa ainda não bem pontuada à época em mapas de solos, podem indicar com relativa precisão a estratégia de enterramento de tubulações.

Como se viu, a literatura é dispersa nos diversos temas que abordam a corrosão metálica devido a contato com solos o que não acontece, por exemplo, com a abordagem dos processos de corrosão em ambiente marítimo. Entretanto, em vista do tema envolver diferentes áreas da ciência as contribuições produzem resultados que vão compondo melhor compreensão aos processos de corrosão.

3. Experimental

3.1 Aspectos gerais e preparo dos corpos-de-prova

A partir de uma chapa plana de Aço API 5L X70 fornecida pela empresa USIMINAS S/A, cuja composição química é apresentada na tabela 1, foram produzidas 09 hastes com aproximadamente 50 mm de largura, 12,7 mm de espessura e 2.000 mm de comprimento com corte por guilhotina e corpos-de-prova com 30 mm de comprimento sendo a espessura e largura semelhantes às hastes, porém, obtidos com corte à plasma. Um grupo de três hastes foi produzido nas mesmas condições, porém, com 1.000 mm de comprimento para aplicação melhor detalhada à frente.

Tabela 1 – Composição química da liga utilizada (grau API5LX70) fornecida pela empresa USIMINAS S/A.

% C máx.	% Mn máx.	%P máx.	%S máx.
0,26	1,65	0,030	0,030

Em seguida as hastes foram ponteadas em uma extremidade, perfuradas com broca de bitola 3,3 mm na extremidade oposta e, assim como os corpos-de-prova, jateadas com esferas de aço com a finalidade de uniformizar e limpar a superfície de contaminantes como óxidos, graxas e sujeiras em geral, resultando nos corpos-de-prova conforme mostrado nas figuras 1 e 2.

Figura 1 – Hastes após os cortes e jateamento para enterramento.

Figura 2 – Exemplos dos corpos-de-prova produzidos para ensaios com solução do solo.

Em seguida, todas as amostras foram numeradas com uso de punção tipográfico por pressão e as massas das hastes avaliadas com auxílio de balança eletrônica (carga máxima 15 kg; carga mínima 125 g; divisões 5 g; tara 9 kg) com cinco repetições para cada aferição visto que o controle por gravimetria neste trabalho é um parâmetro fundamental para avaliação do processo de corrosão. Paralelamente, a aferição das massas dos corpos-de-prova foi realizada com o uso de balança analítica eletrônica com cinco repetições de acordo com os procedimentos aplicados às hastes.

3.2 Coleta de amostras de solo

As coletas de solo foram efetuadas com trado holandês conforme apresentado na figura 3 nas profundidades de acordo com o esquema na figura 4 e embaladas em sacos plásticos depois de adequada identificação, totalizando 400 g de material de coleta para cada parcela amostrada. O produto dessa coleta foi utilizado nas análises granulométricas, pH e difratometria de raios X.

Figura 3 - Perfurações para coleta de amostras de solo e para guia de enterramento das hastes.

Figura 4 – Esquema indicando as profundidades de coletas e a haste enterrada (destaque em preto).

3.3 Enterramento das hastes

Em 06 e 07/12/2005, em vistas das condições climáticas favoráveis, foram iniciados os preparativos para enterramento das hastes de 2.000 mm de comprimento nos solos cujas coordenadas geográficas foram obtidas com equipamento GPS-GARMIN (*GPS - Global Position System*), modelo 12xL, precisão de 15 metros, relacionadas na tabela 2.

Os experimentos foram identificados como Areão I (Nitossolo Vermelho), Areão II (Argissolo Amarelo), Areão III (Latossolo Vermelho) e Fortaleza (Neossolo Quartzarênico), referindo-se a três solos diferentes pertencentes à Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP - e o quarto solo localizado no campus da Universidade Federal do Ceará na cidade de Fortaleza, sendo que os trabalhos foram retomados de 12 a 15/12/2005, quando foram finalizados.

Somente para o experimento Fortaleza foram utilizadas as hastes com 1.000 mm de comprimento em virtude das condições do terreno e das limitações de transporte do material de estudo.

Tabela 2 – Coordenadas geográficas da área dos experimentos em UTM (m) e graus (°).

Coordenadas/local	Areão I	Areão II	Areão III	Fortaleza
UTM (m) - Sul	228,185	228,723	228,329	546,729
UTM (m) - Oeste	7.487,425	7.487,993	7.488,289	9.586,386
Graus (°) - Sul	22°41'55''	22°41'36''	22°41'26''	3°44'00"
Graus (°) - Oeste	47°38'45''	47°38'25''	47°38'39''	38°33'00"

Durante esse período, devido à intensa pluviometria na região “Areão”, o solo torna-se pegajoso e barrento, muito típico dos solos ricos em argila, propiciando melhores condições para o enterramento das hastes. Mesmo assim, parte do solo foi extraída com trado holandês, em torno de 10 cm de profundidade, de modo a servir de guia de entrada para a haste. Em seguida, o corpo-de-prova foi forçado à penetração no solo com auxílio de marreta de 10 kg evitando maiores alterações do solo em camadas mais profundas, conforme ilustram as figuras 5 e 6.

Figura 5 – Hastes à meia altura durante processo de enterramento.

Figura 6 - Detalhe da haste enterrada.

Após essa etapa, estacas demarcadoras foram fincadas, a região do experimento isolada com fita zebraada e foram feitas visitas semanais para acompanhamento do experimento e manutenção da área como mostra as figuras 7 a 10 referentes ao experimento Areão I, II, III e Fortaleza, respectivamente.

Figura 7 – Imagem da região do experimento Areão I.

Figura 8 – Imagem da região do experimento Areão II.

Figura 9 – Imagem da região do experimento Areão III.

Figura 10 – Imagem da região do experimento Fortaleza.

Para cada experimento aqui denominado parcela, 03 hastes foram fincadas conforme o diagrama das figuras 11 a 14, totalizando 12 hastes em quatro diferentes áreas, com relevo geográfico, vegetações distintas e características aparentes do solo diferentes entre si.

A primeira haste foi desenterrada após três meses, a segunda após sete meses e a terceira após um ano do enterramento inicial. Simultaneamente, amostras de solo foram extraídas conforme descrito no item “Coleta de amostras de solo” de cada uma das parcelas nos pontos identificados nos diagramas das figuras 11 a 14 e levadas a laboratório para obtenção de solução do solo para os ensaios com os corpos-de-prova anteriormente descritos.

Figura 11 – Croqui de instalação do experimento Areão I.

Figura 12 – Croqui de instalação do experimento Areão II.

Figura 13 – Croqui de instalação do experimento Areão III.

Figura 14- Croqui de instalação do experimento Fortaleza.

Obs.: ——— Símbolo representando hastes metálicas; ○ símbolo representando o ponto de extração de solo para ensaios com solução do solo.

3.4 Desenterramento das hastes

Em 15/03/2006 foram iniciados os preparativos para desenterramento das quatro primeiras hastes (n.ºs.: AI-1; AII-5, AIII-9 e FI-1) finalizando em 19/03/2006. Com auxílio de trado holandês foram produzidos furos lateralmente a cada uma das hastes na mesma

profundidade de enterramento e tracionadas manualmente com uso de barra metálica de 5 mm de diâmetro trespassada no furo da haste.

Ressalte-se que apenas no caso da haste AI-1 da parcela Areão I, a partir de 1,5 m de profundidade de tradagem foi constatado a presença de água indicando a possibilidade de ter sido atingido o lençol freático. Avaliações posteriores não confirmaram essa possibilidade. Em seguida, as hastes foram acondicionadas em tubo de PVC diâmetro de 100 mm vedado com tampas e transportadas para laboratório para limpeza e inspeção visual, conforme as figuras 15 a 18 indicam os procedimentos de desenterramento.

Figura 15 – Perforação lateral para extração das barras.

Figura 16 – Detalhe da haste com furo na extremidade utilizado como apoio na extração.

Figura 17 – Ferramentas utilizadas para extração das hastes.

Figura 18 – Acondicionamento para transporte das hastes após desenterramento.

Em laboratório, foram preparados 20 litros de solução à base de ácido cítrico (20% m/v) e, após lavagem das hastes com água destilada, vertida no tubo de PVC para imersão por aproximadamente 2 minutos, escovadas, retiradas e enxaguadas novamente com água destilada e secas. O procedimento foi repetido até a plena limpeza das hastes.

Dessa forma a remoção da fina camada de óxidos sobre a superfície possibilitou a avaliação mais precisa da perda de material por oxidação. Posteriormente, as hastes foram pesadas com os mesmos procedimentos descritos em 3.1 e os valores apresentados na tabela 9 no item Resultados e discussão.

Em 08/07/2006 foram retiradas as quatro hastes seguintes (n^os.: AI-2; AII-6, AIII-10 e FI-2) sendo que os mesmos procedimentos anteriormente descritos foram aplicados a essa nova remessa.

Em 15/12/2006 o experimento de campo foi encerrado com a retirada das últimas quatro hastes (AI-3; AII-7; AIII-11 e FI-3) sendo necessária a limpeza mais vigorosa com escovamento e raspagem superficial em vista da impregnação ou aglomeração do solo nas hastes conforme se observa nos procedimentos nas figuras 19 e 20.

Figura 19 – Escovamento das hastes para limpeza grosseira.

Figura 20 – Secagem das hastes para limpeza por ataque químico.

3.5 Preparo da solução do solo

Como citado anteriormente, amostras de solo foram extraídas das parcelas com uso de trado holandês nas regiões indicadas nos croquis das figuras 11 a 14 e indicadas no item “Coleta de amostras de solo” baseado na capacidade de enchimento da cápsula ou ponta de extração do trado.

Em seguida, as amostras dos solos foram imediatamente embaladas em sacos plásticos e anotados no rótulo de cada embalagem o local da extração, a profundidade, o modelo de trado utilizado e a data do procedimento. A finalidade desses detalhes é permitir a rastreabilidade (traceability) caso fosse necessário repetir o experimento. Por fim, as amostras foram acondicionadas em caixa com isolamento térmico mantendo as amostras resfriadas em gelo durante o transporte até o uso final. Nessas condições, evitou-se a proliferação de microorganismos, entre eles, bactérias sulfato redutoras que poderiam alterar os resultados e as análises por demanda bioquímica de oxigênio (DBO), entre outras análises.

Superada essa etapa de campo, as amostras em laboratório ficaram expostas para secagem ao ar durante 8 horas (terra fina seca ao ar) e, posteriormente, acondicionadas em estufa a 45 °C durante 24 horas. Em seguida, foi feita a separação de pequenos fragmentos de matéria orgânica por catação e peneiradas em malha de 2 mm.

Utilizando a proporção de solo / água de 1:1, foi adicionada água grau reagente 1 tipo MiliQ®, conforme procedimento para obtenção de extrato aquoso de solução do solo pelo método de centrifugação, sendo agitada por 15 minutos a 150 rpm, descanso de 1 hora, agitada novamente por mais 5 minutos e centrifugada por 30 minutos a 5000 g, de acordo com o diagrama de controle da figura 21.

Figura 21 – Diagrama de produção para solução do solo

Após essa etapa foi realizada a filtragem em papel de filtro comum JP 40 (45 μ m, cinzas 0,00009 g) em linha de vácuo, figura 22, e a solução estocada em ambiente resfriado (4 °C), após leituras de pH com (resolução de 0,01; precisão de 0,05%), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) com oxímetro (resolução de 0,1; precisão de 0,01%), condutividade elétrica e sólidos suspensos (resolução de 0,01; precisão < 0.05%), conforme mostrado na figura 23, e as medidas obtidas foram lançadas nas tabelas discriminadas no item Resultados e discussão.

Figura 22 – Linha de vácuo utilizada na obtenção de solução do solo.

Figura 23 – Solução do solo obtida e as medições realizadas.

3.6 Ensaio dos corpos-de-prova em solução do solo

Posteriormente, os corpos-de-prova em repetição de triplicatas foram imersos em diferentes frascos contendo 40 mL da solução do solo cada qual, vedados com tampa de rosca, filme plástico aderente (parafilm) e acondicionados em ambiente protegidos de ventilação, umidade e luz.

Cada bloco de triplicata foi mantido em ensaio e avaliado após 30, 60 e 90 dias com grupo de controle unitário, ou seja, um corpo-de-prova do grupo de controle durante o período de ensaio de acordo com o mapa de controle mostrado na figura 24.

Figura 24 – Diagrama de controle das amostras ensaiadas.

Após esse período, os produtos de corrosão foram removidos cuidadosamente da superfície do corpo-de-prova com espátula e, juntamente com o precipitado de fundo e sobrenadante, como se observa nas figuras 25 e 26, analisados por difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, enquanto que as superfícies dos corpos-de-prova foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 25 – Bateria de testes em solução dos solos e corpos-de-prova.

Figura 26 – Destaque para o precipitado de fundo muito fino e o sobrenadante.

3.7 MEV – corpos-de-prova e produtos de corrosão

Para as análises dos corpos-de-prova e dos produtos de corrosão foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura acoplado com espectrômetro por energia dispersiva (EDS).

Os corpos-de-prova, após término do tempo dos ensaios e retirada dos produtos de corrosão, foram aspergidos com álcool etílico, secos e analisados com registros de imagens por elétrons secundários e retro-espalhados além das análises por EDS nos modos pontual e integral. Os produtos de corrosão, por sua vez, foram fixados em suporte metálico à base de cobre com fita de carbono dupla face, recobertos com carbono e analisados nas mesmas condições dos corpos-de-prova.

3.8 Caracterização mineralógica dos solos por difração de raios X

As amostras de solo foram obtidas a partir da sub-amostragem do solo por quarticionamento das coletas descritas no item “Coleta das amostras de solo”, após a separação de fragmentos orgânicos e peneiramento. Em seguida as amostras foram separadas em cadinhos e submetidas à secagem em estufa durante 24 horas a 45 °C.

O material resultante foi separado em béqueres com aproximadamente 2 g de solo qualificado como ‘amostra total’, levados à chapa aquecedora com adição gradual de H₂O₂ 30% (v/v) até clareamento do sobrenadante e decomposição da matéria orgânica. Em seguida,

manteve-se a amostra sob fervura branda até remoção do H_2O_2 . Após isso, foi acrescentada água e centrifugado com descarte do sobrenadante e nova etapa de secagem em estufa nas condições já descritas.

Para desagregar o material, a moagem foi conduzida em almofariz e pistilo até obtenção de pó fino que fosse peneirado em malha de $75\ \mu\text{m}$ (200 *mesh*) e acondicionado em porta-amostra com ligeira compactação a fim de evitar orientação preferencial.

Na seqüência, as amostras foram acondicionadas em porta-amostra e analisadas no difratômetro de raios X com ânodo de cobre ($\text{Cu K}\alpha$ $1,54\ \text{\AA}$), filtro Ni, velocidade de varredura de $1,2^\circ\ 2\theta.\text{min}^{-1}$, faixa de varredura de 3° a $90^\circ\ 2\theta$, com tensão de aceleração e corrente de 40 kV/40 mA.

As calibrações do equipamento foram conduzidas com a análise de pastilha de silício padrão com repetição de 10 análises, análise de desvio angular e resolução, como demonstrado nas figuras 27 e 28.

Figura 27 – Sobreposição dos difratogramas da série de repetições de análise de calibração.

Figura 28 – Difratograma para análise de resolução e desvio angular do equipamento.

Os difratogramas resultantes foram analisados com auxílio do banco de dados de minerais do software APD/PHILIPS e através de consulta literária nos métodos Hanawalt e Fink na comparação de resultados com os padrões produzidos pelo *Joint Committee for Powder Diffraction System* (JCPDS) do *International Center for Diffraction Data* (ICDD).

3.9 Caracterização dos produtos de corrosão por difração de raios X

Os produtos de corrosão analisados por difração de raios X foram coletados do precipitado de fundo com espátula, depositados sobre lâminas finas próprias para análise e outra parte obtida por gotejamento com pipetagem do sobrenadante da solução após agitação e homogeneização do frasco de análise, como se observa nas figuras 29 e 30, para as amostras feitas em triplicata.

Em seguida, as amostras aguardaram secagem durante 24 horas envolvidas em recipiente evitando contaminação ou contato com ambiente sendo que os mesmos parâmetros empregados no difratômetro de raios X para a análise dos solos também foram utilizados nas análises dos produtos de corrosão.

Figura 29 – Preparo da lâmina com coleta de material por espátula.

Figura 30 – Preparo da lâmina por gotejamento.

Após serem obtidos os difratogramas foram aplicados os mesmos procedimentos descritos anteriormente na identificação dos minerais nas análises de solos.

3.10 Análise multi-elementar por SR-TRXRF das soluções dos solos

As amostras de solução do solo obtidas e descritas anteriormente foram estocadas em sistema de refrigeração a 4 °C até decantação de precipitado fino e, sem que ocorresse turbidez, foram sifonadas para um béquero, novamente filtradas a 45 µm e pipetadas alíquotas para o preparo das amostras.

A análise de fluorescência de raios X por reflexão total com radiação síncrotron (SR-TRXRF, em inglês) foi aplicada à solução do solo com o preparo de gotejamento por pipeta com alíquotas de 10 μL , adição de gálio como padrão interno em suporte de quartzo, secas por evaporação a 40 °C em estufa e, por fim, acondicionadas em recipiente protetor contra contaminação no ambiente.

No arranjo experimental foi utilizado como fonte de radiação faixa determinada do espectro branco obtido no acelerador do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS/CNPq), figuras 31 e 32, com tempo de exposição de 200 s e feixe de 178 a 227 mA.

Figura 31 – Vista do acelerador Síncrotron.

Figura 32 – Porta-amostra preparado para irradiação da amostra.

O elemento gálio em concentração previamente conhecida em solução aquosa foi utilizado como padrão interno de modo a controlar desvios e calibrações para identificação quantitativa dos elementos a partir dos picos obtidos no espectrograma. A quantificação dos elementos de interesse, os analitos, foi obtida com a análise prévia de uma solução multi-elementar preparada a partir de soluções-padrão (Aldrich) de forma a obter curvas de calibração com análises nas mesmas condições operacionais que as amostras. A partir dessa introdução de dados foi calculada a concentração do elemento químico na solução do solo.

