



**UNIFACS**

UNIVERSIDADE SALVADOR

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

**UNIFACS UNIVERSIDADE SALVADOR  
MESTRADO EM ENERGIA**

**LÁZARO DIAS MACHADO**

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DOS POTENCIAIS TUBO/SOLO EM GASODUTOS  
ENTERRADOS DE AÇO CARBONO API 5L PROTEGIDOS CATODICAMENTE  
POR CORRENTE IMPRESSA: INFLUÊNCIA DA PROXIMIDADE DO LEITO DE  
ÂNODOS**

Salvador  
2015

**LÁZARO DIAS MACHADO**

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DOS POTENCIAIS TUBO/SOLO EM GASODUTOS  
ENTERRADOS DE AÇO CARBONO API 5L PROTEGIDOS CATODICAMENTE  
POR CORRENTE IMPRESSA: INFLUÊNCIA DA PROXIMIDADE DO LEITO DE  
ÂNODOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação,  
Mestrado em Energia da UNIFACS Universidade  
Salvador, Laureate International Universities, como  
requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Britto Guimarães

Salvador  
2015

## FICHA CATALOGRÁFICA

(Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities)

Machado, Lázaro Dias.

Análise da distribuição dos potenciais tubo/solo em gasodutos enterrados de aço carbono API 5L protegidos catodicamente por corrente impressa: influência da proximidade do leito de ânodos. /Lázaro Machado Dias. – Salvador, 2015.

121 f: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Salvador – UNIFACS.  
Mestrado em Energia, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Britto Guimarães

1. Gasodutos - Corrosão. 2. Proteção catódica. 3. Duto terrestre.  
4. Leito de ânodos. 5. Solo. 6. Bactérias redutoras de sulfato. I. Título.

CDD: 665.744

## TERMO DE APROVAÇÃO

LÁZARO DIAS MACHADO

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DOS POTENCIAIS TUBO/SOLO EM GASODUTOS ENTERRADOS DE AÇO CARBONO API 5L PROTEGIDOS CATODICAMENTE POR CORRENTE IMPRESSA: INFLUÊNCIA DA PROXIMIDADE DO LEITO DE ÂNODOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Regulação da Indústria de Energia, Mestrado em Energia da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, à seguinte banca examinadora.

Paulo Roberto Britto Guimarães – Orientador \_\_\_\_\_  
Doutor em Engenharia Química, University of Leeds, LEEDS, Inglaterra  
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities

Luiz Antônio Magalhães Pontes \_\_\_\_\_  
Doutor em Engenharia Química, Unicamp, Brasil  
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities

Leonardo Sena Gomes Teixeira \_\_\_\_\_  
Doutor em Química, Universidade Federal da Bahia, UFBA, Brasil  
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Heraldo Peixoto da Silva \_\_\_\_\_  
Doutor em Engenharia Rural, Universidad Politécnica de Madrid, UPM, Madrid, Espanha  
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Salvador, 30 de outubro de 2015.

A meus pais, José Pedro Machado e Lúcia Maria Dias Santos Machado (*in memoriam*), pelo exemplo de vida, pelo incentivo e amor incondicional que me dispensaram enquanto viveram.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, meu Senhor, em quem confio integralmente, por me orientar nas decisões, por me sustentar na dificuldade e por atender tempestivamente às minhas orações;

Ao ilustre Professor Dr. Paulo Guimarães, por acreditar desde o início e pela confiança e paciência para comigo durante o trabalho;

À minha querida esposa, Rosimeire Machado, pela paciência e orientações sobre o trabalho;

Aos meus amores, filhos queridos, Pedro, Matheus e Gustavo, pelo carinho, paciência e amor;

Ao meu irmão Paulo Sávio, pelo apoio especial;

Às minhas queridas tias Mariú Santos e Doroty Dias, por se dedicarem a mim ao longo das suas vidas especialmente após o falecimento dos meus pais;

Ao amigo Josafá Nascimento Moura, pela oportunidade, atenção e empenho na realização deste trabalho, por contribuir com seus conhecimentos e cuja amizade ilumina meu caminho;

Ao ilustre Professor Heraldo Peixoto, pela dedicação extrema e apoio nos experimentos;

Aos grandes profissionais Ramon Santos, Rayelliton Galizza e Ney Argolo, pelo apoio incondicional nos experimentos;

Aos amigos e colegas de trabalho Gustavo Feitas, José Sílvio, Denise Cabral, Priscilla Mara, Renata Santana e Márcia Oliva por acreditarem em mim e por se alegrarem com a realização do meu sonho;

Pela impossibilidade de citar a todos, agradeço àqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho visa analisar as configurações do sistema de proteção catódica da malha de gasodutos da BAHIAGÁS, pela sua grande importância, a qual decorre da instalação de gasodutos de aço carbono próximo a áreas urbanas. Nesse sentido, têm ocorrido dificuldades no momento de sua construção, as quais são decorrentes das interferências ao longo da sua diretriz e na escolha de um local seguro para a instalação do leito de ânodos, devido à observância dos distanciamentos entre esse e o duto protegido para atender à prática recomendada pelos profissionais de proteção catódica no Brasil. Diante dessas dificuldades, alinhadas à necessidade imperiosa de redução de custo de instalação de proteção catódica, esta pesquisa propõe a análise da influência da proximidade entre os gasodutos terrestres de aço carbono e o leito de ânodos, considerando-se as características físicas, químicas e microbiológicas do solo. Aplicou-se metodologia sistematizada na identificação do nível de proteção catódica nos retificadores, próximo ao leito de ânodos e ao longo da diretriz dos gasodutos, objeto das análises e foram utilizados os seguintes equipamentos: milivoltímetro de elevada precisão, sistema de GPS e antena receptora, 2 (dois) eletrodos de referência de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , 2 (dois) bastões em fibra de vidro para extensão dos eletrodos, carretel acoplável à cintura com hodômetro e bobina de cobre nu com extensão de 2 km, instalação de uma chave desligadora automática “ON” e “OFF”, sincronizada via satélite, para desligar e ligar, em frações de segundo, antes que houvesse a despolarização. Mediu-se a resistividade do solo e procedeu-se à caracterização física, química e microbiológica do solo por meio de amostras coletadas no perfil de 0 até 1,6 m, a intervalos de 20 cm, por escavação e tradagem para qual se utilizou um trado holandês com caçamba de 20 cm de altura, 6 cm de diâmetro e volume de  $560 \text{ cm}^3$ . Essas amostras foram encaminhadas aos laboratórios da Embrapa e da UFRB para análise de condutividade elétrica, textura, densidade, granulometria, matéria orgânica, pH, cátions, ânions,  $V = \text{soma de bases}$ , CTC = Capacidade de troca catiônica. Como resultado, a análise do nível de influência da proximidade do leito de ânodos de um duto enterrado sobre a distribuição dos potenciais tubo/solo mostrou haver bastante uniformidade apesar das variáveis envolvidas, considerando-se as variáveis do solo como eletrólito. As distâncias perpendiculares entre o primeiro ânodo e o duto, consideradas nesta pesquisa, foram: 58 m na faixa do Gasoduto Polo I, 17 m na faixa do Gasoduto Tronco Feira – trecho Santo Amaro e 28 m na faixa do Gasoduto Candeias. Os resultados não confirmam a recomendação da orientação adotada pelos profissionais de proteção catódica do Brasil, de 100 m, embora exista a possibilidade de se flexibilizar essa distância para viabilizar a expansão segura da malha de gasodutos nos espaços urbanizados com custos reduzidos e viabilidade de instalação de proteção catódica, sem estar condicionada à distância de 100 m, a qual é, muitas vezes, inviável.

**Palavras-chave:** Corrosão. Proteção catódica. Duto terrestre. Leito de ânodos. Solo. Bactérias redutoras de sulfato.

## ABSTRACT

This work aims at analyzing the settings of the cathodic protection system of the Bahiagás pipeline system, for its great importance, due to the installation of carbon steel pipelines near urban areas. In this sense, there have been difficulties during its construction due to interference, in its guideline and in the choice of a safe location for installing the anode bed, related to the observance of the distances between the latter and the protected duct, in order to meet a practice that is recommended by cathodic protection professionals in Brazil. Given such difficulty, together with the vehement need to reduce the cost of cathodic protection installation, this research proposes the analysis of the influence of the proximity of the carbon steel land pipelines and the anode bed, taking into account the physical, chemical and microbiological characteristics of the soil. We have applied systematic methodology in identifying the cathodic protection level in rectifiers, near the anode bed and along the route of the pipeline, the object of analysis, with the following equipment was used: high precision millivoltmeter, GPS system, and receiving antenna, 02 (two) Cu/CuSO<sub>4</sub> reference electrodes, 02 (two) fiberglass rods for the extension of the electrodes, waist-attachable spool with odometer and bare copper coil with a 2-kilometer length, installation of an automatic ON/OFF key, synchronized via satellite, to turn on and off, within a fraction of second, before the occurrence of depolarization. We measured the soil resistivity and proceeded to the physical, chemical and microbiological classification of the soil, through samples collected at 0 to 1.6m profile, at intervals of 20 cm, through excavation, borehole, using a Dutch auger, whose bucket had the following features: 20-cm height, 6-cm diameter and 560-cm<sup>3</sup> volume. These samples were sent to the laboratories of Embrapa and UFRB for the analysis of electrical conductivity, texture, density, grain size, pH organic matter, cations, anions, V = sum of bases, CEC = cation exchange capacity. As a result, the analysis of the level of influence of the proximity of the anode bed to a buried pipeline for the distribution of potential pipe-soil, considering soil variables, such as electrolyte, shows that, despite the variables involved, there is a reasonable amount of uniformity. The perpendicular distance between the first anode and the pipeline, analysed in this study, were: 58m in the range of Polo I Pipeline, 17m in the range of Tronco-Feira Santo Amaro Pipeline, and 28m in the range of Candeias Pipeline. The results do not support the recommendation given by the Brazilian Cathodic protection professionals, which is 100m, indicating possible flexibility to enable the safe expansion of the gas pipeline network in urban areas, with lower costs and higher feasibility of cathodic protection installation, not being restricted to a 100-m distance, which is often not feasible.

**Keywords:** Corrosion. Cathodic protection. Land pipeline. Anode bed. Soil. Sulfate-reducing bacteria.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES<sup>1</sup>

Figura 1 – Perfil de um solo em que se mostram os principais horizontes .....	24
Figura 2 – Pilha causada pela variação de resistividade elétrica do solo .....	28
Figura 3 – Pilha de corrosão causada pelas variações das resistividades elétricas do solo .....	28
Figura 4 – Representação esquemática da corrosão do aço em solo neutro aerado .....	29
Figura 5 – Ciclo dos metais .....	35
Figura 6 - Esquema de pilha eletroquímica .....	36
Figura 7 – Macropilha de corrosão em tubo enterrado.....	37
Figura 8 – Fatores que influenciam o mecanismo da corrosão .....	38
Figura 9 – Como a corrosão se apresenta .....	40
Figura 10 – Processo envolvido na formação e crescimento de biofilmes.....	42
Figura 11 - Interação entre as bactérias produtoras de ácidos e as BRS na biocorrosão.....	45
Figura 12 – Esquema simplificado de um sistema de proteção catódica galvânica .....	48
Figura 13 – Esquema simplificado de um sistema de proteção catódica por corrente impressa .....	51
Figura 14 – Medição de potencial em relação ao solo, de qualquer material metálico.....	52
(potencial estrutura/solo) .....	52
Figura 15 – Elevação do potencial, no campo negativo, para eliminar as pilhas de corrosão ..	54
Figura 16 – Variação do potencial com a distância entre o tubo e o solo .....	55
Figura 17 – Eletrodo metálico esférico de raio $r_0$ imerso em um meio infinito de resistividade $\rho$ .....	56
Figura 18 – Variações de potencial e sua influência sobre o duto .....	57
Figura 19 – Concepção da zona de estudo das faixas de gasoduto .....	58
Figura 20 - Medição de resistividade do solo (com 4 bornes) e tensão presentes no terreno ..	59
Figura 21 – Terrômetro utilizado no experimento.....	61
Figura 22 - Modelo de milivoltímetro digital utilizado no experimento .....	63
Figura 23 – Equipamento completo para medição combinada CIPS/DCVG passo a passo ....	64
Figura 24 – Bobina de cobre na mochila.....	65
Figura 25 – Bastões com os eletrodos de referência .....	65
Figura 26 – Mochila com GPS em destaque . .....	65

---

<sup>1</sup> As fotos usadas no desenvolvimento da dissertação foram cedidas ao autor e devidamente autorizadas pelas pessoas fotografadas, com a finalidade específica de ilustrar o conteúdo da pesquisa realizada (Termo autorização – Apêndice A).

Figura 27 – Destaque do GPS.....	65
Figura 28 – Representa as amostras de solo em laboratório, leitura de pH.....	70
Figura 29 – Representa as amostras de solo em laboratório, secagem.....	70
Figura 30 - Análise de solo granulometria, textura, condutividade elétrica no laboratório de física do solo da Universidade Federal do Recôncavo (UFRB).....	71
Figura 31 - Análise de solo, granulometria, textura, condutividade elétrica no laboratório de física do solo da Universidade Federal do Recôncavo (UFRB) em outra etapa .....	71
Figura 32 - Uso do pipe locator na faixa .....	72
Figura 33 – Piqueteamento (a cada 50m) .....	72
Figura 34 – Anotação dos dados do retificador.....	73
Figura 35 – Início do teste da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo .....	74
Figura 36 – Leitura no milivoltímetro .....	74
Figura 37 – Registro da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo .....	75
Figura 38 – Verificação do leito de ânodos.....	75
Figura 39 – Modelo esquemático de coletas de solo.....	76
Figura 40 – Coleta na vala 2 na faixa do Gasoduto Polo I.....	76
Figura 41 - Medição dos níveis de profundidade para coleta das amostras .....	77
Figura 42 – Coleta na vala do primeiro ânodo na faixa do Gasoduto Polo I .....	77
Figura 43 - Leitura do milivoltímetro.....	79
Figura 44 – Modelo esquemático de coletas de solo no Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro.....	79
Figura 45 - Escavação na vala 3 na faixa do Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro .	80
Figura 46 – Coleta de amostras de solo na vala 3 na faixa do Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro.....	80
Figura 47 - A estação que inicia o Gasoduto Candeias .....	81
Figura 48 – Modelo esquemático de coletas de solo na faixa do Gasoduto Candeias .....	82
Figura 49 – Tradagem na vala 1 na faixa do Gasoduto Candeias .....	83
Figura 50 – Medição da profundidade para coleta de amostras de solo.....	83
Figura 51 – Mapa de relevo característico da faixa de servidão do Gasoduto Polo I .....	84
Figura 52 – Mapa hipsométrico característico da faixa de servidão do Gasoduto Polo I.....	85
Figura 53 – Declividades ocorrentes na faixa de servidão do Gasoduto Polo I.....	85
Figura 54 – Mapa temático de solo ocorrente na faixa de servidão do Gasoduto Polo I.....	86
Figura 55 – Gráfico do potencial tubo/solo (mV) versus distância (m) .....	87
Figura 56 – Relevo característico da faixa de servidão do gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro.....	93

Figura 57 - Mapa hipsométrico característico da faixa de servidão do Gasoduto Tronco - Feira,.....	94
trecho Santo Amaro.....	94
Figura 58 – Declividade ocorrente na faixa de servidão do Gasoduto Tronco - Feira, trecho Santo Amaro.....	94
Figura 59 - Mapa temático de solo ocorrente na faixa de servidão do gasoduto Tronco - Feira, .....	95
trecho Santo Amaro.....	95
Figura 60 - Gráfico do potencial tubo/solo (mV) versus distância (m).....	97
Figura 61 – Relevo característico da faixa de servidão do Gasoduto Candeias.....	102
Figura 62 – Mapa hipsométrico característico da faixa de servidão do Gasoduto Candeias .	102
Figura 63 - Declividades ocorrentes na faixa de servidão do Gasoduto Candeias.....	103
Figura 64 – Mapa Temático de solo ocorrente na faixa de servidão do Gasoduto Candeias .	104
Figura 65 – Gráfico de potencial tubo/solo (mV) versus distância (m) .....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações típicas dos ânodos inertes .....	50
Tabela 2 – Potenciais típicos normalmente observados em solos neutros e água, medidos em relação ao eletrodo de Cu/CuSO <sub>4</sub> .....	53
Tabela 3 - Dados técnicos do terrômetro utilizado no experimento.....	60
Tabela 4 – Análises de variáveis no perfil do solo da superfície até a profundidade do Gasoduto Polo I.....	89
Tabela 5 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo no leito .....	90
de ânodos .....	90
Tabela 6 - Resultado de análises de caracterização física do perfil do solo onde o duto está confinado .....	92
Tabela 7 - Resultado de análises de caracterização física do perfil do solo no leito de ânodos .....	92
Tabela 8 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo onde o duto está confinado .....	99
Tabela 9 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo no leito de ânodos .....	99
Tabela 10 - Resultados de análises de laboratório para caracterização física do perfil do solo onde o duto está confinado .....	100
Tabela 11 - Resultados de análises de laboratório para caracterização física do perfil do solo no leito de ânodos .....	101
Tabela 12 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo onde o duto está confinado .....	108
Tabela 13 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo no .....	109
leito de ânodos .....	109
Tabela 14 - Resultados das análises de laboratório para caracterização granulométrica do solo na .....	109
diretriz do gasoduto .....	109
Tabela 15 - Resultados das análises de laboratório para caracterização granulométrica do solo no leito de ânodos .....	110

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
BOE	Bactérias Oxidantes de Enxofre
BPA	Bactérias Produtoras de Ácido
BPE	Bactérias Produtoras de Exopolissacarídeos
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CE	Carbono Equivalente
CIPS	<i>Close Interval Potential Survey</i>
CMI	Corrosão Microbiologicamente Induzida
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DCVG	<i>Direct Current Voltage Gradient</i>
ECS	Eletrodo Calomelano Saturado
EDTA	<i>Ethylenediamine tetraacetic acid</i>
GN	Gás Natural
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
MO	Matéria Orgânica
PCM	<i>Pipeline Current Mapper</i>
PCPE	Plano de Controle de Processos Erosivos
PTE	Ponto de Teste Eletrolítico
SPC	Sistema de Proteção Catódica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
UFRB	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>20</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>21</b>
<b>4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
5.1 SOLO.....	23
5.1.1 Origem e natureza dos solos .....	23
5.1.2 Corrosividade dos solos.....	27
5.2 SISTEMA DE TRANSPORTE POR DUTOS .....	29
5.2.1 Aços para dutos.....	30
5.2.1.1 Composição dos aços .....	30
5.2.1.3 Norma API 5 L.....	33
5.2.2 Corrosão em dutos e os métodos de combate à corrosão .....	34
5.2.2.1 Causas da corrosão em metais enterrados .....	36
5.2.2.2 Formas de corrosão .....	39
5.2.2.3 Fatores que influenciam o processo corrosivo .....	40
5.2.3 Biofilme.....	41
5.2.3.1 Corrosão induzida microbiologicamente.....	43
5.2.3.2 Bactérias redutoras de sulfato .....	44
5.2.3.3 Métodos de proteção contra a corrosão.....	46
<b>6 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>56</b>
6.1 DEFINIÇÃO DA ESCOLHA DAS ZONAS DE ESTUDO .....	56
6.2 CONCEPÇÃO DA PESQUISA .....	58
6.3 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO .....	59
6.4 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO RELEVO NAS FAIXAS DE GASODUTOS .....	61
6.5 MEDIÇÃO DE POTENCIAL TUBO/SOLO ATRAVÉS DA INSPEÇÃO COMBINADA CIPS/DCVG PASSO A PASSO .....	62

6.6 PROCEDIMENTOS DE COLETAS E ANÁLISES DOS SOLOS .....	65
6.6.1 Procedimento analítico para geração dos dados de caracterização física e química dos solos .....	66
6.6.1.1 Descrição da marcha analítica de caracterização química e física .....	66
6.6.1.1.1 pH em água .....	66
6.6.1.1.1.1 Princípio .....	66
6.6.1.1.1.2 Procedimento .....	67
6.6.1.1.2 Determinação de cálcio, magnésio e alumínio .....	67
6.6.1.1.2.1 Princípio .....	67
6.6.1.1.2.2 Extração.....	67
6.6.1.1.3 Matéria orgânica.....	68
6.6.1.1.3.1 Princípio .....	68
6.6.1.1.3.2 Extração.....	68
6.6.1.1.3.3 Determinação .....	68
6.6.1.1.4 Acidez potencial (Hidrogênio + Alumínio).....	68
6.6.1.1.4.1 Princípio .....	68
6.6.1.1.4.2 Extração.....	69
6.6.1.1.4.3 Determinação .....	69
6.6.1.1.5 Extração de fósforo, potássio, sódio e micronutrientes .....	69
6.6.1.1.5.1 Princípio .....	69
6.6.1.1.5.2 Extração.....	69
6.7 ESTUDOS DE CASO .....	72
6.7.1 Gasoduto Polo I.....	72
6.7.2 Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro .....	78
6.7.3 Gasoduto Candeias .....	81
7 ANÁLISES E RESULTADOS .....	84
7.1 GASODUTO POLO I .....	84
7.1.1 Análise e resultados sobre a identificação e caracterização do solo .....	84
7.1.2 Análise e resultados sobre a medição de resistividade do solo .....	86
7.1.3 Análise e resultados sobre a medição de potencial tubo/solo pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo.....	87
7.1.4 Análise e resultados sobre as amostras de solo .....	88
7.2 GASODUTO TRONCO – FEIRA, TRECHO SANTO AMARO .....	93
7.2.1 Análise e resultados sobre a identificação e caracterização do solo .....	93

<b>7.2.2</b>	<b>Análise e resultados sobre a medição de resistividade do solo .....</b>	<b>95</b>
<b>7.2.3</b>	<b>Análise sobre a medição de potencial tubo/solo pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo .....</b>	<b>96</b>
<b>7.2.4</b>	<b>Análise e resultados sobre as amostras de solo .....</b>	<b>98</b>
<b>7.3</b>	<b>GASODUTO CANDEIAS .....</b>	<b>101</b>
<b>7.3.1</b>	<b>Análise e resultados sobre a identificação e caracterização do solo .....</b>	<b>101</b>
<b>7.3.2</b>	<b>Análise e resultado sobre a medição de resistividade do solo.....</b>	<b>105</b>
<b>7.3.3</b>	<b>Análise e resultados sobre a medição de potencial tubo/solo pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo.....</b>	<b>105</b>
<b>7.3.4</b>	<b>Análise e resultados sobre as amostras do solo.....</b>	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>111</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>115</b>
	<b>APÊNDICE A - Termo de autorização de cessão de imagem .....</b>	<b>121</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este estudo visa discorrer sobre a influência da proximidade do leito de ânodos com o duto terrestre protegido catodicamente, por corrente impressa, na distribuição dos potenciais tubo/solo. Como procedimento metodológico, foi necessário estudar algumas configurações de proteção catódica em que a distância entre o duto e o primeiro ânodo do leito de ânodos fosse menor que 100 m, realizar as medições de potencial tubo/solo pelo método de inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo e analisar as variáveis do solo, sobretudo as suas características físicas, químicas e microbiológicas.

Em escala mundial, existe densa e crescente rede de tubulações de aço enterradas para transportar diversos produtos como gás natural, produtos químicos e combustíveis em geral. Para isso, é fundamental compreender a complexidade do solo, as dinâmicas eletrolíticas, a partir das suas propriedades e características; esses fatores são importantes no processo corrosivo do solo e na instalação de pilhas porque esse conhecimento contribui para a tomada de decisões relativa à escolha e monitoramento dos materiais envolvidos, como também para estabelecer medidas mitigatórias que evitem perdas de produto e danos ao meio ambiente e todos os riscos a esses inerentes.

O Brasil é um país que apresenta grande diversidade de solos, de clima e sazonalidade. Em decorrência do desenvolvimento de tecnologias e do crescimento populacional, será necessário ampliar a malha de gasodutos, o que requer conhecimento sobre os tipos de solo e clima. Em termos regionais, isso é muito importante e estratégico para segurança, integridade, vida útil dos tubos de conduto de gás, prevenção de riscos, desastres, acidentes e proteção ambiental.

Por isso, os dados geomorfológicos são muito importantes para o planejamento ambiental de diferentes áreas. A visão integrada dos diversos elementos da natureza e da sociedade permite conhecer e compreender detalhadamente os tipos e formas de relevo; a água, a hipsometria, a declividade, entre outros, quando se quer usar e/ou ocupar o solo, considerando-se que esses dados influenciam o uso do solo e regulam a ocorrência de processos erosivos que afetam faixas de servidão de gasodutos a serem considerados no Plano de Controle de Processos Erosivos (PCPE).

De maneira geral, a inspeção de gasodutos enterrados torna-se cara se se utilizar a escavação, mas existem formas de se realizarem diagnósticos seguros e economicamente

viáveis antes que ocorram avarias no gasoduto por meio da análise de valores de pH do solo, resistividade do solo e dos potenciais tubo/solo para diagnosticar processos corrosivos, sem a necessidade de escavação em gasodutos em operação. Diante da necessidade de proteger o duto terrestre contra a corrosão é fundamental estudar a corrosividade do solo.

Nesse sentido, Charret (2010) afirma veementemente que a verificação inicial da natureza do solo é necessária para determinar a sua ação corrosiva porque revela suas características física, química e microbiológica e as condições em que as ações corrosivas sobre as estruturas enterradas podem ser determinadas.

No solo existem comunidades microbianas muito diversificadas, de forma qualitativa e quantitativa, destacando-se a capacidade dos microrganismos de se desenvolverem a partir de variadas fontes nutricionais e em condições ambientais inóspitas para uma grande quantidade das formas vivas. Muitas vezes, nesses ambientes, os microrganismos ocorrem no estado sésil (células aderidas a superfícies sólidas), o que resulta na formação de ecossistemas microbianos de diferentes níveis de complexidade e compõem estruturas dinâmicas denominadas biofilme (VIDELA, 2003).

Nas instalações terrestres, um das características mais influentes na dinâmica corrosividade no solo é a sua resistividade elétrica, a qual pode ser medida por intermédio de um terrômetro digital, pelo Método de Wenner ou Método dos Quatros Pinos, em todos os locais onde existam tubulações metálicas enterradas. Quanto mais baixas forem as resistividades elétricas medidas, mais facilmente funcionarão as micropilhas e macropilhas de corrosão sempre presentes nas superfícies enterradas do aço, devido à variação da composição química, presença de inclusões não metálicas e tensões internas diferentes, causadas pelos processos de fabricação, conformação e soldagem dos tubos. Dessa maneira, podemos classificar a agressividade dos solos, sob o ponto de vista da resistividade elétrica medida, da seguinte forma: resistividade elétrica [ $\Omega$ .cm] - até 10.000  $\Omega$ .cm; entre 10.000 a 50.000  $\Omega$ .cm e acima de 50.000  $\Omega$ .cm - possuem respectivamente agressividades - alta, média e baixa (GOMES, 2013).

Segundo o Laboratório de Pesquisa em Corrosão (Lapec) da Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul (UFRRS) (Lapec, 2015), dentre as mais importantes propriedades do solo, a topografia é a que mais influencia a proteção catódica.

Veiga et al., (2012) definem “topografia” como a derivação das palavras gregas “topos” (lugar) e “graphen” (descrever), o que significa a descrição minuciosa de um lugar e a

representação do relevo do solo por meio de curvas de nível, com suas elevações e depressões.

Quando se trata de potenciais tubo/solo, corresponde à diferença de potencial entre uma tubulação enterrada e um eletrodo de referência em contato com o solo. Essas medições são feitas usando-se voltímetros, normalmente eletrônicos, de alta sensibilidade e alta impedância, complementados por uma meia-célula ou eletrodo de referência de  $\text{Cu/CuSO}_4$ .

No entendimento de Gomes (2013), os valores dos potenciais tubo/solo podem ser interpretados considerando-se critérios de valores da ordem  $-0,50\text{V}$  a  $-0,60\text{V}$ , fixos e sem flutuações, os quais refletem os potenciais naturais de corrosão do aço enterrado. Valores iguais ou mais negativos que  $-0,70\text{V}$  indicam que as tubulações são receptoras de corrente de uma fonte externa de corrente contínua, oriunda de um sistema de proteção catódica ou de um sistema de aterramento elétrico construído com ânodos galvânicos de zinco, potenciais flutuantes, com a ocorrência de valores positivos ou menos negativos que  $-0,20\text{V}$ , direcionando para uma ocorrência de correntes de fuga, com corrosão eletrolítica grave, forçada, causada pela influência de uma ou mais fontes externas de corrente contínua, tais como proximidade com estrada de ferro eletrificada (trem ou metrô), operação de máquinas de solda ou proximidade com um sistema de proteção catódica de outra instalação. Potenciais iguais ou mais negativos que  $-0,85\text{V}$  significam que as estruturas metálicas que operam nessas condições estão protegidas catodicamente e, portanto, livres de qualquer tipo de corrosão.

Atrelada ao monitoramento contínuo dos potenciais tubo/solo, existe a necessidade de uma tubulação enterrada ter excelente revestimento para uma média de 20 anos de vida útil, mas sabe-se que independentemente do revestimento, esse possui falhas, envelhece com o tempo e propicia condição adequada para a corrosão localizada na tubulação. A intensidade da corrosão depende de diversos fatores, como das características do solo, dos valores de potenciais tubo/solo, das correntes eletrolíticas e induzidas, e das interferências eletromagnéticas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da proximidade do leito de ânodos com o duto enterrado protegido catodicamente por corrente impressa, na distribuição dos potenciais tubo/solo, considerando as características físicas, químicas e microbiológicas do solo.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Selecionar três sistemas de proteção catódica existentes com a distância entre o primeiro ânodo do leito de ânodos com o duto terrestre protegido bem menor que 100 m;
- b) Efetuar a exata localização do leito de ânodos;
- c) Elaborar os mapas de relevo característico da faixa dos gasodutos;
- d) Elaborar os mapas hipsométricos característicos da faixa de gasodutos;
- e) Elaborar mapas de declividade ocorrentes do solo;
- f) Elaborar os mapas temáticos ocorrentes do solo;
- g) Determinar as características físicas, químicas e microbiológicas de solo, por meio de coletas de amostras de solo;
- h) Elaborar a curva de polarização;
- i) Analisar os gráficos de potenciais “ON e “OFF”

### **3 JUSTIFICATIVA**

No Brasil, no caso das áreas urbanas e industriais, existe uma limitação para atender à prática corrente, a qual recomenda instalar o leito de ânodos a partir de 100 m de distância do duto e a 100 m de profundidade em relação ao nível do solo, o que dificulta significativamente a construção e eleva o seu custo. Essa dificuldade apresenta-se, também, na manutenção do leito de ânodos.

A distância entre um leito de ânodos e o duto a ser protegido é assunto de grande interesse entre os profissionais de proteção catódica. Distâncias maiores não chegam a causar dificuldade quando se trata de áreas rurais. No caso de áreas urbanas, porém, a exigüidade de espaço impede que isso seja feito. Qual a distância ideal entre um leito de ânodos e um duto? Não é fácil responder a essa pergunta com precisão. No entanto, dados obtidos em campo por intermédio de algumas inspeções mostram que um leito de ânodos situado a menos de vinte metros do duto não tem efeito adverso na distribuição de potenciais tubo/solo.

