AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Caracterização química e física de solos urbanos de Palmas e da
corrosividade destes para o aço API 5L X70**

ALEXON BRAGA DANTAS

**São Paulo
2019**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Caracterização química e física de solos urbanos de Palmas e da
corrosividade destes para o aço API 5L X70**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

ALEXON BRAGA DANTAS

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

**Orientadora:
Dra. Isolda Costa**

**São Paulo
2019**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: **Alexon Braga Dantas**

Título: **Caracterização física e química de solos urbanos de Palmas e da corrosividade destes parra o aço API 5L X70.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Doutor em Ciências

Data: 03/05/2019

Banca Examinadora

Prof. Dra.: Vanessa de Freitas Cunha Lins
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais
Aprovado

Julgamento:

Prof. Dr.: Renato Altobelli Antunes
Instituição: Universidade Federal do ABC
Aprovado

Julgamento:

Prof. Dr.: Caio Palumbo de Abreu
Instituição: UNISANTANA
Aprovado

Julgamento:

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

DANTAS, Alexon B. ***Caracterização química e física de solos urbanos de Palmas e da corrosividade destes para o aço API 5L X70.*** 2019. 106 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <www.teses.usp.br> (data de consulta no formato: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Braga Dantas, Alexon

Caracterização química e física de solos urbanos de Palmas e da corrosividade destes para o aço API 5L X70 / Alexon Braga Dantas; orientadora Isolda Costa. -- São Paulo, 2019.
106 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Corrosividade. 2. solo. 3. aço API 5L X70. I. Costa, Isolda, orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Ao meu querido irmão, Thiago Braga Dantas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo Dom da vida, por ser o Senhor de minha vida e, por estar presente em todos os meus caminhos. Aos meus pais: José Reinaldo Dantas e Isabel Braga Dantas pelo amor, carinho, pela educação e por tudo que eles me propiciaram durante todos esses anos; amo muito vocês.

Aos meus irmãos: Robson Braga Dantas e Thiago Braga Dantas pelo amor, carinho, companheirismo, incentivos demonstrados ao longo de todos esses anos; vocês fazem parte de mim, estão em meu coração.

A minha amada esposa, Paula Cristina, por me incentivar de maneira contínua e, por ter me dado os meus maiores tesouros, minhas filhas Isabella de Moura Dantas e Alice de Moura Dantas.

Agradeço, imensamente, ao meu padrinho Carlos Alberto e ao amigo Norton pelo apoio durante a etapa de enterramento das hastes e amostras metálicas.

Agradeço, imensamente, aos amigos e professores Jocélio e Kênia pelas sondagens realizadas.

Agradeço, incomensuravelmente, a minha orientadora, a Professora Dra. Isolda Costa, que, com todo o seu arcabouço de conhecimentos atuou de maneira decisiva para esta conquista.

Ao Professor Dr. Jesualdo Luiz Rossi por ter nos dado todo o suporte no tocante aos aços que utilizamos na pesquisa e, por toda a contribuição conferida a este trabalho.

Ao Dr. Sérgio Luís de Jesus, que muito contribuiu tecnicamente, notadamente, nas questões atinentes ao comportamento dos solos.

Agradeço muitíssimo à doutoranda Larissa Oliveira Berbel pela grandiosa ajuda para a materialização desta pesquisa.

Agradeço muitíssimo à Dra. Rejane Silva pela imensa ajuda.

Agradeço muitíssimo à Dra Mitiko Saiki e Caio Justino de Abreu do Cetró do Reator de Pesquisas do IPEN pelas análises de ativação com neutrons.

Às Instituições de ensino: Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos (ITPAC), Universidade Federal do Tocantins (UFT) e Faculdade Católica do Tocantins. Entre outros, os professores Dr. Aparecido Osdimir Bertolin e Dr. André Machado de Senna.

Ao Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN) pelas instalações, infraestrutura e total apoio a este trabalho.

Ao convênio firmado entre o IPEN e o Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos (ITPAC) e ao professor Dr. Fernando Moreira, que foi um dos responsáveis pela materialização desse convênio.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-graduação do IPEN. Aos meus alunos de graduação, notadamente, no auxílio durante à realização de diversos ensaios.

EPÍGRAFE

“A experiência é uma professora muito severa porque primeiro ela aplica a prova e, somente após, vem a lição.”

Vernon Law

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DE SOLOS URBANOS DE PALMAS E DA CORROSIVIDADE DESTES PARA O AÇO API 5L X70.

Alexon Braga Dantas

RESUMO

Solos urbanos de Palmas foram caracterizados fisicamente e quimicamente. As propriedades físicas de resistividade elétrica, granulometria, massa específica e umidade de cinco solos daquela cidade foram analisadas. As propriedades químicas de composição e pH também foram caracterizadas. Dois destes solos tiveram a sua corrosividade para o aço API 5L X70 investigada por ensaio de campo. O ensaio de campo consistiu no enterramento de amostras do aço nos dois solos seguido por retirada após períodos pré-determinados de tempo até 960 dias, ensaio gravimétrico para avaliação das taxas de corrosão em função do tempo de exposição aos solos e observação da superfície. Foram também realizados ensaios em laboratório com extratos aquosos dos cinco solos caracterizados. Os extratos aquosos foram usados como eletrólito nos ensaios eletroquímicos sendo estes ensaios seguidos pela observação da superfície exposta ao eletrólito. Os ensaios eletroquímicos não se mostraram efetivos na classificação da corrosividade dos diferentes solos. Todavia, a observação da superfície das amostras ensaiadas e análise do eletrólito após ensaio mostrou diferenças significativas na corrosividade dos extratos aquosos. A caracterização da corrosividade de solos por ensaio gravimétrico identificou a maior corrosividade do solo arenoso frente ao solo argiloso, o que foi atribuído à maior porosidade do primeiro em comparação ao segundo e foi corroborado pela maior massa específica do solo argiloso em relação ao arenoso. Os resultados deste trabalho indicaram que a porosidade é um dos fatores mais importantes para a corrosividade de solos de resistividade elétrica similar, uma vez que esta influencia diretamente a aeração do solo na região dos materiais enterrados, característica que é preeminente para a corrosividade dos solos.

CHEMICAL AND PHYSICAL CHARACTERIZATION OF PALMA URBAN SOILS AND THEIR CORROSIVITY TO API 5L X70 STEEL

Alexon Braga Dantas

ABSTRACT

Urban soils of Palmas were characterized physically and chemically. The physical properties of electrical resistivity, granulometry, specific mass and humidity of five soils of that city were analyzed. The chemical properties of composition and pH were also characterized. Two of these soils had their corrosivity for the API 5L X70 steel investigated by field test. The field test consisted of burial of samples of the steel in the two soils followed by removal after predetermined periods of time up to 960 days, gravimetric test to evaluate the corrosion rates as a function of exposure time to the soil and observation of the surface. Laboratory tests were also carried out with aqueous extracts of the five soils characterized. The aqueous extracts were used as electrolyte in the electrochemical tests and these tests were followed by observation of the surface exposed to the electrolyte. The electrochemical tests were not effective in the classification of the corrosivity of the different soils. However, observation of the surface of the samples tested and analysis of the electrolyte after the test showed significant differences in the corrosivity of the aqueous extracts. The characterization of soil corrosivity by gravimetric test showed a higher corrosivity of the sandy soil to the clayey one, which was attributed to the higher porosity of the first one in comparison to the second and was corroborated by the greater specific mass of the clayey soil than the sandy one. The results of this work indicated that porosity is one of the most important factors for the corrosivity of soils of similar electrical resistivity, since this directly influences the aeration of the soil in the region of the buried materials, characteristic that is preeminent for the corrosivity of the soils.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS	II
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VI
SUMÁRIO.....	VII
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO DO TEMA.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA CORROSIVIDADE POR MÉTODOS ELETROQUÍMICOS, GRAVIMÉTRICOS E DE OBSERVAÇÃO DA SUPERFÍCIE APÓS ENSAIO.....	5
3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE SOLOS E RELAÇÃO ENTRE CARACTERÍSTICAS E CORROSIVIDADE.....	11
3.3. CARACTERIZAÇÃO DE CORROSÃO ASSOCIADA A ESFORÇOS MECÂNICOS DE AÇOS API	18
3.4. AÇOS API 5L X70.....	19
3.5. SOLOS	19
3.5.1. Prospeção geotécnica.....	21
3.5.2. Sondagem à trado	23
3.5.3. Sondagem de reconhecimento com Standard Penetration Test (SPT)	23
3.5.4. Prospeção indireta	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1. MATERIAIS.....	28
4.1.1. Definição dos locais para ensaios de campo.....	28

4.1.2.	Aço API 5L X70	31
4.1.3.	Solos.....	32
4.2.	MÉTODOS.....	33
4.2.1.	Enterramento das amostras de aço.....	33
4.2.2.	Retirada das amostras metálicas e das amostras de solo.....	34
4.2.3.	Sondagem de simples reconhecimento com SPT	35
4.2.4.	Sondagem geofísica	36
	Para os solos em estudo, a metodologia usada para os valores de resistividade foi a de Wenner ou método dos quatro pontos. (NBR 7117:2012).....	37
4.2.5.	Ensaio de caracterização física dos solos	37
4.2.6.	Ensaio de perda de massa (gravimétrico)	39
4.2.7.	Ensaio de difratometria de raios - X.....	39
4.2.8.	Caracterização química dos solos	40
4.2.9.	Preparação do extrato aquoso do solo	41
4.2.10.	Ensaio eletroquímico	42
4.2.11.	Caracterização química da concentração de Fe no extrato aquoso de cada solo pelo método por ativação com nêutrons	44
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS	45
5.1.1.	Ensaio de granulometria dos solos.....	45
5.1.2.	Umidade dos solos	49
5.1.3.	Massa específica dos sólidos	50
5.1.4.	Resistividade elétrica dos solos.....	51
5.1.5.	Sondagem dos solos	53
5.2.	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS.....	55
5.2.1.	Análise química dos solos	55

5.2.2.	Ensaio de pH dos solos	56
5.2.3.	Condutividade elétrica das soluções aquosas dos solos	57
5.2.4.	Medidas de pH soluções aquosas dos solos	58
5.2.5.	Potencial redox dos extratos aquosos dos solos	58
5.2.6.	Sólidos totais dissolvidos (STD) nos extratos aquosos dos solos	60
5.2.7.	Difratometria de raios-X dos solos	60
5.2.8.	Caracterização da corrosividade do solo pela determinação das taxas de corrosão	63
5.2.9.	Corrosão do aço API 5L X70 em solos	66
5.2.10.	Caracterização Eletroquímica	67
5.1.1.	Observação da superfície por microscopia eletrônica de varredura após polarização anódica	69
5.1.2.	Análise química dos extratos aquosos do solo após ensaio de polarização	71
5.1.3.	Discussão geral dos resultados	72
6.	CONCLUSÕES	75
7.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	<u>REFERÊNCIAS</u>	77

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESTRATIFICAÇÃO DE SOLO RESIDUAL.....	20
FIGURA 2 - POÇO EM SOLO PARA OBSERVAÇÃO E COLETA DE AMOSTRA.	22
FIGURA 3 - TRINCHEIRA EM SOLO PARA OBSERVAÇÃO E COLETA DE AMOSTRA	22
FIGURA 4 - TRADOS TIPO (A) CAVADEIRA E (B) ESPIRAL.....	23
FIGURA 5 - ESQUEMA DE SONDAGEM SPT.	24
FIGURA 6 - MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SUBSOLO PELA TÉCNICA DE SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL.	26
FIGURA 7 - VISÃO GERAL DA DISPOSIÇÃO DOS LOCAIS ONDE FORAM RETIRADAS TODAS AS AMOSTRAS DE SOLOS, EM PALMAS, TOCANTINS.	29
FIGURA 8 - (A) LOCALIZAÇÃO DOS SOLOS A (UFT); (B) B (FACTO).	30
FIGURA 9 - (A) CORTE DAS HASTES, POR MEIO DE DISCO DIAMANTADO; (B) JATEAMENTO COM AREIA DAS HASTES METÁLICAS; (C) AFERIÇÃO DA MASSA DE CADA AMOSTRA POR MEIO DE BALANÇA; (D) MEDIÇÃO DAS DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS COM PAQUÍMETRO.....	32
FIGURA 10 - (A) ABERTURA INICIAL COM O USO DO TRADO MANUAL; (B) CRAVAÇÃO DAS HASTES METÁLICAS; (C) ABERTURA DOS FUROS PARA O ENTERRAMENTO DAS AMOSTRAS DE AÇO; (D) DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS PEQUENAS DE AÇO PARA O ENTERRAMENTO.....	33
FIGURA 11 - COORDENADAS DE LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AÇO, EM UTM, CAMPUS UFT, (A) E FACTO, (B).	34
FIGURA 12 - (A) E (B) ABERTURA DE FUROS PARA A RETIRADA DAS AMOSTRAS DE SOLO E AMOSTRAS METÁLICAS, SOLO FACTO; (C) ABERTURA DE FUROS PARA A RETIRADA DAS AMOSTRAS DE SOLO E AMOSTRAS METÁLICAS, SOLO UFT (D) ASPECTO DOS FUROS NO ENTORNO DA HASTE METÁLICA, SOLO UFT.....	35

FIGURA 13 - ARRANJO DE WENNER (SENDO, $B \leq A / 10$) NBR 7117:2012, ADAPTADO.	36
FIGURA 14 – (A) EQUIPAMENTO PARA MEDIDA DE RESISTIVIDADE DO SOLO. MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE NO SOLO (B) A; (C) B; (D) C.	36
FIGURA 15 – (A) DETERMINAÇÃO DA MASSA DA AMOSTRA DE SOLO;(B) DESTORROAMENTO DA AMOSTRA DE SOLO; (C) E (D) AMOSTRAS RETIDAS EM PENEIRA.....	38
FIGURA 16 - (A) RETIRADA DOS PRODUTOS DE CORROSÃO DA HASTE METÁLICA; (B) PRODUTOS DE CORROSÃO SENDO PREPARADOS PARA ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.	
	4
0	
FIGURA 17 – (A) SOLO A (UFT); (B) SOLO B – FACTO; (C) SOLO C (EAT-1); (D) SOLO D (EAT-2); (E) SOLO E (EAT-3).....	41
FIGURA 18 – (A) PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE METÁLICA POR LIXAMENTO; (B) SOLUÇÕES DO EXTRATO AQUOSO DE CADA SOLO; (C) MEDIDA DE CONDUTIVIDADE DAS SOLUÇÕES DO EXTRATO AQUOSO DE SOLO; (D) ARRANJO EXPERIMENTAL UTILIZADO NOS ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....	43
FIGURA 19 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO A (UFT).....	45
FIGURA 20 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO B (FACTO).	46
FIGURA 21 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO C (UFT, EAT-1).	47
FIGURA 22 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO D (EAT-2).	48
FIGURA 23 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO E (EAT-3).	48
FIGURA 24 – VALORES MÉDIOS DAS UMIDADES NOS SOLOS.....	49
FIGURA 25 – VALORES DAS MASSAS ESPECÍFICAS DOS SÓLIDOS DAS AMOSTRAS DE SOLOS.....	50
FIGURA 26 – VALORES DAS RESISTIVIDADES DOS SOLOS A E B EM PERÍODOS DE ELEVADA UMIDADE (CHUVAS).	51
FIGURA 27 – RESISTIVIDADE DE TODOS OS SOLOS NO PERÍODO DE ALTA UMIDADE (CHUVAS)	53

FIGURA 28 – ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO A, NO CAMPUS DA UFT.....	54
FIGURA 29 – ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO B, NO CAMPUS DA FACTO. ...	55
FIGURA 30 – VALOR DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE CADA SOLUÇÃO AQUOSA DE SOLO.....	57
FIGURA 31 – VALOR DO PH DE CADA SOLUÇÃO AQUOSA DE CADA SOLO.	58
FIGURA 32 - VALORES DO POTENCIAL REDOX DOS EXTRATOS AQUOSOS DOS SOLOS.	59
FIGURA 33 - VALORES DE STD (PPM) EM CADA SOLUÇÃO DE SOLO.....	60
FIGURA 34 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DO SOLO A.....	61
FIGURA 35 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DO SOLO B.....	61
FIGURA 36 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DOS SOLOS (A) C, (B) D.....	61
FIGURA 37 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DO SOLO E (A) CAULINITA E HEMATITA	62
FIGURA 38 - LATOSSOLO DE COR AVERMELHADA (SOLO B).	63
FIGURA 39 - TAXAS DE CORROSÃO DO AÇO API 5L X70 EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO AO SOLO A.	64
FIGURA 40 - AMOSTRAS DE AÇO RETIRADA APÓS PERÍODO DE 660 DIAS DE EXPOSIÇÃO A SOLO A (UFT).	65
FIGURA 41 - TAXA DE CORROSÃO DO AÇO API 5L X70 EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO AO SOLO B (FACTO).	66
FIGURA 42 - AMOSTRAS DE AÇO RETIRADAS DOS SOLOS APÓS PERÍODO DE 660 DIAS DE EXPOSIÇÃO: (A) SOLO A (UFT); (B) SOLO B (FACTO).....	67
FIGURA 43 - VARIAÇÃO DO POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO COM O TEMPO DE EXPOSIÇÃO AOS EXTRATOS AQUOSOS DOS VÁRIOS SOLOS.....	68
FIGURA 44 – CURVAS DE POLARIZAÇÃO ANÓDICA DO AÇO API 5L X70 NOS EXTRATOS AQUOSOS DOS VÁRIOS SOLOS.....	69
FIGURA 45 – MICROGRAFIAS POR MEV DO AÇO API 5L X70 APÓS 3H DE IMERSÃO EM EXTRATOS AQUOSOS DOS SOLOS SEGUIDA DE	

POLARIZAÇÃO EM (A) SOLO A, (B) SOLO B, (C) SOLO C (EAT-1), (D) SOLO D (EAT-2) E (E) SOLO E (EAT-3)	70
--	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DO AÇO API 5L X70 (% EM MASSA).	31
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DA CORROSIVIDADE DO SOLO EM RELAÇÃO À SUA RESISTIVIDADE (ADAPTADA) (BRADFORD, 2002 APUD LOUREIRO ET AL., 2007).	53
TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS ESTUDADOS.	56
TABELA 4 – RESULTADOS DO ENSAIO DE PH DOS SOLOS.....	56
TABELA 5 - TEOR DE FE NOS EXTRATOS AQUOSOS DOS VÁRIOS SOLOS APÓS POLARIZAÇÃO ANÓDICA DO AÇO, DETERMINADO PELO MÉTODO DE ATIVAÇÃO COM NÊUTRONS.	72

1.INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO DO TEMA

O estudo do comportamento do aço API 5L X70 em contato com meios corrosivos é muito importante em razão da sua aplicabilidade em estruturas que podem ficar em contato com o solo, como tanques de combustíveis e polidutos diversos.

Segundo Serra (2014), a agressividade do solo em contato com metais depende de suas propriedades físico-químicas e biológicas. A agressividade está diretamente relacionada à formação de pilhas de vários tipos, como as pilhas de concentração, as galvânicas e as geradas devido às correntes de fuga. Além disso, em solos são comuns as pilhas de longo alcance, frequentemente observadas em estruturas enterradas de grande extensão, como tubulações que atravessam solos de resistividades variadas, o que dá origem a pilhas de concentração, em resultado do contato do aço com solos de distintos teores de oxigênio ou de sais dissolvidos.