Para as análises dos espectros foi utilizado o software AXIL Tools e TRXRF calculator, desenvolvidos pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, em inglês), que permite a

calibração e identificação dos elementos presentes na amostra de acordo com a equação

$$\phi_{\text{crit}} = \frac{99,1}{E} \sqrt{\frac{r \cdot Z}{A}} \quad (1)$$

onde,

ϕ_{crit} = ângulo crítico, em radianos;

E = energia da radiação (erg);

$\rho = r$, na equação - densidade do material (gramas.cm⁻³);

Z = número de elétrons em um átomo ou molécula componente do material e

A = átomo-grama ou molécula-grama do material (gramas. mol⁻¹).

3.11 Medidas de condutividade elétrica e sólidos suspensos das soluções

Na avaliação da condutividade elétrica e análise de sólidos suspensos ou sólidos totais dissolvidos (STD) das soluções dos solos, foi feita a calibração do equipamento condutivímetro (resolução de 0.01; precisão < 0.05%) com soluções padrão de condutividade Digimed classe DM-S, em temperatura ambiente de 25 °C, nas faixas de condutividade de 12,89 mS.cm⁻¹, 146,9 e 1412 µS.cm⁻¹ com sensor de temperatura acoplado ao equipamento para correção automática da saída de dados observando as variáveis no processo de medida conforme ilustra o diagrama da figura 33. A célula de condutividade utilizada apresentou constante K = 1 cm⁻¹ e as medidas foram obtidas em 5 repetições após tempo de estabilização do equipamento com limpeza da célula por borrifação com água desionizada nos intervalos de leituras. Os resultados estão informado nas tabelas 5 e 6 no item Resultados e discussão.

Figura 33 – Diagrama de ajuste do condutivímetro.

3.12 Análise granulométrica dos solos

Nas análises granulométricas conduzidas no Departamento de Ciências dos Solos da Universidade Federal do Ceará, 20 g de cada amostra de solo foram submetidas à dispersão com solução de hexametáfosfato de sódio a 0,1 N e agitação por 16 horas. Em seguida, separou-se silte e argila da fração areia por peneiramento "via úmida" (EMBRAPA, 1997).

Para tanto, o conteúdo (solo + dispersante) passou através de peneira de 20 cm de diâmetro e malha de 0,053 mm (nº 270 *mesh*), colocada sobre um funil apoiado em um suporte, tendo logo abaixo uma proveta de 1.000 mL. O material retido na peneira foi lavado com água e o volume da proveta completado com água destilada até o aferimento.

A fração areia (retida na peneira) foi transferida para lata de alumínio numerada de peso conhecido e colocada em estufa. Após a secagem o material esfriou em dessecador e a massa medida.

A suspensão de silte e argila foram agitadas por 20 s e, após o tempo de sedimentação, introduziu-se uma pipeta a 5 cm de profundidade para coletar uma alíquota de 50 ml da

suspensão. O volume foi transferido para um béquer, colocado em estufa até completa evaporação e a massa avaliada (após esfriar em dessecador) para determinação da argila.

As massas da areia e da argila foram medidas com auxílio da balança eletrônica descrita no item 'Análise gravimétrica das hastes e corpos-de-prova' e o silte foi obtido pela diferença entre a pesagem inicial do material de análise e os valores finais obtidos.

3.13 Condutividade elétrica dos solos

Os ensaios de condutividade elétrica de solos amostrados em laboratório foram adaptados de **EMBRAPA** (1997). Foi utilizada a solução proveniente da análise do pH (1:1 com 30 minutos de repouso) sendo que a temperatura da solução foi medida para correção devido à diferença de temperatura em relação a 25 °C. A célula de condutividade foi lavada com água destilada três vezes e preenchida com a mesma solução, em seguida, feitas as leituras em condutivímetro com os procedimentos descritos no item 3.11.

3.14 Medidas de pH dos solos e das soluções

A avaliação da acidez e alcalinidade foi obtida com a medição do potencial com uso de eletrodo combinado imerso em suspensão solo / líquido (1:1) com adaptações do método de **EMBRAPA** (1997). Foram colocados 35 g de solo em copo plástico de 100 mL graduado e adicionados 35 mL de água destilada. Em seguida a amostra foi agitada com bastão de vidro individual e mantida em repouso por 30 minutos. Após nova agitação das amostras com bastão de vidro os eletrodos foram imersos na suspensão homogeneizada e registradas as leituras do pH.

3.15 Análise de demanda bioquímica de oxigênio das soluções

Na metodologia aplicada optou-se pela DBO padrão que é obtida após cinco dias de leitura com a amostra incubada a 20 °C. Como citado no item “Preparo da solução do solo” foi utilizado um oxímetro digital para avaliar a DBO de amostras de solução do solo após filtração e estocagem em frasco âmbar mantido em ambiente protegido de ventilação, umidade e luz. A forma usual de representação dos valores é dada em mg.L^{-1} precedida da expressão $\text{DBO}_{5,20}$ indicando a quantidade de dias no intervalo de leitura e a temperatura em que foi mantida a amostra.

Apenas como parâmetros de comparação, a $\text{DBO}_{5,20}$ de 100 mg.L^{-1} representaria o consumo de 100 mg de oxigênio em cinco dias à temperatura de 20 °C, sendo que a essa temperatura e ao nível do mar a quantidade de oxigênio dissolvido em água é de 9,2 mg.L^{-1} .

Assim, valores elevados de DBO indicam baixa quantidade de oxigênio dissolvido ou presença elevada de matéria orgânica no extrato analisado. No presente caso das análises, o interesse foi avaliar esse comportamento a fim de correlacionar a presença ou ausência de microorganismos com a intensidade e tipo de corrosão no material de análise.

Por fim, as análises de DBO foram registradas no momento da preparação da solução dos solos, antes dos ensaios por imersão e ao final dos ensaios cujos valores estão indicados no item “Resultados e discussão”.

3.16 Análise dos ânions por injeção em fluxo

A análise em Sistemas de Injeção em Fluxo foi realizada para identificação de espécies químicas como cloreto, sulfato e nitrato nas amostras das soluções dos solos. Esse tipo de análise é baseado na multicomutação automatizada de uma fração da amostra, o carregador da amostra e o reagente de modo a identificar a reação final com auxílio de espectrofotômetro na região Uv-vis podendo também ser acoplado a outros sistemas de detecção como FAAS, HG AAS, ICP-AES.

Na análise de cloreto (**BERGAMIN FILHO et al.**, 1978) foi usada a reação com tiocianato que em presença de íons férricos formam o complexo colorido tiocianato férrico sendo detectado no comprimento de onda de 480 nm.

A análise de nitrato (**GINÉ et al.**, 1980) foi obtida através da reação de Griess modificada e detectada por espectrofotometria com comprimento de onda de 535 nm.

Para a análise de sulfato (**BERGAMIN FILHO et al.**, 1978) utilizou-se a reação de íons sulfato com íons bário em meio ácido e detecção por espectrofotometria com comprimento de onda de 375 nm.

3.17 Análise gravimétrica das hastes e corpos-de-prova

A análise gravimétrica baseia-se na medida indireta da massa da amostra ou na conversão de uma espécie química constituinte de forma separável do meio em que se encontra e, após isso, por cálculos estequiométricos, a determinação da quantidade real do elemento ou espécie na amostra. Portanto, a pesagem torna-se uma etapa fundamental na marcha analítica que deve ser controlada quanto à precisão e exatidão do processo.

Na pesagem das hastes foi utilizada balança eletrônica (carga máxima 15 kg; carga mínima 125 g; divisões 5 g; tara - 9 kg) e, na pesagem dos corpos-de-prova, o uso de balança analítica eletrônica (sensibilidade = 0,1 mg).

Antes do início do processo de pesagem as balanças foram aferidas com a pesagem de Material de Referência Certificado (CRM, em inglês), em salas climatizadas a 23 °C e utilizado material de apoio como luvas descartáveis e pinças de manipulação.

Foram executadas cinco pesagens de cada peça após estabilização do equipamento de acordo com normas internacionais de metrologia, avaliados os desvios como medidas de dispersão e lançados em gráficos de controle como os exemplificados nas figuras 39 a 42, antes e após os ensaios.

3.18 Tipos de solos

As classificações dos solos foram feitas com base nos fatores de formação dos solos além das análises de granulometria, difratometria de raios X, avaliação da paisagem e nos mapas existentes das áreas. Visto que a região é bem definida quanto à distribuição dos solos a classificação foi restrita até o nível categórico de segunda ordem.

3.19 Coleta de dados meteorológicos

Os dados meteorológicos de Piracicaba foram obtidos através da base de dados do posto agrometereológico ESALQ/USP - Piracicaba, SP – Brasil, figura 34, cujas coordenadas geográficas do posto são:

Latitude: 22° 42' 30" sul;

Longitude: 47° 38' 30" oeste;

Altitude: 546 m.

Figura 34 – Posto Agrometereológico ESALQ/USP.

Instalado no Departamento de Ciências Exatas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz este serviço pode ser acessado através da página eletrônica no endereço: <http://www.lce.esalq.usp.br/posto.html> sendo tais dados referentes às médias mensais e totais de chuva no período abrangido pelo experimento de campo.

A finalidade do controle desses dados visa indicar ou relacionar as variações climáticas às possíveis alterações na intensidade do processo de corrosão quando comparados os diversos desenterramentos das hastes, uma vez que se estima a perda de massa do material em milímetros por ano (mm/ano).

Por exemplo, as hastes desenterradas no mês de março / 2006 poderiam exibir maior taxa de corrosão quando comparadas às hastes desenterradas no mês de maio / 2006 onde se verifica o período de maior estiagem de chuvas na região conforme exemplifica o gráfico na figura A82.

Também, a escolha do período de enterramento das hastes em período de maior precipitação influencia a adesão do solo envolvendo o corpo-de-prova o que poderia produzir diferenças na avaliação do processo corrosivo caso a escolha recaísse sobre um período de maior estiagem.

Dessa forma, a partir de dados analisados anteriormente foi possível, inclusive, identificar quais os períodos mais adequados para a instalação do experimento aprimorando a obtenção de dados. Para tanto, os dados climáticos exibidos nas tabelas A11 a A23 e nos gráficos das figuras A73 a A91 onde são contrapostos à média histórica de chuvas e os dados obtidos no ano do experimento possibilitam a rápida identificação do comportamento das variáveis climáticas que potencialmente poderiam interferir com experimentos dessa natureza.

3.20 Metrologia aplicada aos equipamentos e resultados

Os aspectos metroológicos neste trabalho envolveram a condução das análises, a avaliação dos equipamentos, os processos de calibração e a análise das incertezas das medidas [EURACHEM, 2000 e 2002]. Dessa forma, na comunicação de resultados foram utilizadas as

unidades, múltiplos e submúltiplos do Sistema Internacional de Unidades (SI) sempre que não houvesse conflito com outras unidades reconhecidamente de consenso.

Os padrões para aferições, comparações e calibrações apresentam certificados, o que permitiu confiabilidade, rastreabilidade, comparabilidade e normalização de resultados como, por exemplo, as soluções padrões e as faixas de trabalho ou de medidas. Periodicamente, durante a condução das análises, foram feitas as calibrações de equipamentos como: balança, estufa tipo mufla, condutivímetro, peagômetro e difratômetro, entre outros equipamentos da rotina.

3.21 Análise estatística aplicada ao experimento

Baseado nos procedimentos metrológicos, os resultados foram expressos na forma de medidas de tendência de acordo com os valores médios obtidos e o erro associado à medição na forma de medidas de dispersão como: desvio padrão e desvio padrão relativo (*Relative Standard Deviation – RSD*).

Ferramentas estatísticas também foram utilizadas com a finalidade de controle da qualidade dos resultados como gráficos de controle, diagramas de dispersão, histogramas e diagramas de causa e efeito.

4. Resultados e discussão

A apresentação dos resultados segue em fluxo com a classificação dos solos no texto e a discussão das análises que podem ser divididas em quatro itens abrangidos da seguinte forma:

- **Análises químicas** que abrange o potencial hidrogeniônico (pH).
- **Análises físicas** que consistiram em análise granulométrica, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e resistividade dos solos.
- **Análises biológicas** que envolvem análises de demanda bioquímica de oxigênio.
- **Análises instrumentais** que utilizaram as técnicas de difração de raios X, fluorescência de raios X por reflexão total com radiação síncrotron (SR-TRXRF), microscopia eletrônica de varredura, espectrometria por energia dispersiva, análise por injeção em fluxo (FIA) e análise gravimétrica.

Portanto, a partir dos resultados é possível abordar o problema da corrosão de aços API em contato com os solos analisados diante de uma discussão qualitativa e quantitativa.

Iniciando pela abordagem qualitativa que indicou claramente a ação diferenciada dos horizontes dos solos e os diferentes solos sobre as **hastes**, os argumentos que justificam os resultados são baseados em dois aspectos relevantes durante o experimento: as **inspeções visuais** após os desenterramentos das **hastes** e os resultados das **análises gravimétricas**.

Em todas as etapas de desenterramento, até mesmo na primeira onde não se constata perda de massa expressiva nas **hastes**, ocorre clara diferenciação quanto ao ataque corrosivo em algumas porções visualmente bem definidas nas **hastes** (figuras 35 e 36).

Figura 35 – Aspecto das hastes do grupo Areão após a 2ª etapa de desenterramento (da base para o topo: AI, AII, AIII).

Figura 36 – Aspecto das hastes do grupo Areão após o último desenterramento (da esquerda para direita: AI, AII, AIII).

No solo mais agressivo, por exemplo, Fortaleza, de imediato é possível destacar as extremidades das **hastes**, tanto superior quanto inferior, onde o processo de corrosão é mais intenso. Ressalte-se aqui que a haste FI-3 (Neossolo quartzarênico – Nq) apresentou película mais espessa e compacta de óxidos e areia na superfície da haste se comparado ao aspecto da haste FI-1 (figuras 37 e 38). Tal agressividade encontra correspondência, embora mais branda, nas **hastes** desenterradas em Areão I (Neossolo vermelho – Nv) e, em menor intensidade ainda, em Areão II (Argissolo Amarelo – Aa) e III (Latosolo vermelho).

Quanto às extremidades superiores das **hastes** em todos os experimentos seria de se supor que parte da lâmina de água retida pelos solos seja em precipitações atmosféricas, seja por conta do orvalho, poderia proporcionar mais tempo de contato com essa região das **hastes**. Inclusive, em alguns solos é comum a formação de lençóis freáticos temporários, em períodos com intensa pluviometria, o que se apresenta como mais um fator relevante a contribuir no processo de corrosão de metais em contato com solos.

Figura 37 – Aspecto da haste FI-1 – primeira etapa de desenterramento após procedimentos de limpeza.

Figura 38 – Aspecto da haste FI-3 – última etapa de desenterramento antes do processo de limpeza.

Ainda que em todos os casos tratam-se de solos bem drenados, portanto, a percolação ocorre sem que se produzam estoques de água à medida que o solo atinge sua capacidade de campo, tal evento é um contribuinte a intensificar a solubilização de íons na fração líquida do solo nessas camadas iniciais. Sendo assim, é interessante atentar que, em maior ou menor grau, todos os solos apresentaram o mesmo efeito qualitativo em relação às **hastes** quando são avaliadas as regiões mais atacadas.

É verdade que se constatou também a ocorrência de mosqueados nas **hastes**, regiões de malhas escuras indicando ação corrosiva acentuada e limitada em regiões nas zonas intermediárias e inferiores das **hastes**, mas tais regiões parecem estar associadas a partes dos solos onde a intemperização agregou ou não decompôs plenamente as fases minerais do solo. Dessa forma, esses aglomerados, bem típicos, aliás, em plintossolos, por exemplo, têm ação extrema nos processos de corrosão, ou intensificam ou amenizam a corrosão se comparada à vizinhança local na haste avaliada.

Quanto às extremidades inferiores, o fato de apresentarem ataque diferenciado em relação às regiões intermediárias sugere uma estreita relação entre o horizonte de maior acúmulo de argila e o horizonte acima, o que poderia indicar maior reatividade em relação aos processos de corrosão, sem conflitar com a possibilidade de aeração diferenciada que ocorre nessas regiões de maior acúmulo de argila.

Em geral, em ciências dos solos, a atividade química realmente se encontra onde há maior acúmulo de argilo-minerais, mas convém cautela em extrapolar esse efeito para a ação corrosiva do solo uma vez que o contrário também poderia ocorrer. De todo modo, além do ataque diferenciado houve perda de massa em todas as **hastes** avaliadas.

Nos desenterramentos iniciais, as perdas foram brandas, muito baixas, por esse motivo optou-se pelos diagramas de controle nas avaliações de perda de massa já antecipando a necessidade de um controle eficaz nos processos de pesagem das **hastes** (figuras 39 a 42).

Figura 39 – Gráfico de controle de aferição das massas das 09 hastes enterradas no experimento Areão I (Nv), II (Aa), III (Lv). Valores em percentuais.

Figura 40 – Gráfico de controle de aferição das massas das 09 hastes enterradas no experimento Areão I (Nv), II (Aa), III (Lv). Valores em percentuais.

Figura 41 – Gráfico de controle de aferição das massas hastes enterradas no experimento Fortaleza (Nq). Valores percentuais.

Figura 42 – Gráfico de controle de aferição das massas enterradas no experimento Fortaleza (Nq). Valores percentuais.

Contudo, nos desenterramentos sucessivos as perdas de massa foram gradativamente maiores, porém a ação corrosiva já produzia incrustações no corpo das **hastes** o que, em princípio, poderia dificultar ou produzir “falsos negativos” na pesagem das **hastes** (figuras 43 e 44 e tabela 3).

Figura 43 – Gráfico de perda percentual em massa ao final do experimento Areão I (Nv), II (Aa), III (Lv).

Figura 44 – Gráfico de perda percentual em massa ao final do experimento Fortaleza (Nq).

Tabela 3 - Massas das hastes enterradas e após desenterramento.