#### **4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação foi dividida em introdução, revisão bibliográfica, métodos e materiais, análises e resultados e considerações finais, com o objetivo de facilitar a compreensão do leitor.

A Introdução (capítulo 1) contextualiza o objeto da pesquisa, seus objetivos e importância, aspectos conceituais, metodológicos, algumas referências. No capítulo 2 são apresentados os objetivos da pesquisa e no capítulo 3 a justificativa para sua realização.

A revisão bibliográfica (capítulo 5) busca aprofundar teoricamente a respeito dos elementos essenciais que integram o sistema de proteção catódica considerando o solo como um eletrólito, destacando principalmente sua gênese e dinâmica potencial de corrosividade. Em seguida, aborda os aços para dutos, com ênfase na composição do aço carbono, norma API 5L, corrosão em dutos com destaque para suas causas, formas, fatores que influenciam o processo corrosivo, biofilmes, corrosão induzida microbiologicamente (CIM). No estudo da CIM, ressalta a influência de bactérias produtoras de ácido, bactérias oxidantes de enxofre, bactérias que induzem a precipitação do ferro, bactérias redutoras de sulfato e fungos responsáveis pelo surgimento de bactérias.

O capítulo 6 apresenta procedimentos metodológicos adotados, bases conceituais, definição das zonas de estudo, detalhes do desenvolvimento da pesquisa de campo com os registros de identificação e caracterização dos solos por intermédio de elementos cartográficos do relevo como curvas de nível, da identificação da diretriz dos gasodutos, das medições de resistividade do solo, das medições de potenciais tubo/solo “ON” e “OFF”, e as coletas das amostras de solo para análise das características físicas, químicas e microbiológicas.

O capítulo 7 apresenta e discute análises e resultados, destaca as análises dos dados levantados em campo e das amostras coletadas nas três faixas dos gasodutos, seguidas das respectivas conclusões dos resultados.

O capítulo 8, Considerações Finais, sintetiza os resultados alcançados na pesquisa e permite sua continuidade na busca da melhoria contínua dos procedimentos de sistemas de proteção catódica.

## **5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **5.1 SOLO**

O solo, como o principal substrato ou ambiente no qual estão confinados dutos terrestres, revela ser de grande importância para o estudo da corrosão em metais. A complexidade e heterogeneidade da sua composição algumas vezes apresenta característica corrosiva que afeta significativa quantidade de estruturas metálicas enterradas.

#### **5.1.1 Origem e natureza dos solos**

Os solos têm sua pedogênese relacionada à decomposição da rocha, a qual a geologia conceitua como intemperismo e depende dos agentes físicos e químicos para os quais contribuem diversos fatores, a exemplo das variações de temperatura na geração de trincas que favorecem a penetração da água até afetar quimicamente os minerais e as tensões elevadas que promovem a fragmentação dos blocos, causadas pelo congelamento da água nas trincas no clima temperado ou por inchamento e retração em climas tropicais. Além disso, existem as influências da meso e da microfauna e flora que promovem o ataque químico, por meio de hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, em climas quentes mais do que em climas frios. Assim, os solos são misturas de partículas pequenas de variável composição química e, pelo tamanho e a depender da composição química da rocha que lhes deram origem pode provocar maior ou menor concentração de cada tipo de partícula e definir as características e as dinâmicas química e física ao solo (PINTO, 2006).

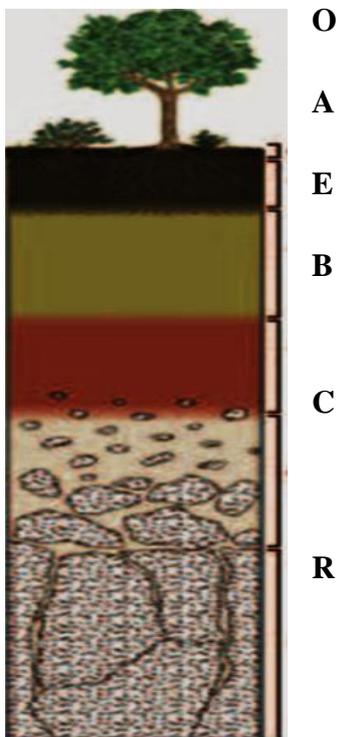
Segundo Rajj (1981), a interação entre as fases sólida, líquida, gasosa e biológica no solo possibilita o desenvolvimento de vegetais. Em conjunto, as propriedades e processos favorecem a retenção da água e de nutrientes e sua liberação para as raízes. Esse processo cria dinâmica de eletrólito com concentrações de cátions, ânions e metais que são absorvidos pela planta.

Contudo, Lepsh (2002) considera importante destacar que a ação dos processos físicos, químicos e biológicos é não uniforme em uma rocha em transformação. Essa transformação, originada do intemperismo e do acréscimo de restos vegetais, acontece com muita intensidade na sua parte superior, tornando-se escurecida com o húmus. Os aspectos

diferentes no perfil do solo, sendo estas camadas empobrecidas que se sobrepõem a outras, enriquecidas de compostos minerais ou orgânicos, vêm do deslocamento de certas substâncias sólidas por meio da ação da água e da gravidade de um lado a outro.

Em complementação ao destaque de Lepsh (2002), Meurer (2004) conceitua o perfil do solo como a seção vertical que se inicia na superfície e aprofunda-se até o contato com o material de origem, pois a observação do perfil permite distinguir os diferentes horizontes do solo. Esses horizontes diferenciam-se pela espessura, cor, distribuição e arranjos das partículas sólidas e poros, distribuição de raízes e outras características e são chamados de O, A, E, B e C (Figura 1):

Figura 1 – Perfil de um solo em que se mostram os principais horizontes



Fonte: Charret (2010).

Charret (2010) define que as letras informadas ao lado da Figura 1 correspondem primeiramente ao horizonte O, no qual ocorre predominância de restos orgânicos; em seguida, o horizonte A do solo, denominado de horizonte mineral escurecido pela acumulação de matéria orgânica; mais abaixo, o horizonte E, conhecido pelas cores claras, de onde as argilas e outras partículas finas foram lixiviadas pelas águas particulares e pela interface ligeiramente

abaixo com o “Horizonte B”, que representa a camada que acumula materiais dos horizontes acima e pode apresentar cores avermelhadas em virtude da presença de hidróxidos de ferro e de óxidos, e são chamadas de argilas. O “Horizonte B” tem interface com o “Horizonte C”, o qual é constituído por material não consolidado. Finalmente, debaixo do “Horizonte C” encontra-se a rocha, em muitos casos similar à rocha que deu origem ao solo, denominada de rocha consolidada.

É importante destacar a importância da fase mineral sólida do solo, denominada de textura e constituída de areia, silte e argila e que correspondem ao tamanho, aspecto e forma do conjunto de agregados. Esta característica influencia o potencial de corrosividade do solo.

Charret (2010) concorda com a afirmação acima quando enfatiza a importância da granulometria, por prenciar muitas das propriedades do solo, como a baixa permeabilidade, a qual ajuda a reter mais água e favorece o aparecimento de processos corrosivos, ou seja, existe uma relação direta entre a quantidade de água no solo e a superfície disponível, que é o tamanho da partícula. Conclui que quanto mais reter água e oxigênio, maior a probabilidade de corrosão nos metais, comparando-se à corrosão de um material metálico imerso em meios aquosos.

Outra característica importante do solo é a porosidade; o ar e pela água ocupam o volume não ocupado pelos constituintes sólidos do solo, como definem Guerra *et al.* (2010). Os mesmos autores destacam a grande importância da porosidade porque através dela se dá a transferência de sólidos, líquidos e gases no interior do solo, bem como a atividade biológica. Ou seja, ela é responsável pela retenção de mais ou menos água no solo. Outro fator de importância é a intercomunicabilidade entre os poros, onde as mudanças verticais bruscas no diâmetro e na morfologia desses podem acarretar sérios problemas de erosão hídrica.

A água e o oxigênio são elementos que causam a corrosão eletroquímica e, vale lembrar, na reação catódica do processo acontece a redução do oxigênio dissolvido em água e produção de hidroxilas. Logo, podemos afirmar que a capacidade do solo de permitir a penetração do ar atmosférico é fator relevante no processo corrosivo. Contudo, em boa parte dos casos de corrosão em solos, a redução do oxigênio é a reação catódica predominante, acontece geração de produtos de corrosão insolúveis, os quais criam uma barreira protetora passivando o metal. Dessa forma, a presença de oxigênio pode, a depender do caso, evitar a corrosão do metal (GENTIL, 2007).

Panossian (1993) afirma que alguns solos são naturalmente mais corrosivos do que outros. Os solos que merecem maior atenção são aqueles que contêm substâncias alcalinas, solúveis em água, tais como os constituídos pelos elementos químicos sódio, potássio, cálcio e magnésio e aqueles que possuem constituintes formadores de ácidos, como carbonatos, bicarbonatos, nitratos e sulfatos, por poderem alterar o pH do solo, torná-lo ácido ou alcalino e contribuir para a ocorrência do processo corrosivo.

Destaca-se para solos extremamente ácidos, pH menor ou igual a 4, o qual causa corrosão severa nos metais enterrados, em que a corrosão ocorre na ausência do oxigênio. Gentil (2007) complementa, ao considerar que normalmente o pH dos solos situa-se na faixa entre 5 e 8; o pH do solo depende da composição da rocha de origem, das condições climáticas durante a formação, da presença de material orgânico e da poluição causada pela atividade humana.

Referenciado pelos estudos e autores citados, pode-se inferir que em solos muito ácidos a condutividade pode não ser considerada como variável importante porque os hidrogênios são formados em áreas catódicas próximas de áreas anódicas, consideradas regiões onde ocorrem ataques corrosivos. Em solos fracamente ácidos, neutros e alcalinos, geram-se condições de impossibilidade de haver a corrosão induzida microbiologicamente e a condutividade passa a ser um parâmetro importante, em virtude de a corrente iônica ter que percorrer grandes distâncias entre as regiões anódicas e catódicas.

Diante da necessidade de se compreender as condições envolvidas na evolução de um processo corrosivo, Charret (2010) revela que a intensidade de corrosão influencia o grau de deterioração de uma estrutura; a velocidade de corrosão, ao longo do tempo constante e elevada, causará deterioração acelerada das estruturas. Os casos em que a velocidade de corrosão diminua, indica o bom desempenho do material mesmo que as velocidades sejam altas no início da instalação.

Gentil (2007) relaciona o processo corrosivo com a natureza dos produtos de corrosão que se formam, ou seja, se esses forem solúveis e facilmente removíveis (por intermédio de fluxo de água que percorra através de poros encontrados entre as partículas de solo) da interface metal/solo, a corrosão terá continuidade. Porém, se os produtos de corrosão forem insolúveis e aderentes à superfície metálica, ou seja, atuarem como uma barreira protetora, a velocidade de corrosão poderá diminuir a níveis desprezíveis. O mesmo autor vai além, ao observar que em grandes profundidades (superiores a 10 m) a velocidade de corrosão deixa de

ser controlada preferencialmente pela condutividade e resistividade do solo e passa a ser determinada pela disponibilidade de oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas e posteriormente afirma que a difusão do ar limita a velocidade de corrosão.

### **5.1.2 Corrosividade dos solos**

Pode-se concluir, então, que as variáveis como acidez, condutividade ou resistividade elétrica têm determinante influência na corrosividade dos solos, em uma relação inversamente proporcional em que ocorre maior resistividade dos solos, menor condutividade e, conseqüentemente, menor corrosão das estruturas enterradas.

Um conjunto de fatores relacionados, como a quantidade e qualidade dos sais dissolvidos, a temperatura, o teor de umidade, a presença de materiais inertes e grau de compactação do solo, tem relação direta com a resistividade do solo refletindo em uma relação inversa, ou seja, maior quantidade de sais solúveis, menor resistividade e, contudo, maior corrosividade do solo.

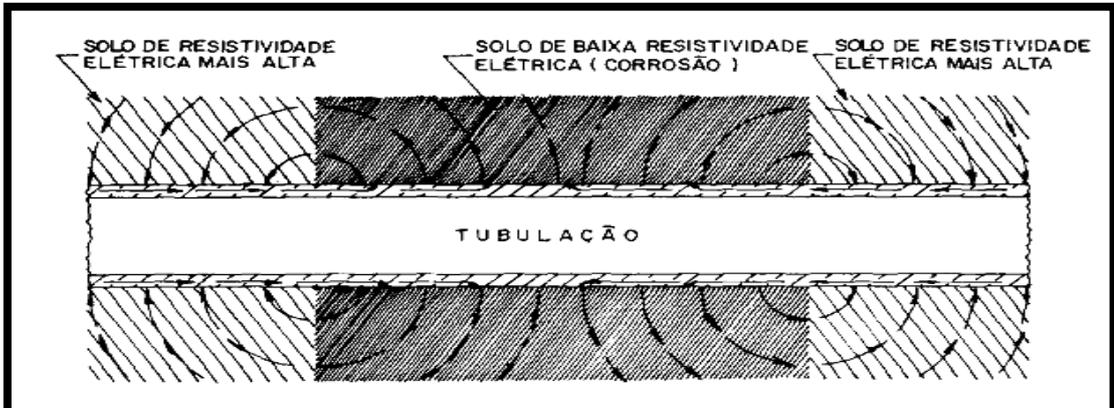
A corrosividade ou a agressividade do solo depende das características físicas (textura, estrutura, interação solo-água), propriedades químicas (acidez total, espécies iônicas e suas concentrações na solução), e biológicas (tipo de bactérias aeróbicas ou anaeróbicas) do solo (CHARRET, 2010).

Diante do que foi abordado sobre a capacidade do solo de reter mais ou menos água, e/ou permitir mais ou menos a entrada e difusão do oxigênio, relacionado ao mecanismo de corrosão do aço enterrado, pode-se assumir como regra geral que a velocidade de corrosão é maior em solos poucos aerados do que em solos aerados. Admite-se haver dificuldade para medir o tempo de retenção da água no solo e, por isso, devem ser consideradas variáveis de fácil determinação e que tenham uma correlação direta com a agressividade do solo, a exemplo da textura e diâmetro médio das partículas do solo.

Segundo Gomes (2009), um dos fatores mais importantes no processo corrosivo dos metais enterrados ou submersos é a resistividade elétrica do solo ou da água, com destaque para suas variações ao longo da diretriz dos dutos e são as maiores produtoras de pilhas de corrosão severa nas estruturas metálicas. Esse autor relaciona o funcionamento da pilha de corrosão ao valor alto ou baixo da resistividade elétrica do solo, ou seja, quanto mais baixo o

seu valor, mais fácil funcionam as pilhas de corrosão e mais severo é o processo corrosivo (Figura 2).

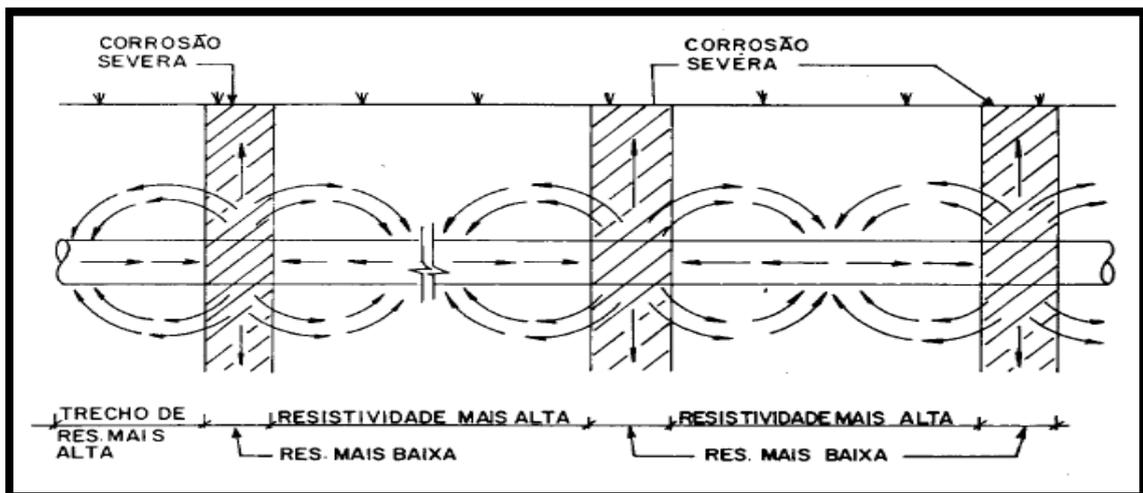
Figura 2 – Pilha causada pela variação de resistividade elétrica do solo



Fonte: Gomes (2009).

Em uma extensão de faixa de gasoduto existem solos de alta, média e baixa resistividade elétrica. Destaca-se o solo de baixa resistividade por ser uma região anódica, ou seja, que sofre corrosão severa em função do surgimento das macropilhas de corrosão, e que se destacam em sua dinâmica eletrolítica em detrimento das áreas de contato de resistividade mais alta, as quais passam por uma corrosão mais suave (Figura 3).

Figura 3 – Pilha de corrosão causada pelas variações das resistividades elétricas do solo

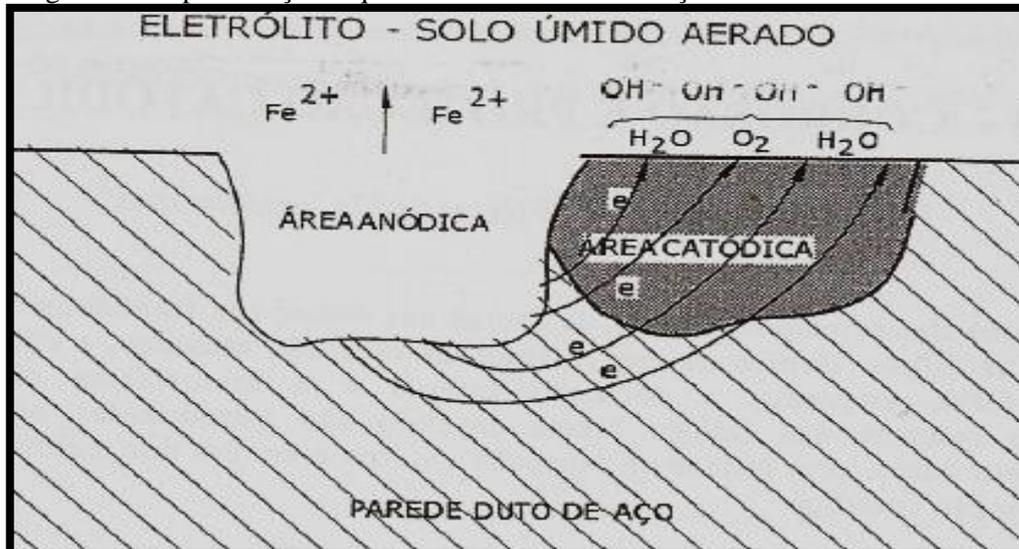


Fonte: Gomes (2009).

Outro aspecto a contribuir para o agravamento da corrosão das tubulações enterradas, principalmente as de grande diâmetro, é o fato de haver variações no grau de aeração dos

solos como, por exemplo, em solos neutros aerados a corrosão se acentuar em zonas pobres de oxigênio (Figura 4).

Figura 4 – Representação esquemática da corrosão do aço em solo neutro aerado



Fonte: Baptista; Castinheiras (2009).

## 5.2 SISTEMA DE TRANSPORTE POR DUTOS

Os dutos são um modal de transporte seguro e confiável e atualmente são essenciais para atender à elevada demanda da sociedade. O mundo depende da energia para trazer crescimento econômico e desenvolvimento para humanidade e os meios para disponibilizá-la são diversos através das características da região, do nível de evolução de suas tecnologias e das políticas públicas. Além disso, a depender dos volumes e distâncias, são meios de transporte mais vantajosos economicamente comparados a outros modais.

Segundo Rennó e Lemgruber, (2009), é notório que a cada dia aumentam as demandas por combustível e fontes alternativas de energia. Assim, torna-se cada vez mais necessária a ampliação da rede de transporte de combustíveis por dutos, por transportar óleo, gás e derivados, biocombustíveis, gases, água e minério, entre outros produtos, e apresentar grandes vantagens com relação aos outros modais de transporte, quais sejam:

- a) Alta confiabilidade pela operação contínua, pelo modal não afetado por condições adversas de tempo e devido ao elevado grau de automação na supervisão;

- b) Alta economia no transporte, por ser mais econômico que outros modais, como transporte ferroviário (até 5 vezes mais econômico) ou rodoviário (até 20 vezes mais econômico). Caso se utilizasse o transporte rodoviário para substituir a função de oleoduto de porte médio, o qual transporta 20.000 m<sup>3</sup>/dia em uma distância de 250 km, seriam necessárias 750 carretas, descarregadas continuamente a cada 2 minutos. Em caso de substituição de transporte ferroviário equivalente, seria necessário um trem-tipo com quase 200 vagões, carregando e descarregando a cada dia;
- c) Baixo consumo de energia em comparação ao modal ferroviário e rodoviário, considerando-se a energia consumida para transportar a mesma carga pela mesma distância;
- d) Baixo impacto ambiental; por ficarem enterrados, não trazem os inconvenientes dos modais ferroviário e rodoviário, como ocupação das vias de transporte, poluição do ar, ruído e acidentes.

Diante da sua importância, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) (2010) classifica o transporte dutoviário nas seguintes modalidades:

- (a) Oleodutos - em sua grande maioria transportam petróleo, óleo combustível, gasolina, diesel, etanol, GLP, querosene e nafta;
- (b) Minerodutos - transportam sal-gema, minério de ferro e concentrado fosfático;
- (c) Gasodutos - transportam principalmente gás natural e também gás combustível de xisto, gás residual e CO<sub>2</sub>.

## **5.2.1 Aços para dutos**

### **5.2.1.1 Composição dos aços**

O elemento de maior concentração nos aços carbonos é o ferro, o qual possui também diferentes quantidades de carbono de elementos de liga, sendo importante na determinação da dureza, tenacidade, resistência à corrosão, entre outros, a depender da sua aplicação. Classificam-se os aços em aço carbono, aço liga e aços especiais.

Na compreensão de Guy (1980), o ferro é o metal mais usado nos materiais metálicos por ter o menor custo. As formas mais baratas do ferro são os ferros fundidos fabricados na fundição, os ferros gusa. No entanto, Silva e Mei (2010) consideram o ferro gusa a forma intermediária pela qual passa praticamente todo o ferro usado na produção primária do aço

(exceção importante são os produtos de redução direta). Genericamente, pode-se definir ferro gusa pela composição química situada nas seguintes faixas: carbono 3,5 - 4,5%; silício 0,3 - 2%; enxofre 0,01 - 0,1%; fósforo 0,05 - 2%; manganês 0,5 - 2%.

É importante destacar que, além dos 3.000 anos de existência dos aços, esses representam 80% de todas as ligas metálicas ferrosas, pois, quando se trata de aços estruturais de alta resistência existe uma definição voltada para o tipo de aplicação relacionada à sua tensão de escoamento, como se vê nos casos dos construtores de guindaste, em que os aços de alta resistência possuem tensão de escoamento de 890 MPa, nos estaleiros 355 MPa e, para comercialização, consideram-se os aços estruturais com 1.100 MPa.

É muito claro para Gomes (2009) que não existe homogeneidade nos aços utilizados nas instalações enterradas e submersas porque existem inclusões não metálicas, variações de composição química e tensões internas diferentes resultantes dos processos de conformação e de soldagem. Essas variações influenciam o comportamento das superfícies do aço de forma a parecer que foram constituídas de materiais metálicos diferentes e que a intensidade do processo corrosivo das pilhas de corrosão formadas ao longo das superfícies do aço depende da grandeza da diferença de potencial que se estabelece nas pilhas formadas. O mesmo autor preocupa-se em afirmar que não existe corrosão uniforme e que o ataque corrosivo pode ser generalizado resultando que a superfície corroída apresenta irregularidades com aspecto rugoso, em consequência da alternância das áreas anódicas e catódicas, com o desenvolvimento de alvéolos mais profundos, o que pode perfurar a parede metálica.

Souza (2001) prefere dar importância aos aços-liga, por possuírem em sua composição, além do carbono, o qual confere parte das propriedades mecânicas da liga, porcentagens elevadas de outros elementos químicos (cromo, níquel, molibdênio, tungstênio, manganês, silício, cobre, pequenas quantidades de vanádio, nióbio, boro e titânio). Esses são incorporados para aumentar e melhor distribuir as propriedades mecânicas, ao combinar dureza, ductilidade e tenacidade ou, inclusive, para melhorar a resistência da liga à corrosão e à abrasão. Por isso, esses metais são mais caros que os aços carbono e necessitam de cuidados durante os tratamentos térmicos.

É impressionante como por mais de 100 anos o aço é o material industrial mais utilizado. Acredita-se que esse papel de destaque na engenharia está relacionado à ampla faixa de propriedades e características de *performance* com baixos custos, otimização dos processos

de fabricação, pela disponibilidade de ferro, e a otimização dos processos de fabricação do aço.

E Silva e Mei (2010) com isso concordam quando revelam:

Naturalmente, o aço é um material em constante evolução, e os padrões de qualidade, bem como os níveis de propriedades que podem ser atingidos hoje com aços convencionais, superam, em muito, as características de aços que eram considerados especiais há poucas décadas (p. 318).

Sabe-se que a seleção do tipo de aço a ser utilizado considera as propriedades dos aços disponíveis em comparação com outros materiais, as tendências do crescimento na indústria do aço, a constante reavaliação do processo de seleção devido ao seu dinamismo e pela busca dos resultados esperados.

#### **5.2.1.2 Aços carbono**

Pela sua importância na indústria dos materiais existentes, Telles (2003) define o aço carbono como a menor relação entre custo/resistência mecânica pela sua fácil soldabilidade e conformação e fácil comercialização como uso geral. Sua aplicabilidade é proibida em situações muito específicas. Silva e Mei (2010) conceituam o aço carbono como uma liga metálica formada predominantemente por ferro e carbono, cuja percentagem desse último componente varia de 0,008% a 2,11%.

Apesar de inúmeras vantagens, o aço carbono possui baixa resistência à corrosão e, por isso, é necessário que o projeto considere uma sobre-espessura, adicione uma pintura ou um revestimento protetor apropriado à condição específica em que a estrutura metálica for submetida.

Logo, no intuito de compreender melhor sobre aços-carbono, Infomet (2015) afirma que esses possuem na sua composição apenas quantidades limitadas dos elementos carbono, silício, manganês, cobre, enxofre e fósforo e que os outros elementos existem apenas em quantidades residuais.

É do conhecimento dos profissionais de engenharia que depois do ferro, o carbono é o elemento mais importante, por ser determinante das propriedades mecânicas do aço, e a sua quantidade define o tipo de aço, conforme se denomina na indústria, em doce ou duro. Dessa

forma, os aços são classificados em: baixo carbono, por possuírem no máximo 0,3% de carbono; médio carbono, pela faixa de 0,3% a 0,6%; e alto carbono, entre 0,6 e 2%. É fundamental compreender que, em regra geral, quanto maior o teor de carbono, maior a dureza e menor a ductilidade do aço.

Na opinião de Charret (2010), no aço carbono o teor de impurezas (elementos além do ferro e do carbono) corresponde a no máximo 2% da sua composição; o percentual de impurezas está relacionado ao mineral de procedência e ao processo de fabricação do aço.

Mesmo que os aços carbonos possuam limitações, quando se trata de resistência à corrosão, ao desgaste, ao calor, dentre outras, muitas das aplicações práticas não necessitam de elementos de liga e nem tratamento térmico, devido à qualidade das suas propriedades mecânicas.

Em concordância com a afirmativa acima, Charret (2010) revela que essa liga metálica é, ainda hoje, o material comumente utilizado na construção de adutoras, oleodutos, gasodutos e minerodutos, e corresponde atualmente a cerca de 90% das tubulações industriais. Na maioria dessas, aplica-se revestimento metálico (zincagem) ou não metálico (inorgânicos ou orgânicos), a fim de minimizar o ataque por processo corrosivo e, quando enterrados, são submetidos a revestimentos protetores juntamente com o sistema de proteção catódica.

### **5.2.1.3 Norma API 5 L**

Ao longo do tempo e com o avanço tecnológico, houve uma revolução no campo dos materiais, considerando-se principalmente os aços de alta resistência e baixa liga – ARBL, os quais, além da boa tenacidade e soldabilidade, possuem elevados níveis de resistência originados dos mecanismos de endurecimento que compreendem o refino do grão, endurecimento por solução sólida e endurecimento por precipitação.

Segundo Boot *et. al.* (2009), o aço denominado API pode ser considerado como aço ARBL, sua especificação (*Specification for Line Pipe*) segue a norma API 5L e sua composição química pode variar com a espessura para atender às propriedades mecânicas. Em busca de boa soldabilidade, os teores de carbono precisam situarem-se entre 0,05% e 0,12% e o Mn até 2%. Adições de Cr, Ni, Mo, Cu, N, V, Nb, Ti e Zr empregados em inúmeras combinações. Quando se trata de dutos, os aços ARBL dividem-se em três tipos principais:

aços microligados ferríticos-perlíticos, aços ferríticos (bainíticos de baixo carbono) e aços multifásicos.

Os tubos para dutos que seguem orientação da API 5L são submetidos a dois níveis de especificação de produtos (*Product Specification Levels* - PSL); o PSL 1 trata dos limites mínimos e o PSL 2 dos limites mínimos obrigatórios, considerando-se carbono equivalente (CE), valores máximos de resistência à tração, limites de escoamento e tenacidade à fratura.

Bott et al., (2009) consideram ainda que a norma em questão abrange os graus A25; A; B; X42; X46; X52; X56; X60; X65; X70; X80; X90; X100 e X120. Nos graus X em que existem dois algarismos, esses significam a tensão de escoamento mínima especificada em Ksi, onde os tubos PSL1 são fornecidos desde o grau A25 até o grau X70, enquanto os tubos PSL2 podem ser fornecidos do grau B até o grau X120. E, além disso, apresentam a fórmula do CE, especificado somente para o PSL2, o qual deve ser calculado a partir da fórmula do P<sub>cm</sub> (carbono equivalente) para aços com teores de  $C \leq 0,12\%$  e da fórmula do *International Institute of Welding* para teores  $C > 0,12\%$

$$C_{eqIIW} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu) / 15$$

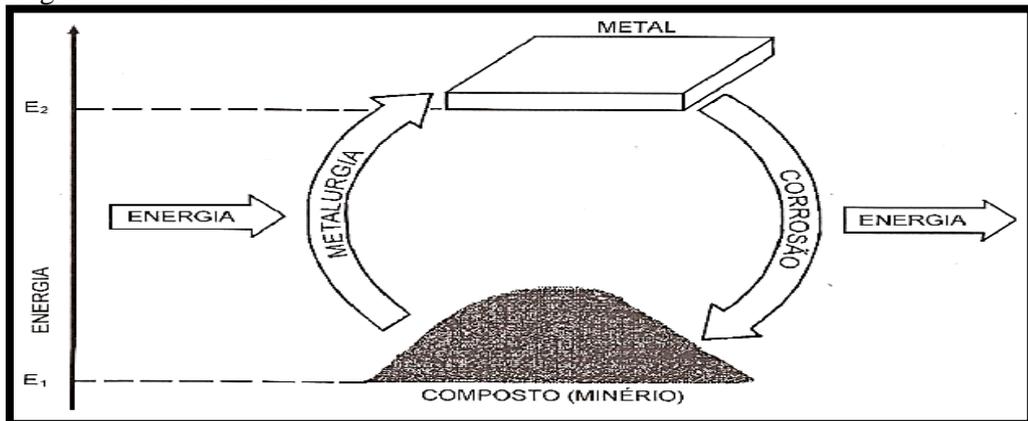
$$P_{cm} = C + Si / 30 + Mn / 20 + Cu / 20 + Ni / 60 + Cr / 20 + Mo / 15 + V / 10 + 5xB$$

### 5.2.2 Corrosão em dutos e os métodos de combate à corrosão

Em se tratando de falhas em dutos, considera-se a corrosão como uma das mais importantes causas de rompimento e, na compreensão de Batista, Castinheiras (2009), a frequência dessas se situa entre 15% e 30% de todas as falhas; a corrosão externa representa 60% das falhas e os 40% restantes das falhas, divididos entre as corrosões atmosférica (20%) e interna (20%).