A união de diferentes metais em contato com o solo favorece a formação das pilhas galvânicas, e estas são usuais em sistemas de aterramento elétrico. Os fatores que afetam a agressividade dos solos são a umidade, acidez, porosidade, presença de sais solúveis e micro-organismos. Vale ressaltar que grande parte desses fatores pode alterar a resistividade elétrica do solo (GENTIL, 2011).

O eletrólito, no caso deste estudo o solo, é responsável pela condução iônica, e este, em contato com o material metálico enterrado, tem sua força de oxidação influenciada por diversos parâmetros, como pH, umidade, tipos de solos, textura, resistividade, entre outros (SERRA, 2014).

Os materiais metálicos em sua maioria apresentam estrutura heterogênea, e quando em contato com eletrólitos, as diferentes regiões da superfície apresentam diferentes potenciais em relação ao eletrólito. Estas diferenças de potencial em uma superfície contínua dão origem a regiões anódicas e catódicas, formando assim pilhas de corrosão (FORERO *et al.*, 2013). No caso de um material ferroso em contato com meios aproximadamente neutros e aerados, a reação anódica pode ser representada pela oxidação do ferro,

Equação 1, enquanto a reação catódica, pela reação predominante de redução do oxigênio, Equação 2:

O mecanismo de corrosão do metal é composto pelas reações anódicas e catódicas na superfície do metal exposta ao eletrólito. Pelo metal transitam elétrons, e pelo eletrólito, os íons, portanto, nestas condições, a corrosão em presença de eletrólitos é uma pilha eletroquímica. (CASTRO, 2013). O contato entre o material metálico e o meio que o envolve, pode também resultar em reação química além da eletroquímica, o que, em geral causa a deterioração das propriedades do metal (SERRA, 2014).

O aço API 5L X70, material do presente estudo, encontra grande aplicação em estruturas que entram em contato com o solo, sendo importante avaliar como este se comporta em presença deste tipo de meio corrosivo. Os solos são eletrólitos altamente complexos pela presença de grande número de compostos, orgânicos ou inorgânicos, e, conseqüentemente, diferenças no seu potencial oxidante, pH e sua resistividade, pela variação na granulometria do solo acarretam em diferenças de aeração do solo, por variações de teor de água, entre outros. É importante salientar que as propriedades do solo variam dependendo das características das diferentes regiões geográficas, e, mesmo, variam em locais próximos entre si, se as propriedades geológicas variarem.

No presente trabalho, foi escolhido o estudo das características de solos da cidade de Palmas, em Tocantins, em razão da completa ausência de informações sobre a corrosividade de seus solos.

Devido à sua localização central em relação aos Estados do Norte e Nordeste do país, o Tocantins possui um polo de distribuição de combustível da Petrobrás. Este, em pouco tempo tenderá a se expandir, por meio de tubulações, que entrarão em contato com tais solos.

O Estado do Tocantins é a mais nova unidade da Federação, tendo sido criado em 1988 a partir da divisão do estado de Goiás. Corresponde à parte

norte e centro-norte do antigo estado goiano. Desde então, tem vivenciado um intenso processo de estruturação da atividade econômica e das relações sociais (CARVALHEDO, 2009). A economia estadual apoia-se, sobretudo, na atividade agropecuária, a qual se concentra na produção de grãos e na pecuária de corte. O Tocantins possui cerca de 55% de seu solo apto para lavoura. Se a esse montante forem somadas as terras aptas para pastagem, chega-se a quase 70% do seu território. Apenas 13% dos solos são considerados inaptos para qualquer uso agrícola. (CARVALHEDO, 2009)

A partir de janeiro de 2013, no município de Porto Nacional, localizado no pátio multimodal da Ferrovia Norte-Sul, a 30 km de Palmas, entrou em funcionamento o Terminal de Distribuição de Combustíveis da Petrobrás Distribuidora, abastecendo toda a região, reduzindo custos logísticos e contribuindo para o maior desenvolvimento econômico da região. A médio prazo, deverão ser construídos polidutos que irão levar combustível para a cidade e, invariavelmente, estarão em contato com o solo dessa região.

Neste cenário, este estudo se justifica ao possibilitar conhecer as características do solo em várias áreas da cidade de Palmas, com ênfase na corrosividade destes solos. Este conhecimento é útil no sentido de se prever e de se propor medidas eficientes para proteção contra a corrosão das estruturas enterradas segundo a corrosividade dos diferentes tipos de solo.

2.OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi o de caracterizar a corrosividade de solos urbanos da cidade de Palmas com relação ao aço API 5L X70:

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

Caracterizar fisicamente e quimicamente solos urbanos da cidade de Palmas.

Caracterizar e comparar a corrosividade de dois solos da cidade de Palmas por ensaio de campo (enterramento no solo seguido por ensaio gravimétrico) e por ensaios de laboratório e comparar as classificações destes dois tipos de ensaio.

Correlacionar as características físicas e/ou químicas dos solos com a corrosividade destes.

3.REVISÃO DA LITERATURA

3.1.CARACTERIZAÇÃO DA CORROSIVIDADE POR MÉTODOS ELETROQUÍMICOS, GRAVIMÉTRICOS E DE OBSERVAÇÃO DA SUPERFÍCIE APÓS ENSAIO.

A corrosão em meios aquosos é a mais frequente entre os tipos de corrosão, sendo esta caracterizada por processos eletroquímicos. As reações eletroquímicas envolvem a passagem de corrente elétrica pelo movimento de partículas carregadas, sejam íons ou elétrons. A corrente elétrica envolvida em reações eletroquímicas pode percorrer desde distâncias muito pequenas, até quilômetros de extensão, a exemplo das correntes de fuga em tubulações enterradas. A resistividade elétrica do meio ao qual o metal está exposto tem grande influência no processo de corrosão.

A corrosão pode ocorrer de maneira uniforme, ou localizada, pela formação de placas, puntiforme (ou por pites), alveolar, intergranular, intragranular, filiforme, galvânica, entre outras. (OLIVEIRA, 2012). O produto de corrosão do metal assemelha-se ao minério do qual é originalmente extraído, sendo, pois, no caso da corrosão de materiais ferrosos, a hematita o óxido de ferro mais recorrente (GENTIL, 2011).

Uma vez que a corrosão em meios aquosos é um processo eletroquímico, métodos eletroquímicos podem ser utilizados para avaliar a corrosividade dos solos. Como por exemplo, no método de *Schewerdtfeger et al.*, a determinação de correntes de corrosão é feita por curvas de polarização anódica e catódica do metal no solo (SERRA, 2014).

Em ensaios eletroquímicos, o potencial de corrosão (E_{corr}) do material metálico no solo é uma medida importante para a caracterização da corrosividade do solo. Tal parâmetro é obtido pela diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho e um eletrodo de referência, em contato com o solo, sem que haja passagem de corrente entre os eletrodos. (ROBERGE, 2012).

Venturelli, *et al* (2018) investigaram o comportamento eletroquímico do aço API 5L X70 por espectroscopia de impedância eletroquímica e curvas de

polarização potenciodinâmica. A solução empregada foi composta de 0,1M de NaHCO_3 , 0,005 M de Na_2CO_3 e 0,1 M NaCl , à temperatura ambiente. Medidas em tempos de exposição de 24h e 168h mostraram aumento da impedância com o tempo de imersão. Além disso, foi observada redução da densidade de corrente de corrosão nas curvas de polarização potenciodinâmica, indicando aumento da resistência do aço com o tempo de ensaio, o que se explica pela formação de produtos de corrosão protetores aderidos à superfície do aço com o tempo de exposição ao meio.

Rodrigues (2006) avaliou a corrosão do aço API 5L X56 em contato com soluções de sulfato em presença de substâncias húmicas, obtidas de solo turfoso. Foram também realizados ensaios com sete amostras de solos distintos, retirados de regiões diferentes no Rio Grande do Sul pelas quais atravessam dutos metálicos. As amostras de solos foram caracterizadas por medidas de pH, condutividade elétrica, teor de umidade, teor de íons sulfato e de cloreto e, também, teor dos metais Fe, Na, Ca, K, Mg, Al. A corrosividade das amostras de solos foi avaliada em laboratório, sendo medida a taxa de corrosão ao final do período de 15 dias de exposição do metal às amostras de solos. Foram realizados, também, ensaios eletroquímicos em extratos aquosos das amostras de solos. Os resultados mostraram corrosão por pites relacionada com inclusões complexas contendo sulfetos. Foi identificada a presença de hematita e goetita dos produtos de corrosão que cobrem os pites e próximos às inclusões, parcialmente dissolvidas. Os potenciais de corrosão a circuito aberto da amostra metálica em contato com cada solução de solo, pelo tempo de 3h foram utilizados como parâmetros indicativos da agressividade dos solos. Foi concluído que as substâncias húmicas solúveis alteraram a resistência à corrosão do aço API 5L X56. Outra conclusão do trabalho foi que em solos onde a umidade relativa crítica seja alcançada, a corrosão ocorrerá mesmo na ausência de água em quantidades observáveis.

Oskuie *et al* (2009) investigaram a resistência à corrosão sob tensão do aço API 5L X70 por espectroscopia de impedância eletroquímica em solução de carbonato. As variações associadas com a corrosão sob tensão foram monitoradas em função do tempo de ensaio. Os autores concluíram que a

espectroscopia de impedância eletroquímica é sensível para detectar o início da formação de trincas no aço.

Santos *et al.* (2015) estudaram o comportamento eletroquímico na interface entre o aço API 5L X70 e uma polpa de bauxita, por meio de técnicas eletroquímicas, especificamente medidas de potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica. Os eletrólitos utilizados foram uma solução resultante da água do processo de diluição do minério bauxita e a polpa da bauxita com o teor de 5% (m/v). As curvas de variação do potencial de circuito aberto mostraram que a presença da bauxita ocasionou deslocamento do potencial na direção catódica por cerca de 130 mV. As curvas catódicas e anódicas não apresentaram alterações substanciais em presença da bauxita, mostrando que o minério não alterou os mecanismos anódico e catódico. Os diagramas de Nyquist mostraram arcos capacitivos achatados e aumento da resistividade elétrica do eletrólito no meio correspondente a polpa de bauxita. A análise da superfície mostrou a formação de fissuras apenas na presença da polpa de bauxita o que causou aumento na velocidade de corrosão do aço API 5L X70.

O comportamento frente à corrosão do aço API 5L X60 usado em tubulações de gasodutos foi investigado por Benmoussa *et al* (2006) em solução simuladora do solo com pH aproximadamente neutro por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e ensaios de polarização potenciodinâmica. Os efeitos de parâmetros como resistividade, pH, temperatura e composição química do eletrólito na resistência à corrosão foram avaliados. Os resultados mostraram que as densidades de corrente de corrosão aumentaram com a temperatura entre 20°C e 60°C. Os autores concluíram que os parâmetros densidade de corrente (i_{corr}), resistência à polarização (R_p) e a resistividade do solo (ρ) são parâmetros úteis para avaliação da corrosividade do solo.

Pinheiro (2010) avaliou a corrosividade de solos em contato com torres metálicas de linhas de transmissão de energia elétrica no Pará, por meio de medidas da resistividade elétrica e potencial redox, em campo, e, medidas em laboratório da umidade, pH e concentrações de íons cloreto, sulfato e sulfeto para, posteriormente, compor o *Índice Steinrath*, que atribui índice parcial para

cada parâmetro do solo avaliado e cujo somatório permite identificar a agressividade do solo (SERRA, 2014). Foi preparado o extrato aquoso das amostras de solo para a realização de ensaios de potencial de corrosão, espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e polarização. As curvas de polarização com sobretensões de ± 100 mV evidenciaram similaridade nos mecanismos de corrosão nas soluções aquosas das amostras de solos, notadamente, pelas inclinações das retas de Tafel apresentarem poucas variações. A resistência de polarização (R_p) e os diagramas de Nyquist indicaram alta resistência do aço no meio corrosivo. Foi concluído que há boa correlação entre o índice de *Steinrath* e os ensaios eletroquímicos, os quais apresentaram resultados satisfatórios para a corrosividade desses solos, classificando-os como de baixa corrosividade.

Oliveira (2007) avaliou a agressividade de solos por meio de técnicas eletroquímicas utilizadas para investigar o processo de corrosão do aço AISI 1020 em amostras de solo e em extrato aquoso do solo. Foram realizados ensaios galvanostáticos que permitiram identificar a queda ôhmica para cada amostra de solo saturado em água destilada. O autor realizou medidas de polarização potencioestática catódica e anódica e de impedância com os extratos aquosos dos solos em contato com o aço AISI 1020. Conforme esperado, a intensidade de polarização catódica aumentou com o aumento da corrente catódica aplicada e, em consequência, ocorreu redução na velocidade de corrosão. A partir dos resultados das medidas de resistência do solo, quatro dos solos estudados foram classificados como pouco corrosivos e, apenas um solo como de corrosão moderada. O pH dos solos pouco variou entre os vários tipos de solo testados, sendo estes em torno de 6,5. O autor observou que os resultados das curvas de polarização anódica em solução de solo e as medidas de impedância eletroquímica apresentaram valores divergentes para os solos pouco corrosivos, mas foram próximos para o solo de maior corrosividade. Os diagramas de Nyquist mostraram aumento da resistência do eletrólito com o tempo de imersão, em razão, provavelmente, do aumento da concentração de íons dissolvidos em solução. No solo *in natura*, todavia, os resultados de EIE

mostraram comportamento inverso, o que foi atribuído ao aumento da resistência na superfície metálica por partículas sólidas incrustadas.

Li (2009) estudou o comportamento frente à corrosão de estruturas de aço em vários solos em regiões litorâneas com o objetivo de garantir a segurança e o aumento da vida útil daquelas estruturas. Para tanto foram utilizadas amostras de aço-carbono tipo Q235A e de aço para gasoduto tipo API 5L 652 enterradas a profundidades de 0,5 m; 1,0 m e 1,5 m em solos típicos de cinco praias distintas pelo período de 1 a 2 anos. As taxas de corrosão do aço-carbono foram superiores às do aço API 5L 652. A corrosão do aço no solo arenoso das praias mostrou mecanismo misto, controle por ativação e por difusão, com diferentes graus de aeração do solo e atividade microbiana.

Liu et al (2009) estudaram o efeito da presença de inclusões no início das trincas por corrosão sob tensão, em aço tipo API 5L X70 para gasoduto, em solução típica de solo ácido por ensaios de taxa de deformação lenta, microscopia eletrônica de varredura e por espectroscopia de energia dispersiva. Investigaram também o efeito da polarização anódica e catódica. Os resultados mostraram que não ocorrem trincas por corrosão sob tensão no aço X70 quando sob polarização anódica. Inclusões enriquecidas em Al foram associadas a microfissuras no ensaio de corrosão sob tensão.

Silva e Brasil (2009) realizaram medidas físico-químicas e eletroquímicas em diversos solos, em regiões ao sul do Brasil, com o propósito de se obter pH, resistividade elétrica e potencial de corrosão. Os autores analisaram sete amostras de solos, os quais foram transportados ao laboratório e, ensaiadas as amostras passantes na peneira de 2 mm, secas em estufa a 100 °C e resfriadas em dessecador. Os resultados foram obtidos em solo saturado com água e em extrato aquoso. Foram identificadas grandes variações do potencial redox, da resistividade, da umidade e do pH. Consequentemente, a taxa de corrosão do aço carbono na solução também apresentou grande variação, entre 76 $\mu\text{m}/\text{ano}$ e 186 $\mu\text{m}/\text{ano}$. Os autores concluíram que há possibilidade de se estabelecer um critério de avaliação da corrosividade de solos em função dos valores de pH e dos potenciais de corrosão de metais em contato com solo. Concluíram ainda que, a resistividade do solo pode não

apresentar correlação direta com a sua corrosividade, visto que o solo mais corrosivo foi o de maior resistividade.

Ikechukwu *et al* (2014) investigaram a correlação entre propriedades de solo, como pH, potencial redox, teor de cloreto e sulfato e resistividade elétrica, e a perda de massa de amostras de aço API 5L X42. Foram utilizadas amostras de solo de quatro regiões distintas por ensaio com duração de 2352 horas. Foi realizada também a caracterização física dos solos por ensaios de granulometria, massa específica, porosidade e permeabilidade. As taxas de corrosão de todas as amostras de aço aumentaram com o tempo e para menores valores de pH. Foi identificada uma relação inversa entre as taxas de corrosão e as resistividades elétricas dos solos. Os resultados mostraram que entre os parâmetros que influenciaram a corrosão do aço em contato com os solos, a resistividade do solo teve influência dominante.

Giarola (2016) preparou soluções sintéticas para simular variedades de solos com propriedades físico-químicas distintas, avaliou, ainda, a corrosividade de três amostras de solos para o aço API X65 por ensaio de perda de massa e ensaios eletroquímicos. As amostras de solos foram retiradas de três locais na cidade de São João del Rei, MG. Foram preparadas em laboratório 21 soluções sintéticas com variações em suas composições. De forma a simular solos anticorrosivos foi adicionado cimento Portland nas taxas de 5%, 10% e 15%. Foi também utilizado tiosulfato de sódio para simular a ação das bactérias redutoras de sulfato (BRS), em condições desaeradas e aeradas, com o objetivo de simular solos com presença de H_2S . Foram preparados também extratos aquosos dos solos. A corrosividade dos solos foi classificada pelo índice de Steinrath, com os parâmetros da resistividade, potencial redox, pH, Cl^- , SO_4^{2-} , S^{2-} , com um solo classificado como ligeiramente agressivo e os outros dois como solos não agressivos. Os resultados permitiram concluir que a adição de cimento até 5% (m/V) provoca aumento do pH, com melhorias na resistência à corrosão do aço. As soluções sintéticas elaboradas pela autora apresentaram boa correlação com as amostras de solos.

Lins *et al* (2012) avaliaram a resistência à corrosão do aço API X52 em contato com solos da Serra do Ouro Branco, MG. Elaboraram soluções do

solo local e sintética. Por técnicas eletroquímicas com análise de Tafel e espectroscopia de impedância eletroquímica, analisaram as amostras do aço por microscopia de eletrônica de varredura. Na solução do solo, o aço apresentou maior potencial de corrosão e resistência à polarização e menor densidade de corrente.

3.2.CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE SOLOS E RELAÇÃO ENTRE CARACTERÍSTICAS E CORROSIVIDADE

Jesus (2007) estudou o comportamento do aço API 5L X70 em contato com alguns solos no Brasil. No trabalho do autor, foram avaliados os efeitos de parâmetros do solo na resistência à corrosão. Os parâmetros avaliados foram pH, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos. As técnicas empregadas foram a difratometria de raios-X, microscopia eletrônica de varredura, fluorescência por raios-X e análise de injeção de fluxo. Foram identificados os teores de cloreto, sulfato e nitrato nas amostras das soluções de solo, e foram realizadas análises de granulometria e gravimetria. Os resultados permitiram caracterizar os solos com relação às suas corrosividades, observando que o ataque corrosivo variou conforme as estratificações e o tipo de solo. Foi demonstrado que as soluções de solo podem atuar como aceleradores do processo de corrosão e respostas rápidas podem ser obtidas pelo uso destas soluções em comparação com aquelas feitas em solo real.