Haste	Massa inicial (kg)	Desvio Padrão (+/-g)	Desvio (%)	Massa Final (kg)	Desvio Padrão (+/-g)	Desvio (%)	Massa Final – Massa inicial (g)	ΔM (%)	Perda de Massa (g/ano)
AI-1	9,815	0,005	0,447	9,853	0,003	0,245	38,0	0,387	15,2
AI-2	9,813	0,003	0,245	9,793	0,024	2,159	-20,0	-0,204	-34,2
AI-3	9,873	0,003	0,245	9,825	0,000	0,000	-48,0	-0,486	-48,0
AII-5	9,845	0,000	0,000	9,837	0,008	0,678	-8,0	-0,081	-32,0
AII-6	10,055	0,000	0,000	10,037	0,003	0,245	-18,0	-0,179	-30,9
AII-7	9,372	0,009	0,812	9,335	9,339	0,004	-33,0	-0,352	-33,0
AIII-9	9,689	0,002	0,2	9,694	0,002	0,200	5,0	0,051	20,0
AIII-10	10,203	0,003	0,245	10,186	0,004	0,374	-17,0	-0,167	-29,1
AIII-11	9,600	0,003	0,316	9,572	0,003	0,245	-28,0	-0,292	-28,0
F1	4,997	0,003	0,245	4,980	0,0027	0,2449	-17,0	-0,340	-68,0
F2	4,765	0,000	0,000	4,730	0,0274	2,4495	-35,0	-0,734	-60,0
F3	4,740	0,000	0,000	4,694	0,0022	0,2000	-46,0	-0,970	-46,0

Essa restrição foi contornada com a raspagem e escovamento criteriosos das regiões onde ocorreu a formação de finas camadas de óxidos e com as limpezas em banhos químicos descritos no item Experimental.

Dessa forma, nos momentos iniciais dos desenterramentos, após a limpeza das **hastes**, já era possível observar claramente que havia segmentos razoavelmente definidos nas **hastes** indicando ação corrosiva mais intensa, se comparada a outros segmentos da mesma haste avaliada, numa clara manifestação da ação diferenciada dos horizontes dos solos.

Outros aspectos qualitativos serão vistos, já que a constatação visual carece de comprovação quantitativa também, mas convém estender a discussão para os **corpos-de-prova** em solução dos solos somados aos dados obtidos nas demais análises.

De início, é necessário fundamentar quais as características e propriedades físico-químicas que determinam um solo ser mais agressivo em relação ao outro quando se trata de corrosão. Nesse sentido, é bem conhecida a relação entre **condutividade elétrica** e **pH** como fatores que intensificam os processos de corrosão em solos.

O solo Fortaleza e suas soluções apresentaram acidez mais elevada em relação aos demais solos e soluções (tabela 4) e, até com certa controvérsia, apresenta teores similares com os demais solos quando se trata da **condutividade elétrica** nas camadas analisadas (tabela 5). Essa aparente contradição reside no fato de que apesar da **condutividade elétrica** avaliada nas camadas ser semelhante aos outros solos, o mesmo não ocorre quando se compara a condutividade nas soluções, um ponto a ser discutido mais a frente.

Tabela 4 – Medida do pH dos solos e das soluções dos solos avaliados.

Área de teste/pH	AI (Nv)	AII (Aa)	AIII (Lv)	FI (Nq)
pH SS	6,4	7,1	6,6	5,5
pH Solo 0- 10 cm	5,9	7,4	5,1	5,0
pH Solo 40- 50 cm	5,6	5,8	4,9	4,9
pH Solo 90- 100 cm	5,9	5,4	5,5	-
pH Solo 150- 160 cm	6,0	5,3	5,4	-

Tabela 5 – Medidas de condutividade elétrica dos solos e das soluções avaliadas.

Área de teste/ condutividade elétrica (CE)	AI (Nv)	AII (Aa)	AIII (Lv)	FI (Nq)
CE (mS. cm ⁻¹) - SS.	0,94	0,67	0,31	1,90
CE (mS.cm ⁻¹) Solo 0- 10 cm	0,26	0,34	0,23	0,23
CE (mS.cm ⁻¹) Solo 40- 50 cm	0,26	0,17	0,2	0,34
CE (mS.cm ⁻¹) Solo 90- 100 cm	0,18	0,17	0,16	-
CE (mS.cm ⁻¹) Solo 150- 160 cm	0,14	0,14	0,12	-

Medidas de **condutividade elétrica** são primordiais na análise de solos uma vez que permitem a correlação com a força iônica sendo que esta última é fundamental nos mecanismos de adsorção ou dessorção de elementos químicos no solo (MCBRIDE, 1994). Uma vez que a grandeza física força iônica indica a atividade dos íons em solução é possível estimar como se comportam os elementos químicos em solos com diferentes valores de **condutividade elétrica**. Como se vê em ciências dos solos a **condutividade elétrica** carrega informações que podem ser utilizadas no estudo do comportamento das plantas e em certa medida à gênese dos solos.

Em ciências dos materiais, o recíproco da **condutividade elétrica**, **resistividade elétrica**, parece fazer mais sentido, em especial na corrosão em solos. Isso porque, a **resistividade elétrica** indica a capacidade de um ambiente ou material resistir à passagem da corrente elétrica e, como os dutos metálicos têm baixa resistividade, a relação fica bem próxima quando se fala na resistividade do solo (**PALMER**, 1989) em relação a algum metal que se deve evitar corrosão, muito comum nos casos de proteção catódica. No entanto, desde que as grandezas são compatíveis, nesse trabalho a adoção do termo **condutividade elétrica** atendeu as necessidades de interpretação para as duas áreas simultaneamente.

Os solos do experimento Areão apresentaram **condutividade** e **acidez** semelhantes nas camadas avaliadas com uma ou outra discrepância dos valores, logo, através dessas análises haveria sérias limitações na previsão de qual solo seria mais agressivo. Novamente, parece ter sido a solução do solo que definiu claramente os valores de **condutividade** e **acidez** que puderam ser utilizados como parâmetros seguros para comparar o potencial de corrosividade dos solos.

O que se pode destacar em geral quanto à **condutividade elétrica** em solos é que ela decresce para as camadas mais profundas dos solos analisados, com exceção de Fortaleza (Nq), propondo um argumento adicional para a corrosão mais intensa nas extremidades superiores das **hastes**, como abordado anteriormente na **inspeção visual**.

Estritamente referindo à **condutividade elétrica** e **acidez** das soluções dos solos o assunto toma uma dimensão mais complexa pelo extenso e intenso debate quanto aos métodos de produção da solução de um solo. Diversos autores sugerem, cada qual, um método para produção da solução do solo argumentando que nesta ou naquela circunstância a obtenção do extrato aquoso tem maior representatividade quanto à concentração dos elementos químicos e menor interferência na vizinhança do sistema à técnica para extraí-lo. Em tempo, foi usada a definição de solução do solo como a fase líquida aquosa do solo em sua capacidade de campo e, portanto, o meio onde reações químicas ocorrem (**SSSA**, 1994; **WOLT**, 1994). Porquanto o estudo mais profundo da solução do solo remonta à segunda metade do século passado pela química do solo é natural o debate sobre conceitos fundamentais e procedimentos como é o caso

da amostragem real de solução do solo ou mesmo a terminologia de extrato aquoso ou simplesmente solução do solo. A despeito desse saudável debate parece apropriado ressaltar que boa parte das conceituações e métodos de estudo para solos e suas soluções vem das ciências dos solos e, mais importante, tem como foco as interações planta-solo.

Dessa maneira, é lógico atentar que todas as técnicas propostas para obtenção de solução do solo têm o intuito de simular como a planta faz para obter macro e micro nutrientes dos solos a partir do enraizamento e da troca biodinâmica que ocorre ao seu redor. Em corrosão, as tubulações, em especial, não admitem o dinamismo de um ser vivo como a planta relacionando-se com a fase líquida do solo da mesma forma, ou seja, os dutos não emitem “raízes” buscando tracionar, absorver, dissolver ou adsorver elementos químicos da vizinhança. Assim, a obtenção de solução do solo a partir dos métodos consagrados nos estudos planta-solo poderia superestimar a **condutividade elétrica** e **pH** para os propósitos de estudos de corrosão, mas, aparentemente, esse desvio sistemático parece não interferir nos resultados desse trabalho. Fato é que, como seria de se esperar, os valores para **condutividade elétrica** e **pH** nas soluções são decididamente diferentes se comparados aos solos dos quais foram obtidos.

Para a **condutividade elétrica** nas soluções, os valores mais expressivos foram encontrados para as soluções de FI (Nq) seguida de AI (Nv), AII (Aa) e AIII (Lv). A disparidade é tal que a **CE** obtida para a solução FI (Nq) é quase 3,5 vezes maior do que a **CE** do solo de origem (tabela 5). É possível fazer essa comparação (**CE** solo-solução) porque se trata de transportadores de carga e, como números absolutos, essa avaliação traduz a percepção de como é maior o número de transportadores na solução se comparado ao solo.

Outro aspecto relevante entre as análises das diferentes soluções é que os valores absolutos em **CE** de FI (Nq) chegam a ser quase o dobro quando comparado ao solo seguinte (AI – Nv) e, embora não haja a mesma expressividade, as relações entre os solos do experimento Areão apresentaram diferenças de pelo menos 50% na **CE** entre si e, em certa medida, tal comportamento se repete nos resultados das análises de **sólidos totais dissolvidos** (tabela 6).

Tabela 6 – Medida de sólidos totais dissolvidos nas soluções dos solos avaliados.

Área de teste/STD	AI (Nv)	AII (Aa)	AIII (Lv)	FI (Nq)
STD (ppm) SS	129,0	88,7	42,5	268,0

Como se percebe, o meio líquido é extremamente reativo. A título de exemplo, os **corpos-de-prova** usados nessas soluções já apresentavam significativo processo de corrosão após 30 dias, o primeiro período de avaliação gravimétrica. As perdas em massa, em todas as etapas, permitiram uma noção clara sobre as soluções mais agressivas e a linha de tendência para os dados obtidos nas amostragens em triplicatas confirmaram essas expectativas. (figuras 45 a 48 e tabela 7)

Figura 45 – Gráfico de perda percentual em massa após 30 dias de ensaio em SS – Observação: Amostras 1, 2 e 3 – Areão I (Nv); 4, 5 e 6 – Areão II (Aa); 7, 8 e 9 – Areão III (Lv); 10, 11 e 12 – Fortaleza (Nq).

Figura 46 – Gráfico de perda percentual em massa após 90 dias de ensaio em SS – Observação: Amostras 1, 2 e 3 – Areão I (Nv); 4, 5 e 6 – Areão II (Aa); 7, 8 e 9 – Areão III (Lv); 10, 11 e 12 – Fortaleza (Nq).

Figura 47 – Gráfico de controle de aferição das massas dos corpos-de-prova antes do ensaio.

Figura 48 – Gráfico de controle de aferição das massas dos corpos-de-prova após ensaio (90 dias).

Tabela 7 - Massas (g) dos corpos-de-prova antes do ensaio - após 30 e 90 dias de ensaio.

Amostra/ medida	Massa inicial	Desvio Padrão (+/-)	Desvio (%)	Massa final(g) (30 dias)	Desvio Padrão (+/-)	Desvio (%)	Massa inicial - Massa final (30 dias)	ΔM (%)	Massa inicial - massa final (90 dias)	ΔM (%)	Perda de massa (g/ano) 30 dias	Perda de massa (g/ano) 90 dias
AreãoI-1	31,6157	0,0001	0,0098	31,5868	0,0001	0,0136	0,0289	-0,0915	0,0845	-0,2674	-0,34704	-0.33816
AreãoI-2	31,2539	0,0001	0,0075	31,2194	0,0002	0,0183	0,0345	-0,1104	0,0958	-0,3066	-0,414	-0.38328
AreãoI-3	31,7348	0,0001	0,0098	31,7072	0,0002	0,0215	0,0277	-0,0871	0,0900	-0,2837	-0,33192	-0.36016
AreãoII-1	31,2702	0,0001	0,0049	31,2467	0,0003	0,0286	0,0235	-0,0751	0,0881	-0,2818	-0,28176	-0.35248
AreãoII-2	31,4953	0,0001	0,0080	31,4652	0,0001	0,0063	0,0301	-0,0954	0,0801	-0,2543	-0,36072	-0.3204
AreãoII-3	31,0408	0,0001	0,0049	31,0129	0,0001	0,0049	0,0279	-0,0899	0,0781	-0,2516	-0,3348	-0.3124
AreãoIII-1	30,3264	0,0001	0,0136	30,3077	0,0005	0,0427	0,0187	-0,0745	0,0828	-0,2730	-0,27096	-0.33128
AreãoIII-2	31,7559	0,0001	0,0075	31,7337	0,0039	0,3513	0,0222	-0,0701	0,0744	-0,2343	-0,26688	-0.29768
AreãoIII-3	30,9451	0,0001	0,0049	30,9268	0,0057	0,5131	0,0183	-0,0592	0,0748	-0,2418	-0,2196	0.29936
FI-1	31,2571	0,0001	0,0049	31,2071	0,0002	0,0224	0,0500	-0,1599	0,1006	-0,3218	-0,6	-0.4024
FI-2	31,1915	0,0001	0,0147	31,1404	0,0001	0,0080	0,0511	-0,1638	0,0984	-0,3155	-0,61296	-0.39368
FI-3	30,9629	0,0001	0,0075	30,9141	0,0001	0,0049	0,0487	-0,1574	0,0978	-0,3158	-0,58488	-0.39112

Além da **CE** e **pH**, poderia haver um interferente expressivo nos experimentos seja nos solos, seja nas soluções dos solos como é o caso da presença de bactérias sulfato-redutoras (BSR) que contribuem fortemente para a agressividade do solo em superfícies metálicas. Uma análise adequada para a detecção de BSR é conhecida pela sigla **DBO**. Esse parâmetro químico permite uma avaliação indireta da atividade microbiana na solução do solo, da quantidade de oxigênio presente na solução ou mesmo a quantidade de matéria orgânica na água.

Bactérias e microorganismos consomem matéria orgânica através da utilização em seus metabolismos de carbono e nitrogênio em geral. Para a metabolização é necessário o consumo de oxigênio que é utilizado na oxidação desse alimento e liberado na forma de CO_2 e outros subprodutos. Logo, a presença de microorganismos na solução do solo poderia produzir um complicador nos processos de corrosão seja pelo consumo de oxigênio, fator fundamental nesses processos, seja pela liberação de subprodutos a partir dessa reação ou mesmo pela presença de outros tipos de bactérias que têm ação corrosiva.

Há dois outros tipos de parâmetros químicos que poderiam ser considerados como é o caso do oxigênio dissolvido (**OD**) ou a demanda química de oxigênio (**DQO**). No primeiro caso, oxigênio dissolvido, avalia-se a quantidade de oxigênio disponível na água seja devido a reações produzidas por microorganismos como algas, organismos fotossintéticos, seja pelo contato com a atmosfera e demais fontes de oxigênio como contribuintes nos processos de aeração natural ou artificial. Na **DQO** o sentido é semelhante à **DBO**, mas referindo-se à quantidade de oxigênio necessária à oxidação da matéria orgânica com uso de agente químico e, embora produza resultados em menor tempo, seus resultados são maiores do que os obtidos pela **DBO** orientando, portanto, as análises mais detalhadas que devem ser aplicadas. Daí a opção pelo uso da análise por **DBO**, em vista da:

- abrangência de resultados;
- faixa de confiança;
- avaliação indireta da presença de microorganismos e teores de oxigênio.

De qualquer forma, os dados obtidos nas análises de **DBO** não indicaram a ocorrência da ação de bactérias nas soluções utilizadas tanto com medidas no início quanto ao final dos experimentos (tabela 8).

Tabela 8– Avaliação da demanda bioquímica de oxigênio das soluções dos solos.

Área de teste/DBO	AI (Nv)	AII (Aa)	AIII (Lv)	FI (Nq)
DBO_{5,20} Antes	< 0,2 mg O ₂ /L	< 0,2 mg O ₂ /L	< 0,2 mg O ₂ /L	< 0,2 mg O ₂ /L
DBO_{5,20} Depois	< 0,2 mg O ₂ /L	< 0,2 mg O ₂ /L	< 0,2 mg O ₂ /L	< 0,2 mg O ₂ /L

De fato, o uso da solução do solo simplifica a análise da agressividade dos solos testados, no entanto, mecanismos como aeração diferencial torna-se mais difícil de ser detectado e isso é importante ao estudar os mecanismos de corrosão. Essa aparente simplificação auxilia demasiadamente no estudo do processo seja na rapidez como são obtidos alguns resultados seja pelo método que permite entender o solo como um compartimento composto de diferentes fases. Em verdade, a complexidade dos processos de corrosão em solos é tamanha que pode ser visto como se o material estivesse em contato com diferentes agentes corrosivos na forma de gases, sólidos e líquidos ao mesmo tempo.

Pelo histórico da agressividade de alguns solos em Fortaleza, tipicamente determinados pelos fatores de formação de solos e ação antropogênica, eram previstas as maiores perdas de massa dos **corpos-de-prova** enterrados ou imersos na solução desse solo. A título de comparação, as perdas percentuais relativas entre FI (Nq) e AI (Nv) nos primeiros trinta dias de imersão indicam uma perda de 40% maior para os **corpos-de-prova** imersos na solução FI (Nq) e, se comparada com AIII (Lv), a perda é mais expressiva, cerca de 60%, como indica a tabela 9.

A fim de avaliar a extensão do processo outras medidas foram feitas após 90 dias de imersão. As comparações entre FI (Nq) e AI (Nv) e FI (Nq) e AIII (Lv) reduziram-se a

aproximadamente 10% e 22%, respectivamente. Essa contradição talvez tenha explicação no teor de cloretos em solução além dos parâmetros relatados como **CE** e **pH**.

Abre-se um parêntese aqui para citar que os resultados obtidos em **fluorescência de raios X por reflexão total** e corroborados pelas **análises por injeção em fluxo** indicaram a solução do solo Fortaleza (Nq) com o mais alto teor de cloretos em relação às outras soluções (figuras 49 a 51 e tabela 9).

Figura 49 - Gráfico da concentração de íons cloreto em solução dos solos – Observação: 1 – Solução do solo Areão I (Nv) ; 2 – SS Areão II (Aa); 3 – SS Areão III (Lv); 4 – SS Fortaleza (Nq).

Figura 50 - Gráfico da concentração de íons sulfato em solução dos solos - Observação: 1 – Solução do solo Areão I (Nv) ; 2 – SS Areão II (Aa); 3 – SS Areão III (Lv); 4 – SS Fortaleza (Nq).