De acordo com Gentil (2007), a corrosão é a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. A Figura 5 ajuda compreender o ciclo de quase todos os metais.

Figura 5 – Ciclo dos metais



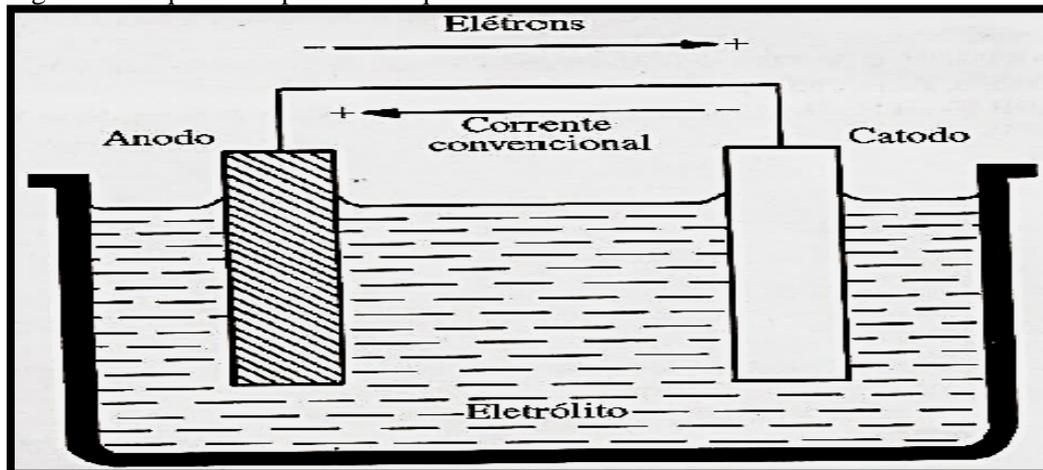
Fonte: Dutra e Nunes (2006).

É importante conhecer a diferença entre a corrosão química e eletroquímica, considerando-se que esta pesquisa trata do combate à corrosão eletroquímica. Baptista e Castinheiras (2009) definem que os processos de corrosão química ocorrem em algumas condições como altas temperaturas (acima do ponto de orvalho da água), em ausência de água e na interação direta metal/meio. Os processos de corrosão eletroquímica ocorrem em temperatura ambiente, na presença de água, e existem por causa da formação de uma pilha de corrosão, composta por uma região catódica e o mesmo eletrólito uma região anódica, as quais estejam interligadas eletricamente e em contato com.

Ou seja, em um sistema formado por meio corrosivo e metal no qual existirá uma heterogeneidade, implicará em eletroquímica. E isso ocorre devido à diferença de potencial gerada pelo sistema que resulta corrosão na formação de áreas anódicas e catódicas.

Para fundamentar a afirmativa acima, Gentil (2007) esclarece que os casos mais frequentes de heterogeneidade são diretamente responsáveis pela corrosão eletroquímica e possuem relação direta com o material metálico ou com o meio corrosivo porque os elétrons são cedidos em determinada região e recebidos em outra, o que favorece o aparecimento de uma pilha de corrosão. Esse autor esquematiza o processo eletroquímico de corrosão (Figura 6) e divide-o em três etapas: a primeira é um processo anódico, com passagem dos íons para a solução; a segunda é o deslocamento dos elétrons e íons pela transferência dos elétrons das regiões anódicas para as catódicas pelo circuito metálico e difusão de ânions na solução; e a terceira é um processo catódico, pela recepção de elétrons das regiões anódicas para as catódicas pelo circuito metálico e difusão de ânions e cátions na solução.

Figura 6 - Esquema de pilha eletroquímica



Fonte: Gentil (2007).

É impossível erradicar a corrosão, em virtude de todos os metais e ligas a essa estarem sujeitos. Assim, os projetos de engenharia devem primar pela excelência para que se possa estabelecer controle sobre os processos corrosivos, o qual é de altíssima importância, considerando-se que a sociedade moderna é totalmente dependente da utilização dos metais e ligas. Rodrigues (2010) alerta que a corrosão de equipamentos ou estruturas metálicas em ambiente marinho ou enterrado pode gerar danos irreparáveis ao meio ambiente e aos seres vivos que neles habitam ou que dele dependem.

Um dos tipos de corrosão a merecer destaque é a eletroquímica. Influenciada por microrganismos, é chamada de corrosão induzida microbiologicamente (CIM) e está diretamente associada ao processo de corrosão eletroquímica, pois, uma região anódica desenvolve um processo de oxidação que leva à dissolução do metal (corrosão) e simultaneamente à redução de algum componente do meio através da reação catódica.

No entendimento de Videla (1988), os grupos microbianos, como fungos, algas e preferencialmente bactérias participam desse processo de forma ativa, sem alterar a natureza eletroquímica do fenômeno, apenas acelerando o processo de corrosão.

### 5.2.2.1 Causas da corrosão em metais enterrados

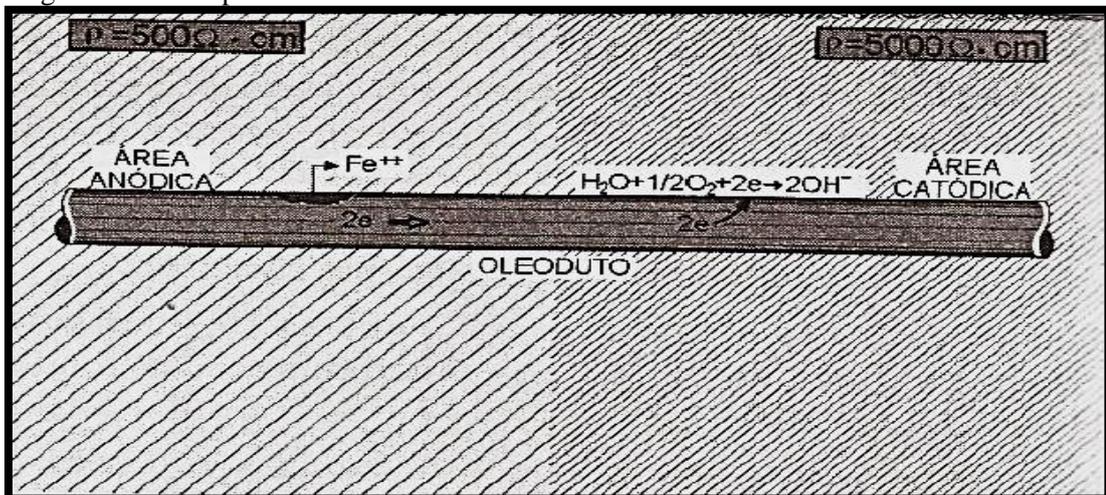
As perdas econômicas que ocorrem pelo transporte dutoviário devem-se essencialmente à deterioração dos dutos enterrados, o que leva ao surgimento de fendas ou até mesmo à ruptura desses (LOUREIRO, 2005). O metal é corroído devido à formação de uma célula, que é composta pelos elementos básicos: eletrólito e eletrodos (ânodo e catodo).

Segundo Baptista e Castinheiras (2009), eletrólito é

[...] qualquer meio, líquido ou sólido, que possui em sua composição água e íons dissolvidos. Os solos, por mais secos que pareçam, sempre contém água e funcionam como um eletrólito. Na região anódica, ocorre a reação de oxidação do metal (corrosão). Na região catódica, ocorre a reação de redução. (BAPTISTA; CASTINHEIRAS, 2009, p. 131).

Para Dutra e Nunes (2006), ao analisarem de forma mais profunda o eletrólito, revelam que esse causa pilhas relacionadas à sua heterogeneidade da mesma forma que as de concentração diferencial, e afirmam que essas ocorrem quando uma peça metálica está em contato com um eletrólito, o qual apresenta, em sua massa, regiões de diferentes concentrações de íons de metal. Os mesmos autores prosseguem em sua explanação e sustentam que as heterogeneidades de área diferencial partem do metal que está em contato com a região mais aerada do eletrólito, que funciona como catodo, e finaliza com a pilha de resistividade elétrica diferencial que ocorre em tubulações enterradas em solos com diferentes resistividades elétricas (Figura 7).

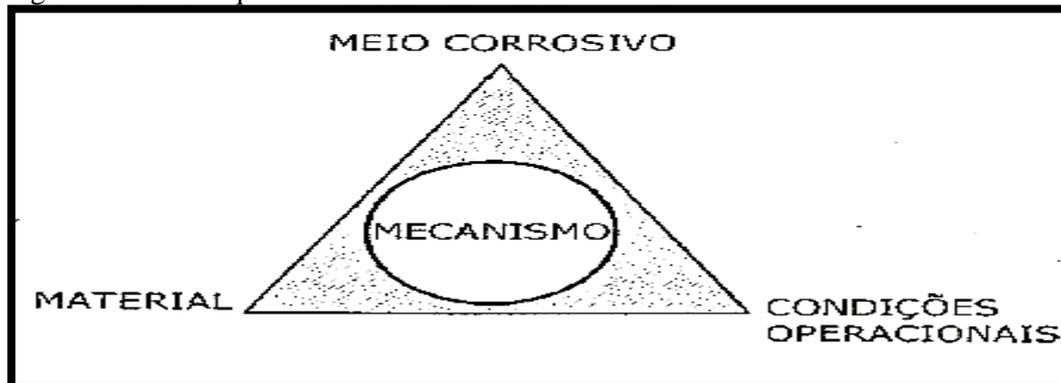
Figura 7 – Macropilha de corrosão em tubo enterrado



Fonte: Dutra e Nunes (2006).

Ao se analisarem os elementos que influenciam o mecanismo da corrosão percebe-se que a resistência a essa não depende somente do metal ou da liga e, sim, das características do meio no qual se encontra a estrutura metálica, da metalurgia da liga do metal, das condições do trabalho e dos fenômenos mecânicos implicados (Figura 8).

Figura 8 – Fatores que influenciam o mecanismo da corrosão



Fonte: Baptista e Castinheiras (2009).

O solo, como eletrólito, é um dos fatores que influenciam o mecanismo da corrosão eletroquímica, assim, é fundamental informar sobre a sua agressividade aos metais, a qual engloba dois tipos: a agressividade específica e a agressividade relativa. No entendimento de Baptista e Castinheiras (2009), a primeira se relaciona com o amplo elenco de propriedades físico-químicas e biológicas do solo, enquanto a segunda depende de fatores externos, capazes de modificar o processo corrosivo, a exemplo da presença de corrente de fuga.

Dessa maneira, a questão da agressividade relativa deve ser levada em consideração pela consequência severa que causará ao duto, com a ruptura e consequentemente vazamentos a partir das correntes de interferência, os quais, segundo Dutra e Nunes (2006), são correntes elétricas disseminadas em um eletrólito, mais particularmente no solo, provenientes das seguintes fontes:

Sistemas de proteção catódica por corrente impressa: Quando duas tubulações enterradas se encontram muito próximas, ou cruzam-se e apenas uma delas tem proteção catódica, a outra poderá captar parte da corrente de proteção, em determinado trecho, e descarregá-la em outro, para a tubulação protegida, dando origem à corrosão eletrolítica; sistema de tração eletrificada em corrente contínua que em geral, nestes sistemas se tem o retorno da corrente pelos trilhos e, como eles se encontram em contato com o solo, parte resultante de emenda deficiente dos trilhos. Quando há estruturas metálicas enterradas nas vizinhanças, estas podem ficar sujeitas aos mesmos problemas de corrosão eletrolítica e correntes telúricas, pois é sabido que estruturas de grande porte sofrem a influência de correntes provenientes da variação e do deslocamento do campo magnético da Terra. (DUTRA; NUNES, 2006, p. 161).

Esses autores também destacam as correntes originadas de linhas de transmissão de correntes contínuas, por serem outra fonte de corrente de interferência. Essas linhas de transmissão de corrente contínua têm sido utilizadas nos Estados Unidos, na Europa e também

no Brasil. Normalmente utilizam um cabo condutor positivo e outro negativo, para o retorno, unindo uma estação conversora de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) em uma extremidade e outra conversora de CC em CA, na outra extremidade.

Além da influência das correntes citadas acima, existe a influência de linhas de alta tensão em estruturas enterradas, conforme Dutra e Nunes (2006).

Esta influência se manifesta quando se tem as estruturas enterradas paralelas ou cruzando a linha de transmissão. Nos cabos de telecomunicações e de energia, a influência ocorre no capeamento metálico quando este for utilizado. Uma linha de alta tensão, em condições normais, está razoavelmente equilibrada e, desta forma, a variação do campo magnético gerado à sua volta é relativamente pequena, ocasionando o aparecimento de correntes induzidas de pequena monta sobre estruturas existentes nas suas proximidades. Entretanto, quando ocorre defeito na linha de alta tensão, provocando curto-circuito com a torre, pelo menos durante alguns ciclos, até que o sistema de proteção desarme, haverá o forte desequilíbrio do campo magnético, resultando numa intensa indução sobre as estruturas enterradas. Haverá, também, a condução de uma corrente devida à fuga para a terra, em consequência do defeito. (DUTRA; NUNES, 2006, p. 161).

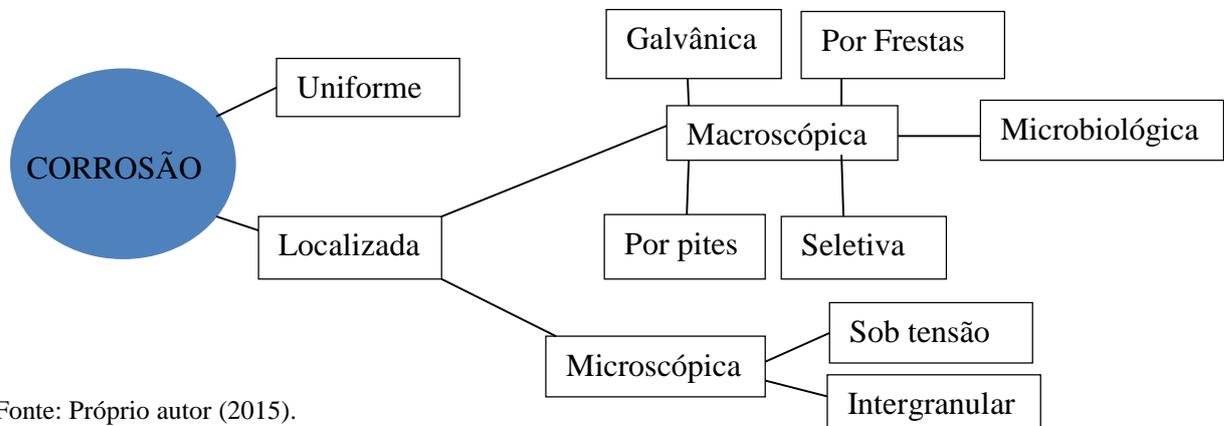
Ressalva-se que três fatores são imprescindíveis para determinar a extensão das correntes induzidas e/ou conduzidas originadas das linhas de alta tensão: as características de projeto da linha de transmissão, as características da estrutura enterrada e a resistividade do solo. Uma tensão elétrica de alto valor aplicada ao revestimento, ou seja, entre a estrutura e o solo, acarretará um arco em que as consequências serão nocivas à estrutura.

#### **5.2.2.2 Formas de corrosão**

Gentil (2007) garante que a corrosão ocorre por diferentes formas e que conhecê-las é muito importante para o estudo dos processos corrosivos. Por isso, aconselha a análise da aparência ou forma de ataque, e das diferentes causas de corrosão, no intuito de se definirem as formas (ou tipos) de corrosão.

Panoni (2007) concorda com Gentil (2007) ao dizer que a corrosão pode ocorrer de variadas formas e que sua classificação pode ser efetuada por meio da aparência do metal corroído. Entretanto, amplia sua resposta ao reconhecer que as formas mais comuns de corrosão que acometem o aço carbono são as uniforme, galvânica, por frestas e por pites (orifícios que adentram o metal formando pequenos poços), essa última menos comum, mas não menos importante que as outras (Figuras 9):

Figura 9 – Como a corrosão se apresenta



Fonte: Próprio autor (2015).

Mesmo que se classifique em diferentes formas de corrosão, caso ocorra qualquer uma delas as perdas econômicas serão relativas aos diferentes setores industriais, com ênfase na indústria petrolífera, levando-se em consideração, segundo Gentil (2007), que cerca de 50% de todos os danos econômicos são provocados diretamente pela corrosão nas instalações de refino de petróleo e nas petroquímicas.

Segundo dados apresentados por Videla (2003), nos Estados Unidos os prejuízos da corrosão alcançam cerca de 300 bilhões de dólares ao ano, o equivalente a 4,2% do PIB. No Brasil, estima-se que os custos decorrentes da corrosão também sejam relativamente altos; embora não haja levantamento específico, é comum adotar-se o índice de 3,5% do PIB para gastos com corrosão, cifra em torno de R\$ 45 milhões.

Complementa Rodrigues (2006) que o estudo da corrosão tem grande interesse tecnológico devido ao elevado custo relacionado com as perdas econômicas, principalmente nos países desenvolvidos, nos quais os processos de prevenção contra a corrosão são mais aplicados, ao custo anual de milhões de dólares.

### 5.2.2.3 Fatores que influenciam o processo corrosivo

Na natureza, a corrosão dos materiais sofre influência de diferentes fatores, de ordem química, física e microbiológica. Segundo Torres (2001), os principais fatores químicos relacionados são os gases dissolvidos, a salinidade e o pH.

Em se tratando dos gases dissolvidos, verifica-se que grande influência está relacionada à presença de oxigênio e gás carbônico e, nos meios aerados, o processo corrosivo deve-se, sobretudo, à presença de oxigênio, cuja redução no catodo intensifica a oxidação do metal no ânodo. Entretanto, o oxigênio pode exercer uma ação passivante e levar à formação de películas de óxidos de ação protetora (CHARRET, 2010).

Segundo o que percebeu Gentil (2007), no caso do gás carbônico a ocorrência do aumento da corrosão pode ser atribuída à diminuição do pH, em função da solubilidade de CO<sub>2</sub> que leva à formação de ácido carbônico. Se o efeito for protetor, deve-se à formação de carbonato de cálcio, um sal insolúvel, que ao se depositar sobre superfícies metálicas pode retardar a ação corrosiva.

A compreensão de Charret (2010) é a de que os fatores biológicos estão relacionados à presença dos micro-organismos, os quais influenciam a corrosão de metais por favorecer reações eletroquímicas na interface metal/meio, seja pela sua própria fixação na superfície, seja pela síntese da excreção de metabólicos agressivos como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, entre outros. De acordo com Videla (2003), praticamente todos os grupos microbianos se relacionam, em menor ou maior grau, aos processos de biocorrosão e bioacumulação.

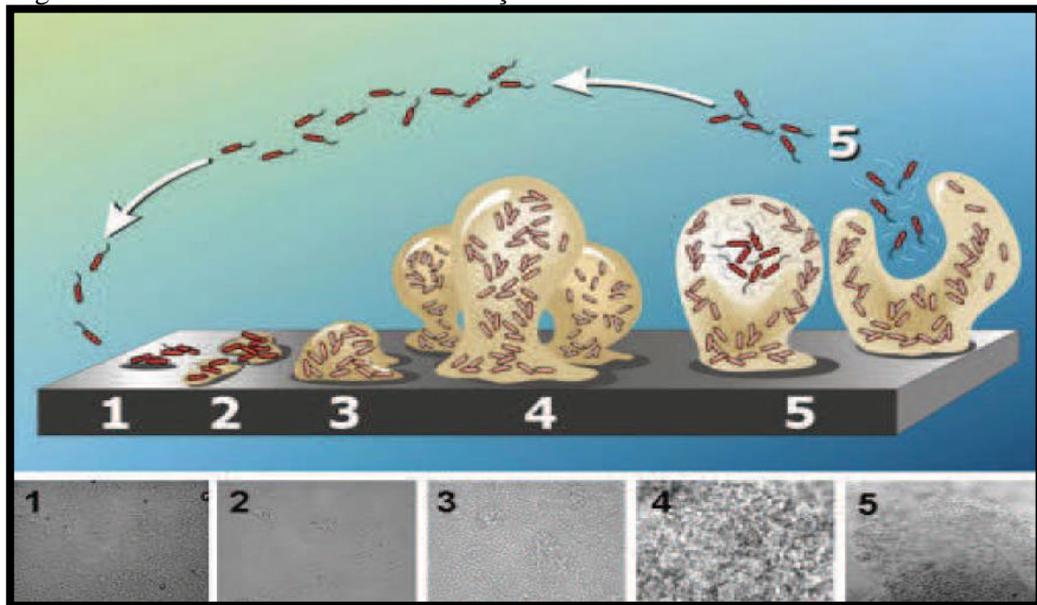
### **5.2.3 Biofilme**

Charret (2010) acredita que qualquer superfície sólida exposta em meios corrosivos (líquidos e/ou sólidos) pode iniciar um processo eficaz de atividade microbiana, gerando o biofilme.

Segundo Garrett et al. (2008), para compreender melhor sobre os biofilmes é necessário saber que esses são comunidades de micro-organismos imobilizados em uma matriz de substâncias poliméricas extracelulares (SPE) de origem microbiana, com canais intersticiais, por onde ocorre a passagem do fluido circulante. Então, os biofilmes são microecossistemas heterogêneos, nos quais ocorrem processos aeróbicos e anaeróbicos.

Charret (2010), ainda na busca de revelar a importância do estudo da corrosão microbiológica na deterioração de materiais, descreve o modelo usual para a formação de biofilme, o qual ocorre em cinco estágios (Figura 10).

Figura 10 – Processo envolvido na formação e crescimento de biofilmes



Fonte: Charret (2010).

Na primeira etapa, ocorre o transporte e a adsorção de moléculas orgânicas e inorgânicas à superfície sólida com formação de uma camada condicionante de 20 a 80  $\mu\text{m}$  de espessura; na segunda etapa, ocorre a adesão reversível de bactérias planctônicas que se aproximam da superfície sólida pelo movimento do fluido ou por mobilidade e têm domínio sobre as forças repulsivas entre a célula e a superfície.

O processo evolui para a terceira etapa, com a transição de adesão reversível para irreversível, pela produção de polímeros extracelulares pela própria bactéria e/ou por adesinas específicas presentes na pili (fímbrias), as quais podem interagir com a superfície. Em seguida, ocorre o desenvolvimento inicial da estrutura do biofilme e crescimento celular de microcolônias dentro do biofilme maduro. Por outro lado, substâncias poliméricas extracelulares (SPE), as quais servem como matriz adesiva e nutriente, podem continuar a ser formadas, bem como canais de água e poros e, por fim, ocorre a dispersão de células do biofilme e o retorno de células planctônicas.

Sobre o filme microbiano, Torres (2001) afirma que esse intensifica e/ou acelera o processo químico na interface metal/meio, em função da liberação de metabólitos como SPE e produtos corrosivos como ácidos orgânicos e gás sulfídrico, os quais causam alterações na superfície do metal e permitem a ocorrência de novas reações ou alterações nas cinéticas das reações envolvidas, o que acelera o desgaste do material.

A experiência de Videla (2003) assegura que a formação de SPE sobre superfícies metálicas varia de acordo com o metal. No caso de aço carbono, há interação complexa entre o biofilme e a superfície do aço, a influenciar o processo corrosivo pela formação de estruturas microbianas irregulares e pelo metabolismo desses microrganismos, os quais mudam as condições interfaciais de oxigênio e pH sobre a superfície do aço.

O estudo sobre os biofilmes tem se ampliado pela importância para a indústria, devido à identificação de diversos problemas causados por eles. Também por fatores positivos, como sua aplicação em estações de tratamento de água e efluentes, para remover organismos patogênicos de redução de matéria orgânica, produção de vinagre e processos biológicos para extração de metais, como o minério.

### **5.2.3.1 Corrosão induzida microbiologicamente**

A deterioração de materiais metálicos e/ou não metálicos causada pela atividade microbiana é denominada corrosão induzida microbiologicamente (CIM) ou biocorrosão (VIDELA, 2003). Os microrganismos participam do processo de deterioração dos materiais quer por estabelecerem as condições iniciais, quer por facilitarem ou acelerarem a reação de corrosão sem alterar a sua natureza eletroquímica (CHARRET, 2010).

Diante da variedade de ambientes que podem proporcionar crescimento de microrganismos, muitos sistemas podem sofrer CIM, como dutos, equipamentos marinhos utilizados nas diversas operações da cadeia de produção de petróleo, tanques de armazenagem, entre outros, em que a corrosão representa cerca de 20% dos danos (JAVAHERDASHTI, 1999).

De acordo com Videla (2003), inúmeras espécies de microrganismos podem estar relacionadas aos processos de biocorrosão, em menor ou maior grau. Assim, a identificação e a quantificação dos microrganismos envolvidos são normalmente realizadas em função das características que as populações microbianas têm em comum.

As Bactérias Produtoras de Exopolissacarídeos (BPE) existem em muitas espécies e apresentam capacidade de excretar material polimérico, que favorece a formação de biofilme e, portanto, a CIM. A colonização de superfícies sólidas será impulsionada se houver a participação de microrganismos potencialmente produtores de BPE. Como as BPE protegem as células contra íons metálicos, contra a ação de biocidas e ajudam a aprisionar outras

espécies de microrganismos e, assim, contribuem para o aumento da espessura do biofilme (TREVORS; COTTER, 1990).

Um importante grupo participante do processo de CIM é o das bactérias produtoras de ácido (BPA). Algumas espécies microbianas são capazes de produzir ácidos orgânicos de cadeias curtas, como os ácidos acético, fórmico, láctico, propiônico e burítico como produtos de seu metabolismo (CHARRET, 2010), os quais, segundo Bogan *et al.* (2004) servem de substrato para as BRS.

As bactérias oxidantes de enxofre (BOE) envolvidas na CIM fazem parte do ciclo do enxofre na natureza e essas se apresentam como células gram-negativas em forma de bastão, são aeróbicas estritas e utilizam o dióxido de carbono como única fonte de carbono (KELLY; WOOD, 2000).

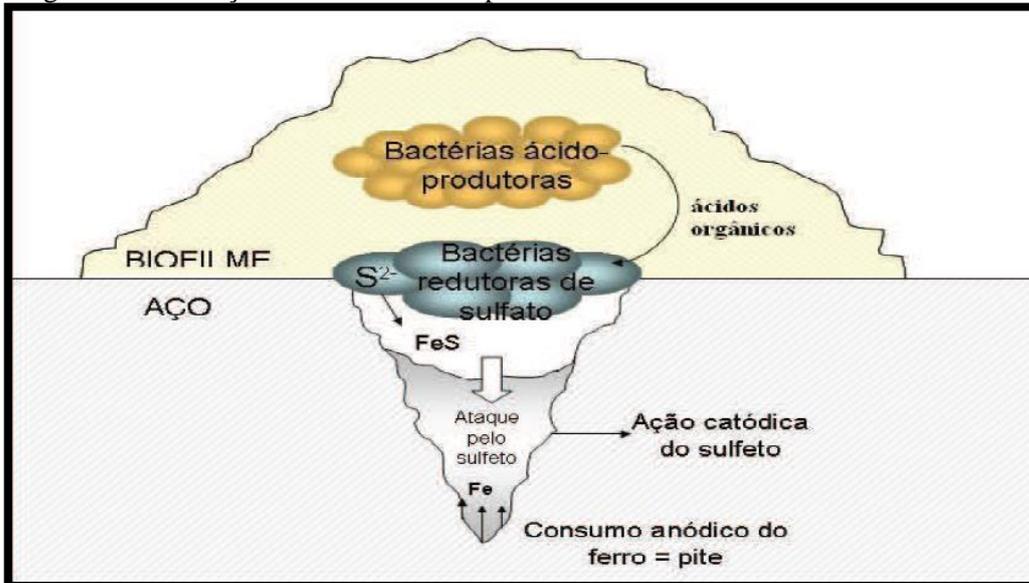
### **5.2.3.2 Bactérias redutoras de sulfato**

Entretanto, as principais espécies responsáveis pela CIM são as Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS), posto que, em comparação com as demais espécies microbianas, são tóxicas e liberam durante seu metabolismo elevada quantidade de ácido sulfúrico ( $H_2S$ ), agente altamente reativo, tóxico e corrosivo (KUANG *et al.*, 2007; MUYZER; STAMS, 2008).

Segundo Holt *et al.*, (1994) a morfologia das diferentes espécies de BRS é bastante diversificada e pode se apresentar nas formas esféricas, ovais, espirais, de bastonetes, de víbrios e filamentosas, cujos diâmetros variam de 0,4 a 3,0  $\mu m$ .

A Figura 11 mostra o mecanismo da interação de bactérias produtoras de ácido com as BRS na degradação da superfície do material e posterior formação de pite.

Figura 11 - Interação entre as bactérias produtoras de ácidos e as BRS na biocorrosão



Fonte: Adaptado de Pineu, Dupont e Braisaz (2003).

Existem inúmeras BRS espalhadas na natureza, as quais são encontradas em diversos ambientes como águas salgadas, águas doces, solos, lamas vulcânicas, ambientes geotérmicos, dentre outros.

De acordo com vários estudos, as BRS apresentam crescimento satisfatório em uma faixa de pH entre 5,0 e 9, com pH ótimo entre 7,2 e 7,8 (BARTON, 1995; HAMILTON, 1995; VIDELA, 1996). No entanto, algumas espécies desse grupo podem também se desenvolver em valores de pH mais ácidos ou mais alcalinos (pH de 2,9 e 10), embora em geral, com menor atividade metabólica. Segundo Colleran et al., (1998), o aumento do pH de 6,8 a 8,5 resulta em elevação do nível de tolerância ao  $H_2S$  pelas BRS. Nesse caso, para Postgate (1984), há que se considerar que culturas de BRS são mais tolerantes a condições extremas.

Por essa razão, Baskaran e Nemati (2009) afirmam que a indústria de petróleo é uma das prejudicadas pela produção de sulfeto biogênico, o qual causa a acidificação de petróleo em reservatórios, associada à corrosão de estruturas de grande porte como plataformas marinhas e dutos de transporte. Esses autores concluem que esse setor industrial investe recursos de grande monta e foca a prevenção ou o controle de BRS nos diferentes estágios de produção, transporte e processamento de óleos crus e seus derivados.

A atenção de Moreira e Siqueira (2002) volta-se para os fungos, por representarem entre 70 e 80% da biomassa microbiana do solo e por sua ocorrência estar condicionada a

fatores como pH, umidade e quantidade de matéria orgânica. Além disso, os fungos são uma complexidade enzimática que permite capacitá-los a utilizar muitos tipos de substâncias químicas, sejam essas complexas ou simples.