Ferreira *et al* (2007) investigaram a corrosividade do solo por meio da interações físico-químicas entre o material e o meio. Foi escolhida a região sudeste do Brasil, especificamente Araxá-MG, para a coleta de dezesseis amostras de solo. A corrosividade do solo foi avaliada por análise de soluções preparadas com amostras do solo, especificamente, ensaios de cromatografia iônica; análise de metais por emissão de plasma e medidas de pH. Os autores concluíram que a quantidade de elementos na composição do solo influencia em sua agressividade.

Loureiro *et al* (2007) estudaram a influência de substâncias químicas na corrosividade do solo em contato com duto de aço-carbono. Para tanto, foi

utilizada amostra de solo do tipo latossolo vermelho-amarelo, da cidade de Juiz de Fora, MG, e o aço-carbono AISI 1020. As amostras de solos foram contaminadas pelas substâncias químicas: ácido sulfúrico, amônia e 1,2-dicloroetano. Os autores avaliaram a corrosividade das amostras de solos durante quatro meses por meio dos ensaios de perda de massa e medidas do *índice de Steinrath*. Este índice correlaciona diversos parâmetros (umidade, resistividade elétrica, pH, potencial redox, entre outros) diretamente envolvidos na corrosividade dos solos, com números cujo somatório resulta em classificação do solo quanto à sua agressividade. Concluíram que o aço-carbono sofre corrosão nos meios: $\text{H}_2\text{SO}_4 > \text{H}_2\text{O} > 1,2\text{-dicloroetano}$.

Nóbrega *et al* (2003) empregaram a eletrorresistividade para avaliar a corrosividade do solo em depósito de armazenamento de derivados de petróleo na cidade de São Paulo. Os autores, ainda mapearam o potencial de corrosão do solo, obtendo o sentido do fluxo da água subterrânea. A área avaliada está situada na bacia hidrográfica do alto Tietê e é caracterizada como bacia sedimentar de idade terciária e de depósitos sedimentares aluviais quaternários sobrepostos a rochas de granito. Foram realizadas 21 sondagens elétricas verticais com alcance de 50 m de profundidade para obter o nível de água e mais 7 sondagens para se obter a resistividade, em consequência, a agressividade do solo mais próximo da superfície. Ademais, foram realizadas 27 sondagens em que foi avaliada a porosidade dos solos pela condutividade hidráulica do solo natural e do aterro da zona não-saturada. Os resultados das sondagens elétricas verticais, juntamente com os dados de níveis de água em poços de monitoramento, permitiram uma compartimentação entre uma zona não saturada, constituída de aterro-siltoso e sedimentos superficiais, e outra zona saturada, com sedimentos arenosos e argilosos. Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica apontaram baixa permeabilidade do solo superficial com valores abaixo de $1,0 \times 10^{-5}$ cm/s, e valores três vezes maiores a profundidade de 10m em solo saturado. Medidas de resistividade de 50 $\Omega \cdot \text{m}$ permitiram identificar a área no terminal em que se localizam o setor de estancagem de álcool e a área leste, como as regiões mais corrosivas. Os autores concluíram que o método geofísico de eletrorresistividade pode ser

empregado para avaliação preliminar da corrosividade de solos, no entanto, para diagnóstico mais detalhado e definitivo seriam requeridos mais parâmetros e ensaios adicionais.

Rieder *et al* (2009) avaliaram as taxas de corrosão de diferentes materiais metálicos expostos aos agentes agressivos de quatro subestações, a fim de estudar os mecanismos de corrosão nestes meios. Os autores utilizaram aço-carbono, zinco, cobre, alumínio e aço galvanizado. Das quatro subestações definidas para estudo, três foram no litoral e outra em ambiente de corrosividade moderada. Os autores caracterizaram o solo, por meio do potencial do solo e da resistividade. Nas medidas do potencial do solo foram empregados eletrodos de aço galvanizado enterrados até 0,5 m. Para obter a resistividade elétrica do solo foi utilizado o método de Wenner. Os autores realizaram também ensaios químicos de agentes agressores nos solos obtendo a concentração de enxofre total e cloretos. Analisaram as amostras metálicas, após 90 dias em contato com as intempéries, e realizaram a caracterização morfológica por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Os autores classificaram a subestação de Osório, no litoral, como de agressividade alta para o aço e muito alta para o cobre, mas, comparativamente às demais subestações litorâneas, foi a menos agressiva. Os autores correlacionaram os valores das resistividades dos solos com a agressividade, classificando os solos como de baixa agressividade, pelo critério em que valores de resistividade maiores que 1000 $\Omega.m$ resultam em solo de baixa agressividade (WRANGLÉN,1972).

Messias (2011) estudou alguns parâmetros do solo como potencial redox, CO₂, O₂, temperatura, umidade, e variáveis micrometeorológicas – direção e velocidade do vento e intensidade de precipitação – por meio de monitoramento contínuo e ininterrupto, na região nordeste do pantanal mato-grossense. Os resultados do potencial redox variaram entre 636 mV, na estação no ano designada de “enchente” até -341 mV, na “cheia”, resultando em ambiente anaeróbico na estação cheia e ambiente oxidado nas demais estações do ciclo hidrológico. A autora concluiu, ainda, que o potencial matricial e a

umidade do solo são variáveis, entre as demais obtidas, e são determinantes no processo biológico deste solo tropical considerando a sazonalidade

Gonzáles e Shanahan (2012) utilizaram extratos de solos, naturais ou simulados, no estudo da corrosão do aço API 5L X65 de uso em gasodutos. Os pH das soluções de ensaio foram variados no intervalo entre 6 e 12 e os resultados mostraram diminuição da corrente de corrosão com o aumento do pH devido ao aumento na tendência à passivação do aço

Queiroz (2012) avaliou o efeito da microbiota dos solos argiloso e arenoso na região de SUAPE, Pernambuco, na corrosão do aço carbono API 5L X60. Para tanto, utilizou cupons metálicos jateados do aço, os quais tiveram suas massas aferidas. Amostras dos solos foram removidas de uma profundidade de 1,0 m e transportadas para o laboratório para a realização de ensaios físico-químicos e caracterização geotécnica. Os resultados mostraram maiores taxas de corrosão no solo argiloso em relação ao solo arenoso. Foi concluído que esses ensaios são importantes para se compreender o comportamento frente a corrosão em solos.

Castro (2013) utilizou o aço AISI 1020 em contato com solos característicos da região amazônica, com o propósito de avaliar a corrosividade do solo por meio do contato direto do aço com o solo, enterrado e, imerso no extrato aquoso do solo. Foi realizada a caracterização do solo por ensaios de massa específica, parâmetros de consistência do solo, granulometria e de perda de massa. O autor avaliou a presença de micro e de macronutrientes, a composição e concentração de elementos no extrato aquoso do solo e realizou análise microbiológica. Os resultados possibilitaram classificar o solo como pertencendo ao grupo A-7, relativo aos solos argilosos, conforme o *Transportation Research Board* (TRB). Quanto à perda de massa, concluiu que o ataque foi severo, conforme a resolução da norma comparativa da NACE-RP-07-75, que permite classificar o processo corrosivo pela perda de massa uniforme e por pite em mm/ano. As análises do solo identificaram partículas coloidais as quais promovem agressividade ao solo argiloso. A técnica de fluorescência de raios X por reflexão total identificou os elementos enxofre e cloro como agentes agressivos que favorecem a corrosividade do solo.

Erthal *et al* (2017) avaliaram e caracterizaram os solos em cidades da região carbonífera do Rio Grande do Sul e suas corrosividades quando em contato com amostras de aço API 5L grau B pelo tempo de 10 meses. Em seis cidades, os autores coletaram amostras de solos e as submeteram a ensaios de condutividade elétrica, pH e microscopia óptica. Os resultados da condutividade elétrica variaram de $23 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, na região de Dom Pedrito, até $130 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, em Pinheiro Machado, enquanto que o valor do pH dos solos variou de 5,5, em Candiota até 7,3 em Aceguá. No entanto, a morfologia das amostras do aço API 5L grau B após a exposição evidenciou que as que ficaram em contato com o solo de Dom Pedrito foram as menos atacadas. Concluíram, em razão da localização do estudo, que as emissões de cinzas da combustão do carvão são ricas em compostos de enxofre e, com isso, promovem corrosão por acidificação, reagindo com água, formando H_2SO_4 .

Castro (2018) investigou a resistividade elétrica do solo na cidade de Palmas, Tocantins, por meio de campanhas de ensaios de laboratório, propondo a elaboração de modelos geotécnicos de tipos de solos, nível freático e valores do índice de resistência à penetração (ABNT NBR 6484, 2001). Os resultados permitiram a estratificação do solo, e estes foram comparados com aqueles oriundos dos ensaios geofísicos. A resistividade elétrica medida ficou entre $100 \Omega.\text{m}$ até $1000 \Omega.\text{m}$, para os solos saprólitos; entre $100 \Omega.\text{m}$ e $6.000 \Omega.\text{m}$, para os solos argilosos; entre $1.000 \Omega.\text{m}$ e $30.000 \Omega.\text{m}$ para os solos siltosos e, para os solos arenosos, os valores variaram entre $10.000 \Omega.\text{m}$ e $150.000 \Omega.\text{m}$. O autor identificou a camada com maior resistividade, por meio do ensaio de penetração simples na profundidade, de cerca de 10 m, e de 5 m para o lençol freático.

Silva (2007) avaliou o comportamento corrosivo do solo em contato com o aço API 5L X56 por técnica de impedância eletroquímica e as características físicas e químicas do solo. No trabalho de Silva, o aço foi ensaiado com revestimento orgânico anticorrosivo do tipo alcatrão de hulha (*coal tar*), em condições de campo e em laboratório. Foram coletadas amostras de solos em regiões próximas a dutos petroquímicos, para preparação do extrato aquoso do solo com água deionizada. A caracterização granulométrica dos solos revelou grande variabilidade, com algumas amostras com predominância de

partículas grossas e outras, de finas. Os resultados mostraram que o revestimento anticorrosivo não foi resistente ao meio alcalino.

Sing *et al* (2013) avaliaram a corrosividade de solo em contato com aço de mineraduto pela relação entre a resistividade elétrica do solo e a perda de massa do aço de solos de cinco locais distintos na península da Malásia e ensaiadas por 12 meses. Amostras de aço API 5LX 70 foram enterradas e a cada 3 meses eram retiradas amostras para realização do ensaio gravimétrico conforme a ASTM G1-03. A resistividade do solo foi medida *in situ*, pelo método de Wenner de quatro elétrodos, conforme a ASTM G57-06. Os resultados das taxas de corrosão, após 12 meses, variaram de 0,056 mm/ano até 0,218 mm/ano, enquanto as resistividades elétricas variaram de 21.677 Ω .cm a 503 Ω .cm. Os autores não observaram uma relação inversa entre a resistividade do meio e as taxas de corrosão e concluíram que apenas a relação entre taxa de corrosão no aço e resistividade elétrica do solo é insuficiente para avaliar a corrosividade do solo em contato com aço.

Ikechukwu *et al* (2014) investigaram a correlação entre as propriedades de solo, pH e resistividade, e a perda de massa de amostras de aço API 5L X42. Os aços API 5L X42 foram colocados em contato com amostras de solo de quatro regiões distintas por 2352 horas. Foi realizada a caracterização química dos solos com medidas de pH, potencial redox, temperatura, resistividade elétrica, teor de cloreto e sulfato e, também a caracterização física dos solos com ensaios de granulometria, massa específica, porosidade e permeabilidade. Os resultados para as perdas de massa foram maiores a partir de 672 h do ensaio e, ainda, as taxas de corrosão de todas as amostras de aço aumentaram com o tempo. Identificaram uma relação inversa entre as taxas de corrosão e as resistividades elétricas dos solos. Concluíram que entre os parâmetros que influenciam o aço em contato com os solos, a resistividade teve influência dominante, em específico, em relação ao pH do solo.

Dhakai, Dahal e Bhattarai (2013) avaliaram a corrosividade de solos em contato com tubulações metálicas, por parâmetros como resistividade elétrica, teor de umidade, potencial redox, pH, e teor de cloretos e sulfatos. O local escolhido foi a cidade de Kamerotar, Nepal, onde foram retiradas 30

amostras de solos para realização dos ensaios de caracterização em laboratório. Os autores chegaram aos resultados: teor de umidade dos solos variou de 18 a 77%, classificando as amostras de solos entre levemente até altamente corrosiva; o pH dos solos variou entre 4,0 a 9,3 sendo estes classificados da seguinte forma: soluções com $\text{pH} < 4,5$ e $\text{pH} > 8,5$ foram consideradas altamente corrosivas; os solos com pH no intervalo 6,5 a 7,4 foram classificados como corrosivos; e aquelas com pH no intervalo de 7,5 a 8,4, em moderadamente corrosivos. Para a resistividade elétrica, os autores classificaram os solos em levemente corrosivos. Os valores de potencial redox no intervalo de 87 a 426 mV resultaram na classificação da maioria das amostras de solos em moderadamente corrosiva, exceto às que se encontravam fora do intervalo de 100 mV até 400 mV (severamente corrosivas). Os teores de cloretos menores que 50 ppm até 130 ppm resultaram em classificação dos solos em levemente corrosivos sendo identificado o aumento da resistividade com a redução do teor de cloreto no solo. Por fim, as concentrações de sulfatos, no intervalo de 20 a 226 ppm resultaram na classificação de solos em levemente corrosivos. Vale ressaltar que os autores avaliaram as características do solo independentemente, enquanto a interação dos parâmetros avaliados no trabalho daqueles autores pode resultar em classificações diversas das especificadas.

Pereira *et al* (2015) avaliaram o efeito do teor de umidade do solo em contato com aço galvanizado. Os autores utilizaram amostras de aço carbono AISI 1020 galvanizados por imersão. Utilizaram amostras de solos argilosos próximos a torres de transmissão de usina termoeletrica, em Pernambuco. As amostras metálicas foram colocadas em contato com as amostras de solos por período de 60 dias quando foram realizados ensaios de perda de massa, potencial redox, pH, concentrações de sulfatos e cloretos, teor de umidade e ensaios eletroquímicos. Os resultados indicaram uma relação da resistividade inversamente proporcional à umidade. Para valores de umidade do solo abaixo de 20% foram medidos valores elevados de resistividade (acima de 4 k Ω .m), classificando o solo como de baixa agressividade. O pH medido de 5,3 indicou alta corrosividade para o aço galvanizado. O potencial redox medido (827,4 mV) indicou solo não corrosivo, o que foi reiterado pela ausência de cloretos e

sulfatos. Os autores, pelos parâmetros físicos e químicos, classificaram o solo como de baixa agressividade, segundo o índice de Steinrath. Os autores concluíram, a partir dos ensaios gravimétricos, que a menor taxa de corrosão do aço, observada em meios de maior umidade, pode ser explicada pelos produtos de corrosão formados, os quais são dependentes dos compostos solúveis constituintes dos solos.

3.3.CARACTERIZAÇÃO DE CORROSÃO ASSOCIADA A ESFORÇOS MECÂNICOS DE AÇOS API

Bueno *et al* (2014) estudaram a resistência à corrosão sob tensão e a fragilização por hidrogênio causada por proteção catódica em aço API 5L X46. As características físicas, químicas e bacteriológicas de diversos solos também foram avaliadas. A resistência à corrosão sob tensão foi avaliada com taxas de deformação lenta em meios de extratos aquosos de amostras de solo. Foram também realizados ensaios de permeação de hidrogênio para avaliar a suscetibilidade à penetração do hidrogênio no interior do aço. Os resultados mostraram que nos meios investigados, mesmo sob potenciais catódicos, o material apresentou incidência de trincas e redução de ductilidade.

Liu *et al* (2008) investigaram a corrosão sob tensão do aço API 5L X70 em solução típica de solo ácido usando ensaio de taxa de deformação lenta, curvas de polarização e técnicas de análise de superfície. A corrosão sob tensão foi controlada por dissolução anódica em baixas sobretensões positivas, mas para sobretensões negativas foi observada evolução de hidrogênio e o hidrogênio afetou as trincas que foram do tipo transgranular. Concluíram que o aço API 5L X70, temperado e com uma microestrutura de bainita, apresenta elevada suscetibilidade à corrosão sob tensão em solo ácido.

Ceglias (2012) analisou o comportamento das tensões residuais em áreas tensionadas do aço API 5L X70. O autor propôs uma metodologia de análise de tensão residual por difração de raios X, e, para garantir essa análise, foram avaliadas a textura cristalográfica e o tamanho de grão. Para validar o método proposto, o autor comparou os resultados com aqueles oriundos de

técnica mais usual, que é o da técnica de furo cego, que consiste na usinagem de um pequeno furo não passante (cego) na superfície a ser avaliada para a medição do alívio de tensões decorrentes da usinagem desse furo. Os resultados indicaram tensões residuais compressivas, tendo sido concluído que essas tensões são benéficas, pois criam obstáculos e dificultam o aumento e propagação e trincas, resultando, no aumento da resistência à fadiga e corrosão sob tensão.

3.4.AÇOS API 5L X70

Os aços-carbono são os mais usados em várias aplicações em razão do custo e propriedades mecânicas (PFEIL, 2008). Os aços microligados são aqueles em que os teores de carbono situam-se entre 0,05% e 0,25%, e o máximo teor de manganês é de 1,6%. (AISC, 2005). A adição de elementos de liga melhora a resistência mecânica do aço, a tenacidade à fratura em baixas temperaturas, a conformabilidade e a soldabilidade (TORRICO, 2006).

Os aços de alta resistência e baixa liga são empregados em polidutos para o transporte de gás e combustível. Estes devem suportar elevadas pressões e vazões. Os aços para tubulações na indústria do petróleo são classificados segundo as normas API (2001) em função de sua aplicação, composição química e resistência mecânica. A classe 5L é composta por aços de composição química e resistência mecânica distintas, compreendendo desde o aço API 5L-X42 até o API 5L-X80. Os dois últimos dígitos após a letra X representam o limite de escoamento mínimo do material em ksi. O aço API 5L X70 foi desenvolvido para a manufatura de polidutos, devendo apresentar alta resistência em meios adversos (API, 2001).

3.5.SOLOS

O solo constitui-se de partículas sólidas que, em razão de suas formas e tamanhos, propiciam o surgimento de vazios, os quais podem ser preenchidos

por água e ar. Entre outras propriedades físicas que permitem a descrição do solo, tem-se a umidade, a massa específica e a porosidade. (FIORI, 2015).

O solo é um meio altamente heterogêneo cuja resistividade elétrica varia em ampla faixa de valores, dependendo da umidade, tamanho do material particulado, teor de sais, material orgânico, pH, teor de agentes oxidantes, presença de contaminação, entre outros (MACNEIL, 1980). É constituído de partículas de diversas granulometrias e composições químicas, sendo estas inerentes à rocha que foi decomposta por meio de intemperismos químico, físico e biológico. (WINERGARDNER, 1995).

No tocante a origem, os solos podem ser residuais, transportados, glaciais, coluvionares, orgânicos (Vargas, 1977). Os solos residuais são formados a partir da decomposição da rocha de origem.

Uma estratificação típica de solos é apresentada na Figura 1 (NOGUEIRA, 1995). Esta figura ilustra como em função do processo de intemperismo – físico, químico, biológico – promovido por agentes externos transportadores e ação biológica e química, ocorre alteração gradativa da textura e da constituição química do material (MARSHAK, 2016).

Figura 1 - Estratificação de solo residual.