Figura 51 - Gráfico da concentração de íons nitrato em solução dos solos - Observação: 1 – Solução do solo Areão I (Nv) ; 2 – SS Areão II (Aa); 3 – SS Areão III (Lv); 4 – SS Fortaleza (Nq).

Tabela 9 – Concentrações dos elementos químicos nas amostras de solução dos solos (ppm).

		Areão I (Nv)	desv.pd (+/-)	desv.pd. rel. %	Areão II (Aa)	desv.pd (+/-)	desv.pd. rel. %	Areão III (Lv)	desv.pd (+/-)	desv.pd. rel. %	Fortaleza (Nq)	desv.pd (+/-)	desv.pd. rel. %
Al	13	1,633615	0,00452345	0,28	0,672608	0,00117031	0,17	0,900336	0,001584	-0,18	2,567886	0,00464	0,18
Si	14	7,824197	0,02893216	0,37	4,537347	0,00351421	0,08	< L. D.	-	-	9,590716	0,01776	0,19
P	15	0,05077	0,00305456	6,02	0,357877	0,00127497	-0,36	0,542298	0,000644	-0,12	< L. D.	-	-
S	16	1,643793	0,00478171	0,29	4,273219	0,01648356	0,39	2,847816	0,004342	0,15	1,607074	0,004768	0,30
Cl	17	0,858312	0,00495054	0,58	0,838939	0,0010231	0,12	0,622075	0,016673	2,68	15,24528	0,051374	0,34
K	19	0,255475	0,01704523	6,67	2,920577	0,00935939	-0,32	2,735571	0,029638	-1,08	3,41964	0,049135	1,44
Ca	20	9,77351	0,12361755	1,26	16,10634	0,18142478	1,13	9,930426	0,03526	0,36	7,225648	0,042412	0,59
Ti	22	0,517705	0,06949822	13,42	0,425162	0,02016809	4,74	0,183849	0,010316	5,61	0,853233	0,037264	4,37
V	23	0,152482	0,01573984	10,32	0,076231	0,00395909	5,19	0,051056	0,002305	4,51	0,079144	0,001692	2,14
Cr	24	0,265335	0,00343239	-1,29	0,262184	0,00073049	-0,28	0,273013	0,000342	-0,13	< L. D.	-	-
Mn	25	0,056194	0,01971711	-35,09	0,230013	0,0013241	-0,58	< L. D.	-	-	< L. D.	-	-
Fe	26	28,25587	4,78267163	16,93	21,07508	0,793352	3,76	10,52407	0,360495	3,43	8,00158	0,411005	5,14
Ni	28	0,622585	0,01005739	-1,62	0,632626	0,00067661	-0,11	0,623853	0,002331	-0,37	< L. D.	-	-
Cu	29	7,350414	0,01903304	-0,26	7,377927	0,00158305	-0,02	7,400485	0,001607	-0,02	< L. D.	-	-

É bem conhecido o papel do íon cloreto nos processo de corrosão, assim como a presença de sulfatos ou sulfetos, estes, seja em solução, seja no solo como indicador da presença de BSR como já descrito anteriormente. Uma vez que a presença do íon cloreto na solução potencializa a agressividade do meio, a sua supressão, por outro lado, pode provocar a amenização do processo. O cloreto sendo usado como reagente nessa reação ao ser consumido altera a velocidade e intensidade da reação, portanto, é de se esperar que com o passar do tempo as diferenças entre as taxas de corrosão nas diversas soluções tendem a diminuir indicando que os contribuintes mais expressivos na corrosão sejam consumidos dando lugar a outro mecanismo menos proeminente. Esses aspectos qualitativos e quantitativos, que envolvem a presença de um elemento químico específico e sua disponibilidade, ajudam a entender porquê a perda percentual relativa em massa com o tempo diminui quando se compara as diversas soluções. Esta explicação parece ser mais promissora do que a formação de barreiras ou películas de passivação por óxidos reduzindo as taxas de corrosão na solução do solo Fortaleza (Nq) uma vez que a disposição dos **corpos-de-prova** permite que os produtos formados sejam depositados por precipitação no recipiente.

Por outro lado, as análises por **microscopia eletrônica de varredura** acusaram a presença de pites e placas de corrosão em diferentes partes dos corpos de prova com a espessura da película indicando a adesão à superfície do corpo de prova, uma vez que a camada de óxidos somente se desprendia com a raspagem mecânica do filme (figuras 52 a 57).

Figura 52 – Micrografia eletrônica de varredura demonstrando a superfície do corpo-de-prova imerso em SS Fortaleza (Nq) – amostra FI-2.

Figura 53 – Micrografia eletrônica de varredura destacando região com formação de produtos de corrosão.

Figura 54 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando o aspecto geral do corpo-de-prova imerso em SS Areão I (Nv) – amostra AI-2.

Figura 55 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando a superfície do corpo-de-prova em região adjacente à região da figura 54.

Figura 56 - Espectrometria por dispersão em energia (EDs) da região observada na figura 54.

Figura 57 - Espectrometria por dispersão em energia (EDs) da região observada na figura 52.

Embora as análises por difração em raios X (figuras 58 a 61) tenham indicado a presença de magnetita, o íon cloreto apresenta intensa mobilidade podendo ser adsorvido na estrutura metálica e dando continuidade ao processo de corrosão como parece indicar a presença de pites na micrografia mostrada na figura 52. Aliás, as análises por **difratometria de raios X** (figuras 58 a 61), em todos os casos avaliados, detectaram também lepidocrocita e maghemita, típicos **produtos de corrosão**. Essas fases minerais apresentam morfologia típica dos óxidos-hidróxidos de ferro (Figuras 62, 63, 64 e 66) e as análises por espectrometria por dispersão em energia confirmaram as composições conforme mostram as figuras 65 e 67.

Figura 58 – Difratoograma de raios X dos produtos de corrosão na SS das amostras Areão I (Nv) em triplicata – Observação: Lp – Lepidocrocita; Mg – Maghemita; Mn – Magnetita.

Figura 59 – Difratoograma de raios X dos produtos de corrosão na SS das amostras Areão II (Aa) em triplicata.

Observação: Lp – Lepidocrocita; Mg – Maghemita; Mn – Magnetita.

Figura 60 – Difratoograma de raios X dos produtos de corrosão na SS das amostras Areão III (Lv) em triplicata.

Observação: Lp – Lepidocrocita; Mg – Maghemita; Mn – Magnetita.

Figura 61 – Difratoograma de raios X dos produtos de corrosão na SS das amostras Fortaleza (Nq) em triplicata.

Observação: Lp – Lepidocrocita; Mg – Maghemita; Mn – Magnetita.

Figura 62 – MEV - Aspecto geral dos produtos de corrosão na amostra AI – 1 (Nv) – representativo.

Figura 63 – MEV - Aspecto geral dos produtos de corrosão na amostra FI – 2 (Nq)– representativo.

Figura 64 – Detalhe das fases na amostra AII – 2 (Aa).

Figura 65 – Espectrometria por dispersão em energia (EDs) da região na figura 64.

Figura 66 - Detalhe das fases na amostra AII – 2 (Aa).

Figura 67 - Análise por EDS da região na figura 66.

Diante do exposto, avaliar solos tão diferentes como Neossolos (F1) e Argissolos (AII) certamente podem produzir respostas confiáveis, mas e quanto a solos cujos parâmetros são muito próximos?

Em vista dos resultados das análises apresentados pelo solo Fortaleza (Nq) era de se esperar um comportamento experimental condizente com a previsão teórica, ou seja, as maiores

perdas em massa (figuras 45 a 48). Realmente, no planejamento experimental foi considerado esse aspecto e um melhor ajuste nessa avaliação pode ser aplicado na comparação com os outros solos onde há proximidade de respostas como AII (Aa) e AIII (Lv). As perdas percentuais relativas em massa para os dois solos são de aproximadamente 25%, para 30 dias, e 8% em 90 dias ao se comparar os **corpos-de-prova** imersos nas soluções AII (Aa) e AIII (Lv). AII (Aa) é a solução mais agressiva e o mecanismo de perda de massa em relação ao tempo de análise parece ser semelhante ao discutido para FI (Nq) e AI (Nv). Por outro lado, o solo Areão II (Aa) é o que apresenta maior teor de sulfatos como atestam as análises por **FIA** e **pH** básico em relação a Areão III (Lv) (tabela 4 e figura 56).

A tendência atual é considerar esses parâmetros, sulfatos / sulfetos e **pH**, como indicadores de corrosividade em solos, como sugere a *American Water Works Association* (AWWA). E aqui começam os conflitos, pois a acidez da SS AIII (Lv) é maior do que em AII (Aa), o que poderia indicar corrosão mais intensa, mas os valores para **condutividade elétrica** e **sólidos totais** para a SS de AII (Aa) são maiores do que AIII (Lv). Além do mais, AII (Aa) exibe teores maiores de íons nitrato, cloreto e sulfato como indicaram as análises **FIA**, portanto, nem sempre **pH** é um fator decisivo no processo de corrosão. Dessa maneira, o fato do solo Areão III (Lv) exibir uma taxa de corrosão menor do que Areão II (Aa) demonstra que o fator **pH** não é tão determinante como parecem considerar, sendo, então precedido do teor de sulfatos / sulfetos, entre outros, e pelo teor de argila no solo. Cita-se o teor de argila uma vez que solos bem drenados, portanto, geralmente secos, não colaboram intensamente no processo de corrosão, além do mais, os argilo-minerais são considerados componentes do solo que não raro, estão associados à alta reatividade e troca de cargas elétricas e, nesse caso, o solo Areão II (Aa) foi considerado o solo mais argiloso entre todos os avaliados. Realmente, as **análises granulométricas** não deixaram dúvidas quanto à textura dos solos avaliados (tabela 10 e figura 68).

Tabela 10 – Análise granulométrica dos solos estudados.

Horizonte	areia fina (%)	areia grossa (%)	areia total (%)	silte (%)	argila (%)
A I (Nv)0-10 cm	21,65	31,71	53,36	22,56	24,09
A I 40-50 cm	12,06	29,36	41,42	31,56	27,02
A I 90-100 cm	12,97	25,94	38,91	31,27	29,82
A I 150-160 cm	10,63	19,06	29,69	24,81	45,51
A II (Aa) 0-10 cm	21,63	35,65	57,28	23,49	19,23
A II 40-50 cm	14,99	17,30	32,29	12,77	54,94
A II 90-100 cm	11,32	20,70	32,02	17,66	50,31
A II 150-160 cm	13,92	19,91	33,83	15,65	50,51
A III (Lv) 0-10 cm	15,01	21,82	36,83	21,90	41,27
A III 40-50 cm	14,17	20,09	34,26	21,78	43,95
A III 90-100 cm	21,88	20,99	42,87	15,67	41,46
A III 150-160 cm	15,42	21,30	36,72	23,03	40,25
F I (Nq) 0-10 cm	58,19	34,45	92,64	5,69	1,66
F I 40-50 cm	54,81	36,03	90,84	5,51	3,65

Figura 68- Gráfico da distribuição de tamanho de partículas nas profundidades dos solos avaliados.

Ressalva-se que textura em ciências dos solos tem conotação diferente à utilizada em ciências dos materiais. Na primeira, refere-se ao tamanho e distribuição de partículas no solo, em materiais o entendimento segue a conceituação cristalográfica.

Com exceção do solo Fortaleza (Nq), arenoso, os solos do experimento Areão apresentam distribuição de argila extremamente diferenciada. Em Areão I (Nv) o acúmulo de argila nas camadas mais profundas indica a intensa eluviação que o caracteriza. Inclusive, esse processo físico encontra associação com a porosidade e permeabilidade do solo. Um argumento a mais que pode elucidar a melhor condutividade e os resultados de corrosão nas **hastes**.

Para Areão II (Aa), a concentração de argila praticamente se mantém a mesma nas camadas abaixo de 10 cm da superfície e para Areão III (Lv) o teor de argila é praticamente o mesmo em todo o perfil, o que poderia sugerir baixa porosidade e permeabilidade do solo. Em termos de **mineralogia** dos solos não há o que surpreender.

As análises por **difratometria de raios X** foram concordantes com o que era de se esperar de solos intemperizados, logo, caulinita, quartzo e hematita foram os componentes principais detectados nos solos, com exceção de Fortaleza (Nq), onde, naturalmente há ocorrência predominante de quartzo (figuras 69 a 71). Portanto, os dois parâmetros, teor de argila e **condutividade elétrica** para o solo AII (Aa) sugerem ser preponderantes na diferença de perda de massa entre AII (Aa) e AIII (Lv). É evidente que cruzar esses dois parâmetros significa levar em conta os resultados obtidos nas **análises gravimétricas** das **hastes**.

Figura 69 – Difratoograma de raios X do solo identificado como Areão I (Nv) – obs.: K – caulinita; Q – quartzo; H – hematita; profundidade em centímetros.

Figura 70 – Difratoograma de raios X do solo identificado como Areão II (Aa) - obs.: K – caulinita; Q – quartzo; H – hematita; profundidade em centímetros.

Figura 71 – Difratoograma de raios X do solo identificado como Areão III (Lv) - obs.: K – caulinita; Q – quartzo; H – hematita; profundidade em centímetros.

Figura 72 – Difratoograma de raios X do solo identificado como Fortaleza (Nq) - obs.: Q – quartzo; profundidade em centímetros.

A discussão da perda de massa nas **hastes** é interessante já que é possível considerar parâmetros dos solos envolvidos como os teores **areia / silte / argila**, **pH**, **condutividade elétrica** e a contribuição da solução do solo avaliada particularmente no experimento com **corpos-de-prova**.

Na solução do solo, em vista do meio líquido com conseqüente maior superfície de contato entre os **corpos-de-prova** e o meio, seria esperado um ataque corrosivo mais intenso produzindo maior perda de material.

Ao se comparar as perdas de massa nos **corpos-de-prova** e as **hastes** observa-se que no primeiro caso a perda responde por aproximadamente um terço da quantidade de massa perdida em relação à haste em contato com o solo do qual foi extraída a solução, quando a avaliação é em percentual. Isso sugere que a solução do solo traz consigo um componente agressivo importante no compartimento solo, porém, não é responsável integralmente pelo processo de corrosão. Apesar de representativo, é necessário cautela na extrapolação dos dados a fim de não negligenciar outros fatores relevantes.

O que fica evidente é que essa agressividade é muito mais dinâmica, em se tratando de solução, o que é aceitável já que o **corpo-de-prova** está imerso em meio líquido. A partir desse exercício de raciocínio fica razoável separar os demais “agentes” que contribuem no processo de corrosão. Como foi dito anteriormente, o solo é composto por três fases, a saber: sólida, líquida e gasosa, e dessas, os ensaios demonstram que a fase líquida pode contribuir com metade do componente agressivo. É prematuro sugerir que os outros componentes contribuem com frações semelhantes, por dois motivos, ao menos:

- não há experimentos, ainda, com solo seco, livre de umidade, a fim de determinar a contribuição de uma segunda fração no processo de corrosão;
- não é possível estimar, por ora, se ocorre ou se manifesta alguma propriedade emergente quando os componentes estão presentes no compartimento solo.

Assim, o experimento induz a avaliar a contribuição da fase gasosa e da fase sólida a fim de conciliar o balanço de massa produzido pelos resultados do experimento com **hastes**.

Em relação às **hastes**, novamente FI (Nq) se destacou com considerável perda de massa ao ser comparada com o solo AI previsto como o segundo mais agressivo. O solo FI (Nq), como já foi dito, exibe maior **condutividade elétrica**, menor **pH**, textura arenosa além do ambiente climático mais propício à troca dinâmica de componentes do compartimento solo uma vez que se trata de região litorânea. A perda de massa da **haste** em FI (Nq) é elevada quando comparada aos demais solos, entretanto, é na comparação do solo AI (Nv) com AII (Aa) e AIII (Lv) que os resultados demonstram mais expressividade.

Quando se compara os solos do experimento Areão já é necessário maior número de parâmetros a fim de antecipar qual solo seria mais agressivo. Nesse sentido, a classificação de solo mais agressivo recai em AI (Nv), prevista e obtida experimentalmente, uma vez que os indicadores desse solo superam, na maior parte, os indicadores de corrosividade de AII (Aa) e AIII (Lv).

Alguns aspectos externos ao sistema haste-solo poderiam causar alterações nos resultados, como é o caso da **variação de temperatura** local e o **regime de chuvas**. No caso da temperatura, intensas variações ou amplitudes térmicas têm forte influência no solo causando expansão e retração em seus constituintes, em especial se forem constituídos de minerais secundários. A incidência de chuvas acarreta outros problemas significativos que também poderiam desviar os resultados quando se compara regiões geográficas tão distantes como no caso desse estudo. Entretanto, este não foi o caso para o período em que foi conduzido o experimento haja vista que as tabelas e os gráficos indicando **variação de temperatura** e **precipitações pluviométricas** estiveram dentro das médias históricas em 2005 e 2006 (tabelas A11 a A23 e figuras A73 a A91). Dessa forma, embora não tenham sido desconsiderados esses aspectos, não foi necessário somá-los nas análises parciais, considerando-os como pano de fundo ao cenário avaliado.

Por fim, apesar das diferenças de perda de massa das **hastes** de AII (Aa) e AIII (Lv) serem tênues, a tendência exibida no ensaio das soluções não deixa dúvidas quanto à preponderância do solo AII (Aa) como sendo o mais corrosivo confirmando a seqüência de agressividade constatada ao final do desse capítulo.

Como foi apresentado, solos diferentes e os diversos horizontes que comparecem em um mesmo solo têm ação diferenciada em relação ao fenômeno da corrosão em superfícies metálicas. Numa vista superior, e levando-se em conta tubulações com vários quilômetros de extensão, diferentes solos também podem ser comparados como diferentes horizontes de um mesmo corpo de solo, conseqüentemente, também se espera potenciais de corrosividade diferentes,.

Embora as **análises granulométricas** e a **difração de raios X** tenham sido aplicadas em faixas determinadas dos horizontes (0-10; 40-50; 90-100 e 150-160 cm), a partir dessas informações juntamente com a avaliação da paisagem, vegetação e relevo foi possível estabelecer que:

- o perfil Areão I pode ser enquadrado como um Nitossolo Vermelho uma vez que não há incremento suficiente de argila para classificá-lo como Argissolo;
- para o perfil Areão II, em que pese a pequena quantidade de argila no horizonte superficial este apresenta um conteúdo da mesma fração em argila bem uniforme com a profundidade que somado ao significativo incremento de argila e pelo local de ocorrência pode ser indicado como um Argissolo Amarelo
- para o perfil Areão III que praticamente não tem incremento de argila, os dados indicam que se trata de um Latossolo Vermelho.