É importante ressaltar que os fungos crescem em ambientes adversos para a maioria das bactérias (baixa umidade e pH ácido) e são, na maioria das vezes, produtores de ácidos orgânicos, vindo posteriormente a corroer as superfícies metálicas por eles colonizadas e também servirão de fonte de carbono e energia para as BRS.

### 5.2.3.3 Métodos de proteção contra a corrosão

A estrutura metálica enterrada é submetida à corrosão eletroquímica pelo contato com o eletrólito solo e, por isso, é fundamental haver uma proteção por barreira contra a corrosão, como, por exemplo, o uso de um revestimento protetor, para evitar danos e garantir a continuidade operacional do processo.

O mesmo entendimento tem Gomes (2013) ao defender o uso do revestimento pela sua finalidade específica de formar uma barreira protetora, isolante, entre o metal e o solo ou água e, com isso, impedir o funcionamento das pilhas de corrosão, por saber-se que desde o momento em que as correntes de corrosão sejam impedidas de circular através do solo, a corrosão cessa totalmente. Contudo, mesmo os revestimentos de boa qualidade possuem falhas; a despeito de serem bem especificados e aplicados com o máximo rigor, mediante preparo adequado da superfície, aplicação de *primer* conveniente, inspeção com *holiday detector* e reparos, por causa da porosidade normal dos materiais utilizados, dos danos resultantes do transporte, manuseio e instalação, e da precariedade das conexões soldadas, as quais muitas vezes são revestidas por meio de processo manual.

Destaca-se também, na redução da eficiência do revestimento protetor nas tubulações enterradas, a ação das variações das condições do solo, a qual acelera o envelhecimento da material isolante, cria falhas e permite que as correntes de corrosão passem por essas falhas e, porventura, perfurem a tubulação.

Na concepção de Dutra e Nunes (2006), os principais revestimentos externos utilizados para tubulações enterradas ou submersas (para uma vida útil de 20 anos), em combinação com proteção catódica nos diversos tipos de equipamentos, apresentam vários graus de eficiência média, ao longo da vida útil, conforme se descreve a seguir.

Existe a compreensão de que o revestimento tripla camada (polietileno extrudado, polipropileno extrudado e epóxi em pó) tem eficiência usual de 99% (inicial) e de 97% (final). É importante lembrar que para esses revestimentos de alta resistividade, a aderência é quesito muito importante porque caso ocorra falha de aderência, isso permitirá a permeação de água na interface tubo/revestimento e o surgimento de processo corrosivo, mesmo que haja proteção catódica.

Dutra e Nunes (2006) relatam que o revestimento de polietileno extrudado, além de ser muito utilizado, possui excelente eficiência, mas não se deve esquecer que existem outros como o de esmalte de piche de carvão, cuja eficiência usual é de 98% inicial e de 95% final; o simples, de 99% inicial e de 97% final; o revestimento com asfalto com eficiência usual de 94% inicial e de 60% final, com revestimento duplo, dentre outros.

Mesmo que a tubulação enterrada tenha o melhor revestimento aplicado, ainda não é suficiente devido às falhas existentes e, por isso, requer um sistema de barreira protetora complementar através do sistema de proteção catódica para o efetivo combate à corrosão eletroquímica. É evidente que para se conhecer o sistema de proteção catódica é necessário se entender o mecanismo da corrosão eletroquímica.

Para isso contribuem Dutra e Nunes (2006), ao definirem que a corrosão eletroquímica acontece quando se tem uma estrutura em contato com um eletrólito, por surgirem pilhas de corrosão, as quais criam áreas anódicas e catódicas que possam ser de responsabilidade do metal ou do meio. Logo que essas áreas são criadas, em presença do eletrólito, tem-se o fluxo de corrente que constitui a corrosão eletroquímica. Para combater esse tipo de corrosão aplica-se a proteção catódica e evita-se a deterioração do material, por ser uma técnica que torna as reações de corrosão termodinamicamente impossíveis.

Na mesma linha de entendimento, Baptista e Castinheiras (2009) também defendem o uso da proteção catódica para combater a corrosão de instalações metálicas enterradas ou submersas, a qual é bastante empregada atualmente a custo reduzido, se comparada ao valor dessas instalações. Aplica-se essa técnica para o combate à corrosão de dutos em tanques enterrados e submersos, embarcações, estacas metálicas de píeres, tanques e armazenamento (superfície interna e superfície externa do fundo), grelhas e aterramentos de torres de transmissão de energia elétrica, trocadores de calor, plataformas de exploração ou produção, armaduras de aço do concreto de pontes, viadutos, píeres etc. Em resumo, o princípio básico de funcionamento da proteção catódica consiste na aplicação de uma corrente elétrica CC

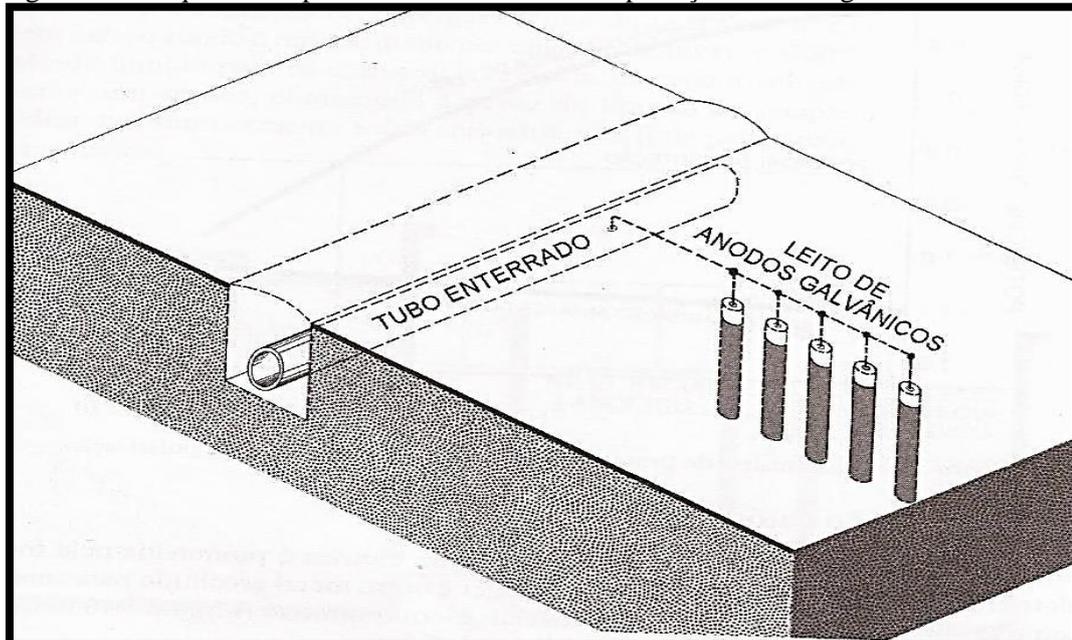
(corrente contínua) na superfície metálica da estrutura a proteger, em intensidade suficiente para reduzir seu potencial eletroquímico a valores desprezíveis, menores que 0,01mm/ano.

O que caracteriza um sistema de proteção catódica é a existência do ânodo e do cátodo dentro de um mesmo eletrólito para que esse último possa conduzir corrente elétrica e, ainda, a ligação elétrica entre o ânodo e cátodo.

Segundo Gentil (2007), para aplicar a proteção catódica são utilizados dois sistemas, ambos baseados no mesmo princípio de funcionamento, o de injeção de corrente elétrica na estrutura através do eletrólito, através da proteção catódica galvânica por ânodos galvânicos ou de sacrifício, e a proteção catódica por corrente impressa ou forçada.

A proteção galvânica é caracterizada por promover corrente elétrica por meio de uma força eletromotriz entre o material do ânodo e o sistema a ser protegido, devido à diferença dos seus potenciais eletroquímicos. Normalmente são utilizadas as ligas de Zn e de Mg por permitirem maior diferença de potencial em relação aos materiais metálicos a serem protegidos (Figura 12).

Figura 12 – Esquema simplificado de um sistema de proteção catódica galvânica



Fonte: Dutra e Nunes (2006).

No sistema de proteção galvânica ocorrem diferenças de potenciais muito pequenas e para que uma estrutura enterrada possa ser protegida é preciso haver baixa resistência global do sistema. Ou seja, um sistema de proteção catódica será eficaz, caso sejam utilizados ânodos de magnésio, quando o solo ou a água do mar apresentar resistividade elétrica muito

baixa, da ordem de no máximo 6.000  $\Omega\cdot\text{cm}$  e, caso sejam utilizados ânodos de zinco, a resistividade elétrica deverá ser de no máximo 1.500  $\Omega\cdot\text{cm}$ . Como desvantagens, possui reposição excessiva de ânodos e a impossibilidade de regular a corrente de proteção.

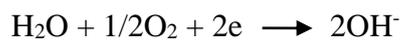
Segundo Gentil (2007), as reações que se passam nos sistemas de proteção catódica galvânica são:

#### Área anódica

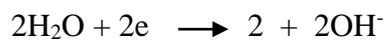


#### Área catódica

a) Aerada



b) Não-aerada



#### Produtos de corrosão



No processo acima são gerados produtos de corrosão, mas existe outro processo em que o fluxo de corrente fornecido pela fonte geradora de corrente elétrica, oriunda de uma força eletromotriz, usualmente dos retificadores, os quais, alimentados com corrente alternada, fornecem a corrente elétrica contínua necessária à proteção da estrutura metálica. A corrente elétrica é dissipada no eletrólito através de ânodos especiais considerados inertes (Tabela 1).

Tabela 1 - Aplicações típicas dos ânodos inertes

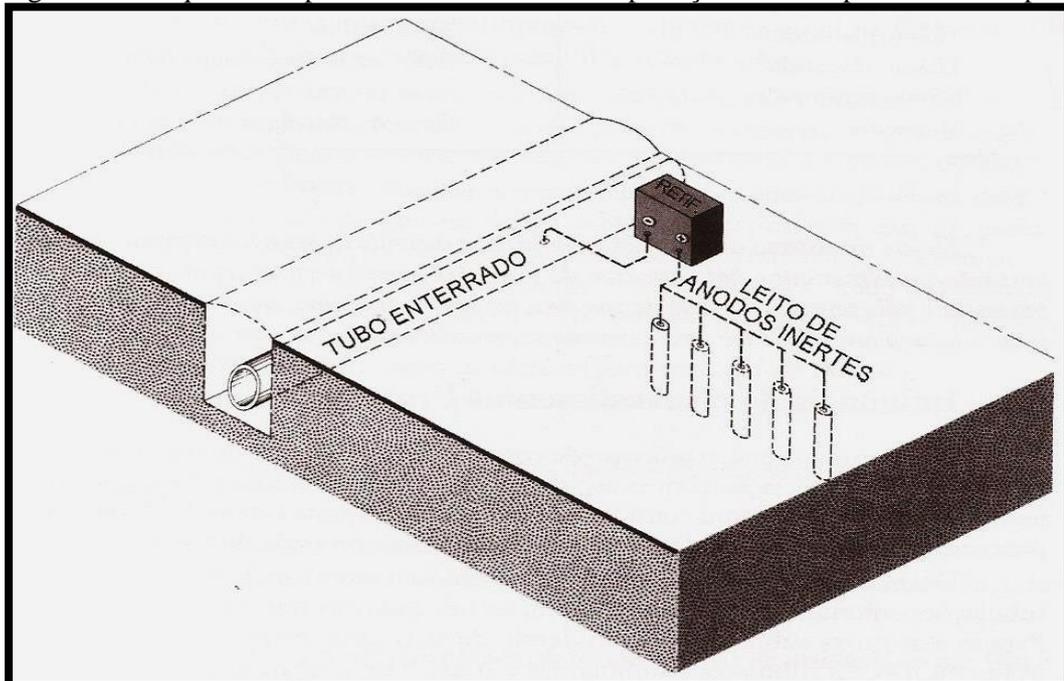
Ânodo	Aplicações
Grafite	Solos, água do mar não profunda e água doce
Ferro-silício (14,5% Si)	Solos ou água com teor de cloreto inferior a 60 ppm
Ferro-silício-cromo (14,5% Si, 4,5% Cr)	Solos, água do mar, fundo do mar ou água doce
Chumbo-antimônio-prata (93% Pb, 6% Sb, 1% Ag)	Água do mar, suspensos, sem tocar o fundo do mar
Titânio, nióbio ou tântalo platinizados (Ti-Pt, Nb-Pt ou Ta-Pt)	Solos, água doce, água do mar e concreto (na proteção das armaduras de aço)
Titânio revestido com óxidos mistos de metais nobres como cério	Solos, água doce, água do mar e outros eletrólitos
Magnetita	Solos, água doce e água do mar
Ferrita	Solos, água doce e água do mar
Ânodo polimérico anodefex	Solos (tubulações nuas ou com revestimento deficiente)

Fonte: Adaptado de Gentil (2007).

Gentil (2007), respaldado em sua vasta experiência, vê uma grande vantagem no método por corrente impressa em razão de o retificador de corrente poder ter a potência e a tensão de saída de que se necessite, em função da resistividade elétrica do eletrólito. Isso é de grande valia porque esse método se aplica à proteção de estruturas em contato com eletrólitos de baixa (3.000 a 10.000  $\Omega$ .cm), média (10.000 a 50.000  $\Omega$ .cm), alta (50.000 a 100.000  $\Omega$ .cm) e altíssima (acima de 100.000  $\Omega$ .cm) resistividade elétrica.

A Figura 13 mostra, de forma simplificada, a aplicação comum de sistema de corrente impressa. Gentil (2007) insiste em dizer que os ânodos inertes são enterrados no solo e há necessidade, na maioria das vezes, de envolvê-los com enchimento condutor de coque metalúrgico moído, com resistividade elétrica máxima de 100  $\Omega$ .cm, como forma de diminuir a resistência de aterramento para ajudar na passagem da corrente elétrica do ânodo para o solo e frear o desgaste do ânodo, porque o enchimento condutor bem compactado proporciona descarregar grande parte da corrente diretamente do coque metalúrgico para o solo.

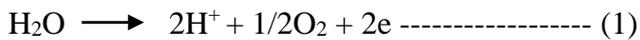
Figura 13 – Esquema simplificado de um sistema de proteção catódica por corrente impressa



Fonte: Dutra e Nunes (2006).

Segundo Gentil (2007), as reações que se passam no sistema de proteção catódica por corrente impressa são:

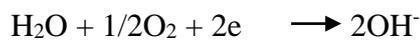
#### Área anódica



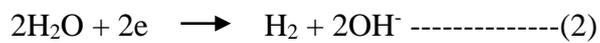
(em meios com concentração elevadas de cloreto pode ocorrer a formação de cloro devido à reação  $2\text{Cl}^- \longrightarrow \text{Cl}_2 + 2e$ )

#### Área catódica

a) Aerada



b) Não –aerada



Verifica-se, neste caso, que ocorre praticamente a eletrólise da água, pois forma-se hidrogênio e oxigênio, conforme equação

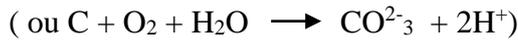


Resultante da soma (1) e (2).

Se o ânodo não for totalmente inerte, poderá, ao longo do tempo, ocorrer oxidação do metal (M), observando-se a reação



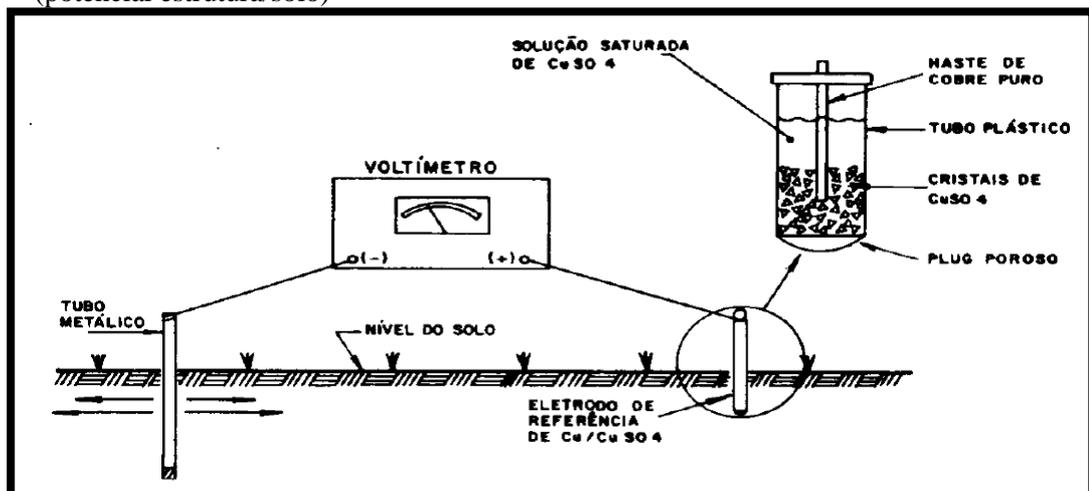
Ou, em casos de ânodos de grafite (C)



Para se complementarem as informações que tratam dos componentes da proteção catódica, a NBR 15589-1 (2011) flexibiliza ao dizer que os leitos de ânodos de um sistema de proteção catódica (PC) por corrente impressa podem ser do tipo poço profundo ou superficial e devem ser projetados e localizados de maneira a atender aos seguintes requisitos: a massa e a qualidade do material devem ser adequadas para a vida útil especificada no projeto do sistema de PC; e a resistência à terra remota de cada leito de ânodos deve permitir que a demanda de corrente máxima prevista não seja superior a 70% da capacidade de tensão da fonte de CC durante a vida útil de projeto do sistema de PC.

Gomes (2013) revela que existe uma diferença de potencial entre o tubo e o solo. Essa diferença de potencial, ou seja, potencial natural, pode ser medida com facilidade por meio de um voltímetro e um eletrodo de referência, tal como o eletrodo de cobre/sulfato de cobre ( $Cu/CuSO_4$ ), utilizado na prática para eletrólitos tipo solo, conforme a Figura 14. Em seguida, o mesmo autor destaca que para determinado tipo de solo cada metal apresenta um potencial diferente, conhecida como Série Galvânica Prática (Tabela 2).

Figura 14 – Medição de potencial em relação ao solo, de qualquer material metálico (potencial estrutura/solo)



Fonte: Gomes (2013).

Tabela 2 – Potenciais típicos normalmente observados em solos neutros e água, medidos em relação ao eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>

<b>Série Galvânica Prática</b>	
<b>Metal</b>	<b>Potencial volts</b>
Magnésio comercialmente puro	- 1,75
Liga de magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	- 1,60
Zinco	- 1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	- 1,05
Alumínio comercialmente puro	- 0,80
Aço (limpo)	- 0,5 a - 0,80
Aço enferrujado	- 0,20 a - 0,50
Ferro fundido (não grafitizado)	- 0,50
Chumbo	- 0,50
Aço em concreto	- 0,20
Cobre, bronze, latão	- 0,20
Ferro fundido com alto teor de silício	- 0,20
Carbono, grafite, coque	+ 0,30

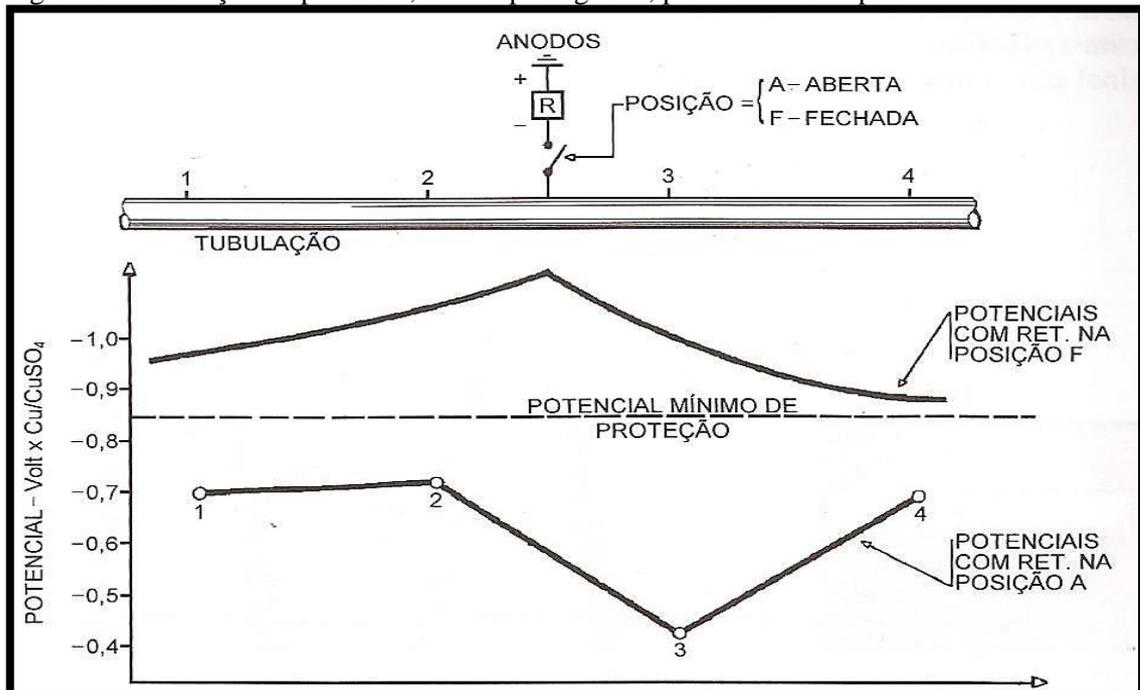
Fonte: Adaptado de Gentil (2007).

Quanto aos eletrodos de Cu/CuSO<sub>4</sub>, Borba et. al., (2006) afirmam que esses são usados principalmente para a medição de potenciais no solo e em água doce; por meio da utilização desses eletrodos é possível avaliar a condição do material metálico, isto é, verificar se há corrosão, se há influência de correntes de interferência ou se a estrutura está protegida.

É de suma importância saber se há ou não corrosão em uma estrutura e, para isso, existem diversos critérios atualmente. O mais indicado deles e utilizado em todo o mundo é o do potencial negativo mínimo entre a estrutura e o eletrólito utilizando-se um eletrodo de referência adequado.

Para compreender melhor o critério do potencial negativo mínimo, Dutra e Nunes (2006) explicam que ao se utilizar determinado eletrodo como referência, para que a estrutura esteja protegida contra a corrosão deverá estar sempre mais negativa do que aquele valor mínimo estabelecido para a estrutura, em relação ao eletrodo considerado (Figura 15). Então, o potencial negativo mínimo de proteção adotado para o aço é -0,85V, em relação à semicélula de Cu/CuSO<sub>4</sub>; em relação à semicélula de Ag/AgCl é -0,8V e em relação ao eletrodo de calomelano saturado é -0,77V (ECS).

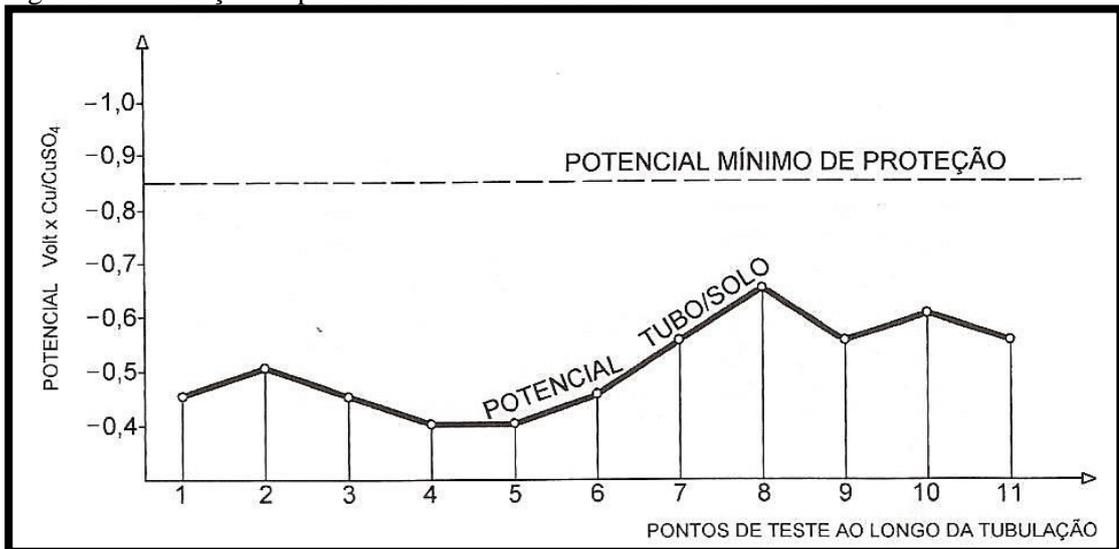
Figura 15 – Elevação do potencial, no campo negativo, para eliminar as pilhas de corrosão



Fonte: Dutra e Nunes (2006).

Para se ampliar o conhecimento sobre o critério do potencial negativo mínimo no caso de dutos enterrados, utiliza-se o potencial de polarização “OFF” relacionado ao tipo de resistividade elétrica do solo e a análise dos potenciais dos pontos ao longo da diretriz podem ser representados em um gráfico em função da distância (Figura 16). Dutra e Nunes (2006) destacam outro ponto importante, o do “potencial remoto”, muito usado em tubulações enterradas, o qual consiste em se colocar o eletrodo afastado a certa distância. O seu conceito fundamenta-se na corrente de proteção catódica injetar gradientes de tensão na superfície do solo.

Figura 16 – Variação do potencial com a distância entre o tubo e o solo



Fonte: Dutra e Nunes (2006).

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

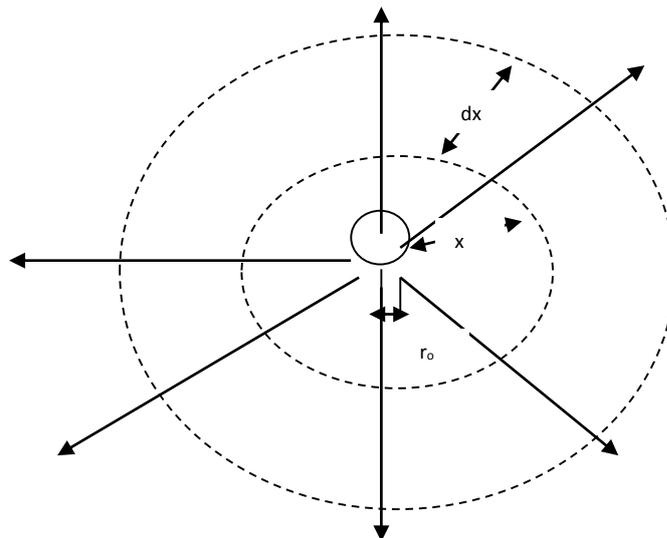
Este capítulo tem como objetivos apresentar materiais, critérios e redefinição da escolha das zonas de estudo e equipamentos utilizados durante a realização dos experimentos, assim como descrever todas as metodologias adotadas, em cada experimento realizado.

### 6.1 DEFINIÇÃO DA ESCOLHA DAS ZONAS DE ESTUDO

Foram escolhidos 3 (três) gasodutos em operação, os quais fazem parte da malha de distribuição de gás natural canalizado da Bahia, nas regiões do Polo Petroquímico de Camaçari, Candeias e Santo Amaro, devido às configurações do sistema de proteção catódica de corrente impressa que possuem o distanciamento entre o leito de ânodos e o duto terrestre protegido bem menor que 100 m, ou seja, menor que a prática recomendada pela empresa responsável dos dutos de transporte no Brasil.

Para se avaliar a influência da proximidade de um leito de ânodos na distribuição de potenciais ao longo de um duto é necessário estudar, *a priori*, a variação do potencial do solo em função da distância de um eletrodo dispersor de corrente. O caso mais simples é o de um eletrodo metálico esférico de raio  $r_0$ , imerso em um meio infinito de resistividade  $\rho$  (Figura 17).

Figura 17 – Eletrodo metálico esférico de raio  $r_0$  imerso em um meio infinito de resistividade  $\rho$



Fonte: Próprio autor (2015).

A variação do potencial com a distância é dada por:

$$dV = (\rho dx / 4\pi x^2), \quad (1)$$

em que  $dV$  é o diferencial do potencial,  $\rho$  é a resistividade do meio onde se encontra o eletrodo metálico e  $x$  é a distância entre o ponto considerado e o centro da esfera condutora de raio  $r_0$ .

À medida que a distância  $x$  tende para o infinito, o potencial tende a um valor limite dado por

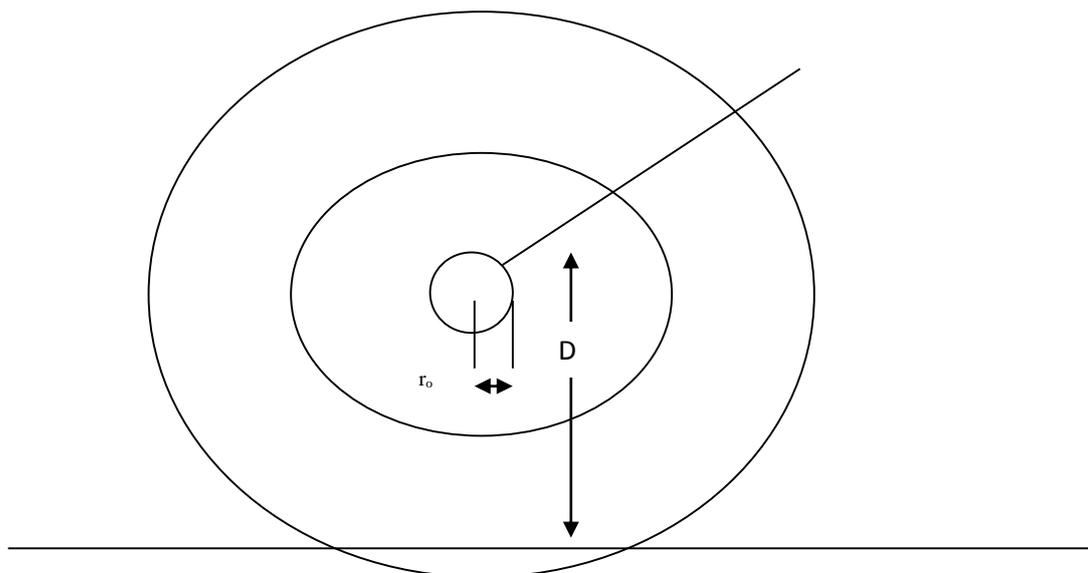
$$V_L = \rho / 4\pi r_0 \quad (2)$$

A variação do potencial em função do raio do eletrodo esférico condutor pode ser obtida pela integração de (1) entre os limites  $r_0$  e  $nr_0$ . Assim:

$$V = (1 - 1/n) \cdot V_L \quad (3)$$

A expressão (3) mostra que se “ $n$ ” for suficientemente grande, quase toda a resistência do eletrodo se concentra em uma distância de  $nr_0$  do centro do eletrodo metálico. Em termos práticos, a partir daí as variações de potencial são desprezíveis e sua influência em um duto que por aí passe é desprezível (Figura 18).

Figura 18 – Variações de potencial e sua influência sobre o duto



Fonte: Próprio autor (2015).