Fonte: Nogueira, 1995

Os solos maduros são mais homogêneos e não apresentam semelhanças com a rocha original. O solo residual jovem apresenta grande quantidade de material com partículas cujo diâmetro é superior a 4,8 mm. Em geral, apresenta irregularidade na coloração, permeabilidade e

compressibilidade, em razão do processo de transformação não ocorrer com igual intensidade em todos os pontos, existindo comumente blocos de rocha no seu interior (VARGAS, 1977). A textura (granulometria) e heterogeneidade do solo aumentam com a profundidade (WICANDER, 2014).

Os solos transportados são os que foram deixados em seu local atual por algum agente de transporte, como o vento, a água, as geleiras, a gravidade. Suas características dependem do agente de transporte, resultando em tipos distintos de solos para cada tipo de transporte (WICANDER, 2014).

Alguns solos sofrem, em seu local de formação, uma série de transformações físico-químicas o que resulta em serem classificados como solos de evolução pedogênica, como no caso dos solos lateríticos (WINEGARDNER, 1995). Em regiões em que os períodos de chuva e de estiagem são bem definidos, torna-se propício o processo de laterização. Este processo é caracterizado pela lavagem da sílica coloidal dos horizontes superiores do solo, com posterior deposição desta em horizontes mais profundos, implicando em solos superficiais com elevadas concentrações de óxidos de ferro e alumínio (FIORI, 2015).

3.5.1. Prospecção geotécnica

Segundo Costa (2012), a prospecção geotécnica consiste na investigação realizada para caracterizar o tipo de solo, como a sua resistência, a estratificação das camadas, a profundidade do nível de água e a profundidade da rocha.

A geologia divide os métodos de investigação geológica em três tipos: direto, semidireto e indireto, todos aplicáveis na verificação da superfície e subsuperfície. As sondagens diretas são aquelas que observam o terreno a olho nu, por meio de furos realizados no subsolo para analisar diretamente as distintas divisões do subsolo, ou coletar amostras em furos. Dessa forma, podem ser obtidos perfis pontuais, como os poços, ou longitudinais, a exemplo das trincheiras (NBR 6486:2001).

Os poços são perfurações realizadas manualmente com uso de ferramentas, como pás e picaretas, cujo limite máximo de profundidade é o nível

de água ou a queda das laterais do furo. O perfil exposto permite visualizar as divisões do subsolo e observar as propriedades de integração e compactação, além da coleta de amostras sem deformá-las, Figura 2.

Figura 2 - Poço em solo para observação e coleta de amostra.

Fonte: Conciani, 2013

As trincheiras são aberturas longitudinais feitas no solo por equipamentos mecânicos, como as escavadeiras, permitindo o exame visual e contínuo do solo. Além disso, permitem a retirada de amostras deformadas ou sem deformação. A amostragem do solo em poços e trincheiras se dá de maneira semelhante, devendo ser feita ao longo de sua parede lateral, podendo ser deformada ou não (COSTA, 2012), Figura 3.

Figura 3 - Trincheira em solo para observação e coleta de amostra

Fonte: Conciani, 2013

As sondagens do tipo semidireto são aquelas em que pode haver ou não a coleta de amostras de solos para sua caracterização, como por exemplo para obtenção de parâmetros de resistência e deformabilidade ou para

realização de ensaios mecânicos. As sondagens podem ser de reconhecimento com trado, de penetração padrão ou a rotativa.

3.5.2.Sondagem à trado

A sondagem a trado é realizada manualmente com o auxílio de trado, e tem como cota limite, 6m ou o nível de água. Trata-se de um processo simples, rápido e de baixo custo. Propicia obter informações das características do solo, como espessura das camadas e a sentido do lençol freático. É possível, ainda em campo, coletar amostras deformadas de solos e realizar uma caracterização inicial, por meio de sua identificação tátil e visual (CONCIANI et al. 2013), Figura 4.

Fonte: ABNT NBR 9603, 2015

Todos os solos estudados são solos urbanos da capital tocaninense. A caracterização do solo foi realizada por uma série de ensaios, a saber: tátil-visual, granulometria, sedimentação, umidade, gravimétrico, pH, resistividade.

3.5.3.Sondagem de reconhecimento com Standard Penetration Test (SPT)

Este tipo de sondagem propicia a investigação do solo pela retirada de amostras deformadas. Por este método, podem ser determinados o nível de água, a resistência à penetração dinâmica, o estado de consistência e compactação do solo (ABNT, NBR 6484:2001).

O ensaio é iniciado com o trado-concha até a profundidade de 1,0 m, e, na sequência, é utilizado o trado helicoidal até atingir o nível de água. Figura 5 é mostrado um esquema de execução da sondagem.

Figura 5 - Esquema de sondagem SPT.

Fonte: Costa, 2012

Para os solos A e B, foram realizadas sondagens do tipo rotativo desde a superfície até a profundidade de 5,0 metros. Por meio do amostrador específico para cada cota de profundidade do solo, obteve-se uma visão da estratificação do solo, por meio da descrição do solo.

3.5.4. Prospeção indireta

Trata-se de sondagens indiretas em que não se coletam amostras nem se observa o perfil de solo. Dentre essas sondagens, as mais utilizadas são a elétrica, a sísmica de reflexão e a sísmica de refração (ABGE, 2013). A sondagem elétrica é aquela em que a partir da resistividade obtém-se o mapeamento do solo em função das propriedades elétricas. A identificação de rochas e solos por este método resulta na estratificação do perfil do solo segundo a sua resistividade. (KNAPPETT e CRAIG, 2014).

Os ensaios geofísicos, também chamados de métodos indiretos de investigação geológico-geotécnica, são ensaios onde não há necessidade de penetração física no meio investigado, mas há visualização contínua da estratificação do solo. (SOUZA, 1998).

A priori todos os métodos de investigações indiretas são limitados devido ao alto número de resultados possíveis condicionados a variantes como: variação da propriedade física intrínseca da rocha, bem como dos minerais nela contidos; heterogeneidades, descontinuidade e anisotropia dos meios, intemperismo; e presença de agente externo, como a água. Devido à alta condutividade desses materiais, propiciada pela presença da água, a resistividade aparente é afetada de forma definitiva. Dessa forma, determinada resistividade aparente pode resultar de espessuras muito diferentes de solos ou rochas sedimentares, bem como do tipo de água contida nesses materiais (BRAGA, 2006).

Os métodos geoelétricos permitem medir correntes elétricas e diferença de potencial entre dois pontos na superfície. As propriedades elétricas diferentes das rochas, dos sedimentos e dos minerais viabilizam o uso dos métodos geoelétricos como forma de investigação geológica-geotécnica (ABGE, 2013).

O método de eletrorresistividade emprega corrente elétrica introduzida no terreno através de dois eletrodos (A e B), com objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, o que permite calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície (ELIS, 2008). A sondagem elétrica vertical permite medir o parâmetro da resistividade elétrica na superfície terrestre, com o emprego de um arranjo (simétrico ou assimétrico) de eletrodos de emissão (AB) e de recepção (MN). A variação vertical da resistividade elétrica em subsuperfície pode ser estimada por esta técnica onde o arranjo de eletrodos é colocado ao redor de um ponto fixo central, Figura 12 (MOREIRA, 2005).

A variação vertical da resistividade elétrica em subsuperfície pode ser medida pela técnica de soldagem elétrica vertical onde todo o arranjo de

eletrodos é posicionado ao redor de um ponto fixo central, Figura 6 (MOREIRA, 2005).

Figura 6 - Medição de resistividade do subsolo pela técnica de sondagem elétrica vertical.

Fonte: Moreira, 2005.

O arranjo Schlumberger é utilizado, especificamente, em sondagens elétricas verticais para se obter a resistividade aparente do solo (p_a), sobre a superfície de um terreno estratificado. É admitido que a distância entre os eletrodos (MN) seja pequena, ou seja, cerca de 20% menor em relação à distância dos eletrodos de corrente (AB), de forma que a diferença de potencial dividida por MN represente o campo elétrico no ponto central entre A e B. Em relação à disposição do quadripolo, os tipos mais utilizados são os dispostos linearmente e com simetria entre os quatro eletrodos e um ponto central, denominados *quadripolos lineares simétricos*. O arranjo Schlumberger é um dos mais comuns (NBR 7117:2012).

A medição da resistividade é feita utilizando-se um sistema quadripolo, sendo que, dois eletrodos são cravados no solo para a medição da corrente no amperímetro, e os outros dois, também cravados no solo, para medir a diferença de potencial devido à corrente aplicada, por meio de um potenciômetro. (COSTA, 2012).

A resistividade varia com a distância entre os eletrodos. Se a separação for pequena, mas suficiente para determinar com segurança a resistividade, e houver homogeneidade e isotropia no solo, a resistividade obtida é real (KNAPPETT; CRAIG, 2014).

O quadripolo de Wenner é de fácil mensuração, porém possui duas principais desvantagens, que são, tornar as operações de campo mais lentas e não permitir distinguir os efeitos decorrentes de heterogeneidades superficiais. Já o quadripolo de Schlumberger tem como principais vantagens, tornar mais dinâmicas as operações de campo e possibilitar a distinção entre efeitos profundos e efeitos superficiais. Sua principal desvantagem é que as medições são mais complicadas e menos precisas, principalmente nas areias secas, que apresentam alta resistividade.

4.MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.MATERIAIS

4.1.1.Definição dos locais para ensaios de campo

O primeiro local escolhido para ensaio foi o campus da Universidade Federal do Tocantins (UFT), em local próximo a um lago – cerca de 150 metros, cuja localização possui as coordenadas: latitude: 10°10'40.72"S e longitude: 48°21'42.40"O. Foi também escolhido outro local para ensaio, o campus da Faculdade Católica do Tocantins (FACTO), cujo aspecto do solo, textura, coloração, é muito distinto do outro local. As coordenadas desse local são: latitude 10°16'11.92"S e longitude: 48°19'51.67"O.

Soluções dos solos foram extraídas também de três outros locais, especificamente, de locais próximos de estações de alta tensão. Desses cinco locais foram extraídas amostras de solos, para caracterização e realização de ensaios de resistividade. Os três últimos solos são localizados próximos ao campus da UFT, e possuem as coordenadas: latitude: 10°10'45.25"S e longitude: 48°21'20.64"O, sendo chamado de solo EAT-1 (estação de alta tensão). As coordenadas do solo denominado EAT-2, outro local de retirada são: latitude: 10°12'14.17"S e longitude: 48°18'36.44"O. Por fim, foram retiradas amostras do solo em outro local, designado como solo EAT-3, cujas coordenadas são: latitude: 10°15'39.35"S e longitude: 48°19'50.89"O.

Na Figura 7 é apresentada uma visão geral dos locais de retiradas das amostras de solos. Os solos do campus da UFT, chamado de solo A, e o solo EAT-1, são próximos do lago, sendo suscetíveis às variações do lençol freático. Os solos FACTO, também chamado de solo B, e o solo EAT-3, estão distantes em relação ao lago, e o solo EAT-2, fica em região central da cidade e distante do lago. Este último solo, no entanto, fica próximo de outro lago, sendo influenciado pela variação da cota do nível de água.

Figura 7 - Visão geral da disposição dos locais onde foram retiradas todas as amostras de solos, em Palmas, Tocantins.

Fonte: Software: GoogleEarthPro, terça-feira, 10 de julho de 2018 19:31:57 UTC.

As atividades de campo foram iniciadas com o enterramento das amostras metálicas, em dezembro de 2014 e abril de 2016, nas regiões A e B, respectivamente. Posteriormente, em novembro de 2018, foram removidas amostras de solo das regiões C (EAT-1), D (EAT-2) e E (EAT-3), próximas a três estações de alta tensão, em Palmas, para avaliar o efeito das correntes de fuga em resultantes do campo eletromagnético dessas estações na corrosividade dos solos em seu entorno.

As regiões A e C ficam localizadas a cerca de 150 m e 850 m do lago, respectivamente. As regiões B e E estão situadas a cerca de 2000 m do lago. A região D está localizada na região central da cidade, cerca de 1000 m de um lago.

Na Figura 8 é mostrada a localização dos solos A e B.

Figura 8 - (a) Localização dos solos A (UFT); (b) B (FACTO).

Fonte: Software: GoogleEarthPro, terça-feira, 10 de julho de 2018 19:31:57 UTC.

4.1.2.Aço API 5L X70

O aço API 5L X70 utilizado neste estudo foi fornecido pela USIMINAS S/A, e é parte do mesmo lote empregado por Jesus, 2007 em seu trabalho de doutorado. Esse aço apresenta resistência ao escoamento de 570 MPa e composição química apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do Aço API 5L X70 (% em massa).

C	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Nb+V+Ti	B	Fe
0,26	1,65	0,030	0,030	0,50	0,50	0,50	0,15	0,15	0,001	balanço

Fonte: USIMINAS S/A

Neste trabalho, foram utilizadas cinco hastes com 50 mm de largura, 12,7 mm de espessura e 1000 mm de comprimento para enterramento no solo de Tocantins. O corte das hastes foi realizado por guilhotina.

Também foram confeccionadas 84 amostras deste aço, cujas dimensões foram de 50 mm por 50 mm de lado e 12,7 mm de espessura, para avaliar a corrosividade do solo em contato com este material. Estas amostras foram cortadas usando discos diamantados. A área exposta ao meio corrosivo foi estimada. A superfície do material ensaiado foi submetida a jateamento com areia para remoção de produtos óxidos aderentes às suas superfícies. Após jateamento, as hastes e as amostras metálicas foram acondicionadas e levadas para laboratório, onde suas dimensões foram aferidas com paquímetro, e suas massas medidas em balança de precisão (Figura 9).

Figura 9 - (a) Corte das hastes, por meio de disco diamantado; (b) Jateamento com areia das hastes metálicas; (c) Aferição da massa de cada amostra por meio de balança; (d) Medição das dimensões geométricas das amostras com paquímetro.

4.1.3.Solos

Os solos escolhidos para este trabalho foram retirados de cinco regiões geográficas na cidade de Palmas. As amostras dos solos A e C foram retiradas no campus da UFT e de uma estação de alta tensão nas proximidades do campus da UFT. Os solos A e C, geologicamente, são muito distintos dos solos B, D e E, pois, os perfis do solo A são formados por um aluvião, transportado com profundidade da ordem 20m, com granulação constituída de areias e pedregulhos, sendo solos jovens, sem laterização e com o nível de água raso.

A extratificação dos solos B, D e E, revelam se tratar de solos residuais sedimentares de rocha de baixa granulometria (siltes e argilas), não saturado.

4.2.MÉTODOS

4.2.1.Enterramento das amostras de aço

Foi realizada abertura inicial do solo, com profundidade de 100 mm, por meio de trado manual, para o enterramento das cinco hastes de 2 kg, e, posteriormente, foi efetuada a cravação das hastes metálicas com o uso de marreta. O enterramento das amostras menores empregou o trado manual e o perfurador rotativo de solo. Após a realização dos furos com profundidade de 500 mm as amostras identificadas de aço foram enterradas e sua localização em coordenadas *Universal Transversa de Mercator* (UTM), foi obtida por *Global Positioning System* (GPS) manual da marca *Garmin*, Figuras 10 e 11.

Figura 10 - (a) Abertura inicial com o uso do trado manual; (b) cravação das hastes metálicas; (c) abertura dos furos para o enterramento das amostras de aço; (d) disposição das amostras pequenas de aço para o enterramento.

Figura 11 - Coordenadas de localização das amostras de aço, em UTM, campus UFT, (a) e FACTO, (b).

Como é observado na Figura 11 (a), as amostras metálicas pequenas foram dispostas de maneira concêntrica e intermitente às barras metálicas, para a primeira idade de enterramento. Para a segunda idade de enterramento, estas foram dispostas longitudinalmente, em direção ao lago. Para o solo B, a disposição foi também longitudinal, conforme ilustra a Figura 11 (b).

4.2.2.Retirada das amostras metálicas e das amostras de solo

Durante a abertura dos furos foram retiradas amostras de solos nas profundidades de 1,10 m e 0,50 m, por meio de trado manual, para a realização de ensaios de granulometria e de caracterização mineralógica dos solos (ABNT NBR 7181, 2016). Os desenterramentos das peças metálicas pequenas e das hastes metálicas foram realizados nas idades de 230 dias, 360 dias, 500 dias, 660 dias, 730 dias, 820 dias e 960 dias. Para tanto, foi empregado o trado manual, pá, barra metálica, cabo de aço entre outras ferramentas, (Figura 12).

Figura 12 - (a) e (b) Abertura de furos para a retirada das amostras de solo e amostras metálicas, solo FACTO; (c) abertura de furos para a retirada das amostras de solo e amostras metálicas, solo UFT (d) Aspecto dos furos no entorno da haste metálica, solo UFT.

Após remoção das amostras de aço, foi verificado que elas se encontravam impregnadas de material do solo porém havia maior concentração de material nas bordas. O excesso de material do solo foi retirado, ainda em campo e colocados em recipiente hermético e transportados ao laboratório de corrosão do IPEN.

4.2.3. Sondagem de simples reconhecimento com SPT

Com o objetivo de determinar os tipos de solos nas profundidades de 0,5 m até 5,0m dos locais em estudo, e, obter a posição do nível de água, foi empregada a sondagem denominada *Standard Penetration Test* (SPT). Os

componentes empregados foram torre com roldana; tubos de revestimento; trado-concha; trado helicoidal; amostrador padrão; cabeças de bateria; martelo padronizado; medidor de nível de água (ABNT NBR 6484, 2001).

4.2.4. Sondagem geofísica

As sondagens elétricas verticais foram realizadas utilizando o método da eletrorresistividade com o arranjo de campo (NBR 7117:2012). Foram executadas quatro leituras para cada profundidade, variando de 0,5 m até 5,0 m, conforme o arranjo de Wenner, NBR 7117:2012. (Figura 13).

Figura 13 - Arranjo de Wenner (Sendo, $b \leq a / 10$) NBR 7117:2012, adaptado.

Para medidas de resistividade a 0,5 m de profundidade, hastes de cobre foram fincadas em P1 e P2, cada uma a 0,25 m do ponto central, enquanto que, para medidas de resistividade a 1,0 m de profundidade, as hastes ficaram equidistantes de 0,5 m, em relação ao ponto central. O equipamento empregado para medir a resistividade dos solos, pelo método de Wenner foi o terrômetro digital MTD-20KWe. Figura 14.

Figura 14 – (a) equipamento para medida de resistividade do solo. Medição da resistividade no solo (b) A; (c) B; (d) C.

Para os solos em estudo, a metodologia usada para os valores de resistividade foi a de Wenner ou método dos quatro pontos. (NBR 7117:2012).

4.2.5. Ensaios de caracterização física dos solos

Foram retiradas amostras de solos deformadas nos cinco locais adotados para posterior caracterização. As amostras de solos foram retiradas por meio de trado manual, devidamente acondicionadas e transportadas ao laboratório da Faculdade Católica do Tocantins (ABNT NBR 9604, 2016).

Para a realização do ensaio de granulometria por meio do peneiramento das amostras de solos foram empregados balança, almofariz, mão de grau, estufa, peneiras, agitador. Após secagem em estufa, as amostras são destorroadas e, em seguida, a sua massa medida e levada ao agitador de peneiras em que se obtém a quantidade de amostra de solo retida em cada peneira (ABNT NBR 7181, 2016), Figura 15.

