

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

**EFEITO DA CORROSÃO NO COMPORTAMENTO
GEOTÉCNICO E MECÂNICO DE TUBULAÇÕES
ENTERRADAS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 18 / 09 / 03
Ass.: *Kawajllu*

ÉRIKA MENDES DE SÁ

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil: Geotecnia

ORIENTADOR: PROF. DR. BENEDITO DE SOUZA BUENO

DEDALUS - Acervo - EESC



31100044197



SÃO CARLOS
2003

Class. TESE-EESC ✓
Cvtl. 5020
Tombo T300/03
Sysno 1338358

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S111e

Sá, Érika Mendes de
Efeito da corrosão no comportamento geotécnico e
mecânico de tubulações enterradas / Érika Mendes de
Sá. -- São Carlos, 2003.

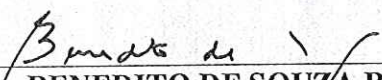
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
Área: Geotecnia.
Orientador: Prof. Dr. Benedito de Souza bueno.

1. Corrosão. 2. Tubulação enterrada. 3. Capacidade
de carga. 4. Simulações numéricas. I. Título.

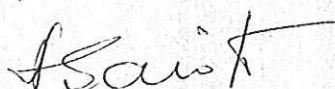
FOLHÁ DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheiro **ÉRIKA MENDES DE SÁ**

Dissertação defendida e julgada em 07-07-2003 perante a Comissão Julgadora:


Prof. Assoc. **BENEDITO DE SOUZA BUENO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada

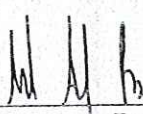

Prof. Tit. **NÉLIO GAIOTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada


Prof. Assoc. **RODRIGO DE MELO PORTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada


Prof. Assoc. **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia


Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Vice-Presidente em exercício da Comissão de Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Benedito de Souza Bueno que, com sua grande experiência, contribuiu para o aperfeiçoamento deste trabalho, o qual já nos rendeu bons resultados.

A minha mãe Ângela Marcia e ao meu pai Frederico de Sá pela motivação e cobrança na conclusão rápida e eficiente do mestrado.

Aos colegas Yuri e Paulo Márcio que me propiciaram as diretrizes basilares para o desenvolvimento da dissertação ora concluída.

Aos meus irmãos Cassiana Mendes de Sá e Dirceu Mendes de Sá pela paciência e incentivo na fase de Qualificação.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia Clever, Sílvio, José Luís, Oscar e Antônio pelo esforço conjunto quando da realização dos ensaios.

A todos os amigos pelo apoio e colaboração e, em especial a Marcio Costanzi pela sua exclusiva dedicação e carinho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	viii
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.2 – OBJETIVO.....	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 – INTRODUÇÃO.....	4
2.2 – CORROSÃO EM TUBULAÇÕES ENTERRADAS.....	4
2.2.1 – O Fenômeno da Corrosão.....	5
2.2.2 – Tipos de Corrosão.....	9
2.2.2.1 – Corrosão Generalizada.....	9
2.2.2.2 – Corrosão por Pite.....	10
2.2.2.3 – Corrosão Galvânica.....	10
2.2.2.3.1 – Corrosão Bioquímica.....	11
2.2.2.4 – Corrosão em Frestas.....	11
2.2.2.5 – Corrosão sob Tensão.....	11
2.2.3 – Avaliação do Processo Corrosivo.....	12

2.3 – INFLUÊNCIA GEOTÉCNICA NO PROCESSO.....	13
CORROSIVO	
2.3.1 – Tipo e Composição do Solo.....	13
2.3.2 – Potencial Corrosivo do Solo.....	15
2.3.2.1 – pH.....	15
2.3.2.2 – Resistividade do Solo.....	16
2.3.3 – Ação Microbiológica do Solo.....	18
2.3.4 – Agressividade do Meio Ambiente.....	18
2.3.5 – A Influência da Instalação do Duto no Processo de Corrosão.....	20
2.3.6 – Influência do Material no Processo Corrosivo.....	21
2.4 – O COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE TUBULAÇÕES.....	22
ENTERRADAS	
2.4.1 – Interação Solo-Conduto.....	26
2.4.2 – Tubulações Rígidas Enterradas.....	28
2.4.2.1 – Tubulações em Vala.....	29
2.4.2.2 – Tubulações Salientes Positivas.....	30
2.4.2.3 – Tubulações Salientes Negativas.....	31
2.4.3 – Tubulações Flexíveis Enterradas.....	32
2.4.3.1 – Deformação Excessiva.....	32
2.4.3.2 – Teoria da Compressão do Anel.....	35
2.4.3.3 – Flambagem das Paredes.....	36
2.4.4 – Tubulações Rígidas x Tubulações Flexíveis.....	37
2.4.5 – O Efeito da Geometria da Corrosão no Comportamento de.....	38
Tubulações	
2.5 – MÉTODOS DE CONTROLE DA CORROSÃO.....	39
2.5.1 – Isolamento Elétrico.....	39
2.5.2 – Revestimentos.....	39

2.5.3 – Proteção Catódica.....	40
2.5.4 – Monitoração e Inspeção.....	40
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 – INTRODUÇÃO.....	42
3.2 – PROJETO DA CAIXA DE TESTES.....	42
3.2.1 – Dimensões.....	42
3.2.2 – Paredes Frontais e Laterais.....	45
3.2.3 – Base e Tampa de Reação.....	47
3.2.4 – Rigidez das Peças.....	47
3.3 – PROJETO DA CHUVA DE AREIA.....	47
3.4 – A BOLSA DE REAÇÃO.....	51
3.5 – O SOLO.....	51
3.5.1 – Curva de Calibração para Definição da Densidade..... Relativa do Solo	52
3.5.2 – Realização dos Ensaios Triaxiais.....	52
3.6 – O SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO.....	54
3.6.1 – Células de Tensão Total.....	54
3.6.2 – Medidas de Deflexões do Tubo.....	55
3.6.3 – Medidas com os Strain Gages.....	56
3.6.4 – Aquisição de Dados.....	57
3.7 – PROGRAMA DE ENSAIOS.....	57
3.7.1 – Análises Numéricas.....	59
4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	61
4.1 – INTRODUÇÃO.....	61
4.2 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS LABORATORIAIS.....	61

4.2.1 – Distribuição de Tensões no Solo.....	62
4.2.2 – Tensão de Compressão nas Paredes do Conduto.....	66
4.2.2.1 – Tubo de Aço.....	66
4.2.2.2 – Tubo de Alumínio.....	68
4.2.3 – Deslocamentos do Conduto.....	71
4.2.3.1 – Ensaio 01.....	71
4.2.3.2 – Ensaio 02.....	72
4.2.3.3 – Ensaio 03.....	74
4.2.3.4 – Ensaio 04.....	76
4.2.3.5 – Ensaio 05.....	77
4.2.3.6 – Ensaio 06.....	78
4.3 – APRESENTAÇÃO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS.....	80
4.4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	93
4.4.1 – Introdução.....	93
4.4.2 – Avaliação dos Deslocamentos.....	93
4.4.3 – Tensão de Compressão nas Paredes do Conduto.....	93
4.4.4 – Análises Numéricas.....	94
5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

RESUMO

SÁ, E. M (2003). O Efeito da Corrosão no Comportamento Geotécnico e Mecânico de Tubulações Enterradas. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do efeito da corrosão no comportamento geotécnico de condutos enterrados através da utilização de ensaios em modelos reduzidos. Foram empregados diferentes padrões de corrosão, em que se variou o grau e a localização da corrosão. Os resultados do trabalho mostram as localizações mais danosas à estrutura, correlacionando resultados dos tubos corroídos com os de tubos intactos. O duto danificado desencadeou um carregamento assimétrico que deve ser considerado para a prevenção de possíveis deslocamentos. Finalmente, o trabalho avalia a influência conjunta da corrosão e da flexibilidade do conduto no comportamento mecânico das tubulações enterradas. De modo a permitir comparações para averiguar a validade do modelo laboratorial adotado, utilizaram-se simulações numéricas, que possibilitam o estudo do problema de forma mais abrangente.

Palavras-chave: corrosão; tubulação enterrada; capacidade de carga; simulações numéricas

ABSTRACT

SÁ, E. M (2003). The Corrosion Effect on the Geotechnical and Mechanical Behavior of Underground Pipelines. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

This work evaluates the influence of corrosion effect on the geotechnical behavior of underground conduits. Small-scale tests were carried out on two different types of pipes, in which the degree and location of the corrosion were changed. The results show the most harmful corrosion locations relative to the intact conduits. The damaged conduits built in and located under asymmetric condition behave as if they were subjected to an asymmetric loading condition and this must be considered to the prevention of possible displacements. Finally, the work evaluates the joined influence of the corrosion and conduit's flexibility on the mechanical behavior of underground pipelines. To allow comparisons to inquire the validation of the adopted laboratorial model, numeric simulations were used, which enable the study of the problem considering other corrosion layouts.

Keywords: corrosion; underground pipeline; bearing capacity; numeric simulations

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.1 – Acidentes em tubulações enterradas entre 1971 e 1995 (CONCAWE, 1997)
- FIGURA 2.1 – Célula de corrosão bimetálica (ABRACO, 2002)
- FIGURA 2.2 – Múltiplas células de corrosão ao longo de uma tubulação enterrada (ABRACO, 2002)
- FIGURA 2.3 – Conduitos em trincheira: a) largas; b) escalonadas; c) inclinadas (Bueno, 2003)
- FIGURA 2.4 – Conduitos em aterro: a) saliente positivo; b) saliente negativo (Bueno, 2003)
- FIGURA 2.5 – Classificação de conduitos enterrados em função da rigidez relativa (Gumbel et al., 1982)
- FIGURA 2.6 – Comparação entre o arqueamento ativo e passivo (McNulty, 1965)
- FIGURA 2.7 – Análise de Marston para uma escavação do tipo trincheira
- FIGURA 2.8 – Principais tipos de ruptura em tubulações flexíveis (GODDARD, 1994)
- FIGURA 2.9 – Distribuição de tensões sobre uma tubulação flexível (SPANGLER, 1941)
- FIGURA 2.10 – Carga de compressão do anel
- FIGURA 2.11 – Diferença entre a distribuição de tensões em tubulações rígidas e flexíveis
- FIGURA 3.1 – Vista geral da caixa de testes
- FIGURA 3.2 – Detalhes do projeto da caixa de testes
- FIGURA 3.3 – Detalhe das chapas móveis
- FIGURA 3.4 – Detalhe da parte inferior da caixa com placa com furos de menor diâmetro
- FIGURA 3.5 – Preenchimento da caixa com chuva de areia
- FIGURA 3.6 – Sistema de acionamento da caixa de areia

- FIGURA 3.7 – Detalhe da proteção do motor
- FIGURA 3.8 – Curva granulométrica da areia fina
- FIGURA 3.9 – Curva de calibração da chuva de areia (D_r x diâmetro do furo)
- FIGURA 3.10 – Resultados dos ensaios de compressão triaxial consolidado drenado. (a) Curvas tensão-deformação; (b) Deformação volumétrica versus deformação axial.
- FIGURA 3.11 – Trajetória de tensões e envoltória de resistência
- FIGURA 3.12 – Localização das células de tensão total
- FIGURA 3.13 – Transdutor de deslocamento utilizado no ensaio
- FIGURA 3.14 – Vistas do transdutor de deslocamento
- FIGURA 3.15 – Strain gages colados na parede do conduto
- FIGURA 3.16 – Configuração do sistema de instrumentação
- FIGURA 3.17 – Padrões de corrosão adotados nas simulações numéricas
- FIGURA 4.1 – Nomenclatura adotada
- FIGURA 4.2 – Distribuição de tensões do solo para conduto corroído no topo
- FIGURA 4.3 – Distribuição de tensões do solo para conduto corroído no O1
- FIGURA 4.4 – Distribuição de tensões do solo para conduto corroído na LD1
- FIGURA 4.5 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de aço – corrosão no topo
- FIGURA 4.6 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de aço – corrosão no O1
- FIGURA 4.7 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de aço – corrosão na LD1
- FIGURA 4.8 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de alumínio – corrosão no topo
- FIGURA 4.9 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de alumínio – corrosão no O1
- FIGURA 4.10 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de alumínio – corrosão na LD1
- FIGURA 4.11 – Deslocamentos radiais para o conduto de aço corroído no topo

- FIGURA 4.12 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de aço- corroído no topo)
- FIGURA 4.13 – Deslocamentos radiais para o conduto de aço corroído no O1
- FIGURA 4.14 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de aço- corroído no O1)
- FIGURA 4.15 – Deslocamentos radiais para o conduto de aço corroído na LD1
- FIGURA 4.16 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de aço- corroído na LD1)
- FIGURA 4.17 – Comparação dos deslocamentos radiais para o conduto de aço
- FIGURA 4.18 – Deslocamentos radiais para o conduto de alumínio corroído no topo
- FIGURA 4.19 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de alumínio - corroído no topo)
- FIGURA 4.20 – Deslocamentos radiais para o conduto de alumínio corroído no O1
- FIGURA 4.21 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de alumínio - corroído no O1)
- FIGURA 4.22 – Deslocamentos radiais para o conduto de alumínio corroído na LD1
- FIGURA 4.23 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de alumínio - corroído na LD1)
- FIGURA 4.24 – Comparação dos deslocamentos radiais para o conduto de alumínio

LISTA DE TABELAS

- TABELA 2.1 – Série Galvânica Prática (ABRACO, 2002)
- TABELA 2.2 – Relação entre a corrosividade e resistividade do solo (CORROSION DOCTORS, 2002)
- TABELA 2.3 – Potencial corrosivo das regiões brasileiras (BEDNAR, 1989)
- TABELA 2.4 – Agrupamento de solos quanto à ação corrosiva (AWWA, 1989)
- TABELA 2.5 – Caracterização de solos quanto à ação corrosiva (AWWA, 1989)
- TABELA 2.6 – Principais Classes de Instalação (BULSON, 1985)
- TABELA 2.7 – Comportamento estrutural de tubos enterrados de acordo com a rigidez relativa (Gumbel et al., 1982)
- TABELA 3.1 – Valores de e/D adotados em ensaios laboratoriais e análises numéricas
- TABELA 3.2 – Programa de ensaios em modelos laboratoriais
- TABELA 3.3 – Programa de modelos das análises numéricas
- TABELA 4.1 – Tubo de aço corroído no topo
- TABELA 4.2 – Tubo de alumínio corroído no topo
- TABELA 4.3 – Tubo de aço corroído no ombro 1
- TABELA 4.4 – Tubo de alumínio corroído no ombro 1
- TABELA 4.5 – Tubo de aço corroído na linha d'água 1
- TABELA 4.6 – Tubo de alumínio corroído na linha d'água 1
- TABELA 4.7 – Tubo de aço e alumínio corroído no ombro 1 e linha d'água 2
- TABELA 4.8 – Tubo de aço e alumínio corroído no topo e linha d'água 1
- TABELA 4.9 – Tubo de aço e alumínio corroído no ombro 1 e linha d'água 1

- TABELA 4.10 – Tubo de aço e alumínio corroído na linha d'água 1 e linha d'água 2
- TABELA 4.11 – Tubo de aço e alumínio corroído no topo e ombro 1
- TABELA 4.12 – Influência da rigidez – conduto corroído no topo – 45% de corrosão
- TABELA 4.13 – Influência da rigidez – conduto corroído no topo – 70% de corrosão
- TABELA 4.14 – Influência da rigidez – conduto corroído no O1 – 45% de corrosão
- TABELA 4.15 – Influência da rigidez – conduto corroído no O1 – 70% de corrosão
- TABELA 4.16 – Influência da rigidez – conduto corroído na LD1 – 45% de corrosão
- TABELA 4.17 – Influência da rigidez – conduto corroído na LD1 – 70% de corrosão
- TABELA 4.18 – Influência da rigidez – conduto corroído no O1 e LD2 – 70% de corrosão
- TABELA 4.19 – Influência da rigidez – conduto corroído no Topo e LD1 – 70% de corrosão
- TABELA 4.20 – Influência da rigidez – conduto corroído no O1 e LD1 – 70% de corrosão
- TABELA 4.21 – Influência da rigidez – conduto corroído na LD1 e LD2 – 70% de corrosão
- TABELA 4.22 – Influência da rigidez – conduto corroído no topo e O1 – 70% de corrosão
- TABELA 4.23 – Influência do padrão de corrosão – tubo de aço – 45% de corrosão
- TABELA 4.24 – Influência do padrão de corrosão – tubo de alumínio – 45% de corrosão
- TABELA 4.25 – Influência do padrão de corrosão no deslocamento horizontal – tubo de aço – 70% de corrosão
- TABELA 4.26 – Influência do padrão de corrosão no deslocamento vertical – tubo de aço – 70% de corrosão
- TABELA 4.27 – Influência do padrão de corrosão no deslocamento horizontal – tubo de alumínio – 70% de corrosão
- TABELA 4.28 – Influência do padrão de corrosão no deslocamento vertical – tubo de alumínio – 70% de corrosão
- TABELA 4.29 – Influência do módulo de elasticidade do conduto ($E=30000\text{kPa}$)
- TABELA 4.30 – Máxima tensão de compressão nas paredes do conduto

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABRACO –	Associação Brasileira de Corrosão
AWWA –	American Water Works Association
AASHTO –	American Association of State Highway and Transportation Officials
NBS –	National Bureau of Standards
FBE –	Fusion Bonded Epoxy
H ₂ –	Hidrogênio
H ₂ S –	Ácido sulfúrico
CO ₂ –	Gás carbônico
O ₂ –	Oxigênio
<i>A</i> –	Fator de arqueamento
δ –	Deflexão relativa entre a estrutura e a superfície do solo
<i>C</i> –	Coesão do solo
W_c –	Carga vertical total
<i>B</i> –	Largura da vala
<i>H</i> –	Altura de cobertura do conduto
σ_v –	Tensão vertical
σ_h –	Tensão horizontal
P_i –	Pressão na interface solo-conduto
γ –	Peso específico do solo
<i>q</i> –	Sobrecarga uniformemente distribuída
k_r –	Razão entre a pressão horizontal e vertical do solo
<i>R</i> –	Raio do conduto

T –	Carga de compressão do anel
D –	Diâmetro do conduto
t –	Espessura da parede do conduto

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO**1.1 – INTRODUÇÃO**

A utilização de tubulações enterradas cresce sistematicamente ao longo dos anos em todo o mundo, tendo em vista que este tipo de obra está vinculado desde às simples redes de serviço urbano ou às sofisticadas dutovias para transporte de produtos da indústria química e petroquímica, até as recentes redes de transmissão de dados.

Um histórico da utilização de dutovias revela que as redes enterradas são empregadas desde a Antiguidade. Chineses, egípcios e romanos foram os pioneiros, os romanos chegaram a empregar tubos de chumbo no transporte de líquidos. Nos Estados Unidos, 1852, as tubulações enterradas aparecem associadas ao abastecimento de água (AWWA, 1989). No Brasil, além das redes de abastecimento, os dutos surgem ligados ao escoamento das fontes de produção, entre eles, os oleodutos datam da década de 40 e os gasodutos, da década de 80. Como um bom exemplo da atual fase de desenvolvimento, cita-se a obra do Gasoduto Brasil-Bolívia, que revelou apreciável desenvolvimento da engenharia brasileira, capaz de suplantar os percalços decorrentes da implantação de uma dutovia deste porte.

A opção de transporte de fluidos em tubulações enterradas é responsável pela solução de muitos problemas de engenharia relacionados à funcionalidade, economia, velocidade e, principalmente, à segurança. Esta opção também permite que muitos produtos sejam transportados quase que inteiramente sem o conhecimento da população e com as mínimas emissões para o meio ambiente.

Atualmente, as malhas enterradas estão presentes não só em todos os aglomerados urbanos, mas também atravessando as mais diferentes regiões do globo, logo, as conseqüências advindas de um acidente podem ser gravíssimas, o que produz a consciência do quanto é importante o crescente desenvolvimento de técnicas e equipamentos que tornem o sistema seguro e confiável. Portanto, os aspectos ligados à segurança de tubulações enterradas devem ser considerados de fundamental importância no projeto, já que, qualquer falha no sistema pode levar à ocorrência de um acidente de grandes proporções, incluindo-se

perdas de vidas humanas, perda de capacidade operacional e danos significativos à propriedade e ao meio ambiente não mais admitidos.

Com o crescimento industrial, o número de produtos que precisam de transporte é cada vez maior. No Brasil, a malha instalada é considerada pequena em comparação com a demanda existente, porém, as expectativas de crescimento são cada vez maiores. Apenas como exemplo, estima-se que a Petrobras estará atingindo nos próximos anos um complexo dutoviário de 21000km (PETROBRAS, 2002).

No caso de tubulações metálicas enterradas, um dos grandes problemas relativo à segurança diz respeito à deterioração causada pela corrosão. Estudos do National Bureau of Standards (NBS) mostram que problemas devido à corrosão custaram aos EUA, em 1996, 4,2% do PNB do país, ou seja, 290 bilhões de dólares (PAYER & UGIANSKY, 1996). Um estudo realizado pela companhia européia de óleo, que coletou dados de acidentes em tubulações, verificou que 30% dos acidentes envolvendo derramamento de óleo entre 1971 e 1995 foram causados pelo efeito da corrosão nos dutos enterrados. Isto constitui a maior causa de desastres, ficando apenas atrás dos danos provocados por atividades de terceiros (CONCAWE, 1997). A Figura 1.1 mostra uma visualização das principais causas de acidentes durante este período.

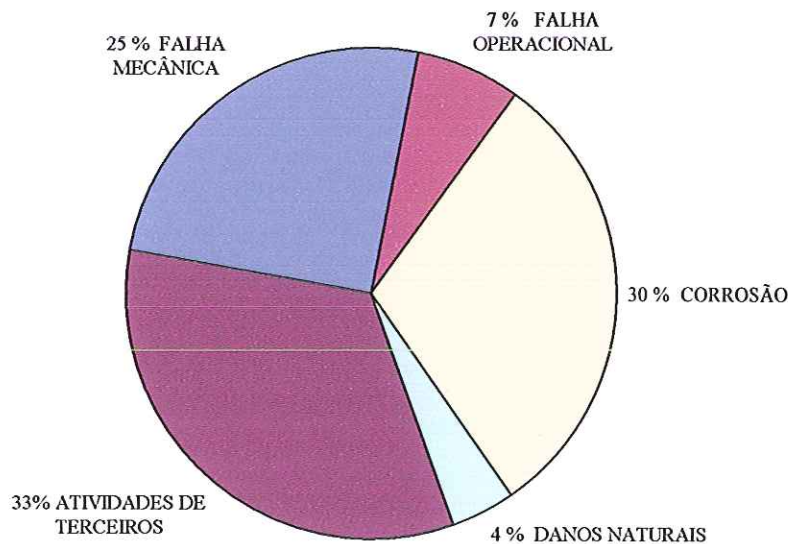


FIGURA 1.1 – Acidentes em tubulações enterradas entre 1971 e 1995 (CONCAWE, 1997)

A perda ou vazamento de substâncias químicas é um dos tipos de acidentes mais graves causados por falhas no sistema dutoviário. A causa dos vazamentos pode estar relacionada à deterioração causada nas tubulações pela corrosão. Os vazamentos podem levar à contaminação não somente para solos, como também a reservatórios aquíferos. As

consequências destes danos são muitas vezes irreparáveis para a sociedade. No Brasil, segundo relato para a Convenção sobre Mudança de Clima, em 1995, a quantidade de gás metano na atmosfera, responsável pelo aumento da temperatura global, resultante de emissões fugitivas de gás natural canalizado em sistemas de distribuição, deve-se basicamente a acidentes por vazamentos em tubulações. Neste caso também a corrosão aparece como a grande causa deflagradora destes vazamentos, após atividades de terceiros.

1.2 – OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é identificar, através de ensaios em modelos reduzidos, a magnitude das tensões e deformações a que o conduto passa a ser submetido devido a um processo corrosivo.

CAPÍTULO 02

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**2.1 – INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresenta-se a revisão da literatura relacionada ao comportamento mecânico de tubulações enterradas sujeitas à corrosão. O conhecimento atual permite verificar que o processo de corrosão gera perdas de capacidade de carga do conduto. Além disto, mostra-se que o comportamento mecânico está fortemente associado à influência do tipo de solo onde o conduto é implantado e ao processo construtivo. Por fim, discorre-se brevemente a respeito dos métodos de controle de corrosão, que podem ser utilizados para a mitigação do processo.

2.2 – CORROSÃO EM TUBULAÇÕES ENTERRADAS

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material metálico pela ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 1982).

Algumas considerações energéticas devem ser ressaltadas no processo de corrosão. Para a obtenção de um metal é necessário a utilização de uma quantidade de energia, que é extraída por intermédio de processos metalúrgicos. Como resultado do próprio processo, os metais, nas suas formas refinadas, encontram-se num nível energético superior ao do composto que lhes deu origem. Esta é, portanto, a razão termodinâmica da espontaneidade das reações de corrosão.

A corrosão, como normalmente encontrada em uma tubulação metálica, é, basicamente, um processo eletroquímico por natureza. A tubulação metálica envolvida por um eletrólito, no caso, o solo, sofre ao longo do tempo uma variação de potencial elétrico em sua extensão, como resultado da existência de áreas anódicas e catódicas. Estas áreas de diferentes potenciais elétricos são a base para a formação de uma célula de corrosão.

2.2.1 – O Fenômeno da Corrosão

Para que uma célula de corrosão atue algumas condições específicas devem estar presentes, como:

- A existência de um anodo e de um catodo;
- A diferença de potencial elétrico entre o anodo e o catodo. Em tubulações enterradas, esta diferença entre o potencial elétrico pode ter diversas origens;
- A presença de um caminho metálico conectando eletricamente o anodo e o catodo, estando ambos imersos em um eletrólito condutivo eletricamente.

A mistura de solo e água em contato com a tubulação é normalmente suficiente para preencher estas condições.

Desde que estas condições estejam presentes, uma célula de corrosão é criada, com fluxo de corrente elétrica, sendo o metal então consumido no anodo, como pode ser observado pela ilustração apresentada na Figura 2.1. A remoção de uma destas condições interromperá o processo corrosivo.

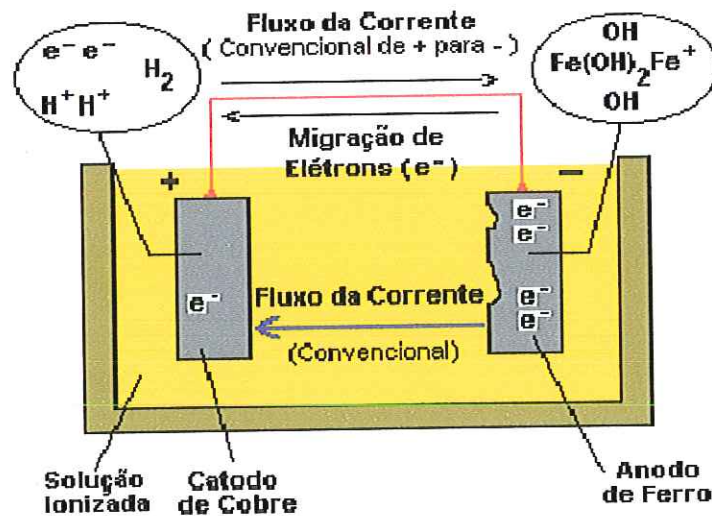


FIGURA 2.1 – Célula de corrosão bimetálica (ABRACO, 2002)

O fluxo de corrente é definido em termos do conceito convencional, que é contrário ao conceito de fluxo de elétrons. O circuito é completado pelo eletrólito. Assim o fluxo de corrente convencional, no eletrólito, será no sentido do anodo para o catodo. A Figura 2.2 é uma representação esquemática da corrosão, mostrando a direção da corrente na sua forma convencional.

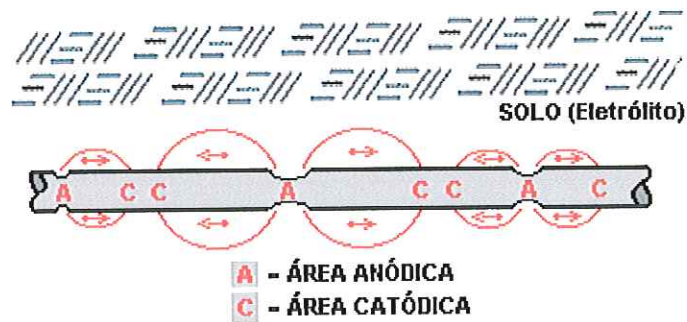


FIGURA 2.2 – Múltiplas células de corrosão ao longo de uma tubulação enterrada
(ABRACO, 2002)

O anodo e o catodo de uma célula de corrosão podem estar afastados entre si por alguns centímetros ou até metros, de acordo com a origem da causa de diferença potencial entre os dois pontos. A taxa de corrosão é diretamente proporcional à taxa de fluxo de corrente, que é afetada por diversos fatores, entre eles: a resistividade do solo e a eficiência do revestimento da tubulação.

A diferença elétrica entre o anodo e o catodo resulta na migração de elétrons do anodo para o catodo. No anodo, com a perda de elétrons, permanecem átomos de carga positiva de ferro que se combinam com íons do ambiente carregado positivamente, formando hidróxido ferroso, que, por sua vez, normalmente, reage a seguir para formar hidróxido férrico (ferrugem).

No catodo, ocorre um acréscimo de elétrons provindos do anodo. Este acréscimo de íons, que carregados negativamente se combinam com íons de hidrogênio do ambiente carregados positivamente, formando hidrogênio (H_2). Este hidrogênio que se forma na superfície do catodo é à base do filme de polarização. Este filme de hidrogênio pode ser imaginado como uma camada isolante que introduz resistência ôhmica em um circuito e reduz o fluxo de corrente.

Como o filme de hidrogênio cria e aumenta a resistência à corrosão, pode parecer que os filmes atuam reduzindo o fluxo de corrente na célula de corrosão. Entretanto, a ação de efeitos despolarizantes tende a remover esta membrana. O hidrogênio formado na superfície do catodo escapa na forma de gás, combinado com o oxigênio dissolvido no eletrólito, ou através de efeito mecânico, é removido por movimento do eletrólito passando em contato com a superfície do catodo. Qualquer que seja o mecanismo de remoção do hidrogênio, o efeito final é que ele permite que a célula de corrosão se mantenha ativa, e o seu grau de atividade será dado em função da taxa de remoção do hidrogênio.

Casos de corrosão por aeração diferencial ocorrem em tubulações que, embora totalmente enterradas, atravessam solos com distribuições granulométricas diferentes. Tais

solos permitem maior ou menor permeabilidade, dependendo de diversos fatores, incluindo a granulometria. A colocação de tubulações parcialmente enterradas também deve ser evitada, sempre que possível, de forma a prevenir a ocorrência da corrosão por aeração diferencial. As zonas mais atacadas no caso de condutos semi-enterrados são as regiões logo abaixo do nível do solo.

O fenômeno da corrosão é regido pela Lei de Ohm, expressa pela seguinte relação:

$$I = E/R \quad (2.1)$$

Onde:

I = Corrente em ampères;

E = Diferencial de voltagem entre o anodo e o catodo;

R = Resistência de todo o circuito.

A corrente é o fator primário na corrosão eletrolítica. Para que uma célula de corrosão desenvolva um fluxo é preciso vencer uma certa resistência, nomeada "resistência aparente", que é o resultado simultâneo de resistência em série e em paralelo.

A resistência através do eletrólito entre o anodo e o catodo e a resistência de isolamentos afetam a resistência aparente. Grandes variações de resistência podem ser observadas no eletrólito (solo).

Os tamanhos relativos e as configurações das áreas anódicas e catódicas são de fundamental importância no processo corrosivo. Quanto menor o tamanho da área anódica ou catódica, maior será a resistência de contato entre ela e o eletrólito, com conseqüente fluxo de corrente mais baixo. A respeito da proporção entre área anódica e catódica, à medida que se tem uma pequena área catódica em relação a anódica, a corrosão não se processará de forma severa ou rápida. Entretanto, se a proporção é invertida, a presença de pequenas áreas anódicas em relação a grandes áreas catódicas produz as razões mais desfavoráveis possíveis de corrosão, podendo provocar em certos solos células corrosivas ativas e destrutivas.

A célula de visualização mais simples é a de corrosão de um metal heterogêneo. Esta célula pode ser criada quando metais diferentes são empregados na construção de uma tubulação. Como existe um contato elétrico entre eles e, desde que estejam imersos num eletrólito comum, a célula é criada. Sob tais condições, qualquer par de metais apresenta uma diferença de potencial elétrico. A magnitude deste potencial e qual dos metais será anódico depende normalmente da posição dos metais na série de força eletromotiva.