DUTO

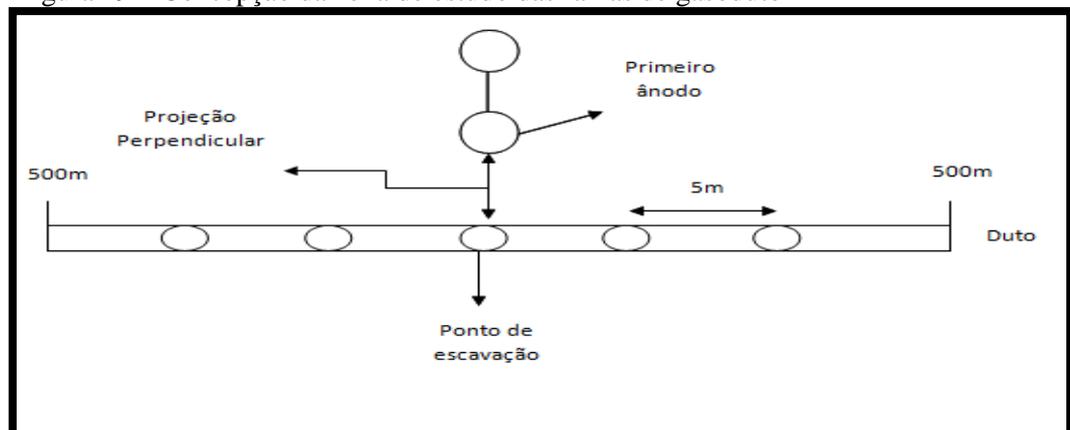
Assim, definiu-se uma zona de estudo nas três faixas de gasodutos para a medição de resistividade do solo, coleta de amostras em diferentes pontos nos quais o duto foi enterrado para análise física, química, microbiológica e medição de potencial tubo/solo pelo método de inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo.

A escolha dos Gasodutos Tronco – Feira, trecho Santo Amaro ( $\phi$  8”); Polo I ( $\phi$  4”) e Candeias ( $\phi$  2”), deveu-se à maior proximidade do leito de ânodos com o duto terrestre protegido para comprovar o objetivo desse trabalho.

## 6.2 CONCEPÇÃO DA PESQUISA

Em cada faixa de gasoduto inicialmente foram verificados o retificador, a chave interruptora de corrente (ON/OFF) e a localização, através de escavação manual, do primeiro ânodo do leito de ânodos. Ressaltamos que a chave interruptora de corrente somente não foi instalada no sistema de proteção catódica que protege a faixa do gasoduto Tronco-Feira, trecho Santo Amaro, porque o fabricante do equipamento ainda não a havia enviado. A partir do primeiro ânodo projetou-se uma perpendicular em relação ao gasoduto protegido; este ponto foi considerado o marco zero, em que se definiu um raio de até 500 m para a medição de potencial tubo/solo pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo e como o primeiro ponto escavado na diretriz do duto. A partir deste marco zero escavaram-se sobre o duto dois pontos no sentido do fluxo e mais dois no sentido contrário ao fluxo, com a distância de 5 m entre eles (Figura 19).

Figura 19 – Concepção da zona de estudo das faixas de gasoduto



Fonte: Próprio autor (2015).

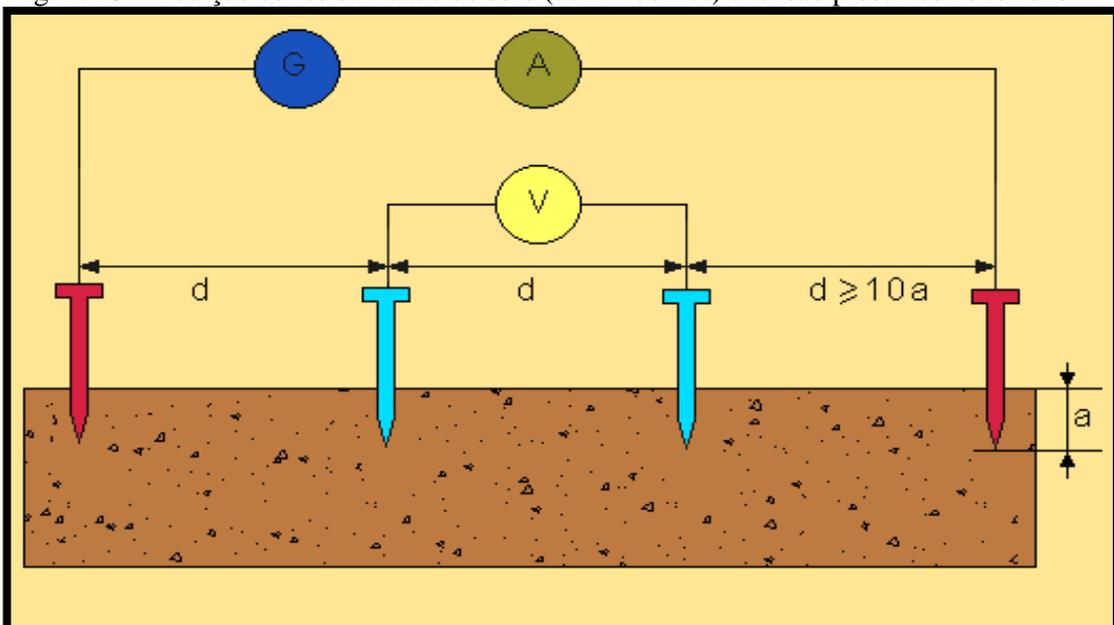
Em cada ponto escavado, a tubulação ficou exposta para análise do revestimento e da integridade física do metal e coletados verticalmente 8 níveis de profundidade para a caracterização química, física e microbiológica do perfil do solo.

### 6.3 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

A resistividade do eletrólito é fundamental para se determinar a corrosividade do solo e, conseqüentemente, para a determinação da densidade de corrente a ser utilizada na proteção do gasoduto. Apesar de existirem muitos métodos de medição de resistividade de um eletrólito, escolheu-se o método mais aplicável em solos, o dos quatro pinos.

Dutra e Nunes (2006) afirmam que Wenner desenvolveu o método dos quatro pinos, o qual requer uma corrente estabilizada eletronicamente e mede com alta precisão a tensão que aparece no terreno, pela circulação dessa corrente através da resistência de difusão do aterramento, por meio de dois pinos externos, e na medição da queda de voltagem no solo, por meio de dois pinos internos. Para isso, quatro pinos de aproximadamente 50 cm de comprimento são cravados no solo em linha reta e a espaços iguais entre eles (Figura 20). A resistividade é definida pelas fórmulas apresentadas após as figuras.

Figura 20 - Medição de resistividade do solo (com 4 bornes) e tensão presentes no terreno



Fonte: Gomes (2013).

Equação de Wenner:  $\rho = 2\pi R D$  ou  $\rho = 2\pi a V/I$

Onde:

$\rho$  = valor da resistividade elétrica média do terreno em  $\Omega \cdot \text{cm}$ ;

$\pi = 3,14159$

$R$  = valor indicado no *display*

$D$  = distância entre as estacas, expressadas em metros.

$I$  = corrente injetada pelos pinos externos, em A:

$V$  = queda de voltagem nos pinos internos, em V:

$a$  = espaçamento entre pinos, em cm

De acordo com os valores de resistividade medidos pelo método acima, pode-se classificar os eletrólitos da seguinte forma (GOMES, 2013):

- eletrólito de baixa resistividade = até 3.000  $\Omega \cdot \text{cm}$
- eletrólito de média resistividade = 3.000 a 15.000  $\Omega \cdot \text{cm}$
- eletrólito de alta resistividade = 15.000 a 50.000  $\Omega \cdot \text{cm}$
- eletrólito de altíssima resistividade = acima de 50.000  $\Omega \cdot \text{cm}$

O instrumento utilizado na medição de resistividade de solo é o terrômetro, o qual funciona por baterias ou pilhas e possui conversores que transformam a corrente contínua em corrente alternada com frequência determinada, com uma determinada tensão, as quais são as suas condições de saída. No seu *display* há quatro terminais, dos quais dois deles para injeção de corrente no solo e os outros dois para medição da queda potencial. O terrômetro utilizado no experimento atende à especificação técnica da Tabela 3 e a Figura 21 exibe a foto do equipamento.

**Tabela 3** - Dados técnicos do terrômetro utilizado no experimento

<b>Terrômetro digital MTD – 20kWe</b>	
Escala de medição	Resistências: 0-20 $\Omega$ s, 0-200 $\Omega$ s, 0-2.000 $\Omega$ s e -020K $\Omega$ s. Tensão: 0-200V
Exatidão	Medição de resistências: +(2% de leitura + 1% do fundo de escala) Medição de tensão +(2% da leitura + 1% do fundo de escala)
Resolução de leitura	0,01 $\Omega$ s na medição de resistência e 0,1 V na medição de tensão.
Potência e corrente de saída	Opera com potência de saída inferior a 0,5W e com corrente inferior a 15mA (pico a pico)

Fonte: Catálogo do fabricante, 2015.

Figura 21 – Terrômetro utilizado no experimento



Fonte: Próprio autor (2015).

#### 6.4 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO RELEVO NAS FAIXAS DE GASODUTOS

Para identificação e caracterização do relevo ocorrente na faixa de gasodutos, foram utilizadas imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e o mapa de relevo disponíveis no *site* do SRTM//Bahia Embrapa, 2015, monitorado por satélite, nas cartas SD-24-X-C e SD-24-X-A, em escala de 1:250000 para gerar arquivos DEM. Após o *download* das respectivas imagens, foram interpoladas curvas de nível com intervalos de curvas simples de 1 m e as curvas mestras de 5 m, com o auxílio do *software* Global mapper, gerado o modelo digital de terreno (MDT), desenvolvidas as análises hipsométricas e posteriormente de declividades. Concluídas as análises, foi elaborado tratamento final com auxílio do *software* Auto CAD Map para desenvolvimento do leiaute.

Antes de iniciar a técnica de identificação da proteção catódica do duto, certificou-se de sua diretriz, e por isso, consultaram-se os desenhos de construção dos gasodutos e, a seguir, utilizou-se o aparelho *pipe locator* para localizar, em campo, os gasodutos, nos quais

se injetou uma corrente nos pontos de afloramento mais próximos e caminhou-se com o aparelho sobre a diretriz estaqueando-a a cada 50 m e georreferenciando cada ponto.

#### 6.5 MEDIÇÃO DE POTENCIAL TUBO/SOLO ATRAVÉS DA INSPEÇÃO COMBINADA CIPS/DCVG PASSO A PASSO

O crescimento da tecnologia de equipamentos de coleta de dados no campo e o avanço tecnológico no tratamento dos dados pelo computador têm permitido que as medidas aplicadas no campo sejam fáceis de entender e melhorem o desempenho e a eficiência dos sistemas de proteção catódica existentes.

Na execução da inspeção combinada passo a passo, uma equipe de técnicos caminhou sobre a faixa dos gasodutos, sobre a diretriz desses, mediu o potencial tubo/solo com auxílio de hastes acopladas às semicélulas de cobre/sulfato de cobre conectadas ao equipamento registrador digital e a um ponto de teste de proteção catódica ou a outro ponto de contato com a tubulação.

Dessa maneira, a inspeção de potencial passo a passo é uma técnica de grande avanço tecnológico para aplicação em dutos enterrados e permite se obter o perfil de potencial tubo/solo em intervalos muito próximos, por exemplo, a cada metro; fornece o perfil contínuo de potenciais de energização (“ON”) e de polarização (“OFF”) da estrutura, os quais podem ser registrados ao longo de todo o duto.

A eficiência da proteção catódica dos dutos terrestres foi verificada pelas medições de potencial tubo/solo, pois o potencial é medido com um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre diretamente no solo, sobre a tubulação, onde o eletrodo e a tubulação são conectados a um voltímetro de alta impedância interna.

Para saber se os dutos estavam ou não protegidos, foi necessário medir o potencial “OFF” que ocorre ao se conseguir minimizar o erro da queda ôhmica  $IR$ , onde não existem correntes de interferência, pois a queda  $IR$  é substancialmente reduzida imediatamente após o desligamento da corrente de proteção catódica e, a partir daí, a polarização catódica, ou variação do potencial na interface tubo/solo, decaiu lentamente.

Para que o potencial de polarização fosse verdadeiro, todas as fontes de correntes foram simultaneamente sincronizadas para ligar e para desligar. O período de sincronismo (liga-desliga) utilizado no experimento foi 12 segundos ligado e 4 segundos desligado.

Ou seja, para que houvesse a sincronia dos desligamentos e religamentos rápidos foram instaladas chaves sincronizadoras via satélite, interligadas aos retificadores. E para armazenamento dos dados dos potenciais tubo/solo foi utilizado um instrumento digital de elevada precisão, denominado milivoltímetro (Figura 22), desenvolvido para auxiliar a engenharia de integridade de tubulações em inspeções pelo método do Gradiente de Potencial (DCVG), bem como as inspeções de potencial passo a passo (CIPS). Sua integração com GPS permite a localização precisa de defeitos em revestimentos e pontos com deficiência de proteção catódica.

A inspeção passo a passo aplicada no experimento possui um sistema combinado CIPS/DCVG, em que o DCVG, conforme entendimento de Dutra e Nunes (2006), quando aplicado sobre a superfície do solo fornece detalhadamente o perfil da diferença de potencial entre as semicélulas de cobre-sulfato de cobre e tem a finalidade de identificar defeitos no revestimento do gasoduto. A execução da inspeção passo a passo só é possível quando o operador possui a aparelhagem completa conforme a Figura 23.

Figura 22 - Modelo de milivoltímetro digital utilizado no experimento



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 23 – Equipamento completo para medição combinada CIPS/DCVG passo a passo



Fonte: Próprio autor (2015).

A bobina de cobre (Figura 24) serve para manter a ligação entre a mochila e a estação de gás natural para garantir as leituras dos potenciais tubo/solo, no decorrer da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo. Os bastões cujas pontas porosas são parte integrante da semicélula que contém a solução  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , essa especialmente para uso em eletrólitos como solo, garantem a leitura do potencial tubo/solo (Figura 25). O GPS integrado à mochila (em destaque na foto) deve estar sincronizado com o GPS da chave interruptora de corrente sincronizada via satélite, com o objetivo de georreferenciar cada medida lida durante a inspeção (Figura 26 e Figura 27).

Figura 24 – Bobina de cobre na mochila



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 25 – Bastões com os eletrodos de referência



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 26 – Mochila com GPS em destaque



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 27 – Destaque do GPS



Fonte: Próprio autor (2015).

## 6.6 PROCEDIMENTOS DE COLETAS E ANÁLISES DOS SOLOS

As amostras de solo foram coletadas das faixas de gasodutos instalados nos municípios do Polo Petroquímico de Camaçari, Candeias e Santo Amaro para determinar e avaliar as características físicas, químicas e biológicas por meio de amostras coletadas no perfil de 0 até 1,8 m, com intervalos de 20 cm, através de perfis do solo por escavação e tradagem, utilizado um trado holandês com caçamba de altura de 20 cm, diâmetro de 6cm e volume de 560 cm<sup>3</sup> em valas no leito de ânodo determinadas em cada faixa de gasoduto,

conforme fotografias no detalhamento metodológico, mais adiante. Com o *pipe locator* foram aferidas a diretriz e a profundidade dos dutos.

As amostras foram identificadas, acondicionadas em bolsas plásticas e enviadas para laboratórios da Embrapa Fruticultura, em Cruz das Almas, e para a Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Dentre as análises, foram realizadas: caracterização física, química e microbiológica [granulometria, argila dispersa, textura, umidade gravimétrica, cátions, ânions, capacidade de troca catiônica (CTC) matéria orgânica, pH, alumínio trocável, soma de bases (S), saturação de bases (V%) e condutividade elétrica]. As amostras coletadas em campo foram destorroadas, acondicionadas em bandejas, levadas a estufas para secagem até atingir peso constante. A umidade gravimétrica foi realizada a partir de coleta de amostra em bolsas plásticas hermeticamente fechadas para representar o conteúdo de umidade do solo no momento da coleta e na realização do passo a passo.

### **6.6.1 Procedimento analítico para geração dos dados de caracterização física e química dos solos**

Adotou-se os procedimentos do Manual de Análises Químicas de Solo, Plantas e Fertilizantes da Embrapa (2009).

#### **6.6.1.1 Descrição da marcha analítica de caracterização química e física**

##### **6.6.1.1.1 pH em água**

###### **6.6.1.1.1.1 Princípio**

O potencial hidrogênio iônico no solo foi determinado pela medição eletroquímica da concentração efetiva de íons  $H^+$  na solução do solo, por meio de eletrodo combinado, imerso em suspensão solo água na proporção 1:2,5. Adotaram-se como pontos de curva de calibração, solução-padrão pH - 4,00 (faixa acidez) e solução-padrão pH-7,00 (faixa alcalina) diluídas, conforme orientação do fabricante do equipamento potenciômetro medidor de pH, o potenciômetro com eletrodo combinado.

#### **6.6.1.1.2 Procedimento**

Colocaram-se 10 cm<sup>3</sup> de terra fina seca ao ar (TFSA) em copo de plástico numerado de 100 ml e adicionaram-se 25 ml de água destilada ou deionizada. Procedeu-se à agitação da mistura com bastão individual, deixou-se em repouso por uma hora, voltou-se a agitar novamente cada mistura com bastão de vidro e, em seguida, mergulhou-se o eletrodo na suspensão homogeneizada e efetuou-se a leitura do pH diretamente no painel eletrônico do potenciômetro.

#### **6.6.1.1.2 Determinação de cálcio, magnésio e alumínio**

##### **6.6.1.1.2.1 Princípio**

O cálcio e o magnésio trocáveis são extraídos por solução de cloreto de potássio de concentração 1 molar. O alumínio trocável foi determinado por titulação, em uma fração do extrato, o alumínio com o hidróxido de sódio, na presença do azul-de-bromotimol como indicador.

Em outra fração do extrato são titulados o cálcio e o magnésio por complexometria com EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético), ou seja, um composto orgânico que atua como agente quelante e desenvolve complexos muito estáveis com muitos íons metálicos; para isso usa-se como indicador o negro-de-eriocromo – T. Em uma terceira alíquota, faz-se a determinação do cálcio por complexometria com EDTA e usa-se como indicador o ácido calconcarbônico.

##### **6.6.1.1.2.2 Extração**

Foram colocados 10 cm<sup>3</sup> de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) em *elenmeyer* de 125 ml, adicionaram-se 100 ml de solução de cloreto de potássio. Agitou-se durante 5 minutos em agitador horizontal e deixou-se decantar durante uma noite, depois de desfazer os montículos que se formam no fundo dos *elemeyer*.

### **6.6.1.1.3 Matéria orgânica**

#### **6.6.1.1.3.1 Princípio**

Adotou-se o método volumétrico do bicromato de potássio. O carbono da matéria orgânica da amostra é oxidado a  $\text{CO}_2$  e o cromo (Cr) da solução extratora é reduzido da valência +6 ( $\text{Cr}^{+6}$ ) a valência +3 ( $\text{Cr}^{+3}$ ). Na sequência, fez-se a titulação do excesso do bicromato de potássio pelo sulfato ferroso amoniacal.

#### **6.6.1.1.3.2 Extração**

Tomaram-se aproximadamente 20 g de TFSA triturada em grãos para passar em peneira de 80 *mesh*. Pesou-se uma fração de 0,5 g de TFSA triturada e colocada em *elenmeyer* de 250 ml e, em seguida, pipetados 100 ml da solução de bicromato de potássio, mas somente 0,2 ml foram adicionados à amostra de solo. Colocou-se um tubo de ensaio de 25 mm de diâmetro e 250 mm de altura, cheio de água e protegido com papel aluminizado, na boca do *elenmeyer*, o qual funcionou como condensador (dedo fino); em seguida, a mistura foi aquecida em placa elétrica, até a fervura branda, durante 5 minutos.

#### **6.6.1.1.3.3 Determinação**

O procedimento foi deixar esfriar, juntar 80 ml de água destilada ou deionizada (medida em proveta), 1 ml de ácido ortofosfórico e 3 gotas do indicador difenilamina a 10 g/l. Em seguida, foi titulada com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,05; a viragem ocorre quando a cor azul desaparece, passando à verde.

### **6.6.1.1.4 Acidez potencial (Hidrogênio + Alumínio)**

#### **6.6.1.1.4.1 Princípio**

A determinação por extração potencial da acidez do solo foi realizada com solução de acetato de cálcio e titulação alcalimétrica do extrato; a extração do  $\text{H} + \text{Al}^{+3}$  pelo acetato de cálcio é baseada na propriedade tampão do sal decorrente da presença de ânions acetatos. Com o pH ajustado em 7,0, esse extrai grande parte da acidez potencial do solo até esse valor de pH.

#### **6.6.1.1.4.2 Extração**

Foram colocados 5 cm<sup>3</sup> de TFSA em *elenmeyer* de 125 ml, adicionados 75 ml de solução de acetato de cálcio 0,5 M, pH 7,1-7,2. O *elenmeyer* foi arrolhado imediatamente e agitado 5 vezes durante o dia. Deixou-se decantar durante uma noite, após desfazerem-se os montículos que se formam por precipitação no fundo dos *elenmyers*.

#### **6.6.1.1.4.3 Determinação**

Foram pipetados 25 ml do extrato e passados para um béquer de 100 ml. Procedeu-se à titulação com solução de hidróxido de sódio (NaOH a 0,025 M), usando-se como indicador 3 gotas de fenolftaleína a 10 g/l. A titulação se completou quando o líquido, incolor, apresentou cor rosa persistente. Foi efetuada prova em branco, estabelecendo-se o ponto de cada amostra em comparação com a tonalidade róseo obtido na titulação.

#### **6.6.1.1.5 Extração de fósforo, potássio, sódio e micronutrientes**

##### **6.6.1.1.5.1 Princípio**

Utilizou-se a solução extratora de Mehlich 1, também chamada de solução duplo-ácida ou da Carolina do Norte, constituída por uma mistura de ácido clorídrico (HCl 0,05 M) + ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 M. O emprego dessa solução como extratora de fósforo, potássio, sódio e micronutrientes do solo baseia-se na solubilização desses elementos pelo efeito de pH entre 2 e 3; o papel do Cl é o de restringir o processo de reabsorção dos fosfatos recém-extraídos. Para os micronutrientes, a relação solo: extrato é de 1:5, enquanto para os demais elementos é de 1:10.

##### **6.6.1.1.5.2 Extração**

Colocaram-se 10 cm<sup>3</sup> de TFSA em *elenmeyer* de 125 ml, adicionaram-se 100 ml de solução extratora dupla-ácida (HCl 0,05 M + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 M), agitou-se durante cinco minutos em agitador horizontal circular, deixou-se decantar durante uma noite, após desfazerem-se os montículos que se formam por precipitação no fundo dos *elenmeyers*.

As Figuras 28 a 31 ilustram e demonstram detalhes das rotinas dos procedimentos metodológicos das análises realizadas nos laboratórios.

Figura 28 – Representa as amostras de solo em laboratório, leitura de pH



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 29 – Representa as amostras de solo em laboratório, secagem



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 30 - Análise de solo granulometria, textura, condutividade elétrica no laboratório de física do solo da Universidade Federal do Recôncavo (UFRB)



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 31 - Análise de solo, granulometria, textura, condutividade elétrica no laboratório de física do solo da Universidade Federal do Recôncavo (UFRB) em outra etapa



Fonte: Próprio autor (2015).

## 6.7 ESTUDOS DE CASO

### 6.7.1 Gasoduto Polo I

O estudo refere-se ao Gasoduto Polo I, de aço carbono API 5L, Grau B, diâmetro de 4", com revestimento extrudado tripla camada, extensão de 4,6 km, construído em 2001, com o sistema de proteção catódica constituído por leito de ânodos formado de 6 eletrodos de titânio com óxidos mistos de metais nobres, cujo primeiro ânodo encontra-se a 58 m do duto. As dimensões dos ânodos são 1.000 mm x 17 mm x 4 mm, encamisados em tubos de 150 mm, contendo no seu interior moinha de coque metalúrgico compactada, interligadas a um retificador Italux Ind. e Com. Ltda. REC 20.000 Tensão entrada 220v / Tensão saída 15V, A = 0,85A n° série 42/02 Freq=6Hz e uma chave interruptora de corrente sincronizada via satélite também interligada ao retificador.

A primeira etapa do experimento consistiu da identificação da diretriz do gasoduto, por meio da leitura dos gráficos gerados da técnica de identificação de falhas do revestimento realizada em 2007, do uso do *pipe locator* para identificação dos campos elétricos resultantes dos dutos (Figura 32) e do piqueteamento de identificação rápida para uma posterior passagem da inspeção passo a passo e das coletas de amostras de solo (Figura 33).

Figura 32 - Uso do pipe locator na faixa



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 33 – Piqueteamento (a cada 50m)



Fonte: Próprio autor (2015).

Na região do leito de ânodos realizou-se a medição da resistividade do solo através do terrômetro em que se detectou nas escalas de 20.00  $\Omega$  e 200.0  $\Omega$  a mesma resistência de 9,2  $\Omega$ . Em seguida, realizou-se a medição de potencial passo a passo pela equipe de integridade estrutural de equipamentos; no dia da realização dessa inspeção houve a montagem da chave interruptora de corrente e a sua interligação ao retificador com participação da equipe de elétrica para montagem do sistema.

A Figura 34 ilustra o momento em que a equipe de integridade estrutural de equipamentos anota os dados do retificador antes do início da inspeção para saber em que condições a corrente está sendo emitida para o gasoduto. Caso fossem encontradas medidas abaixo do esperado durante a inspeção dos potenciais tubo/solo, realizar-se-iam ajustes no retificador.

Figura 34 – Anotação dos dados do retificador



Fonte: Próprio autor (2015).

Para o início do teste de inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo foi necessário deixar a mochila o mais confortável possível para o operador; fixar o fio de cobre no flange da estação de gás; confirmar o sincronismo entre do GPS da mochila com o GPS da chave interruptora de corrente que se encontrava ao lado do retificador; ajustar os eletrodos de referência aos bastões e ligar o milivoltímetro para registro e acompanhamento dos potenciais tubo/solo medidos ao longo da inspeção (Figura 35).

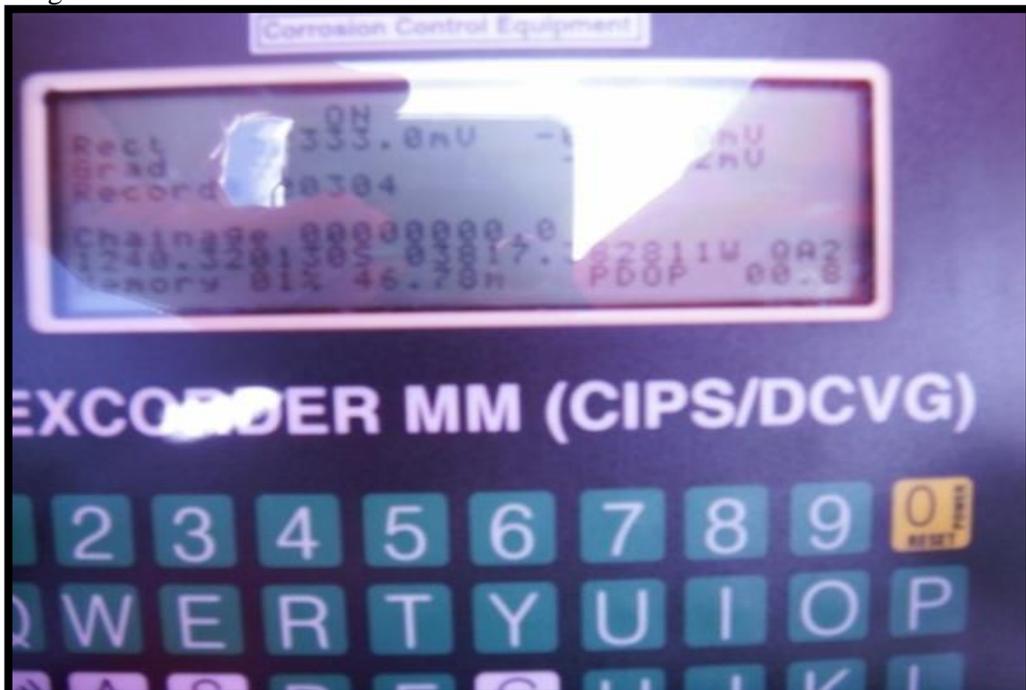
Figura 35 – Início do teste da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo



Fonte: Próprio autor (2015).

Ao longo da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo, os dados de potenciais tubo/solo são medidos pelo milivoltímetro e esses são monitorados pelo operador à medida que se realiza a inspeção (Figura 36).

Figura 36 – Leitura no milivoltímetro



Fonte: Próprio autor (2015).

A execução da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo, na qual a cada passo dado foi preciso cravar, de forma segura, as pontas porosas dos eletrodos de referência que estavam enroscadas nos bastões. E, ao se cravarem os eletrodos de referência, acionaram-se os botões vermelhos da parte superior dos bastões para que as medidas dos potenciais

tubo/solo fossem registradas para posterior análise e geração de gráficos potenciais “ON” e “OFF” *versus* distância percorrida (Figura 37).

Figura 37 – Registro da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo



Fonte: Próprio autor (2015).

Antes da escavação, para se identificar o primeiro ânodo do leito de ânodos foi necessária a verificação do leito de ânodos com o uso do equipamento utilizado para inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo (Figura 38).

Figura 38 – Verificação do leito de ânodos

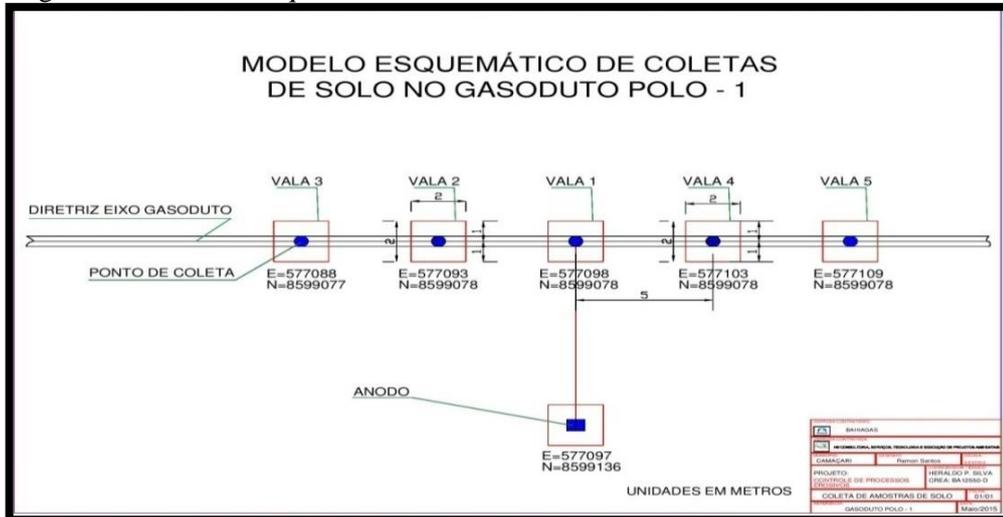


Fonte: Próprio autor (2015).

Após a medição de potencial tubo solo pelo método de inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo, realizou-se a coleta das amostras do solo para as análises físicas,

químicas e microbiológicas. Os pontos escavados estão demonstrados no modelo esquemático de coletas de solo no Gasoduto Polo I; a distância entre o primeiro ânodo e a vala 1 é de 58 m (Figura 39).

Figura 39 – Modelo esquemático de coletas de solo



Fonte: Próprio autor (2015).