Figura 15 – (a) Determinação da massa da amostra de solo; (b) destorroamento da amostra de solo; (c) e (d) amostras retidas em peneira.

O ensaio de granulometria foi realizado segundo a norma ABNT NBR 7181, 2016. Essa norma prescreve limites para os solos em função do tamanho dos grãos. No presente estudo, a maioria dos solos foi ensaiada com diâmetro máximo do agregado de 4,8 mm por meio do peneiramento (ABNT NBR NM ISO 3310-1). Foi realizada também a caracterização da textura dos solos pelo método da EMBRAPA, 2018.

Cerca de 50 g de amostra de solo foram colocadas em recipiente metálico e levadas a estufa a temperatura de 105 °C, permanecendo por um período de até 6 h, quando, então, a amostra é considerada seca e, pela diferença percentual em relação à massa úmida, é obtido o teor de umidade para cada amostra de solo. (ABNT NBR 16097, 2012).

Foi também realizado o ensaio de massa específica das amostras de solos e, para tanto, foram preparados 250 g de amostra conforme a norma ABNT NBR 6457, 2016. Em seguida, a amostra foi homogeneizada, medida 50 g, para os solos argilosos e siltosos e 60 g para os solos arenosos e, posteriormente, as amostras foram imersas em água destilada, por 12 h, no interior de um balão de

500 cm³. Na sequência, após obtida a umidade higroscópica, as amostras foram levadas a um copo dispersor e agitadas por 15 min e depois aquecidas por 30 min e levadas ao banho-maria por 30 min até ocorrer o equilíbrio com a temperatura ambiente, efetuando a aferição da massa da amostra para se obter, por meio de formulação específica, a massa específica da amostra de cada solo (ABNT NBR 6508,1984).

4.2.6. Ensaio de perda de massa (gravimétrico)

As amostras de aço, após serem desenterradas foram acondicionadas e transportadas para o Laboratório de Eletroquímica e Revestimentos Protetores do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM), IPEN, onde foi realizada a limpeza por escovação de suas superfícies com escova de aço para retirada do solo impregnado e lavagem com água destilada antes de serem submetidas a ensaio gravimétrico para obtenção das taxas de corrosão.

O ensaio gravimétrico ou de perda de massa foi realizado por imersão das amostras, escovadas e lavadas, em solução contendo 1000 mL de ácido clorídrico e 350 mg de hexametilenotetramina. Esta solução tem por objetivo remover produtos de corrosão da superfície do aço sem causar ataque ao aço. O tempo inicial de exposição a esta solução foi de 6 min, após o qual as amostras eram retiradas, enxaguadas em recipiente contendo 1000 mL de água destilada, secadas com sopro de ar quente e, finalmente, pesadas em balança gravimétrica. Este procedimento foi repetido para tempos de 6, 15 e 20 min, (ASTM E1526-93).

4.2.7. Ensaio de difratometria de raios - X

Foi realizada inspeção visual da haste metálica após limpeza do solo impregnado em sua superfície. Uma quantidade de produtos de corrosão foi removida com uma espátula, e estes foram acondicionados e encaminhados ao Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP para caracterização química

por difratometria de raios X, pelo método do pó. Foi utilizado o difratômetro de raios-X, da Marca Philips, linha X'Pert, com anodo de cobre ($\text{Cu K}\alpha$ 1,54 Å). A velocidade de varredura foi de $1,2^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$, a faixa de varredura foi de 3° a $90^\circ 2\theta$, a tensão de aceleração foi de 40 kV e a corrente foi de 40 mA (Figura 16).

Figura 16 - (a) Retirada dos produtos de corrosão da haste metálica; (b) produtos de corrosão sendo preparados para análise por difração de raios-X.

4.2.8. Caracterização química dos solos

Diversos elementos químicos podem estar presentes no solo. No entanto, grande parte encontra-se como compostos não solúveis e, portanto, não participam do processo de corrosão. Para avaliação da corrosividade do solo é importante analisar quimicamente os elementos solúveis em água, notadamente, os elementos formadores de bases K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} e, também, os formadores de ácidos Cl^- , $(\text{HCO}_3)^-$, $(\text{SO}_4)^{2-}$, $(\text{CO}_3)^{2-}$ (SERRA, 2014).

A caracterização dos elementos químicos dos solos seguiu a preconização da EMBRAPA, 2018, em que os elementos foram extraídos por solução quelante, dietilenotriaminopentacético ou solução mista de ácidos e obtenção dos teores por espectrofotometria de absorção atômica.

4.2.9.Preparação do extrato aquoso do solo

O extrato aquoso do solo, ou solução do solo, foi preparado com o material passante em peneira de abertura 0,84 mm (Figura 17). Para cada solução, foram colocados 240 g de solo em béquer de 1000 mL ao qual foi adicionado 600 mL de água deionizada e, após homogeneização da mistura por 15 minutos com agitador magnético, seguido por repouso de 30 min, foi realizada filtração da solução com papel filtro (PINHEIRO, 2010); sendo assim obtido o extrato aquoso do solo. Após obtenção do extrato foi efetuada medida do pH e potencial redox (E). Os extratos aquosos foram utilizados nos ensaios eletroquímicos de polarização anódica.

Figura 17 – (a) solo A (UFT); (b) solo B – FACTO; (c) solo C (EAT-1); (d) solo D (EAT-2); (e) solo E (EAT-3).

Após o ensaio de granulometria foram pesados 240 g solo e colocados em um béquer de 1000 mL, ao qual foi adicionado 600 mL de água deionizada e, após homogeneização inicial, foi realizada a mistura do solo com a água utilizando agitador magnético, por 15 min com repouso de 30 min, e, posterior filtração com papel filtro. (PINHEIRO, 2010).

Após o preparo da mistura foi efetuada a medida do pH, da condutividade elétrica, potencial redox (E_H) e dos sólidos totais dissolvidos nas soluções dos solos. Os extratos aquosos foram utilizados nos ensaios eletroquímicos (medidas de potencial e curvas de polarização anódica). O pH do eletrólito influencia o comportamento frente à corrosão do material, dele depende

a estabilidade dos produtos de corrosão, justificando-se, pois, a sua importância como parâmetro de corrosividade de solos. (SERRA, 2014).

As medições do pH das soluções aquosas dos solos foram realizadas em laboratório utilizando eletrodos de referência de vidro e equipamento devidamente calibrado. Foram efetuadas três medições e estimado o valor médio. Foi utilizado o pHmetro de bancada da marca *Mettler Toledo*. (ASTM G 51:2018). A medida da condutividade elétrica de cada extrato aquoso do solo foi realizada por condutivímetro CDM210, com leituras diretas na solução. O potencial redox dos extratos aquosos foi medido por leituras diretas utilizando potenciômetro digital com resolução de 1 mV.

A medição de total de sólidos dissolvidos dos extratos aquosos dos solos foi feita por equipamento eletrônico portátil com alcance de 0 até 9990 ppm e precisão de $\pm 2\%$. Todas as medidas mencionadas neste item foram realizadas em quadruplicata sendo estimado o valor médio.

4.2.10. Ensaio eletroquímico

Ensaaios eletroquímicos com o aço API 5L X70 foram realizados nos cinco tipos de extratos aquosos em triplicata em um total de 15 amostras, nas dimensões de 50 mm de comprimento, 12,5 mm de largura e 2 mm de espessura. A área em contato com o eletrólito (extrato aquoso) foi de 1 cm². A superfície exposta ao eletrólito foi previamente lixada na sequência das lixas #220, #360, #400, #800, #1000 e # 1200, Figura 18 (a).

Foi utilizado um arranjo experimental de 3 eletrodos com o eletrodo de Ag/AgCl, KCl saturado como eletrodo de referência, um fio de platina pura como contraeletrodo e o aço API 5L X70 como eletrodo de trabalho. O extrato aquoso de cada solo foi utilizado como eletrólito, Figura 18 (b). As condutividades dos extratos aquosos foram medidas em condutivímetro Radiometer Copenhagen, CDM 210, Figura 18 (c).

Medidas de potencial de circuito aberto entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência foram obtidas em função do tempo até 3h de exposição ao eletrólito quando os potenciais em todos os meios estavam estabilizados. Após estabilização do potencial, foram realizadas medidas de polarização

potenciodinâmica anódica na faixa de polarização de $-0,02 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ até $+1,3 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ com taxa de varredura de 1 mV/s utilizando potenciostato Gamry (PC600P), Figura 18 (d).

Figura 18 – (a) Preparação da superfície metálica por lixamento; (b) soluções do extrato aquoso de cada solo; (c) medida de condutividade das soluções do extrato aquoso de solo; (d) arranjo experimental utilizado nos ensaios eletroquímicos.

Após polarização, as soluções de ensaio (extrato aquoso de cada solo) foram analisadas pelo método de análise por ativação com nêutrons para se determinar a concentração de Fe dissolvido em solução.

4.2.11. Caracterização química da concentração de Fe no extrato aquoso de cada solo pelo método por ativação com nêutrons

Para a caracterização foram utilizados trezentos microlitros de cada uma das amostras dos extratos aquosos dos solos, pipetados e secos em cápsulas de polietileno de alta pureza, em seguida, foram irradiados no reator nuclear IEA-R1 juntamente com um padrão sintético de Fe. Este padrão sintético foi preparado secando na cápsula 50 microlitros da solução certificada de ferro com a concentração $(10009 \pm 30) \text{ mg L}^{-1}$ da Spex Certiprep, EUA. As amostras e o padrão de Fe foram irradiados por 16 h sob fluxo de nêutrons térmicos de $4,6 \times 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Após 14 dias de decaimento foram realizadas as medições da atividade gama das amostras e do padrão usando um detector de Ge hiper puro Modelo GC3019 ligado ao analisador digital de espectro (DAS 1000), ambos da Canberra. O tempo de contagem do padrão de Fe foi de 6000 s e cada uma das amostras foi contada por um período de 72000 s. Os espectros gama obtidos foram processados usando Programa Genie 3.1 da Canberra. O ferro foi identificado pelo pico de energia dos raios gama de 1099,25 keV do ^{59}Fe com meia vida de 44,5 dias.

A concentração do Fe na amostra foi calculada pelo método comparativo (DE SOETE et al. 1972). A contribuição da impureza de Fe na cápsula de polietileno utilizada na irradiação da amostra foi considerada desprezível uma vez que não foi detectada a presença deste elemento na análise do branco (cápsula vazia). Para as amostras em que o Fe não foi detectado, foi calculado o limite de detecção segundo o Critério de Currie (CURRIE, 1999).

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1.CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS

5.1.1.Ensaio de granulometria dos solos

A partir da curva de distribuição granulométrica do solo A foram obtidos os parâmetros, diâmetro efetivo, $Def = 0,108 \text{ mm}$, que juntamente com os valores dos diâmetros $D_{30} = 0,192 \text{ mm}$ e $D_{60} = 0,346 \text{ mm}$, resultaram no coeficiente de não uniformidade, $C_{nu} = 3,212$ e coeficiente de curvatura, $CC = 0,988$, o que caracteriza o solo como muito uniforme e mal graduado. O módulo de finura, MF, foi de 2,218, sendo, pois, a parcela do solo arenoso, classificada em areia fina ($MF < 2,4$). (ABNT NBR 9935:2011), Figura 19.

Figura 19 – Curva granulométrica do Solo A (UFT).

Os resultados de textura pelo método da EMBRAPA, 2018, apresentou o solo A constituído por 20,0% de argila, 3,0% de silte e 77,0% de areia.

A partir da curva granulométrica do solo B foram obtidos: diâmetro efetivo, $Def = 0,103 \text{ mm}$, que juntamente com os valores dos diâmetros $D_{30} =$

0,193 mm e $D_{60} = 0,365$ mm, resultaram no coeficiente de não uniformidade, $C_{nu} = 3,537$ e no coeficiente de curvatura, $CC = 0,991$, caracterizando, respectivamente, o solo em muito uniforme e mal graduado. O módulo de finura, MF, de 2,323, permitiu classificar a parcela do solo arenoso, em areia fina ($MF < 2,4$). (ABNT NBR 9935:2011), Figura 20.

Figura 20 – Curva granulométrica do Solo B (FACTO).

Os resultados de textura pelo método da EMBRAPA, 2018, apresentou o solo B constituído por 48,0% de argila, 11,0% de silte e 41,0% de areia.

A curva granulométrica do solo C apresentou uniformidade média em sua disposição, $C_{nu} = 7,272$, e, foi classificado como mal graduado, $CC = 0,762$. O módulo de finura, MF, estimado foi de 2,660, podendo, por conseguinte, se classificar a parcela do solo arenoso, em areia média ($2,4 < MF < 3,9$). (ABNT NBR 9935:2011), Figura 21.

Figura 21 – Curva granulométrica do Solo C (UFT, EAT-1).

Os resultados de textura pelo método da EMBRAPA, 2018, apresentou o solo C constituído por 35,0% de argila, 16,4% de silte e 48,6% de areia.

A textura das amostras coletadas do solo D apresentou diâmetro efetivo, $D_{ef} = 0,123$ mm, e este, juntamente com os valores dos diâmetros $D_{30} = 0,258$ mm e $D_{60} = 0,742$ mm, resultaram em coeficiente de não uniformidade, $C_{nu} = 6,035$ e coeficiente de curvatura, $CC = 0,727$, revelando um solo com uniformidade média e mal graduado. O módulo de finura, MF, calculado para a curva granulométrica do solo D foi de 2,775, podendo, por conseguinte, classificar a parte do solo em areia média ($2,4 < MF < 3,9$). (ABNT NBR 9935:2011), vide figura 22.

Figura 22 – Curva granulométrica do Solo D (EAT-2).

A curva granulométrica do solo E apresentou uniformidade média em sua disposição, $C_{nu} = 12,759$, e, foi classificado como mal graduado, $CC = 0,407$. O módulo de finura, MF, calculado foi 2,743, podendo, parte do solo, ser classificado em areia média ($2,4 < MF < 3,9$). (ABNT NBR 9935:2011), Figura 23.

Figura 23 – Curva granulométrica do Solo E (EAT-3).

Para o solo E, os resultados de textura pelo método da EMBRAPA, 2018, apresentou 44,0% de argila, 11,8% de silte e 44,2% de areia.

Segundo o critério de Allen-Hazen, o solo pode ser classificado em função da distribuição dos diâmetros dos grãos. De fato, os solos A e B, apresentaram $C_{nu} < 5$, sendo sua distribuição muito uniforme, possuindo os demais, uniformidade média ($5 < C_{nu} < 15$).

O solo mal graduado, quer seja pela disposição uniforme dos grãos, ou pela graduação aberta, implica na incidência de poros, tornando o solo permeável, permitindo assim, a circulação de água ou até mesmo a sua ascensão por capilaridade, que concomitantemente, à variação de umidade de solo pode favorecer a dissolução de íons que aumentam a corrosividade do solo (FIORI, 2015). Os dados numéricos das curvas se encontram em Apêndice.

5.1.2.Umidade dos solos

O solo constitui-se de partículas sólidas que, em razão de suas formas e tamanhos, propiciam o surgimento de vazios, os quais podem ser preenchidos por água e ar em proporções que variam com o teor de umidade, massa específica e porosidade (FIORI, 2015).

A umidade do solo é um fator bastante útil e, que se relaciona com o tipo de solo, textura, sazonalidade, entre outros (SERRA, 2014). Na Figura 24 estão apresentados os resultados dos ensaios de umidade para cada solo.

Figura 24 – Valores médios das umidades nos solos.

As amostras do solo A apresentaram valor médio de umidade menor em relação aos demais solos. A variação da umidade percentual dos solos, desde cerca de 7,2% até mais de 26,4%, é influenciada pela parcela do solo que contém mais finos, ou seja, os solos argilosos, cujo estado pode variar desde o líquido, plástico e semi-sólido em função do teor de umidade (VARGAS, 1977).

Valores de teor de umidade do solo acima de 20% resultam em solo mais agressivo (TRABANELLI, 1972 apud SERRA, 2014). Com os valores apresentados o solo A seria o menos agressivo.

5.1.3. Massa específica dos sólidos

Na Figura 25 estão apresentados os resultados das massas específicas dos sólidos das amostras de solos. Trata-se da média de três resultados. A faixa de variação foi pequena, sendo $\rho_s = 2,67 \text{ g/cm}^3$, valor característico de solos arenosos, e ρ_s na faixa entre $2,75 \text{ g/cm}^3$ e $2,90 \text{ g/cm}^3$, típico de solos argilosos (Bueno e Vilar, 1995).

Figura 25 – Valores das massas específicas dos sólidos das amostras de solos

O valor médio das massas específicas para as amostras dos solos B e E, foi de $2,84 \text{ g/cm}^3$ e $2,77 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. As amostras de solos A, C e D apresentaram, respectivamente, os seguintes resultados $2,54 \text{ g/cm}^3$ e $2,66$

g/cm³. As massas específicas dos solos B e E mostram mais sólidos por volume, ou seja, maior teor de finos em relação aos demais. As amostras de solos com menores valores de massas específicas apresentam maior número de vazios (WINEGARDNER, 1995), tendo, em sua maioria partículas com diâmetros maiores, notadamente, os solos A e C.

5.1.4. Resistividade elétrica dos solos

Os valores de resistividade obtidos para os solos A e B, em períodos de umidade alta (chuvas), mostrados na Figura 26, foram crescentes nas profundidades de 0,5m e de 1,0m. A menor resistividade representa a maior facilidade no transporte de íons pelos seus poros, ou seja, o aumento da corrosividade do solo.

Figura 26 – Valores das resistividades dos solos A e B em períodos de elevada umidade (chuvas).

O solo B apresentou valores de resistividade elétrica maiores nos períodos de elevada umidade que o solo A, com a resistividade aumentando com a profundidade do solo.

Segundo Castro (2008) a resistividade elétrica se relaciona com os tipos de solos – arenoso, siltoso, argiloso. Esta apresenta valores na faixa de

desde 100 Ω .m até superiores a 40.000 Ω .m. No caso deste estudo, o solo A apresentou maior teor de areia e menor resistividade em relação ao solo B.

No entanto, os solos urbanos em estudo, não apresentaram separação nítida entre os tipos de solos, além de conter matérias microbiológicas atreladas à variação na textura, propiciando valores bem distintos de resistividade elétrica. O solo B, um latossolo vermelho formado por processos de intemperismo químico e, com poros mais fechados e de menor índice de vazios em relação ao solo A, é constituído de muitos finos (silte e argilas). Este tipo de solo pode apresentar comportamento peculiar quando em presença de água, com adsorção da mesma nas paredes das partículas finas, reduzindo a porosidade (fechamento parcial dos poros) e, conseqüentemente, a sua agressividade (SERRA, 2014).

Também foram realizados ensaios de resistividade elétrica dos demais solos localizados próximos de estações de alta tensão (Figura 27). As resistividades variaram bastante, com os solos C e D apresentando os maiores valores. De forma análoga aos solos A e B, a resistividade dos solos C e D aumentou com a profundidade o que seria esperado considerando a contribuição dos fatores externos, como presença de vegetação, agentes poluidores, interferência antropogênica, maior facilidade de umidificação e, conseqüentemente, dissolução de íons.

A umidade contribui para diminuição da resistividade e, também, para o aumento da corrosividade do solo. Dessa forma, há tendência de o período de chuvas ser o mais significativo no tocante à corrosividade do solo, segundo o parâmetro da resistividade elétrica. Vale ressaltar que em Palmas, o período chuvoso se estende por até sete meses, ou seja, a maior parte do ano é de alta agressividade dos solos devido à alta umidade.