Em relação ao perfil Fortaleza, em vista das análises granulométricas, vegetação, elevados teores de areia, mineralogia e características locais a classificação recai em Neossolo Quartzarênico.

Finalmente, as **análises granulométricas, condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, fluorescência de raios X por reflexão total e injeção em fluxo** permitem a classificação quanto à agressividade prevista dos solos envolvidos e das suas soluções de tal forma que, tanto para os solos, quanto para as soluções desses solos, a seqüência decrescente quanto à agressividade é: Neossolo Quartzarênico (Fortaleza) > Nitossolo Vermelho (Areão I) > Argissolo Amarelo (Areão II) > Latossolo Vermelho (Areão III) (tabela A24 - anexo)

Também, as **análises gravimétricas nas hastes e corpos-de-prova** possibilitaram a comparação entre a agressividade teórica dos solos e soluções e a resposta experimental quando em contato com as **hastes** e os **corpos-de-prova**.

Dessa forma, foi possível estabelecer a seqüência da agressividade experimental dos solos e soluções, do mais agressivo ao menos agressivo tanto para solos quanto para soluções dos solos, da seguinte maneira: Neossolo Quartzarênico > Nitossolo Vermelho > Argissolo Amarelo > Latossolo Vermelho (tabela A24 - anexo).

5. Conclusões

Os resultados obtidos das análises permitiram determinar experimentalmente a ordem de agressividade dos solos e soluções em contato com as hastes e os corpos-de-prova.

Dos solos testados, em ordem decrescente de agressividade a estruturas metálicas, é possível classificá-los da seguinte forma: Neossolos Quartzarênico (Fortaleza), Nitossolo Vermelho (Areão I), Argissolo Amarelo (Areão II) e Latossolo Vermelho (Areão III), mantendo a mesma seqüência de classificação para as soluções dos respectivos solos.

A utilização de solução do solo como meio de teste para avaliação da agressividade do solo na corrosão de metais mostrou-se como uma alternativa de baixo custo, rotina de implantação de análises sem complexidades e com rapidez na obtenção de resultados, sendo representativa da ação do compartimento solo em contato com materiais metálicos.

No aspecto geral, a metodologia empregada se mostrou adequada para esse tipo de investigação, em especial, pela adoção do método de ensaios de campo conjugada aos ensaios de laboratório. Tal prática é relativamente inovadora na área de materiais, corrosão em solos, porém, se mostrou eficaz já que os resultados estão relacionados diretamente às aplicações práticas do material de análise.

Também, a técnica analítica de reflexão total por fluorescência de raios X mostrou robustez, aplicabilidade e versatilidade na detecção de análises multi-elementares nas soluções dos solos aliando resultados confiáveis à facilidade nos preparos de amostras.

Em acordo com a literatura vigente, as características e propriedades químicas mais proeminentes que interferem no potencial de corrosividade do solo também foram observadas nesse estudo. Dentre elas, pH, condutividade elétrica, atividade de ânions e teor de argila, porém, estudos mais profundos devem ser realizados a fim de obter correlações melhor definidas.

Com esse trabalho ficou patente mais um ponto de contato entre ciências dos solos e ciências dos materiais ocorrendo uma intersecção comum entre as duas áreas de estudo e podendo haver troca constante de estratégias de investigação e aprimoramento do conhecimento nos temas comuns estudados, a saber: metais e solos.

Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO; Anuário estatístico brasileiro do petróleo e do gás natural; ANP, Rio de Janeiro, 2004.

AHAMMED, M.; MELCHERS, R. E.; Probabilistic Analysis of Underground Pipelines subject to Combined Stresses and Corrosion; Engineering Structures, vol. 12, pp 988 – 944; 1997;

AIZAWA, M.; CHIBA, Y.; HOSOKAWA, H.; OHSUMI, K.; UCHIDA, S, ISHIZAWA, N.; A Mechanism for Corrosion Product Deposition on the Carbon Steel Piping in the Residual Heat Removal System of BWRs, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 39, n 10, pp 1041-1050, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS: E1526-93, Standard Practice for Evaluating the Performance of Release Detection Systems for Underground Storage Tank Systems, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS: E1990-98 Standard Guide for Performing Evaluations of Underground Storage Tank Systems for Operational Conformance with 40 CFR, Part 280 Regulations, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM G1-90, Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D 4220-95, Standard Practices for Preserving and Transporting Soil Samples, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS: G158-98 Standard Guide for Three Methods of Assessing Buried Steel Tanks, 1998.

ANKERSMIT, B; LANGH, R; disponível em <<http://icom-cc.icom.museum/WG/Metals/>>

Acesso em: 10 ago2006.

BARLO, T. J.; Projecting Pipeline Pitting Rates and Cathodic-Protection Requirements Using Corrosion Coupons; The NACE International Annual Conference and Exposition – CORROSION 96; 1996.

BALASUBRAMANIAM, R.; KUMAR, A. V. R.; DILLMANN, P.; Characterization of Rust on Ancient Indian Iron, Current Science, vol. 85, n. 11, pp. 1546-1555, 2003.

BEECH, I. B.; CHRISTINE C. G.; Recent Advances in the Study of Biocorrosion – an Overview, Revista de Microbiologia, vol. 30, pp. 177 – 190, 1999.

BENMOUSSAT, A., HADJEL, M.; Corrosion Behavior of Low Carbon Line Pipe Steel in soil Environment, Journal of Corrosion Science and Engineering, vol. 07, 2005.

BERGAMIN FILHO, H.; REIS, B. F.; ZAGATTO, E. A. G.; A new device for improving sensitivity and stabilization in flow-injection analysis; Analytica Chimica Acta, v. 97 - 2, pp. 427-431, 1978.

BERTHOLON, R.; Characterization and Location of Original Surface of Corroded Metallic Archaeological Objects; Surface Engineering, vol. 17 - 3, pp 241-245, 2001.

BLENGINO, J. M.; KEDDAM, M.; LABBE, J. P.; ROBBIOLA, L.; Physico-chemical Characterization of Corrosion Layers Formed on Iron in a Sodium Carbonate Bicarbonate Containing Environment; Corrosion Science; vol. 37; pp. 621 – 643; 1995.

BOTELER, D. H.; Geomagnetic Effects on the pipe-to-Soil Potentials of a Continental Pipeline; Adv. Space Res., vol. 26, n 01, pp. 15-20, 2000.

BRADFORD, S. A. *Practical Handbook of Corrosion Control in Soils*, CASTI Publishing Inc. – ASTM, 2000.

BROWN, G.; A semi-micro Method for the Preparation of Soil Clays for X-ray diffraction Studies; *Journal of Soil Science*, vol. 4, 2, 1953.

BUENO, A. H. S.; VENTIN, F. F.; CASTRO, B. B., PONCIANO, J. A. C.; Avaliação de Corrosividade em Amostras de Solo; 7a COTEQ - Conferencia sobre Tecnologia de Equipamentos; 2003.

BURSTEIN, G. T.; LIU, C.; SOUTO, R. M.; VINES, S. P.; Origins of Pitting Corrosion, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 39, pp 25-30, 2004.

CANTRELL, K. J.; KRUPKA, KENNETH M.; DEUTSCH, W. J.; LINDBERG, MICHAEL J.; Residual Waste from Hanford Tanks 241-C-203 and 241-C-204. 2. Contaminant Release Model; *Environmental Science and Technology*; 40; pp. 3755-3761; 2006.

CHEN, W., WANG, S. H.; CHU, R.; KING, F.; JACK, T. R.; FESSLER, R. R.; Effect of precyclic loading on stress-corrosion-cracking initiation in an X-65 pipeline steel exposed to near-neutral pH soil environment, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34 A, 2003.

COLE, G. M.; *Underground Storage Tank Installation and Management*, Lewis Publishers, Inc., 1992.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/conama>>. Consultado em 10/agosto/2006.

CORBETT, R. A.; JENKINS, C. F.; Soil characteristics as criteria for cathodic protection of a nuclear fuel production facility; *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*, ASM, Philadelphia, pp. 95-106, 1989.

CREIG-SMITH, S.; To Refurbish or Replace Steel Water Pipelines, That is The Question; Engineering Failure Analysis; vol. 8, pg 107 – 112; 2001.

DILLMANN, P.; BALASUBRAMANIAM, R.; Characterization of Ancient Indian Iron and Entrapped Slag Inclusions Using Electron, Photon and Nuclear Microprobes; Bull. Mater. Sci.; vol. 24, n 03, pp 317-322, 2001.

DOYLE, G.; SEICA, M. V.; GRABINSKY, M. W. F.; The Role of Soil in the External Corrosion of Cast Iron Water Mains in Toronto, Canada; Can. Geotech. J., vol. 40, 225-236, 2003.

DUAN, J.; HOU, B, YU, Z.; Characteristics of Sulfide Corrosion Products on 316L Stainless Steel Surfaces in the Presence of Sulfate-Reducing Bacteria; Materials Science and Engineering; in press, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Manual de Métodos de Análise de Solo, 2^a ed., 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 1^a ed., 1999.

EPA US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Process affecting subsurface transport of leaking underground tank fluids. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, NV, 2006.

EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement Second Edition, 2nd. ed., 2000.

EURACHEM / CITAC - Guide to Quality in Analytical Chemistry an Aid to Accreditation, 2002.

FRIEDMAN, S.; Soil Properties Influencing Apparent Electrical Conductivity: a Review; Computers and Electronics in Agriculture, 46, pg. 45-70, 2005.

FU, C. Y.; ZHENG, J. S.; ZHAO, J. M.; XU, W. D.; Corrosion Induced Failures of Oil Tubulars from Gas Wells in Zhongyuan Oil Field; British Corrosion Journal, vol. 34, n 01, 71, 1999.

GARDINER, C. P.; MELCHERS, R. E.; Corrosion of Mild Steel in Porous Media; Corrosion Science, vol. 44, pp. 2459-2478, 2002.

GERWIN, W.; BAUMHAUER, R.; Effect of Soils Parameters on the Corrosion of Archaeological Metal Finds; Geoderma, 96, pp. 63-80, 2000.

GIL, M. L. A.; SANTOS, A.; BETHENCOURT, M.; GARCIA, T.; FERNANDEZ-BASTERO, S.; VELO, A.; GAGO-DUPORT, L.; Use of X-ray and other Techniques to Analyze the Phase Transformation Induced in Archaeological Cast Iron after its Stabilization by the Electrolytic Method, Analytica Chimica Acta, 494, pp. 245-254, 2003.

GINÉ, M. F.; BERGAMIN FILHO, H.; ZAGATTO, E. A. G.; REIS, B. F.; Simultaneous determination of nitrate and nitrite by flow injection analysis; Analytica Chimica Acta, v. 114, pp. 191-197, 1980.

HUDAK, P. F.; DAVID, J. W.; HUNTER, B. A.; Managing subsurface property hazards: reactive soils and underground storage tanks. Urban Water 1, 237-241, 1999.

HULKA, K.; High Strength large Diameter Pipe Plate from Standard Production X80 / X100; em www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/info/hsLDPP/hsLDPP.htm disponível em 05/02/07.

KARE, M.; NAHAR, S.; Soil aggressiveness towards buried water pipelines, Environmental Technology, vol. 18, pp. 187-194, 1997.

KIM, J.; KIM, Y.; Cathodic Protection Criteria of Thermally Insulated Pipeline Buried in Soil; Corrosion Science, vol. 43, pp 2011-2021, 2001.

KIMPE, C. R.; Clay and Silt Analysis In: Soil sampling and methods of analysis, M. R. Carter, Ed., Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, 1993.

LAZZARI, V.; MACHADO, S.; SILVA, C.; NETO, O.; MOREIRA, J.; Industrial Data on the First API X80 Line Pipe Produced in Latin America; COSIPA Works, São Paulo.

LEAVENWORTH, G.; Leaking underground storage tanks. Insurance Review, 48 (3), 20-27, 1987.

LEVLIN, E.; Aeration Cell Corrosion of Carbon Steel in Soil In Situ Monitoring Cell Current and Potential, Corrosion Science, vol. 38, n 12, pp. 2083-2090, 1996.

LINTER, B. R.; BURSTEIN, G. T.; Reactions of Pipeline Steels in Carbon Dioxide Solutions; Corrosion Science; vol. 41, pp. 117 – 139; 1999.

LOPEZ, E.; OSELLA, A.; MARTINO, L.; Controlled Experiments to Study Corrosion Effects Due to External Varying Fields in Embedded Pipelines; Corrosion Science, 2005.

MANOLATOS, R. P. H., JEROME, M., MEYER, M., GALLAND, J.; Hydrogen Absorption by Cathodically Protected Underground Steel Piping in Thiosulphate Containing Media; Corrosion Science, vol. 40, pp. 619 – 629; 1998.

MARSHALL, W. F.; SMITH, D. D.; WARNER, J. F.; Advantages of Continuous Impressed Current Anodes in High Resistively Soil Environments; The NACE International Annual Conference and Exposition – CORROSION 97; 1997.

MATTHIESEN, H., HILBERT, L.R., GREGORY, D., SØRENSEN, B. Corrosion of archaeological iron artifacts compared to modern iron at the waterlogged site Nydam, Denmark. *In* EUROCORN 2004, Nice 12-16 September 2004. CD-ROM, European Federation of Corrosion. 2004.

MCBRIDE, M. B. Environmental chemistry of soils; Oxford University Press, Inc.: New York, 1994.

MOORE, T. J.; HALLMARK, C. T.; Soil Properties Influencing Corrosion of Steel in Texas Soils; *Soils Sci. Soc. Am. J.*; vol. 51, 1987.

MOSCHINI, L.E.; SANTOS, J. E.; PIRES, J. S. R.; Environmental Diagnosis of Risk Areas Related to Gas Stations; *Brazilian Archives of Biology and Technology*; vol. 48, nº. 04, 2005.

MURRAY, J. N.; MORAN, P. J.; Influence of Moisture on Corrosion of Pipeline Steel in Soils Using In Situ Impedance Spectroscopy; *Corrosion Science*, pp 34-43, 1989.

NEFF, D.; REGUER, S.; BELLOT-GURLET, L.; DILLMANN, P.; BERTHOLON, R.; Structural Characterization of Corrosion Products on Archaeological Iron: an Integrated Analytical Approach to Establish Corrosion Forms; *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 35, pp 739-745, 2004.

NOVAKOVA, A. A.; GENDLER, T. S., MANYUROVA, N. D., A Mössbauer Spectroscopy Study of the Corrosion Products Formed at an Iron Surface in Soil, *Corrosion Science*, vol. 39, n 9, pp 1585-1594, 1997.

OCÓN, P.: CRISTOBAL, A. B.; HERRASTE, P.; FATAS, E.; Corrosion Performance of Conducting Polymer Coating applied on Mild Steel; *Corrosion Science* vol. 47, pgs. 649 – 662; 2005.

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; vol. 84: pp. 1 – 6: 2004.

OJOVAN M. L.; LEE W. E.; BARINOV A. S.; STARTCEVA W. L. V.; BACON D. H.; MCGRAIL B. P.; VIENNA J. D.; Corrosion of low level vitrified radioactive waste in a loamy soil; Glass Technology, vol. 47 no2, pp. 48 – 55; 2006.

OSELLA, A.; FAVETTO, A.; Effects of Soil Resistivity on Currents Induced on Pipelines; Journal of Applied Geophysics, vol. 44, pp 303-312, 2000.

PALMER, J. D.; Environmental characteristics controlling the soil corrosion of ferrous piping; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASM, Philadelphia, pp. 5-17; 1989.

PARKER, M. E.; PEATTIE, E. G.; Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection. Gulf Publishing Company, 1984.

PRADO, H.; Solos do Brasil: gênese, morfologia, classificação, levantamento, manejo; 4º. Ed.; 2005.

PRATES, C. P. T.; PIEROBON, E. C.; COSTA, R. C.; FIGUEIREDO, V. S.; Evolução da Oferta e da Demanda de Gás natural no Brasil; BNDES Setorial, n. 24, pg. 35-68, 2006.

REGUER, S., DILLMAN, P.; MIRAMBET, F.; BELLOT-GURLET, L.; Local and Structural Characterization of Chlorinated Phases Formed on Ferrous Archaeological Artifacts by μ XRD and μ XANES, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 240, pp. 500-504, 2005.

RHOADES, J. D.; RAATS, A. C.; PRATHER, R. J.; Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity; Soil Sci. Soc. Am. J.; vol. 40, 1976.

RIEMER, D.; ORAZEM, M.; A Mathematical Model for the Cathodic Protection of Tank Bottoms; Corrosion Science, vol. 47, pp 849-868, 2005.

RODRIGUES, M. L.; DICK, L. F. P.; Estudo da Corrosividade de Solos ao Longo do Oleoduto Oscan; Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos – 7ª COTEQ; Florianópolis – SC; 2003.

RODRIGUES, S. J. J.; HERNANDEZ, F. J. S.; GONZALES, J. E. G.; XRD and SEM Studies of the Layer of Corrosion Products for Carbon Steel in Various Different Environments in the Province of Las Palmas (The Canary Islands, Spain), Corrosion Science, vol. 44, pp 2425-2438, 2002.

SAVOYE, S.; LEGRAND, L.; SAGON, G.; LECOMTE, S.; CHAUSSE, A.; MESSINA, R.; TOULHOAT, P.; Experimental investigations on iron corrosion products formed in bicarbonate/carbonate - containing solutions at 90 °C. Corrosion Science, vol. 43, pp. 2049-2064, 2001.

SCHULZE, D. G.; Identification of Soil Iron Oxide Minerals by Differential X-ray Diffraction, Soil Sci. Soc. Am. J., vol.45, pp. 437-440, 1981.

SEICA, M. V.; PACKER, J. A.; GRABISNKY, M. W. F.; ADAMS, B. J.; Evaluation of the properties of Toronto Iron Water Mains and Surrounding Soil; Can. J. Civ. Eng., 29, pp. 222-237, 2002.

SHEIKH, S. T.; Failure of Newly Laid Water Pipeline; Journal of Corrosion Science and Engineering; vol. 6, Conference “Corrosion Science in the 21st Century; UMIST; 2005.