Realizou-se coleta na vala 2 do Gasoduto Polo I para cada nível de profundidade, ou seja, a cada 20 cm, as quais posteriormente foram ensacadas e enviadas aos laboratórios (Figura 40).

Figura 40 – Coleta na vala 2 na faixa do Gasoduto Polo I



Fonte: Próprio autor (2015).

Realizou-se a medição por trena, de cada nível de profundidade, para coleta das amostras a cada 20 cm até chegar ao gasoduto (Figura 41).

Figura 41 - Medição dos níveis de profundidade para coleta das amostras



Fonte: Próprio autor (2015).

Realizou-se coleta na vala do primeiro ânodo do leito de ânodos, a qual seguiu o mesmo procedimento utilizado nas valas da diretriz do gasoduto (Figura 42).

Figura 42 – Coleta na vala do primeiro ânodo na faixa do Gasoduto Polo I



Fonte: Próprio autor (2015).

### 6.7.2 Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro

O estudo refere-se ao Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro, caracterizado por ser de aço carbono API 5L Grau B, diâmetro de 8", extensão de 68 km, enterrado, juntas soldadas, revestimento extrudado tripla camada com 2,7 mm de espessura, com espessura de parede no 1º Trecho de 32 km, Sch 40, 8,2 mm e 2º Trecho de 36 km Sch 20, 6,4 mm, construído em 2004, com o sistema de proteção catódica constituído por uma estação retificadora, na estação Santo Amaro, com o retificador modelo REP-1500, tipo manual, frequência 60 Hz, grau de proteção IP-43, entrada 110/220V, saída 20V, corrente 30A, alimentação monofásica, refrigerado a ar, instalado em poste, ao tempo, com os ajustes no fino 2 e no grosso 3 e por um leito de ânodos em que o primeiro ânodo está situado a 17 m do gasoduto formado com 6 eletrodos de titânio com óxidos mistos de metais nobres, tipo LIDA STRIP, nas dimensões 1.000 mm x 17 mm x 2,5 mm, encamisados em tubos de 150 mm, contendo no seu interior moinha de coque metalúrgico compactada. Esses furos estão dispostos em linha reta, com afastamento de 5 m, com 4 caixas de passagem que permitem a ligação do cabo negativo do retificador às tubulações protegidas.

As ligações elétricas entre os cabos dos ânodos e os cabos positivos foram realizadas por intermédio do cabo de cada um dos ânodos conectados ao cabo principal por meio de solda exotérmica. O isolamento dos cabos elétricos no local da conexão do cabo de cada ânodo com o correspondente cabo positivo é recomposto com o emprego de muflas plásticas. Os ramais de ligação ao gasoduto são cabos elétricos que possuem seção condutora de 10 mm<sup>2</sup> e isolamento de PVC.

A primeira etapa do experimento consistiu da identificação da diretriz do gasoduto na leitura dos gráficos gerados pela técnica de identificação de falhas do revestimento realizadas em 2007, do uso do *pipe locator* para identificação do campo elétrico oriundo dos gasodutos e piqueteamento de identificação rápida para realização da inspeção passo a passo e para coleta de amostras do solo nas faixas.

Em seguida, realizou-se a medição da resistividade do solo onde fica o leito de ânodos com espaçamento das estacas de eletrodos do terrômetro de 5 em 5 metros; o valor encontrado foi 0.16  $\Omega$  na escala de 20.00  $\Omega$ .

No dia da realização das medições dos potenciais tubo/solo pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo não foi instalada a chave interruptora de corrente sincronizada via

satélite porque o equipamento não foi entregue pelo fabricante até o momento do experimento. Entretanto, o potencial “ON” colabora em parte para a análise da influência da proximidade do leito de ânodos com gasoduto nas medições de potenciais tubo/solo.

Após as medições dos potenciais tubo/solo, nas quais os registros são mostrados no visor do milivoltímetro (Figura 43), foi realizada a coleta das amostras do solo para as análises físicas, químicas e microbiológicas. Os pontos escavados estão demonstrados no modelo esquemático de coletas de solo no Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro; a distância entre o primeiro ânodo e a vala 1 é de 17 m.

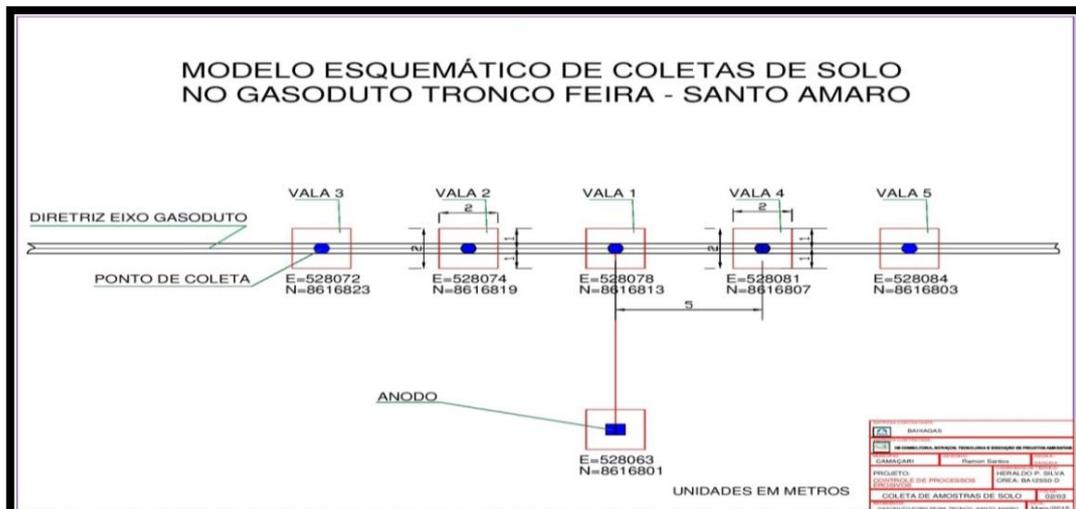
Figura 43 - Leitura do milivoltímetro



Fonte: Próprio autor (2015).

Destaca-se que na vala 1 e na vala 5 foram encontrados revestimentos danificados e, logo em seguida, recuperados (Figura 44).

Figura 44 – Modelo esquemático de coletas de solo no Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro



Fonte: Próprio autor (2015).

Realizou-se a escavação da vala 3 para preparar para a coleta de amostras de solo (Figura 45).

Figura 45 - Escavação na vala 3 na faixa do Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro



Fonte: Próprio autor (2015).

Realizou-se a coleta de amostras de solo na vala 3 por cada 20 cm de profundidade até se chegar ao gasoduto.

Figura 46 – Coleta de amostras de solo na vala 3 na faixa do Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro



Fonte: Próprio autor (2015).

### 6.7.3 Gasoduto Candeias

O estudo refere-se ao Gasoduto Candeias, de aço carbono API 5L Grau B, diâmetro de 2", extensão de 15 km, enterrado, juntas soldadas, revestimento extrudado tripla camada, construído em 2007, com o sistema de proteção catódica constituído por uma estação retificadora, com o retificador modelo e por um leito de ânodos situado a 28 m do gasoduto formado com 2 pedaços de tubo de aço carbono, 03", comprimento de 1,50 m e espaçamentos de 1,00 m de um pra outro.

A estação de gás natural que inicia o trecho do Gasoduto Candeias é o local onde o fio de cobre foi interligado e que serviu como ponto de partida para a inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo (Figura 47).

Figura 47 - A estação que inicia o Gasoduto Candeias



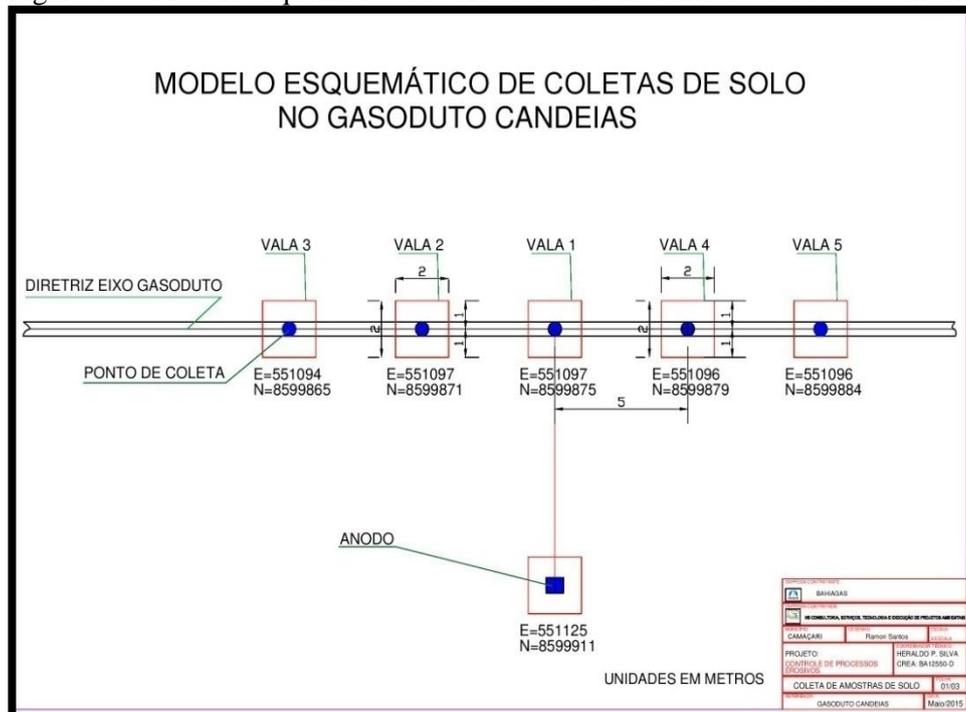
Fonte: Próprio autor (2015).

Nos pontos onde foi realizada a escavação para coletas do material, a medição da resistividade do solo utilizou-se do terrômetro e detectaram-se naquele local as seguintes medições: na escala de 20.00  $\Omega$  – 4,4  $\Omega$  e 200.0  $\Omega$  – 4,4  $\Omega$ .

Quando ocorreu a medição de potencial passo a passo houve também a montagem da chave sincronizadora e sua interligação ao retificador e contou com a equipe de integridade estrutural de equipamentos e da equipe de elétrica para montagem do sistema e da realização do teste na diretriz.

Após a medição de potencial tubo solo pelo método combinado CIPS/DCVG passo a passo, realizou-se a coleta de amostras de solo para as análises físicas, químicas e microbiológicas. Os pontos escavados estão demonstrados no modelo esquemático de coletas de solo no Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro; a distância entre o primeiro ânodo e a vala 1 é de 28 m. Destaca-se que na vala 4 e na vala 5 não foram escavados pela dificuldade da pista (Figura 48).

Figura 48 – Modelo esquemático de coletas de solo na faixa do Gasoduto Candeias



Fonte: Próprio autor (2015).

Realizou-se uma escavação por trado na vala 1 da faixa do Gasoduto Candeias para facilitar a coleta de amostras de solo (Figura 49).

Figura 49 – Tradagem na vala 1 na faixa do Gasoduto Candeias



Fonte: Próprio autor (2015).

Realizou-se a medição da profundidade da vala para coletar amostras de solo a cada 20 cm até chegar ao gasoduto (Figura 50).

Figura 50 – Medição da profundidade para coleta de amostras de solo



Fonte: Próprio autor (2015).

## 7 ANÁLISES E RESULTADOS

### 7.1 GASODUTO POLO I

#### 7.1.1 Análise e resultados sobre a identificação e caracterização do solo

A partir do STRM extraído do *site* da Embrapa, foram gerados os mapas topográficos, hipsometria, declividade e mapas temáticos de relevo e solo.

As análises topográficas e do relevo são apresentadas em mapas e uma avaliação conjunta entre as Figuras 51, 52 e 53 permite constatar que na faixa de servidão ocorrem três classes de declividades, em que predomina a classe 1, na qual o declive varia de 0 a 3% plano e suave ondulado, condição que oferece boa estabilidade e condições favoráveis para faixas de implantação e de operação de dutos. A segunda classe de declividade mais ocorrente foi a 2, na qual o declive varia de 3 a 8% ondulado, condição que requer cuidados quanto à possibilidade de ocorrência de processos erosivos, ladeiras e/ou baixadas (côncavos ou convexos) com riscos potenciais de deslizamentos e/ou acumulação de água. Em menor proporção, aparece a classe de declividade 3, na qual o declive varia de 8 a 13%, topografia mais íngreme com restrições a implantação de gasodutos por requerer cuidados preventivos para processos erosivos nas cotas altas e para inundações nas mais baixas, crista e base, respectivamente.

Figura 51 – Mapa de relevo característico da faixa de servidão do Gasoduto Polo I



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 52 – Mapa hipsométrico característico da faixa de servidão do Gasoduto Polo I



Fonte: Próprio autor (2015).

Figura 53 – Declividades ocorrentes na faixa de servidão do Gasoduto Polo I



Fonte: Próprio autor (2015).

A análise pedológica da faixa do Gasoduto Polo I foi realizada pela superposição da diretriz georreferenciada do gasoduto sobre o Mapeamento de Solos do Brasil, gerado pela Embrapa, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. A unidade pedológica ocorrente na faixa do Gasoduto Polo I é o espodossolo ferrocárbico, cuja definição e caracterização pela Embrapa (1977-1979, v.1 p.731, perfil 225) é solo com acúmulo,



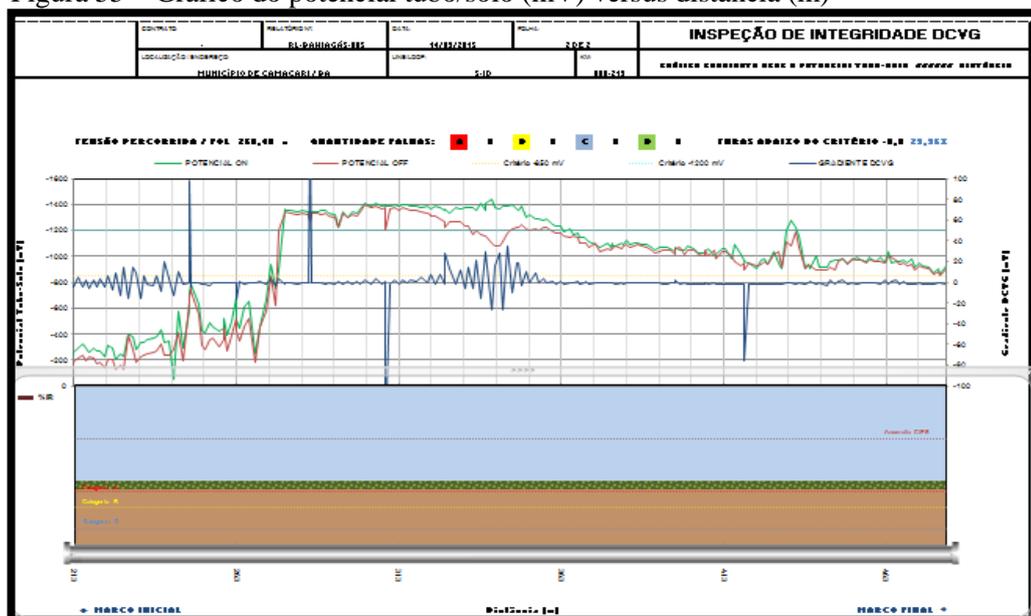
$$P = 2\pi \times 9,2 \times 5 = 28.902,6 \Omega.cm$$

Logo, pela classificação de resistividade elétrica do solo definida por Gomes (2013), esse eletrólito é de alta resistividade. Ao compararmos com o que tratam Dutra e Nunes (2006) no referencial teórico, compreendemos que nas regiões de alta resistividade surgem áreas catódicas, ou seja, áreas protegidas em que ocorre o fenômeno da redução com geração de hidróxidos e, ao mesmo tempo, essas regiões necessitam de uma corrente de proteção maior. Então, surge a necessidade de se ajustar o retificador para aumentar a corrente de proteção, considerando-se que antes dos 323 m de trajeto da inspeção passo a passo indica potencial tubo/solo abaixo do potencial mínimo de proteção de -0,85V (Figura 55).

### 7.1.3 Análise e resultados sobre a medição de potencial tubo/solo pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo

A Figura 55 ilustra o resultado da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo do Gasoduto Polo I, operado pela BAHIAGÁS, no Município de Camaçari/BA, visando à detecção de possíveis defeitos e anomalias, e também se o duto encontra-se protegido para adoção de medidas de caráter corretivo e/ou preventivo, no intuito de assegurar o cumprimento dos requisitos de operação e segurança do gasoduto.

Figura 55 – Gráfico do potencial tubo/solo (mV) versus distância (m)



Fonte: Próprio autor (2015).

Para a inspeção passo a passo foi utilizada tecnologia digital integrada, capaz de coletar simultaneamente e para cada ponto geográfico a data e hora em que a leitura foi realizada (hh:mm:ss, com precisão < 1ns), a latitude, a longitude, a altitude e os potenciais tubo/solo “ON” e “OFF”.

As anomalias verificadas são pontuais, associadas a defeitos no revestimento, como indicado pelos dados da inspeção DCVG ou possivelmente causadas por variações da resistividade do solo e da magnitude do fluxo de corrente local em concordância com Dutra e Nunes (2006).

Desde o início do trecho até a distância de 323 m existe uma grande interferência na proteção catódica, possivelmente eletromagnética devido às redes de alta tensão, por se encontrar abaixo do valor de proteção de -0,85V. É possível um ajuste grosso e fino do retificador para aumentar a corrente de proteção. Percebe-se no mesmo trecho uma possível falha no revestimento no ponto em que o “ON” e o “OFF” se afastam e ocorre um ponto de atenuação. Em quase todo o trecho o “ON” e o “OFF” caminham juntos sem haver atenuação da corrente.

A partir dos 323 m, o gráfico mostra que é reestabelecida a proteção catódica do gasoduto e entre os 323 m e 363 m há outra possível falha no revestimento devido ao afastamento entre o potencial “ON” e o “OFF” e pela perturbação do DCVG; esse é um ponto de atenuação de corrente. O importante é que esse ponto da falha encontra-se protegido catodicamente e após essa última falha até o fim da inspeção pode-se considerar que o trecho continua protegido.

#### **7.1.4 Análise e resultados sobre as amostras de solo**

Para facilitar a análise dos dados gerou-se a Tabela 4, referente aos resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo em que o duto está confinado.

Tabela 4 – Análises de variáveis no perfil do solo da superfície até a profundidade do Gasoduto Polo I

ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASODUTO POLO - 1															
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO															
Cm		Mg/dm <sup>3</sup>			Cmolc/dm <sup>3</sup>								dSm/cm	%	
PROF.	PH	P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	S	CTC	COND. ELE.SAT.	V	M.O	
0-20	4,3	12,0	30,0	1,7	1,1	0,6	0,1	3,7	0,1	1,8	5,5	0,7	33,2	3,2	
20-40	6,0	6,0	45,0	1,0	0,5	0,5	0,2	3,9	0,0	1,2	5,0	0,6	22,8	2,7	
40-60	5,0	10,0	63,0	3,2	2,0	1,2	0,1	2,3	0,1	3,5	5,8	0,3	59,8	2,3	
60-80	5,3	10,0	36,0	1,0	0,6	4,0	0,2	3,8	0,1	1,2	5,0	0,2	23,6	1,3	
80-100	5,2	9,0	34,0	1,5	1,0	0,5	0,2	2,7	0,0	1,6	4,3	0,3	37,6	1,1	
100-120	5,3	8,0	27,0	1,0	0,5	0,5	0,4	3,1	0,0	1,1	1,1	0,2	4,2	0,6	
120-140	4,3	7,0	32,0	0,9	0,5	0,4	0,2	4,0	0,0	1,0	5,0	0,2	20,4	0,3	
140-160	5,3	6,0	27,0	1,0	0,5	0,5	0,1	3,6	0,0	1,1	4,7	0,3	23,6	0,2	
VAL. MÉD.	5,1	8,5	36,8	1,4	0,8	1,0	0,2	3,4	0,0	1,6	4,5	0,4	28,1	1,4	

Fonte: Próprio autor (2015).

Os solos apresentam uma complexa atividade físico-química, geoquímica e microbiológica que o caracteriza como um eletrólito em dinâmico processo de balanço de cargas e concentrações de cátodos e ânodos. A caracterização química é fundamental para entender a dinâmica da química do solo, sua resistividade, potencial gerador de pilhas de corrosividade. Para tal, é fundamental conhecer a acidez total, espécies iônicas e suas concentrações na solução do solo, saturação de bases, capacidade de troca catiônica, percentual de matéria orgânica.

A tabela 4 demonstra que o pH ao longo do perfil do solo apresenta leve variação nos horizontes até a profundidade em que o gasoduto está confinado. Observou-se variação em uma amplitude de pH 4,3 a 6,0, portanto, revelando ambiente de pH mais ácido 4,3 no horizonte superficial onde há maior presença de matéria orgânica em decomposição e atividade de micro-organismos; em média, ao longo do perfil do solo o pH foi 5,1, logo, caracteriza ambiente agressivo potencialmente favorável à corrosão severa em metais enterrados.

Os solos, em geral, apresentam valores de pH que variam em uma amplitude de 5 a 8. O pH do solo está relacionado com a composição do material rochoso de origem, com as condições climáticas durante a pedogênese (formação do solo), com a presença de material orgânico ou poluição por atividade humana (GENTIL, 2007). Segundo Charret (2010), solos fracamente ácidos, neutros ou alcalinos e nos quais não há presença de material orgânico, portanto, não se espera haver atividade de micro-organismos (CIM); a condutividade do solo se torna uma variável importante, vez que a corrente iônica tem que percorrer grandes distâncias entre as regiões catódicas.

Assim como a acidez, a condutividade ou resistividade elétrica tem grande influência na corrosividade dos solos, então, quanto maior a resistividade dos solos menor a condutividade e tanto menor será a corrosão das estruturas enterradas. Os elementos cátodos e ânodos encontrados nas amostras coletadas de 20 cm em 20 cm do horizonte superficial até a profundidade de confinamento do duto enterrado estão expressos em unidades de concentração conforme tabela acima.

Como leitura ou análise de balanços e/ou potencial de cargas que caracterizam este perfil de solo, comentamos aqui a CTC, S- Soma de bases, V- Saturação de bases, porcentagem de matéria orgânica (MO), as quais conjuntamente e em interação com o pH, conteúdo de umidade e atividade dos micro-organismos regulam a dinâmica de resistividade, condutividade e potencial corrosivo do ambiente solo no qual o gasoduto encontra-se enterrado.

A CTC variou em amplitude entre 5,8 e 1,1 Cmolc/dm<sup>3</sup>; considera-se 1,1 valor anômalo, o valor médio representativo foi de 5,0 Cmolc/dm<sup>3</sup>. A saturação de bases V (%) variou na amplitude de 59,8 a 4,2; considera-se 4,2 valor anômalo, o valor médio representativo foi de 31,6. O reduzido conteúdo de matéria orgânica na profundidade do gasoduto é indicador de não haver atividade microbiana, portanto, condições favoráveis à biocorrosão (CIM).

A tabela 5 trata dos resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo no leito de ânodos.

Tabela 5 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo no leito de ânodos

ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASOUTO POLO - 1 ANODO															
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO															
cm		Mg/dm <sup>3</sup>		Cmolc/dm <sup>3</sup>								gSm/cm	%		
PROF.	PH	P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	S	CTC	COND. ELE. SAT.	V	M.O	
0-20	5.7	9.0	44.0	1.5	1.0	0.5	0.1	2.6	0.2	1.8	4.3	0.4	40.7	3.5	
20-40	5.9	4.0	27.0	1.0	0.5	0.5	0.1	2.4	0.1	1.2	3.5	0.2	33.1	3.2	
40-60	5.9	5.0	36.0	0.7	0.4	0.3	0.1	2.0	0.1	0.9	2.9	0.5	31.5	2.8	
60-80	6.6	3.0	24.0	0.6	0.4	0.2	0.1	2.7	0.1	0.7	3.4	0.4	21.0	2.2	
80-100	5.9	2.0	18.0	0.8	0.6	0.2	0.1	2.5	0.1	0.9	3.4	0.3	27.7	2.1	
100-120	5.7	2.0	24.0	0.7	0.4	0.3	0.1	2.6	0.0	0.8	3.4	0.3	23.3	1.1	
120-140	5.8	2.0	21.0	0.4	0.3	0.1	0.2	2.8	0.1	0.5	3.3	0.2	15.3	0.6	
140-160	5.0	3.0	23.0	0.5	0.3	0.2	0.3	3.0	0.0	0.6	3.5	0.1	16.7	0.2	
VAL. MÉD.	5.8	3.8	27.1	0.8	0.5	0.3	0.1	2.5	0.1	0.9	3.5	0.3	26.2	2.0	

Fonte: Próprio autor (2015).

As análises laboratoriais das amostras de solo retiradas do leito de ânodos nas mesmas profundidades, processamento e métodos que as amostras de solo no perfil onde o gasoduto está enterrado, apresentaram os resultados que comentamos a seguir.

No leito de ânodos, o pH variou em uma amplitude de 5,0 a 5,9 e apresentou o valor médio representativo de 5,8, tendência de levemente ácido a neutro. A CTC no solo do leito ânodos variou entre 2,9 e 4,3 Cmolc/dm<sup>3</sup> e teve valor médio de 3,5 Cmolc/dm<sup>3</sup>. A saturação de bases V (%) variou em uma amplitude de 15,3 a 40,7 e apresentou valor médio de 26,2; o maior valor, 40,7 na profundidade de 0-20 cm e os menores valores na profundidade de confinamento do gasoduto.

Na análise comparada aos resultados obtidos para solo da vala de confinamento do gasoduto, observa-se para o pH valores na faixa severamente ácido, enquanto no solo do leito de ânodos o pH medido situa-se na faixa levemente ácido tendendo a neutro, a indicar ambiente apropriado para boa proteção catódica.

Dentre as características físicas do solo (Tabelas 6 e 7) que influem na difusão de cátions e ânions, por conseguinte, nas concentrações de cargas e ambiente propício à corrosividade, observam-se variações nos conteúdos de umidade levemente superior no solo do leito de ânodos, bem como a argila dispersa em água.

Os resultados das análises química e física dos perfis de solo conferem coerência, aos valores medidos de resistividade e potencial tubo/solo.

Tabela 6 - Resultado de análises de caracterização física do perfil do solo onde o duto está confinado

<b>ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASODUTO POLO - 1</b>					
<b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO</b>					
Cm	GRANULOMETRIA				%
	g kg <sup>-1</sup>				
Profundidade	Areia total	Silte	Argila	Arg. disp. Água	UG
0-20	794	126	80	69.7	10.1
20-40	778	152	70	49.7	6.7
40-60	581	140	279	29.9	12.8
60-80	638	112	250	69.9	6.6
80-100	807	83	110	59.9	10.5
100-120	694	67	239	89.8	10.5
120-140	686	73	241	98.2	6.4
140-160	766	55	179	69.7	30.5
VALOR MÉDIO	718.0	101.0	181.0	67.1	11.8

Fonte: Próprio autor (2015).

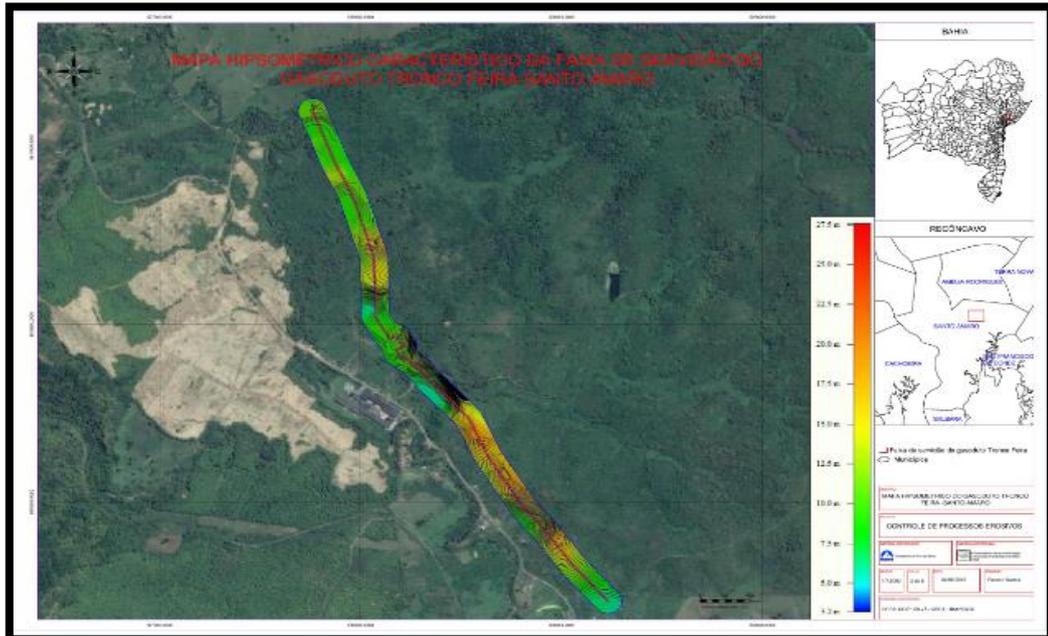
Tabela 7 - Resultado de análises de caracterização física do perfil do solo no leito de ânodos

<b>ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASODUTO POLO - 1 ÂNODO</b>					
<b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO</b>					
Cm	GRANULOMETRIA				%
	g kg <sup>-1</sup>				
Profundidade	Areia total	Silte	Argila	Arg. disp. Água	UG
0-20	726	166	108	59.1	13.1
20-40	698	163	139	69.6	11.7
40-60	729	152	119	69.6	10.5
60-80	494	350	156	117.2	18.2
80-100	510	313	177	107.9	19.5
100-120	486	355	159	103.1	18.4
120-140	425	403	172	114.6	19.0
140-160	524	357	119	89.5	21.9
VALOR MÉDIO	573.9	282.3	143.8	91.3	16.5

Fonte: Próprio autor (2015).

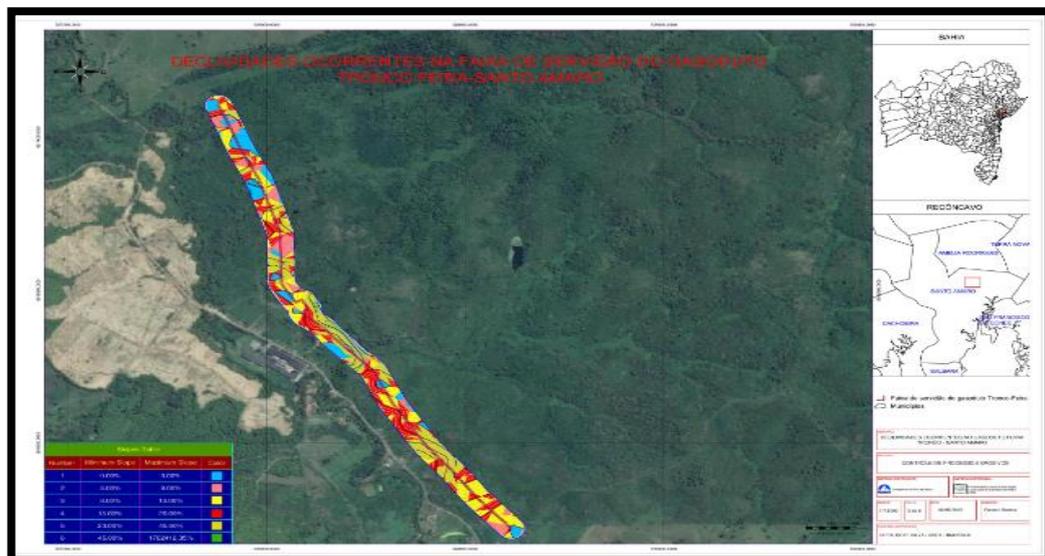


Figura 57 - Mapa hipsométrico característico da faixa de servidão do Gasoduto Tronco - Feira, trecho Santo Amaro



Fonte: Próprio autor (2015).