Figura 27 – Resistividade de todos os solos no período de alta umidade (chuvas)

A ordem de grandeza dos valores obtidos, permite classificar o solo A como solo de baixa corrosividade. (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação da corrosividade do solo em relação à sua resistividade (adaptada) (Bradford, 2002 apud Loureiro et al., 2007).

Resistividade do solo (ohm.m)	Corrosividade
$<10^0$	Muito alta
$10^0 - 10^1$	Alta
$10^1 - 10^2$	Baixa
$>10^2$	Muito baixa

5.1.5.Sondagem dos solos

A sondagem realizada no solo A, na cota de -0,5 m, identificou areia fina com pouca argila, na cor marrom; em um metro de profundidade, houve um aumento na granulometria do solo, passando a ser areia média com pedregulho de quartzo com coloração amarela.

Na profundidade de 2,0 m, continua areia média, na cor amarela, reduzindo a textura na cota de -3,0 m, passando a conter argila arenosa e pouco siltosa, na cor variegada (coloração variada). Nas cotas de -4,0 m e -5,0 m, o

solo apresenta silte com pouca argila, na cor variegada. A sondagem identificou ainda a cota do nível de água na profundidade de -5,45 m, ou seja, próxima da superfície, dada a proximidade desse solo com o lago. A Figura 28 apresenta um corte no solo A, até a profundidade de 1,0 m, sendo observada a variabilidade de textura e coloração desse solo.

Figura 28 – Estratificação do solo A, no campus da UFT.

A sondagem realizada no solo B revelou maior uniformidade na textura dos solos até a cota de -4,0 m, sendo este constituído de argila com pouco teor de areia, na cor vermelha. Foi observada pequena alteração na cota de -5,0 m passando esta a conter argila pouco arenosa com laterita fina, também na cor vermelha. Ou seja, há maior quantidade de finos, diferentemente do comportamento em relação ao solo A. Até a cota apresentada não foi encontrado o nível de água e, considerando a distância em relação ao lago, tem-se que a influência desta seja menos significativa. Na Figura 29, tem-se a trincheira realizada no solo B, em que se pode perceber coloração e textura uniformes.

Figura 29 – Estratificação do solo B, no campus da FACTO.

5.2.CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS

5.2.1.Análise química dos solos

Os solos foram analisados quimicamente e os resultados são apresentados na Tabela 3. Nota-se que, embora os solos sejam de uma mesma cidade, há uma grande variabilidade em suas constituições químicas como o solo A apresentando maior quantidade de Fe ($68,0 \text{ mg/dm}^3$), Cu ($0,90 \text{ mg/dm}^3$), e Zn (11 mg/dm^3), em relação aos demais solos.

A capacidade de troca de cátion, CTC, é umas das propriedades relacionadas com o arranjo espacial das partículas, dados pela natureza física, a estrutura e textura do solo. A matéria orgânica propicia o aumento da CTC do solo urbano, em função de sua alta reatividade, regulando a disposição de vários micronutrientes (EMBRAPA, 2018). Entre os cinco solos, o solo A foi o de menor CTC. Este solo fica localizado próximo de edificações, enquanto os demais, sofrem maior influência de vegetações.

Tabela 3 – Caracterização química dos solos estudados.

	Solo A	Solo B	Solo C	Solo D	Solo E
Elementos	mg/dm ³ (ppm)				
Na	2,6	3,3	-	-	-
Co	0,07	0,06	0,07	0,09	0,08
Zn	3,80	3,00	0,30	0,30	0,40
B	0,14	0,23	0,37	0,33	0,33
Cu	0,90	0,20	0,20	0,20	0,20
Fe	68,00	56,60	24,60	36,70	37,80
Mn	2,10	4,00	2,40	4,00	2,80
Mo	0,08	0,09	0,10	0,09	0,08
K	11,00	9,00	6,00	7,00	10,00
P	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
S	6,76	6,26	5,05	3,57	5,05
CTC	2,06	2,59	2,45	2,43	2,4

5.2.2. Ensaio de pH dos solos

Os valores do pH obtidos por eletrodo imerso em suspensão do solo e CaCl₂, na proporção de 1:2,5 (EMBRAPA, 2018), são mostrados na Tabela 4:

Tabela 4 – Resultados do ensaio de pH dos solos.

Solos	A (UFT)	B (FACTO)	C (EAT-1)	D (EAT-2)	E (EAT-3)
pH	5,0	5,7	5,4	5,0	4,8

É verificado pelos resultados que todos os solos em estudo são levemente ácidos, com valores de pH em torno de 5. Considerando os índices parciais constituídos por parâmetros do solo, como a resistividade; potencial redox; umidade; teor de Cl⁻; SO₄²⁻; S²⁻ e o pH. Valores de pH abaixo de 5 contribuem para classificar o solo em agressivo (SERRA, 2014).

O somatório dos índices parciais de agressividade dos parâmetros do solo supramencionados, resultam em classificação do solo quanto à corrosão (TRABANELLI, 1972 apud SERRA, 2014). Com base nos valores de pH de cada solo, foi observado que os solos A, D e E possuem maior agressividade, e, portanto, são mais corrosivos que os demais em contato com o aço API 5L X70.

5.2.3. Condutividade elétrica das soluções aquosas dos solos

A extração da solução de cada solo permitiu caracterizar a influência das espécies solúveis na corrosividade do meio. Os valores de condutividade elétrica de cada solução de extrato do solo são apresentados na Figura 30. Os valores médios das condutividades elétricas das soluções de solos variaram entre cerca de 75 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 85 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com exceção do solo C, cujo valor foi cerca de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Observando a Tabela 3 nota-se que os elementos em menor teor neste solo em relação aos demais são Fe e K. O que este resultado representa é que os sólidos presentes no solo C foram pouco solúveis no meio aquoso. A comparação da condutividade das soluções dos extratos dos solos A e B não mostrou diferença entre esta propriedade para os dois extratos.

Figura 30 – Valor da condutividade elétrica de cada solução aquosa de solo.

Os resultados das medidas de condutividade elétrica das soluções de solos, quando comparadas com os valores obtidos por Jesus, (2007) apresentam valores da ordem de grandeza de 10^3 menores. Assim, os solos em análise são significativamente menos corrosivos que os utilizados no trabalho de Jesus, 2007.

As soluções dos solos C e D apresentaram o menor e maior, respectivamente, valores de condutividade, tendendo, o solo D apresentar a maior tendência de ser corrosivo. Os demais solos apresentaram valores muito próximos de condutividade e, pouco inferiores aos do solo D.

5.2.4. Medidas de pH soluções aquosas dos solos

O intervalo usual de pH dos solos é de 5,0 a 8,5 (ROBERGE, 2012). Uma vez que no intervalo de pH entre 6,5 e 7,0, o solo é considerado neutro quanto à agressividade (GADALA e ALFANTAZI, 2014). Os solos utilizados neste estudo foram todos levemente ácidos, Figura 31. Os extratos aquosos com menores valores de pH, solos A e E, são também os cujos pHs do solo foram os menores.

Figura 31 – Valor do pH de cada solução aquosa de cada solo.

5.2.5. Potencial redox dos extratos aquosos dos solos

Na Figura 32 estão apresentados os valores médios do potencial redox nos extratos aquosos de cada solo. Os extratos com maiores potenciais

redox foram aqueles de maior acidez (menores pHs), o que sugere que a acidez do solo é um fator determinante na corrosividade dos extratos destes dois solos.

Figura 32 - Valores do potencial redox dos extratos aquosos dos solos.

As medidas de potencial redox dos extratos aquosos dos solos resultaram em valores acima de +200 mV e abaixo de +400 mV. Segundo Trabanelli, 1972, solos com potenciais redox nesta faixa são considerados solos de baixa agressividade.

Quando os valores da Figura 32 são confrontados com os valores da Quadro 1, todos os cinco solos das soluções em estudo apresentam corrosividade fraca.

Quadro 1 - Critério de Starkey e Wight

Potencial redox (mV)	Corrosividade
< 100	severa
100 - 200	moderada
200 - 400	fraca
> 400	não corrosivo

Fonte: STARKEY, W., *apud* Giarola, 2014

5.2.6.Sólidos totais dissolvidos (STD) nos extratos aquosos dos solos

A Figura 33 apresenta os valores médios dos sólidos totais dissolvidos (STD) nos extratos aquosos dos solos.

A solução aquosa do solo B apresentou o maior valor de STD, revelando ser mais reativo, tendo maior quantidade de íons e, para este parâmetro, maior corrosividade.

Quando comparado com os valores de Jesus, 2007, o maior valor, solução de solo B, é próximo do menor valor, 42,5 ppm e cerca de 5 vezes menor que o maior valor, obtido pelo autor. O que revela, por este parâmetro, a maior agressividade daqueles solos trabalhados por Jesus, 2007, em relação aos deste trabalho.

5.2.7.Difratometria de raios-X dos solos

A Figura 34 mostra o difratograma de raios-X do solo A. Foram identificados neste solo o quartzo, caulinita e gibsita, consoante com o tipo de solo obtido na sondagem que indicou solo predominantemente arenoso.

Figura 34 – Difratoograma de raios-X do solo A.

O difratograma de raios X para o solo B mostrou resultados similares aos do solo A, exceto pela presença de hematita em lugar da caulinita, Figura 35.

Figura 35 – Difratoograma de raios-X do solo B.

Os difratogramas dos solos C, D e E são mostrados nas Figuras 36 e 37.

Figura 36 – Difratoograma de raios-X dos solos (a) C, (b) D.

Figura 37 – Difratoograma de raios-X do solo E (a) caulinita e hematita
(b) gibbsita e quartzo

O solo A é composto de quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), e gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Os solos com partículas grosseiras— areias e pedregulhos — são formados, em sua maioria, por silicatos, além de óxidos, carbonatos e sulfatos. Entre os silicatos, tem-se o quartzo, presente em diversas rochas e com boa resistência ao intemperismo. A gibbsita é um mineral argiloso e hidratado,

formado pelo intemperismo químico (PINTO, 2006). Entre os tipos de argilo-minerais tem-se a caulinita, formada pela superposição de lâmina silícica e de alumínio.

A caracterização por difração de raios-X do solo B mostrou a presença de quartzo (SiO_2), normalmente encontrado nos solos grossos, e hematita (Fe_2O_3), óxido responsável em conferir a cor avermelhada característica desse solo, também chamado de latossolo (Figura 38). A caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) foi o argilo-mineral encontrado nos solos finos da região.

Figura 38 - Latossolo de cor avermelhada (Solo B).

Os ensaios de difração de raios-X dos produtos de corrosão no aço API 5L X70, identificaram apenas, a goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e a magnetita, (Fe_3O_4) nos produtos de corrosão. Esta última é aderente, sendo de difícil remoção da superfície do aço.

5.2.8.Caracterização da corrosividade do solo pela determinação das taxas de corrosão

As taxas de corrosão para o aço API 5L X70 foram obtidas nos solos A e B em oito idades distintas, considerando os dois períodos de enterramento.

Na Figura 39 são apresentadas as taxas de corrosão para o aço API 5L X70 em contato com o solo A, em períodos distintos. Foi observado para a primeira idade de ensaio que as amostras de aço tiveram valores de taxa de corrosão entre 1,39 e 1,51 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ (desvio padrão, $\sigma = 0,048$). Já para o período de 320 dias, estes valores variaram entre 1,83 e 1,96 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,053$). Para o período de 500 dias, as taxas de corrosão estiveram na faixa de 2,32 a 2,51 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,078$) e para 730 dias estas variaram desde 3,05 até 3,09 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,015$). Após 820 dias as taxas de corrosão se encontravam entre 3,17 e 3,47 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,127$), e, após 960 dias de exposição as taxas de corrosão medidas estavam entre 3,90 e 4,07 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,076$).

O aumento da taxa de corrosão com o tempo de exposição ao solo A de forma praticamente linear indicar que os produtos de corrosão formados não são protetores, portanto, não causam redução na taxa de corrosão com o tempo de exposição.

Figura 39 - Taxas de corrosão do aço API 5L X70 em função do tempo de exposição ao solo A.

A observação da superfície das amostras de aço após o ensaio de perda de massa mostrou corrosão generalizada sobre toda a superfície, embora tenha ocorrido ataque preferencial em algumas regiões da superfície (indicadas

por setas) Figura 40 (a, b). O ataque preferencial ocorreu particularmente nas bordas das amostras. Este tipo de ataque nas bordas pode ter origem em defeitos introduzidos durante a preparação do material. A Figura 40 mostra a evolução da corrosão com o tempo de contato do aço com o solo A.

Figura 40 - Amostras de aço retirada após período de 660 dias de exposição a Solo A (UFT).

As taxas de corrosão do aço API 5L X70 em contato com o solo B são mostradas na Figura 41. A comparação das taxas de corrosão nos dois solos mostra que o solo B é menos corrosivo que o solo A. No solo B as taxas de corrosão eram inicialmente bem menores do que no solo A, mas estas aumentaram com o tempo. Nas diferentes idades, as taxas de corrosão foram: para 230 dias entre 0,58 e 0,59 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,003$), para 320 dias entre 0,85 a 0,87 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,007$); para 660 dias, entre 1,61 e 1,73 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,051$) e, para 960 dias, na faixa de 2,50 a 2,81 $\text{mg dm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ($\sigma = 0,162$).

Figura 41 - Taxa de corrosão do aço API 5L X70 em função do tempo de exposição ao Solo B (FACTO).

A partir dos resultados de caracterização dos solos A e B, os fatores que podem ter contribuído para a maior corrosividade do solo A são o tipo de solo que é predominantemente arenoso, favorecendo a aeração do meio que circundava as amostras de aço, a menor resistividade do solo A em relação ao B e o pH levemente mais ácido do solo A.

5.2.9. Corrosão do aço API 5L X70 em solos

Em Palmas, a sazonalidade é marcada por um período chuvoso e outro sem chuvas, podendo resultar em variações das taxas de corrosão. O

acesso do oxigênio aos poros de solo predominantemente arenoso, solo A, é mais fácil do que em solo com predominância de argila, solo B. Esta é uma das razões para a maior corrosividade do solo A.

De fato, a observação das superfícies das amostras expostas aos dois solos, A e B, para o mesmo período (660 dias) evidencia de forma clara a maior corrosividade do solo A (Figura 42). A superfície do aço exposta ao solo A apresenta ataque generalizado enquanto a exposta ao solo B mostra uma superfície com poucos pontos de corrosão.

Figura 42 - Amostras de aço retiradas dos solos após período de 660 dias de exposição: (a) Solo A (UFT); (b) Solo B (FACTO).

5.2.10. Caracterização Eletroquímica

A variação do potencial de circuito aberto desde os momentos iniciais de exposição do aço aos vários extratos aquosos até a estabilização do potencial, após 3h, é mostrada na Figura 43. Comportamentos similares são observados em todos os extratos com diminuição de potencial com o tempo de contato do aço com os extratos aquosos dos solos. Estes resultados mostram o ataque corrosivo do meio ao aço seguido por estabilização do potencial. Vale ressaltar que os solos A e B apresentaram potenciais muito próximos após 3h de imersão no meio e a variação de potencial com o tempo também foi muito similar. Apenas dois tipos de extratos, C e D mostraram pequenas diferenças em relação aos demais com potenciais mais nobres no início da exposição e até ao

final das medidas no caso do solo C. Uma característica comum a estes dois tipos de solo é o menor teor de Fe nestes dois solos em relação aos demais.

Figura 43 - Variação do potencial de circuito aberto com o tempo de exposição aos extratos aquosos dos vários solos.

As curvas de polarização anódica para o aço API 5L X70 após 3h de exposição à solução do extrato aquoso de cada solo são dadas na Figura 44. Os resultados mostram que as densidades de corrente de corrosão mais altas foram obtidas no extrato do solo A, embora a diferença de corrente entre os diversos extratos tenha sido pequena. Uma comparação apenas entre os solos A e B mostra que em toda a faixa de polarização, as densidades de corrente do aço no solo B foram levemente inferiores. Com relação aos solos C, D e E, estes foram relacionados com as menores taxas de corrosão para baixas sobretensões.

Figura 44 – Curvas de polarização anódica do aço API 5L X70 nos extratos aquosos dos vários solos.

5.1.1. Observação da superfície por microscopia eletrônica de varredura após polarização anódica

Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície do aço API 5L X70, após polarização anódica nos vários extratos aquosos, mostrou a presença de pites de corrosão nas superfícies expostas com distribuição e densidade que variaram com o tipo de extrato aquoso (Figura 45). Após polarização anódica em extrato aquoso, a observação da superfície dos aços mostrou que a amostra em contato com o extrato aquoso do solo B apresentava maior número de regiões ativas, em relação ao extrato aquoso do solo A, ou seja, maior densidade de pites foi relacionada com o extrato do solo B. Embora os pites formados pelo contato com o solo B apresentem menor dimensão do que os do solo A, estes se distribuíram em maior número em maior proporção da área exposta ao meio corrosivo. É interessante notar que este resultado contradiz o que foi observado no ensaio de enterramento no solo, uma vez que neste caso, o solo A mostrou ser mais corrosivo do que o solo B. Este resultado é importante na medida em que ensaios em laboratório são adotados como parâmetro de caracterização da corrosividade dos solos. Os resultados do

presente trabalho todavia mostraram que estes resultados devem ser considerados de forma crítica.

A Figura 45 também mostrou diferenças entre os solos C, D e E, tanto na morfologia do pite como na densidade e distribuição dos mesmos, sendo o extrato do solo C relacionado com a menor corrosividade entre os extratos usados.

Figura 45 – Micrografias por MEV do aço API 5L X70 após 3h de imersão em extratos aquosos dos solos seguida de polarização em (a) solo A, (b) solo B, (c) solo C (EAT-1), (d) solo D (EAT-2) e (e) solo E (EAT-3)

A nucleação de pites mostrada nas micrografias da Figura 45 geralmente ocorre pela formação de micropilhas entre precipitados e a matriz. Meios de alta resistividade favorecem o ataque apenas nas áreas mais ativas da superfície, no caso, aquelas onde se tem a presença de precipitados ativos eletroquimicamente. Com o aumento da condutividade do meio, várias outras áreas tornam-se ativas o que explicaria o maior número de pites relacionado com o extrato do solo B. Ao se comparar os dois extratos, dos solos A e B, nota-se que o STD na solução do solo B é cerca de duas vezes a do solo A e é superior também à dos demais solos. Este parâmetro representa maior quantidade de sais lixiviados no extrato aquoso do solo B e, conseqüenteente, maior corrosividade do solo B em relação ao A. Estes resultados também apontam para o fato que não se deve classificar a corrosividade de um solo com base em parâmetros apenas de ensaios de laboratório.

Com relação aos solos C, D e E, a observação das superfícies após ensaio indica que a corrosividade dos extratos destes solos aumenta nesta ordem, $C > D > E$.

5.1.2. Análise química dos extratos aquosos do solo após ensaio de polarização

O teor de ferro analisado nos extratos aquosos após ensaio de polarização pelo método de análise por ativação com nêutrons é mostrado na Tabela 5. A maior corrosividade do extrato do solo B em relação ao A, fica evidente nesta tabela pelos valores mais do que três vezes superiores de Fe em extrato do solo B em relação ao solo A. Fica também evidente que os solos C, D e E são muito pouco corrosivos para o aço estudado resultando em valores muito baixos para os três tipos de extrato após polarização, alguns abaixo do limite de detecção da técnica de análise. Os resultados de análise química mostrados na Tabela 5 não permitem diferenciar a corrosividade destes três extratos aquosos.