SOILS SCIENCE SOCIETY OF AMERICA; Quantitative Methods in Soil Mineralogy; **AMONETTE, J. E.** and **ZELAZNY, L. W.** editors; 1994.

SONG, F. M.; KIRK, D. W.; GRAYDON, J. W.; CORMACK, D. E.; CO₂ Corrosion of Pipelines Under a Disbonded Coating in the Presence of a Precipitate; vol. 6, Conference "Corrosion Science in the 21st Century; UMIST; 2002.

SONG, F. M.; KIRK, D. W.; CORMACK, D. E.; A Comprehensive Model for Predicting CO₂ Corrosion in Oil and Gas Systems; Conference Corrosion/2005; Houston, TX; USA; 2005.

SRIKANTH, S.; SANKARANARAYANAN, K.; GOPALAKRISHNA, K.; NARASIMHAN, B. R. V.; DAS, T. V.K.; DAS, S. K.; Corrosion in a Buried Pressurized Water Pipeline; Engineering Failure Analysis, 2004, In Press.

THICKETT, D; disponível em <<http://icom-cc.icom.museum/WG/Metals/>> Acesso em: 10/agosto/ 2006.

VEGA, E.; BERGER, P.; DILLMANN, P.; A Study of Transport Phenomena in the Corrosion Products of Ferrous Archaeological Artifacts Using ¹⁸O Tracing and Nuclear Microprobe Analysis, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 240, pp 554-558, 2005.

WEBSTER, R.; BECKETT, P. H. T.; Quality and Usefulness of Soil Maps, Nature vol. 219, 17, 1968.

WOLT, J.D.; Soil Solution Chemistry, Applications to Environmental Science and Agriculture, 1994.

Bibliografía consultada

AIGINGER, H.: Historical Development and Principles of Total Reflection X-ray Fluorescence Analysis (TRXRF); *Spectrochimica Acta*, vol. 46B, nº. 10, pp. 1313-1321, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D 1193-99, Standard Specification for Reagent Water.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E 617-97, Standard Specification for Laboratory Weights and Precision Mass Standards.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D422-63, Standard Test Methods for Particle-Size Analysis of Soils, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D2217-85, Standard Practice for Wet Preparation of Soil Samples for Particle Size Analysis and Determination of Soil Constants, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D2217-85, Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle Size Analysis and Determination of Soil Constants.

ASTER, B.; VON BOHLEN, A.; BURBA, P.; Determination of Metals and their Species in Aquatic Substances by Using Total-Reflection X-ray Fluorescence Spectrometry; *Spectrochimica Acta*, 52B, pp. 1009-1018, 1997.

BUSHMAN, J. B.; MEHALICK, T. E. Statistical analysis of soils characteristics to predict mean time to corrosion failure of underground metallic structure; **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS,** ASM, Philadelphia, pp. 107-118, 1989.

CARTER, R. C.; Soil Sampling and Methods of Analysis, Lewis Publishers, 1993.

CLAES, M.; DE BOKX, P.; WILLARD, N.; VENY, P.; VAN GRIEKEN, R.: Optimization of Sample Preparation for Grazing Emission X-ray Fluorescence in Micro and Trace Analysis Applications; *Spectrochimica Acta*, 52B, pp; 1063-1070, 1997a.

CLAES, A.; VAN GRIEKEN, R.; DE BOKX, P.; Comparison of Grazing Emission XRF with Total Reflection and other X-ray Emission Techniques; *X-ray Spectrometry*, vol. 26, pp. 153-158, 1997b.

CLINICAL AND LABORATORY STANDARDS INSTITUTE - CLSI (NCCLS - National Committee for Clinical Laboratory Standards): Preparation and Testing of Reagent Water in the Clinical Laboratory – 3rd. Edition – 1997, vol. 17 nr.18.

DE BOKS, P. K.; KOK., C.; BAILLEUL, A.; WIENER, G. ; URBACH, H. P. ; Grazing-Emission X-ray Fluorescence Spectrometry ; Principles and Applications ; *Spectrochimica Acta*, 52B, pp. 829-840, 1997.

JENKINS, R., et al.; Sample Preparation Methods in X-Ray Powder Diffractometry – Report of JCPDS Task Group. *Powder Diff.* 1, 51-63.

JENKIS, R. et al.; Quantitative X-Ray Spectrometry, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc, 1995.

KLOCKENKAMPER, R.; VON BOHLEN, A.: Elemental Analysis of Environmental Samples by Total Reflection X-Ray Fluorescence: a Review; *X-ray Spectrometry*, vol. 25, 156-162, 1996.

KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E.; X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials, Wiley, New York, 966 pp. 1974.

MATTNEY, C. G. Underground Storage Tank Installation and Management. Lewis Publishers, Inc., 1992.

MOORE, D.; REYNOLDS, R. C. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, Oxford University Press, Oxford, 332 pp., 1989.

NASCIMENTO FILHO, V. F.; POBLETE, V. H.; PARREIRA, P. S.; ESPINOZA, V. E. NAVARRO, A. A. – Analytical Sensibility of a X-ray Fluorescence by Total Reflection System (in Portuguese). Anais VII CGEN, Belo Horizonte, MG, 1998.

SCHWENKE, H.; KNOTH, J.; A highly sensitive energy-dispersive X-ray spectrometer with multiple total reflection of the exciting beam. Nucl. Instrum. Methods, 193, p. 239-243, 1982.

STRELI, C.; AIGINGER, H.; WOBRAUSCHEK, R.: Light Element Analysis with a New Spectrometer for Total-Reflection X-ray Fluorescence; Spectrochimica Acta, vol. 48B, 2, pp. 163-170, 1993.

STRELI, C.; WOBRAUSCHEK, P., HANES, U. E. - A new spectrometer for total reflection X-ray fluorescence analysis of light elements. Nucl. Instrum. Methods, 334, pp. 425-429, 1993.

Anexo

Tabela A13 – Dados meteorológicos de Fevereiro 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPORACAO
32	2006	1	FEV	605	11.0	0.0	80	5.9	6.9	31.9	17.2	24.6	7.60
33	2006	2	FEV	533	9.2	0.6	77	6.1	5.5	33.6	18.0	25.8	5.36
34	2006	3	FEV	585	9.0	0.0	76	8.5	3.4	31.9	18.6	25.3	6.76
35	2006	4	FEV	549	8.0	1.5	79	8.5	4.1	32.9	19.9	26.4	
36	2006	5	FEV	431	4.9	0.0	83	7.0	4.1	32.8	20.1	26.5	
37	2006	6	FEV	543	10.0	0.0	91	2.2	6.0	35.5	20.9	28.2	7.29
38	2006	7	FEV	528	7.2	4.6	83	14.5	7.2	33.8	21.4	27.6	7.09
39	2006	8	FEV	490	6.0	18.8	84	6.1	5.5	32.0	20.8	26.4	4.37
40	2006	9	FEV	412	3.0	4.7	90	8.6	5.6	29.9	20.9	25.4	4.30
41	2006	10	FEV	256	0.3	18.0	96	9.2	4.8	27.8	20.4	24.1	1.66
42	2006	11	FEV	176	0.0	17.2	97	4.7	4.0	25.0	19.5	22.3	0.26
43	2006	12	FEV	216	0.0	11.9	93	5.5	3.3	26.1	19.4	22.8	1.70
44	2006	13	FEV	351	2.5	0.0	88	2.0	6.0	30.0	19.3	24.7	2.08
45	2006	14	FEV	516	5.7	15.6	86	6.5	7.9	31.2	18.9	25.1	4.76
46	2006	15	FEV	515	8.3	43.7	86	12.9	9.2	33.1	19.2	26.2	
47	2006	16	FEV	228	0.2	0.3	93	2.0	3.6	27.0	19.3	23.2	0.43
48	2006	17	FEV	286	1.1	4.0	93	7.0	3.5	26.5	21.0	23.8	4.19
49	2006	18	FEV	257	0.3	2.1	90	6.2	2.9	27.7	20.9	24.3	2.12
50	2006	19	FEV	386	3.7	0.0	80	8.5	3.6	31.8	19.2	25.5	2.11
51	2006	20	FEV	234	0.1	1.4	93	4.9	4.1	28.7	20.3	24.5	2.37
52	2006	21	FEV	324	1.0	31.5	93	16.0	6.1	29.7	19.0	24.4	2.56
53	2006	22	FEV	501	5.5	0.0	85	4.3	7.0	30.0	17.4	23.7	3.15
54	2006	23	FEV	548	10.0	0.0	80	6.0	7.5	31.5	19.7	25.6	6.40
55	2006	24	FEV	313	1.8	0.3	89	7.7	5.3	27.5	19.8	23.7	3.28
56	2006	25	FEV	356	2.9	0.0	85	7.7	6.1	29.6	20.2	24.9	4.22
57	2006	26	FEV	527	7.5	0.0	87	8.5	6.6	29.4	19.4	24.4	6.93
58	2006	27	FEV	419	4.6	0.0	82	7.0	4.5	30.9	17.7	24.3	4.82
59	2006	28	FEV	450	5.4	0.0	82	8.5	4.5	31.7	19.6	25.7	4.96
MEDIA				411.96	4.61	6.29	86.46	7.23	5.31	30.34	19.57	24.96	4.03
TOTAL				11535.00	129.20	176.20	2421.00	202.50	148.80	849.50	548.00	698.75	100.77
DESVIO PADRAO				127	3.5	10.7	6	3.2	1.6	2.6	1.1	1.3	2.13
VARIANCIA				16042	12.4	115.0	33	10.3	2.5	6.5	1.2	1.8	4.55
VALOR MAXIMO				605	11.0	43.7	97	16.0	9.2	35.5	21.4	28.2	7.60
VALOR MINIMO				176	0.0	0.0	76	2.0	2.9	25.0	17.2	22.3	0.26
DIAS DE CHUVA:					16								

Tabela A14 – Dados meteorológicos de Março 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPO- RACAO
61	2006	1	MAR	476	7.3	0.0	79	7.7	3.7	32.6	19.6	26.1	4.71
62	2006	2	MAR	415	7.9	0.0	80	4.0	5.5	34.0	19.8	26.9	4.98
63	2006	3	MAR	438	6.2	0.0	82	6.2	3.6	33.7	20.2	27.0	4.88
64	2006	4	MAR	429	5.9	26.8	83	9.2	2.9	33.9	20.7	27.3	
65	2006	5	MAR	379	4.5	1.2	90	7.0	5.2	29.0	20.3	24.7	1.27
66	2006	6	MAR	478	7.7	15.1	86	8.9	12.2	31.5	22.1	26.8	7.52
67	2006	7	MAR	309	2.8	0.1	92	3.5	4.6	28.4	18.5	23.5	2.20
68	2006	8	MAR	607	10.3	0.0	78	4.0	7.3	31.6	18.1	24.9	5.82
69	2006	9	MAR	594	10.0	0.0	76	4.0	6.1	33.0	18.3	25.7	6.13
70	2006	10	MAR	243	0.7	25.9	84	14.5	3.8	31.0	19.8	25.4	
71	2006	11	MAR	481	7.4	0.0	78	8.5	13.2	29.0	18.8	23.9	2.03
72	2006	12	MAR	490	7.7	0.0	78	8.5	10.7	28.8	17.6	23.2	5.50
73	2006	13	MAR	525	9.2	0.0	74	6.8	8.8	33.1	17.8	25.5	5.20
74	2006	14	MAR	519	9.2	0.0	76	8.0	7.8	32.3	17.0	24.7	6.23
75	2006	15	MAR	454	7.8	1.7	81	4.8	4.4	31.8	18.0	24.9	3.85
76	2006	16	MAR	450	5.5	0.0	83	6.0	6.2	31.9	20.4	26.2	3.42
77	2006	17	MAR	449	6.5	0.0	76	5.5	2.7	30.8	19.2	25.0	4.71
78	2006	18	MAR	473	7.2	0.0	75	7.7	4.0	31.9	20.1	26.0	5.76
79	2006	19	MAR	410	5.4	0.0	82	6.2	3.5	31.4	19.1	25.3	4.39
80	2006	20	MAR	499	8.2	0.0	82	6.0	6.2	32.2	20.5	26.4	4.44
81	2006	21	MAR	440	5.2	0.0	80	5.0	6.5	30.0	20.2	25.1	5.44
82	2006	22	MAR	316	3.8	7.7	92	8.3	4.8	31.0	19.8	25.4	3.34
83	2006	23	MAR	206	1.4	9.8	95	11.0	5.7	31.0	20.2	25.6	1.53
84	2006	24	MAR	302	2.3	21.3	90	13.7	4.4	31.6	19.2	25.4	6.40
85	2006	25	MAR	330	3.1	13.9	88	9.2	2.4	30.2	20.4	25.3	3.80
86	2006	26	MAR	263	1.2	0.0	83	7.7	8.8	26.3	19.6	23.0	0.27
87	2006	27	MAR	468	7.5	0.0	78	5.0	8.5	31.1	19.2	25.2	4.12
88	2006	28	MAR	491	9.3	0.5	77	1.0	4.9	32.0	19.0	25.5	5.12
89	2006	29	MAR	180	0.3	30.0	89	44.0	7.2	25.9	20.8	23.4	
90	2006	30	MAR	396	5.8	0.0	85	8.0	10.3	30.2	17.9	24.1	5.50
91	2006	31	MAR	450	6.5	0.0	83	9.2	8.6	29.5	16.4	23.0	4.39
MEDIA				418.06	5.93	4.97	82.42	8.36	6.27	30.99	19.31	25.15	4.39
TOTAL				12960	183.8	154.0	2555	259.1	194.5	960.7	598.6	779.7	122.95
DESVIO PADRAO				103	2.8	9.1	5	7.1	2.7	1.9	1.2	1.2	1.67
VARIANCIA				10613	7.6	82.5	30	50.0	7.6	3.7	1.5	1.3	2.78
VALOR MAXIMO				607	10.3	30.0	95	44.0	13.2	34.0	22.1	27.3	7.52
VALOR MINIMO				180	0.3	0.0	74	1.0	2.4	25.9	16.4	23.0	0.27
DIAS DE CHUVA:	12												

Tabela A15 – Dados meteorológicos de Abril 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPO- RACAO
92	2006	1	ABR	460	8.9	0.0	79	9.2	9.2	29.9	18.0	24.0	3.28
93	2006	2	ABR	437	8.1	0.0	80	8.5	7.4	29.4	17.1	23.3	3.30
94	2006	3	ABR	391	7.1	0.0	79	8.9	11.7	28.4	17.4	22.9	4.61
95	2006	4	ABR	440	7.0	0.0	78	10.1	8.1	30.2	14.8	22.5	4.31
96	2006	5	ABR	321	1.0	0.0	83	3.6	3.7	27.9	15.1	21.5	1.59
97	2006	6	ABR	173	0.3	16.6	95	4.0	3.4	27.5	19.2	23.4	0.72
98	2006	7	ABR	221	1.2	2.0	92	7.0	1.8	26.8	17.8	22.3	
99	2006	8	ABR	268	2.7	0.1	91	5.5	4.5	26.7	18.8	22.8	0.64
100	2006	9	ABR	331	4.7	8.8	89	6.2	3.4	30.1	17.8	24.0	
101	2006	10	ABR	477	9.5	0.0	84	7.5	7.6	29.1	17.3	23.2	5.46
102	2006	11	ABR	491	10.0	0.0	76	9.8	9.3	27.8	17.6	22.7	5.89
103	2006	12	ABR	462	10.2	0.0	75	4.0	5.2	30.5	15.8	23.2	4.30
104	2006	13	ABR	424	7.7	0.0	75	4.7	3.1	29.6	15.1	22.4	4.49
105	2006	14	ABR	442	8.3	0.0	75	6.2	3.5	29.7	15.4	22.6	4.57
106	2006	15	ABR	333	4.8	0.0	77	4.7	2.4	28.5	15.6	22.1	2.88
107	2006	16	ABR	129	0.0	5.5	70	5.5	4.6	22.2	18.4	20.3	
108	2006	17	ABR	229	0.8	0.0	83	10.0	15.2	23.1	18.3	20.7	3.27
109	2006	18	ABR	429	8.4	0.0	81	7.0	12.4	24.4	15.1	19.8	5.30
110	2006	19	ABR	454	9.8	0.0	77	5.2	10.8	26.9	12.7	19.8	4.98
111	2006	20	ABR	400	6.9	0.0	74	5.5	3.6	27.2	12.4	19.8	3.11
112	2006	21	ABR	421	7.6	0.7	70	6.2	4.1	28.2	11.6	19.9	4.06
113	2006	22	ABR	375	6.1	0.0	78	7.7	5.3	29.8	17.4	23.6	3.98
114	2006	23	ABR	365	5.8	0.0	80	5.5	4.5	29.0	16.1	22.6	4.27
115	2006	24	ABR	455	9.7	0.0	71	2.9	4.3	31.4	13.2	22.3	3.80
116	2006	25	ABR	391	8.4	0.0	80	7.0	5.8	31.4	14.3	22.9	2.79
117	2006	26	ABR	422	9.6	0.0	76	7.5	7.2	31.5	17.1	24.3	4.93
118	2006	27	ABR	434	9.3	0.0	77	4.9	8.7	29.2	16.0	22.6	5.43
119	2006	28	ABR	408	7.2	0.0	80	7.7	6.0	27.3	13.0	20.2	3.81
120	2006	29	ABR	379	6.3	0.0	88	4.7	3.0	27.9	12.8	20.4	2.80
121	2006	30	ABR	347	5.2	0.0	88	6.2	3.7	27.4	13.0	20.2	3.30
MEDIA				377	6.4	1.1	80	6.4	6.1	28.3	15.8	22.1	3.77
TOTAL				11309	192.6	33.7	2401	193.4	183.5	849.0	474.2	661.6	101.87
DESVIO PADRAO				90	3.1	3.4	6	1.9	3.3	2.2	2.1	1.4	1.31
VARIANCIA				8147	9.7	11.7	40	3.7	10.6	4.8	4.5	2.0	1.70
VALOR MAXIMO				491	10.2	16.6	95	10.1	15.2	31.5	19.2	24.3	5.89
VALOR MINIMO				129	0.0	0.0	70	2.9	1.8	22.2	11.6	19.8	0.64
DIAS DE CHUVA:					6								