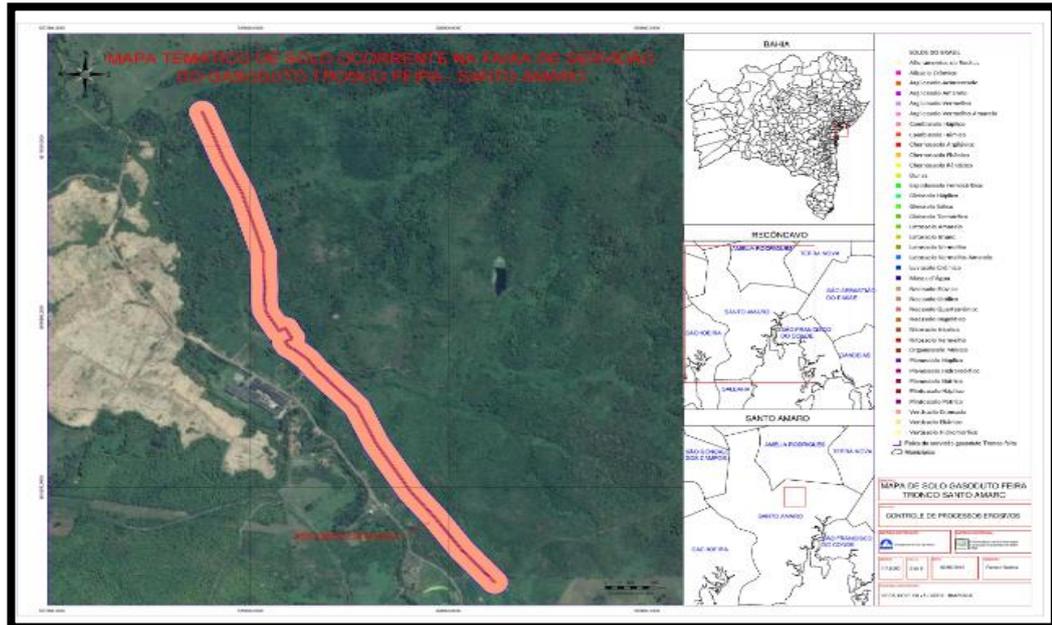
Figura 58 – Declividade ocorrente na faixa de servidão do Gasoduto Tronco - Feira, trecho Santo Amaro



Fonte: Próprio autor (2015).

No mapa temático de solos, na faixa de servidão do Gasoduto Tronco – Feira, na estação da BAHIAGÁS, em Santo Amaro, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, o mais ocorrente é o vertissolo (Figura 59).

Figura 59 - Mapa temático de solo ocorrente na faixa de servidão do gasoduto Tronco - Feira, trecho Santo Amaro



Fonte: Próprio autor (2015).

O vertissolo compreende solos constituídos por material mineral, os quais apresentam horizonte vértico e pequena variação textural ao longo do perfil, nunca suficiente para caracterizar um horizonte B textural. Apresentam pronunciadas mudanças de volume com o aumento do teor de água no solo, fendas profundas na época seca e evidências de movimentação da massa do solo, sob a forma de superfícies de fricção (*slickensides*). Podem apresentar microrrelevo tipo gilgai e estruturas do tipo cuneiforme, inclinadas e que formam ângulo com a superfície horizontal. Essas características resultam da grande movimentação da massa do solo que se contrai e fendilha quando seca e se expande quando úmida. São de consistência muito plástica e muito pegajosa, devido à presença comum de argilas expansíveis ou mistura dessas com outros argilominerais.

### 7.2.2 Análise e resultados sobre a medição de resistividade do solo

Na escala de  $20.00 \Omega - 0,16 \Omega$  e  $200.0 \Omega - 0,16 \Omega$ .

Aplicando-se a Equação de Wenner:  $\rho = 2\pi R D$

Onde:

$\rho$  = valor da resistividade elétrica média do terreno em  $\Omega.cm$ ;

$\pi = 3,14159$

R = valor indicado no display: 0,16  $\Omega$

D = distância entre as estacas, expressadas em metros: 5 m

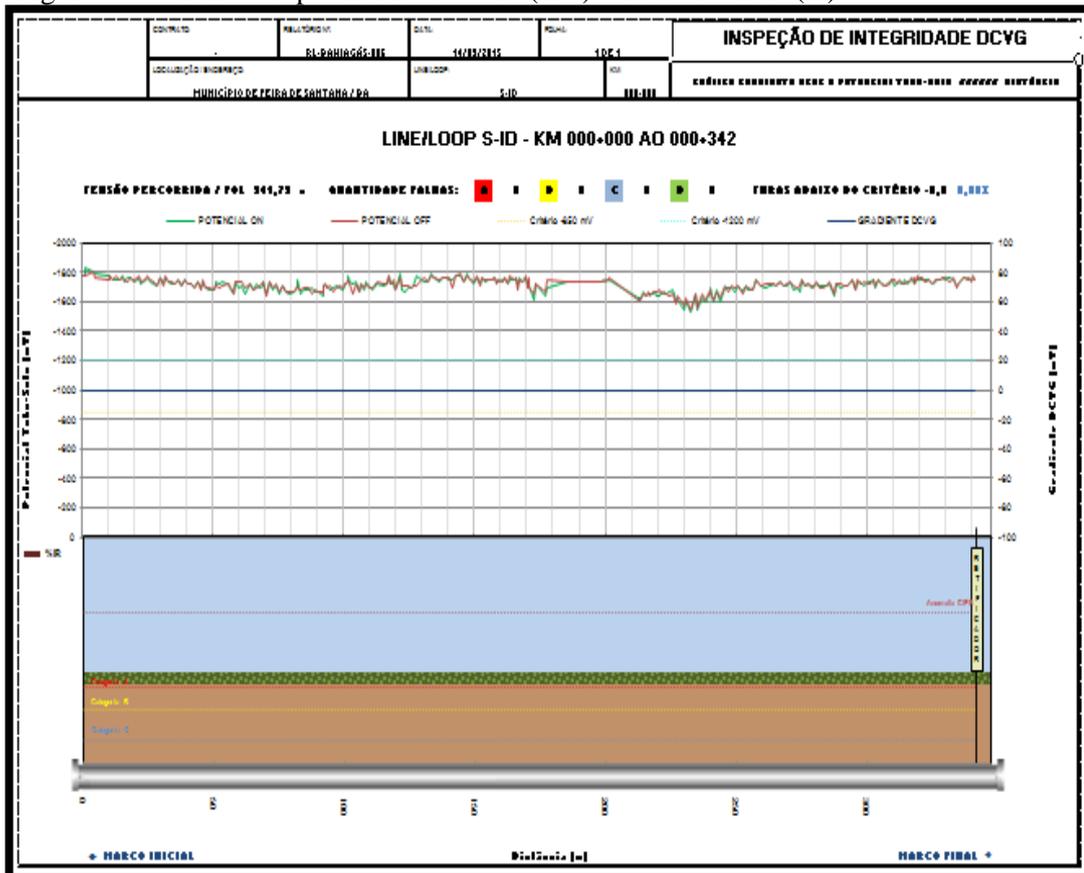
$P = 2\pi \times 0,16 \times 5 = 502,4 \Omega.cm$

Logo, pela classificação de resistividade elétrica do solo definida por Gomes (2013), esse eletrólito é de baixa resistividade. Por ser um solo massapê, criam-se regiões de áreas anódicas em que ocorre o fenômeno da corrosão e, paralelamente, em épocas chuvosas é um solo que facilita a condutividade elétrica pelo aspecto pegajoso, enquanto nas épocas secas os potenciais tubo/solo “ON” ficam muito abaixo do valor de referência -0,85V devido a sua característica rígida.

### **7.2.3 Análise sobre a medição de potencial tubo/solo pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo**

O gráfico a seguir integra o relatório de inspeção de integridade do revestimento do Gasoduto denominado Tronco – Feira, trecho Santo Amaro – Line/Loop S-ID, operado pela BAHIAGÁS no município Feira de Santana – BA. Utilizou-se o método combinado CIS-DCVG, com o objetivo de se detectarem possíveis defeitos e anomalias e se adotarem medidas de caráter corretivo e/ou preventivo, de maneira a se assegurar o cumprimento dos requisitos de operação e segurança do gasoduto (Figura 60).

Figura 60 - Gráfico do potencial tubo/solo (mV) versus distância (m)



Fonte: Próprio autor (2015).

Todo o percurso inspecionado pelo operador foi mapeado empregando-se o receptor GPS integrado, com correção diferencial (DGPS) e precisão submétrica; foram coletados, para cada ponto geográfico, data e horário em que a leitura foi realizada (hh:mm:ss, com precisão < 1 ns), latitude, longitude e altitude.

O trecho em estudo foi inspecionado por meio de ferramenta DCVG – *Direct Current Voltage Gradient*, utilizada tecnologia digital integrada, capaz de coletar, simultaneamente e para cada ponto geográfico: data e horário em que a leitura foi realizada (hh:mm:ss, com precisão < 1ns), latitude, longitude, altitude, gradiente de potencial solo-solo “ON”.

Os levantamentos de campo foram realizados no dia 17/09/2015 e o rendimento médio real aproximado apresentado pela equipe foi 341,73 m/dia.

O trecho inspecionado é o que se situa nas imediações da estação retificadora de Santo Amaro. O gráfico apresenta os resultados. Vale dizer que não foi realizada medição dos potenciais OFF porque a chave interruptora “ON-OFF” ainda não havia sido instalada.

Não se observa uma tendência à atenuação no trecho estudado. Os potenciais “ON”, no início e no final do trecho inspecionado, apresentam diferença muito pequena e isso ocorre apesar da grande proximidade do leito de ânodos. Esse seria justamente o trecho no qual a atenuação haveria de ser observada.

As variações na curva de potenciais observadas na parte intermediária do trecho inspecionado correspondem muito provavelmente a falhas no revestimento. Somente após o levantamento dos potenciais “OFF” é que se poderá chegar a uma conclusão. Nem mesmo com essas variações observou-se atenuação acentuada na curva de potencial “OFF”.

Muito provavelmente esse gasoduto apresenta sobreproteção. Isso será facilmente comprovado após o levantamento dos potenciais OFF. Esse problema será facilmente resolvido reduzindo-se a corrente de saída do retificador.

#### **7.2.4 Análise e resultados sobre as amostras de solo**

A Tabela 8, a seguir, mostra o resultado das análises de variáveis no perfil do solo massapê (com uma alta atividade da argila expansiva predominante) ao longo da diretriz do gasoduto, em que se observou variação do pH no perfil do solo em uma faixa de 6,7 a 8,2, valor médio 7,3, portanto, neutro com tendência a alcalino, caracterizando ambiente não agressivo para corrosão. Os valores da CTC variaram entre 4,0 (valor anômalo) e 52,8, valor médio de 34,0, portanto, coerente com o tipo de solo, com seu material de origem e com a atividade geoquímica. A saturação de bases V (%) variou na amplitude de 32,9 (valor anômalo) a 94,0, valor médio 34,0. Os teores de umidade variaram entre 24,0 na profundidade 0-20 cm a 36,7, valor médio de 29,7. O conteúdo de matéria orgânica variou entre 0,1 (traço) na profundidade do gasoduto e 2,4, na superfície, e nas profundidades 0-20 cm e 20-40 cm, valor médio 1,2. Portanto, pode-se inferir que não há possibilidade de ocorrência de CIM na profundidade na qual está enterrado o gasoduto, devido à correlação direta entre matéria orgânica e atividade de micro-organismos.

Tabela 8 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo onde o duto está confinado

ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASOUTO TRONCO-FEIRA EM SANTO AMARO														
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO														
Cm		Mg/dm <sup>3</sup>			Cmolc/dm <sup>3</sup>							dSm/cm	%	
PROF.	PH	P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	S	CTC	COND.ELE.SAT.	V	M.O
0-20	6.9	16.0	67.0	42.7	27.5	15.2	0.3	3.3	0.2	43.1	46.4	0.4	93.0	2.4
20-40	8.2	10.0	49.0	46.2	29.2	17.0	0.4	3.5	0.3	46.6	50.1	0.3	93.1	2.1
40-60	7.6	7.0	45.0	48.6	30.3	18.3	0.1	3.9	0.2	48.9	52.8	0.9	92.7	1.9
60-80	6.9	12.0	49.0	36.3	30.4	5.9	0.1	3.5	0.2	36.6	40.1	0.4	91.2	1.6
80-100	7.9	8.0	46.0	40.2	37.5	2.7	0.1	2.7	0.0	40.4	43.0	0.3	93.8	1.2
100-120	6.8	5.0	36.0	12.8	9.7	3.1	0.3	2.9	0.1	13.0	15.9	0.4	81.8	0.7
120-140	6.7	5.0	33.0	11.8	10.0	1.8	0.3	2.6	0.1	12.0	14.6	0.4	82.0	0.4
140-160	7.2	20.0	41.0	36.7	31.5	5.2	0.1	2.4	0.0	36.8	39.2	0.6	94.0	0.3
160-180	7.6	5.0	28.0	1.2	0.8	0.4	0.1	2.7	0.0	1.3	4.0	0.3	32.9	0.1
VAL. MÉD.	7.3	9.8	43.8	30.7	23.0	7.7	0.2	3.0	0.1	31.0	34.0	0.4	83.8	1.2

Fonte: Próprio autor (2015).

A Tabela 9 apresenta os resultados das análises das variáveis no solo do leito de ânodos, onde se observou que o pH variou em uma faixa de 5,9 a 8,2, valor médio de 7,4, portanto, de neutro a levemente alcalino. A CTC variou entre 25,1 e 42, valor médio 35,4. A saturação de bases V (%) de 89,4 a 94,1, valor médio de 92,6. Os valores encontrados são coerentes com o tipo de solo, com a atividade de argila expansiva e os efeitos da proteção catódica. Os teores de umidade variaram de 15,2 a 36,8, valor médio 27,6.

Tabela 9 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo no leito de ânodos

ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASOUTO TRONCO-FEIRA, SANTO AMARO - ANODO														
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO														
Cm		Mg/dm <sup>3</sup>			Cmolc/dm <sup>3</sup>							dSm/cm	%	
PROF.	PH	P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	S	CTC	COND.ELE.SAT.	V	M.O
0-20	6.4	100.0	74.0	38.7	28.6	10.1	0.0	2.7	0.1	39.0	41.7	0.5	93.6	0.2
20-40	5.9	14.0	58.0	27.2	24.4	2.8	0.0	2.8	0.2	27.5	30.3	0.4	90.9	0.4
40-60	7.6	10.0	45.0	26.7	23.6	3.1	0.0	3.0	0.2	27.0	30.0	0.4	90.0	1.5
60-80	8.1	7.0	31.0	33.8	30.1	2.9	0.0	2.1	0.1	34.0	36.1	0.3	94.1	0.6
80-100	8.0	150.0	73.0	36.0	28.7	7.3	0.1	3.1	0.1	36.3	39.4	0.5	92.1	0.7
100-120	7.4	8.0	32.0	36.4	30.2	6.2	0.0	2.0	0.0	36.5	38.5	0.5	94.8	1.0
120-140	8.2	6.0	26.0	40.0	36.7	3.3	0.0	1.9	0.0	40.1	42.0	0.5	95.5	1.3
140-160	7.9	7.0	37.0	22.3	18.4	3.9	0.0	2.7	0.0	22.4	25.1	0.4	89.4	1.7
VAL. MÉD.	7.4	37.8	47.0	32.6	27.6	5.0	0.0	2.5	0.1	32.9	35.4	0.4	92.6	0.9

Fonte: Próprio autor (2015).

Uma análise comparada permite observar que o pH teve comportamento similar no perfil do solo da vala de confinamento do gasoduto, na qual está confinado o leito de ânodos. Quanto à CTC, foram observados valores equivalentes entre o solo onde o gasoduto está

confinado e o do leito de ânodos. A saturação de bases V (%) apresentou maiores valores no solo do leito de ânodos, coerente com a ação da proteção catódica.

Os resultados permitem inferir que o potencial de corrosividade nos solos estudados é função de suas composições e dinâmica geoquímica e que os insignificantes teores de matéria orgânica encontrados na profundidade de confinamento do gasoduto permitem inferir haver baixa ou inexistente atividade microbiana, portanto, sem CIM.

Ao se observarem as Tabelas 10 e 11, percebe-se que as variações nos conteúdos de umidade do solo, dentre as características físicas que influem na difusão de cátions e ânions e, por conseguinte, nas concentrações de cargas e ambiente propício à corrosividade, as quais são significativamente superiores no solo massapê, tanto no ânodo quanto no perfil do solo onde o duto está confinado. Os resultados das análises química e física dos perfis de solo conferem coerência aos valores medidos de resistividade e potencial tubo/solo, entre os experimentos realizados.

Tabela 10 - Resultados de análises de laboratório para caracterização física do perfil do solo onde o duto está confinado

<b>ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASODUTO TRONCO - FEIRA, TRECHO SANTO AMARO</b>					
<b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO</b>					
Cm	<b>GRANULOMETRIA</b>				%
	<b>g kg-1</b>				
Profundidade	Areia total	Silte	Argila	Arg. disp. Água	UG
0-20	135.6	712.4	152.0	126.7	24.0
20-40	175.0	627.4	198.0	123.9	25.0
40-60	182.0	651.7	166.0	104.6	28.4
60-80	194.0	634.7	171.0	119.5	32.9
80-100	201.0	626.2	173.0	121.4	36.7
100-120	205.1	625.8	169.1	126.8	25.4
120-140	239.1	598.2	162.7	135.6	30.5
140-160	281.2	566.2	152.7	127.2	32.9
160-180	219.5	638.9	141.6	123.9	31.6
VALOR MÉDIO	203.6	631.3	165.1	123.3	29.7

Fonte: Próprio autor (2015).

Tabela 11 - Resultados de análises de laboratório para caracterização física do perfil do solo no leito de âodos

<b>ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASODUTO TRONCO - FEIRA, EM SANTO AMARO - ÂNODO</b>					
<b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO</b>					
Cm	GRANULOMETRIA				%
	g kg <sup>-1</sup>				
Profundidade	Areia total	Silte	Argila	Arg. disp. Água	UG
0-20	158	563	279	183.0	23.2
20-40	167	556	277	207.5	30.6
40-60	210	493	297	230.1	36.8
60-80	227	511	262	225.4	31.4
80-100	229	552	219	182.9	27.9
100-120	208	550	242	197.2	29.8
120-140	145	636	219	164.4	25.7
VALOR MÉDIO	192.0	551.5	256.5	198.6	29.4

Fonte: Próprio autor (2015).

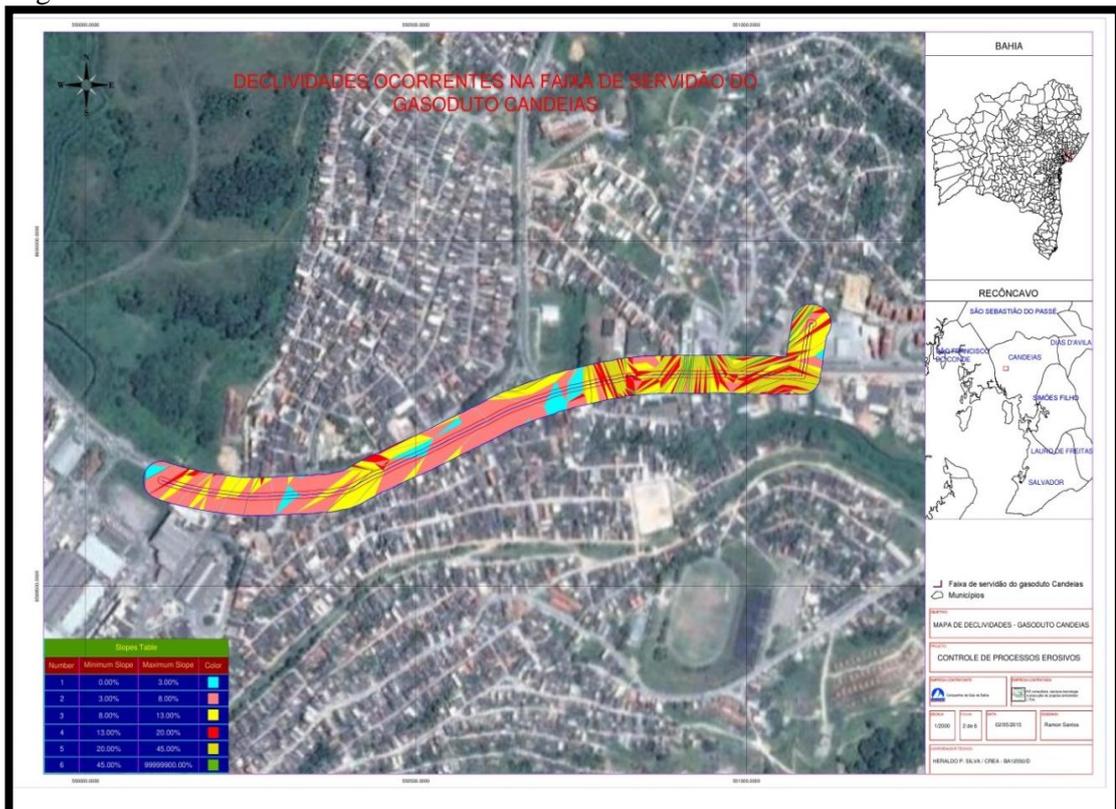
### 7.3 GASODUTO CANDEIAS

#### 7.3.1 Análise e resultados sobre a identificação e caracterização do solo

As análises topográficas e do relevo estão representadas em mapas em uma avaliação conjunta das Figuras 61, 62 e 63, a qual permite constatar na faixa de servidão a ocorrência que três classes de declividades, ao longo da extensão do gasoduto. Predominam as classes 3 e 4, em que o declive varia de 8 a 13% e de 13 a 20%, respectivamente, acidentado muito íngreme, condição de risco para ocorrência de processos erosivos, o que requer a implantação de um Plano de Controle de Processos Erosivos (PCPE). A terceira classe de declividade mais ocorrente foi a classe 2, cujo declive variou de 3 a 8%, ondulado, condição que requer cuidados quanto à possibilidade de ocorrência de processos erosivos, ladeiras e/ou baixadas (côncavos ou convexos) com riscos potenciais de deslizamentos e/ou acumulação de água. Em menor proporção, aparece a classe de declividade 3. Nos setores de topografia mais íngreme requer cuidados preventivos de processos erosivos nas cotas altas e inundações nas mais baixas, crista e base, respectivamente.



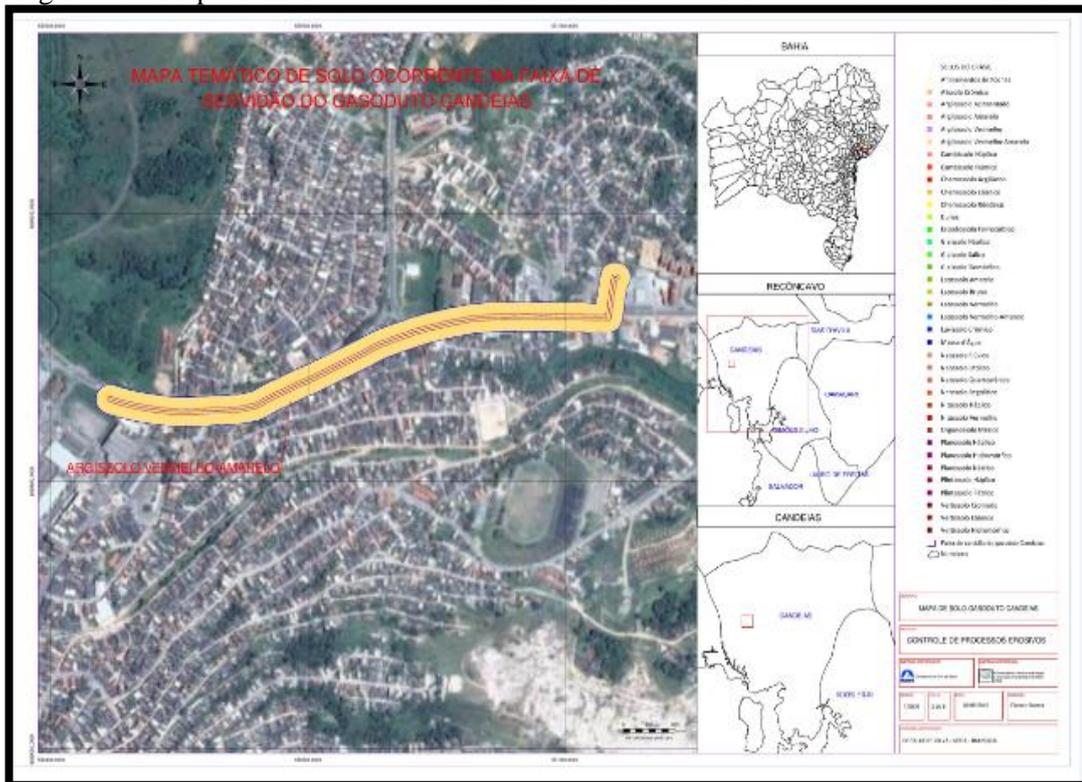
Figura 63 - Declividades ocorrentes na faixa de servidão do Gasoduto Candeias



Fonte: Próprio autor (2015).

O mapa temático de solos na faixa onde está confinado o gasoduto Millennium (Figura 64) baseou-se no manual da Embrapa (2006) para identificar que o solo característico é o argissolo vermelho-amarelo.

Figura 64 – Mapa Temático de solo ocorrente na faixa de servidão do Gasoduto Candeias



Fonte: Próprio autor (2015).

Os argissolos são solos constituídos por material mineral, apresentam horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B, e atendem ainda aos seguintes requisitos:

- Horizonte plântico, se presente, não satisfaz os critérios para plintossolo;
- Horizonte glei, se presente, não satisfaz os critérios para gleissolo.

Sua base é a evolução avançada com atuação incompleta de processo de ferralitização, em conexão com paragênese caulínica-oxidíca ou virtualmente caulínica, ou com hidróxido de alumínio entre camadas, na vigência de mobilização de argila da parte mais superficial do solo, com concentração ou acumulação em horizonte subsuperficial. O seu critério é o desenvolvimento (expressão) de horizonte diagnóstico B textural, em vinculação com atributos que evidenciam a baixa atividade da fração argila ou o caráter alítico.

### 7.3.2 Análise e resultado sobre a medição de resistividade do solo

Nos pontos onde foram realizadas as escavações para as coletas das amostras, a medição da resistividade do solo foi efetuada com o terrômetro e se detectaram naquele local as seguintes medições: na escala de 20.00  $\Omega$ s – 4,4  $\Omega$ s e 200.0  $\Omega$ s – 4,4  $\Omega$ .

Valor encontrado no aparelho: 4,4  $\Omega$

Equação de Wenner:  $\rho = 2\pi R D = 2 \pi \times 9,2 \times 5 = 13.816 \Omega \times \text{cm}$

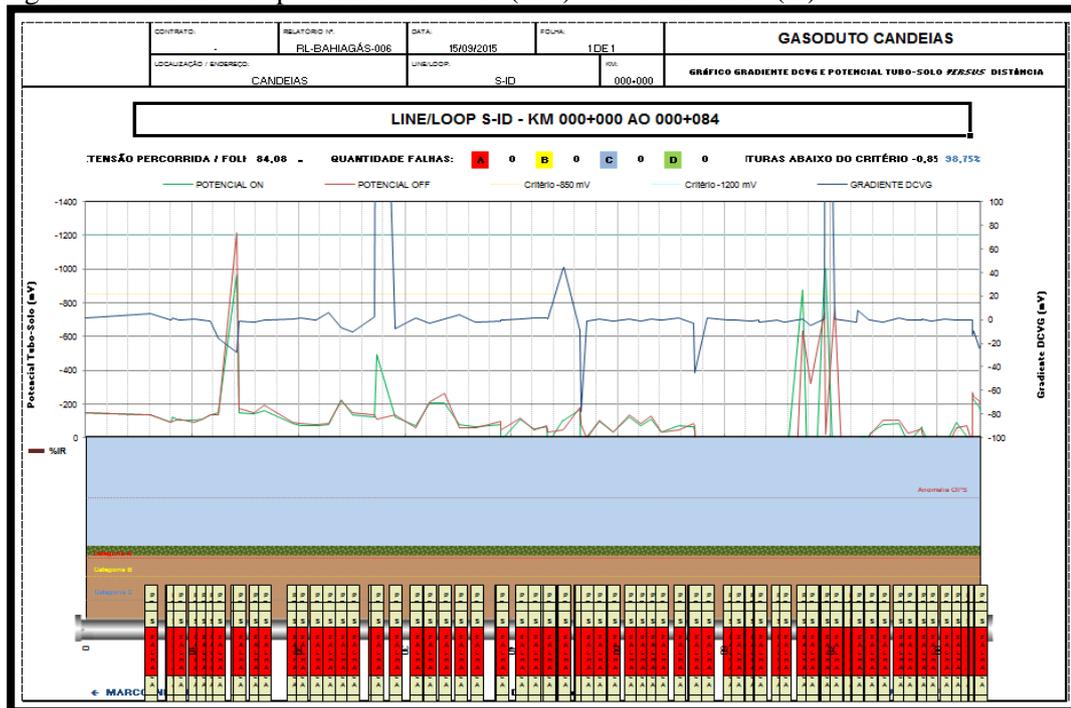
- $\rho$  = valor da resistividade elétrica média do terreno em  $\Omega \cdot \text{cm}$ ;
- $\pi = 3,14159$
- R = valor indicado no display: 4,4 $\Omega$
- D = distância entre as estacas, expressadas em metros : 5m

Logo, pela classificação de resistividade elétrica do solo definida por Gomes (2013), esse eletrólito é de média resistividade. Essa condição permite haver boa capacidade de condutividade elétrica e também permite boa proteção catódica, salvo em condições nas quais haja interferências eletromagnéticas, influência de indução elétrica ou sistema de proteção catódica subdimensionado.

### 7.3.3 Análise e resultados sobre a medição de potencial tubo/solo pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo

O gráfico representado na figura 65 mostra bons valores de proteção do revestimento e variações significativas de potenciais.

Figura 65 – Gráfico de potencial tubo/solo (mV) versus distância (m)



Fonte: Próprio autor (2015).

Para injeção do sinal pulsante no duto, requerido para aplicação da inspeção combinada CIS/DCVG passo a passo, a chave sincronizadora “ON/OFF”, sincronizada por GPS, foi programada para o período “OFF” de 400 ms e período “ON” de 600 ms, totalizando 1s por ciclo; foi instalada no equipamento retificador mais próximo do trecho inspecionado. Não foram localizados defeitos de revestimentos ao longo do trecho (line/Loop) inspecionado.

Todo o percurso inspecionado pelo operador foi mapeado empregando-se o receptor GPS integrado, com correção diferencial (DGPS) e precisão submétrica; foram coletados, para cada ponto geográfico, data e horário em que a leitura foi realizada (hh:mm:ss, com precisão < 1 ns), latitude, longitude e altitude.