Tabela 5 - Teor de Fe nos extratos aquosos dos vários solos após polarização anódica do aço, determinado pelo método de ativação com nêutrons.

Amostras das Soluções de Solos	Concentração (microgramas / mililitro)
A (UFT) polarizado	5,2 ± 0,2
B (FACTO) polarizado	18,2 ± 0,3
C (EAT-1) polarizado	0,57 ± 0,09
D (EAT-2) polarizado	< 0,30
E (EAT-3) polarizado	< 030

5.1.3. Discussão geral dos resultados

A caracterização da corrosividade dos solos realizada por ensaio de campo (enterramento de amostras nos solos), ou por ensaio em laboratório, neste último caso por observação da superfície do aço API 5L X70 e análise química da solução após ensaio em dois dos solos caracterizados neste estudo, especificamente os denominados solos A e B, apresentaram resultados contraditórios. Segundo o ensaio de campo de longa duração, a corrosividade do solo A é maior do que a do B. Já os resultados obtidos de ensaios em laboratório com o extrato aquoso, indicaram o oposto, ou seja, a corrosividade do solo B é maior que a do solo A. Isto foi mostrado pela observação das superfícies após ensaio de polarização e pela análise química das soluções após o ensaio de polarização. Isto é explicado pelo fato de o solo ser um meio (eletrólito) muito complexo, cuja corrosividade se deve à sua capacidade de reter água (porosidade, tamanho e forma dos grãos) e pela capacidade de adsorção de espécies corrosivas na superfície metálica exposta ao eletrólito. Além disso, a composição química do solo é muito variável e dependente da região, da interferência do homem no solo, com presença de substâncias orgânicas e inorgânicas, sejam ácidos ou bases (RAMANATHAN, 1988).

No caso deste estudo, a caracterização física e química dos solos mostrou variações entre os solos A e B. O solo A apresenta textura com maior teor de partículas grossas, 77% de partículas arenosas, enquanto o solo B possui maior proporção de partículas finas (silte e argila, 52%), sendo menos poroso (maior massa específica). Estas diferenças nas características destes dois solos

resultam em variações na disponibilidade de oxigênio na superfície dos materiais metálicos neles enterrados. Esta diferença de característica não é considerada em ensaios de laboratório com extratos aquosos. Estes últimos ensaios consideram a composição química do extrato devido à lixiviação de compostos solúveis do solo na água como fator de corrosividade, bem como o efeito desta solubilização em outras propriedades, como a condutividade. Portanto, estes ensaios devem ser complementares a ensaios de caracterização de corrosividade de solos. Para uma classificação efetiva é necessário que sejam considerados fatores de primordial importância para a corrosividade do solo, como as diferenças nos teores de oxigênio disponíveis no solo em contato com o material metálico, a composição química do solo, o pH do meio, entre outros.

Dentre as características dos solos A e B que podem explicar a maior corrosividade do solo A em relação ao solo B, além da maior porosidade do solo A já mencionada, tem-se que este solo apresentou acidez levemente maior do que o solo B, bem como teores maiores de cobre e ferro, ambos elementos que se lixiviados ou removidos para o solo sendo nele dissolvidos podem aumentar localmente o poder oxidante do solo e, portanto, aumentar a corrosividade deste. Vale ressaltar que o potencial redox do extrato aquoso do solo A foi maior que o do solo B, o que corrobora esta hipótese. É importante também salientar que as medidas eletroquímicas realizadas não foram sensíveis para classificar de forma evidente a diferença de corrosividade entre os solos, embora a observação das superfícies ensaiadas e a análise da solução utilizada no ensaio mostraram uma diferenciação clara entre a corrosividade dos extratos aquosos para o aço API 5L X70.

A caracterização dos solos, C, D, E, teve como objetivo investigar solos próximos a torres de alta tensão e selecionar solos com características similares para investigação posterior sobre a influência da proximidade do solo de torres de alta tensão na corrosividade do solo. Os resultados mostraram que as texturas dos solos D e E, são similares à do solo B, ambos com maior teor de finos e, portanto, menor porosidade do que os solos A e C. O solo C, por sua vez, apresentou maior quantidade de partículas arenosas. As umidades dos três solos são próximas, com valores de cerca de 20%. Na profundidade de

enterramento das amostras, todavia, foi observado que as resistividades dos solos C, D e E diminuem nesta ordem, com valores de 626,4 Ω .m, 446,3 Ω .m e 208,1 Ω .m, respectivamente, todos maiores que as resistividades dos solos A e B. É importante salientar que a ordem decrescente de resistividade dos solos foi inversa da corrosividade do extrato destes solos, aumentando na seguinte ordem, C<D<E, ou seja, houve correlação inversa entre resistividade do solo e a corrosividade do extrato do solo, como esperado. Todavia, esta correlação foi apenas identificada pela observação da superfície após ensaio de polarização.

Outra observação que vale salientar é que o solo B, sendo argiloso e, portanto, com maior quantidade de partículas finas em relação ao solo A, resultou em maior concentração de sólidos totais dissolvidos, STD, na solução aquosa do solo em comparação ao solo A. Este é o único parâmetro entre os estudados que explica a maior agressividade do extrato do solo B em relação ao solo A, considerando que outros parâmetros analisados, como condutividade, pH e Eredox, favoreceriam a maior corrosividade do solo A.

Os resultados mostraram que o uso exclusivo de extratos aquosos de solos não deve ser utilizado como critério único para a caracterização de suas corrosividades. Isto se deve ao fato que os extratos aquosos não reproduzem fatores importantes para a corrosividade do solo, principalmente a variação na disponibilidade do oxigênio que ocorre entre solos de granulometria/textura diferentes, como no caso dos solos predominantemente arenosos ou argilosos. Outros parâmetros dos solos como a massa específica, umidade, resistividade elétrica, disposição do material metálico no solo, agentes microbiológicos, sazonalidade, ação antropogênica e animal não são possíveis de ser reproduzidos nos ensaios com extratos aquosos. Também, a variação desses parâmetros com a profundidade, proximidade de lençol freático e, a evolução geológica dos solos, resultam em um meio altamente complexo cuja corrosividade é consequência da interação entre vários destes parâmetros, enquanto a agressividade de extratos aquosos considera apenas o efeito das espécies/compostos dissolvidos no meio aquoso, obviamente com as suas consequências em propriedades como condutividade e pH.

6.CONCLUSÕES

Solos urbanos de cinco regiões de Palmas, Tocantins, foram caracterizados quimicamente e fisicamente. A caracterização física destes solos mostrou que estes são geologicamente muito distintos. Os solos A e C são predominantemente arenosos, enquanto os solos B, D e E são principalmente constituídos por argila. A caracterização química dos solos por difratometria de raios-X mostrou que todos os solos são constituídos por quartzo e gibsita, mas apresentam variações quanto à presença de um terceiro componente, caulinita no caso dos solos A, C, D, e E, e hematita nos solos B e E. A hematita se revela na cor avermelhada do solos B e E.

A corrosividade de dois dos solos estudados foi caracterizada por ensaios de campo e de laboratório. O ensaio de campo consistiu no enterramento de amostras do aço API 5L X70 em dois dos solos escolhidos, remoção destas amostras após períodos pré-determinados de tempo, ensaio gravimétrico para determinação das taxas de corrosão, e observação das superfícies expostas ao solo. Os ensaios em laboratório foram realizados por métodos eletroquímicos (medidas de potencial de circuito aberto e polarização anódica potenciodinâmica) em que o eletrólito consistiu dos extratos aquosos dos cinco solos caracterizados quimicamente e e fisicamente. Estes ensaios foram seguidos pela observação da superfície exposta ao eletrólito. Os ensaios eletroquímicos não se mostraram efetivos na classificação da corrosividade dos diferentes solos uma vez que resultados muito similares foram obtidos para os eletrólitos usados. A observação das superfícies ensaiadas, bem como a análise química do eletrólito após ensaio, todavia, mostrou diferenças significativas na corrosividade dos extratos aquosos.

Os resultados mostraram que a resistividade dos solos usados no ensaio de campo é muito próxima. Todavia, a corrosividade destes solos para o aço API 5L X70 foi claramente diferente. O solo predominantemente arenoso (solo A) mostrou maior corrosividade frente ao solo predominantemente argiloso (solo B) o que foi atribuído à maior porosidade do solo A em comparação ao solo

B. Este resultado foi corroborado pela maior massa específica do solo B em relação ao solo A.

A caracterização da corrosividade dos solos A e B pelo uso de extratos aquosos mostrou classificação oposta à obtida pelo ensaio de campo, ou seja, o extrato aquoso do solo B foi mais agressivo ao aço API 5L X70 do que o extrato do solo A. Este resultado lança severas críticas sobre o uso de ensaios de laboratório de forma exclusiva para a caracterização da corrosividade de solos.

Os resultados deste estudo mostraram que para solos com resistividades elétricas próximas, a porosidade é fator determinante da corrosividade, uma vez que porosidade afeta diretamente a aeração do solo nos locais onde os materiais metálicos estão enterrados e, a disponibilidade de oxigênio, como principal agente oxidante em solos aproximadamente neutros, determina a corrosividade destes.

As observações deste trabalho representam uma contribuição ao campo do conhecimento que investiga a corrosividade dos solos ao mostrar que o uso de extratos aquosos de solo para a caracterização da agressividade destes pode resultar em classificação inversa à observada na prática, ou seja, por exposição real do material a estes solos.

7.SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Caracterizar os solos de outras regiões do Tocantins, tanto quimicamente e fisicamente, como por enterramento de amostras de aço para determinação das taxas de corrosão.

Escolher solos com características físicas e químicas similares e, para estes solos, investigar o efeito da proximidade de torres de alta tensão na corrosividade deste solo.

Avaliar a relação entre tipo de solo, composição do extrato aquoso do solo e a corrosividade do mesmo.

Caracterizar a corrosividade dos solos C, D e E, usados neste trabalho, para o aço API 5L X70.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. **Manual de Sondagens**. Boletim n. 3, 5ª. ed. São Paulo, 2013. (ABGE).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. (NBR 6484).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. (NBR 7181).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Condições exigíveis para abertura de poço de inspeção, de trincheira e para retirada de amostras**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. (NBR 9604).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Solo – determinação do teor de umidade – métodos expeditos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. (NBR 16097).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Peneiras de ensaio – requisitos técnicos e verificação – parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. (NBR 3310-1).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. (NBR 6508).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. (NBR 6457).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. (NBR 7117).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Agregados - terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. (NBR 9935).

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – **API 5L: Specification for Line Pipe**, 44^a ed., Washington, DC – EUA. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS: **Standard Practice for Evaluating the Performance of Release Detection Systems for Underground Storage Tank Systems**. In: Annual Book of ASTM, 1993. (E1526).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS: **Standard Test Method for Measuring pH of Soil for Use in Corrosion Testing**. In: Annual Book of ASTM, 2018. (G51).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS: **Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens**. In: Annual Book of ASTM, 2017. (G1-03).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS: **Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method**. In: Annual Book of ASTM, 2012. (G57-06).

BARBOSA, Luiz Henrique Soares. **Efeito da espessura na tenacidade à fratura e no crescimento de trinca por fadiga em um aço do tipo API 5L-X70**.

134 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2012.

BENMOUSSA, A.; HADJEL, M.; TRAISNEL, M. **Corrosion behavior of API 5L X-60 pipeline steel exposed to near-neutral pH soil simulating solution**, Materials and Corrosion. V. 57, Issue 10, pp, 771-777, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/maco.200503964>>. Acesso em: 15/03/2018

BRAGA, A. C. O. **Métodos da Eletroresistividade e polarização Induzida Aplicados no Estudos da Captação e Contaminação de Água subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática**. 121 f. Tese Livre-docência. Universidade Estadual Paulista. São Paulo. 2006.

BUENO, A.H.S., MOREIRA, E.D., SIQUEIRA, P. et al., **Effect of cathodic potential on hydrogen permeation of API grade steels in modified NS4 solution**, Materials Science & Engineering: A, V. 597, pp. 117-121, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.033>>. Acesso em: 16/04/2018

BUENO, B. S., VILAR, O. M., **Mecânica dos solos**. Escola de Engenharia de São Carlos, volume I, EESC. USP. São Carlos, SP, 1995.

BUENO, A.H.S.; MOREIRA, E.D.; SIQUEIRA, P.; GOMES, J.A.C.P. **Effect of cathodic potential on hydrogen permeation of API grade steels in modified NS4 solution**, Materials Science & Engineering: A, V. 597, pp 117-121, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.033>>. Acesso em: 17/04/2018

BRADFORD, S. A., **Practical handbook of corrosion control in soil**. CAST Publications, Canadá, 2002.

CARVALHEDO, W. R.; LIRA, E. R. **Palmas Ontem e Hoje: do Interior do Cerrado ao Portal da Amazônia**. Observatorium, v. 1. 2009

CASTRO, BRUNO CARRILHO DE **Uso de Resistividade Elétrica Em Investigação Geotécnica: O caso De Palmas-TO**. 298 f. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Brasília, 2018

CASTRO, D. F. **Estudo da corrosão do aço 1020 no solo natural argiloso da região amazônica**. 82 f. Dissertação. Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 2013.

CEGLIAS, Rodrigo Braga. **Análise de tensão residual em tubo de aço API 5L X70**. 111 f. Dissertação. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

CONCIANI, W. et al. **Manual do Sondador**. 117 p. Editora IFB. Brasília, 2013.

COSTA, W. D., **Geologia de Barragens**. 351 p. Oficina de Textos. São Paulo 2012.

CURRIE L.A **Detection and quantification limits: origins and historical overview**. Analytica Chimica Acta, V. 391, p. 127-134, 1999. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00105-1](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00105-1)>. Acesso em: 112/05/2018

DE SOETE, D; GIJBELS R; HOSTE J. **Neutron activation analysis**, London, Wiley-Interscience, 836 p, 1972.

DHAKAL, Y. R., DAHAL, K. P., BHATTARAI, J. **Investigation on the soil corrosivity towards the buried water supply pipelines in Kamerotar town planning area of Bhaktapur, Nepal**. Bibechana. V. 10, p. 82-91, 2013. Disponível em: < DOI: 10.3126/bibechana.v10i0.8454>. Acesso em: 18/04/2018

ELIS, V. R.; MENDONÇA, C. A.; PORSANI, J. L. **O uso de sondagem dipolo-dipolo em estudos hidrográficos e depósitos de resíduos**. Rev. Bras. Geof. Vol. 26 n. 3. São Paulo, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2008000300005>>. Acesso em: 20/01/2018.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. EMBRAPA-CNPS. 573 p. 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 2018.

ERTHAL, C., WERNER, K. S., AVILA, L. B., CASARTELLI, R. O., SILVA, S. N., RODRIGUES, M. R., **Corrosividade dos solos da região carbonífera do Rio Grande do Sul sobre tubulações metálicas enterradas**. UFSCar. V. 1. N 4. 2017. Disponível em: < DOI: 10.5151/chemeng-cobeqic2017-302>. Acesso em: 22/01/2018.

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e Seu Controle**. Ed. Hemus. v. Un. 360p. 1/4. São Paulo. 1988.

FERREIRA, C.A.M.; PONCIANO, J.A.C.; VAITSMAN, D.S.; PÉREZ, D.V., **Evaluation of the corrosivity of the soil through its chemical composition**, Science of The Total Environment. V. 388, pp 250-255, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.062>> Acesso em: 23/02/2018.

FIORI, A.P. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Oficina de Textos. São Paulo, 2015.

FORERO, A. B., NUNEZ, M.M.G, BOTT, I. S. **Analysis of the Corrosion Scales Formed on API 5L X70 and X80 steel Pipe in the Presence of CO₂**. Materials Research. V.17 no.2. 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000182>> Acesso em: 23/08/2018.

GADALA, I. M., ALFANTAZI, A. **Electrochemical behavior of API-X100 pipeline steel in NS4, nearneutral, and mildly alkaline pH simulated soil solutions**, Corrosion Science V. 82, pp. 45-57, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.12.020>> Acesso em: 23/09/2017.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. 376 p. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GIAROLA, J. M. **Avaliação de soluções sintéticas e amostras de solos no processo de corrosão do aço API X65**. 122f. Dissertação. Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei. 2016.

Google Earth Pro. Versão 7.3.2.5487 (64-bit). Disponível em: **www.google.com**. Acesso em: 10 de julho de 2018 19:31:57. 2018

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesconvencionais/>> . Acesso em 20 fev. 2019.

IKECHUKWU, A. S., UGOCHUKWU, N. H., EJIMOFOR, R. A., OBIOMA E., **Correlation between soil properties and external corrosion growth rate of carbono steel**. IJES. V. 3. Issue 10. Pages. 38-47. 2014.

JESUS, S. L., **Estudo dos processos de corrosão de aços API 5L X70 em contato com alguns dos solos do Brasil**. 126f. Tese de Doutorado. IPEN. São Paulo. 2007.

JÚNIOR, J. L. C. S., **Relatório técnico – científico. Avaliação parcial das condições pluviométricas no Estado do Tocantins, durante o período de chuvoso de 2015/2016**. 22 f. UNITINS. Palmas, TO, 2016.

KNAPPETT, J.A.; CRAIG, R.F. **Craig Mecânica dos Solos**. 8. Ed. 418 p. São Paulo: Ltc Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2014.

LI, Y. T. **Corrosion behaviour of steel in beach soil along Bohai Bay**, Corrosion Engineering Science and Technology, V. 44, pp 91-95, 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1179/174327807X234633>> Acesso em: 23/05/2017.

LIU, Z. Y.; LI, X.G.; DU, C. W.; ZHAI, G. L.; CHENG, Y. F., **Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment**, Corrosion Science, V. 50, pp 2251-2257, 2008. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.05.011> > Acesso em: 03/07/2017.

Liu, Z. Y.; Li, X.G.; Du, C. W.; Zhai, G. L.; Cheng, Y. F., **Effect of inclusions on initiation of stress corrosion cracks in X70 pipeline steel in an acidic soil environment**. Corrosion Science, V. 51, pp 895-900, 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.01.007>> Acesso em: 25/09/2017.

LOUREIRO, A.; BRASIL, S.; YOKOYAMA, L.; **Estudo da corrosividade de solo contaminado por substâncias químicas através de ensaios de perda de massa e índice de Steinrath**, Corrosão e Proteção de Materiais. V. 26. pp 114, 2007. Disponível: <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-11642007000400002> Acesso em: 25/09/2017.

MARSHAK, S. **Essentials of Geology**. Illinois, U.S.A., W. W. Norton & Company. First edition. 2016.

MESSIAS, I. A. M., **Monitoramento contínuo do potencial redox e de variáveis complementares em ambiente hipersazonal no pantanal de Barão de Melgaço**. 57 f. Dissertação. UFMT. Cuiabá. 2011.