Tabela A16 – Dados meteorológicos de Maio 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPO- RACAO
122	2006	1	MAI	389	8.4	0.0	83	4.7	4.6	28.6	12.1	20.4	3.08
123	2006	2	MAI	425	9.1	0.0	61	8.9	8.9	28.4	16.1	22.3	4.48
124	2006	3	MAI	468	9.6	0.0	60	5.8	6.5	24.1	7.3	15.7	5.33
125	2006	4	MAI	444	9.5	0.0	60	5.2	6.3	24.5	4.9	14.7	3.74
126	2006	5	MAI	368	7.7	0.0	68	7.7	8.1	23.9	6.7	15.3	3.20
127	2006	6	MAI	381	8.1	0.0	65	5.5	4.3	25.1	9.8	17.5	3.00
128	2006	7	MAI	291	4.9	0.0	68	7.0	6.4	24.5	10.6	17.6	3.07
129	2006	8	MAI	253	3.3	0.0	86	5.0	7.0	26.2	14.6	20.4	0.98
130	2006	9	MAI	409	7.0	0.0	82	7.0	7.3	26.4	12.2	19.3	3.36
131	2006	10	MAI	356	6.7	0.0	81	6.0	6.2	25.0	10.9	18.0	2.82
132	2006	11	MAI	449	9.6	0.0	79	9.8	8.6	24.0	9.4	16.7	5.63
133	2006	12	MAI	133	0.0	0.0	85	5.5	5.0	20.8	9.8	15.3	0.36
134	2006	13	MAI	324	6.1	0.0	83	7.0	5.4	23.1	8.2	15.7	3.12
135	2006	14	MAI	364	7.5	0.0	83	5.5	3.8	24.5	8.9	16.7	2.68
136	2006	15	MAI	398	9.3	0.0	69	5.1	6.5	27.4	9.4	18.4	3.81
137	2006	16	MAI	404	9.2	0.0	71	6.2	6.1	27.4	8.5	18.0	2.96
138	2006	17	MAI	383	8.2	0.0	72	4.0	3.8	27.4	8.4	17.9	3.24
139	2006	18	MAI	378	8.7	0.0	70	5.2	7.2	28.6	8.8	18.7	2.44
140	2006	19	MAI	327	6.2	0.0	61	7.7	6.6	27.4	10.3	18.9	3.75
141	2006	20	MAI	111	0.0	0.0	83	7.0	3.6	20.5	11.7	16.1	0.75
142	2006	21	MAI	189	1.2	0.0	79	4.0	2.9	24.3	13.9	19.1	1.51
143	2006	22	MAI	113	0.0	1.2	93	4.0	5.6	19.0	14.6	16.8	0.29
144	2006	23	MAI	138	0.0	0.8	97	6.1	9.9	17.8	15.2	16.5	0.75
145	2006	24	MAI	180	2.1	0.0	84	7.0	11.8	21.6	12.4	17.0	1.53
146	2006	25	MAI	332	7.6	0.0	80	4.2	5.5	26.5	11.7	19.1	3.04
147	2006	26	MAI	319	5.9	0.0	78	4.7	2.5	26.0	9.5	17.8	0.17
148	2006	27	MAI	324	6.1	0.0	78	5.5	4.9	27.6	10.6	19.1	1.15
149	2006	28	MAI	337	6.5	0.0	75	8.5	4.2	27.6	10.4	19.0	3.43
150	2006	29	MAI	323	9.1	0.0	75	2.0	5.1	29.2	11.7	20.5	2.39
151	2006	30	MAI	306	8.4	0.0	73	4.0	5.9	30.3	10.5	20.4	4.28
152	2006	31	MAI	291	8.1	0.0	71	9.6	7.1	29.8	11.5	20.7	4.07
MEDIA				320	6.3	0.1	76	6.0	6.1	25.4	10.7	18.0	2.72
TOTAL				9907	194.1	2.0	2353	185.4	187.6	787.5	330.6	559.1	84.41
DESVIO PADRAO				99	3.2	0.3	9	1.8	2.0	3.1	2.5	1.8	1.42
VARIANCIA				9859	10.0	0.1	85	3.1	4.0	9.3	6.2	3.4	2.01
VALOR MAXIMO				468	9.6	1.2	97	9.8	11.8	30.3	16.1	22.3	5.63
VALOR MINIMO				111	0.0	0.0	60	2.0	2.5	17.8	4.9	14.7	0.17
DIAS DE CHUVA:		2											

Tabela A17 – Dados meteorológicos de Junho 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPORACAO
153	2006	1	JUN	326	9.4	0.0	84	5.3	9.8	27.2	13.9	20.6	3.77
154	2006	2	JUN	338	7.8	0.0	82	7.7	6.5	24.8	9.8	17.3	2.99
155	2006	3	JUN	295	6.1	0.0	86	4.0	3.3	25.5	8.7	17.1	2.60
156	2006	4	JUN	322	7.2	0.0	78	6.2	4.4	26.8	10.0	18.4	3.19
157	2006	5	JUN	141	1.1	0.0	84	2.0	3.4	23.8	12.6	18.2	0.21
158	2006	6	JUN	278	8.3	0.0	84	3.1	4.7	28.6	13.6	21.1	3.78
159	2006	7	JUN	264	7.2	0.0	85	2.8	5.9	28.5	10.7	19.6	2.28
160	2006	8	JUN	299	9.3	0.0	79	3.6	6.1	28.0	10.4	19.2	3.11
161	2006	9	JUN	322	7.2	0.0	77	7.7	5.2	26.5	9.2	17.9	3.26
162	2006	10	JUN	256	4.6	0.0	75	7.0	5.9	27.6	12.4	20.0	3.43
163	2006	11	JUN	208	2.7	0.0	83	5.5	5.0	26.2	11.8	19.0	2.49
164	2006	12	JUN	283	8.1	0.0	88	6.0	8.5	26.2	11.5	18.9	2.20
165	2006	13	JUN	288	7.7	0.0	84	2.0	5.0	28.4	10.0	19.2	2.42
166	2006	14	JUN	311	6.8	0.0	77	5.5	3.8	26.7	9.4	18.1	3.02
167	2006	15	JUN	312	6.8	0.0	75	4.7	4.3	26.6	8.2	17.4	3.03
168	2006	16	JUN	298	6.2	0.0	80	8.5	7.2	25.5	9.2	17.4	3.12
169	2006	17	JUN	275	5.3	0.0	85	5.5	3.7	24.7	7.9	16.3	1.67
170	2006	18	JUN	288	5.9	0.0	84	10.0	3.9	26.9	9.7	18.3	2.46
171	2006	19	JUN	291	7.5	0.0	82	4.0	6.0	28.0	10.1	19.1	2.10
172	2006	20	JUN	312	9.3	0.0	74	7.0	9.2	28.5	9.5	19.0	4.55
173	2006	21	JUN	303	9.3	0.0	72	4.9	9.2	28.7	10.0	19.4	2.33
174	2006	22	JUN	301	8.8	0.0	70	4.7	4.9	29.0	10.1	19.6	5.04
175	2006	23	JUN	278	3.6	0.0	85	9.2	4.9	27.3	9.0	18.2	2.79
176	2006	24	JUN	317	4.9	0.0	82	5.5	3.7	27.2	12.2	19.7	2.34
177	2006	25	JUN	282	3.8	0.0	76	9.2	6.7	28.2	11.2	19.7	3.11
178	2006	26	JUN	97	1.5	18.6	92	14.0	12.0	22.3	16.7	19.5	
179	2006	27	JUN	336	9.5	0.0	82	5.0	10.8	20.8	10.4	15.6	4.60
180	2006	28	JUN	330	8.5	0.0	83	10.0	12.0	20.4	6.3	13.4	2.43
181	2006	29	JUN	298	7.4	0.0	86	4.1	5.4	24.0	6.0	15.0	3.54
182	2006	30	JUN	297	6.2	0.0	86	4.0	2.9	25.3	8.0	16.7	1.62
MEDIA				284.87	6.60	0.62	81.33	5.96	6.14	26.27	10.28	18.28	2.88
TOTAL				8546	198.0	18.6	2440	178.7	184.3	788.2	308.5	548.4	83.48
DESVIO PADRAO				52	2.3	3.3	5	2.6	2.5	2.2	2.2	1.7	0.95
VARIANCIA				2664	5.2	11.1	25	7.0	6.5	4.9	4.7	2.8	0.91
VALOR MAXIMO				338	9.5	18.6	92	14.0	12.0	29.0	16.7	21.1	5.04
VALOR MINIMO				97	1.1	0.0	70	2.0	2.9	20.4	6.0	13.4	0.21
DIAS DE CHUVA:					1								

Tabela A18 – Dados meteorológicos de Julho 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPO- RACAO mm
183	2006	1	JUL	246	3.7	0.0	91	5.5	2.7	25.0	10.4	17.7	1.97
184	2006	2	JUL	58	0.0	0.5	96	6.2	2.5	18.2	13.3	15.8	0.62
185	2006	3	JUL	277	7.5	0.0	90	1.0	4.2	24.9	9.3	17.1	2.62
186	2006	4	JUL	289	6.9	0.0	88	3.2	7.5	26.0	7.8	16.9	2.89
187	2006	5	JUL	307	9.5	0.0	82	4.0	6.4	26.8	7.8	17.3	2.33
188	2006	6	JUL	291	9.3	0.0	82	1.0	4.9	27.4	7.3	17.4	2.87
189	2006	7	JUL	319	6.5	0.0	77	5.5	3.4	28.1	8.5	18.3	3.04
190	2006	8	JUL	314	6.3	0.0	73	5.5	4.9	29.6	11.1	20.4	3.39
191	2006	9	JUL	269	4.6	0.0	72	13.0	8.5	29.8	13.7	21.8	4.61
192	2006	10	JUL	190	2.0	7.9	94	9.5	8.2	21.2	16.0	18.6	1.24
193	2006	11	JUL	280	7.1	0.0	91	4.8	5.6	28.5	11.6	20.1	4.44
194	2006	12	JUL	298	9.2	0.0	81	5.9	8.4	29.6	12.8	21.2	2.18
195	2006	13	JUL	319	9.4	0.0	77	4.8	7.5	28.8	10.8	19.8	3.24
196	2006	14	JUL	323	6.6	0.0	77	5.5	5.3	27.5	9.8	18.7	3.05
197	2006	15	JUL	312	6.2	0.0	79	8.5	6.4	25.2	11.2	18.2	3.74
198	2006	16	JUL	343	7.4	0.0	78	7.7	5.3	25.2	10.6	17.9	3.65
199	2006	17	JUL	319	8.9	0.0	77	4.7	4.5	27.2	8.3	17.8	2.24
200	2006	18	JUL	312	8.8	0.0	75	4.0	6.1	27.8	8.4	18.1	4.40
201	2006	19	JUL	315	9.2	0.0	74	7.0	8.5	27.4	8.5	18.0	2.87
202	2006	20	JUL	305	9.3	0.0	75	4.7	7.0	28.4	8.5	18.5	3.65
203	2006	21	JUL	318	6.4	0.0	73	5.5	5.9	28.8	8.4	18.6	3.18
204	2006	22	JUL	343	7.3	0.0	66	6.2	6.2	30.1	10.4	20.3	4.12
205	2006	23	JUL	347	7.5	0.0	63	5.5	4.5	31.2	9.8	20.5	4.13
206	2006	24	JUL	314	9.5	0.0	63	4.7	8.1	32.3	12.2	22.3	4.42
207	2006	25	JUL	324	8.3	0.0	63	8.1	9.1	32.2	11.7	22.0	5.12
208	2006	26	JUL	304	8.1	0.0	63	9.0	9.3	31.9	10.4	21.2	4.60
209	2006	27	JUL	289	8.2	0.0	64	9.9	9.5	32.8	9.7	21.3	4.68
210	2006	28	JUL	288	5.3	5.0	61	7.7	7.1	33.0	13.7	23.4	4.28
211	2006	29	JUL	107	0.0	2.6	96	7.7	4.7	23.6	15.2	19.4	1.28
212	2006	30	JUL	74	0.0	12.4	96	7.0	8.8	15.5	11.7	13.6	1.10
213	2006	31	JUL	61	0.0	4.0	99	6.1	6.3	15.3	11.8	13.6	0.82
MEDIA				273	6.4	1.0	79	6.1	6.4	27.1	10.7	18.9	3.12
TOTAL				8455	199.0	32.4	2436	189.4	197.3	839.3	330.7	585.0	96.77
DESVIO PADRAO				82	3.0	2.7	11	2.4	1.9	4.5	2.2	2.3	1.23
VARIANCIA				6702	9.1	7.4	127	5.9	3.7	19.9	4.8	5.1	1.51
VALOR MAXIMO				347	9.5	12.4	99	13.0	9.5	33.0	16.0	23.4	5.12
VALOR MINIMO				58	0.0	0.0	61	1.0	2.5	15.3	7.3	13.6	0.62
DIAS DE CHUVA:		6											

Tabela A19 – Dados metereológicos de Agosto 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPOR- RACAO
214	2006	1	AGO	208	2.9	0.0	97	4.0	4.7	22.0	12.0	17.0	1.68
215	2006	2	AGO	194	1.8	0.0	96	8.0	7.7	22.4	10.7	16.6	2.06
216	2006	3	AGO	330	8.5	0.0	90	4.0	5.3	26.3	9.9	18.1	1.85
217	2006	4	AGO	338	5.7	0.0	85	4.0	2.7	27.5	10.5	19.0	2.61
218	2006	5	AGO	358	6.4	0.0	76	4.7	3.8	29.5	12.3	20.9	3.66
219	2006	6	AGO	371	6.8	0.0	70	5.5	3.6	30.9	12.8	21.9	4.41
220	2006	7	AGO	339	9.5	0.0	68	5.0	7.3	32.2	11.7	22.0	3.90
221	2006	8	AGO	363	9.5	0.0	67	9.9	10.1	31.6	12.0	21.8	4.35
222	2006	9	AGO	307	6.5	0.0	60	9.5	10.8	30.2	10.5	20.4	6.34
223	2006	10	AGO	332	7.9	0.0	62	7.9	6.6	33.0	14.0	23.5	5.04
224	2006	11	AGO	359	6.4	0.0	62	7.7	3.7	31.8	13.2	22.5	5.18
225	2006	12	AGO	335	5.6	0.0	62	4.7	3.8	30.9	13.6	22.3	4.37
226	2006	13	AGO	366	6.6	0.0	64	5.5	4.1	31.5	13.7	22.6	4.86
227	2006	14	AGO	341	9.4	0.0	61	10.0	10.6	32.8	12.9	22.9	5.88
228	2006	15	AGO	329	8.4	0.0	57	6.8	8.5	34.2	15.0	24.6	5.86
229	2006	16	AGO	350	9.5	0.0	56	9.1	9.4	35.0	13.7	24.4	5.61
230	2006	17	AGO	330	8.8	0.0	78	10.0	8.8	33.8	15.0	24.4	6.61
231	2006	18	AGO	343	5.8	0.0	80	10.0	5.8	31.1	14.3	22.7	4.32
232	2006	19	AGO	312	4.8	0.0	81	7.0	5.4	29.1	14.9	22.0	3.86
233	2006	20	AGO	343	5.8	0.0	72	9.2	5.6	27.8	13.4	20.6	4.77
234	2006	21	AGO	403	9.9	0.0	67	8.0	9.5	24.0	10.4	17.2	5.69
235	2006	22	AGO	420	9.8	0.0	63	5.1	5.5	25.4	5.7	15.6	4.13
236	2006	23	AGO	404	10.0	0.0	61	5.5	5.9	29.0	5.1	17.1	4.52
237	2006	24	AGO	393	9.5	0.0	57	1.0	5.7	32.0	7.8	19.9	3.80
238	2006	25	AGO	397	7.7	0.0	57	7.7	3.1	31.9	10.7	21.3	5.36
239	2006	26	AGO	401	7.8	9.3	55	12.2	8.4	32.7	12.1	22.4	
240	2006	27	AGO	384	7.2	0.0	85	11.5	10.7	25.9	17.0	21.5	2.40
241	2006	28	AGO	344	7.6	0.0	69	7.0	7.5	28.5	14.9	21.7	4.03
242	2006	29	AGO	283	4.0	0.0	75	12.0	17.2	19.7	14.0	16.9	4.06
243	2006	30	AGO	449	9.7	0.0	66	9.5	11.8	26.4	7.0	16.7	6.67
244	2006	31	AGO	366	8.7	8.1	64	15.1	9.5	31.6	8.9	20.3	5.20
MEDIA				348	7.4	0.6	70	7.6	7.2	29.4	11.9	20.7	4.44
TOTAL				10792	228.5	17.4	2163	237.1	223.1	910.7	369.7	640.2	133.08
DESVIO PADRAO				52	2.1	2.1	12	3.0	3.2	3.8	2.8	2.6	1.32
VARIANCIA				2708	4.4	4.6	134	8.8	9.9	14.2	7.8	6.5	1.75
VALOR MAXIMO				449	10.0	9.3	97	15.1	17.2	35.0	17.0	24.6	6.67
VALOR MINIMO				194	1.8	0.0	55	1.0	2.7	19.7	5.1	15.6	1.68
DIAS DE CHUVA:		2											