O trecho em estudo foi inspecionado por meio de ferramenta DCVG – *Direct Current Voltage Gradient*, utilizando-se tecnologia digital integrada, capaz de coletar, simultaneamente e para cada ponto geográfico: data e horário em que a leitura foi realizada (hh:mm:ss, com precisão < 1ns), latitude, longitude, altitude, gradiente de potencial solo-solo “ON”.

Ao longo da extensão da diretriz do gasoduto, os potenciais tubo/solo sofreram interferências em razão de os valores, em sua maioria, encontrarem-se abaixo de -0,85V, o que pode ter sido ocasionado pela dificuldade da realização do experimento, considerando-se

que no caminho não se encontravam frestas com facilidade para que se realizasse o contato da ponta porosa do eletrodo de referência com o solo ou, possivelmente, interferências de induções elétricas de tubulações que estejam alimentando energia ao posto, ou de correntes telúricas; esses serão objetos de estudos futuros.

Apesar de os potenciais estarem abaixo do recomendado, existe a proximidade do “ON” com o “OFF”, garantindo que não haja a atenuação da corrente. Alguns picos apresentados do DCVG são possíveis falhas no revestimento. O sistema de proteção catódica desse trecho possui um leito de ânodos provisório, formado por dois tubos de 3” de aço carbono, e um retificador que se encontra no limite da sua capacidade. Mesmo assim, os potenciais melhoraram após se ajustar o retificador.

### **7.3.4 Análise e resultados sobre as amostras do solo**

A Tabela 12 representa os resultados de análise de laboratório que trata da caracterização química na diretriz do gasoduto mostrando que o pH variou no perfil do solo numa faixa de 5,6 a 6,8, sendo o valor médio de 6,2, por tanto tendendo a neutro. Quanto a CTC observou-se variação de 6,5 a 13,0, na profundidade de 1,20 m a 1,40m, com valor médio de 9,2. A saturação de bases V (%) variou na amplitude de 64,5 a 80,7, tendo como valor médio 70,4. Os teores de umidade variaram de 5,8 na profundidade de 0-20 cm a 27,4 na profundidade de 1,40m a 1,60m, sendo o valor médio de 18,9. O conteúdo de matéria orgânica variou de 0,2 (traço) na profundidade do gasoduto até 1,7 nos perfis entre 0-20 cm e 20-40 cm, sendo o valor médio de 0,7. Portanto, pode-se inferir que não há possibilidades de ocorrência de CIM na profundidade onde está enterrado o gasoduto devido à correlação direta entre matéria orgânica e atividade de micro-organismos.

Tabela 12 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo onde o duto está confinado

ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASOUTO CANDEIAS														
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO														
Cm		Mg/dm <sup>3</sup>			Cmolc/dm <sup>3</sup>							dSm/cm	%	
PROF.	PH	P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	S	CTC	COND. ELE.SAT.	V	M.O
0-20	6.1	10.0	54.0	4.0	2.6	1.4	0.0	2.2	0.2	4.3	6.5	0.7	65.7	1.7
20-40	6.4	8.0	47.0	7.4	5.2	2.2	0.0	2.0	0.2	7.7	9.7	0.5	79.3	1.3
40-60	6.2	6.0	44.0	5.9	4.0	1.9	0.6	2.5	0.1	6.1	8.7	0.6	70.6	0.9
60-80	6.3	6.0	40.0	4.3	2.6	1.7	1.0	3.7	0.0	4.4	8.1	0.4	54.9	0.7
80-100	5.6	3.0	27.0	7.3	5.0	2.3	1.0	2.7	0.0	7.4	10.1	0.5	73.5	0.4
100-120	6.8	4.0	29.0	7.9	5.7	2.2	0.0	2.9	0.0	8.0	10.9	1.3	73.6	0.4
120-140	6.6	6.0	25.0	10.4	8.1	2.3	0.0	2.5	0.0	10.5	13.0	0.5	80.7	0.3
140-160	5.6	6.0	30.0	4.1	3.2	0.9	0.2	2.3	0.0	4.2	6.5	0.5	64.5	0.2
VAL. MÉD.	6.2	6.1	37.0	6.4	4.6	1.9	0.4	2.6	0.1	6.6	9.2	0.6	70.4	0.7

Fonte: Próprio autor (2015).

A Tabela 13, a seguir, representa as análises das variáveis da caracterização química do solo no leito de ânodos e observa-se que o pH variou em uma faixa de 4,9 a 7,5, o valor médio 6,0, portanto, levemente ácido a neutro. A CTC registrou variação de 4,7 a 9,2, valor médio 5,7. A saturação de bases V (%) variou na amplitude de 20,3 a 78,0, valor médio 46,6. Os teores de umidade variaram de 6,4 a 19,0 na profundidade 1,20m - 1,40 m, valor médio 18,9.

Uma análise comparada permite observar que o pH teve comportamento similar no perfil do solo da vala de confinamento do gasoduto e no perfil do solo no leito de ânodos. Quanto à CTC, foram observados maiores valores no perfil de solo onde o gasoduto está confinado do que no solo do leito de ânodos, o que reflete menor concentração de cargas causadas provavelmente pelo efeito da proteção catódica. A saturação de bases V (%) mostrou a mesma tendência, portanto, coerente com os valores da CTC e da ação da proteção catódica.

Tabela 13 - Resultados de análises de laboratório para caracterização química do perfil do solo no leito de ânodos

ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASODUTO CANDEIAS - ANODO															
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO															
Cm		Mg/dm <sup>3</sup>			Cmolc/dm <sup>3</sup>							dSm/cm		%	
PROF.	PH	P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	S	CTC	COND. ELE.SAT.	V	M.O	
0-20	6.2	27.0	65.0	2.3	1.7	0.6	0.0	2.3	0.2	2.7	5.0	0.7	53.3	0.6	
20-40	7.5	14.0	54.0	6.9	4.5	2.4	0.0	2.0	0.2	7.2	9.2	0.7	78.0	1.2	
40-60	6.4	8.0	40.0	3.6	2.5	1.1	0.1	2.4	0.0	3.8	6.2	0.6	60.9	1.4	
60-80	6.8	12.0	40.0	2.7	1.9	0.8	0.1	2.3	0.0	2.8	5.1	0.2	55.6	1.4	
80-100	6.7	8.0	38.0	2.3	1.7	0.6	0.1	2.5	0.1	2.5	5.0	0.8	49.9	0.5	
100-120	4.9	3.0	26.0	1.2	0.7	0.5	0.4	3.7	0.1	1.3	5.0	0.2	26.6	0.9	
120-140	4.9	2.0	17.0	1.5	1.0	0.5	1.3	4.0	0.0	1.6	5.5	0.1	28.2	3.0	
140-160	4.8	3.0	20.0	0.8	0.4	0.4	1.2	3.7	0.1	1.0	4.7	0.1	20.3	1.7	
VAL. MÉD.	6.0	9.6	37.5	2.7	1.8	0.9	0.4	2.9	0.1	2.8	5.7	0.4	46.6	1.3	

Fonte: Próprio autor (2015).

Ao se observarem as Tabelas 14 e 15, percebe-se que dentre as características físicas do solo que influem na difusão de cátions e ânions, por conseguinte, nas concentrações de cargas e ambiente propício a corrosividade, estão as variações nos conteúdos de umidade, as quais são significativamente superior no solo massapê, tanto no ânodo quanto no perfil do solo onde o duto está confinado, quando comparados aos solos arenosos.

Tabela 14 - Resultados das análises de laboratório para caracterização granulométrica do solo na diretriz do gasoduto

ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASODUTO CANDEIAS					
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO					
Cm	GRANULOMETRIA				%
	g kg <sup>-1</sup>				
Profundidade	Areia total	Silte	Argila	Arg. disp. Água	UG
0-20	543	287	170	20.0	5.76
20-40	526	249	225	127.3	21.84
40-60	459	323	218	128.8	15.70
60-80	272	466	262	18.7	19.27
80-100	416	359	225	127.2	17.13
100-120	294	460	246	28.4	22.70
120-140	266	470	264	48.9	21.26
VALOR MÉDIO	396.5	373.4	230.1	71.3	17.7

Fonte: Próprio autor (2015).

Tabela 15 - Resultados das análises de laboratório para caracterização granulométrica do solo no leito de ânodos

<b>ANÁLISES DE VARIÁVEIS NO PERFIL DO SOLO DA SUPERFÍCIE ATÉ A PROFUNDIDADE DO GASODUTO CANDEIAS - ÂNODO</b>					
<b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO</b>					
Cm	<b>GRANULOMETRIA</b>				%
	<b>g kg<sup>-1</sup></b>				
Profundidade	Areia total	Silte	Argila	Arg. disp. Água	UG
0-20	803	97	100	30.0	6.4
20-40	694	197	109	49.7	11.7
40-60	682	158	160	90.0	9.4
60-80	691	130	179	99.5	10.1
80-100	678	103	219	79.6	10.5
100-120	516	206	278	69.5	15.1
120-140	296	477	227	29.9	19.0
140-160	237	507	256	19.7	15.2
VALOR MÉDIO	574.5	234.3	191.0	58.5	12

Fonte: Próprio autor (2015).

Os resultados das análises química e física dos perfis de solo conferem coerência aos valores medidos de resistividade e potencial tubo/solo, entre os experimentos realizados.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As faixas de gasodutos escolhidas possuem uma configuração do sistema de proteção catódica favorável à realização deste estudo, devido à proximidade do leito de ânodos com o duto, e essa distância é bem menor que os 100 m recomendados pelos profissionais de proteção catódica do Brasil.

Em razão da dificuldade de se definir com precisão a melhor distância entre o leito de ânodos e o duto, iniciou-se o trabalho com a identificação e caracterização das faixas de gasodutos por meio das análises topográficas e caracterização do relevo, justificadas por serem essas informações fundamentais para auxiliar a elaboração de diagnósticos ambientais, como vulnerabilidade a processos erosivos, localização de áreas afetadas por grandes erosões, quando associadas a informações de precipitações pluviométricas.

Além disso, podem-se prever pontos de alagamento, enchentes, possíveis deslizamentos em áreas urbanas e rurais que influenciam a densidade de corrente de proteção catódica do duto.

Os resultados das pesquisas de caracterização física, química e microbiológica dos perfis de solos ocorrentes na faixa de servidão dos gasodutos estudados ratificam que o solo é um eletrólito que possui dinâmica e complexidade química reveladas pelas concentrações de cátions e ânions, saturação de bases, condutividade elétrica, pH, capacidade de troca catiônica, percentual de matéria, argila de alta atividade e conteúdo de água presente na matriz do solo, com destaque para o solo ocorrente no gasoduto Tronco – Feira, o vertissolo (massapê) constituído por material mineral, o qual apresenta horizonte vértico e pequena variação textural ao longo do perfil, nunca suficiente para caracterizar um horizonte B textural. Apresentam pronunciadas mudanças de volume com o aumento do teor de água no solo, fendas profundas na época seca e evidências de movimentação da massa do solo, sob a forma de superfícies de fricção (*slickensides*).

Na faixa do Gasoduto Polo I, o solo ocorrente é o espodossolo ferrocárbico, cuja principal característica é a presença de horizonte B espódico, constituído pela concentração de matéria orgânica. Pode também apresentar o horizonte E, como resultante da eluviação da matéria orgânica do horizonte A.

Na faixa do Gasoduto Candeias, a análise pedológica identificou argissolo vermelho-amarelo, constituído por material mineral, o qual apresenta horizonte B textural

imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por base baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B.

Como aprofundamento fundamental do estudo analisou-se a resistividade elétrica do solo nas faixas, devido à sua importância para avaliar o potencial de corrosividade do solo. Uma vez medida a resistividade elétrica pelo equipamento terrômetro, aplicou-se a equação de Wenner. Os resultados foram, para as faixas dos Gasodutos Polo 1, Tronco – Feira, Santo Amaro e Candeias, respectivamente, os seguintes valores e classificação: 28.902,6  $\Omega$ .cm, alta resistividade; 502,65  $\Omega$ .cm, baixa resistividade; e 13.823  $\Omega$ .cm, média resistividade.

Quanto à caracterização eletrolítica dos solos, observou-se que na faixa do Gasoduto Candeias uma análise comparada em profundidades de 20 cm em 20 cm, o pH teve comportamento similar no perfil do solo da vala de confinamento do gasoduto na qual está confinado o leito de ânodos. Quanto à CTC, observaram-se maiores valores no perfil de solo em que o gasoduto está confinado e menores valores no solo do leito de ânodos. Isso reflete menor concentração de cargas provavelmente por efeito da proteção catódica. A saturação de bases V (%) mostrou a mesma tendência, portanto, coerente com os valores da CTC e da ação da proteção catódica.

Na faixa do Gasoduto Tronco – Feira, trecho Santo Amaro, com ocorrência de vertissolo, a análise comparada por profundidade permitiu observar que o pH teve comportamento similar no perfil do solo da vala de confinamento do gasoduto e onde está confinado o leito de ânodos. Quanto à CTC, observaram-se valores equivalentes entre o solo onde o gasoduto está confinado e o do leito de ânodos. A saturação de bases V (%) apresentou maiores valores no solo do leito de ânodos, coerente com a ação da proteção catódica. Os resultados permitem inferir que o potencial de corrosividade nos solos estudados são função de suas composições e dinâmica geoquímica e que os insignificantes teores de matéria orgânica encontrados na profundidade de confinamento do gasoduto permitem inferir haver baixa ou inexistente atividade microbiana, portanto, não oferecem riscos de ocorrência de processos corrosivos induzidos por micro-organismos CIM.

Para a faixa do Gasoduto Polo I, procedeu-se à análise comparada dos resultados obtidos para o solo da vala de confinamento do leito de ânodos e observaram-se valores para o pH na faixa severamente ácido, enquanto no solo do leito de ânodos o pH medido situou-se na faixa de levemente ácido tendendo a neutro. A CTC apresentou valores relativamente

superiores no perfil do solo onde o duto está enterrado e valores menores no solo do leito de ânodos, possivelmente refletindo efeitos da proteção catódica. A saturação de bases revelou comportamento similar com valores próximos.

Em se tratando dos resultados obtidos pela inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo nos Gasodutos Tronco – Feira, trecho Santo Amaro, e Candeias, esses mostram claramente que, embora os leitos de ânodos estejam a distâncias bem menores dos gasodutos que os afastados, na prática não se verificou atenuação acentuada na curva de potenciais “ON”. Isso prova claramente que a menor distância do leito de ânodos dos gasodutos não compromete a distribuição dos potenciais tubo/solo.

Observou-se que todo o trecho do Gasoduto Candeias encontra-se abaixo da linha de proteção em que poderá ter influência da resistividade elétrica média do solo. Apesar de não haver atenuação, os potenciais encontram-se abaixo da linha de proteção em que é necessário alterar a regulação de corrente do retificador, mesmo que esteja previsto um novo retificador e a substituição do leito de ânodos pelo de titânio com óxidos de metais nobres. No Gasoduto Santo Amaro observou-se haver uma superproteção do gasoduto. As variáveis físicas, químicas e microbiológicas do solo não interferiram na distribuição dos potenciais tubo/solo nas duas faixas do Gasoduto Candeias.

O gráfico dos potenciais passo a passo do Gasoduto Polo I mostrou-se bastante atípico, muito provavelmente devido à alta resistividade elétrica do solo e à interferência da linha de transmissão elétrica. Isso deverá ser objeto de estudo posterior. Observaram-se possíveis falhas no revestimento e algumas falhas protegidas catodicamente. As variáveis físicas, químicas e microbiológicas do solo não interferiram na distribuição dos potenciais tubo/solo na faixa do Gasoduto Polo I.

Diante do exposto, conclui-se que a resistividade do solo tem influência muito forte na corrente de proteção dos gasodutos; as características tipo granulometria, as características químicas e microbiológicas do solo não tiveram influência nos sistemas de proteção catódica objeto deste trabalho, exceto no caso do vertissolo ocorrente na faixa do Gasoduto Tronco Feira, trecho Santo Amaro, provavelmente devido à argila 2:1 de alta atividade e CTC. Mesmo que ocorram possíveis interferências eletromagnéticas e também pela faixa de servidão do Gasoduto Candeias estar protegida por um leito de ânodos não convencional, os perfis de potenciais tubo/solo construídos pelas medições registradas ao longo da inspeção combinada CIPS/DCVG passo a passo, nas 3 faixas deste estudo, comprovam que a

proximidade do leito de ânodos com o gasoduto não influencia a distribuição dos potenciais tubo/solo. Assim, constata-se a hipótese testada como objetivo fundamental desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- AGENCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Transporte Dutoviário**. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br>>. Acesso em: 5 set. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE GÁS CANALIZADO – ABEGÁS. **Gasodutos**. Disponível em: <[http://www.abegas.org.br/Site/?page\\_id=842](http://www.abegas.org.br/Site/?page_id=842)>. Acesso em: 5 dez. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 15589-1**: Indústria do petróleo e gás natural – Proteção catódica para sistemas de transporte de dutos parte 1: Dutos terrestres. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 46p.
- BAHIA. COMPANHIA DE GÁS – BAHIAGÁS. **Plano de expansão**. Disponível em: <<http://www.bahiagas.com.br/bahiagas/plano-de-expansao>>. Acesso em: 5 dez. 2015.
- BAPTISTA, W.; CASTINHEIRAS, W. G. C. Corrosão e proteção catódica. In: GOMES, M. G.F.M.; FREIRE, J.L. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Ponto Final, 2009. p. 11.26.
- BARTON, L. L. **Sulphate-reducing bacteria**. Biotechnology Handbooks. New York: Plenum Press, 1995, p.333. (Series Editors – Spinger).
- BASKARAN, V.; NEMAT, M. Anaerobic reduction of sulfate in immobilized cell bioreactors, using a microbial culture originated from an oil reservoir. **Biochemical Engineering Journal**, v. 31, n.2, p. 148-159, 2006.
- BOGAN, B. W.; LAMB, B. M.; KILBANE, J. J. **Development of an environmentally benign microbial inhibitor to control internal pipeline corrosion**: final report. Gas Technology Institute, 2004. Disponível em: <<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/834516>> Acesso em: 05 dez. 2015.
- BORBA, J. P.; SILVA, S. N. da; DICK, L. F. P. **Avaliação do desempenho de eletrodos de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub>**. Porto Alegre: UFRGS, 2006. p.278. Disponível em: <[https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/69499/Resumo\\_200601437.pdf?sequenc e=1](https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/69499/Resumo_200601437.pdf?sequenc e=1)>. Acesso em: 15 set. 2015.
- BOTT, I. de S. et al. Aços para dutos. In: GOMES, M. G. F. M.; FREIRE, J. L. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Ponto Final, 2009.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil em relevo Embrapa**. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/ba/ba.htm>>. Acesso em: 30 set. 2015.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Embrapa - 1977-1979 – perfil 225**. 2015. p.781. v.1.
- BUENO, B.; COSTA, Y. **Dutos enterrados**: aspectos geotécnicos. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2012.
- CANTO, C. H. do; LOUZADA, M. Projeto mecânico de dutos terrestres. In: GOMES, M. G. F. M.; FREIRE, J. L. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Ponto Final, 2009. p. 9.1 – 9.37.

CHARRET, S. F. **Avaliação do potencial de solos na faixa de dutos na indução da biocorrosão de metais**. Rio de Janeiro, 2010. 112p. Dissertação (Mestrado Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, 2010.

COLLERAN, E. et al. Effect of pH on growth kinetics and sulphide toxicity thresholds of a range of methanogenic, syntrophic and sulphate-reducing bacteria. **Process Biochemistry**, v. 33, n. 5, p. 555-569, 1998

CORTELETTI, R. C. **Desenvolvimento de metodologia para concepção de traçados de dutos de transporte de gás natural**. 2009. 143f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Escola de Minas. Belo Horizonte, 2009.

COUTINHO, B. C. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992. 405p.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. de P. **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

FARAH, M. A. **Petróleo e seus derivados: definição, constituição, aplicação, especificações, características de qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

FREIRE, J. L., et al. Integridade de dutos. In: GOMES, M. G. F. M. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Ponto Final, 2009. p. 15-.34.

FREIRE, J. L. Análise de tensões em dutos. In: GOMES, M. G. F. M. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Ponto Final, 2009. p. 3-30.

GARRETT, S. C. et al. A biosensor of S100A4 metastasis factor activation: inhibitor screening and cellular activation dynamics. **Biochemistry**, n. 47, p. 986-996, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 359p.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio Ambiente & desenvolvimento**. 3. ed. rev. ampl. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008. 400p.

GOMES, L. P. **Apresenta artigo sobre corrosão e proteção catódica de tubulações industriais**. Disponível em: <<http://www.iecengenharia.com/downloads/artigos-em-tecnicos.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2013.

GOMES, L. P. Corrosão e proteção catódica de tubulações enterradas e tanques em plantas industriais. 2007, p. 1–8. Disponível em: <[http://www.iecengenharia.com/downloads\\_artigo\\_tecnico/\(protecao-catodica-de-plantas-industriais\).pdf](http://www.iecengenharia.com/downloads_artigo_tecnico/(protecao-catodica-de-plantas-industriais).pdf)>. Acesso em: 30 set. 2015.

GOMES, L. P. **Curso de proteção catódica**. Salvador, 2009. 1 CD-ROM. Arquivos em pdf.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 2010.

GUY, A. G. **Ciência dos materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.

HAMILTON, W. A. Role of sulfate-reducing bacteria in corrosion of mild steel: a review. **Biofouling**, v.8, p. 165-194, 1995.

HINRICHS, R.A. ; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. dos. **Energia e meio ambiente**. 2. ed. reimpr. Tradução da 4. ed. norte-americana. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2010.

HOLT, J. G., et al. **Bergey's manual of determinative bacteriology: the actinomycetes**. 9. ed. Baltimore: Williams and Wilkins, 1994. p. 2300–2648.

INFOMET. **Aços e Ligas**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=13>>. Acesso em: 13 set. 2015.

JAVAHERDASHTI, R. A. A review of some characteristics of MIC caused by sulfate-reducing bacteria: past, present and future. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 46, n. 3, p. 173–180, 1999.

KELLY, D. P.; WOOD, A. P. Reclassification of some species of *Thiobacillus* to the newly designated genera *Acidithiobacillus* gen. nov., *Halothiobacillus* gen. nov. and *Thermithiobacillus* gen. nov. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 50, p. 511 – 516, 2000.

KUANG, F. et al. Effects of sulfate-reducing bacteria on the corrosion behavior of carbon steel. **Electrochimica Acta**, v. 52, n. 20, p. 6084-6088, 2007.

LAPEC, **Laboratório de pesquisa em corrosão**. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/lapec/wa\\_files/prote\\_c3\\_a7\\_a3o\\_c3\\_20cat\\_c3\\_b3d.pdf](http://www.ufrgs.br/lapec/wa_files/prote_c3_a7_a3o_c3_20cat_c3_b3d.pdf)> Acesso em: 5out. 2015

GOMES, L. P. Corrosão e proteção catódica de tubulações enterradas e tanques em plantas industriais. 2007, p. 1-8. Disponível em: <[http://www.iecengenharia.com/downloads\\_artigo\\_tecnico/\(protecao-catodica-de-plantas-industriais\).pdf](http://www.iecengenharia.com/downloads_artigo_tecnico/(protecao-catodica-de-plantas-industriais).pdf)> Acesso em: 30 set. 2015.

LEMOS, P. F. S. de. Códigos e regulamentos. In: GOMES, M. G. F. M.; FREIRE, J. L. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Ponto Final, 2009. p. 6–12.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Texto, 2002.

LOUREIRO, A. M. V. **Estudo da corrosão de dutos enterrados em solos contaminados por substâncias químicas**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MAGALHÃES, F. C. M. et al. Critério para avaliação da corrosividade de solos por bactérias redutoras de sulfato. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 6; CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 22., 2012, Salvador. **Anais eletrônicos ...** Salvador, 2012.

MANZANO, C. A. C. Construção e montagem de dutos terrestres. In: GOMES, M. G. F. M.; FREIRE, J. L. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro. Ponto Final, 2009. p. 10-36.

- MARTINS, S. V. **Recuperação de áreas degradadas:** \b ações em áreas degradadas permanente, voçorocas, taludes rodoviário e de mineração. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2009, 270p.
- MEURER, J. E. **Fundamentos de química do solo.** Porto Alegre, 2000, 174p.
- MOREIRA, F. M.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** 2. ed. Lavras: UFLA, 2002.
- MUHLBAUER, W. K. **Pipeline risk management manual:** a tested and proven system to prevent loss and assess risk. 3.rd. Oxford, USA: Elsevier Inc, 2004.
- MUYZER, G.; STAMS, A. J. M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. **Nature Reviews Microbiology**, v. 6, p. 441-454, 2008.
- NACE INTERNATIONAL THE CORROSION SOCIETY. **ANSI/NACE standard RP0502:** Pipeline external corrosion direct assessment methodology. Houston, Texas, 2002.
- NUNES, L. de P.; LOBO, A. C. O. **Pintura Industrial na proteção anticorrosiva.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.
- OLIVEIRA, R. P. de. **Glossário Técnico Manutenção e Engenharia Industrial:** um guia de referência para a indústria. Belo Horizonte, MG: O Lutador, 2003.
- PANONI, F. D. **Coletânea de uso dos aços 2:** princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. 4. ed. 2007. (Manuais Técnicos Perfis Gerdau Açominas). Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/br/produtos/pdfs/manual>>. Acesso em: 15 set. 2015.
- PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993. v.2.
- PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2006.
- PINEAU, S.; DUPONT, I.; BRAISAZ, T. In terrelationship between cathodic protection and microbiologically influenced corrosion in marine environment: brief-review and propects. In: INTERNATIONAL HARBOUR CONGRESS PROCEEDINGS, 13., Bélgica, 2003. p.169-178.
- POSTGATE, J. R. **The sulphace-reducing bactéria.** 2. ed. England: Cambridge University Press, 1984.
- RAMASWAMY, S. D.; ROY, S. K. The importance of importance of evaluating subsoil corrosion and its effects on buried structures. In: SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENT IN THE ANALYSIS OF SOIL BEHAVIOUR AND THEIR APPLICATION TO GEOTECHNICAL STRUCTURES. 1975, Austrália. **Proccedings...** p. 325-334, 1975.
- RENNÓ, M.; LEMGRUBER, N. O ciclo de vida de um empreendimento de dutos. In: GOMES, M. G. F. M.; FREIRE, J. L. **Engenharia de dutos.** Rio de Janeiro. Ponto Final, 2009. p. 1.1-1.20.

RODRIGUES, T. de C. **Efeito de potencial de proteção catódica sobre a biocorrosão de aço-carbono em solo contendo BRS**. Rio de Janeiro, 2010. 145p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, 2010.

SANTOS, E. M. dos, et al. **Gás Natural: estratégias para uma energia nova no Brasil**. São Paulo: Annablume, 2002. 352p.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, R. P. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVA FILHO, G. N.; OLIVEIRA, V. L. **Microbiologia manual de aulas práticas**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2007.

SOUZA, S. A. de. **Composição química dos aços**. São Paulo: Blucher, 2001.

TELLES, P. da S. **Tubulações industriais: materiais, projeto, montagem**. 10. ed. reimpr. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

TORRES, E. S. **Cinética de parâmetros microbiológicos na formação de biofilmes**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

TREVORS, J. T.; COTTER, C. M. Copper toxicity and uptake in microorganisms. **Journal of Industrial Microbiology**, v. 6, 77-84, 1990.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre: Instituto de Biociências. Disponível em: <[http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/index.php?option=com\\_content&view=article&id=15:modelos-digitais-de-elevacao-dos-estados-brasileiros-obtidos-a-partir-do-srtm-shuttle-radar-topography-mission&catid=9:noticias](http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/index.php?option=com_content&view=article&id=15:modelos-digitais-de-elevacao-dos-estados-brasileiros-obtidos-a-partir-do-srtm-shuttle-radar-topography-mission&catid=9:noticias)>. Acesso em: 30 set. 2015.

VAN RAIJ, B. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fostato; Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142p.

VASCONCELOS, E. de A. Estudo de traçado. In: GOMES, M. G. F. M.; FREIRE, J. L. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Ponto Final, 2009.

VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z. F.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de topografia: engenharia cartográfica e de agrimensura**. Santa Catarina: Universidade Federal do Paraná, 2012. p. 14-20, 2012. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/lapec/wa\\_files/prote\\_c3\\_a7\\_c3\\_a3o\\_20cat\\_c3\\_b3d.pdf](http://www.ufrgs.br/lapec/wa_files/prote_c3_a7_c3_a3o_20cat_c3_b3d.pdf)>. Acesso em: 05 out. 2015.

VIEIRA, P. L. et al. **Gás natural: benefícios ambientais no Estado da Bahia**. Salvador: Solisluna Design e Editora, 2005. 132p. (BahiaGás Documenta).

VIDELA, H. A. Electrochemical interpretation of the role of microorganisms in corrosion. In: HOUGHTON, D. R.; SMITH, R. N.; EGGINS, H. O. W. (Eds.). **Biodeterioration and Biodegradation 7**. London: Elsevier Applied Science, 1988.

\_\_\_\_\_. Microbially influenced corrosion: an updated overview. In: ROSSMORE, H. W. (Ed). **Biodeterioration and biodegradation 8**. London: Elsevier Applied Science, 1991.

\_\_\_\_\_. Biofilms and corrosion interactions on stainless steel in seawater. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.34, n.3-4, p. 245-257, 1994.

\_\_\_\_\_. **Corrosion inhibition in the presence of microbial corrosion**: paper no. 223, Corrosion 96. , Houston, TX: NACE International, 1996.

\_\_\_\_\_. **Biocorrosão, biofouling e biodeterioração de materiais**. São Paulo: Edgar Blucher, 2003. 148p.

VIEIRA, R. D. Processos de fabricação de dutos. In: GOMES, M. G. F. M.; FREIRE, J. L. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Ponto Final, 2009. p. 5-30.

VILLELA, T. R. et al. Influência da corrosividade do solo na resposta do eletrodo de referência permanente com cupom. In: INTERCORR, 1., 2010. Salvador. **Anais eletrônicos...** Fortaleza: ABRACO, 2010. Disponível em: <<http://www.abraco.org.br/intercorr2010>>. Acesso em: 2 jul. 2014.

**APÊNDICE A - Termo de autorização de cessão de imagem**

Pelo presente instrumento, autorizo o Sr. Lázaro Dias Machado, a divulgar, utilizar e dispor, na íntegra, para fins institucionais, educativos, informativos, técnicos e culturais, o meu nome e a minha imagem (fotografia) na sua dissertação de mestrado em Energia, da Universidade Salvador – UNIFACS, sob o título **ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DOS POTENCIAIS TUBO/SOLO EM GASODUTOS ENTERRADOS DE AÇO CARBONO API 5L PROTEGIDOS CATODICAMENTE POR CORRENTE IMPRESSA: INFLUÊNCIA DA PROXIMIDADE DO LEITO DE ÂNODOS**, como requisito para obtenção do título de mestre, sem que isto implique ônus para o autor e nem para a UNIFACS.

Nome: \_\_\_\_\_

Endereço: \_\_\_\_\_

Telefone(s): \_\_\_\_\_

Data de nascimento: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

CPF ou RG: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

Salvador, XX de xxxxxxxx de 2015.

---

Assinatura