A posição relativa destes metais é mostrada na Série Galvânica Prática, de acordo com a Tabela 2.1. Todos os potenciais são medidos tendo como referência um eletrodo

padrão de cobre-sulfato comumente usado em teste de controle de corrosão de tubulações em campo.

TABELA 2.1 – Série Galvânica Prática (ABRACO, 2002)

METAL	VOLTS (*)
Magnésio comercial 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 comercial puro	-0.80
Aço acalmado (limpo e brilhante)	-0.5 a -0.8
Aço acalmado (enferrujado)	-0.4 a -0.55
Aço fundido (não grafitado)	-0.50
Chumbo	-0.50
Aço acalmado em concreto	-0.20
Cobre, Latão e Bronze	-0.20

(*) Potenciais típicos observados em solos neutros e água, medidos com referência ao eletrodo de sulfato de cobre padrão.

A Série Galvânica Prática foi elaborada colocando-se os metais mais ativos como predominantes, de modo que, de quaisquer entre dois metais selecionados, aquele com maior potencial será o anodo e o menos ativo o catodo. Por exemplo, o aço em contato com cobre, poderá desenvolver uma corrosão por metais heterogêneos caso não sejam isolados eletricamente, onde o aço será o anodo, logo corroído.

As razões para que uma parte da tubulação atue como anodo em relação à outra são várias. Uma condição bastante semelhante à da corrosão de metais dissimilares ocorre, por exemplo, quando uma nova tubulação é inserida em contato com a tubulação já existente, usualmente em decorrência de uma substituição por corrosão. O novo trecho, apesar de exposto às mesmas condições de solo da tubulação antiga, apresentará potencial diferente, atuando como área anódica que sofre corrosão. Durante trabalhos de manutenção num sistema de tubulação existente, a utilização inadequada de ferramentas pode cortar a parede do tubo expondo uma área da tubulação que se torna área anódica.

De forma muito similar, como as células de corrosão podem se estabelecer em metais heterogêneos, uma tubulação metálica, que percorre solos heterogêneos, pode também estabelecer células de corrosão. O potencial elétrico de um metal em relação ao

meio pode variar com as diferenças na composição do eletrólito, presente na água que preenche os poros do solo. Um outro caso que pode ser tratado de forma similar à dos solos dissimilares, envolve o aço em contato com o solo versus aço no concreto (bloco de ancoragem). O ambiente eletrolítico do concreto é totalmente distinto do solo. A tubulação metálica enterrada no solo se torna uma área anódica em relação ao aço embutido no concreto.

Para o caso de tubulações galvanizadas, tem-se o zinco eletricamente conectado ao aço, imersos no eletrólito. Caso o revestimento de zinco seja danificado, expondo a tubulação metálica ao eletrólito, de acordo com a Série Galvânica, o zinco, metal mais ativo atua como anodo sendo consumido, livrando a tubulação da corrosão durante o tempo em que esteja atuando como anodo.

2.2.2 – Tipos de Corrosão

Os variados tipos de corrosão que podem ocorrer em condutos enterrados, relacionados ao processo corrosivo de natureza eletroquímica, apresentam mecanismos idênticos, constituindo-se de áreas anódicas e catódicas. No entanto, a forma e grau de desgaste das tubulações apresentam configurações distintas. Os seguintes tipos de corrosão, com suas características específicas serão abordados a seguir: corrosão generalizada, por pites, galvânica, em frestas e corrosão sob tensão.

2.2.2.1 – Corrosão Generalizada

A corrosão generalizada é caracterizada pelo processo do ataque corrosivo sobre toda a superfície da tubulação, ou numa larga fração da área total. Na verdade, a corrosão generalizada consiste de várias células de corrosão, localizadas em toda a estrutura. Ocorre uma diminuição gradativa da espessura das paredes do duto podendo levar à ruptura. Porém, como a corrosão ocorre uniformemente ao longo da superfície do metal componente, esta pode ser prevenida praticamente através de proteção catódica, uso de revestimentos protetores ou pinturas, ou simplesmente por uma especificação de projeto que exija uma espessura de sacrifício em função do ataque corrosivo. Todos estes métodos de controle citados serão discutidos em um capítulo posterior. A corrosão generalizada é geralmente ocasionada por danos nos sistemas de revestimentos protetores dos condutos enterrados.

2.2.2.2 – Corrosão por Pite

A corrosão por pite tem como principais características a ocorrência em pequenas áreas da superfície metálica e uma alta velocidade de ação. Isto é devido à presença de células de corrosão que possuem área catódica muito maior do que a anódica, o que acelera o desgaste comparado à corrosão generalizada. As áreas anódicas por serem pontos pequenos na superfície do metal concentram a corrosão, formando as cavidades denominadas *pites*.

A corrosão por pite é considerada mais perigosa relativamente à corrosão generalizada, tendo em vista a maior dificuldade para detectar, prognosticar e projetar contra este tipo de corrosão. Ao lado da perda localizada de espessura nas paredes das tubulações, a corrosão por pite também pode ser prejudicial à medida que atua no aumento das tensões circunferenciais do conduto.

Ainda se referindo à corrosão localizada, de acordo com SUMMERSON (1984), ambientes com pH entre 4 e 9 são mais propícios a sua ocorrência, enquanto que, condições mais ácidas ou alcalinas a camada protetora é facilmente removida, promovendo desta forma a corrosão generalizada.

2.2.2.3 – Corrosão Galvânica

A corrosão galvânica, também chamada de corrosão do metal dissimilar, se processa quando dois metais dissimilares são colocados em contato num eletrólito favorável à corrosão. Caracteriza-se por apresentar corrosões localizadas, próximas à região do acoplamento, ocasionando profundas perfurações no material metálico. Quando os dois metais estão conectados, um dos metais no par se torna o anodo, que sofre corrosão mais rapidamente, comparando ao caso da tubulação ser formada unicamente pelo metal anódico. Enquanto o outro metal se torna o catodo, que contrário ao metal anódico, é corroído mais vagorosamente do que se estivesse isolado. A força que leva aqui ao processo corrosivo é a diferença de potencial entre os distintos materiais.

A corrosão galvânica pode ser uma das formas mais comuns, assim como uma das mais destrutivas formas de corrosão, tendo sido a força eletromotiva bimetálica descoberta no final do século XVIII por Luigi Galvani. Pelas considerações apresentadas, conclui-se sobre a necessidade da adoção de medidas de proteção a fim de evitar, ou mitigar, a ação corrosiva devido à formação de pilhas galvânicas. Dentre essas medidas, pode-se estabelecer o uso de inibidores de corrosão, o isolamento elétrico dos materiais que apresentam diferentes potenciais, a aplicação de revestimentos protetores, avaliação da relação área

anódica/catódica, o emprego da proteção catódica, como também, se possível, a seleção de materiais com potenciais próximos.

2.2.2.3.1 – Corrosão Bioquímica

A corrosão bioquímica não é um tipo distinto de corrosão, e sim uma outra causa de corrosão galvânica. Possíveis bactérias presentes nos solos provocam alterações em suas propriedades físicas e químicas, produzindo desta forma células galvânicas ativas. A ação também pode se dar removendo o filme protetor de hidrogênio da área catódica.

A corrosão bioquímica em tubos enterrados pode se manifestar tanto a partir do exterior, como avaliado, ou também do interior. A corrosão interna está relacionada ao material transportado pelo conduto, que muitas vezes propicia o surgimento da ação de microorganismos. Os oleodutos da área norte da Bacia de Campos vêm apresentando falhas por corrosão interna devido à atividade de bactérias desde 1994 (ANDRADE et al., 1999). O mecanismo da corrosão nestes dutos é baseado na atuação de bactérias redutoras de sulfato sobre incrustações de sulfato de bário que levam à geração de H_2S e à corrosão localizada sob o depósito.

2.2.2.4 – Corrosão em Frestas

A corrosão em frestas aparece de forma concentrada, estando usualmente associada à solução estagnada no eletrólito. Estas soluções ocorrem nas frestas formadas nas soldas ou juntas, nas arruelas das tubulações, trincas, em revestimentos danificados e outros defeitos metalúrgicos.

Na verdade, como a difusão do oxigênio para dentro das frestas se torna restritiva, células de aeração diferencial tendem a se formar entre a fresta e a superfície externa. O mais baixo teor de oxigênio na fresta forma um anodo na superfície do metal, enquanto a superfície metálica em contato com o eletrólito exposto a presença de oxigênio atuará como catodo.

2.2.2.5 – Corrosão sob Tensão

A corrosão sob tensão é induzida pela influência combinada de tensões de tração e um meio corrosivo. Pode também iniciar com base no processo corrosivo por pites. A distribuição uniforme de tensões normalmente não prejudica a resistência à corrosão. Em

uma tubulação metálica esta é a configuração de tensões usual, porém, pontos de concentração de tensão adjacentes a estas áreas de tensão uniformes podem provocar corrosão se o sistema for imerso em um eletrólito favorável. As tensões de tração requeridas para desencadear o processo corrosivo podem ser provenientes de tensões diretamente aplicadas à tubulação, ou na forma de tensões residuais. Confecção e deformação a frio, solda, tratamento térmico, esmerilhamento são fatores que podem introduzir tensões residuais. A magnitude e importância de tais tensões são geralmente subestimadas.

Estudos têm indicado que a preparação da superfície metálica da tubulação durante a aplicação de revestimentos induz tensões residuais de compressão à superfície do metal, o que reduz a susceptibilidade do aço de iniciar a corrosão sob tensão (WILLIAMSON & WILMOTT, 1999).

Usualmente, a superfície da tubulação sob corrosão por tensão permanece inalterada, mas com finas trincas penetrando o material. A corrosão sob tensão é classificada como uma forma catastrófica, já que a detecção de tão finas trincas é somente possível através da microscopia e os danos não são facilmente previstos.

Uma ruptura do sistema de dutos enterrados pode ocorrer de forma inesperada, com uma mínima perda global de massa. A seção rompida por corrosão sob tensão apresenta uma diferença de cores, atingindo a região mais próxima ao meio agressivo numa tonalidade escura, característica do produto da corrosão, nas regiões mais internas predomina a cor do metal intacto. Os principais fatores que influem na corrosão sob tensão são o nível de tensões aplicadas interna e externamente ao material, a susceptibilidade do material ao fenômeno, o meio corrosivo e o tempo (DUTRA & NUNES, 1991).

2.2.3 – Avaliação do Processo Corrosivo

A severidade da corrosão, independente do tipo que se apresente em um dado caso, depende de muitos fatores, alguns dos quais, já abordados anteriormente, afetam mais ou menos o fluxo de corrosão, como a posição relativa dos metais na Série Galvânica, a proporção entre as áreas anódicas e catódicas, a resistência do circuito metálico, o tipo e a composição do eletrólito, a sua condutividade, resistividade e uniformidade, assim como as condições despolarizantes.

É necessário avaliar e caracterizar a origem da corrosão, o grau de corrosividade de diversos produtos quanto à taxa de deteriorização do duto por perda de massa, considerando no estudo da corrosividade efeitos de escoamento e alternância de derivados. A corrosão pelo transporte de água ocorre principalmente na parte inferior da circunferência do tubo,

dentre os principais fatores que transformam a água num potencial corrosivo são a presença de materiais sólidos dissolvidos, seu pH e alcalinidade.

A produção de petróleo é inevitavelmente associada à presença de água, que como citado apresenta impurezas que podem dar origem a sérios problemas operacionais relacionados à corrosão. A corrosividade da água é também influenciada pela presença de gases dissolvidos (H_2S , CO_2 , O_2), ácidos orgânicos, cloretos, bactérias e, ainda, por parâmetros operacionais como a velocidade do fluxo, pressão e temperatura. O efeito destes elementos é interativo, o que torna difícil a identificação do principal mecanismo atuante e a escolha de formas de controle efetivas.

É conhecido que a severidade da corrosão é agravada em dutos que transportam álcool. Além da importância do produto transportado, tem-se a importância quanto à taxa de utilização da tubulação, demonstrando que o escoamento intermitente também é outro agravante no processo corrosivo.

2.3 – INFLUÊNCIA GEOTÉCNICA NO PROCESSO CORROSIVO

Para uma adequada utilização de tubulações enterradas, que considere a durabilidade e segurança da estrutura, é necessário que se conheça as condições internas e externas que irão atuar em contato com o conduto. Trata-se de estabelecer o grau de hostilidade apresentado pelo meio circundante, no presente trabalho restrito ao solo externo envolvendo o duto.

O potencial corrosivo de uma dada área é função de muitas variáveis, como a presença de água, o grau de aeração, o pH do solo, resistividade elétrica, potencial redox, nível de cloretos, nível de sulfatos, interferência microbiológica, temperatura, os quais serão abordados ao longo do texto seguinte.

2.3.1 – Tipo e Composição do Solo

A corrosão de metal implantado no solo é extremamente variável e, embora o meio ambiente do subsolo seja complexo, é possível fazer algumas generalizações sobre os tipos de solo e associá-los aos níveis de corrosão. O solo é um material heterogêneo e, em geral, constituído de três fases, sólida, aquosa e gasosa. A fase sólida é formada pelas partículas do solo, que variam em tamanho e em composição química e no teor de matéria orgânica. A fase aquosa, que contribui para a umidade do solo, é o veículo que permite a corrosão se proceder. A fase gasosa consiste no volume de ar que ocupa os poros do solo. Parte deste ar pode se encontrar dissolvido na fase aquosa.

Os solos são classificados de acordo com a distribuição granulométrica e composição química de suas partículas. Convenções classificam os solos em areias, siltes e argilas. Os solos raramente apresentam exclusivamente uma destas frações, são na maior parte combinações entre estes componentes. Solos argilosos são caracterizados pela sua grande habilidade em reter água. Por esta razão, estes solos apresentam, significativamente, potencial corrosivo mais alto do que os solos arenosos.

A água existente no solo pode se encontrar nas seguintes formas, livre e devido à capilaridade. A água livre, determinada pelo nível d'água, que pode estar acima do nível do solo, em áreas pantanosas, até metros abaixo da superfície. Este é o fator menos importante na determinação da corrosão, já que a maior parte das estruturas enterradas se encontra acima do nível d'água.

Os lençóis freáticos elevados agem sobre as estruturas enterradas como se elas estivessem num ambiente imerso. Água gravitacional proveniente de precipitações pluviométricas, sistemas de irrigação ou condensação é absorvida pelo solo em uma proporção relacionada a sua porosidade. A frequência do contato determina a umidade na superfície do metal. Em áreas bastante chuvosas, a maior parte dos sais solúveis podem ser lixiviados do solo. Já as áreas desérticas, de baixa precipitação, podem ter alto nível de sais e, assim, serem mais corrosivas do que ambientes tropicais. A água devido à capilaridade, ocupando os poros e a superfície das partículas do solo, é a principal origem da taxa de corrosão do metal no solo. Acima do nível d'água, os poros do solo funcionam como uma rede de finos tubos capilares que são preenchidos com água.

O acesso do ar nos poros depende da permeabilidade do solo. Solos mais secos ou de granulometria grossa permitem o acesso de mais oxigênio para a sub-superfície e aumentam a taxa de corrosão relativa às áreas deficientes de oxigênio.

Avaliar a formação do solo e sua composição é uma forma de se obter a maior ou menor interferência que uma ou mais variáveis irá apresentar no processo corrosivo. Características de permeabilidade do solo indicam além da capacidade de retenção de água e ar, também de outras substâncias que podem participar na corrosão.

O solo como meio corrosivo pode ser tratado como uma substância porosa que consiste de mais ou menos sólidos, parcialmente coloidais, apresentando constituintes solúveis e higroscópicos e organismos vivos. Os poros do solo contêm ar e água. Para que a corrosão se realize nos solos é necessária umidade e, geralmente, oxigênio. Não obstante, o aço é também corroído em condições anaeróbias (CALIFORNIA SOIL NAIL COMMITTEE, 2002).

2.3.2 – Potencial Corrosivo do Solo

Argilas altamente corrosivas, solos úmidos, escórias e solos ácidos (baixo pH) são materiais em que ocorrem os mais elevados níveis de corrosão em tubulações enterradas. O uso de reaterros limpos durante a instalação dos condutos pode diminuir os efeitos negativos do solo circundante.

Quanto ao grau de aeração, a concentração de oxigênio decresce com o aumento da profundidade de solo. Em solos neutros ou alcalinos, a concentração de oxigênio tem um importante efeito na taxa de corrosão devido à sua participação na reação catódica. Contudo, na presença de certos micróbios (como as bactérias redutoras de sulfato), a razão em que a corrosão se desenvolve pode ser bastante alta, mesmo sob condições anaeróbias. Escavações durante o processo de instalação dos condutos pode obviamente aumentar o grau de aeração no solo, comparado com o estado inalterado.

O potencial eletroquímico (redox) corresponde à habilidade do solo em reduzir ou oxidar um metal. O potencial redox é essencialmente uma medida do grau de aeração no solo. Um alto potencial redox indica um alto nível de oxigênio. Baixos valores de potencial redox podem prover uma indicação das situações que conduzem a uma atividade bacteriológica anaeróbia.

2.3.2.1 – pH

Muitos esforços vêm sendo empregados para se estabelecer uma relação definitiva entre a corrosão e a concentração do íon hidrogênio, pH do solo, porém, sua constatação se torna inviável, já que o pH não é uma medida de polarização. Além do mais, o pH do solo varia com as mudanças sazonais, de acordo com cada localização.

O valor de pH do solo é determinado pelo teor de ácido carbônico, ácidos orgânicos e inorgânicos (produzidos por atividades microbiológicas), e por resíduos industriais ou chuvas ácidas. Em países de clima temperado, com raras exceções, o pH situa-se usualmente entre 5 e 8. Sobre estas condições normais, a corrosividade do solo é determinada principalmente por outros fatores além do pH (BUCCI & BUCKLEY, 2001). No Brasil, porém, há vastas ocorrências de solos com elevados teores de alumínio e ferro o que torna os solos muito ácidos, no geral, com pH inferior a 5. Isto é certamente um aspecto particular que merece atenção.

A acidez do solo é produzida pela lixiviação de minerais, decomposição de plantas ácidas, resíduos industriais, chuvas ácidas e certas formas de atividade microbiológica. Em

solos ácidos a proporção de corrosão por pite aumenta com a acidez total do solo e com o aumento da porcentagem total de volume do solo que é preenchido por ar estando o mesmo em seu teor normal de umidade.

Os solos alcalinos, por outro lado, tendem a apresentar altos teores de sódio, potássio, magnésio e cálcio, os dois últimos tendem a formar depósitos calcáreos sobre as estruturas enterradas com propriedades protetoras contra a corrosão. A precipitação de hidróxido ferroso e férrico em contato imediato com a superfície do metal pode manter uma baixa corrosão por pite reduzindo o acesso de oxigênio à superfície catódica.

Em zonas de solos sem bases, o pH da água intersticial pode baixar para 4,5 e 3,5. O valor do pH do solo afeta a solubilidade dos produtos de corrosão. A composição da umidade pode ser modificada como um resultado de chuvas ácidas.

2.3.2.2 – Resistividade do Solo

A resistividade do solo é um dos fatores mais importantes na ação corrosiva. Em geral, solos com resistividade mais baixa e uniforme são mais propícios à corrosão. A medida de resistividade de um solo determina a sua resistência ao fluxo de uma corrente elétrica. A resistividade geralmente se apresenta na proporção inversa a quantidade de sais dissolvidos. Desta forma, a resistividade é menor com o aumento da quantidade química dissolvida. A corrosão de dutos pode ser observada em solos de baixa resistividade devido à existência de substâncias disponíveis a se combinar com o metal, fazendo com que a corrente de corrosão possa fluir mais facilmente.

As medidas de resistividade são mais precisas quando obtidas na zona logo abaixo do conduto, já que o contato do mesmo com o solo é mais eficaz ao longo da base da trincheira, onde o processo de escavação não perturbou as formações naturais. A relação entre a severidade da corrosão e a resistividade de um solo pode ser observada na Tabela 2.2.

TABELA 2.2 – Relação entre a corrosividade e resistividade do solo
(CORROSION DOCTORS, 2002)

Resistividade do solo (Ohm.cm)	Corrosividade do solo
> 20.000	Essencialmente não-corrosivo
10.000 a 20.000	Medianamente corrosivo
5.000 a 10.000	Moderadamente corrosivo
3.000 a 5.000	Corrosivo
1.000 a 3.000	Altamente corrosivo
< 1.000	Extremamente corrosivo

Os solos arenosos situam-se no topo da escala de resistividade e, desta forma, considerados os menos corrosivos. Solos argilosos, especialmente aqueles com água marinha, ocupam o lado oposto do espectro, sendo os mais corrosivos.

A resistividade do solo é geralmente relacionada à salinidade ou pureza da água ou solução, que em algum tempo tenha percolado o solo e permaneça retido em um ou outro grau. A resistividade do solo geralmente diminui com o aumento do teor de umidade e a concentração de espécies iônicas.

A instalação do conduto, em solos com diferentes resistividades, é prejudicial, uma vez que pode fazer com que o mesmo se comporte como uma pilha de corrosão.

A corrosão promovida pelo solo pode ser mais preocupante nas condições em que o teor de sais clorídricos/sulfurosos é alto e quando a precipitação da área é inadequada para promover o lixiviamento de sais solúveis, mas o teor de umidade do solo é alto (BEDNAR,1989). Este mesmo autor apresenta uma classificação do potencial de corrosão das regiões brasileiras para tubos metálicos galvanizados. As regiões estão em uma escala de A a H, que representa a ordem favorável à aplicação do conduto, de acordo com a Tabela 2.3.

TABELA 2.3 – Potencial corrosivo das regiões brasileiras (BEDNAR, 1989)

Região	Classificação	Descrição
Áreas interioranas da Região Nordeste	B	Não-corrosivo
Região Sul, Sudeste e Estado de GO	C	Medianamente corrosivo
Estados do AC, RO e MT	E	Moderadamente corrosivo
Estados do ES e MA	F	Corrosivo
Áreas litorâneas da BA, SE, AL, PE, PB e RN	G	Altamente corrosivo
Região Norte	H	Extremamente corrosivo

Em solos em que a resistividade é o fator controlador, um grande número de correlações pode ser encontrado entre este fato e a profundidade da corrosão que se desenvolve por pite (SPELLER, 1951).

2.3.3 – Ação Microbiológica do Solo

Solos com alto teor de umidade propiciam a ação de bactérias, fungos e outros microorganismos que podem modificar as características do solo, interferindo em suas propriedades químicas e/ou físicas. A forma mais comum de ataque microbiológico vem através de processos metabólicos de redução bacteriológica de sulfato, que se desenvolvem em condições anaeróbias. Os rejeitos do metabolismo realizado são íons de sulfureto que reagem com o metal permitindo dissolução da região anódica da célula de corrosão para resultar em metal sulfureto. O valor de pH sobre o qual estas bactérias se desenvolvem é entre 6,5 e 8,5.

2.3.4 – Agressividade do Meio Ambiente

Testes expeditos, como observações de campo, são usados para classificar a agressividade do meio ambiente. O solo pode ser considerado agressivo se uma ou mais das seguintes características se apresentam, solos com baixo pH, presença de água salgada ou salobre, aterros de cinzas e escórias, aterros orgânicos contendo ácido húmico, turfeiras, rejeito industrial e minas ácidas.

Assim, a agressividade do solo é influenciada também pela sua resistividade, composição química do solo, da água constituinte, derivados da rocha originária. Elevação do nível d'água, se o mesmo é estável ou flutuante, além de fatores físicos como correntes de fuga. Indústrias de transporte dentre outras utilizam correntes diretas de eletricidade com

vários objetivos em suas operações, para estas correntes o solo é utilizado como um caminho de retorno para a carga, no entanto, em alguns casos, o caminho da corrente pode ser desviado de uma área limite, buscando uma menor resistência, e acabar encontrado alguma estrutura, como, por exemplo, uma tubulação metálica enterrada, que será danificada por esta denominada “corrente de fuga”.

Mudanças na composição ou na temperatura do eletrólito (solo) podem provocar com que certos metais listados na Série Galvânica, responsável pela classificação de diferença de potencial que desencadeia a corrosão entre metais, mudem de posição ou até mesmo invertam de posição na tabela. Isto indica que a tabela da Série Galvânica não deve ser usada indiscriminadamente para prever o desempenho de metais sobre todas as condições, e o cuidado deve ser despendido para cada caso individualmente.

De acordo com os parâmetros fornecidos se pode obter um agrupamento de solos em relação ao seu grau de corrosividade, e a sua devida caracterização, como pode ser visto nas Tabelas 2.4 e 2.5.

TABELA 2.4 – Agrupamento de solos quanto à ação corrosiva (AWWA, 1989)

Grupo	Tipo de Solo	Grau de Corrosão
Grupo I	<ul style="list-style-type: none">• Areias ou solos superficiais arenosos• Solos superficiais bem graduados, siltosos• Solos superficiais porosos ou solos superficiais argilosos oxigenados em grandes profundidades	Levemente corrosivo
Grupo II	<ul style="list-style-type: none">• Solos superficiais arenosos• Solos superficiais siltosos	Moderadamente corrosivo
Grupo III	<ul style="list-style-type: none">• Solos superficiais argilosos• Argilas	Gravemente corrosivo
Grupo IV	<ul style="list-style-type: none">• Turfa• Mangue• Argilas e solos orgânicos	Excepcionalmente corrosivo

TABELA 2.5 – Caracterização de solos quanto à ação corrosiva (AWWA, 1989)

Grupo	Características da Camada de Solo
Grupo I	<ul style="list-style-type: none"> • Boa aeração e drenagem • Nível d'água profundo
Grupo II	<ul style="list-style-type: none"> • Moderada aeração e drenagem • Nível d'água profundo
Grupo III	<ul style="list-style-type: none"> • Deficiente aeração e drenagem • Nível d'água 2-3 m abaixo da superfície • Solos geralmente ocupam áreas planas
Grupo IV	<ul style="list-style-type: none"> • Insuficiente aeração e drenagem • Nível d'água próximo à superfície • Solos bastante impermeáveis devido à presença de materiais coloidais

2.3.5 – Influência da Instalação do Duto no Processo de Corrosão

A influência do tipo, composição e caracterização do potencial corrosivo do solo foi objeto de discussão durante todo o capítulo, resta também salientar a interferência que o processo de instalação de tubulações enterradas pode desencadear. No processo corrosivo, a concentração diferencial de oxigênio nos poros do solo que pode ocorrer em zonas contíguas é uma das principais razões de diferenças de eletrólitos. Esta concentração diferencial de oxigênio, ou aeração diferencial pode ser causada por compactação desigual do reaterro, porosidade entre solos diferentes ou mesmo entre pontos de um mesmo solo, distribuição não-uniforme de umidade, e restrição ao movimento de ar e água no solo devido à presença de edifícios, estradas, pavimentos e vegetação.

A diferença de eletrólitos devido à mistura de solos pode causar a formação de células galvânicas. Se grandes torrões de solo, provenientes de distintas profundidades na trincheira, repousam diretamente contra a parede desprotegida do tubo, esta área de contato tende a se tornar um anodo (área de corrosão), e o tubo adjacente catodo. Torrões de solo pequenos e bem dispersos, resultantes da abertura das trincheiras através de máquinas, reduzem a tendência de formação de células de corrosão. Células galvânicas tendo áreas anódicas e catódicas distribuídas ao redor da circunferência da tubulação são geralmente chamadas de “células de curta trajetória”.

Outro tipo de célula galvânica que pode se desenvolver em relação a diferentes espécies de eletrólitos é aquele em que o solo ao longo da profundidade da trincheira é uniforme, mas o tubo repousa sobre solo úmido ou saturado, com pouca ou nenhuma aeração no fundo da trincheira, enquanto o restante da circunferência está em contato com o solo de reaterro, mais seco e mais aerado. Portanto, para que isto não ocorra a trincheira deve ser

drenada, ao menos que o solo seja suficientemente poroso para evitar a estagnação e conseqüente formação da área anódica.

2.3.6 – Influência do Material no Processo Corrosivo

Aço e zinco são materiais comumente utilizados na fabricação de tubos enterrados, estes materiais reagem de forma diferenciada quando em contato com o solo. O conhecimento do desempenho de cada material quando em contato com o solo permite que se façam previsões da determinação do tempo de serviço de uma estrutura enterrada com razoável precisão.

O aço requer oxigênio, umidade e a presença de sais dissolvidos para ser corroído. Se algum dos fatores for abstraído, a reação de corrosão cessará ou se processará muito lentamente. O aço é corroído rapidamente em meios ácidos e mais lentamente à medida que a alcalinidade aumenta. O aço galvanizado é a melhor combinação nas situações em que as estruturas são parcialmente enterradas e parcialmente expostas à atmosfera, são particularmente danosas sob o ponto de vista da corrosão. Em tais situações, o aço de melhor desempenho é o do tipo galvanizado.

Tubulações de ferro fundido têm sido substituídas por tubulações metálicas dúcteis em muitas aplicações. Estas tubulações são utilizadas, por exemplo, em barragens, serviços de distribuição de água e outras instalações onde os fluidos são transportados sob pressão. São também adequadas em encanamentos que funcionam sob pressão ou por gravidade, onde a estanqueidade é um fator essencial no projeto. As mesmas podem resistir relativamente a altas pressões internas e externas, e à corrosão quando implantada em grande variedade de tipos de solos. Contudo, este tipo de tubo está sujeito à corrosão causada por ácidos, por águas de esgotos e quando envoltos por solos ácidos.

O zinco, por sua vez, requer a presença de filmes óxidos estáveis na sua superfície para promover sua resistência à corrosão. Apresenta melhor desempenho em meios com pH neutro. Não obstante, pode tolerar exposição a valores de pH da ordem de 5,5 a 12. Na ausência de oxigênio, os filmes óxidos não se formam na superfície do zinco e a corrosão pode ser acelerada se a umidade estiver presente sob estas condições.

As tubulações de alumínio são usualmente mais afetadas pela corrosão externa promovida pelo solo do que pela corrosão interna. O desempenho em longo tempo não pode ser totalmente previsto devido à curta história de utilização deste tipo de produto. Porém, os projetos não devem excluir uma vida útil para tubos de alumínio de mais de 50 anos (U.S. CORPS OF ENG., 1998).

Em solos bem aerados todos os metais comuns fornecem bons resultados quanto à resistência corrosiva. O cobre conduz a um melhor desempenho do que o aço em solos com alto teor de cloretos. É evidente que o caráter corrosivo do solo deve ser considerado na seleção do tipo de material da tubulação.

Contudo, sobre condições de solos corrosivos, as taxas de corrosão, e corrosão por pite mais especificamente, parecem se comportar aproximadamente da mesma forma, deste modo o problema não é resolvido pela seleção de algum tipo particular de aço ou ferro. As propriedades físicas e o custo do metal, juntamente com o custo de adequado sistema de proteção são geralmente considerados de grande importância na corrosão do subsolo.

A durabilidade de uma tubulação enterrada e seu respectivo desempenho, satisfazendo os fins a que se destina com suficiente segurança, no que concerne a sua utilização pela população e a exclusão de possíveis danos que podem ocorrer ao meio ambiente, é o termo final que se busca, e este depende não somente do metal e das condições do solo, mas também das formas de instalação, da espessura da parede do tubo, dos sistemas de proteção empregados, que estão todos relacionados à viabilidade econômica do projeto.

2.4 – O COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE TUBULAÇÕES ENTERRADAS

Sob o ponto de vista do comportamento mecânico, as tubulações enterradas podem ser classificadas em rígidas e flexíveis (YOUNG & TROTT, 1984). O exato entendimento do comportamento de tubulações rígidas e flexíveis enterradas deve ser baseado primeiramente em uma adequada investigação de campo. Com base nestas informações obtidas pelas investigações, deve-se avaliar a natureza do solo no qual será inserida a tubulação. O maior número possível de detalhes como, a existência de outros serviços ou estruturas no subsolo, alguma condição potencialmente corrosiva do solo ou da água do solo, a posição do nível d'água, e a possibilidade de ocorrência de recalque da superfície devem ser conhecidos (YOUNG & TROTT, 1984).

Outra classificação para os condutos enterrados corresponde à forma de instalação. Marston considerou três classes principais de instalação, como mostrado na Tabela 2.6 e ilustrados nas Figuras 2.3 e 2.4.

TABELA 2.6 – Principais Classes de Instalação (BULSON, 1985)

Tipo de Instalação		Descrição
Trincheira		A tubulação é enterrada em estreitas trincheiras escavadas em solo não perturbado
Aterro	Saliência Positiva	A tubulação é instalada em camadas rasas com a projeção do topo sobre a superfície natural do solo, então coberta com reaterro de solo
	Saliência Negativa	A tubulação é instalada em trincheiras rasas com o topo abaixo da superfície natural do solo, então coberta com reaterro de solo

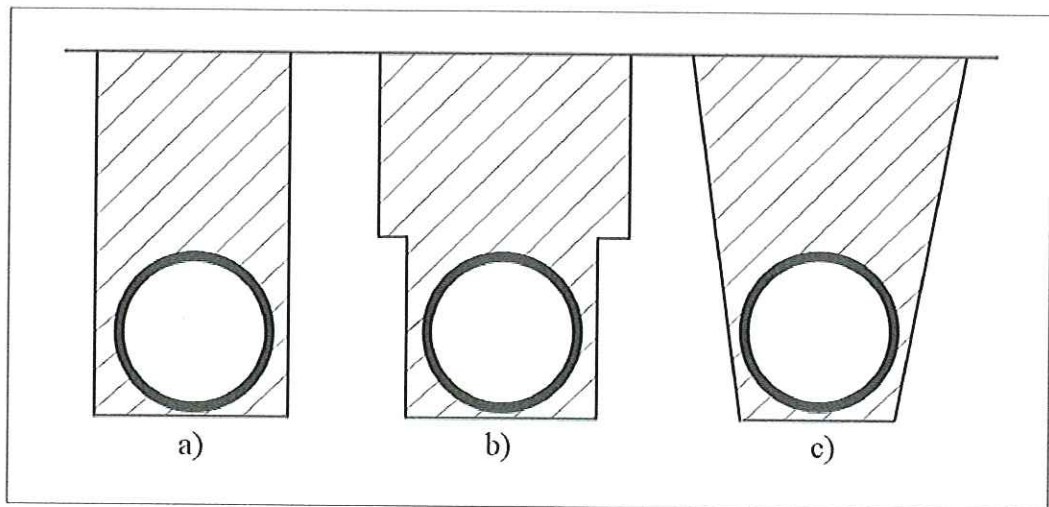


FIGURA 2.3 – Condutos em trincheira: a) largas; b) escalonadas; c) inclinadas (Bueno, 2003)

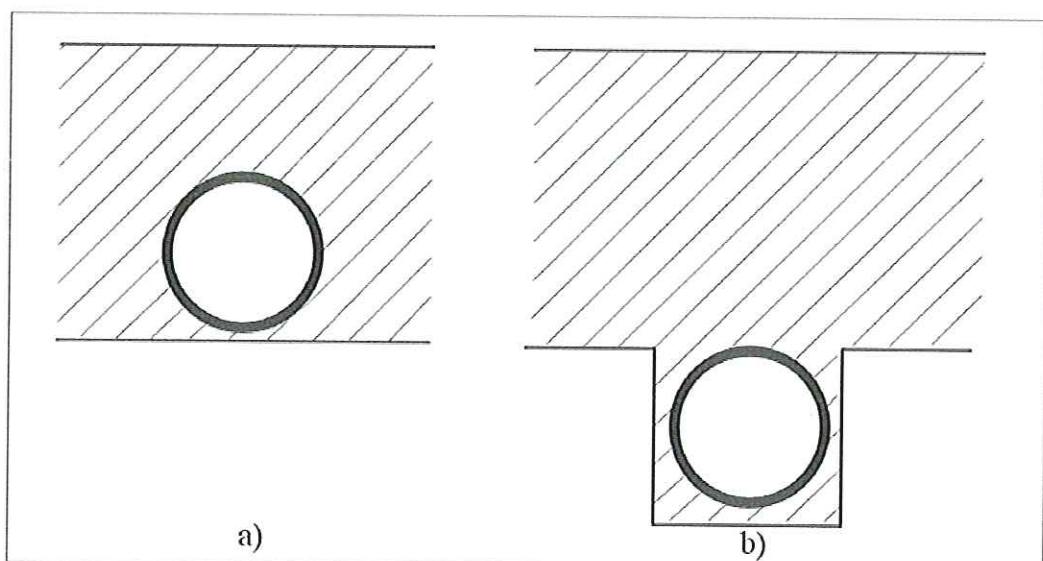


FIGURA 2.4 – Condutos em aterro: a) saliente positivo; b) saliente negativo (Bueno, 2003)

A classificação de uma tubulação enterrada com base exclusivamente no seu comportamento estrutural, apesar de amplamente utilizada, deve ser avaliada considerando também a rigidez do solo onde o tubo é inserido. Um conduto considerado rígido possui rigidez estrutural suficiente para sustentar sem nenhuma interação com o solo adjacente todas as cargas que lhe sejam impostas, como o peso da camada de solo, ou os carregamentos externos. Enquanto um conduto flexível seria aquele que depende da interação com o solo envolvente para suportar as cargas que lhe são aplicadas.

Com o objetivo de avaliar de uma forma mais completa a interação solo-conduto, Allgood e Takahashi (1972) e Gumbel et al. (1982), de acordo com Bueno (2003), elaboraram uma classificação mais detalhada quanto à rigidez estrutural, que pode ser vista na Tabela 2.7. Segundo esses autores, podem-se agrupar os condutos em intervalos segundo a rigidez relativa da seção transversal da estrutura comparada à do solo circundante. O parâmetro utilizado é a rigidez relativa, RR , que tem como expressão:

$$RR = \frac{R_s}{R_c} \quad (2.2)$$

onde R_s é a rigidez do solo circundante e R_c é a rigidez da seção transversal do conduto. A referida rigidez, tanto a do solo quanto a do conduto podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$R_s = \frac{E_s}{(1-\nu_s)} \quad (2.3)$$

$$R_c = \frac{E \cdot I}{D^3} \quad (2.4)$$

Nas seguintes expressões:

E_s – módulo de deformabilidade do solo circundante;

ν_s – coeficiente de Poisson do solo circundante;

E – módulo de elasticidade do material constituinte do conduto;

I – momento de inércia;

D – diâmetro do conduto.

TABELA 2.7 – Comportamento estrutural de tubos enterrados de acordo com a rigidez relativa (Gumbel et al., 1982)

Rigidez Relativa (RR)	Proporção da carga suportada pelo conduto em flexão	Comportamento do sistema
RR < 10	Mais de 90%	Rígido
10 < RR < 1000	De 10 a 90%	Intermediário
RR > 1000	Menos de 10%	Flexível

Como pode ser observado na tabela acima, nos condutos flexíveis a rigidez do solo circundante é muito maior do que a rigidez da seção transversal do tubo, o que torna necessário grande interação do conduto com o solo para que o sistema solo-tubo seja capaz de suportar todas as cargas que lhe são impostas. Os condutos rígidos, por sua vez, possuem elevada rigidez à flexão e, portanto, o comportamento estrutural do tubo pouco depende do solo da envoltória para suportar as cargas que lhe são impostas.

Ao se adotar a classificação referida, assume-se que mesmo que se tenha um tipo de material específico, com classe de rigidez determinada, dependendo das características de deformabilidade do solo em que o tubo for implantado, tem-se um sistema rígido ou flexível. A Figura 2.5 ilustra este aspecto do comportamento de tubulações enterradas. Nesta Figura mostra-se também a avaliação da rigidez estrutural do conduto em função da relação D/t (diâmetro e espessura do tubo). Valores altos da relação D/t indicam tubulações flexíveis, o inverso caracteriza tubulações rígidas.

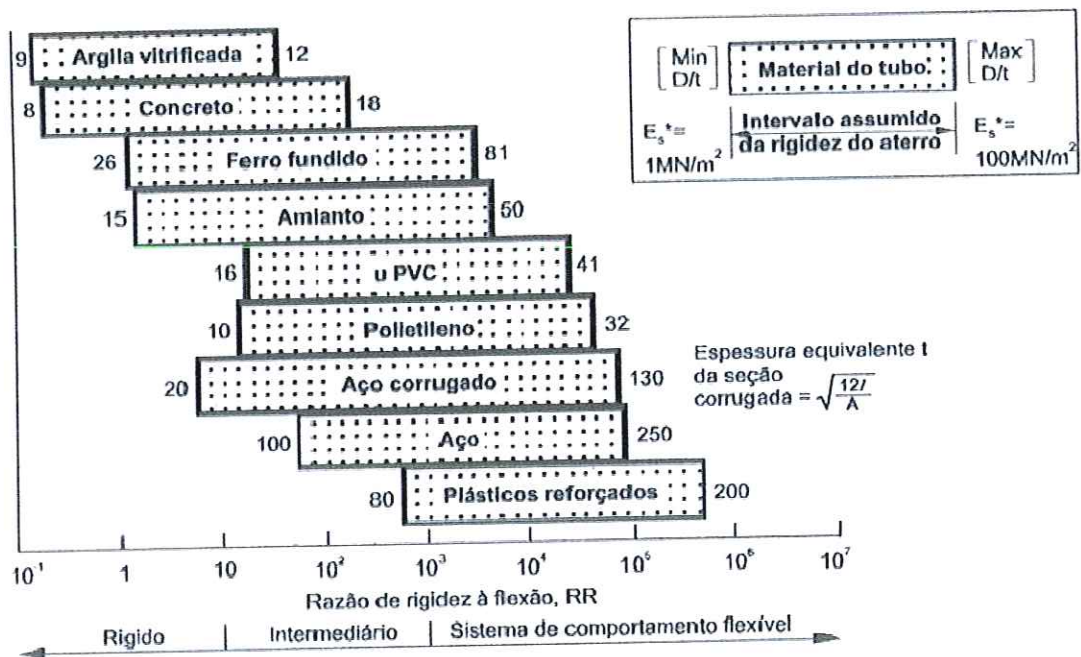


FIGURA 2.5 – Classificação de condutos enterrados em função da rigidez relativa (Gumbel et al., 1982)

Ao se instalar a tubulação no meio de um maciço de solo, seja ele natural ou compactado, se insere neste meio um elemento de rigidez diferente do valor do maciço. Isto promove uma redistribuição das tensões ao redor do tubo que deve ser quantificada para se obter as cargas reais sob as estruturas enterradas.

2.4.1 – Interação Solo-Conduto

A análise e o projeto de condutos enterrados é essencialmente um problema de interação solo-estrutura, e é necessário se atribuir total conhecimento para este fenômeno quando formular ou avaliar qualquer procedimento específico (KRIZEK et al.,1971). A consideração de duas situações extremas, tubulação rígida ou flexível, com base exclusivamente nas características da estrutura é inconsistente. A carga vertical que atua em cada caso é determinada da mesma maneira, contudo, o efeito de interação entre o solo e o conduto será diferenciado. De acordo com a relação de rigidez solo-estrutura, as posições podem ser invertidas, uma tubulação rígida quando instalada em um solo altamente compactado pode atuar como flexível. Isto significa que uma tubulação denominada flexível sob certas condições, pode muito bem ser considerada rígida sobre outros aspectos, e o contrário também seria válido. A diferença entre a rigidez do conduto e a do maciço terroso causa uma profunda perturbação na forma e na intensidade com que as cargas chegam à estrutura.

As cargas que atuam em condutos enterrados podem ser provenientes do peso do solo situado acima do conduto, do peso próprio do conduto, da pressão interna, sobrecargas estáticas e dinâmicas oriundas de carregamento externo aplicado à superfície do terreno. As últimas são significantes somente para tubulações rasas com altura de cobertura menor que cerca de 1,50m.

O arqueamento do solo, fenômeno de transferência de cargas em tubulações enterradas, foi estudado inicialmente por Marston & Anderson (*apud* HANDY, 1985) para definir as cargas de solo sobre tubulações rígidas enterradas. Terzaghi (1936) estudou a transferência de tensões que ocorre no solo quando se insere uma estrutura deformável através da análise de deslocamentos provocados ao solo por um alçapão. Foi averiguado que as tensões agindo sobre o alçapão correspondiam aproximadamente a 10% do valor da tensão geostática que ocorreria caso fosse desconsiderado.

Esta transferência de tensões de pontos flexíveis para pontos rígidos no sistema solo-conduto é o arqueamento do solo, que é função das deflexões sofridas pelo conduto em relação ao solo, e principalmente do método de instalação do duto.

Algood & Takahashi (1972) e Gill (*apud* BULSON, 1985) quantificam o arqueamento através do fator de arqueamento A , função das tensões atuantes no conduto, a relação entre este fator e o fator de geometria-rigidez, R , assumem a seguinte forma, de acordo com a equação (2.5):

$$A = A_0 (1 - e^{-nR}) \quad (2.5)$$

onde, A_0 e n são constantes determinadas experimentalmente, e R é dado de acordo com a equação (2.6):

$$R = A_g \left(\frac{M_s}{P_i} \right) \delta \quad (2.6)$$

em que, A_g é o fator de geometria, M_s é o módulo secante do solo obtido através de teste confinado de compressão e δ é a deflexão relativa entre a estrutura e a superfície do solo.

A ação do arqueamento causa às tensões principais menores na massa de solo uma reorientação tal que pode ser representada por uma catenária, designada “arco menor”. Esta suposição requer que o solo permaneça em um estado plástico (HANDY, 1985). O arqueamento pode ser destruído por ações que modificam a estrutura do solo como vibração, percolação de água ou outros distúrbios externos. Portanto, o uso do arqueamento em projeto deve levar em consideração estes fatores que podem contribuir para reduzir o efeito de arco (BONAPARTE & BERG, 1987).

Os resultados dos ensaios apresentados como curvas de arqueamento, Figura 2.6, mostram a relação entre a razão da tensão vertical média atuando sobre o alçapão (P_B) e uma sobrecarga uniformemente aplicada à superfície do terreno (P_s), e a razão entre o deslocamento vertical e o diâmetro do alçapão. Dependendo da rigidez relativa entre o conduto e o solo circundante, o arqueamento pode ocorrer de forma positiva ou negativa, como representado na Figura 2.6. Nesta Figura, pode-se observar como a porcentagem de arqueamento decresce rapidamente até zero ou para valor assintótico nas curvas ativas com deslocamentos muito pequenos. Estas condições externas para o caso do arqueamento negativo requerem um deslocamento muito maior. No caso de condutos enterrados o arqueamento positivo surge quando a deflexão do conduto somada aos recalques do solo de fundação é maior do que o recalque total do solo lateral ao conduto. Neste caso a carga sobre a tubulação é menor do que a carga geostática. O arqueamento negativo ocorre para condições inversas, e a carga sobre a tubulação é maior do que a tensão geostática. Assim, o efeito de arqueamento do solo e a rigidez do conduto não são independentes entre si. Em geral, a resposta do sistema depende das características de geometria e rigidez do tubo, das

características de geometria, forma de disposição e das propriedades mecânicas do aterro compactado adjacente e de cobertura, e das características do solo de fundação e adjacente ao conduto.

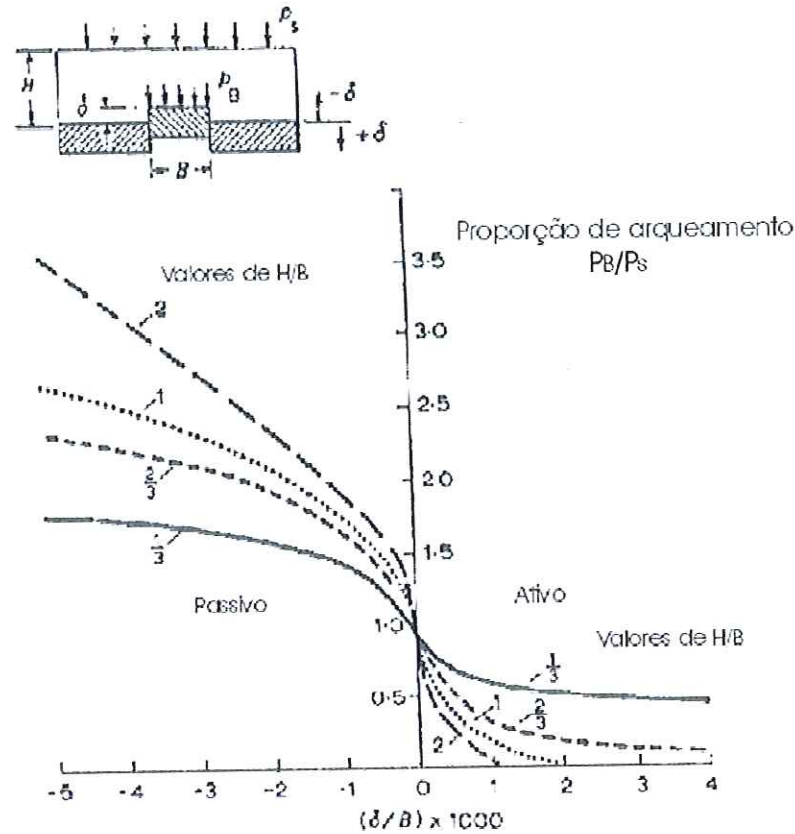


FIGURA 2.6 – Comparação entre o arqueamento ativo e passivo (McNulty, 1965)

2.4.2 – Tubulações Rígidas Enterradas

O procedimento de projeto comumente utilizado para tubulações rígidas é baseado amplamente nos estudos experimentais e analíticos desenvolvidos originalmente por Marston (1930). As análises existentes e os métodos de projeto para condutos rígidos são em grande extensão governados pelo modo como o tubo é instalado, pelas propriedades do solo e pelo método de reaterro.

Marston (1930) elaborou uma expressão para cálculo de cargas verticais sobre condutos rígidos em vala em termos da função de forças cisalhantes que se desenvolvem em um prisma de solo que atua diretamente sobre a estrutura e do peso próprio do solo deste prisma, Figura 2.7. Também foram levados em consideração o recalque relativo dos prismas internos e externos, a deflexão vertical do tubo, e a compressão no prisma de solo sobre e adjacente à estrutura.

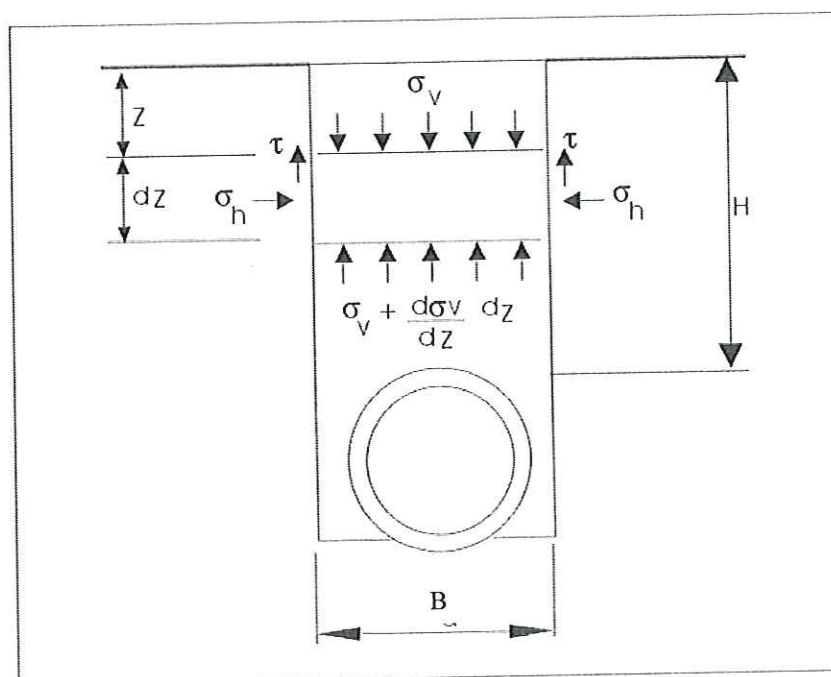


FIGURA 2.7 – Análise de Marston para uma escavação do tipo trincheira

A Teoria de Marston apresenta a ressalva de que as forças atritivas nas laterais da vala só se desenvolvem em planos verticais bem definidos, como no caso de uma trincheira estreita. O método considera que a tensão vertical calculada atua uniformemente sobre toda a vala, o que não se verifica na observação de um plano horizontal logo acima de um alçapão. As tensões verticais, considerando-se um plano horizontal, variam em torno da região perturbada pelo alçapão ou com qualquer outro elemento que implantado no solo, altere a rigidez do sistema.

2.4.2.1 – Tubulações em Vala

Para um conduto em vala assume-se que sempre ocorre o arqueamento positivo. Este fato é devido ao método de instalação, quando a má compactação do reaterro correspondente ao prisma de solo sobre a tubulação recalca mais relativamente ao solo das paredes da trincheira.

O cálculo da tensão vertical que atua sobre o conduto é dado de acordo com a expressão 2.7:

$$\sigma_v = C_v \cdot B_v \left[\gamma - \frac{2 \cdot C}{B_v} \right] \quad (2.7)$$

Onde:

σ_v - Tensão vertical sobre o conduto;

C_v - Fator de carga calculado pela equação (2.8), a seguir;

B_v - Largura da vala.

O valor de C_v pode ser obtido pela expressão 2.8:

$$C_v = \frac{1}{2 \cdot k_r \cdot \text{tg}\varphi} \left[1 - \exp\left(-k_r \cdot \text{tg}\varphi \cdot \frac{2H}{B_v}\right) \right] \quad (2.8)$$

2.4.2.2 – Tubulações Salientes Positivas

Quando os condutos rígidos são implantados sobre a superfície do terreno e cobertos com o reaterro, tem-se a condição dos condutos salientes positivos. O cálculo de recalque de um plano horizontal que passa pelo topo do conduto, denominado plano crítico, pode apresentar basicamente duas possibilidades: a primeira, o recalque do plano crítico, calculado no prisma interno, é maior do que se calculado para os prismas externos; no segundo caso, o recalque do plano crítico para os pontos dos prismas externos é maior do que o do prisma interno. A primeira possibilidade caracteriza um arqueamento positivo e a segunda um arqueamento negativo.

A primeira condição descrita é bastante similar à situação de um duto em vala, por este motivo denomina-se “condição em vala”. A condição de arqueamento negativo caracteriza a “condição de saliência”.

Os movimentos relativos entre o prisma interno e os prismas externos vão se alterando à medida que se afasta verticalmente do topo do conduto e eventualmente se o aterro de cobertura for espesso. O plano horizontal a partir do qual estes movimentos tornam-se insignificantes é denominado plano de igual recalque. Acima deste plano os efeitos do arqueamento desaparecem e o peso do aterro acima deste plano atua sobre o conduto como se fosse uma carga uniformemente distribuída. O comportamento do sistema estrutura/solo é influenciado pela localização do plano de igual recalque, do plano crítico e da direção e extensão das forças cisalhantes que atuam que atuam em planos verticais entre prismas do solo. De acordo com a combinação entre estes parâmetros, variadas possibilidades apresentam-se para os condutos salientes positivos. A tensão vertical sobre um conduto saliente positivo, na condição de saliência total, em função das características do solo, da relação H/B e de uma sobrecarga uniformemente distribuída, q , aplicada à superfície do terreno é dada de acordo com a equação 2.9:

$$\sigma_v = \frac{B \left(\gamma - \frac{2C}{B_c} \right)}{2k_r \text{tg} \phi} \left[\exp \left(k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_c} \right) - 1 \right] + q \exp \left(k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_c} \right) \quad (2.9)$$

A tensão vertical para o caso do conduto saliente positivo, na condição de vala total, é dada de acordo com a equação 2.10:

$$\sigma_v = \frac{B_c \left(\gamma - \frac{2C}{B_c} \right)}{2k_r \text{tg} \phi} \left[1 - \exp \left(-k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_c} \right) \right] + q \exp \left(-k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_c} \right) \quad (2.10)$$

Para os condutos salientes positivos na condição de saliência ou vala parcial, a tensão vertical é dada de acordo com as seguintes expressões (2.11) e (2.12):

$$\sigma_v = \frac{B_c \left(\gamma - \frac{2C}{B_c} \right)}{2k_r \text{tg} \phi} \left[\exp \left(-k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_c} \right) \right] + [q + \gamma(H - H_e)] \exp \left(k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_c} \right) \quad (2.11)$$

$$\sigma_v = \frac{B_c \left(\gamma - \frac{2C}{B_c} \right)}{2k_r \text{tg} \phi} \left[1 - \exp \left(-k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_c} \right) \right] + [q + \gamma(H - H_e)] \exp \left(-k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_c} \right) \quad (2.12)$$

Onde:

- B_c - Largura do conduto;
- H - Altura do topo do conduto à superfície do terreno;
- H_e - Altura que define a posição do plano de igual recalque, em relação ao topo do conduto;

2.4.2.3 – Tubulações Salientes Negativas

Um conduto instalado em uma trincheira escavada no solo natural e recoberto por um aterro caracteriza uma tubulação saliente negativa. A vantagem deste sistema é a redução de cargas verticais, característico do modelo de instalação da tubulação em vala, associado as facilidades de construção de estruturas sob aterros.

Para as tubulações salientes negativas, na condição de vala total ou vala incompleta, tem-se as expressões 2.13 e 2.14 para o cálculo da tensão vertical sobre o conduto:

$$\sigma_v = \frac{B_v \left(\gamma - \frac{2C}{B_v} \right)}{2k_r \text{tg} \phi} \left[1 - \exp \left(-k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_v} \right) \right] + q \exp \left(-k_r \text{tg} \phi \frac{2H}{B_v} \right) \quad (2.13)$$

$$\sigma_v = \frac{B_v \left(\gamma - \frac{2C}{B_v} \right)}{2k_r \operatorname{tg} \phi} \left[1 - \exp \left(-k_r \operatorname{tg} \phi \frac{2H}{B_v} \right) \right] + [q + (H - H_e)] \exp \left(-k_r \operatorname{tg} \phi \frac{2H}{B_v} \right) \quad (2.14)$$

2.4.3 – Tubulações Flexíveis Enterradas

Para se desenvolver um procedimento de projeto para as tubulações flexíveis enterradas, deve-se estabelecer limites de desempenho destas estruturas. Estudos analíticos e em modelos físicos mostram que estruturas flexíveis enterradas rompem-se por deformação excessiva, flambagem e esmagamento das paredes, desta forma, estas condições devem ser avaliadas. A Figura 2.8 ilustra estas formas de ruptura.

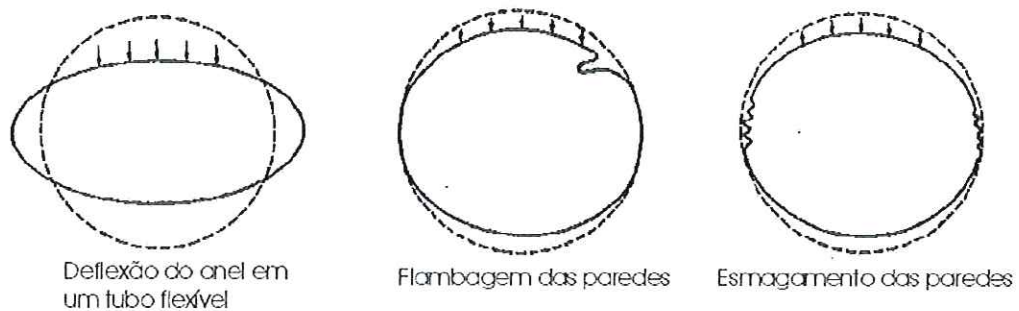


FIGURA 2.8 – Principais tipos de ruptura em tubulações flexíveis (GODDARD, 1994)

2.4.3.1 – Deformação Excessiva

As rupturas em tubulações flexíveis ocorrem principalmente devido à deformação excessiva. A causa deste tipo de comportamento é geralmente associada a uma compactação insuficiente do reaterro em áreas críticas, causando uma ovalização da seção transversal. Deslocamentos adicionais causam uma mudança de curvatura do tubo e o conseqüente colapso. Se o diâmetro vertical da tubulação decresce em torno de 20% é normalmente admitido que o tubo se encontra em um estágio inicial de ruptura, e qualquer carga vertical a mais causará colapso.

A origem predominante de suporte de um conduto flexível é a tensão confinante lateral do solo nas paredes do tubo. O tubo por si só apresenta relativamente pouca resistência à flexão, e grande parte da sua habilidade em suportar as cargas verticais é derivada da tensão passiva do solo induzida à medida que as paredes do tubo se movem em direção ao solo de aterro. A carga de solo sobre uma tubulação flexível causa uma diminuição no diâmetro vertical e um aumento no diâmetro horizontal do tubo, de modo que

a seção adquire uma forma elíptica, com o eixo menor (vertical) diminuindo em proporção à deflexão vertical e o eixo maior (horizontal) aumentando em proporção à deflexão horizontal. Com base neste comportamento, Spangler (1941) supôs uma distribuição de tensões como mostrado na Figura 2.9, e desenvolveu a seguinte equação (2.15), para prever as deflexões em condutos flexíveis enterrados, que se tornou conhecida como “Fórmula de Iowa”:

$$\Delta X = \frac{D_t K W_c R^3}{EI + 0,061 k R^4} \quad (2.15)$$

na qual, ΔX é a deflexão horizontal do tubo; D_t é um fator tempo, que é introduzido para levar em consideração efeitos dependentes do tempo na deflexão (notou-se que os tubos continuam a defletir verticalmente mesmo depois de terminado o reaterro, em alguns casos por muito tempo depois do final da obra); K é a constante de berço; W_c é a carga no conduto (MARSTON); E é o módulo de elasticidade do tubo; I é o momento de inércia; k é o coeficiente de reação do solo. Posteriormente, através de observações de Spangler & Watkins (1958), verificou-se que o coeficiente k não é uma constante, e sim a relação kR , que representa o módulo de reação horizontal do solo, ou seja, um modo mais realístico para se representar a interação solo-conduto. O módulo de reação do solo, E' , foi introduzido de acordo com a equação (2.16):

$$\Delta X = \frac{D_t K W_c}{\frac{EI}{R^3} + 0,061 E'} \quad (2.16)$$

Os seguintes termos podem ser usados para descrever os três fatores separados que afetam a deflexão do conduto: $D_t K W_c$ é o fator de carga; EI/R^3 é a rigidez do anel e; $0,061 E'$ é o fator de rigidez do solo.

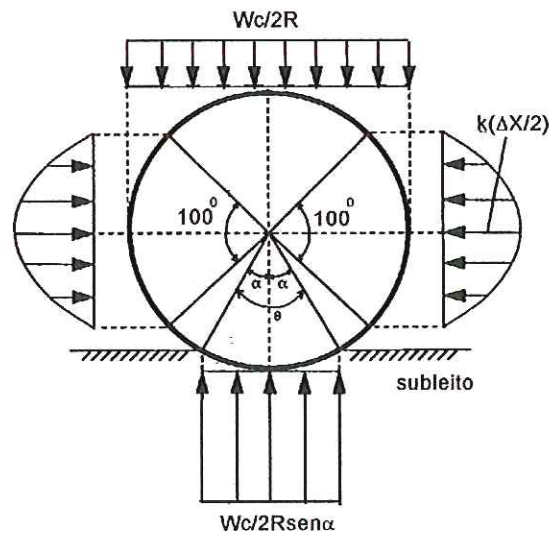


FIGURA 2.9 – Distribuição de tensões sobre uma tubulação flexível (SPANGLER, 1941)

O módulo de reação do solo (E') tem sido tema de intensas discussões e pesquisas (SPANGLER, 1941; SHAFER, 1948; WATKINS & SPANGLER, 1958; WATKINS, 1959; WATKINS & NIELSON, 1964; MEYERHOF, 1966; NIELSON, 1967; KRIZEK *et al.* 1971; ALGOOD & TAKAHASHI, 1972; PARMELEE & COROTIS, 1972; HOWARD, 1977; CHAMBERS *et al.*, 1980; HARTEY & DUNCAN, 1987). Todo módulo varia com o confinamento e, portanto, com a profundidade. As maiores divergências giram em torno do fato que o coeficiente de reação do solo (k) não é um valor constante. Terzaghi (1955) mostra detalhes sobre o módulo de reação do subsolo. Valores usuais de E' podem ser obtidos em Howard (1977) e uma sùmula dos valores propostos na literatura é apresentada e discutida por Hartley & Duncan (1987).

A teoria mais difundida para a estimativa de deflexões sofridas por condutos flexíveis foi desenvolvida por Spangler (1941), sendo ainda largamente utilizada (DUANE *et al.*, 1986). Diversas limitações desta teoria têm sido apontadas, por exemplo, Jeyapalal *et al.* (1987) questionam sua aplicação para tubulações muito flexíveis, uma vez que estes tubos não assumem forma elíptica ao sofrerem deflexão, como pressuposto na concepção do modelo.

Como alternativa ao empirismo da maioria dos métodos propostos para estimativas de deflexões em condutos flexíveis, Burns & Richard (1964) propõem uma solução analítica fechada para o problema. É considerado um conduto circular em um meio elástico, isotrópico, homogêneo e semi-infinito com uma tensão uniformemente distribuída agindo em planos horizontais numa distância infinita.

2.4.3.2 – Teoria da Compressão do Anel

De modo a não ocorrer colapso estrutural, o conduto deve ser dimensionado também de forma a prevenir a ruptura por compressão das paredes. A tensão compressiva atuante na parede do conduto depende de diversos fatores tais como: pressão interna, pressão externa, sobrecarga e golpe de aríete, tensão resultante do peso do solo sobrejacente e de cargas externas, entre outros (AWWA, 1989). A área da seção transversal do tubo deve ser dimensionada de forma a resistir tal tensão.

A probabilidade de ruptura por compressão das paredes cresce em condutos envoltos em solos com alto grau de compactação e em condutos com altura de cobertura elevada (WATKINS, 1966). No entanto, quanto mais uniforme as tensões ao redor do tubo, maiores são as chances de ocorrer esmagamento nas paredes.

Para condutos com suficiente altura de cobertura e com aterro adjacente bem compactado, White & Layer (1960) sugerem que a carga de compressão do anel pode ser melhor aproximada se considerando o conduto circular carregado uniformemente por uma carga equivalente em magnitude à sobrecarga do solo, γH , na qual γ é o peso específico de solo sobre a tubulação e H é a distância do topo do tubo até a superfície do aterro. Para o caso de um cilindro sob pressão radial uniforme, a carga de compressão do anel é dada de acordo com a equação (2.17) e Figura 2.10:

$$T = r\gamma H \quad (2.17)$$

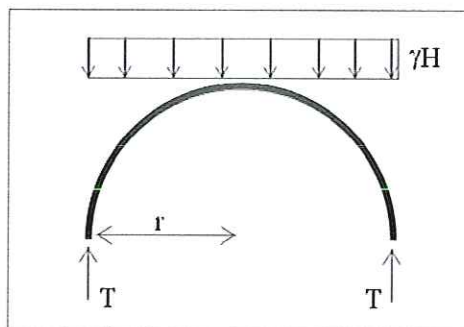


FIGURA 2.10 – Carga de compressão do anel

Existe uma diferença básica por trás da filosofia dos métodos de projeto de Marston-Spangler e da compressão do anel. A abordagem de Marston-Spangler assegura que a deformação dos condutos usualmente controla o projeto; costuras ou juntas de recobrimento são projetadas para resistir à compressão do anel, porém nenhuma consideração é feita em relação à tensão de compressão nas paredes do tubo. Em outras palavras, nesta abordagem

exceder a tensão de escoamento de compressão do aço não é considerado como um problema sério. Do outro lado, White & Layer (1960) afirmam que a carga de compressão do anel é uma consideração importante para a determinação da espessura da parede do tubo.

De acordo com a Teoria da Compressão do Anel o conduto flexível, modificado geometricamente (forma elipsóide) na mobilização de resistência passiva do solo, ao receber incrementos adicionais de tensão, estando impossibilitado de maiores deslocamentos devido ao alto grau de compactação do solo já neste estágio, atua redistribuindo a tensão em toda a circunferência do duto através do acréscimo da compressão das paredes, que é o modo mais eficiente do conduto suportar as cargas aplicadas.

Tubos muito flexíveis, inseridos em solos bem compactados se adaptam bastante a teoria proposta, a baixa rigidez a flexão do tubo e o alto grau de compactação do solo circundante atendem as condições básicas da formulação da teoria da compressão do anel.

Em geral, os manuais de projeto recomendam ambos, a verificação na deflexão de acordo com a teoria de Marston-Spangler e uma seleção da espessura das paredes de acordo com a teoria de compressão do anel. Para condutos flexíveis a deflexão admissível do anel é limitada a 5% do diâmetro do conduto.

2.4.3.3 – Flambagem das Paredes

Tubulações flexíveis enterradas implantadas em solos bem compactados, e altura de cobertura superior a mais de um raio, apresentam poucas chances de se deformar excessivamente durante o processo de carregamento. A seção transversal do tubo permanece circular até que uma ruptura catastrófica ocorra por flambagem das paredes. Isto pode ocorrer para baixas tensões de compressão da parede do tubo, por exemplo, para níveis de tensão situados na faixa elástica da curva tensão versus deformação do material, se a razão entre o diâmetro e a espessura da tubulação é muito alta, ou para valores elevados de tensão de compressão quando se atinge a zona plástica do material do tubo, para valores mais baixos da relação diâmetro/espessura. Para valores intermediários, existe uma zona de transição na qual ocorre a interação entre os dois modos de colapso (BULSON, 1985).

A resistência a flambagem de sistemas flexíveis é mais sensível a mudanças na rigidez do solo do que às mudanças na rigidez do tubo (GUMBEL *et al.* 1982). A ruptura por flambagem das paredes do conduto está relacionada à mudança de rigidez e da forma geométrica. Entre os diversos métodos disponíveis na literatura para a análise da flambagem das paredes, podem-se destacar as formulações clássicas da teoria da elasticidade de Timonshenko & Gere (1961).

Utilizando o método gráfico de Southwell, Viana & Bueno (1999) obtiveram previsões satisfatórias da ruptura de condutos por flambagem, a partir de resultados de medidas de deflexão vertical do tubo.

A flambagem das paredes pode governar o projeto de tubulações flexíveis sujeitas a altas tensões do solo, pressão hidrostática externa, ou vácuo interno. Quanto mais flexível o conduto, menor a resistência a flambagem. O projeto de tubos de grande diâmetro ou tubos enterrados a baixas profundidades pode ser governado pelo processo de flambagem, particularmente quando submetidos a altas pressões em solos de baixa rigidez (GODDARD, 1994).

2.4.4 – Tubulações Rígidas x Tubulações Flexíveis

As características de alta deformação das tubulações flexíveis mobilizam pressões passivas do solo, como já exposto, que impedem o tubo de continuar deformando e retiram, em vista disto, grandes vantagens desta situação. As tubulações rígidas por sua vez não se deformam sobre carregamento e, portanto, deve ter a capacidade, por si só, de suportar o carregamento imposto.

A Figura 2.11 compara as tensões de solo sobre condutos rígidos e flexíveis. Nesta Figura, assumiu-se que o tubo deflete 6%, e que P é a tensão geostática. Assumindo-se que o tubo deforma-se elipticamente, a tensão horizontal no tubo flexível é $P_H = 1,5P$, por sua vez, a tensão horizontal no conduto rígido atinge o valor igual a $P/3$. A tensão vertical, no entanto, é maior no tubo rígido atingindo $2P$ no topo e $3P$ na base. A tensão na base do tubo é geralmente mais crítica devido à dificuldade de se ter uma compactação adequada nesta área, podendo mesmo formar muitas vezes vazios.

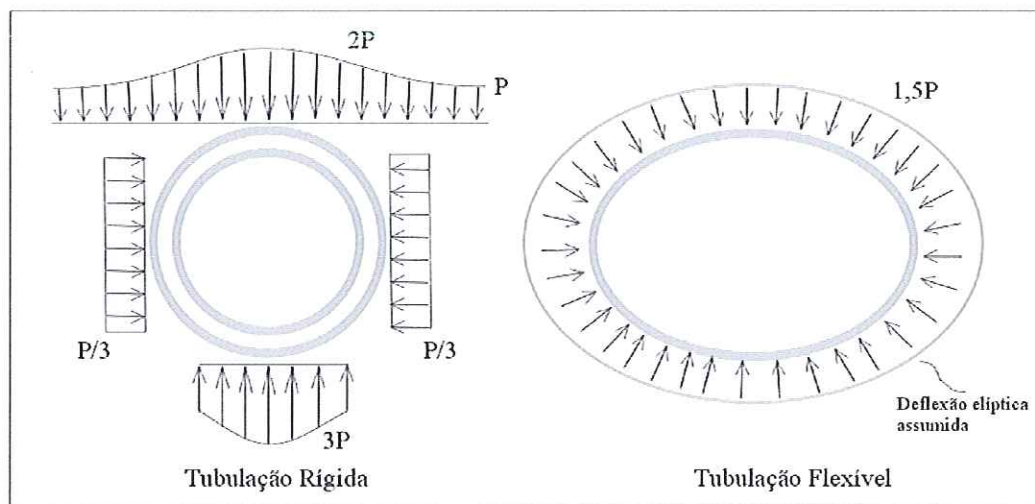


FIGURA 2.11 – Diferença entre a distribuição de tensões em tubulações rígidas e flexíveis

Para os condutos mais rígidos, as distribuições de tensões se apresentaram superiores em relação às tensões devido às camadas de solo subjacentes. Por outro lado, de maneira geral, as tensões horizontais se mantêm iguais, inferiores, ou pouco superiores às tensões horizontais devido às camadas de solo subjacente, caracterizando um efeito de arco negativo sobre o tubo.

As deflexões em cilindros de parede espessa, como seria esperado, são muito pequenas para baixas cargas de superfície, mas a perda de rigidez devido à formação de trincas longitudinais pode resultar em deflexões nos condutos rígidos mais do que nos condutos flexíveis sob maiores carregamentos. Também ocorrem grandes variações no empuxo ao redor da circunferência dos tubos rígidos, os mesmos apresentam maiores momentos.

2.4.5 – O Efeito da Geometria da Corrosão no Comportamento de Tubulações

No escopo que engloba o efeito da geometria da corrosão no comportamento de tubulações, depara-se com três principais modos de ruptura: ruptura longitudinal, ruptura circunferencial e colapso por flexão. Tipicamente, a máxima deformação plástica ocorre no interior da região corroída. O correspondente modo ou direção de ruptura é determinado por comparação dos componentes de deformação plástica axiais e circulares. O modo de ruptura é provavelmente governado pelo componente dominante de deformação plástica. De forma que, se a deformação plástica circular local é muito maior do que a deformação plástica axial de tração em uma mesma localização, o tubo tende a romper longitudinalmente, com a trinca se desenvolvendo paralelamente ao eixo do tubo.

De outro lado, se a deformação plástica axial de tração é muito maior do que a deformação plástica circular, uma ruptura circunferencial pode se desenvolver. A deformação plástica axial de compressão, embora grande, não produz ruptura circunferencial, mas pode causar o princípio de uma flambagem localizada nas paredes da tubulação.

Um aumento na profundidade de corrosão (profundidade de perda de massa das paredes do conduto) reduz a capacidade de momento máximo da seção corroída. A redução relativa de momento é mais afetada por um aumento de profundidade de corrosão na direção circunferente, do que por um aumento de profundidade na direção axial do tubo. Isto ocorre porque a redução na área do momento de inércia da seção transversal do tubo devido a uma corrosão circunferencial com aumento de profundidade é maior do que devido a uma estreita corrosão axial com um idêntico aumento na profundidade de corrosão, o que leva a uma redução de rigidez a flexão. De um modo geral, todas as falhas por ruptura se iniciam no

lado de compressão da tubulação, com a trinca se desenvolvendo na direção axial (ROY et al., 1997).

2.5 – MÉTODOS DE CONTROLE DA CORROSÃO

Considerando-se entendidos os tipos de corrosão, as condições geotécnicas que influenciam o processo corrosivo, e o conseqüente comportamento das tubulações enterradas, que se mostrou evidentemente susceptível à corrosão, os métodos de controle da corrosão podem ser mais bem compreendidos. Três métodos básicos podem ser utilizados para a mitigação da corrosão: isolamento elétrico, revestimento e proteção catódica, além de adequada manutenção e inspeção.

2.5.1 – Isolamento Elétrico

O isolamento elétrico visa isolar a tubulação de estruturas metálicas estranhas. Uma estrutura metálica estranha pode ser outras tubulações, conduites elétricos, e provavelmente, a mais comum, o tubo revestido de concreto. Como já exposto, deve-se atentar para a classificação dos metais de acordo com a Série Galvânica. Obviamente o isolamento elétrico não irá prevenir células de corrosão localizada na tubulação. O isolamento elétrico reduz o problema de controle de corrosão em relação aos efeitos do ambiente solo sobre a própria tubulação.

2.5.2 – Revestimentos

Apesar de influir com apenas 4 a 8% no valor do investimento em tubulações enterradas de longa distância, como por exemplo, os longos oleodutos e gasodutos de transporte, o revestimento externo anticorrosivo assume função importante na sua durabilidade e segurança operacional (TAVES, 1999).

O revestimento externo de uma tubulação deve ser encarado como um componente fundamental do sistema de proteção de corrosão, uma vez que permite a otimização do projeto de proteção catódica, que será abordado a seguir, e racionaliza a sua manutenção.

Os revestimentos compostos de materiais destilados do petróleo e do alcatrão de hulha foram utilizados por um longo período, surgindo na década de 60 sistemas de aplicação de materiais orgânicos mais eficientes, econômicos e menos poluentes.

Os revestimentos normalmente têm a finalidade de formar um filme contínuo, constituindo um material isolante sobre uma superfície metálica que se pretende isolar. Um revestimento será um meio efetivo de interrupção da corrosão, para tanto, deve apresentar como características básicas um efetivo isolamento elétrico, aplicação sem interrupções ou descontinuidades, capacidade de resistir com integridade durante os processos de transporte, instalação e operação de enterramento. Um bom revestimento deve prover inicialmente um filme quase perfeito capaz de apresentar grande durabilidade.

Os revestimentos podem variar em qualidade e em resistência devido ao manuseio e instalação deficientes. As inspeções de controle de recebimento da tubulação, armazenamento, manuseio e instalação afetam tanto a qualidade quanto o custo. Numa tubulação revestida, instalada e enterrada, pode-se esperar que apresente pontos danificados ou imperfeições no revestimento (furos, falhas) que permitem que o solo mantenha contato com o metal. Qualquer célula de corrosão deve estar em uma área de furo, falha, constituindo-se de dois furos, um catódico e outro anódico.

A respeito da longevidade do revestimento, a força dielétrica e a permeabilidade são relativamente pouco afetadas ao longo do tempo no ambiente do subsolo. Não obstante, a resistência tubulação-solo irá reduzir, em específico nos primeiros anos, período no qual as áreas parcialmente danificadas se degradam e as movimentações do solo ainda se processam, podendo causar danos maiores.

Em países como Estados Unidos, Canadá e Inglaterra, predominam os revestimentos constituídos de uma fina película de tinta (0,5mm), especialmente de epoxi em pó aplicado a quente e pulverizado eletrostaticamente, conhecido pela sigla FBE (fusion bonded epoxy). Um sistema anticorrosivo constituído deste modo privilegia a proteção catódica e confere ao revestimento uma importância secundária (TAVES, 1999). Um único sistema anticorrosivo não representa uma solução final e estática para o problema da corrosão, o alto desempenho dos revestimentos tem sido uma meta que aumenta em variedade e em qualidade.

2.5.3 – Proteção Catódica

A proteção catódica consiste no uso direto de eletricidade de uma fonte externa, em oposição da corrente de descarga da corrosão de áreas anódicas que estarão normalmente presentes. O princípio da proteção catódica faz com que todas as partes da corrente coletada da estrutura protegida do eletrólito circunvizinho e de toda a superfície exposta se tornem uma única área catódica.

A galvanização tem um passado histórico no uso de redução da corrosão em tubulações. A galvanização funciona como um sistema de proteção catódica, utilizando o zinco, dispersado sobre a superfície da tubulação, como material de anodo de sacrifício.

Uma tubulação mesmo bem revestida poderá apresentar alguns defeitos de revestimento ou furos. Um sistema de proteção catódica somente precisa proteger as pequenas áreas de aço expostas ao solo.

2.5.4 – Monitoração e Inspeção

Avaliar e disponibilizar técnicas convencionais e alternativas de monitoração e inspeção da corrosão interna e externa de condutos enterrados é o objetivo de muitas pesquisas em desenvolvimento.

O funcionamento adequado dos equipamentos elétricos dos sistemas de proteção catódica de tubulações enterradas é de fundamental importância na prevenção de falhas nos dutos causadas por corrosão externa. Em geral, estes equipamentos são inspecionados semanalmente, com o objetivo de se verificar a normalidade do funcionamento. Para uma maior segurança no sistema já se elabora uma solução com monitoração remota, que possibilitará que as inspeções passem a ser preventivas e realizadas com menor frequência, bem como permitirá que o devido órgão operacional seja prontamente alertado da ocorrência de problemas nos respectivos aparelhos (PETROBRAS, 2002).

Além disso, a monitoração on-line do potencial eletroquímico em regiões consideradas críticas, com relação à corrosão externa, permitirá uma maior confiabilidade no desempenho da proteção catódica.

Como exemplo de técnicas convencionais, tem-se a de Resistência Elétrica e Polarização Linear, como técnicas alternativas, o uso do Campo Elétrico e técnicas eletroquímicas como o Ruído e a Impedância. O método de *pigging* torna possível a realização de um mapeamento de toda uma dutovia. Um *pig* é um equipamento usado para passar sensores e outros instrumentos pelo interior de tubulações avaliando a corrosão, frequentemente a corrosão alveolar, na superfície interna do conduto (FURUKAWA *et al.*, 1999).

CAPÍTULO 03

MATERIAIS E MÉTODOS**3.1 – INTRODUÇÃO**

Para o estudo da corrosão de tubos enterrados optou-se pela realização de um programa de testes em modelo reduzido. Os testes foram executados em tubos de 76mm de diâmetro, de aço e de alumínio, nos quais foram impostos diferentes padrões artificiais de desgaste, de forma a permitir uma melhor análise e comparações a respeito da redistribuição de tensões sofrida por estes condutos. Para a execução da pesquisa os tubos foram implantados em uma caixa de testes, procedendo-se então o preenchimento da caixa através do processo da chuva de areia.

Neste capítulo é feita a descrição dos equipamentos e materiais utilizados para a elaboração da pesquisa.

3.2 – PROJETO DA CAIXA DE TESTES**3.2.1 – Dimensões**

As dimensões da caixa foram fixadas depois de efetuada uma revisão de literatura sobre modelos reduzidos em tubulações enterradas. Considerou-se como elemento de base da escolha das dimensões da caixa um tubo de cerca de 80 a 100mm de diâmetro (D). Este diâmetro foi selecionado considerando o orçamento do projeto e o tempo de execução de cada ensaio.

Com as dimensões selecionadas, os ensaios a serem executados poderão representar tanto um protótipo para tubulações de pequeno diâmetro, que são geralmente utilizadas em serviços urbanos, como no de distribuição de gás, quanto um modelo reduzido para tubulações de grande diâmetro.

A largura da caixa foi determinada de modo a minimizar a influência das paredes nas tensões e deformações desenvolvidas na massa de solo. Se as paredes estiverem dispostas muito próximas ao tubo, o atrito desenvolvido na interface solo-parede prejudicaria os resultados obtidos. A Tabela 3.1 lista alguns valores adotados em trabalhos experimentais e numéricos encontrados na literatura para a relação entre a distância da parede do tubo à parede da caixa (e) e o diâmetro do conduto (D).

TABELA 3.1 – Valores de e/D adotados em ensaios laboratoriais e análises numéricas

Autor	Valor adotado para e/D	Comentários
Allison (1967)*	0 a 2,25	Recomenda $e/D > 1,5$
Howard (1968)*	1,67; 1,46; 0,82	Relata ter havido influência nos ensaios
Dezsényi (1975) ⁺	2	
Nath (1977) ⁺	$> 2,5$	Métodos numéricos; recomenda $e/D > 2,5$
Trott et al. (1984)	1,0	Ensaio em centrífuga
Valsangkar & Britto (1979)	2,4	Ensaio em centrífuga
Bueno (1987)	3,7	
Rogers (1987)	1,1	
Tohda (1991)	1,4	Ensaio em centrífuga
Zhan & Rajani (1997)	1,5	Métodos numéricos
Brachman et al. (2000)	2,6	A influência é nula para $e/D > 5$

*Apud Bulson (1985); ⁺apud Bueno (1987).

Levando-se em consideração as informações resumidas na Tabela 3.1, adotou-se $e/D = 3$, o que representa para um tubo de 80mm uma largura interna de 560 mm. Acredita-se que esta dimensão, aliada a um esquema composto por lubrificantes e folhas de polietileno colocado entre as paredes e a massa de solo, seja suficiente para tornar mínima a influência do atrito lateral nos ensaios. A Figura 3.1 mostra uma vista geral da caixa de teste, montada e em operação.



FIGURA 3.1 – Vista geral da caixa de testes

A altura interna foi fixada de modo que:

- a) o tubo possuisse uma altura de cobertura mínima igual a três vezes o seu diâmetro;
- b) que houvesse uma distância suficiente para minimizar a influência da base rígida da caixa no comportamento do conduto., como pode ser visto na Figura 3.2.

Finalmente, considerou-se que a bolsa de ar comprimido utilizada para aplicação de sobrecarga deveria dispor de um espaço de aproximadamente 50mm entre o solo e a tampa de reação da caixa. Em vista destes aspectos a altura interna da caixa foi fixada em 560mm. A Figura 3.2 mostra detalhes do projeto da caixa de testes.

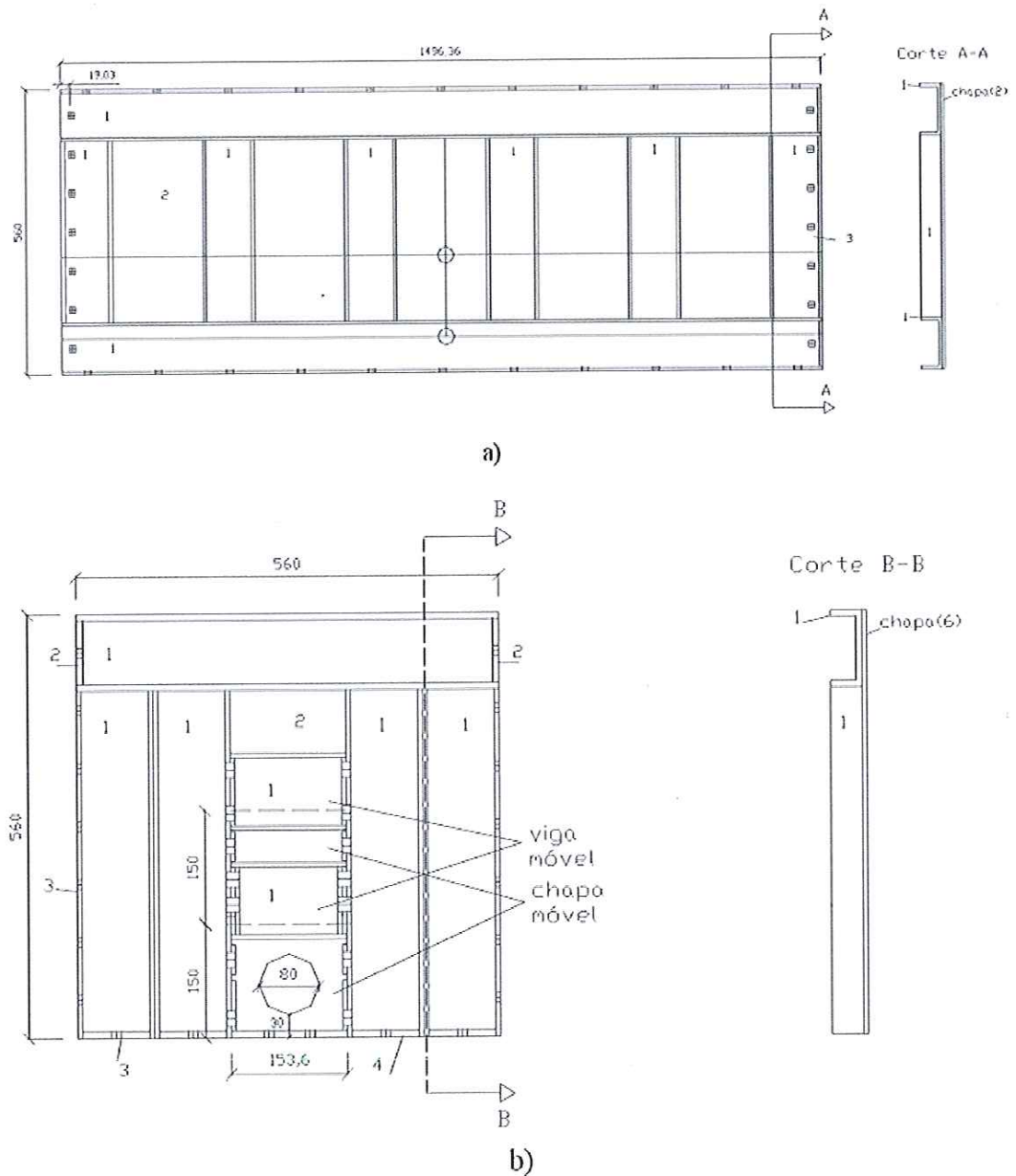


FIGURA 3.2 – Detalhes do projeto da caixa de testes: a) parede lateral; b) parede frontal

3.2.2 – Paredes Frontais e Laterais

Uma vez definidas as dimensões, procedeu-se ao projeto das paredes frontais e laterais da caixa de testes. As paredes laterais foram confeccionadas com vigas de aço do tipo U, com

altura de 101,6 mm, largura da aba de 41,83 mm e espessura da alma de 6,55 mm. Uma chapa metálica de 6,35 mm de espessura foi soldada às vigas, constituindo a superfície de contato com o solo. A disposição das vigas obedeceu a dois critérios distintos:

- a) fornecer uma rigidez adequada para a peça, e;
- b) facilitar a montagem.

Por não se encontrar engastada, a parte superior da caixa torna-se o local mais susceptível à ocorrência de deformações durante a fase de compactação do solo. Numa tentativa de reduzir este problema, optou-se por utilizar uma viga horizontal para aumentar a rigidez nesta região.

As paredes frontais foram projetadas também com vigas U de 101,6 x 41,83 x 6,55mm e chapa de 6,35 mm de diâmetro. Utilizaram-se quatro perfis verticais de 458mm de comprimento e um perfil horizontal com comprimento igual a 560mm, dispostos segundo o esquema exibido na Figura 3.2. O vão central da parede é dotado de duas chapas móveis com 150mm de comprimento e 166mm de largura. A chapa inferior possui um orifício com o mesmo diâmetro do conduto para possibilitar acesso de instrumentação ao interior do mesmo. Caso se julgue necessário, as chapas móveis possibilitarão ensaios com tubos de diversos diâmetros e posições verticais de assentamento, bastando para tanto serem substituídas. Duas vigas móveis, com as mesmas especificações anteriormente descritas, foram dispostas horizontalmente com o intuito de diminuir a deflexão da parede na região das chapas móveis. O detalhe das chapas móveis pode também ser observado na Figura 3.3.



FIGURA 3.3 – Detalhe das chapas móveis

3.2.3 – Base e Tampa de Reação

A base da caixa de testes foi confeccionada com vigas U com dimensões de 152,4 x 51,66 x 7,98mm. Como se pode observar através da Figura 3.1, quatro vigas transversais de 553mm de comprimento foram soldadas às vigas principais de 1496mm de comprimento. A fim de conferir maior rigidez ao centro da caixa, foram utilizadas nesta região duas vigas duplas transversais com dimensões de 101,6 x 41,83 x 6,55mm. Duas vigas de 152,4 x 51,66 x 7,98mm, dispostas paralelamente às vigas principais, interligam as vigas duplas entre si. Uma chapa com espessura de 6,35mm de diâmetro foi soldada no topo da base, compondo o fundo da caixa. Um orifício retangular de 100 x 350mm foi aberto no fundo da caixa para que um mecanismo com movimentação ascendente e descendente (alçapão) pudesse ser empregado, se necessário, quando se quiser estudar, por exemplo, o arqueamento do solo.

A base da caixa foi construída sobre cantoneiras de abas iguais com 550mm de altura, 63,5mm de largura e 6,35mm de espessura. Isto facilita o livre acesso ao fundo da caixa, permitindo a instalação de instrumentação nesta região.

A tampa de reação da caixa, com dimensões de 1496 x 656mm, foi confeccionada a partir de seis perfis do tipo U de 101,6 x 41,83 x 6,55mm e chapa com 6,35mm de espessura.

3.2.4 – Rigidez das Peças

A rigidez foi o principal critério que norteou o dimensionamento das peças da caixa de testes, pois, assim como o atrito lateral, influencia a resposta do modelo de forma considerável. As paredes e a base foram dimensionadas para suportar com segurança uma pressão aplicada pela bolsa e esforços de compactação de 250kPa.

3.3 – PROJETO DA CHUVA DE AREIA

A decisão em se adotar o método da chuva de areia para preenchimento da caixa de ensaios deve-se ao fato deste método permitir que se obtenha um maciço de compacidade muito uniforme em todos os pontos atingidos pela chuva. É um método consagrado para preparação de amostras em laboratório.

A vantagem de se ter um maciço de grande uniformidade é facilitar o entendimento da interação solo-conduto. Esta interação não depende somente das características de geometria e

rigidez do tubo, mas também da forma de deposição e das propriedades mecânicas do aterro compactado, além das condições de berço ao redor de toda a tubulação.

O sistema da chuva de areia construído é composto por um reservatório superior de solo, uma estrutura metálica de apoio, um sistema mecânico que movimentação horizontal do reservatório e de placas perfuradas intercambiáveis que permitem alterar a intensidade da chuva (RAD & TUMAY, 1987).

A estrutura metálica do equipamento apoio tem dimensões de 1,95m de comprimento, 0,75m de largura e 2,10m de altura. O reservatório superior de solo possui dimensões de 560mm de comprimento, 200mm de largura e 400 mm de profundidade, ou seja, possui capacidade de armazenar um volume de $0,045\text{m}^3$ de solo. A base deste reservatório possui um sistema de encaixe de placas perfuradas para difusão da areia de modo a permitir um fluxo uniforme, sem concentração de solo na região central. Foram confeccionadas três placas perfuradas, com furos de diâmetros 4mm, 8,9mm e 12,2mm, respectivamente. Cada placa possui os furos espaçados, entre si, na direção transversal de 47,4mm e na direção longitudinal, de 37,4mm. O número de furos em cada placa é 75, Figura 3.4.



FIGURA 3.4 – Detalhe da parte inferior da caixa com placa com furos de menor diâmetro

A vedação da base da caixa de areia é feita por duas chapas móveis, fixas nas laterais por dobradiças e presas no centro por uma alavanca que, quando aberta, libera a areia. Abaixo da base da caixa de areia, a uma distância de 590mm encontra-se o difusor composto de duas peneiras, separadas entre si por 45mm. A peneira superior apresenta a malha com uma inclinação de 45° em relação à peneira inferior, ambas possuem aberturas de malha com 7mm de diâmetro. O sistema assim construído permite um espalhamento extremamente uniforme da areia na caixa de teste, como pode ver visto na Figura 3.5.



FIGURA 3.5 – Preenchimento da caixa com chuva de areia

O enchimento da caixa é feito através de sucessivas passagens da chuva sobre a caixa. Em testes preliminares constatou-se que a areia utilizada atinge sua máxima densidade a partir de uma altura de queda de 100mm. Com esta altura atingem-se densidades relativas de 100, 70 e 40% para os diâmetros dos furos das placas de 4mm; 8,9mm e 12,2mm, respectivamente. Para o presente trabalho optou-se em trabalhar com a máxima densidade, 100%, obtida através do processo da chuva de areia com o solo.

A movimentação do sistema da chuva de areia é feita através de um sistema de correntes e coroas dentadas, associados a um motor trifásico de 0,5HP, com redutor de velocidade. Chaves reversoras e de fim de curso são responsáveis pelo funcionamento automático do sistema, Figura 3.6.



FIGURA 3.6 – Sistema de acionamento da caixa de areia

Durante a realização dos ensaios preliminares, verificou-se uma grande quantidade de material fino suspenso no ar que se acumula tanto nas coroas e correntes, como também no motor. Para proteger principalmente o motor uma caixa de acrílico foi projetada para envolvê-lo por completo, Figura 3.7.

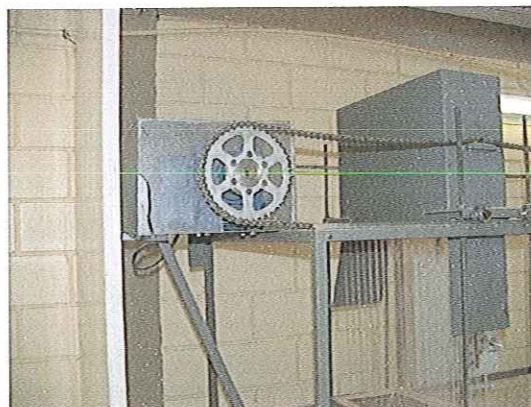


FIGURA 3.7 – Detalhe da proteção do motor

O enchimento do reservatório de areia é feito com o auxílio de uma ponte rolante, disponível na sala de testes do Laboratório de Geossintéticos, onde se executam os ensaios.



3.4 – A BOLSA DE REAÇÃO

Para o sistema de sobrecarga nos ensaios, utilizou-se uma bolsa de reação, que consiste em um colchão inflável, confeccionado de material à base de PVC, revestimento interno duplo e ligas de alta resistência. As dimensões da bolsa de reação são: 1500mm de comprimento, 700mm de largura e 300mm de altura. Os critérios de projeto e de utilização da bolsa de reação estão de acordo com as especificações técnicas da SANSUY S.A.

O sistema de reação é utilizado após completo preenchimento da caixa de testes através do processo da chuva de areia supramencionado. Sendo então a sobrecarga aplicada em estágios de 10 em 10kPa, até 150kPa.

3.5 – O SOLO

Utilizou-se em todos os ensaios uma areia pura e fina para maior uniformidade na confecção do maciço envolvente. A curva granulométrica do material está apresentada na Figura 3.8.

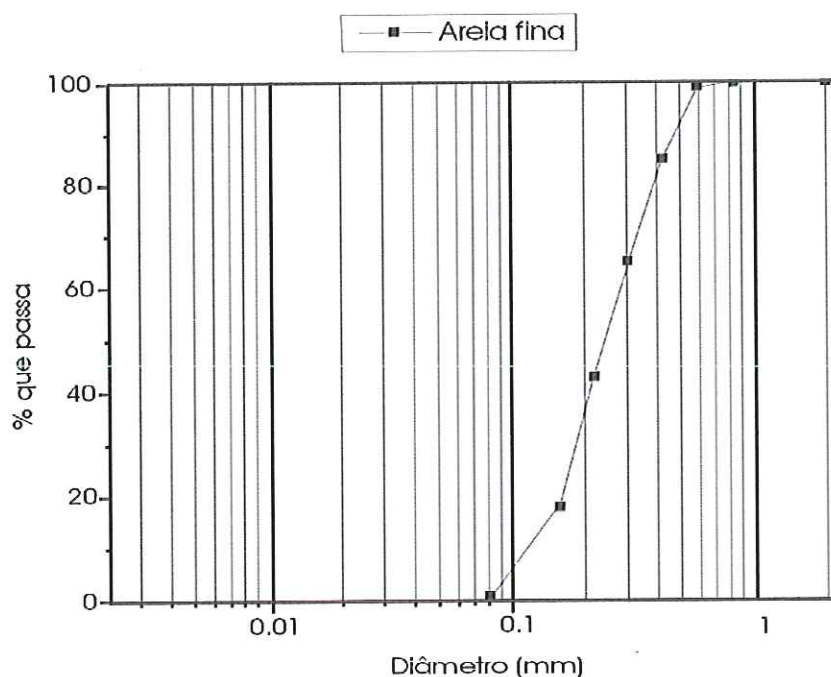


FIGURA 3.8 – Curva granulométrica da areia fina

3.5.1 – Curva de calibração para definição da densidade relativa do solo

Para se escolher a densidade relativa de trabalho efetuou-se uma curva de calibração do sistema de chuva de areia com o solo selecionado. Esta curva foi obtida após vários ensaios em que se variou, para cada abertura de furo da placa de base do sistema de chuva de areia, a altura de queda da areia. Percebeu-se que para altura superiores a 40cm a variação da densidade relativa era muito pequena. Em vista disto fixou-se a altura de queda em 50cm e para os furos de 4, 9 e 13mm obteve-se densidades relativas de 100, 75 e 50%, respectivamente, Figura 3.9.

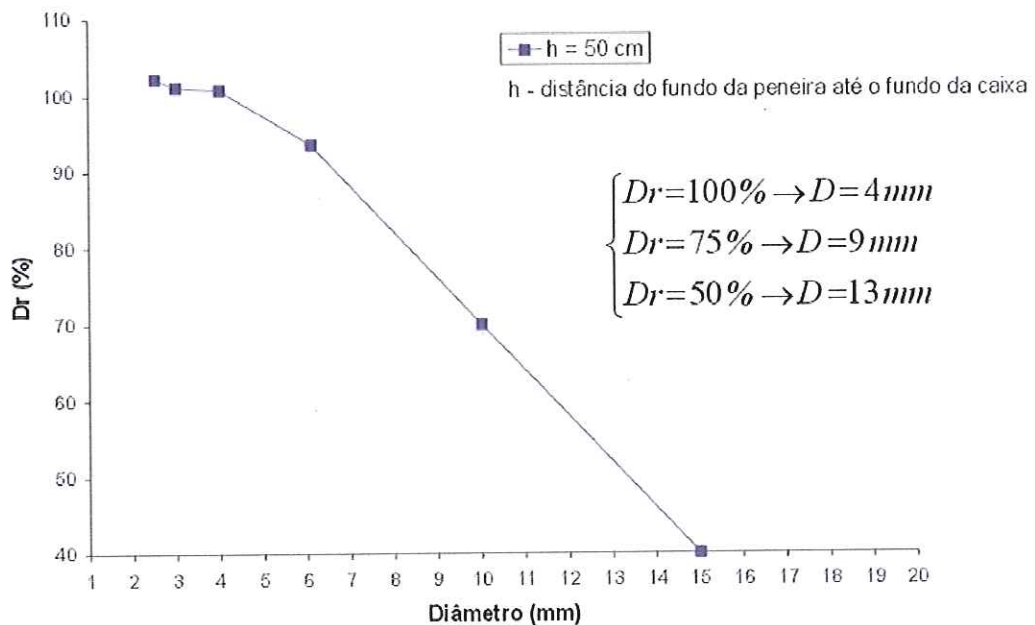


FIGURA 3.9 – Curva de calibração da chuva de areia (D_r x diâmetro do furo)

3.5.2 – Realização dos Ensaios Triaxiais

Ensaio drenados de compressão triaxial foram executados em laboratório, utilizando-se amostras compactadas de areia, com pesos específicos iguais a (17,6; 17,8 e 17,6kN/m³), diâmetros dos corpos de prova iguais a (4,96; 4,94 e 4,96cm) e alturas de (12,56; 12,53 e 12,54cm). A velocidade de cisalhamento utilizada no ensaio foi de 0,5mm/min. Pressões efetivas confinantes de 50, 100 e 200kPa foram aplicadas. Estes ensaios triaxiais se referem a densidade relativa de 100% para o solo utilizado nos testes.

As curvas tensão-deformação obtidas dos ensaios triaxiais estão apresentadas na Figura 3.10, em função das quais traçou-se as trajetórias de tensões e conseqüente envoltória de resistência cisalhante, Figura 3.11.

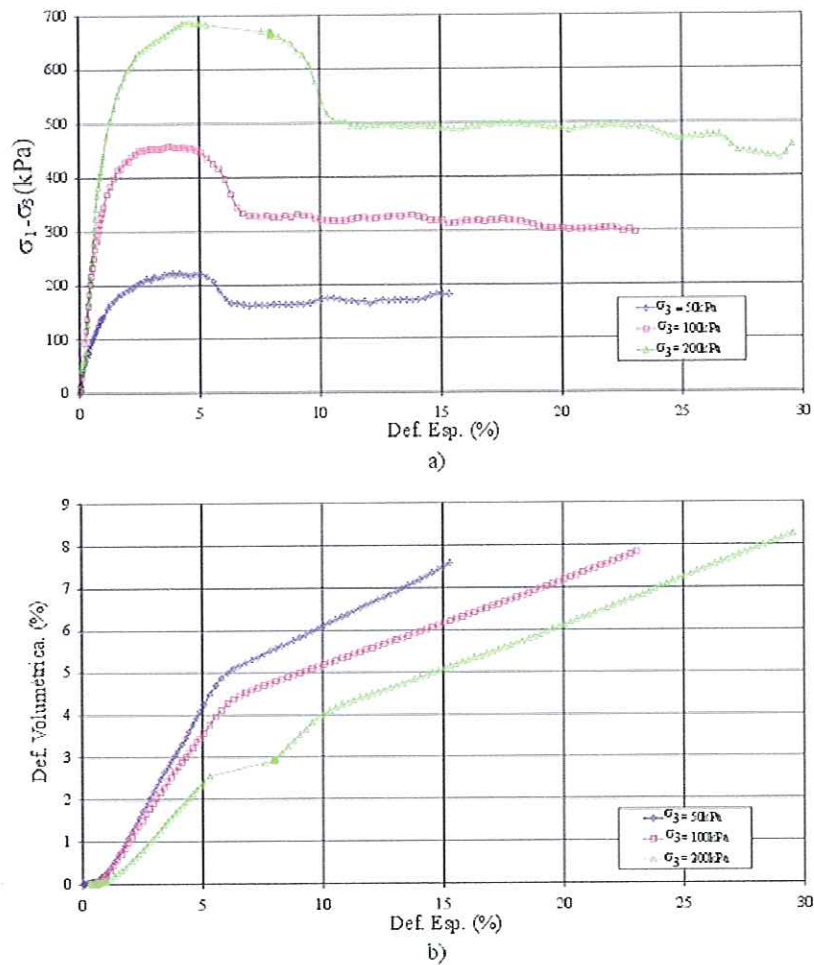


FIGURA 3.10 – Resultados dos ensaios de compressão triaxial consolidado drenado. (a) Curvas tensão-deformação; (b) Deformação volumétrica versus deformação axial.

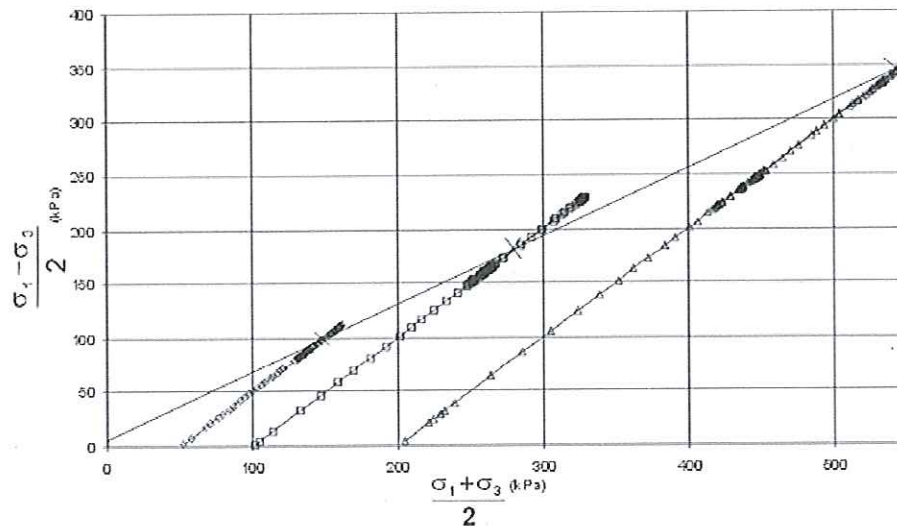


FIGURA 3.11 – Trajetória de tensões e envoltória de resistência

3.6 – O SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO

Para que se tenha um bom entendimento do problema é necessário um adequado sistema de instrumentação. No presente trabalho foram utilizados no sistema de instrumentação, células de tensão total, um transdutor de deslocamento e strain gages.

3.6.1 – Células de Tensão Total

As células de tensão total utilizadas nos ensaios suportam uma sobrecarga de até 150kPa. São células do tipo diafragma, à base de extensômetros elétricos, possuem diâmetro externo de 50mm e interno de 30mm, e foram fabricadas de alumínio. As células foram dispostas em torno do conduto da seguinte forma: no topo, nas linhas d'água e na base, e também imersas no solo acima do topo do conduto a uma altura de $D/2$ e D , como pode ser visto no esquema da Figura 3.12.

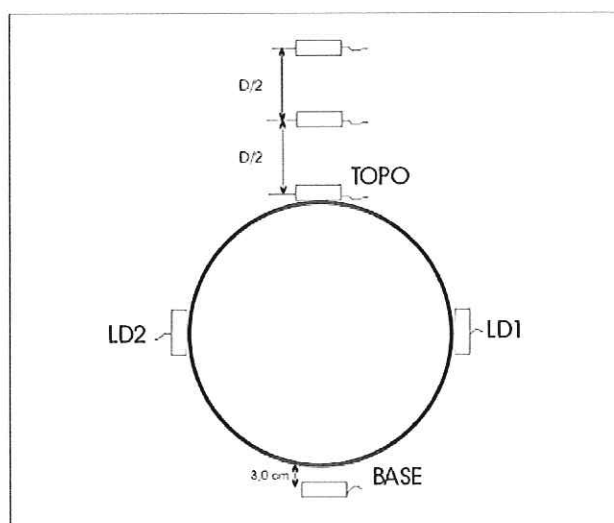


FIGURA 3.12 – Localização das células de tensão total

3.6.2 – Medidas de Deflexões do Tubo

Para as medidas de deflexão do conduto foi utilizado um transdutor de deslocamento, idealizado por Bueno (1987). Este transdutor possui oito braços à base de strain gages. Cada braço é fixo a um elemento central e funciona como uma pequena viga engastada em uma extremidade e possui dois strain gages (meia ponte) com ligação que permite medir as deformações resultantes causadas por esforços de flexão. A outra ponta livre da viga se desloca, registrando o movimento sofrido pelo ponto em contato. A Figura 3.13 mostra a utilização deste equipamento no ensaio. Trata-se de um equipamento de grande precisão e que permite a medição simultânea dos movimentos do conduto em oito pontos distintos, no topo, nos ombros, nas linhas d'água e na base do duto.

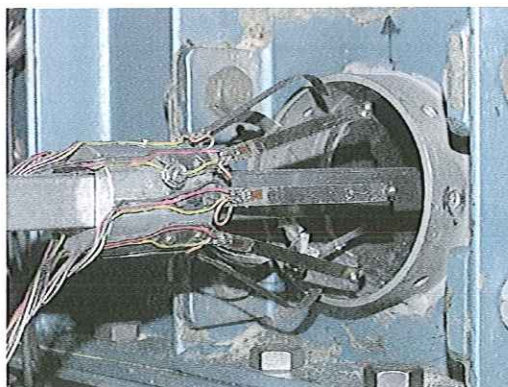


FIGURA 3.13 – Transdutor de deslocamento utilizado no ensaio

Efetuiu-se a calibração de todas as pernas do instrumento aplicando-se deslocamentos conhecidos, medidos através de um micrômetro e registrando o sinal da ponte de Wheatstone. Para eliminar qualquer efeito de histerese, aplicou-se um número elevado de ciclos de deslocamento até que obtivesse a repetibilidade das leituras em carga e descarga. A Figura 3.14 mostra duas vistas do transdutor de deslocamento.



FIGURA 3.14 – Vistas do transdutor de deslocamento

3.6.3 – Medidas com os Strain Gages

Os strain gages utilizados foram colados externamente na parede do conduto, nos mesmos oito pontos de medida do transdutor de deslocamento, Figura 3.15.

Todo o sistema de instrumentação foi disposto em uma única seção transversal, já que nos ensaios considerou-se o estado plano de deformações, Figura 3.16.

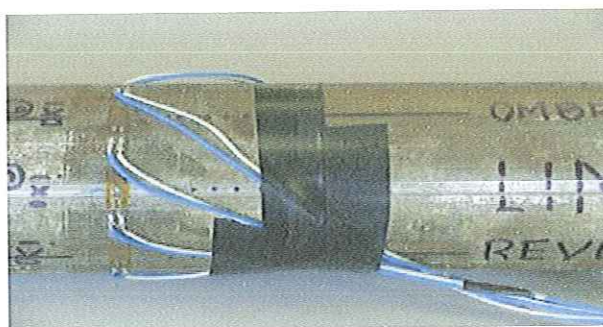


FIGURA 3.15 – Strain gages colados na parede do conduto

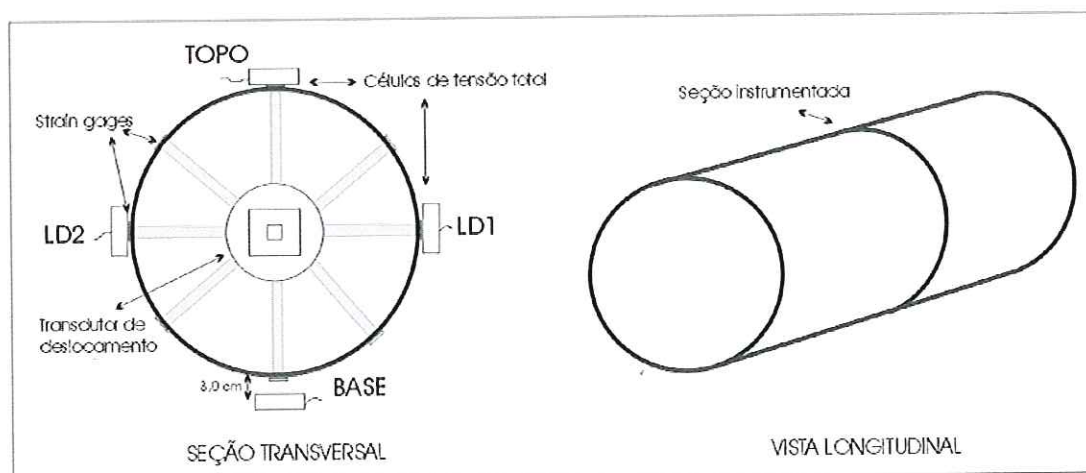


FIGURA 3.16 – Configuração do sistema de instrumentação

3.6.4 – Aquisição de Dados

As leituras de toda a instrumentação são feitas através de um aquisitor de dados, modelo Win5000, onde foram ligadas as células de tensão total, o transdutor de deslocamentos e os strain gages. No total utilizou-se trinta canais de aquisição.

3.7 – PROGRAMA DE ENSAIOS

O plano de atividades constitui-se na realização de ensaios em modelos físicos, que representam em uma escala aproximada o emprego de uma tubulação de diâmetro da ordem de 1m, com uma altura de cobertura que varia entre 5-7m. Nos ensaios alternaram-se a localização da zona corroída, o grau de corrosão e a rigidez do conduto. Quanto à localização da corrosão, os dutos foram desgastados artificialmente no topo, no ombro e na linha d'água. A utilização da corrosão artificial garantiu a uniformidade da profundidade do pite ao longo de todo o comprimento da tubulação, parâmetro necessário para conservar o estado plano de deformações nos ensaios.

Os ensaios foram divididos em dois grupos distintos. No primeiro, foram utilizados tubos de aço, de 76,20mm de diâmetro e 1,20mm de espessura de parede; o segundo grupo foi composto por condutos de alumínio, de diâmetro igual e 1,10mm de espessura de parede. Relativamente o tubo de aço representa um sistema rígido e o de alumínio um sistema flexível.

O objetivo, com a seguinte adoção, foi o de avaliar a influência da rigidez do sistema na redistribuição de tensões para o tubo danificado, considerado a variação na interação do sistema solo/conduto. O agrupamento dos condutos em classes segundo a rigidez relativa da seção transversal de estrutura comparada à do solo circundante pode ser obtida com o auxílio do parâmetro rigidez relativa, RR, já mencionado no Capítulo 02, equação (2.2), de acordo com a Tabela 2.7. Em função da classificação apresentada, o valor da rigidez relativa para o tubo de aço foi, $RR = 816$ e para o tubo de alumínio, $RR = 3227$. Considerou-se o módulo de elasticidade do solo igual a $E_s = 40.000\text{kPa}$.

A seqüência de ensaios programada é apresentada na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Programa de ensaios em modelos laboratoriais

Ensaio	Nível de Corrosão	Rigidez	Local Corroído
01	70%	I	Topo
02			Ombro I
03			Linha d'água I
04	45%	II	Topo
05			Ombro I
06			Linha d'água I
07	-	I	Tubo intacto
08	-	II	Tubo intacto

Obs.: rigidez I (Tubo de aço) > rigidez II (Tubo de alumínio)

Adotou-se um maior nível de corrosão para os tubos de aço, ensaios 01, 02 e 03, já que o conduto rígido, possui rigidez estrutural suficiente para sustentar por si só as cargas que lhe são impostas. Desta forma, um maior nível de corrosão permite tornar mais evidente o reconhecimento da interação solo/conduto. Em relação à geometria do dano, a corrosão localizada foi executada com comprimento igual a 2% do comprimento total da circunferência do conduto, conforme sugere a revisão bibliográfica (CHOUCHAOUI & PICK, 1994; PADILHA & GUEDES, 1994). Com um nível de corrosão de 70%, a espessura da parede no ponto danificado passa a ser: $0,3 \times \text{espessura} = 0,36\text{mm}$. Para o tubo de alumínio, conduto flexível, optou-se por um nível de corrosão de 45%, em que a espessura do ponto danificado passa a ser: $0,55 \times \text{espessura} = 0,60\text{mm}$. Adotou-se geometria idêntica a do tubo de aço. Comparações entre os grupos de ensaios (01, 02 e 03) e (04,05 e 06) permitem verificar quais os

padrões de corrosão que propiciam as maiores perdas de capacidade de carga e os maiores níveis de deflexão no conduto. Correlacionando-se os resultados dos tubos corroídos aos dos respectivos tubos intactos, ensaios (01, 02, 03 e 07) e (04, 05, 06 e 08), é possível analisar as alterações de comportamento devido ao processo corrosivo.

3.7.1 – Análises numéricas

Foram realizadas também simulações numéricas dos condutos enterrados corroídos utilizando o programa computacional de Elementos Finitos Plaxis 7.12. O objetivo de usar esta ferramenta foi a de complementar os resultados dos modelos físicos obtidos nos ensaios laboratoriais, além do que, essas análises permitem o estudo do problema de forma mais abrangente, tendo em vista ser possível obter tensão e deformação em todo o perímetro do conduto bem como tensão e deformação do solo envolvente.

As simulações numéricas foram efetuadas variando-se a posição da região corroída no tubo, com as mesmas configurações dos ensaios de laboratório, de modo a permitir comparações para averiguar a validade do modelo adotado. Foram também adotados para as análises numéricas padrões de corrosão com a combinação de duas regiões corroídas. A Figura 3.17 ilustra as configurações adotadas. A partir destes padrões de corrosão, análises paramétricas são efetuadas, variando-se a rigidez e o grau de corrosão do conduto. Considerou-se em todas as modelagens o estado plano de deformações. A Tabela 3.3 apresenta o programa de análise efetuado com os modelos de análises numéricas.

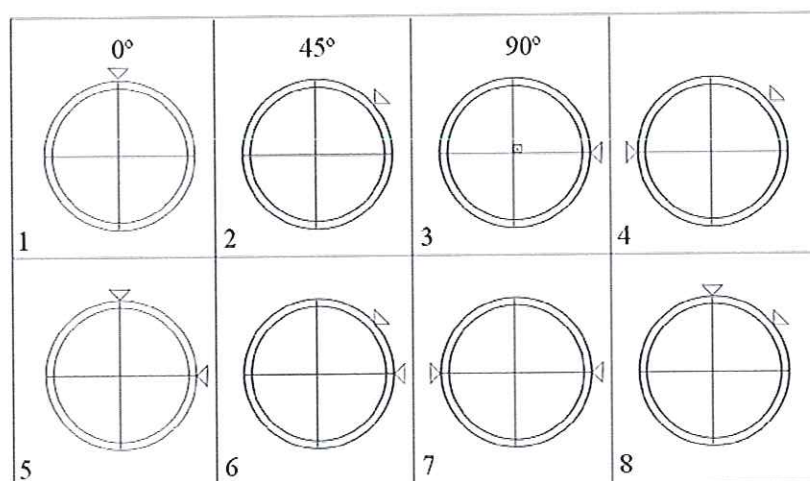


FIGURA 3.17 – Padrões de corrosão adotados nas simulações numéricas

TABELA 3.3 – Programa de modelos das análises numéricas

Modelo	Nível de corrosão	Tubo	Local corroído
1	45%	Aço	Topo
2			O1
3			LD1
4	45%	Alumínio	Topo
5			O1
6			LD1
7	70%	Aço	Topo
8			O1
9			LD1
10			O1 e LD2
11			Topo e LD1
12			O1 e LD1
13			LD1 eLD2
14			Topo e O1
15	70%	Alumínio	Topo
16			O1
17			LD1
18			O1 e LD2
19			Topo e LD1
20			O1 e LD1
21			LD1 eLD2
22			Topo e O1

CAPÍTULO 04

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**4.1 – INTRODUÇÃO**

Este Capítulo apresenta os resultados obtidos na parte experimental e com a simulação numérica. Estes resultados permitiram avaliar a influência do efeito da corrosão no comportamento geotécnico dos condutos enterrados, mostrando as localizações mais danosas à estrutura, através da comparação de resultados dos tubos intactos com os de tubos corroídos. Finalmente, o trabalho avaliou a influência conjunta da corrosão e da flexibilidade do conduto no comportamento mecânico das tubulações enterradas.

4.2 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS LABORATORIAIS

O sistema de instrumentação utilizado forneceu resultados que permitem definir a distribuição de tensão do solo em torno do conduto, as tensões de compressão na parede do tubo e os deslocamentos radiais sofridos.

Para melhor entendimento dos resultados apresentados a seguir, adotou-se para os pontos da seção transversal do conduto uma nomenclatura específica, de acordo com o apresentado na Figura 4.1. A nomenclatura adotada segue a proposta de Bueno (2003).

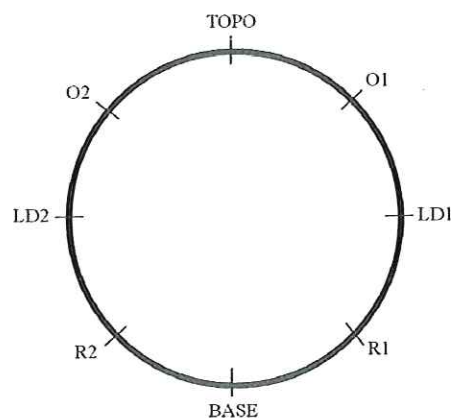


FIGURA 4.1 – Nomenclatura adotada

Onde:

O1	- Ombro direito do conduto;
O2	- Ombro esquerdo do conduto;
R1	- Reverso direito do conduto;
R2	- Reverso esquerdo do conduto;
LD1	- Linha d'água direita do conduto;
LD2	- Linha d'água esquerda do conduto;

4.2.1 – Distribuição de Tensões no Solo

A partir das medidas de tensões efetuadas, obtidas no topo, nas linhas d'água e na base dos condutos pode-se obter uma forma aproximada da distribuição de tensões que ocorre no contorno do tubo. Obviamente, as distribuições sugeridas não conseguem traduzir com exatidão todas as nuances e variações que ocorrem ao redor do conduto. No entanto, o registro de tensões nestes pontos fornece uma idéia bastante consistente do que ocorre nos pontos-chave do perímetro do conduto, além de permitir comparações entre as tensões de condutos intactos e corroídos e entre tubos mais rígidos e mais flexíveis.

As distribuições de tensões apresentadas nas Figuras 4.2 a 4.4 foram determinadas para os tubos de aço e de alumínio. Os resultados de distribuição de tensões obtidos para cada ensaio: duto corroído no topo, no ombro direito (O1) e na linha d'água direita (LD1) são comparados entre si e relacionados as suas respectivas distribuições de tensão, considerando o duto intacto. A análise destes resultados mostra que danos devido à corrosão realmente provocam redistribuições de tensões ao redor do conduto.

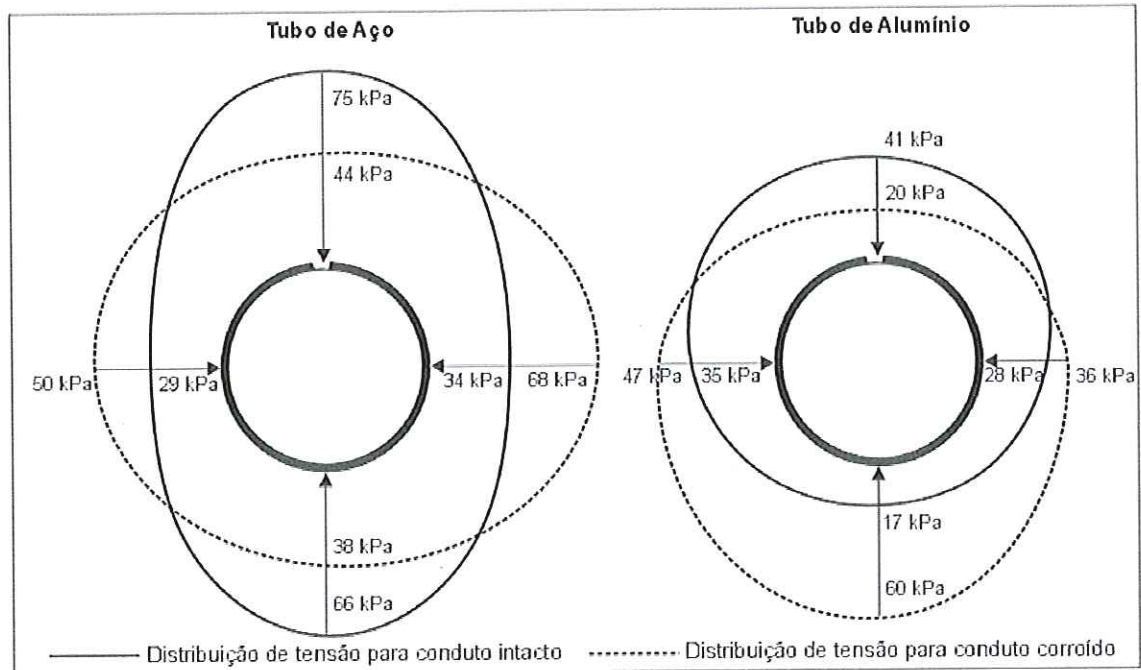


FIGURA 4.2 – Distribuição de tensões do solo para conduto corroído no topo

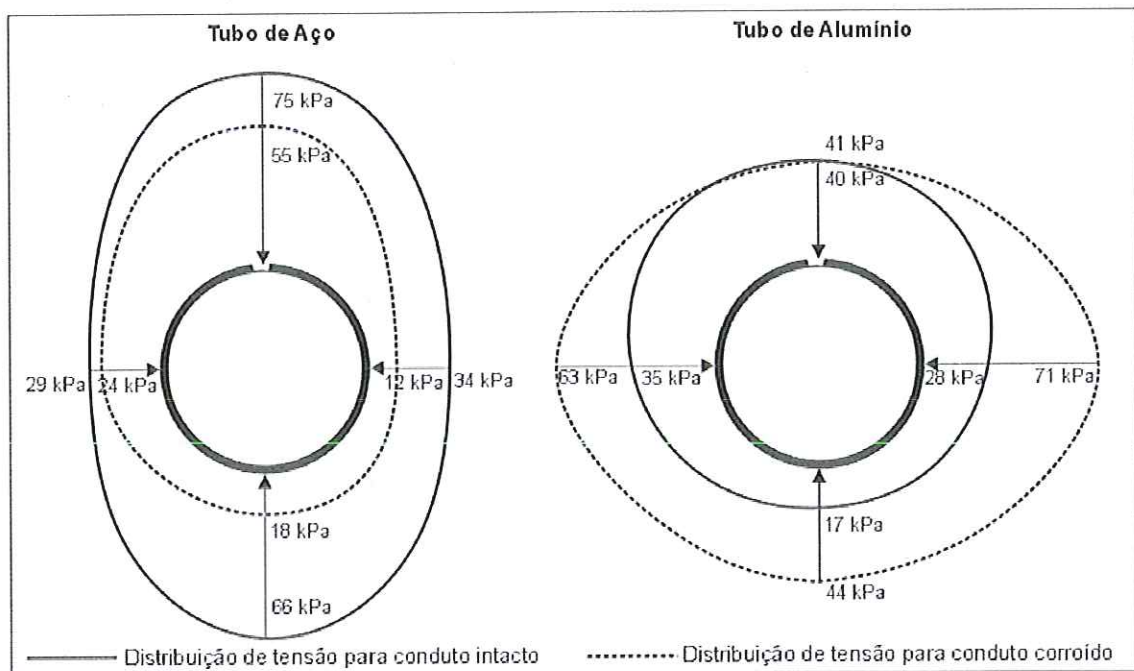


FIGURA 4.3 – Distribuição de tensões do solo para conduto corroído no O1

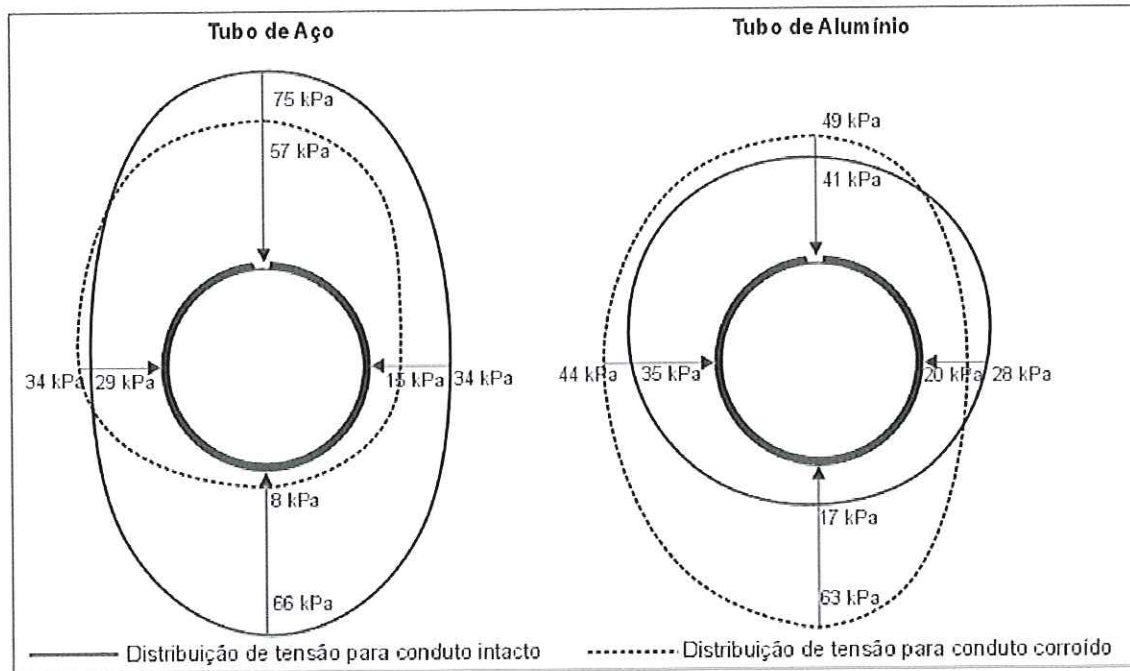


FIGURA 4.4 – Distribuição de tensões do solo para conduto corroído na LD1

As alterações observadas para os ensaios realizados com tubo de aço podem ser resumidas como se segue:

- A distribuição de tensão no solo no contorno da tubulação intacta sugere que se pode assumir um comportamento de um duto rígido, tendo em vista que se observa elevada tensão vertical no topo (75kPa) e na base (66kPa) e tensões menores nas linhas d'água (27kPa e 34kPa);
- O conduto de aço corroído no topo mostrou modificações em todos os valores de tensões registrados, as tensões no topo e na base apresentaram decréscimo em detrimento ao aumento das tensões nas linhas d'água. O que se observa é que à medida que o conduto perde rigidez com o dano localizado no topo, o sistema se torna mais flexível. Logo, o topo se desloca mais para baixo, forçando um acréscimo de solicitação da resistência passiva do solo. Desta forma, as tensões nas linhas d'água crescem quando comparadas às do tubo intacto;
- Os resultados do tubo danificado no ombro direito mostram que os pontos mais afetados pela corrosão são o ponto da linha d'água direita e da base. Os outros dois pontos de observação, topo e linha d'água esquerda, apresentaram pequenas variações quando seus resultados são comparados com os do tubo intacto. O deslocamento do ombro direito

provoca um alívio de tensões na linha d'água direita não permitindo que toda a carga seja transferida para a base, onde também ocorre um alívio de tensões;

- Avaliando-se o tubo de aço corroído na linha d'água direita, observa-se um alívio de tensões na linha d'água direita (ponto danificado) e também uma transferência de tensões para a linha d'água esquerda. É neste padrão de corrosão, em que se percebe o maior alívio de tensões na base do conduto.

A partir dos ensaios obtidos com os testes realizados em tubulações de alumínio, as seguintes alterações podem ser percebidas:

- As diferenças nas distribuições de tensão obtidas para o conduto corroído no topo e o conduto intacto não são tão evidentes para o tubo de alumínio como foram verificadas para o caso do duto de aço. O padrão de deslocamento, no entanto, é similar ao observado para o tubo de aço, o topo e as linhas d'água sofrem alívios de tensões. No entanto, a base apresenta um acréscimo de tensões, diferente do que ocorre no tubo de aço. É importante perceber que mesmo o dano estando localizado no topo seção, a redistribuição de tensões não ocorre de maneira simétrica;
- Avaliando-se o tubo de alumínio corroído no ombro 1, o único ponto que não foi afetado pela corrosão é o topo, todos os demais pontos apresentaram acréscimos de tensão;
- Para o tubo de alumínio corroído na linha d'água 1, o único ponto que apresenta um alívio de tensões é a linha d'água 1 (local danificado), todos os demais sofreram acréscimos de tensões.

As observações citadas acima indicam o quanto a corrosão instalada em uma tubulação enterrada pode influenciar na rigidez do sistema. As deformações do conduto, provocadas como resultado do dano imposto pela corrosão, estão relacionadas a uma correspondente transferência de esforços, que proporciona uma redistribuição de tensões em torno do conduto. Em relação às formas da redistribuição de tensões no solo, é para o caso da tubulação corroída na linha d'água, tanto para o tubo de aço, quanto para o tubo de alumínio, em que se percebe a maior assimetria de carregamento. A atuação de cargas assimétricas deve ser devidamente analisada na concepção de uma proposta de cálculo para esta situação.

4.2.2 – Tensão de Compressão nas Paredes do Conduto

A corrosão localizada, além de provocar uma redução do momento de inércia da seção transversal do conduto, provoca também um aumento de tensões circunferenciais no ponto danificado.

Os resultados de tensão de compressão, tendo em vista a pequena espessura da parede dos condutos, foram calculados com base, unicamente, nas deformações externas, de acordo com a equação (4.1), nos oito pontos especificados na nomenclatura, onde foram colados os strain gages.

$$\sigma_h = \frac{\varepsilon_{ext} \cdot E}{1 - \nu^2} \quad (4.1)$$

Onde:

σ_h - Tensão de compressão na parede do conduto;

ε_{ext} - Deformação externa;

E - Módulo de elasticidade do material;

ν - Módulo de Poisson.

4.2.2.1 – Tubo de Aço

Os valores das tensões de compressão nas paredes do conduto de aço em função do carregamento, são apresentadas nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente, para o conduto corroído no topo, no ombro 1 e na linha d'água 1. Nestes gráficos a tensão aplicada atingiu 150kPa.

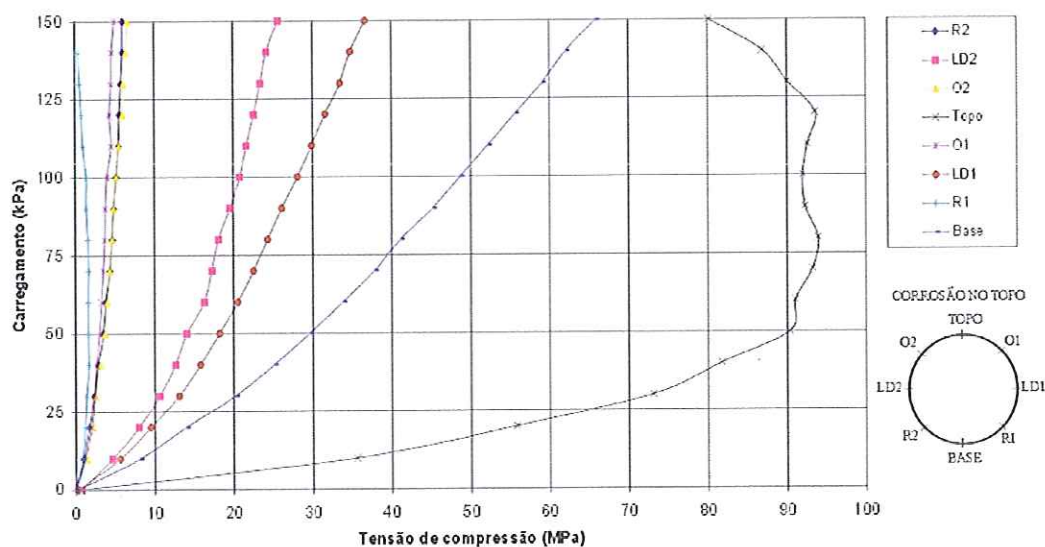


FIGURA 4.5 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de aço – corrosão no topo

Na Figura 4.5 mostra-se que, a tensão de compressão na base do conduto cresce de forma bastante acentuada, e quase linear, alcançando 65MPa para uma carga aplicada de 150kPa. Este valor de tensão de compressão só é menor em comparação ao ponto no topo do conduto, que atinge 95MPa. A evolução da tensão de compressão registrada no topo do conduto é bastante peculiar atingindo um máximo para uma tensão aplicada de 50kPa e permanecendo estável à medida que a tensão aplicada cresce até cerca de 125kPa, para daí decrescer até o valor máximo de tensão aplicada de 150kPa. Ainda na mesma Figura 4.5, percebe-se alguma alteração na medida do valor da tensão de compressão para o ponto situado no R1, que deveria ter seguido uma mesma tendência de comportamento como observado nos pontos R2, O1 e O2, porém, a tensão de compressão neste ponto tende a zero à medida que a tensão aplicada cresce.

As tensões de compressão para os pontos do conduto situados na LD1 e na LD2 apresentaram uma pequena diferença não esperada a princípio, já que a corrosão se localizava no topo do conduto, o que garantiria uma simetria no comportamento. Este fato evidencia que mesmo os pontos na LD1 e na LD2 sendo simétricos em relação ao dano, não ocorre uma distribuição equitativa da influência quanto a transmissão da tensão de compressão para os pontos na linha d'água, ou até mesmo alguma interferência do método de execução do ensaio pode ter acarretado a discrepância entre os valores de tensão de compressão na LD1 e na LD2.

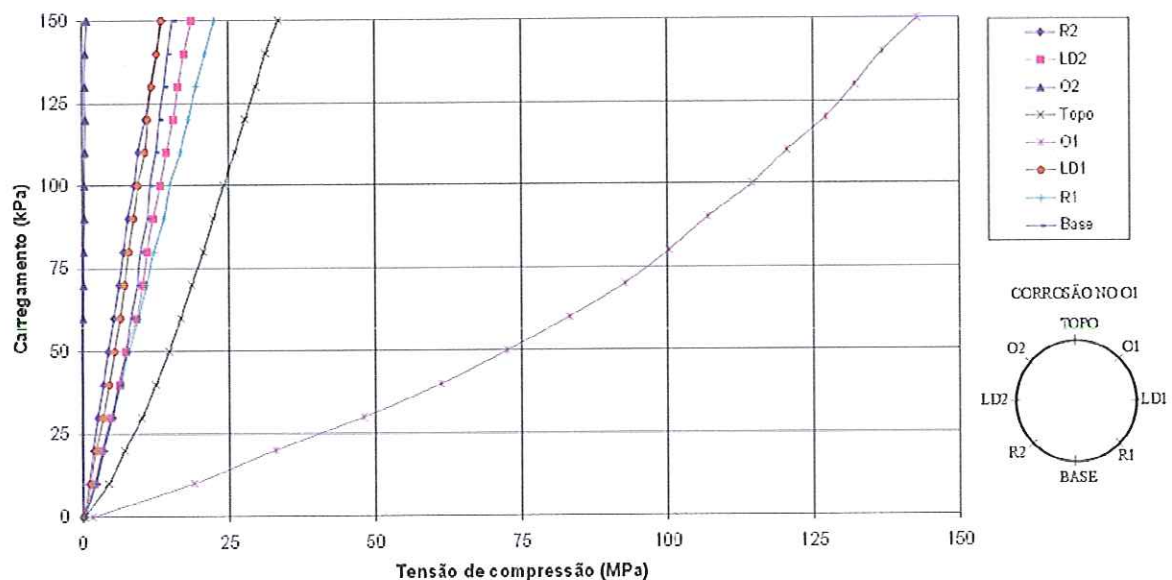


FIGURA 4.6 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de aço – corrosão no O1

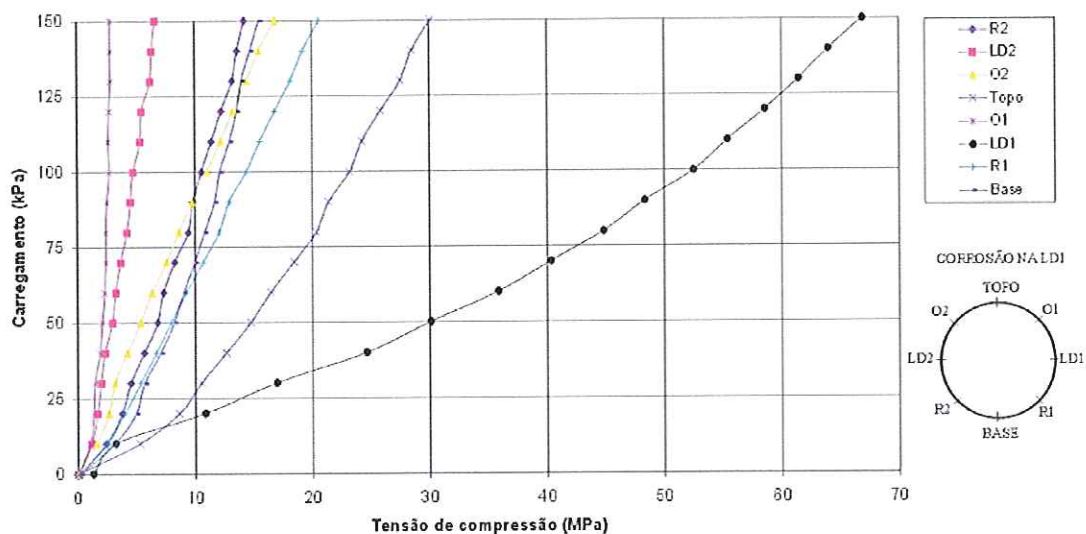


FIGURA 4.7 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de aço – corrosão na LD1

Avaliando a tensão de compressão nas paredes do tubo para o seu topo, para os três padrões de corrosão, tubo corroído no topo, no ombro 1 e na linha d'água 1, percebe-se que no topo, Figura 4.5 ocorrem os maiores valores, até mesmo por ser este ponto danificado. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram também que os valores de tensão de compressão no topo se destacam dos demais, sendo inferior unicamente dos valores de tensão observados nos pontos danificados em cada caso.

Observa-se na Figura 4.6 que o comportamento da tensão de compressão na zona do ombro 2 não apresentou alteração com o incremento do carregamento, quando era esperado que estivesse próximo ao grupo de pontos LD1, LD2, R1, R2 e Base.

A Figura 4.7 mostra que para o tubo corroído na linha d'água 1 a maior diferença ocorre entre os valores de tensão de compressão medidos nos pontos correspondentes às duas linhas d'água, sendo a tensão atuante na linha d'água 1 dez vezes maior do que a da linha d'água 2.

4.2.2.2 – Tubo de Alumínio

Os valores das tensões de compressão nas paredes do conduto de alumínio em função do carregamento aplicado (até 150kPa) são apresentados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 respectivamente, para o conduto corroído no topo, no ombro 1 e na linha d'água 1.

Observa-se do conjunto de curvas mostrado nas Figuras 4.8 a 4.10 que os tubos de alumínio são bastante sensíveis a qualquer pequena variação do carregamento aplicado, especialmente

próximo da origem do eixo, que induz tensões de compressão de relativa magnitude quando comparadas às observadas nos tubos de aço.

Este comportamento possivelmente se deve à influência das cargas de peso próprio do solo envolvente que causa no tubo de aço deslocamentos insignificantes quando comparadas ao tubo de alumínio.

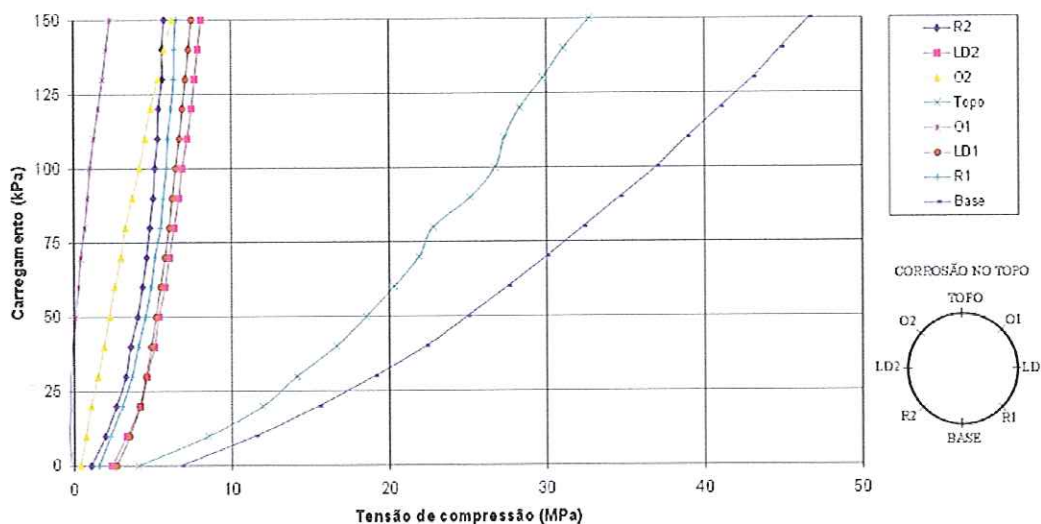


FIGURA 4.8 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de alumínio – corrosão no topo

Avaliando o gráfico da Figura 4.8, percebe-se que os maiores valores de tensão de compressão não ocorreram na zona do ponto danificado, o topo do conduto, como observado na Figura 4.5, para o tubo de aço. As maiores tensões de compressão ocorreram na base do conduto, e todos os demais pontos apresentaram valores de tensão da mesma ordem de grandeza, com exceção do ponto situado no topo, que apresenta tensão de compressão algo superior aos demais. Comparando estes valores aos do tubo de aço obtém-se, para o topo uma tensão de compressão corresponde à cerca de 1/3 apenas da tensão registrada para o tubo de aço, ou seja, uma diferença de 65% em favor do tubo de aço. A comparação entre os valores de tensão registrados na base mostra que embora ainda maiores, a diferença é de cerca apenas de 30%.

Na Figura 4.9, a seguir, três curvas de tensão de compressão se sobressaem, as do topo, do ombro 1 e da base do duto. De forma similar ao observado na Figura anterior, novamente os maiores valores de tensão de compressão não ocorreram para o ponto danificado, o ombro 1. Com exceção destas três curvas todas as demais mostraram valores de mesma grandeza.

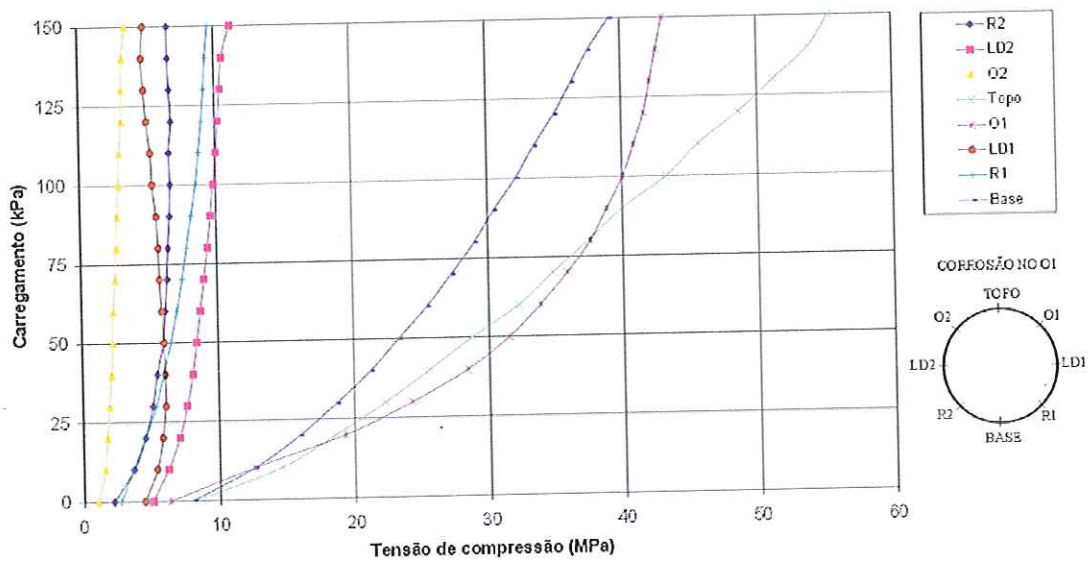


FIGURA 4.9 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de alumínio – corrosão no O1

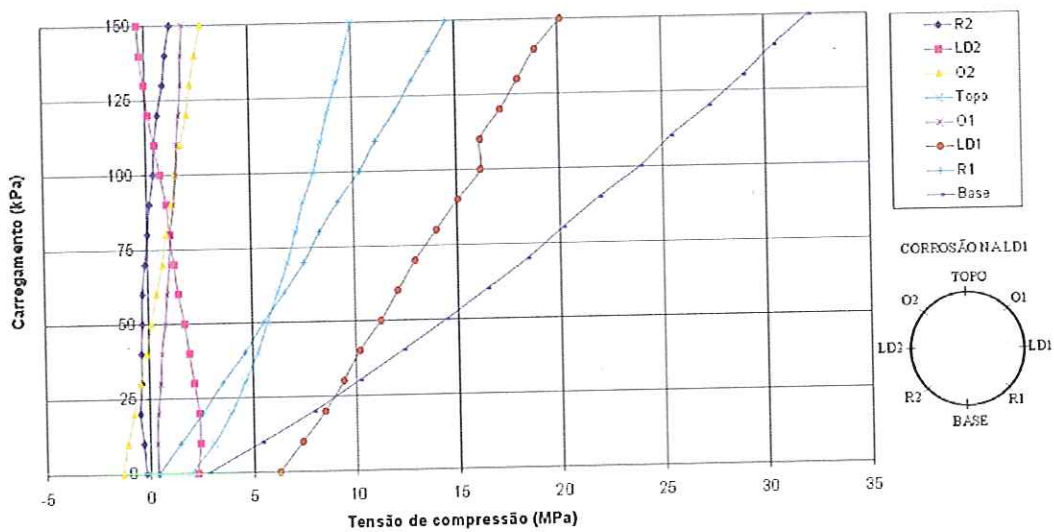


FIGURA 4.10 – Tensão de compressão nas paredes do tubo de alumínio – corrosão na LD1

A tensão de compressão na base do conduto atinge os maiores valores em relação aos demais pontos da seção para o caso do tubo corroído no topo, Figura 4.10.

Em relação ao tubo de aço, comparando-se os valores da tensão de compressão na base do conduto, obtidos para cada um dos padrões de corrosão, observa-se que em se tratando do tubo de

alumínio, os valores são mais próximos entre si. A diferença entre o maior valor (corrosão no topo) e o menor valor (corrosão na LD1) é de apenas 27%, enquanto que para o tubo de aço a diferença é de 77% entre o maior e o menor valor da tensão de compressão na base do tubo. Vale salientar que o padrão corrosivo que apresenta o maior e o menor valor de tensão de compressão na base do conduto é o mesmo, tanto para o tubo de aço como para o tubo de alumínio.

4.2.3 – Deslocamentos do Conduto

Os valores dos deslocamentos radiais do conduto, registrados com o transdutor de deslocamento, são apresentados a seguir. Para melhor visualização, ampliaram-se estes valores utilizando um fator de vinte vezes. Isto foi necessário para que as tendências dos deslocamentos pudessem ser percebidas, já que todos os deslocamentos foram pequenos, devido à relativa rigidez dos condutos ensaiados.

4.2.3.1 – Ensaio 01

O ensaio 01 foi realizado com tubo de aço, corroído no topo. Os deslocamentos radiais para todos os oito pontos do conduto são apresentados na Figura 4.11. O deslocamento vertical máximo observado ocorreu no topo e atingiu 0,51mm, sob a ação de uma sobrecarga de 150kPa. Este deslocamento associado também ao deslocamento vertical da base representa uma deflexão correspondente a 0,34% diâmetro do conduto. Considerando-se como deflexão máxima de utilização para condutos rígidos 2% do diâmetro do conduto constata-se que o sistema solo-conduto não apresenta nenhuma tendência de ruptura por deformação excessiva.

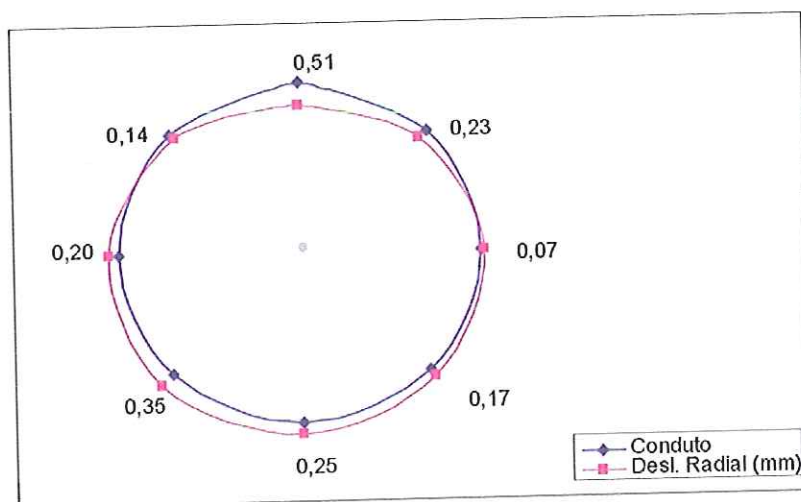


FIGURA 4.11 – Deslocamentos radiais para o conduto de aço corroído no topo

A Figura 4.12 apresenta a relação entre o carregamento aplicado e os deslocamentos radiais correspondentes aos pontos do topo e da base do tubo de aço corroído no topo. Notam-se relações lineares para ambos os casos.

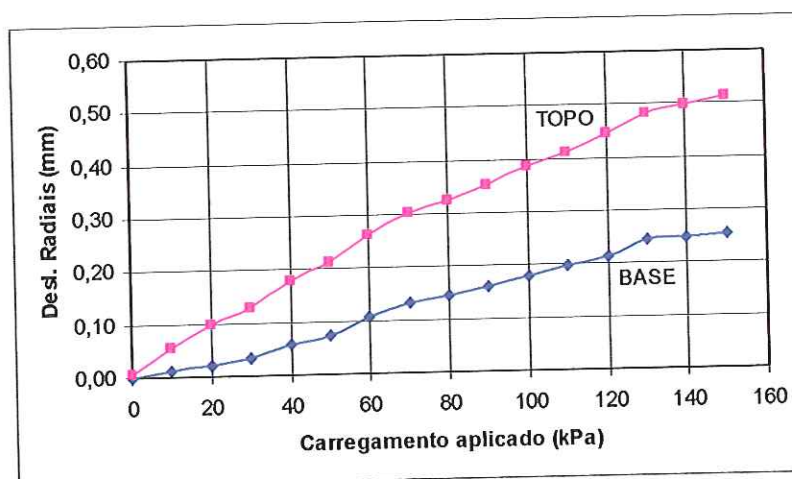


FIGURA 4.12 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de aço – corroído no topo)

Admitindo-se, apenas para ilustração, um comportamento linear das deflexões com o acréscimo da sobrecarga, o valor referente a uma deflexão de 2% corresponderia a uma carga de utilização: 430kPa.

4.2.3.2 – Ensaio 02

O ensaio 02 foi realizado com tubo de aço corroído no ombro 1. Os deslocamentos radiais para todos os oito pontos do tubo são apresentados na Figura 4.13. O deslocamento vertical máximo observado ocorreu também no topo do conduto e atingiu 0,22mm, sob a ação de uma sobrecarga de 150kPa. Percebe-se que os deslocamentos para este caso são menores do que os observados para o tubo corroído no topo, embora o padrão geral de deformação desenvolvido nos dois testes seja similar. Este deslocamento somado ao deslocamento vertical da base do conduto conduz a uma deflexão correspondente a 0,13% diâmetro do conduto. Considerando-se como deflexão máxima de utilização para condutos rígidos 2% do diâmetro do conduto, constata-se uma elevada segurança contra uma ruptura por deformação excessiva.

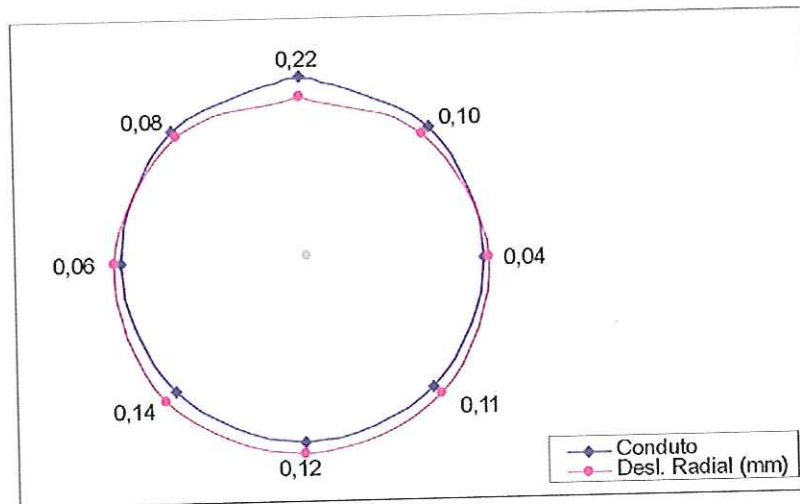


FIGURA 4.13 – Deslocamentos radiais para o conduto de aço corroído no O1

A Figura 4.14 apresenta a relação entre o carregamento aplicado e os deslocamentos radiais correspondentes, para os pontos do topo e da base do tubo de aço corroído no O1.

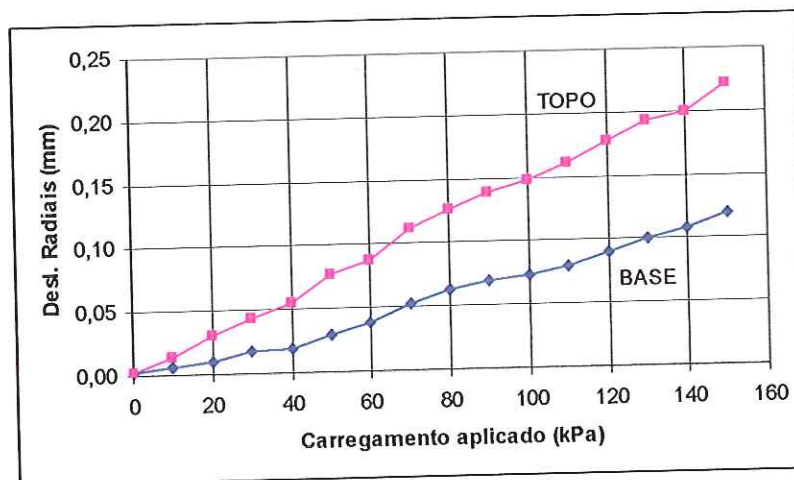


FIGURA 4.14 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de aço – corroído no O1)

Admitindo-se, do mesmo modo, apenas para ilustração, uma linearidade entre deflexões e acréscimos da sobrecarga, o valor referente a uma deflexão de 2% do diâmetro do duto, refere-se a uma carga de utilização de **1030kPa**, um valor extremamente elevado.

4.2.3.3 – Ensaio 03

O ensaio 03 foi realizado com tubo de aço, corroído na linha d'água 1. Os deslocamentos radiais para todos os oito pontos do conduto são apresentados na Figura 4.15. O deslocamento vertical máximo observado ocorreu no topo do tubo e atingiu 0,26mm, sob a ação de uma sobrecarga de 150kPa. Este deslocamento somado ao que ocorre na base do conduto representa uma deflexão correspondente a 0,13% do diâmetro do conduto. Admitindo-se uma deflexão máxima de utilização para condutos rígidos de 2% do diâmetro do conduto, observa-se que o sistema solo-duto não está sujeito a uma ruptura por deformação excessiva.

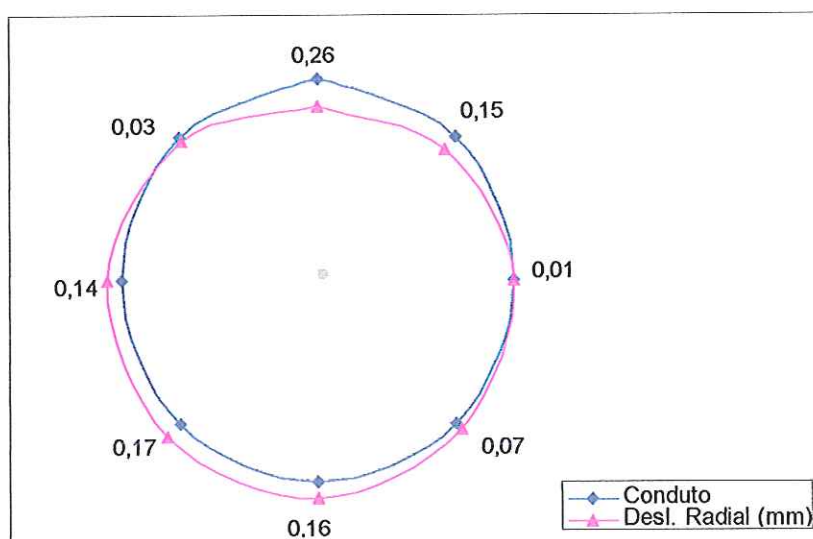


FIGURA 4.15 – Deslocamentos radiais para o conduto de aço corroído na LD1

A Figura 4.16 apresenta a relação entre o carregamento aplicado e os deslocamentos radiais correspondentes, para os pontos do topo e da base do tubo de aço corroído na LD1.

Admitiu-se também que, apenas para ilustração do comportamento linear do sistema, haja uma relação entre as deflexões do tubo e os acréscimos da sobrecarga. Neste caso, as curvas são bilineares. A extrapolação foi feita com base no 2º trecho, e o valor referente a uma deflexão de 2% do diâmetro do duto conduz a uma carga de utilização de **810kPa**.

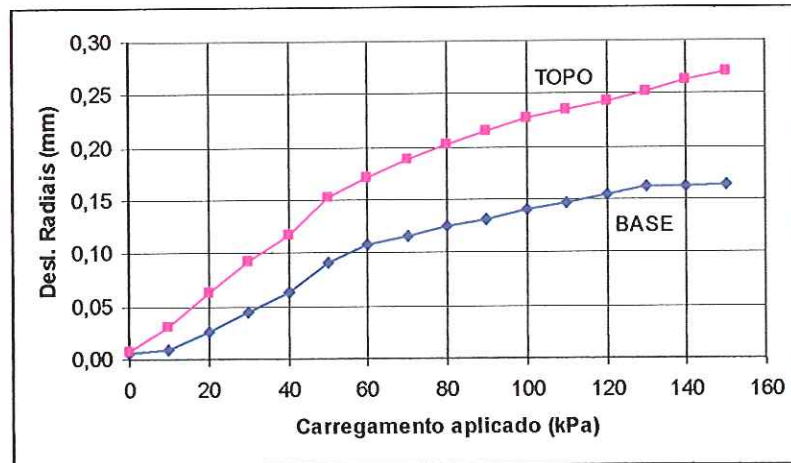


FIGURA 4.16 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de aço – corroído na LD1)

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios 01, 02 e 03, observa-se que o efeito da corrosão foi mais desfavorável para o caso do conduto danificado no topo. Vale a pena ressaltar a grande discrepância entre os valores obtidos de cargas máximas de utilização. Para que as diferenças fossem comparadas, apresenta-se na Figura 4.17 o perfil do conduto deformado nos três casos ampliando-se os deslocamentos por um fator de ampliação de trinta vezes. Apesar da rigidez do conduto utilizado, é possível observar a mudança de comportamento do conduto para os distintos padrões de corrosão, duto corroído no topo, no ombro e na linha d'água.

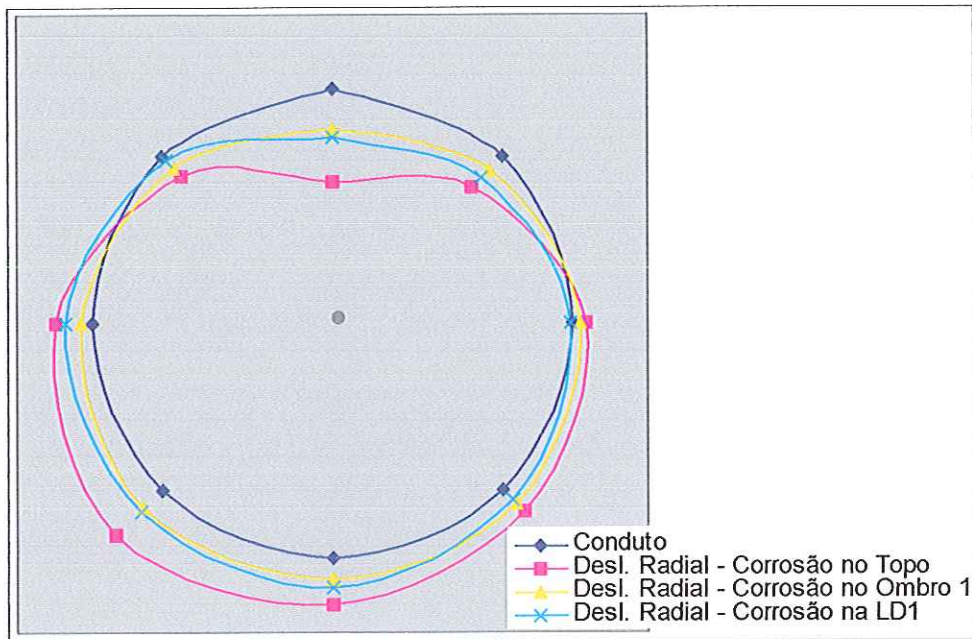


FIGURA 4.17 – Comparação dos deslocamentos radiais para o conduto de aço

4.2.3.4 – Ensaio 04

O ensaio 04 foi realizado com tubo de alumínio corroído no topo. Os deslocamentos radiais para todos os oito pontos do conduto são apresentados na Figura 4.18. O deslocamento vertical máximo observado, sob a ação de uma sobrecarga de 150kPa, foi de 0,37mm e ocorreu no topo. Este deslocamento acrescido do deslocamento vertical da base representa uma deflexão correspondente a 0,40% diâmetro do conduto. Considerando-se como deflexão máxima de utilização para condutos flexíveis 5% do diâmetro do conduto, constata-se um elevado fator de segurança contra a ruptura por deformação excessiva.

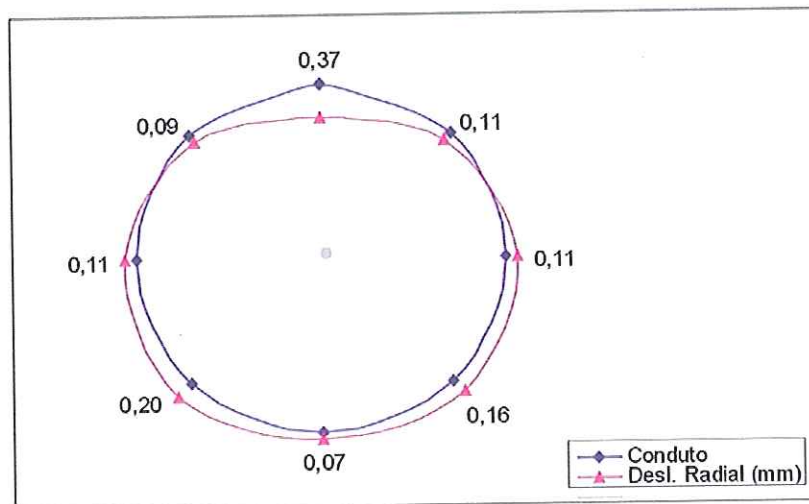


FIGURA 4.18 – Deslocamentos radiais para o conduto de alumínio corroído no topo

A Figura 4.19 apresenta a relação entre o carregamento aplicado e os deslocamentos radiais correspondentes, para os pontos do topo e da base do tubo de alumínio corroído no topo.

De forma similar ao que se definiu para os tubos de aço, admitindo-se, apenas para ilustração do comportamento do conduto, uma relação linear entre as deflexões e o acréscimo da sobrecarga aplicada, o valor referente a uma deflexão de 5% do diâmetro do conduto conduz a uma carga de utilização de **1540kPa**.

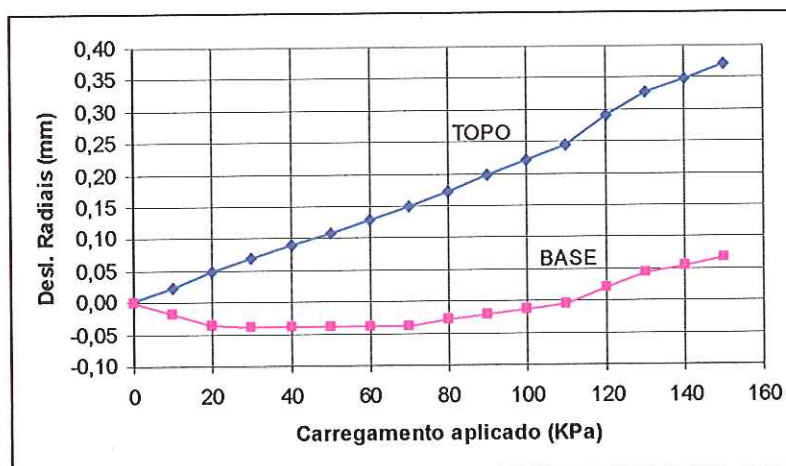


FIGURA 4.19 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de alumínio – corroído no topo)

4.2.3.5 – Ensaio 05

O ensaio 05 foi realizado também com tubo de alumínio corroído no ombro 1. Os deslocamentos radiais para todos os oito pontos do conduto são apresentados na Figura 4.20. O deslocamento vertical máximo foi observado no topo do conduto e atingiu 0,27mm sob a ação de uma sobrecarga de 150kPa. Este deslocamento acrescido do deslocamento vertical que ocorreu na base do duto representa uma deflexão de 0,45% do diâmetro do conduto. Considerando-se como deflexão máxima de utilização para condutos flexíveis 5% do diâmetro do conduto constata-se que o sistema está distante de uma possível ruptura por deformação excessiva.

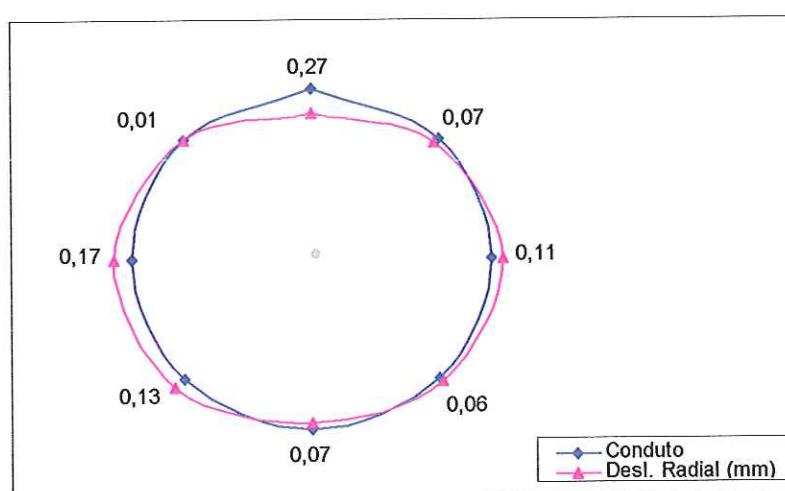


FIGURA 4.20 – Deslocamentos radiais para o conduto de alumínio corroído no O1

A Figura 4.21 apresenta a relação entre o carregamento aplicado e os deslocamentos radiais correspondentes, para os pontos do topo e da base do tubo de alumínio corroído no O1.

De forma similar, apenas para ilustração, admitindo-se um comportamento linear entre deflexões e os acréscimos da sobrecarga, o valor referente a uma deflexão de 5% do diâmetro do conduto conduz a carga de utilização de 1065kPa.

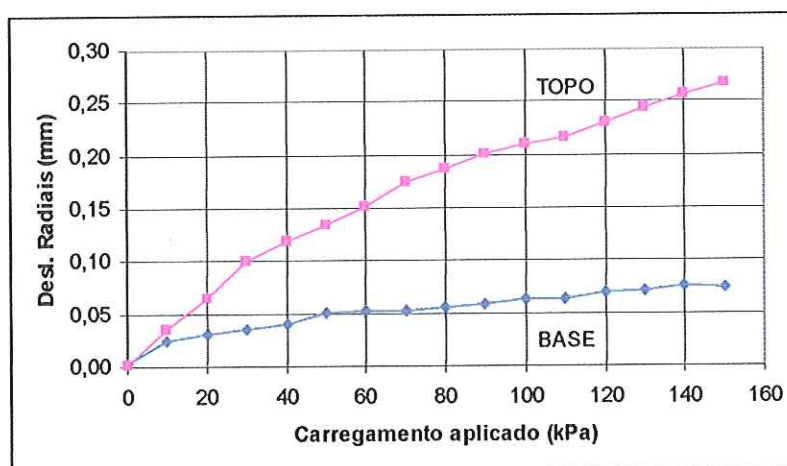


FIGURA 4.21 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de alumínio – corroído no O1)

4.2.3.6 – Ensaio 06

O ensaio 06 foi realizado com tubo de alumínio corroído na linha d'água 1. Os deslocamentos radiais para todos os oito pontos do conduto são apresentados na Figura 4.22. O deslocamento vertical máximo foi também observado no topo do conduto e atingiu 0,19mm, sob a ação de uma sobrecarga de 150kPa. Este deslocamento acrescido do deslocamento vertical que ocorreu na base do duto representa uma deflexão correspondente a 0,29% do diâmetro do conduto. Considerando-se como deflexão máxima de utilização para condutos flexíveis 5% do diâmetro do conduto percebe-se que este valor representa uma elevada segurança contra uma ruptura por deformação excessiva.

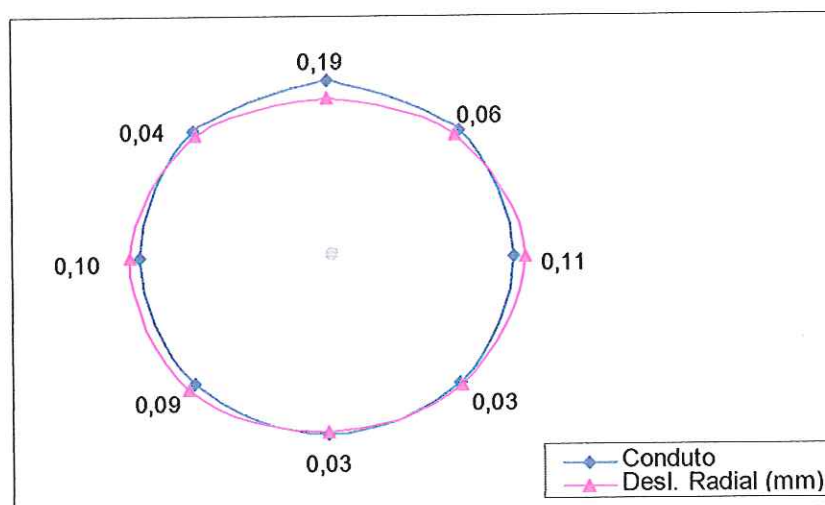


FIGURA 4.22 – Deslocamentos radiais para o conduto de alumínio corroído na LD1

A Figura 4.23 apresenta a relação entre o carregamento aplicado e os deslocamentos radiais correspondentes, para os pontos do topo e da base do tubo de alumínio corroído na LD1.

Apenas para ilustração, considerou-se um comportamento linear entre as deflexões do conduto e os acréscimos da sobrecarga, o valor referente a uma deflexão de 5% do diâmetro do tubo conduz a uma carga de utilização de 1560kPa.

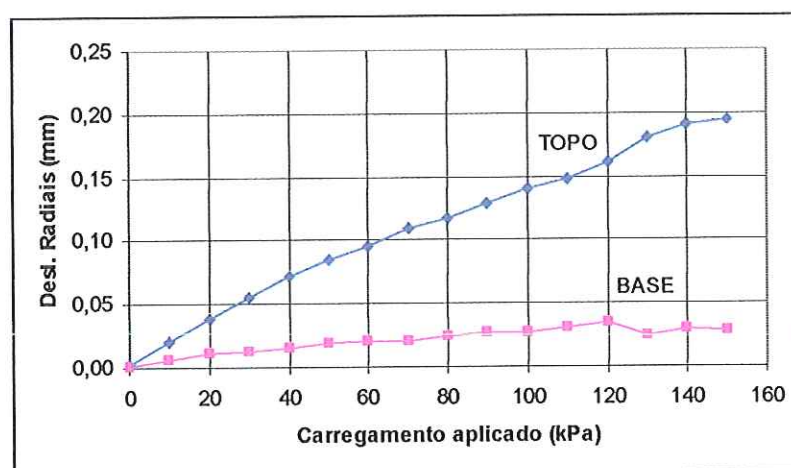


FIGURA 4.23 – Carregamento x Desl. Radiais (Tubo de alumínio – corroído na LD1)

Comparando-se os ensaios (04, 05 e 06), aos seus respectivos valores de carga máxima de utilização (1540kPa, 1065kPa e 1650kPa), percebe-se que o efeito da corrosão não teve grande interferência no sistema, de modo a provocar grandes variações nos resultados. Dentre as alterações verificadas, o efeito da corrosão foi mais desfavorável para o conduto corroído no ombro direito. A

Figura 4.24 mostra os deslocamentos observados nos três ensaios, para que, desta forma se possa analisar as distintas tendências que eles apresentam. Os ensaios 04 e 05 apresentaram deslocamentos bastante semelhantes, apesar das distribuições de tensões serem diferentes, significando que a um maior nível de corrosão, ou até mesmo a um maior nível de carregamento, os deslocamentos se diferenciariam. Para uma melhor visualização dos gráficos da Figura 4.24, a seguir, utilizou-se um fator de ampliação de 40 vezes para que as tendências dos deslocamentos pudessem ser mais bem percebidas.

O conduto corroído no topo apresenta os maiores deslocamentos, que ocorrem de forma simétrica, diferentemente dos outros dois ensaios, 05 e 06. Apesar da pequena diferença de comportamento dos deslocamentos entre as tubulações, observa-se que o conduto corroído no ombro direito mostra o maior deslocamento na linha d'água esquerda.

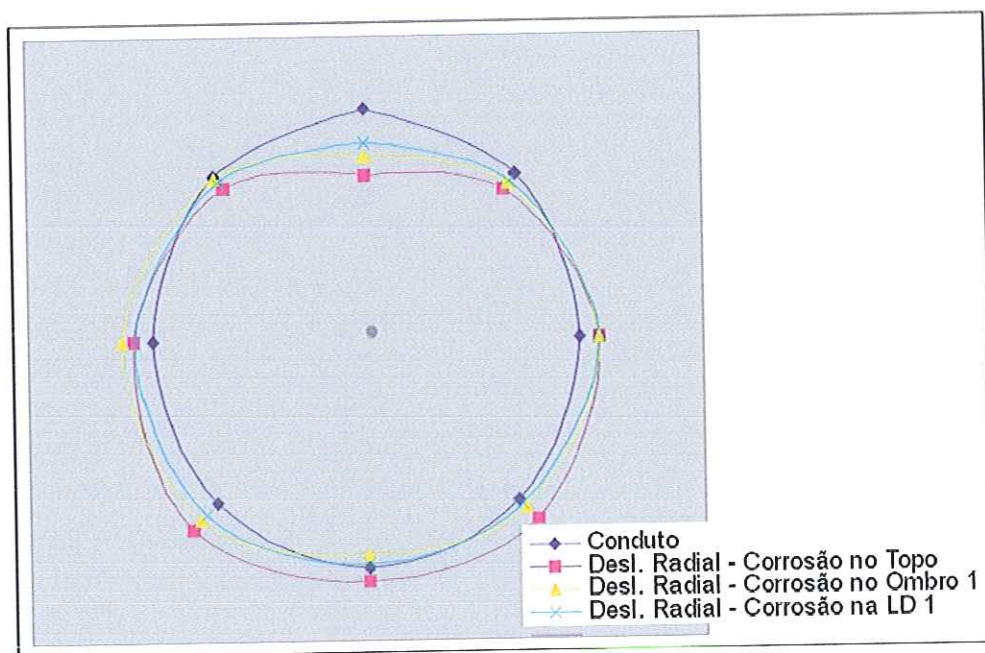


FIGURA 4.24 – Comparação dos deslocamentos radiais para o conduto de alumínio

4.3 – APRESENTAÇÃO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS

As simulações numéricas foram empregadas para a realização de análises paramétricas que pudessem permitir uma discussão mais ampla dos aspectos abordados nos ensaios laboratoriais. Os padrões de corrosão adotados nesta análise estão mostrados na Figura 3.17. A partir destes oito padrões de corrosão variou-se a rigidez (tubo de aço e tubo de alumínio) e o grau de corrosão do

conduto (45% e 70% de corrosão por pite) e também o módulo de elasticidade do solo. Com esta análise de flexibilidade buscou-se um entendimento da interação solo-conduto para um tubo danificado tentando-se identificar a parcela de importância de cada um dos parâmetros adotados.

As Tabelas 4.1 a 4.11 mostram como ocorre a variação do deslocamento horizontal nos pontos das linhas d'água do conduto (deslocamento horizontal com o módulo de elasticidade do solo). O valor apresentado foi o maior dentre os deslocamentos nos pontos das linhas d'água, para as situações em que houve assimetria de carregamento. Além disto, estas tabelas também mostram a variação do deslocamento vertical no topo da tubulação (Desl.Vert.) em função do módulo de elasticidade do solo (E). As Tabelas 4.1 a 4.6, além de relacionarem o módulo (E) aos deslocamentos horizontal e vertical, também avaliam o módulo (E) e o grau de corrosão. Os resultados obtidos mostram que a diferença no grau de corrosão (de 45% para 70%) tem maior influência no comportamento do sistema com elevada rigidez. No entanto, devido à pequena diferença nos valores dos deslocamentos para cada um dos níveis de corrosão, os resultados apresentados nas Tabelas 4.7 a 4.11 serão analisados apenas para o nível de 70% de corrosão.

TABELA 4.1 – Tubo de aço corroído no topo

E	Nível de corrosão - 45%		E	Nível de corrosão - 70%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)		Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
kPa			kPa		
40000	0,120	0,340	40000	0,130	0,356
50000	0,100	0,280	50000	0,104	0,286
60000	0,084	0,235	60000	0,087	0,239
70000	0,072	0,202	70000	0,075	0,205
80000	0,063	0,177	80000	0,065	0,180

TABELA 4.2 – Tubo de alumínio corroído no topo

E	Nível de corrosão - 45%		E	Nível de corrosão - 70%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)		Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
kPa			kPa		
40000	0,127	0,358	40000	0,129	0,363
50000	0,101	0,287	50000	0,103	0,291
60000	0,084	0,240	60000	0,085	0,244
70000	0,072	0,207	70000	0,072	0,210
80000	0,063	0,181	80000	0,062	0,184

TABELA 4.3 – Tubo de aço corroído no ombro 1

E	Nível de corrosão - 45%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,111	0,331
50000	0,091	0,269
60000	0,078	0,226
70000	0,067	0,195
80000	0,060	0,172

E	Nível de corrosão - 70%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,111	0,331
50000	0,091	0,269
60000	0,078	0,226
70000	0,067	0,195
80000	0,059	0,172

TABELA 4.4 – Tubo de alumínio corroído no ombro 1

E	Nível de corrosão - 45%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,120	0,350
50000	0,098	0,280
60000	0,082	0,240
70000	0,070	0,200
80000	0,061	0,180

E	Nível de corrosão - 70%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,120	0,340
50000	0,100	0,280
60000	0,082	0,240
70000	0,071	0,204
80000	0,061	0,179

TABELA 4.5 – Tubo de aço corroído na linha d'água 1

E	Nível de corrosão - 45%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,124	0,333
50000	0,101	0,269
60000	0,085	0,227
70000	0,073	0,195
80000	0,065	0,172

E	Nível de corrosão - 70%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,135	0,334
50000	0,109	0,270
60000	0,091	0,227
70000	0,078	0,196
80000	0,068	0,172

TABELA 4.6 – Tubo de alumínio corroído na linha d'água 1

E	Nível de corrosão - 45%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,130	0,351
50000	0,104	0,282
60000	0,087	0,236
70000	0,074	0,204
80000	0,064	0,179

E	Nível de corrosão - 70%	
	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,130	0,350
50000	0,110	0,280
60000	0,089	0,237
70000	0,075	0,204
80000	0,066	0,179

TABELA 4.7 – Tubo de aço e alumínio corroído no ombro 1 e linha d'água 2

Aço		
E	Nível de corrosão - 70%	
kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,135	0,334
50000	0,108	0,270
60000	0,091	0,227
70000	0,078	0,196
80000	0,068	0,172

Alumínio		
E	Nível de corrosão - 70%	
kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,135	0,351
50000	0,107	0,282
60000	0,088	0,237
70000	0,075	0,204
80000	0,065	0,179

TABELA 4.8 – Tubo de aço e alumínio corroído no topo e linha d'água 1

Aço		
E	Nível de corrosão - 70%	
kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,127	0,344
50000	0,106	0,281
60000	0,088	0,235
70000	0,075	0,202
80000	0,066	0,177

Alumínio		
E	Nível de corrosão - 70%	
kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,129	0,359
50000	0,102	0,289
60000	0,084	0,242
70000	0,072	0,209
80000	0,062	0,184

TABELA 4.9 – Tubo de aço e alumínio corroído no ombro 1 e linha d'água 1

Aço		
E	Nível de corrosão - 70%	
kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,132	0,353
50000	0,105	0,283
60000	0,087	0,236
70000	0,075	0,203
80000	0,065	0,177

Alumínio		
E	Nível de corrosão - 70%	
kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,134	0,351
50000	0,107	0,283
60000	0,088	0,237
70000	0,075	0,204
80000	0,065	0,179

TABELA 4.10 – Tubo de aço e alumínio corroído na linha d'água 1 e linha d'água 2

Aço			Alumínio		
E	Nível de corrosão - 70%		E	Nível de corrosão - 70%	
kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)	kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,131	0,358	40000	0,129	0,363
50000	0,105	0,287	50000	0,102	0,292
60000	0,088	0,239	60000	0,084	0,244
70000	0,075	0,205	70000	0,072	0,210
80000	0,065	0,180	80000	0,062	0,185

TABELA 4.11 – Tubo de aço e alumínio corroído no topo e ombro 1

Aço			Alumínio		
E	Nível de corrosão - 70%		E	Nível de corrosão - 70%	
kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)	kPa	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
40000	0,110	0,347	40000	0,124	0,364
50000	0,092	0,288	50000	0,100	0,291
60000	0,078	0,240	60000	0,083	0,243
70000	0,068	0,207	70000	0,071	0,209
80000	0,060	0,181	80000	0,062	0,183

As Tabelas 4.12 a 4.22 apresentam as comparações da influência da rigidez do conduto na análise de interação do sistema. As Tabelas 4.23 a 4.27 mostram a influência do padrão de corrosão.

Comparações entre os valores apresentados nas Tabelas (4.12 e 4.13), (4.14 e 4.15) e (4.16 e 4.17) permitem observar a influência do grau de corrosão sobre o comportamento geral do sistema solo-duto através das simulações numéricas.

TABELA 4.12 – Influência da rigidez – conduto corroído no topo – 45% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,120	0,127*	0,340	0,358*
50.000	0,100	0,101*	0,280	0,287*
60.000	0,084	0,084*	0,235	0,240*
70.000	0,072*	0,072*	0,202	0,207*
80.000	0,063*	0,063*	0,177	0,181*

* maiores valores

TABELA 4.13 – Influência da rigidez – conduto corroído no topo – 70% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,130*	0,129	0,356	0,363*
50.000	0,104*	0,103	0,286	0,291*
60.000	0,087*	0,085	0,239	0,244*
70.000	0,075*	0,072	0,205	0,210*
80.000	0,065*	0,062	0,180	0,184*

* maiores valores

A Tabela 4.14 comportou-se da mesma maneira que a Tabela 4.12. Avaliando a Tabela 4.15, a influência da rigidez, para o conduto corroído no O1, observa-se que este padrão de corrosão não provocou a mesma alteração observada na Tabela 4.13.

TABELA 4.14 – Influência da rigidez – conduto corroído no O1 – 45% de corrosão

Rigidez E (Kpa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,111	0,120*	0,331	0,350*
50.000	0,091	0,098*	0,269	0,280*
60.000	0,078	0,082*	0,226	0,240*
70.000	0,067	0,070*	0,195	0,200*
80.000	0,060	0,061*	0,172	0,180*

* maiores valores

TABELA 4.15 – Influência da rigidez – conduto corroído no O1 – 70% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,111	0,120*	0,331	0,340*
50.000	0,091	0,100*	0,269	0,280*
60.000	0,078	0,082*	0,226	0,240*
70.000	0,067	0,071*	0,195	0,204*
80.000	0,059	0,061*	0,172	0,179*

* maiores valores

As Tabelas 4.16 e 4.17 avaliam a influência da rigidez, para o conduto corroído na LD1. A Tabela 4.16 apresenta um único valor, para $E = 80.000\text{kPa}$, em que o deslocamento horizontal do tubo de aço é superior ao tubo de alumínio. A Tabela 4.17, por sua vez, resume condições de rigidez em que o tubo de alumínio apresenta os maiores valores de deslocamentos verticais e o tubo de aço os maiores valores de deslocamentos horizontais.

TABELA 4.16 – Influência da rigidez – conduto corroído na LD1 – 45% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,124	0,130*	0,333	0,351*
50.000	0,101	0,104*	0,269	0,282*
60.000	0,085	0,087*	0,227	0,236*
70.000	0,073	0,074*	0,195	0,204*
80.000	0,065*	0,064	0,172	0,179*

* maiores valores

TABELA 4.17 – Influência da rigidez – conduto corroído na LD1 – 70% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,135*	0,130	0,334	0,350*
50.000	0,109	0,110*	0,270	0,280*
60.000	0,091*	0,089	0,227	0,237*
70.000	0,078*	0,075	0,196	0,204*
80.000	0,068*	0,066	0,172	0,179*

* maiores valores

Nas Tabelas 4.18 e 4.19, apresentam-se os deslocamentos horizontais e verticais dos tubos corroídos no O1 e LD2. Nota-se que o tubo de alumínio apresentou os maiores deslocamentos verticais, mas não os maiores deslocamentos horizontais. Com exceção de um único ponto da Tabela 4.19, cujo valor de $E = 40.000\text{kPa}$, em que o deslocamento vertical do tubo de alumínio é levemente superior ao do tubo de aço, os maiores valores de deslocamento vertical ocorreram para este tipo de tubo. No entanto, é bom salientar que a diferença entre os deslocamentos horizontais é muito pequena, especialmente para elevados valores de E .

TABELA 4.18 – Influência da rigidez – conduto corroído no O1 e LD2 – 70% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,135*	0,135*	0,334	0,351*
50.000	0,108*	0,107	0,270	0,282*
60.000	0,091*	0,088	0,227	0,237*
70.000	0,078*	0,075	0,196	0,204*
80.000	0,068*	0,065	0,172	0,179*

* maiores valores

TABELA 4.19 – Influência da rigidez – conduto corroído no Topo e LD1 – 70% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,127	0,129*	0,344	0,359*
50.000	0,106*	0,102	0,281	0,289*
60.000	0,088*	0,084	0,235	0,242*
70.000	0,075*	0,072	0,202	0,209*
80.000	0,066*	0,062	0,177	0,184*

* maiores valores

Na Tabela 4.20, apresenta-se os deslocamentos horizontais e verticais do tubo corroído no O1 e LD1. Nota-se que o tubo de alumínio apresentou os maiores valores de deslocamento horizontal e vertical, com algumas exceções e que apesar disto, as deformações observadas são muito pequenas. Analisando a Tabela 4.21, que avalia a influência da rigidez, com o mesmo nível de corrosão da Tabela 4.20, e apresenta o conduto corroído na LD1 e LD2. Na Tabela 4.21 os valores de deslocamentos horizontais são maiores para o tubo de aço. A Tabela 4.22 também apresentou os maiores valores de deslocamento horizontal e vertical para o tubo de alumínio.

TABELA 4.20 – Influência da rigidez – conduto corroído no O1 e LD1 – 70% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,132	0,134*	0,353*	0,351
50.000	0,105	0,107*	0,283*	0,283*
60.000	0,087	0,088*	0,236	0,237*
70.000	0,075*	0,075*	0,203	0,204*
80.000	0,065*	0,065*	0,177	0,179*

* maiores valores

TABELA 4.21 – Influência da rigidez – conduto corroído na LD1 e LD2 – 70% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,131*	0,129	0,358	0,363*
50.000	0,105*	0,102	0,287	0,292*
60.000	0,088*	0,084	0,239	0,244*
70.000	0,075*	0,072	0,205	0,210*
80.000	0,065*	0,062	0,180	0,185*

* maiores valores

TABELA 4.22 – Influência da rigidez – conduto corroído no topo e O1 – 70% de corrosão

Rigidez E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)		Deslocamento Vertical (mm)	
	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio	Tubo de Aço	Tubo de Alumínio
40.000	0,110	0,124*	0,347	0,364*
50.000	0,092	0,100*	0,288	0,291*
60.000	0,078	0,083*	0,240	0,243*
70.000	0,068	0,071*	0,207	0,209*
80.000	0,060	0,062*	0,181	0,183*

* maiores valores

Nas Tabelas 4.23 a 4.28, fixou-se a rigidez do conduto e o nível de corrosão, para se avaliar qual será o padrão de corrosão mais desfavorável.

Nas Tabelas 4.23 e 4.24, confronta-se resultados obtidos para um nível de corrosão de 45%. Verifica-se que os maiores deslocamentos verticais ocorreram para o conduto corroído no topo, e os maiores valores de deslocamentos horizontais para o conduto corroído na LD1. No entanto, a diferença entre os deslocamentos observados é muito pequena, para todas as situações de localização de corrosão analisadas.

TABELA 4.23 – Influência do padrão de corrosão – tubo de aço – 45% de corrosão

Local corroído E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)			Deslocamento Vertical (mm)		
	Topo	O1	LD1	Topo	O1	LD1
40.000	0,120	0,111	0,124*	0,340*	0,331	0,333
50.000	0,100	0,091	0,101*	0,280*	0,269	0,269
60.000	0,084	0,078	0,085*	0,235*	0,226	0,227
70.000	0,072	0,067	0,073*	0,202*	0,195	0,195
80.000	0,063	0,060	0,065*	0,177*	0,172	0,172

* maiores valores

TABELA 4.24 – Influência do padrão de corrosão – tubo de alumínio – 45% de corrosão

Local corroído E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)			Deslocamento Vertical (mm)		
	Topo	O1	LD1	Topo	O1	LD1
40.000	0,127	0,120	0,130*	0,358*	0,350	0,351
50.000	0,101	0,098	0,104*	0,287*	0,280	0,282
60.000	0,084	0,082	0,087*	0,240*	0,240*	0,236
70.000	0,072	0,070	0,074*	0,207*	0,200	0,204
80.000	0,063	0,061	0,064*	0,181*	0,180	0,179

* maiores valores

As Tabelas 4.25 e 4.26, a seguir, apresentam os deslocamentos dos tubos de aço, corroídos individualmente no topo, ombro e linha d' água, e com corrosão simultânea em dois pontos em cinco combinações de localização.

O padrão de corrosão que apresentou os maiores deslocamentos horizontais foi o conduto corroído na LD1, juntamente com o padrão de conduto corroído simultaneamente no topo e na LD1. Entre todos os padrões de corrosão a diferença entre o maior e o menor valor de deslocamento horizontal é de 21,43%, Tabela 4.25. Para os deslocamentos verticais da tubulação de aço, o padrão de corrosão que apresentou os maiores valores foi duto corroído simultaneamente nas duas linhas d'água (LD1 e LD2), a diferença entre o maior e menor valor de deslocamento vertical é de 8,33%.

As Tabelas 4.27 e 4.28 apresentam similarmente os deslocamentos dos tubos de alumínio para pontos de corrosão isolados e em pares. O padrão de corrosão que apresentou os maiores valores de deslocamentos horizontais para este caso foi o conduto corroído na LD1 e os maiores deslocamentos verticais ocorrem para o conduto danificado ao mesmo tempo no O1 e na LD1. A diferença entre o maior e menor valor de deslocamento horizontal é de 7,69% e a diferença para os deslocamentos verticais é de 5,55%.

TABELA 4.25 – Influência do padrão de corrosão no deslocamento horizontal – tubo de aço – 70% de corrosão

Tubo de aço		Deslocamento Horizontal (mm)							
Local corroído		Topo	O1	LD1	O1 e LD2	Topo e LD1	O1 e LD1	LD1 e LD2	Topo e O1
E (kPa)									
40.000		0,130	0,111	0,135*	0,132	0,135*	0,131	0,110	0,127
50.000		0,104	0,091	0,109*	0,105	0,108	0,105	0,092	0,106
60.000		0,087	0,078	0,091*	0,087	0,091*	0,088	0,078	0,088
70.000		0,075	0,067	0,078*	0,075	0,078*	0,075	0,068	0,075
80.000		0,065	0,059	0,068*	0,065	0,068*	0,065	0,060	0,066

* maiores valores

TABELA 4.26 – Influência do padrão de corrosão no deslocamento vertical – tubo de aço – 70% de corrosão

		Deslocamento Vertical (mm)							
Local corroído		Topo	O1	LD1	O1 e LD2	Topo e LD1	O1 e LD1	LD1 e LD2	Topo e O1
E (kPa)									
40.000		0,356	0,331	0,334	0,353	0,334	0,358*	0,347	0,344
50.000		0,286	0,269	0,270	0,283	0,270	0,287	0,288*	0,281
60.000		0,239	0,226	0,227	0,236	0,227	0,239	0,241*	0,235
70.000		0,205	0,195	0,196	0,203	0,196	0,205	0,207*	0,202
80.000		0,180	0,172	0,172	0,177	0,172	0,180	0,181*	0,177

* maiores valores

TABELA 4.27 – Influência do padrão de corrosão no deslocamento horizontal – tubo de alumínio – 70% de corrosão

Local corroído E (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)							
	Topo	O1	LD1	O1 e LD2	Topo e LD1	O1 e LD1	LD1 e LD2	Topo e O1
40.000	0,129	0,120	0,130	0,134	0,135*	0,129	0,124	0,129
50.000	0,103	0,100	0,110*	0,107	0,107	0,102	0,100	0,102
60.000	0,085	0,082	0,089*	0,088	0,088	0,084	0,083	0,084
70.000	0,072	0,071	0,075*	0,075*	0,075*	0,072	0,071	0,072
80.000	0,062	0,061	0,066*	0,065	0,065	0,062	0,062	0,062

* maiores valores

TABELA 4.28 – Influência do padrão de corrosão no deslocamento vertical – tubo de alumínio – 70% de corrosão

Local corroído E (kPa)	Deslocamento Vertical (mm)							
	Topo	O1	LD1	O1 e LD2	Topo e LD1	O1 e LD1	LD1 e LD2	Topo e O1
40.000	0,363	0,340	0,350	0,351	0,351	0,363	0,364*	0,359
50.000	0,291	0,280	0,280	0,283	0,282	0,292*	0,291	0,289
60.000	0,244*	0,240	0,237	0,237	0,237	0,244*	0,243	0,242
70.000	0,210*	0,204	0,204	0,204	0,204	0,210*	0,209	0,209
80.000	0,184	0,179	0,179	0,179	0,179	0,185*	0,183	0,184

* maiores valores

Devido à pequena diferença nos valores dos deslocamentos encontrados para os parâmetros adotados, optou-se em adotar um sistema mais flexível, em que se manteve o diâmetro ($D=76\text{mm}$) e a espessura da parede ($t=1,2\text{mm}$), alterando-se apenas o módulo de elasticidade do conduto, a Tabela 4.29 mostra a influência do módulo de elasticidade do conduto.

TABELA 4.29 – Influência do módulo de elasticidade do conduto ($E= 30000\text{kPa}$)

Local da Corrosão	E kPa	Nível de corrosão - 45%		Nível de corrosão - 70%	
		Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)	Desl. Horiz. (mm)	Desl. Vert. (mm)
Topo	40000	0,383	0,831	0,472	0,872
Ombro	40000	0,319	0,799	0,330	0,804
Linha d'água	40000	0,321	0,798	0,336	0,803
O1 e LD2	40000	-	-	0,330	0,810
Topo e LD1	40000	-	-	0,481	0,910
O1 e LD1	40000	-	-	0,360	0,811
LD1 e LD2	40000	-	-	0,482	0,912
Topo e O1	40000	-	-	0,341	0,818

Avaliando a diferença entre os deslocamentos horizontais para os três primeiros padrões corrosivos dos níveis 45% e 70% de corrosão verifica-se uma diferença nos valores de 18,86%, 3,33% e 4,46% de acordo com a Tabela 4.29. Para os deslocamentos verticais esta diferença diminui para 4,70%, 0,62% e 0,62%. Estas diferenças para os modelos anteriores, de maior rigidez, foram praticamente imperceptíveis.

Considerando-se cada nível de corrosão isoladamente, verifica-se, para o nível de 45% de corrosão, que a diferença entre o maior e menor valor do deslocamento horizontal é de 16,71%, para o deslocamento vertical a diferença é de 3,97%. Para o nível de 70% de corrosão, a diferença entre o maior e o menor valor do deslocamento horizontal é de 31,53%, para o deslocamento vertical a diferença é de 11,95%.

Para os modelos da Tabela 4.29, o conduto corroído na LD1 e LD2 simultaneamente foi o padrão que apresentou os maiores deslocamentos verticais e horizontais.

A discussão efetiva dos resultados apresentados, referentes aos deslocamentos do tubo e a tensão de compressão nas paredes do conduto, como também as análises dos resultados das simulações numéricas são discutidas a seguir.

4.4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.4.1 – Introdução

Para a avaliação da localização da corrosão mais danosa à estrutura, foram considerados os deslocamentos e a possibilidade de ocorrência de ruptura por esmagamento das paredes do conduto. A redistribuição de tensões apresentada pode ser entendida como uma consequência destes dois fatores e pode atuar provocando deslocamentos laterais do duto. No texto seguinte apresentam-se discussões dos resultados obtidos no programa experimental e através das simulações numéricas.

4.4.2 – Avaliação dos Deslocamentos

Tendo-se como base os deslocamentos observados, a localização da corrosão mais danosa à estrutura não foi a mesma para os ensaios (01, 02 e 03 – tubo de aço) e (04, 05 e 06 – tubo de alumínio), Tabela 4.30. No primeiro grupo, a situação mais desfavorável foi para o conduto corroído no topo, atingindo uma carga de utilização de 430kPa. Este valor representa apenas 41,75% do maior valor de carga de utilização alcançado, que se deu para o conduto corroído no ombro 1.

Analisando o segundo grupo de ensaios (04, 05 e 06), para o tubo de alumínio, a situação mais desfavorável foi observada para a tubulação corroída no ombro 1, atingindo uma carga de utilização igual a 1065kPa. Este valor representa 68,27% do maior valor atingido. Desta forma, percebe-se a pouca influência do efeito da corrosão para o tubo de alumínio utilizado, embora o nível de corrosão atingisse 45% de sua espessura na localização do pite.

O comportamento distinto observado entre os dois tipos de materiais pode ser analisado em função da diferença tanto da rigidez do duto, quanto no nível de corrosão que lhes foi imposto. Percebe-se então, a importância do nível de corrosão, já que o sistema mais rígido mostra maior influência da corrosão no seu comportamento.

4.4.3 – Tensão de Compressão nas Paredes do Conduto

Quanto à tensão de compressão nas paredes do conduto, apesar da improvável ruptura devido à grande rigidez dos condutos avaliados, fica evidente a alteração dos valores devido à corrosão localizada.

A Tabela 4.30 mostra os valores máximos de tensão de compressão e a localização de sua ocorrência obtidos em cada ensaio. Constata-se que a máxima tensão de compressão desenvolvida no grupo de ensaios (01, 02 e 03) corresponde a $57,2\% \sigma_y$, em que σ_y é a tensão de escoamento do aço, tomada igual a 250MPa. No grupo de ensaios (04, 05 e 06), a máxima tensão de compressão desenvolvida nas paredes do conduto foi de $69,21\% \sigma'_y$, em que σ'_y é a tensão de escoamento do alumínio, tomada igual a 80MPa. Em relação aos condutos de alumínio, em que se tem um nível de corrosão de 45% para os pites, os pontos danificados não coincidem com a localização da máxima tensão de compressão nas paredes, novamente confirmando a baixa interferência do efeito da corrosão para este caso.

TABELA 4.30 – Máxima tensão de compressão nas paredes do conduto

Ensaio	Máxima tensão (MPa)	Localização
01	80,13	Topo
02	142,90	Ombro 1
03	22,30	Linha d'água 1
04	46,63	Base
05	55,37	Topo
06	32,13	Base

4.4.4 – Análises Numéricas

Os resultados das simulações numéricas permitem constatar os comportamentos apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.11:

- Comparações entre os modelos (1 e 7), (2 e 8), (3 e 9), (4 e 15), (5 e 16) e (6 e 17), da Tabela 3.3, permitem averiguar a influência do grau de corrosão na capacidade de carga do tubo em cada padrão adotado;
- Comparações entre os modelos (1 e 4), (2 e 5), (3 e 6), (7 e 15), (8 e 16), (9 e 17), (10 e 18), (11 e 19), (12 e 20), (13 e 21) e (14 e 22), cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.11 foram utilizados para análises da influência da rigidez do conduto nas deflexões e nas tensões sofridas quando o duto apresenta diferentes padrões de corrosão;

- c) Comparações entre os grupos (1, 2 e 3), (4, 5 e 6), (7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14) e (15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22) permitem verificar quais os padrões de corrosão que propiciam as maiores perdas de capacidade de carga e os maiores níveis de deflexão do conduto.

Avaliando a influência do grau de corrosão para os tubos de aço e alumínio, corroídos no topo, verificou-se que com o aumento no nível de corrosão, a capacidade de carga do conduto diminui. Já para o caso dos condutos (aço e alumínio) corroídos no ombro I não foi possível verificar a influência do nível de corrosão na capacidade remanescente. Para os dutos corroídos na LD1, o aumento do grau de corrosão apesar de não alterar os valores dos deslocamentos verticais, provocou um pequeno acréscimo nos deslocamentos horizontais dos condutos.

Em relação à influência da rigidez do conduto as seguintes observações podem ser citadas:

- a) Entre os condutos de aço e alumínio, corroídos no topo, com um nível de 45% de corrosão, o conduto de alumínio apresentou os maiores valores de deslocamentos verticais e horizontais. No entanto, esta avaliação deve levar em consideração a diferença de rigidez do conduto. Se isto é feito, verifica-se que os condutos de aço apresentam relativamente os deslocamentos mais danosos à estrutura. O tubo de alumínio apresentou um deslocamento vertical de 0,358mm, este valor representa uma deflexão correspondente a 0,47% do diâmetro do conduto. Considerando-se como deflexão máxima de utilização para dutos flexíveis 5% do diâmetro do conduto, percebe-se que existe uma grande segurança neste caso. O tubo de aço apresentou um deslocamento vertical de 0,340mm, que representa uma deflexão correspondente a 0,45% do diâmetro do conduto. Considerando-se como deflexão máxima de utilização para tubos rígidos 2% do diâmetro do conduto, neste caso o tubo apresenta uma menor segurança;
- b) Para os condutos de aço e alumínio, corroídos no topo, com um nível de 70% de corrosão, o tubo de alumínio apresentou um deslocamento vertical de 0,363mm. Este deslocamento representa uma deflexão correspondente a 0,48% do diâmetro do conduto. Igualmente a análise efetuada no item a) o tubo de aço mostra-se mais comprometido. Nele o deslocamento vertical atingiu 0,356mm, que representa uma deflexão correspondente 0,47% do seu diâmetro. Em relação ao grau de corrosão, o tubo de aço apresentou maiores deslocamentos horizontais em relação ao tubo de

alumínio, o que mostra que o tubo de aço é mais afetado pelo aumento do nível de corrosão;

- c) Para os condutos de aço e alumínio, corroídos no O1, com um nível de corrosão de 45%, os tubos de aço e alumínio apresentaram, respectivamente, deslocamentos verticais iguais a 0,331mm e 0,350mm, representam deflexões correspondente a 0,43% e 0,46% do diâmetro do conduto. O tubo de aço é também o mais afetado por esta localização do processo corrosivo;
- d) Situação semelhante ao item c), ocorre com os condutos de aço e alumínio quando corroídos no O1, com um nível de corrosão de 70%. Os deslocamentos verticais observados são praticamente iguais, e atingem respectivamente, a 0,331mm e 0,340mm. Isto representa uma deflexão correspondente a 0,43% e 0,45%;
- e) Os condutos de aço e alumínio, corroídos na LD1, apresentaram deslocamentos verticais que representam deflexões correspondentes a 0,44% e 0,46% do diâmetro do conduto. O mesmo padrão corrosivo, para um nível de 70% de corrosão, mostrou iguais valores de deslocamentos verticais. Porém, os deslocamentos horizontais do tubo de aço são maiores do que os do tubo de alumínio para este último caso, ou seja, 70% de corrosão. Novamente percebe-se a influência do grau de corrosão, principalmente para o conduto de aço;
- f) Os tubos de aço e alumínio, corroídos simultaneamente no O1 e LD2, com um nível de corrosão de 70%, apresentaram deslocamentos verticais que representam deflexões correspondentes a 0,44% e 0,46% do diâmetro do conduto. Similarmente à análise apresentada no item a), o tubo de aço é o mais afetado por este padrão de corrosão;
- g) Os tubos de aço e alumínio, corroídos no topo e LD1, com um nível de corrosão de 70%, apresentaram deslocamentos verticais que representam deflexões correspondentes a 0,45% e 0,47% do diâmetro do conduto. O tubo de aço é mais uma vez o mais afetado pela corrosão;
- h) Os dutos de aço e alumínio, corroídos simultaneamente no O1 e LD1, com um nível de 70% de corrosão, apresentaram deslocamentos verticais que representam deflexões correspondentes a 0,46% do diâmetro do conduto para os dois casos. O tubo de aço ainda é desfavorável;
- i) Avaliando a influência da rigidez entre os condutos de aço e alumínio, corroídos simultaneamente na LD1 e LD2, com um nível de 70% de corrosão. Tem-se que os deslocamentos verticais apresentados respectivamente pelos dutos de aço e alumínio representam deflexões correspondentes a 0,47% e 0,48% do diâmetro do conduto;

- j) Para os condutos de aço e alumínio, corroídos simultaneamente no topo e O1, nível de corrosão de 70%, os deslocamentos apresentados pelos condutos de aço e alumínio representam deflexões correspondentes a 0,46% e 0,48% do diâmetro do conduto.

Em todos os casos acima tratados, com o objetivo de se avaliar a influência da rigidez do conduto nas deflexões sofridas quando o mesmo apresenta-se danificado pelo efeito da corrosão, constatou-se que um conduto de maior rigidez (tubo de aço) é mais atingido pelo efeito da corrosão.

Um outro fator importante, que também deve ser observado nas análises do comportamento do conduto danificado, é o módulo de elasticidade do solo. Nos itens a) a j), referentes às Tabelas 4.12 a 4.22, constatou-se que o acréscimo do módulo de elasticidade do solo de $E=40.000\text{kPa}$ para $E=80.000\text{kPa}$, proporcionou um decréscimo de 50% nas deflexões dos condutos, igualmente para o aço e alumínio. Na medida em que o módulo de elasticidade do solo aumenta, os valores dos deslocamentos verticais para o tubo de aço e de alumínio tendem a valores mais próximos.

Verificando-se quais os padrões corrosivos que propiciam as maiores perdas de capacidade de carga para o conduto, constatou-se que:

- a) Em relação ao tubo de aço, com um nível de corrosão de 45% (Tabela 4.23), o padrão corrosivo mais desfavorável foi verificado para o conduto corroído no topo;
- b) Para o tubo de alumínio, com 45% de corrosão, o padrão corrosivo de conduto corroído no topo foi observado como o mais desfavorável;
- c) O tubo de aço, com 70% de corrosão, foi avaliado em oito padrões corrosivos distintos (de acordo com a Figura 3.17). Dentre estes padrões o modelo mais desfavorável, para o módulo de elasticidade do solo igual a 40.000kPa , foi o do duto corroído no O1 e LD1, simultaneamente. O conduto corroído no topo apresentou valor praticamente igual. Entre $E=50.000\text{kPa}$ e $E=80.000\text{kPa}$, os modelos, conduto corroído no topo, no (O1 e LD1) e na (LD1 e LD2) apresentaram valores praticamente iguais para os deslocamentos verticais;
- d) O tubo de alumínio, com 70% de corrosão, também foi avaliado em oito padrões de corrosão, o mais desfavorável deles, considerando o módulo do solo igual a 40.000kPa , foi o conduto corroído na (LD1 e LD2), de $E=50.000\text{kPa}$ a $E=80.000\text{kPa}$, os valores dos deslocamentos verticais apresentaram valores praticamente iguais para os modelos, tubo corroído no topo, no (O1 e LD1) e na (LD1 e LD2).

CAPÍTULO 05

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados deste trabalho permitem concluir que:

- a) O efeito da corrosão, em conjunto com as características do solo, a geometria e a rigidez do sistema, influencia a carga que atinge o sistema, provocando uma redistribuição de tensões;
- b) Logo, o comportamento de uma tubulação enterrada, desgastada devido a um processo corrosivo, deve ser avaliado levando-se em consideração o nível de corrosão e a localização do dano, para que desta forma se possa obter a resistência remanescente da tubulação;
- c) A corrosão instalada em uma tubulação enterrada influencia na rigidez do sistema;
- d) Além do mais, o conduto corroído desencadeia um carregamento assimétrico, informação importante a ser considerada, de modo a prevenir o deslocamento lateral do conduto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGOOD, J. R. (1971). Structures en soil under high loads. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, v. 97, n. SM3, mar.
- ALGOOD, J. R.; TAKAHASHI, S. K. (1972). Balanced design and finite element analysis of culverts. Highway Research Record, HRB, n. 412, p. 54-56.
- ALMEIDA JR., J. R.; CAMARGO JR., J. B. (2002). Principais aspectos da segurança em sistemas utilizados em áreas críticas. FDTE, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ANDRADE, C. A; MAGALHÃES, F. C. M.; JUNIOR, H. A. S.; FEDEL, E. R.; BEZERRA, M. C. M.; FREITAS, N. D.; PENNA, M. O. (1999). Hibernação de oleoduto com desincrustante e bactericida. IN: Seminário Brasileiro de Dutos, 2, Rio de Janeiro, 1999. Anais. IBP.
- AWWA (1982). Steel pipe design and installation. Manual n. M11.
- BEDNAR, L. (1989). Durability of plain galvanized steel drainage pipe en South America: criteria for selection. Transportation Research Record, n. 1231, p. 80-87.
- BELLAIR, P. J.; EWING, J. P. (1984). Metal loss rates of uncoated steel and aluminum culverts in New York. Research Report 115. New York State Dept. of Transportation, Gainesville.
- BUCCI, J. E.; BUCKLEY, P. F. (2001). Modeling the degradation of unexploded ordnance (UXO) and its use as a tool in the development of risk assessments.
- BUENO, B. S. (1979).
- BUENO, B. S. (1987). The behavior of thin walled pipes in trenches. PhD – University of Leeds, U.K., 337p.

- BUENO, B. S. (2003). Aspectos geotécnicos de tubulações enterradas (NO PRELO).
- BULSON, P. S. (1985). Buried Structures – static and dynamic strength. Chapman and Hall.
- BURNS, J. Q.; RICHARD, R. M. (1964). Attenuation of stresses for buried cylinders, IN: Symp. On Soil-structure interaction, Tucson, Arizona. Proceedings.
- BURNS, J. Q. (1965). An analysis of circular cylindrical shells embedded in elastic media. PhD Thesis, University of Arizona, Tucson.
- CALIFORNIA SOIL NAIL COMMITTEE (2002).
<http://www.contechsystems.com/SoilNComm/Cdoes/CorrosionInformation.htm>
- C&T BRASIL (2002). Programa do governo estadual de São Paulo para redução das emissões fugitivas de metano na distribuição do gás natural em São Paulo, Conveção sobre a mudança do clima.
http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/fugitiv03.htm
- CHAMBERS, R. F., McGRATH, T. J., HEGER, F. J. (1980). Plastic pipe for subsurface drainage of transportation facilities. NCHRP Report 225, Transportation Research Board, Washington, D. C., Oct., pp. 122-140.
- CONCAWE (1997). 25 years of CONCAWE pipeline incident statistics.
<http://www.concawe.be/HTML/VOLUME62/statistics.htm>
- CORROSION DOCTORS SITE (2002).
<http://www.corrosion-doctors.org/soilCorrosion/Severity.htm>
- COSTA, Y. D. J. (2001). Comportamento longitudinal de condutos enterrados. Revisão Bibliográfica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DUANE, J.; ROBISON, R.; MOORE, C. A. (1986). Culvert-soil interaction finite element analysis. Journal of Transportation Engineering, v. 112, n. 3, May, p. 250-262.
- DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. (1991). Proteção catódica – técnica de combate à corrosão. MkKlausen. Rio de Janeiro.



- FERREIRA, J. (1999). Avaliação dos problemas ambientais relacionados aos aspectos geológicos-geotécnicos de dutos enterrados, poliduto OSBRA: trecho Porto Ferreira-Ribeirão Preto. São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FERREIRA, M.; SILVA, R. L. G.; CAMARGO JR. S. S. (1999). Recobrimento interno de dutos para minimização de depósitos, fricção e corrosão. IN: Seminário Brasileiro de Dutos, 2, Rio de Janeiro, 1999. Anais. IBP.
- FURUKAWA, M.C; ADAMOWSKI, J. C.; CAMERINI, C. S. (1999). IN: Seminário Brasileiro de Dutos, 2, Rio de Janeiro, 1999. Anais. IBP.
- GENTIL, V. (1982). Corrosão. 2ª ed. Guanabara Dois. Rio de Janeiro.
- GODDARD, J. B. (1994). Plastic Pipe Design. Technical Report 4.103.
<http://www.ADS.pipe.com>
- GUMBEL, J. E.; O'REILLY, M. P.; LAKE, L. M.; CARDER, D. R. (1982). The development of a new design method for buried flexible pipes. IN: Europipe'82 Conference, Base, Switzerland, Paper 8.
- HANDY, R. L. (1985). The arch in soil arching. Journal of Geotechnical Engineering, v. 11, n. 3, Mar, p. 302-318.
- HARTLEY, J. D.; DUNCAN, J. M. (1987). E' and its variation with depth. Journal of Transportation Engineering, v. 113, n. 5, p. 538-553.
- HOWARD, A. K. (1972). Laboratory load tests on buried flexible pipe. Journal American Water Works Association, part 1, Oct, p. 655-662.
- HOWARD, A. K. (1977). Modulus of soil reaction values for buried flexible pipeline. Journal of Geotechnical Engineering Division, v. 103, n. GT1, Jan, p. 33-43.
- JENKINS, C. F. (1997). Common causes of material degradation in buried piping. Pressure Vessel and Piping Codes and Standards, PVP-Vol. 653, ASME 1997.

- JEYAPALAN, J. K.; ETHIJAJEEVAKARUNA, S. W.; BOLDON, B. A. (1987). Behavior and design of buried very flexible plastic pipes. *Journal of Transportation Engineering*, v. 113, n. 6, Nov, p. 642-657.
- KRIZEK, R. J., *et al.* (1971). Structural analysis and design of pipe culverts. Report No. 116, National Cooperative Highway Research Program, Highway Research Board, Washington, D. C., 155 pp.
- LOPES, B. O. (2000). Capacidade de carga em tubulação enterrada sujeita à corrosão. Relatório Final de Iniciação Científica FAPESP. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MEYERHOF, G. G. (1966). Composite design of shallow-buried steel structures. Canadian Good Roads Association, Annual Convention.
- McGRATH, T. J. (1999). Calculating loads on buried culverts based on pipe hoop stiffness. / Submetido ao Transportation Research Board Committee para apresentação no encontro annual de 1999/.
- McKELVEY III, J. A. (1994). The anatomy of soil arching. *Geotestiles and Geomembranes*, v. 13, p. 317-329.
- NIELSON, F. D. (1967). Modulus of soil reaction as determined from triaxial shear test. *Highway Research Record*, No. 185, Washington, D. C., pp. 80-90.
- PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. (1994). Aços inoxidáveis austeníticos – microestrutura e propriedades. Hemus Editora. São Paulo.
- PARMELEE, R.A.; COROTIS, R.B. (1972). The Iowa deflection formula: an appraisal. *Highw. Res. Rec.*, no. 413.
- PAYER & UGIANSKY, 1996.
- PETROBRAS (2002). <http://www.petrobras.br>
- PREVOST, R. C.; KIENOW, K. K. (1994). Basics of flexible pipe structural design. *Journal of Transportation Engineering*, v. 120, p. 652-671.

- ROY, S.; GRIGRY, S.; SMITH, M.; KANNINEN, M. F.; ANDERSON, M. (1997). Numerical simulations of full-scale corroded pipe tests with combined loading. *Journal of Pressure Vessel Technology*, v. 119, Nov, 1997.
- SHAFER, G. E. (1948). Discussion: Underground Conduits – An Appraisal of Modern Research. *Trans., ASCE*, Vol. 113, pp. 354-363.
- SILVEIRA, K. D. (2001). Análise paramétrica de um sistema múltiplo de estruturas flexíveis enterradas de grande diâmetro. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SILVEIRA, K. D.; BUENO, B. S. (1999). Estudo numérico de tubos enterrados sob carregamento assimétrico. IN: *Seminário Brasileiro de Dutos, 2*, Rio de Janeiro, 1999. Anais. IBP.
- SMITH, D. J.; SMITHEE, J. (1981). Survey of ARMCO corrugated steel pipe culverts under the Lamco Railroad, Liberia. ARMCO European Division, Newport, England, Jan.
- SOUZA, H. A.; FERREIRA, P. A. (1999). Gerenciamento da corrosão interna em dutos da área de exploração e produção da PETROBRÁS. IN: *Seminário Brasileiro de Dutos, 2*, Rio de Janeiro, 1999. Anais. IBP.
- SPANGLER, M. G.; HANDY, R. L. (1917). *Soil Engineering* 4th. Edition. Harper & Row, Publishers, New York.
- SPANGLER, M. G. (1941). The structural design of flexible pipe culverts. *Bul. 153*. Iowa Eng. Expt. Station.
- SPELLER, F. N. (1951). *Corrosion: Causes and prevention*. 3th Edition. Mcraw-Hill. New York, N.Y.
- SUMMERSON, T. J. (1984). Corrosion resistance of aluminum drainage products: the first 25 years. *Transportation Research Record*, n. 1001, p. 77-87.
- TAVES, J. M. V. (1999). A evolução em projetos de revestimento externo de dutos. IN: *Seminário Brasileiro de Dutos, 2*, Rio de Janeiro, 1999. Anais. IBP.

- TERZAGHI, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Geotechnique*, London, Vol 5, No. 4, p. 297-326.
- TERZAGHI, K. (1984). Stress distribution in dry and saturated sand above a yielding trapdoor. IN: *International Congress on Soil Mechanics*, 1. Cambridge, Ma. Proceedings. Vol. 1, p. 307.
- TIMONSHEKO, S. P.; GERE, J. M. (1961). *Theory of elastic stability*. McGraw-Hill, New York, 292 p.
- US ARMY CORPS OF ENG. (1997). Department of the Army. Engineering and Design –conduits, culverts and pipes. Manual n. 110-2-2902. Washington, DC.
- VIANA, P. M. F. (1999). O efeito da interação solo-conduto-geossintético na redução de esforços sobre tubulações enterradas. *Revisão Bibliográfica*. Escola de Engenharia de São Carlos, universidade de São Paulo.
- VIANA, P. M.; BUENO, B. S. (1999). Aplicabilidade do método gráfico de Southwell para prever a carga de ruptura em tubulações enterradas. IN: *Seminário Brasileiro de Dutos*, 2, Rio de Janeiro, 1999. Anais. IBP.
- WATKINS, R. K. (1959). Influence of soil characteristics on the deformation of embedded flexible pipe culverts. *Bulletin 223*, Highway Research Board, Washington, D. C., pp. 14-24.
- WATKINS, R. K. (1966). Structural design of buried circular conduits. *Highway Research Record*, HRB, n. 145, p. 1-16.
- WATKINS, R. K. (1975). Buried structures. IN: WINTERKORN, H. F.; FANG, H. Y., eds. *Foundation Engineering Handbook*. New York, Van Nostrand Reinhold. Cap. 23, p. 649-672.
- WATKINS, R. K.; ANDERSON, L. R. (1999). *Structural mechanics of buried pipes*. CRC Press.
- WATKINS, R. K.; NIELSON, F. D. (1964). Development and use of the modpares device. *Journal of the Pipeline Division, ASCE*, Vol. 90, No 1, Jan, pp. 155-178.

WATKINS, R. K.; SPANGLER, M. G. (1958). "Some characteristics of the modulus of passive resistance of soil – a study in similitude." Highway Research Board Proc., 37, 576-583.

WILLIAMSON & WILMOTT (1999).

WHITE, H. L.; LAYER, J. P. (1960). The corrugated metal conduit as a compression ring. Highway Research Record, HRB, n. 39, p. 389-397.

WOLFE, V. D.; MACNAB, S. (1976). The corrugated metal pipe comparison study. Report 76-3. Oregon Dept. of Transportation, Salem, July.

YOUNG, O. C.; TROTT, J.J. (1984). Buried rigid pipes – structural design of pipelines. Elsevier Science Publishers. London and New York.