Tabela A20 – Dados meteorológicos de Setembro 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPO- RACAO
245	2006	1	SET	242	1.2	14.2	89	11.5	9.0	27.2	14.8	21.0	4.00
246	2006	2	SET	275	2.3	0.0	82	10.7	7.9	25.0	15.7	20.4	1.40
247	2006	3	SET	470	8.2	0.0	59	8.5	8.2	25.9	16.0	21.0	5.77
248	2006	4	SET	384	8.7	0.0	70	8.9	10.2	24.4	12.6	18.5	4.72
249	2006	5	SET	500	10.4	0.0	58	8.2	12.8	20.0	6.2	13.1	6.05
250	2006	6	SET	496	9.0	0.0	64	10.0	12.2	22.3	4.3	13.3	4.68
251	2006	7	SET	471	8.2	0.0	66	8.5	7.2	26.6	10.1	18.4	5.39
252	2006	8	SET	459	7.9	0.0	59	6.2	4.4	29.5	10.0	19.8	5.28
253	2006	9	SET	406	6.2	0.0	54	8.5	7.5	29.1	13.0	21.1	6.08
254	2006	10	SET	291	2.7	0.0	67	4.7	2.7	28.2	16.3	22.3	3.50
255	2006	11	SET	424	10.2	0.0	53	5.5	6.8	34.4	13.9	24.2	5.16
256	2006	12	SET	423	10.1	0.0	48	4.9	7.4	35.4	15.0	25.2	7.27
257	2006	13	SET	405	10.2	0.0	50	6.1	7.4	36.0	15.0	25.5	7.00
258	2006	14	SET	435	10.1	0.0	45	8.9	9.5	36.0	16.0	26.0	8.89
259	2006	15	SET	459	7.8	0.0	49	8.5	7.9	37.2	14.8	26.0	8.58
260	2006	16	SET	153	0.0	13.3	83	8.5	12.8	26.6	16.1	21.4	
261	2006	17	SET	262	1.9	11.8	84	7.7	6.3	24.6	14.8	19.7	3.60
262	2006	18	SET	333	6.5	0.4	78	8.8	8.6	26.5	15.4	21.0	2.26
263	2006	19	SET	414	7.8	0.0	66	7.0	7.9	29.4	12.2	20.8	6.00
264	2006	20	SET	160	0.2	9.9	87	17.0	10.9	28.2	14.0	21.1	2.21
265	2006	21	SET	360	6.8	0.0	73	8.1	7.1	27.7	12.6	20.2	5.12
266	2006	22	SET	309	3.3	0.0	69	5.5	3.4	26.7	13.7	20.2	3.04
267	2006	23	SET	396	5.9	4.5	72	19.0	8.1	30.3	14.0	22.2	3.89
268	2006	24	SET	188	0.0	0.0	79	7.0	8.9	21.3	14.1	17.7	0.39
269	2006	25	SET	469	10.5	0.0	71	11.0	12.7	27.5	13.0	20.3	4.63
270	2006	26	SET	508	10.5	0.0	69	9.9	13.8	28.0	12.1	20.1	7.21
271	2006	27	SET	469	9.4	0.0	61	7.0	8.1	31.8	13.8	22.8	5.91
272	2006	28	SET	456	9.0	0.0	59	5.1	7.5	31.0	13.1	22.1	5.57
273	2006	29	SET	289	2.7	0.0	70	11.5	9.0	27.4	14.5	21.0	2.24
274	2006	30	SET	183	0.0	0.6	78	8.5	12.0	24.2	17.2	20.7	0.83
MEDIA				370	6.3	1.8	67	8.7	8.6	28.3	13.5	20.9	4.71
TOTAL				11089	187.7	54.7	2012	261.2	258.2	848.4	404.3	626.4	136.67
DESVIO PADRAO				107	3.7	4.2	12	3.1	2.7	4.3	2.8	2.9	2.12
VARIANCIA				11483	13.6	17.9	143	9.7	7.1	18.1	7.6	8.6	4.48
VALOR MAXIMO				508	10.5	14.2	89	19.0	13.8	37.2	17.2	26.0	8.89
VALOR MINIMO				153	0.0	0.0	45	4.7	2.7	20.0	4.3	13.1	0.39
DIAS DE CHUVA:		7											

Tabela A21 – Dados meteorológicos de Outubro 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPORACAO
275	2006	1	OUT	161	0.0	11.0	87	4.7	2.3	24.1	16.7	20.4	
276	2006	2	OUT	392	7.8	0.0	84	7.0	7.6	30.0	18.1	24.1	4.82
277	2006	3	OUT	441	7.8	0.0	84	8.2	8.5	31.8	17.2	24.5	4.41
278	2006	4	OUT	451	7.8	11.5	82	13.0	6.3	33.7	15.8	24.8	6.66
279	2006	5	OUT	338	7.5	17.5	85	12.9	10.4	31.2	17.5	24.4	3.80
280	2006	6	OUT	420	3.7	1.2	91	7.7	5.5	28.2	18.0	23.1	3.60
281	2006	7	OUT	309	1.0	0.0	92	5.5	3.9	27.7	19.7	23.7	1.83
282	2006	8	OUT	555	6.9	0.0	81	7.7	9.0	29.2	17.1	23.2	5.63
283	2006	9	OUT	427	9.2	0.0	79	6.5	7.3	32.0	17.0	24.5	4.85
284	2006	10	OUT	438	8.7	0.0	78	7.1	8.5	31.6	16.0	23.8	5.08
285	2006	11	OUT	553	6.9	13.0	75	6.2	4.1	30.0	16.4	23.2	
286	2006	12	OUT	166	0.0	16.1	99	5.5	4.7	25.2	18.7	22.0	
287	2006	13	OUT	336	3.2	0.0	91	7.0	6.3	27.8	19.7	23.8	2.88
288	2006	14	OUT	557	7.0	0.0	81	7.7	6.8	30.1	18.2	24.2	4.79
289	2006	15	OUT	556	6.9	0.5	87	8.5	5.8	32.4	18.2	25.3	5.43
290	2006	16	OUT	338	3.5	4.3	92	11.0	11.5	31.8	20.2	26.0	5.01
291	2006	17	OUT	163	0.5	0.0	92	8.5	12.1	25.6	19.2	22.4	2.78
292	2006	18	OUT	326	4.7	4.3	85	7.9	11.2	25.0	17.6	21.3	4.40
293	2006	19	OUT	163	0.9	0.0	92	7.1	10.5	23.2	17.2	20.2	2.14
294	2006	20	OUT	524	6.1	0.0	82	9.2	12.9	25.9	15.6	20.8	4.50
295	2006	21	OUT	686	10.0	0.0	75	10.7	14.2	25.9	14.7	20.3	7.91
296	2006	22	OUT	691	10.2	0.0	68	10.7	9.4	27.3	12.0	19.7	7.95
297	2006	23	OUT	551	10.4	0.0	69	4.0	12.2	28.3	13.3	20.8	6.26
298	2006	24	OUT	554	11.2	0.0	73	5.9	8.1	31.0	15.0	23.0	7.30
299	2006	25	OUT	455	8.5	0.0	69	1.0	5.9	32.3	16.0	24.2	5.83
300	2006	26	OUT	515	7.8	0.0	72	6.7	9.5	33.4	19.8	26.6	7.07
301	2006	27	OUT	590	7.8	0.9	66	7.0	6.6	31.8	18.5	25.2	5.07
302	2006	28	OUT	624	8.5	0.0	70	8.5	9.3	30.1	16.9	23.5	7.63
303	2006	29	OUT	719	10.7	0.0	75	7.7	8.7	30.7	14.2	22.5	7.61
304	2006	30	OUT	539	11.0	0.0	60	5.4	5.7	34.2	14.1	24.2	6.65
305	2006	31	OUT	488	8.3	0.0	61	5.9	7.2	36.5	17.7	27.1	8.26
MEDIA				452	6.6	2.6	80	7.5	8.1	29.6	17.0	23.3	5.36
TOTAL				14026	204.5	80.3	2477	232.4	252.0	918.0	526.3	722.2	150.15
DESVIO PADRAO				153	3.3	5.1	10	2.4	2.8	3.2	2.0	1.9	1.77
VARIANCIA				23469	11.2	26.4	97	5.9	7.9	10.2	3.8	3.6	3.14
VALOR MAXIMO				719	11.2	17.5	99	13.0	14.2	36.5	20.2	27.1	8.26
VALOR MINIMO				161	0.0	0.0	60	1.0	2.3	23.2	12.0	19.7	1.83
DIAS DE CHUVA:	10												

Tabela A22 – Dados meteorológicos de Novembro 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPO- RACAO
306	2006	1	NOV	314	1.7	13.9	90	10.0	6.4	31.9	21.8	26.9	
307	2006	2	NOV	216	0.0	5.1	97	8.5	4.9	28.1	20.0	24.1	2.37
308	2006	3	NOV	309	1.5	0.0	89	7.7	5.8	29.1	19.9	24.5	3.11
309	2006	4	NOV	511	6.9	0.0	79	9.2	10.3	31.2	19.9	25.6	6.39
310	2006	5	NOV	531	7.5	0.0	75	10.0	9.3	31.9	19.2	25.6	6.81
311	2006	6	NOV	438	5.3	3.8	88	12.0	9.9	31.6	18.2	24.9	4.97
312	2006	7	NOV	491	7.5	0.0	86	10.6	16.8	27.9	19.2	23.6	6.34
313	2006	8	NOV	537	9.3	0.0	77	9.0	15.5	27.1	14.9	21.0	6.83
314	2006	9	NOV	558	10.3	1.0	72	9.0	13.8	29.8	12.9	21.4	7.19
315	2006	10	NOV	557	8.2	0.0	74	9.2	14.0	24.2	13.8	19.0	5.22
316	2006	11	NOV	616	9.7	0.0	67	10.7	12.7	25.7	11.0	18.4	7.59
317	2006	12	NOV	630	10.1	0.0	71	10.7	13.6	27.0	11.7	19.4	6.85
318	2006	13	NOV	569	8.5	8.2	79	10.7	14.6	28.4	15.9	22.2	
319	2006	14	NOV	490	6.4	0.5	86	8.5	6.4	27.4	14.8	21.1	5.29
320	2006	15	NOV	497	6.6	0.6	83	10.7	3.5	29.3	15.1	22.2	5.45
321	2006	16	NOV	425	6.3	0.0	64	9.7	9.5	32.4	17.1	24.8	5.17
322	2006	17	NOV	563	8.3	0.1	68	7.0	4.9	35.1	20.5	27.8	6.50
323	2006	18	NOV	490	6.4	31.0	69	10.7	5.5	36.1	20.3	28.2	
324	2006	19	NOV	513	7.0	15.5	80	16.7	6.2	33.4	19.2	26.3	
325	2006	20	NOV	502	6.7	2.8	90	10.7	5.9	29.9	18.3	24.1	
326	2006	21	NOV	324	3.0	0.0	85	2.0	8.2	33.2	19.0	26.1	2.80
327	2006	22	NOV	659	10.3	0.0	69	7.5	8.3	31.6	15.0	23.3	7.57
328	2006	23	NOV	626	10.6	0.0	59	7.5	12.2	32.8	18.2	25.5	7.70
329	2006	24	NOV	664	11.0	0.0	74	6.2	4.4	33.8	16.0	24.9	7.18
330	2006	25	NOV	496	6.5	37.7	83	7.7	7.0	33.1	21.0	27.1	5.69
331	2006	26	NOV	311	1.6	13.3	93	9.2	4.8	28.9	20.0	24.5	3.73
332	2006	27	NOV	473	9.3	0.0	84	9.1	7.0	32.2	20.0	26.1	5.53
333	2006	28	NOV	294	0.9	53.6	97	17.1	8.7	30.1	20.0	25.1	4.15
334	2006	29	NOV	338	2.9	13.1	94	6.1	6.6	30.0	19.4	24.7	
335	2006	30	NOV	402	4.3	0.0	90	12.0	15.9	28.0	21.5	24.8	6.77
MEDIA				478	6.5	6.7	80	9.5	9.1	30.4	17.8	24.1	5.72
TOTAL				14344	194.6	200.2	2412	285.7	272.6	911.2	533.8	722.5	137.20
DESVIO PADRAO				117	3.1	12.7	10	2.8	3.9	2.8	2.9	2.5	1.52
VARIANCIA				13642	9.8	160.6	101	7.8	15.0	7.7	8.5	6.2	2.32
VALOR MAXIMO				664	11.0	53.6	97	17.1	16.8	36.1	21.8	28.2	7.70
VALOR MINIMO				216	0.0	0.0	59	2.0	3.5	24.2	11.0	18.4	2.37
DIAS DE CHUVA:				15									

Tabela A23 – Dados meteorológicos de Dezembro 2006

No	ANO	DIA	MES	R.GLOBAL 2 cal/cm.d	INSO- LACAO h/d	PRECIPI- TACAO mm	UMIDADE RELATIVA %	VENTO MAXIMO m/s	VENTO MEDIO km/h	TEMPER. MAXIMA grau C	TEMPER. MINIMA grau C	TEMPER. MEDIA grau C	EVAPO- RACAO
275	2006	1	DEZ	724	12.2	0.0	80	10.7	14.8	29.3	18.0	23.7	7.44
276	2006	2	DEZ	628	9.7	0.0	80	7.0	5.7	31.6	17.3	24.5	6.13
277	2006	3	DEZ	599	8.9	7.2	82	8.5	3.7	32.2	19.4	25.8	5.85
278	2006	4	DEZ	404	3.5	7.3	92	13.0	9.1	30.2	21.3	25.8	4.34
279	2006	5	DEZ	453	5.0	8.8	92	11.0	4.8	29.8	20.0	24.9	4.23
280	2006	6	DEZ	413	3.0	23.6	91	11.0	8.0	30.0	20.6	25.3	4.13
281	2006	7	DEZ	300	1.0	0.0	90	8.5	6.3	26.9	18.4	22.7	2.35
282	2006	8	DEZ	623	9.6	0.0	78	7.7	6.4	29.8	17.4	23.6	5.91
283	2006	9	DEZ	376	3.0	0.0	90	8.5	5.7	28.4	19.0	23.7	3.67
284	2006	10	DEZ	582	8.5	0.0	83	10.0	9.3	31.1	18.6	24.9	5.47
285	2006	11	DEZ	541	10.3	0.0	82	10.8	15.5	30.3	18.7	24.5	6.48
286	2006	12	DEZ	494	8.4	0.0	82	9.0	13.2	30.8	18.4	24.6	7.27
287	2006	13	DEZ	400	5.3	3.0	83	9.1	6.7	31.8	19.0	25.4	4.94
288	2006	14	DEZ	342	1.7	0.3	94	6.9	8.1	30.1	21.4	25.8	3.30
289	2006	15	DEZ	421	4.2	0.0	94	11.5	4.7	29.6	21.2	25.4	3.89
290	2006	16	DEZ	617	9.4	0.0	80	5.5	3.9	32.1	19.4	25.8	6.10
291	2006	17	DEZ	591	8.7	5.3	84	7.7	5.5	32.4	20.9	26.7	6.70
292	2006	18	DEZ	556	7.1	0.0	85	11.0	8.0	32.4	22.5	27.5	5.92
293	2006	19	DEZ	611	8.3	26.0	83	13.0	10.2	33.9	21.0	27.5	
294	2006	20	DEZ	431	4.3	6.0	97	16.1	11.3	28.6	20.0	24.3	5.18
295	2006	21	DEZ	418	4.1	2.6	94	10.7	6.3	27.3	21.0	24.2	
296	2006	22	DEZ	336	2.0	21.6	97	7.7	3.0	29.6	20.9	25.3	
297	2006	23	DEZ	359	2.6	18.4	97	9.2	2.5	28.9	20.9	24.9	
298	2006	24	DEZ	560	7.9	41.2	94	10.7	6.0	30.9	20.3	25.6	
299	2006	25	DEZ	514	6.7	13.8	94	11.5	5.0	31.4	20.0	25.7	
300	2006	26	DEZ	564	8.0	0.0	93	11.5	5.0	31.0	19.5	25.3	
301	2006	27	DEZ	380	3.2	25.2	98	8.5	3.8	30.0	19.9	25.0	
302	2006	28	DEZ	656	10.4	24.4	87	13.7	6.8	31.6	19.9	25.8	6.36
303	2006	29	DEZ	703	11.7	0.0	82	9.2	13.2	30.8	19.7	25.3	7.36
304	2006	30	DEZ	372	2.9	6.4	95	7.0	6.5	28.1	19.4	23.8	3.73
305	2006	31	DEZ	204	0.0	10.6	100	4.7	4.5	23.5	20.2	21.9	2.71
MEDIA				489.42	5.96	8.12	88.81	9.71	7.21	30.14	19.81	24.98	5.13
TOTAL				15172	184.7	251.7	2753	300.9	223.5	934.4	614.2	774.3	

Gráficos de dados meteorológicos

Figura A73 – Gráfico da precipitação mensal na região da Base Meteorológica em Piracicaba (BM) e média histórica.

Figura A74 – Gráfico da quantidade de dias de chuva por mês na BM absolutos e média histórica.

Figura A75 – Gráfico indicando a evaporação em milímetros em tanque Classe A e média histórica.

Figura A76 – Gráfico da umidade relativa na BM por mês e média histórica.

Figura A77 – Gráfico da Insolação na BM por mês e média histórica.

Figura A78 – Gráfico da radiação global na BM por mês e média histórica.

Figura A79 – Climograma das médias comparado à média histórica na BM.

Figura A80 – Climograma das mínimas comparado à média histórica na BM.

Figura A81 – Climograma das máximas comparado à média histórica na BM.

Figura A82 – Gráfico da precipitação média na região da Base Meteorológica em Piracicaba (BM).

Figura A83 – Gráfico da quantidade de dias de chuva por mês na BM absolutos e média histórica.

Figura A84 – Gráfico indicando a evaporação em milímetros em tanque Classe A.

Figura A85 – Gráfico da velocidade média de vento na BM.

Figura A86 – Gráfico da umidade relativa na BM por mês e média histórica.

Figura A87 – Gráfico da Insolação na BM por mês e média histórica.

Figura A88 – Gráfico da radiação global na BM por mês e média histórica.

Figura A89 – Climograma das médias comparado à média histórica na BM.

Figura A90 – Climograma das mínimas comparado à média histórica na BM.

Figura A91 – Climograma das máximas comparado à média histórica na BM.

Tabela A24 - Sinopse das características e propriedades dos solos e soluções relacionadas ao potencial corrosivo dos solos.

Questao/Solo/Solucao do Solo	Areão I (Nv)	Areão II (Aa)	Areão III (Lv)	Fort I (Nq)
Qual é o mais agressivo (solo/teórico)	3	2	1	4
Qual é o mais agressivo (solo/experimental)	3	2	1	4
Qual é o mais agressivo (solução/teórico)	3	2	1	4
Qual é o mais agressivo (solução/experimental)	3	2	1	4
Qual o menor pH (solução do solo)	2	1	3	4
Qual o menor pH (solo)	1	2	3	4
Qual a maior condutividade (solo)	3	2	1	4
Qual a maior condutividade (solução)	3	2	1	4
Qual exibe o maior teor de Sólidos Totais	3	2	1	4
Qual o maior teor de cloro (solução)	3	2	1	4
Qual o maior teor de sulfato (solução)	3	4	1	2
Qual o mais argiloso (solo)	2	4	3	1

Maior intensidade: 4

Menor intensidade: 1