MOREIRA, C. A. **Aplicação do método eletromagnético transiente em área contaminada sob atenuação natural**. 172f. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

LINS, V. F. C., FERREIRA, M. L. M., SALIBA, P. A. **Corrosion Resistance of API X52 Carbon Steel in Soil Environment.** Journal of Materials Research and Technology. V. 1, p. 161-166, Belo Horizonte 2012. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70028-5](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70028-5) > Acesso em: 25/10/2017

NÓBREGA, C. A., CHANG H. K., BRAGA A. C. O., FERREIRA J., OLIVA., A., PEDE M. A. Z., **Avaliação preliminar da corrosividade de solo com o emprego de resistividade elétrica em uma planta industrial utilizada para armazenamento de derivados de petróleo.** Geociências. V. 22, n. especial., p. 83-93. UNESP. São Paulo, 2003.

OLIVEIRA, A. R. **Corrosão e Tratamento de Superfície.** 104 p. IFPA. Belém, PA, 2012.

OLIVEIRA, J. R., **Aplicação de métodos eletroquímicos para avaliação da corrosividade do solo.** Dissertação. 170 p. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2007.

OSKUIE, A. A.; SHAHRABI, T.; SHAHRABI, A.; SAEBNOORI, E. **Electrochemical impedance spectroscopy analysis of X70 pipeline steel stress corrosion cracking in high pH carbonate solution.** Corrosion Science. 61, pp 111-122, 2012. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.04.024> > Acesso em: 15/11/2017.

PEREIRA, R. F. C., et al. **Corrosion of Galvanized Steel under Different Soil Moisture Contents.** Materials Reserch. Materials Research. V. 3, p. 563-568, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.341714> > Acesso em: 14/11/2017.

PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático.** 8ª ed. LTC. Rio de Janeiro, 2010.

PINHEIRO, Clairon Lima. **Avaliação da corrosividade de solos da região amazônica através de técnicas eletroquímicas de polarização e impedância eletroquímica**. 110 p. Dissertação. UFPA. Belém. 2010.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**, 3ª ed. Oficina de Textos. São Paulo, 355 p. 2006.

PORTO, R. **Avaliação da Influência de Parâmetros de Laminação de Tiras a Quente na Tenacidade de um Aço que atende aos requisitos da Norma API 5L, graus X70 e X80**. 127 f. Dissertação. UFOP. Ouro Preto. 2010.

QUEIROZ, G. A. **Efeito da microbiota de solos da região de Suape na corrosão de aço carbono API 5LX60**. 111 f. Dissertação. Recife, PE. 2011.

RIEDER, E. S., BRUSAMARELLO, V., BIANCHI, A. L., BALBINOT, A. **Investigação dos principais processos de corrosão em estações de energia elétrica do estado do RS**. Revista Matéria. V. 14, n. 3, pp. 1000-1014, 2009. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762009000300012> > Acesso em: 14/08/2016.

ROBERGE, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. 1088 p. 2 edition. McGraw-Hill. 2012.

RODRIGUES, L. M., **Estudo da corrosão do aço para dutos API 5L X56 em solos do RS**. 97 f. Tese. UFRGS. Porto Alegre, RS. 2006.

SANTOS, M.C.; PINHEIRO, C.L.; FILHO, J.C.A.C. **Investigação do processo de corrosão pela polpa de bauxita em mineroduto de aço carbono**, Revista Matéria. V. 20. N. 1 pp. 178-184, 2015. < <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0018> > Acesso em: 14/04/2016.

SERRA, E. T. **Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo**. 182 p. 1 ed. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, J. M. e BRASIL, S. L. **Critério de avaliação da corrosividade de solos baseado na sobretensão de hidrogênio**. Corrosão e Proteção de Materiais. V. 29. N. 1, Lisboa, 2010.

SILVA, S. N., **Estudo da corrosão no solo de aços para dutos protegidos catodicamente**. 83 p. Dissertação. UFRGS. Porto Alegre. 2007.

SING, L. K *et al.*, **The relationship between soil resistivity and corrosion growth in tropical region**. JCSR. V. 16. ISSN 1466-8858. 2013

SOUZA, L.A.P.; SILVA, R.F.; IYOMASA, W.S (1998). **Métodos de investigação**. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. Geologia de engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p.163-196. 1998

TORRICO, I. F. A., **Tenacidade à fratura em Condições Elasto-Plásticas com Corpos de Prova Não Normalizados para Aços API 5L: Análise Numérica e Experimental**. 188 p. Tese. UNICAMP. Campinas SP, 2006.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. MCgraw-Hill do Brasil, USP. São Paulo, p. 3-4, 1977.

WICANDER, R. **Fundamentos de Geologia**. Cengage Learning. São Paulo. 2014.

WINERGARDNER, D. L. **As introduction to soils for environmental professionals**. United States of American. CRC Press LLC., 1995.

WRANGLÉN G., **An introduction to corrosion and protection of metals**. Institut for Metallshkydd, Stockholm, MCB UP Ltd, 1972.

APÊNDICE

Apêndice A - Resultados da composição granulométrica do solo A (UFT).

Material:		Solo A (UFT)		Amostra
Abertura das Peneiras		Ensaio		
Pol/n°	(mm)	massa (g)	%	
			Retida	Acumulada
4	4,750	9,20	0,54	0,54
6	3,350	4,60	0,27	0,81
10	2,000	104,00	6,12	6,93
16	1,180	90,00	5,29	12,22
20	0,850	60,00	3,53	15,75
30	0,600	84,00	4,94	20,69
40	0,425	156,00	9,18	29,87
50	0,300	178,00	10,47	40,34
60	0,250	267,00	15,71	56,05
70	0,212	25,00	1,47	57,52
80	0,180	171,00	10,06	67,58
100	0,150	119,00	7,00	74,58
200	0,075	197,00	11,59	86,16
Fundo		96,00	5,65	91,81
Totais		1560,80	100%	

Apêndice B - Resultados da composição granulométrica do solo B (FACTO).

Material:		Solo B (FACTO)		Amostra
Abertura das Peneiras		Ensaio		
Pol/n°	(mm)	massa (g)	%	
			Retida	Acumulada
4	4,750	4,00	0,54	0,54
6	3,350	34,00	0,27	0,81
10	2,000	73,00	6,12	6,93
16	1,180	114,00	5,29	12,22
20	0,850	54,00	3,53	15,75
30	0,600	82,00	4,94	20,69
40	0,425	179,00	9,18	29,87
50	0,300	217,00	10,47	40,34
60	0,250	269,00	15,71	56,05
70	0,212	3,30	1,47	57,52
80	0,180	173,00	10,06	67,58
100	0,150	112,00	7,00	74,58
200	0,075	202,00	11,59	86,16
Fundo		110,00	5,65	91,81
Totais		1626,30	100%	

Apêndice C – Resultados da composição granulométrica do solo C (EAT-1).

Material:		Solo C (EAT-1)		Amostra
Abertura das Peneiras		massa (g)	Ensaio	
			%	
Pol/n°	(mm)		Retida	Acumulada
4	4,750	14,00	1,27	1,27
6	3,350	33,00	3,00	4,27
10	2,000	93,00	8,45	12,73
16	1,180	148,00	13,45	26,18
20	0,850	66,00	6,00	32,18
30	0,600	81,00	7,36	39,55
40	0,425	113,00	10,27	49,82
50	0,300	91,00	8,27	58,09
60	0,250	101,00	9,18	67,27
70	0,212	17,00	1,55	68,82
80	0,180	52,00	4,73	73,55
100	0,150	51,00	4,64	78,18
200	0,075	132,00	12,00	90,18
Fundo		101,00	9,18	99,36
Totais		1093,00	100%	

Apêndice D – Resultados da composição granulométrica do solo D (EAT-2).

Material:		Solo D (EAT-2)		Amostra
Abertura das Peneiras		massa (g)	Ensaio	
			%	
Pol/n°	(mm)		Retida	Acumulada
4	4,750	50,00	3,13	3,13
6	3,350	83,00	5,19	8,31
10	2,000	200,00	12,50	20,81
16	1,180	198,00	12,38	33,19
20	0,850	71,00	4,44	37,63
30	0,600	79,00	4,94	42,56
40	0,425	113,00	7,06	49,63
50	0,300	99,00	6,19	55,81
60	0,250	253,00	15,81	71,63
70	0,212	0,00	0,00	71,63
80	0,180	88,00	5,50	77,13
100	0,150	115,00	7,19	84,31
200	0,075	168,00	10,50	94,81
Fundo		75,00	4,69	99,50
Totais		1592,00	100%	

Apêndice E – Resultados da composição granulométrica do solo E (EAT-3).

Material:		Solo E (EAT-3)		Amostra
Abertura das Peneiras		Ensaio		
Pol/nº	(mm)	massa (g)	%	
			Retida	Acumulada
4	4,750	73,00	4,29	4,29
6	3,350	173,00	10,18	14,47
10	2,000	268,00	15,76	30,24
16	1,180	201,00	11,82	42,06
20	0,850	70,00	4,12	46,18
30	0,600	73,00	4,29	50,47
40	0,425	8,20	0,48	50,95
50	0,300	78,00	4,59	55,54
60	0,250	243,00	14,29	69,84
70	0,212	0,00	0,00	69,84
80	0,180	26,00	1,53	71,36
100	0,150	108,00	6,35	77,72
200	0,075	218,00	12,82	90,54
Fundo		79,00	4,65	95,19
Totais		1618,20	100%	

Apêndice F – Valores dos teores de umidades dos solos.

	Solo A (UFT)	Solo B (FACTO)	Solo C (EAT-1)	Solo D (EAT-2)	Solo E (EAT-3)
Amostras de solo	Teor de umidade (%)				
1	7,39	19,78	27,29	16,44	18,74
2	7,17	19,93	26,23	16,67	16,71
3	8,16	19,55	27,05	15,93	17,87
4	6,73	19,59	26,58	16,05	13,81
5	7,04	19,58	25,79	16,01	14,50
6	6,43	19,85	25,28	16,23	14,82
média	7,15	19,71	26,37	16,22	16,07
desvio	0,50	0,14	0,64	0,24	1,69

Apêndice G – Valores das massas específicas dos solos.

Amostras de solo	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)			Média	Desvio padrão
A (UFT)	2,50	3,21	1,90	2,54	0,54
B (FACTO)	2,91	2,84	2,79	2,84	0,05
C (EAT-1)	2,60	2,64	2,42	2,55	0,10
D (EAT-2)	2,66	2,54	2,79	2,66	0,10
E (EAT-3)	2,78	2,73	2,81	2,77	0,03

Apêndice H – Valores das resistividades no solo A, nos em períodos seco e úmido, respectivamente.

Resistividade (Ω . m)					
Profundidade (m)	Solo A	Solo B	Solo C (EAT-1)	Solo D (EAT-2)	Solo E (EAT-3)
-0,5	116,6	131,9	626,4	446,3	208,1
-1,0	363,9	452,2	2053,6	697,1	310,9

Apêndice I – Dados da sondagem à percussão SPT – solo A.

Pesquisador:		Alexon Braga Dantas			Furo:		SP 01	
Ensaio:		Sondagem à Percussão SPT			Folha:		01/01	
Local da Pesquisa:		Campus UFT próximo ao bloco I Palmas TO			Data do Laudo:		05/05/18	
Descrições do amostrador:		Diâmetro externo = 2 1/2"			Peso batente= 65 Kg		Diâmetro do Revestimento = 2 1/2"	
		Diâmetro interno = 1 3/8"			Altura da queda = 75 cm		Diâmetro da Haste = 1"	
Profun-	Nº da	Manobra	Penetração			Recuperação	Descrição	
didade	Amostra	(trecho)	15	30	45	(cm)	do Solo	
0,00	0	0,45	4	10	18	23	Areia fina pouca argila, cor marrom	
-1,00	1	1,45	3	5	5	29	Areia média com pedregulho de quartzo, cor	
-2,00	2	2,45	2	2	1	14	Areia média, cor amarela	
-3,00	3	3,45	2	2	4	25	Argila arenosa pouco siltosa, cor variegada	
-4,00	4	4,45	3	3	4	20	Silte pouco argiloso, cor variegada	
-5,00	5	5,45	4	4	5	27	Silte pouco argiloso e pouco arenoso, cor	
Nível d'água :		2,45 m					Início Sondagem:	11h 38min
Data do N.A.:		05/05/18	13h 05 min				Prof. da sondagem:	5,45 m
							Coordenadas:	0°00'00".0 S
							Equip: GPS Garmin	00°00'00".0 W

Apêndice J – Dados da sondagem à percussão SPT – solo B.

Pesquisador:	Alexon Braga Dantas				Furo:	SP 01
Ensaio:	Sondagem à Percussão SPT				Folha:	01/01
Local da Pesquisa:	Campus UFT próximo ao bloco I Palmas TO				Data do Laudo:	05/05/18
Descrições do amostrador:		Diâmetro externo = 2 1/2"	Peso batente= 65 Kg	Diâmetro do Revestimento = 2 1/2"		
		Diâmetro interno = 1 3/8"	Altura da queda = 75 cm	Diâmetro da Haste = 1"		
Profundidade	Nº da Amostra	Manobra (trecho)	Penetração	Recuperação (cm)	Descrição do Solo	
			15 30 45			
0,00	0	0,45	4 10 18	23	Areia fina pouca argila, cor marrom	
-1,00	1	1,45	3 5 5	29	Areia média com pedregulho de quartzo, cor	
-2,00	2	2,45	2 2 1	14	Areia média, cor amarela	
-3,00	3	3,45	2 2 4	25	Argila arenosa pouco siltosa, cor variegada	
-4,00	4	4,45	3 3 4	20	Silte pouco argiloso, cor variegada	
-5,00	5	5,45	4 4 5	27	Silte pouco argiloso e pouco arenoso, cor	
Nível d'água :	2,45 m				Início Sondagem:	11h 38min
Data do N.A.:	05/05/18	13h 05 min			Prof. da sondagem:	5,45 m
					Coordenadas:	0°00'00".0 S
					Equip: GPS Garmin	00°00'00".0 W

Apêndice K – Resultados do ensaio químico dos solos.

	Solo A	Solo B	Solo C	Solo D	Solo E
Elementos	mg/dm ³ (ppm)				
Na	2,6	3,3	-	-	-
Co	0,07	0,06	0,07	0,09	0,08
Zn	3,80	3,00	0,30	0,30	0,40
B	0,14	0,23	0,37	0,33	0,33
Cu	0,90	0,20	0,20	0,20	0,20
Fe	68,00	56,60	24,60	36,70	37,80
Mn	2,10	4,00	2,40	4,00	2,80
Mo	0,08	0,09	0,10	0,09	0,08
K	11,00	9,00	6,00	7,00	10,00
P	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
S	6,76	6,26	5,05	3,57	5,05
CTC	2,06	2,59	2,45	2,43	2,4
Sat. Bases	22,33	34,36	30,61	30,04	33,33

Apêndice L – Dimensões geométricas das hastes metálicas (cm).

	Haste 01	Haste 02	Haste 03	Haste 04	Haste 05
h	99,50	99,50	99,60	99,40	99,50
L	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
e	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25

Apêndice M – Massas das hastes metálicas (g).

	Haste 01	Haste 02	Haste 03	Haste 04	Haste 05
m1	4,975	4,710	4,935	4,795	4,675
m2	4,975	4,710	4,935	4,795	4,675
m3	4,975	4,710	4,935	4,795	4,675
m4	4,975	4,710	4,935	4,795	4,675
m5	4,975	4,710	4,935	4,795	4,675

Apêndice N – Taxas de corrosão das amostras de aço API 5L X70 (Solo A).

Período (dias)	230	320	500	660	730	820	960
Taxas de corrosão (mg.dm ⁻² .dia ⁻¹)	1,47	1,83	2,51	2,70	3,06	3,47	4,06
	1,39	1,96	2,36	2,76	3,09	3,17	3,90
	1,51	1,91	2,33	2,89	3,09	3,39	4,07
desvio padrão	0,05	0,05	0,08	0,08	0,02	0,13	0,08

Apêndice O – Taxas de corrosão das amostras de aço API 5L X70 (Solo B).

Período (dias)	230	320	660	960
Taxas de corrosão (mg dm ⁻² dia ⁻¹)	0,06	0,09	1,66	2,50
	0,06	0,09	1,61	2,79
	0,06	0,09	1,74	2,81
desvio padrão	0,000	0,001	0,051	0,142

Apêndice P – Amostras de aço API 5L X70 (retiradas em 13/12/2016; t = 230 d).

CP 1 (UFT)

CP 2 (UFT)

CP 3 (UFT)

CP 4 (UFT)

CP 5 (UFT)

CP 6 (UFT)

Apêndice Q – Amostras de aço API 5L X70 (retirada em 13/12/2016; t = 230 d).

CP 1 (FACTO)

CP 2 (FACTO)

CP 3 (FACTO)

CP 4 (FACTO)

CP 5 (FACTO)

CP 6 (FACTO)

Apêndice R – Amostras de aço API 5L X70 (retirada em 15/03/2017; t = 320 d).
CP 7 (FACTO)

CP 8 (FACTO)

CP 9 (FACTO)

CP 10 (FACTO)

CP 11 (FACTO)

Apêndice S – Amostras de aço API 5L X70 (retirada em 15/03/2017; t = 320 d).
CP 7 (UFT)

CP 8 (UFT)

CP 9 (UFT)

CP 10 (UFT)

CP 11 (UFT)

CP 12 (UFT)

Apêndice T – Amostras de aço API 5L X70 (retirada em 13/12/2016; 730 d).
CP 13 (UFT)

CP 14 (UFT)

CP 15 (UFT)

CP 16 (UFT)

CP 17 (UFT)

CP 18 (UFT)

Apêndice U – Amostras de aço API 5L X70 (retirada em 15/03/2017; 820 d).
CP 19 (UFT)

CP 20 (UFT)

CP 21 (UFT)

CP 22 (UFT)

CP 23 (UFT)

CP 24 (UFT)

Apêndice V – Hastes metálicas do aço API 5L X70.

V.1 - Haste do aço API 5L X70 (retirada em 10/10/2015; 300 d)

V.2 - Haste do aço API 5L X70 (retirada em 23/04/2016; 500 d)

V.3 – Haste do aço API 5L X70 (retirada em 13/12/2016; 730 d)

V.4 - Haste do aço API 5L X70 (retirada em 15/03/2017; 820 d)

V.5 – Haste do aço API 5L X70 (retirada em 17/12/2018; 1160 d)

Apêndice W – Informações acerca do clima de Palmas.

Pela classificação climática de Koppen, o clima de Palmas é do tipo AW, sendo úmido e com moderada deficiência hídrica no inverno, caracterizado por duas estações bem definidas, chuvosa e seca (JÚNIOR, 2016). Compilando os dados, entre o período de 1993 até 2018, da estação meteorológica INMET número 83033, latitude: - 10,19°; longitude -48,3°; altitude 280 metros acima do nível do mar, tem-se que a precipitação diária máxima foi de 156,5 mm em março de 2010, com os meses entre junho até agosto, tendo baixos índices de precipitação. Na figura 1, são mostrados os dados das precipitações anuais, desde o ano de 2010 até o ano de 2018. Durante o lapso de tempo entre dezembro de 2014 até dezembro de 2018, as amostras metálicas mantiveram contato com os solos A e B e, pela figura 1, nota-se um acréscimo no volume de chuvas, a partir de 2017, em relação a 2015 e 2016, que somaram valores de precipitações próximos e, o aumento continuou no ano de 2018.

Figura 1- Precipitações anuais em Palmas, Tocantins.

Fonte: Estação Meteorológica em Palmas, Tocantins (INMET, 2018)

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
À Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação