

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO
DE DEFORMAÇÃO EM MODELOS FÍSICOS DE DUTOS
ENTERRADOS**

ALINE DIAS PINHEIRO

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO - UENF**

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

SETEMBRO - 2015

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO EM MODELOS FÍSICOS DE DUTOS ENTERRADOS

ALINE DIAS PINHEIRO

"Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção de
título de Mestre em Engenharia Civil".

Orientador: Prof. Fernando Saboya Júnior

Co-orientador: Prof. Sérgio Tibana

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

SETEMBRO - 2015

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO EM MODELOS FÍSICOS DE DUTOS ENTERRADOS

ALINE DIAS PINHEIRO

"Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção de
título de Mestre em Engenharia Civil".

Aprovada em 08 de setembro de 2015.

Comissão Examinadora:

Prof. Edmundo Rogério Esquivel PhD. – USP, São Carlos

Prof. Aldo Durand Farfán D.Sc. – UENF

Prof. Rodrigo Martins Reis D.Sc. – UENF

Prof. Sérgio Tibana D.Sc. – Co-orientador, UENF

Prof. Fernando Saboya Júnior D.Sc. – Orientador, UENF

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado todas as condições para que esse trabalho pudesse ser realizado e completado, principalmente por ter me dado a maturidade necessária.

À minha família por toda a ajuda, cada um da sua forma, cada um dentro de suas possibilidades, mas todos torcendo pelo meu sucesso nessa jornada.

Aos meus professores, por terem me incentivado em suas disciplinas, em especial aos meus orientadores por terem confiado em mim em todos os momentos.

Ao Euclides Domingues de Moura Neto, da PUC-RJ, pela imensa ajuda durante o projeto e montagem do equipamento.

A todos os técnicos, estagiários e bolsistas que me ajudaram em diversos momentos desse trabalho e foram imprescindíveis para a realização deste.

Aos meus amigos da UENF, do IFF, da dança e da vida pelas ajudas, pelos sorrisos, pelos abraços, pelas brincadeiras que foram tão importantes durante todo esse desgastante processo.

Aos meus alunos que sempre me instigam a progredir como professora.

A conclusão desse trabalho só foi possível graças à participação direta e indireta de cada um de vocês.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Estrutura da Dissertação.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Dutos Enterrados	4
2.1.1. Rigidez do duto.....	5
2.1.2. Métodos de instalação dos dutos	6
2.1.3. Solicitações estáticas	8
2.1.3.1. Marston e Anderson-Spangler.....	10
2.1.4. Solicitações dinâmicas	15
2.1.5. Solicitação de Cálculo	17
2.1.6. Deformação/deflexão em dutos flexíveis	19
3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	22
3.1. <i>Clip Gauge</i> – Transdutor de Deslocamentos	22
3.2. Caracterização do Solo	26
3.3. Ensaio de carregamento estático a 1g	27
3.3.1. Instrumentação e Aquisição de Dados	29
3.3.2. Instrumentação do Duto	34
3.3.3. Preparação da Amostra.....	36
3.3.4. Apresentação dos Ensaio.....	41
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
4.1. Resultados da instrumentação externa ao duto (Rosetas).....	42
4.1.1. Densidade Relativa da Base de 23% (DR 23%).....	43
4.1.2. Densidade Relativa da Base de 40% (DR 40%).....	45
4.1.3. Densidade Relativa da Base de 70% (DR 70%).....	48
4.1.4. Densidade Relativa da Base de 90% (DR 90%).....	50
4.2. Resultados do <i>Clip Gauge</i>	53

4.2.1.	Densidade Relativa da Base de 23% (DR 23%).....	53
4.2.2.	Densidade Relativa da Base de 40% (DR 40%).....	55
4.2.3.	Densidade Relativa da Base de 70% (DR 70%).....	57
4.2.4.	Densidade Relativa da Base de 90% (DR 90%).....	59
4.3.	Comparativos	61
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	65
5.1.	Conclusões	65
5.2.	Sugestões para pesquisas futuras	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento que auxiliasse na obtenção direta das deformações/deflexões em modelos físicos de dutos enterrados. As teorias de dimensionamento de dutos enterrados são consideradas antigas e por vezes conservadoras. Além disso, o cálculo das deformações/deflexões é realizado de forma complexa, muitas vezes através de retroanálises. Dessa forma, poder realizar essas medições de forma direta trará grandes ganhos aos estudos dos dutos enterrados. Os objetivos secundários são direcionados a avaliar o funcionamento do equipamento desenvolvido frente à interação solo x duto. Os ensaios foram realizados em escala reduzida, a 1g, simulando aplicação de carga estática através de sapata de seção retangular. Foram realizados quatro (4) ensaios variando a densidade relativa do solo da base de apoio do duto. Os resultados mostraram que a instrumentação desenvolvida é capaz de auxiliar a medição direta das deformações/deflexões em modelos físicos de dutos enterrados. Porém, a análise dessa instrumentação com a interação solo x duto foi prejudicada devido à baixa carga aplicada e aos ensaios terem sido realizados a 1g.

Palavras-chave: dutos enterrados; *Clip-Gauge*; instrumentação; deformação/deflexão de dutos.

ABSTRACT

The main aim of this work was to develop a device that would help in obtaining direct deformations / deflections in buried pipelines physical models. The buried pipelines dimensioning theories are considered obsolete and sometimes conservative. Moreover, the deformation / deflection calculation is performed in a complex way, often through back-calculation. Thus, the ability to carry out these measurements in a direct way will bring large gains to the buried pipelines studies. Secondary objectives are directed to evaluate the effectiveness of the developed equipment for ground x duct interaction. The tests were conducted in a reduced scale, at earth gravity acceleration (1g), simulating static loading through rectangular footing. Four tests, varying the relative density of the duct supporting soil base, were carried out. The results have shown that the developed instrumentation is able to help direct deformation / deflection measurement in buried pipelines physical models. However, this instrumentation review in ground x duct interaction was hindered due to the low load applied once to the tests had been performed at 1g gravity level.

Keywords: buried pipelines; Clip-Gauge; instrumentation; deformation / deflection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Definição dos elementos constituintes de uma instalação típica e terminologia adotada para a identificação dos locais da seção transversal do duto (Bueno e Costa, 2012).

Figura 2.2: Duto instalado na condição de vala (Adaptado: Farrás e Pérez, 2003)

Figura 2.3: Duto instalado na condição de aterro (Farrás e Pérez, 2003)

Figura 2.4: Instalação em aterro com projeção positiva (a) e com projeção negativa (b) (Adaptado: Carvalho, 2010)

Figura 2.5: Instalações em aterro: (a) Projeção positiva incompleta; (b) Projeção positiva completa (Adaptado: Carvalho, 2010)

Figura 2.6: Instalações em aterro: (a) Projeção negativa incompleta; (b) Projeção negativa completa (Adaptado: Carvalho, 2010)

Figura 2.7: Comportamento de tubos em aterro com projeção positiva (Debs, 2003)

Figura 2.8: Tensões em um ponto no interior da massa de solo

Figura 2.9: Reação do solo em dutos flexíveis (Adaptado: Neto e Relvas, 2003)

Figura 3.1: Representação esquemática do Transdutor de Deslocamentos.

Figura 3.2: Representação esquemática da ponte de Wheatstone e esquema de colagem dos Strain Gages nas lâminas.

Figura 3.3: Clip Gauge desenvolvido.

Figura 3.4: Calibração do Clip Gauge.

Figura 3.5: Curvas de calibração do Clip Gauge.

Figura 3.6: Curva granulométrica do solo usado no modelo reduzido (Santiago, 2010).

Figura 3.7: Esquema de configuração do ensaio.

Figura 3.8: Caixa utilizada nos ensaios (medidas internas).

Figura 3.9: Duto utilizado no ensaio.

Figura 3.10: Sapata utilizada para aplicação de carga no ensaio.

Figura 3.11: Centrífuga Geotécnica da UENF.

Figura 3.12: Célula de carga.

Figura 3.13: Calibração da célula de carga.

Figura 3.14: Curva de calibração da Célula de Carga.

Figura 3.15: Célula de Carga conectada ao atuador.

Figura 3.16: Atuador apoiado na viga (adaptado: Melo, 2015).

Figura 3.17: Central de controle próximo ao eixo de giro do braço da centrífuga

Figura 3.18: Diagrama de funcionamento do sistema

Figura 3.19: Fluxograma do programa desenvolvido

Figura 3.20: Colagem de uma roseta

Figura 3.21: Posição dos Strain-gage's em relação ao duto

Figura 3.22: Posição de colagem das rosetas em relação ao posicionamento da carga

Figura 3.23: Esquema de montagem das Densidades Relativas de solo no ensaio.

Figura 3.24: Pluviador (Santiago, 2010).

Figura 3.25: Curva de calibração do pluviador com areia IPT (Santiago, 2010).

Figura 3.26: Pluviação.

Figura 3.27: Duto assentado na areia.

Figura 3.28: Modelo pronto para ensaio.

Figura 4.1: Resultados Roseta 1 – DR 23%.

Figura 4.2: Resultados Roseta 2 – DR 23%.

Figura 4.3: Resultados Roseta 3 – DR 23%.

Figura 4.4: Resultados Roseta 4 – DR 23%.

Figura 4.5: Resultados Roseta 1 – DR 40%.

Figura 4.6: Resultados Roseta 2 – DR 40%.

Figura 4.7: Resultados Roseta 3 – DR 40%.

Figura 4.8: Resultados Roseta 4 – DR 40%.

Figura 4.9: Resultados Roseta 1 – DR 70%.

Figura 4.10: Resultados Roseta 2 – DR 70%.

Figura 4.11: Resultados Roseta 3 – DR 70%.

Figura 4.12: Resultados Roseta 4 – DR 70%.

Figura 4.13: Resultados Roseta 1 – DR 90%.

Figura 4.14: Resultados Roseta 2 – DR 90%.

Figura 4.15: Resultados Roseta 3 – DR 90%.

Figura 4.16: Resultados Roseta 4 – DR 90%.

Figura 4.17: Deslocamentos do Clip-Gauge – DR 23%.

Figura 4.18: Variação de diâmetro do Clip-Gauge – DR 23%.

Figura 4.19: Deformações do Clip-Gauge – DR 23%.

Figura 4.20: Deslocamentos do Clip-Gauge – DR 40%.

Figura 4.21: Variação de diâmetro do Clip-Gauge – DR 40%.

Figura 4.22: Deformações do Clip-Gauge – DR 40%.

Figura 4.23: Deslocamentos do Clip-Gauge – DR 70%.

Figura 4.24: Variação de diâmetro do Clip-Gauge – DR 70%.

Figura 4.25: Deformações do Clip-Gauge – DR 70%.

Figura 4.26: Deslocamentos do Clip-Gauge – DR 90%.

Figura 4.27: Variação de diâmetro do Clip-Gauge – DR 90%.

Figura 4.28: Deformações do Clip-Gauge – DR 90%.

Figura 4.29: Comparativo entre as deformações verticais para cada densidade relativa da base de apoio do duto.

Figura 4.30: Comparativo entre as deformações horizontais para cada densidade relativa da base de apoio do duto.

Figura 4.31: Comparação entre a densidade relativa da base de apoio do duto e a relação entre o diâmetro vertical final/diâmetro horizontal final.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação quanto à rigidez segundo Marston (1930).

Tabela 2.2: Valores da taxa de recalque (r_{sd}) em função do tipo de solo (Neto e Relvas, 2003)

Tabela 2.3: Parâmetros k_b e k_z

Tabela 2.4: Fator de instalação (Barreto, 2003 e Neto e Relvas, 2003)

Tabela 2.5: Valores do parâmetro X (Barreto, 2003)

Tabela 3.1: Propriedades físicas da areia IPT (Santiago, 2010)

Tabela 3.2: Resumo dos ensaios realizados

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

B, b – largura da vala.

C_c – coeficiente de carga de Marston para situação de aterro.

C_d – coeficiente de carga de Marston para situação de vala.

C_t – coeficiente de carga.

D, D_e – diâmetro externo do duto.

d_e – diâmetro nominal do duto.

D_L – fator de deflexão retardada.

E – módulo de elasticidade do duto.

E' – módulo de reação horizontal do solo.

f – fator de impacto.

f_e – fator de equivalência.

g – gravidade.

H, h – profundidade / altura do aterro

H_e, h_e – altura entre o topo do duto e o plano de igual recalque do solo.

h_s – altura entre o topo do duto e o topo do aterro.

I – momento de inércia.

K – coeficiente de Rankine.

k – razão entre a pressão ativa lateral pela pressão vertical unitária.

k_a – coeficiente de empuxo ativo.

k_b, k_d – constante de deflexão.

k_z – constante de berço.

L – comprimento do duto.

N – fator de instalação do duto.

P – carga concentrada.

P – pressão interna no duto.

q – carga distribuída.

Q – carga vertical atuante no topo do duto.

q – relação entre a pressão lateral e a carga vertical.

$Q_{\text{cálculo}}$ – carga de cálculo.

Q_{carga} – carga móvel atuante sobre o duto.

$Q_{\text{dinâmica}}$ – cargas móveis.

$Q_{\text{estática}}$ – carga estática.

Q_{outras} – cargas de outras origens.

Q_{solo} – carga de solo atuante sobre o duto por metro linear.

r – raio médio do duto.

r_{sd} – taxa de recalque.

t – espessura da parede do duto.

x – distância horizontal.

X – parâmetro da taxa de projeção do duto.

γ – peso específico do solo.

δ – ângulo de atrito.

Δ_x – máxima deflexão do duto.

θ – ângulo de berço.

μ – coeficiente de atrito entre o duto e o solo.

ρ – taxa de projeção.

σ – tensão circunferencial na base do duto.

σ_v – tensão vertical.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A utilização de dutos enterrados tem aumentado significativamente nos últimos anos devido ao desenvolvimento dos centros urbanos e à necessidade de facilitar o transporte/condução de diversos tipos de materiais.

Redes de abastecimento de água e coleta de esgoto, de distribuição de energia elétrica, de cabos de telefonia e rede, transporte de gás, oleodutos, minerodutos dentre outros são constituídas de dutos enterrados. Essa solução é comumente escolhida por introduzir menores perturbações físicas e estéticas comparada a outros métodos. Certamente, quando comparada a outras soluções, os dutos enterrados apresentam menores custos em relação ao material empregado, às facilidades de transporte, instalação, manutenção, bem como os benefícios que se pode obter da interação solo-duto.

Os dutos são o meio de transporte mais seguro e econômico para conduzir grandes volumes de petróleo, gás, água, esgoto e outros produtos a grandes distâncias. Por sua vez, em vista da dimensão do Brasil, localização de suas cidades, seus diferentes relevos e bacias hidrográficas, os dutos de transporte de petróleo e derivados apresentam, além de grandes extensões, diferentes trajetos, dimensões e normas de projeto.

Enquanto no passado grande parte dessas redes era localizada em áreas remotas, atualmente elas são instaladas em áreas ocupadas pela expansão das cidades, sendo crítica a movimentação de veículos pesados na área da construção cujas cargas induzidas podem causar danos importantes com consequências imprevisíveis. Portanto, é necessária a avaliação dos efeitos de cargas frente às deformações no duto para que se tenha uma previsão de sua integridade e garantia de segurança.

Os fundamentos para o cálculo de projetos de dutos enterrados baseiam-se nas teorias de Marston e Spangler, criadores de alguns trabalhos que provaram que os seus conceitos, teorias e procedimentos são adequados ao dimensionamento de dutos enterrados. Porém, Barbato et al. (2010), Neto e Figueiredo (2002), Silva e Silva (2009) dentre outros criticam as teorias de

Marston e Spangler por considera-las antieconômicas e conservativas uma vez que levam a dimensões exageradas nos projetos.

Bueno e Costa (2012) destacam algumas limitações da teoria de Marston e Spangler, dentre elas:

- Desenvolvimento das forças de tração segundo planos verticais bem definidos, hipótese essa questionável para instalação de dutos em aterros compactados;
- Suposição de atrito constante com a profundidade;
- Desconsideração da coesão do solo.

Barbato et al. (2010) acrescenta como limitações o fato da teoria de Marston e Spangler assumir o solo como elástico e isotrópico acima e ao redor do duto.

Além das limitações de cálculo de projetos, existem, também, as limitações no cálculo das deformações/deflexões nos dutos. As medições normalmente são realizadas através de métodos indiretos e retroanálises, tornando o processo complexo, conforme se pode verificar em Tibana et al. (2014).

Viana (2013) ressalta que, em algumas vezes, o aterro na região lateral do duto é pouco compactado podendo ocorrer elevadas deformações de flexão nessa região as quais não são previstas pelas fórmulas clássicas impedindo de quantificar o seu real efeito.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver e testar um equipamento capaz de auxiliar na medição direta das deformações/deflexões de modelos físicos de dutos enterrados quando sujeitos a carregamentos.

A simulação das condições de campo foi executada através de modelos em escala reduzida ensaiados a 1g. Foram realizados ensaios de carregamento estático em quatro condições diferentes de base de apoio do duto, variando a densidade relativa do material utilizado nessa base.

Dessa forma, foi possível testar o equipamento não apenas em seu funcionamento, mas frente à interação solo x duto.

1.2. Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos.

Nesse Capítulo 1 é descrita de forma geral a aplicação e uso de tubulações enterradas, as teorias mais utilizadas para cálculo de projetos de dutos enterrados, a justificativa da pesquisa, o objetivo e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre dutos enterrados, apresentando conceitos, métodos de instalação e teorias sobre o dimensionamento, cálculo de cargas e deformações/deflexões dos dutos enterrados.

O Capítulo 3 descreve o programa de ensaios, onde os materiais e metodologia de ensaios são apresentados.

No Capítulo 4 estão apresentados os resultados, as interpretações e as comparações encontradas nos ensaios.

O Capítulo 5 se reserva às considerações finais, conclusões e sugestões para futuras pesquisas neste tema.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no decorrer da pesquisa.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Dutos Enterrados

Os dutos enterrados representam um modo seguro e barato de transporte de fluidos e alguns materiais granulares, além de servirem de passagem para cabeados. Estas estruturas interagem fortemente com o solo circundante e, devido às diferenças na rigidez dos materiais, causam uma intensa redistribuição de tensões. Desta forma, é necessário adequar a estrutura ao meio, no sentido de uniformizar ao máximo as tensões em seu entorno e, se possível, reduzi-las.

Como apresentado por Bueno e Costa (2012), uma instalação típica de duto enterrado é constituída por envoltória, material compactado adjacente ao duto, subdividida em: berço, zona do reverso e aterro inicial, e aterro final. Algumas posições no entorno do duto também recebem uma denominação: topo, ombro, linha d'água, reverso e base (Figura 2.1).

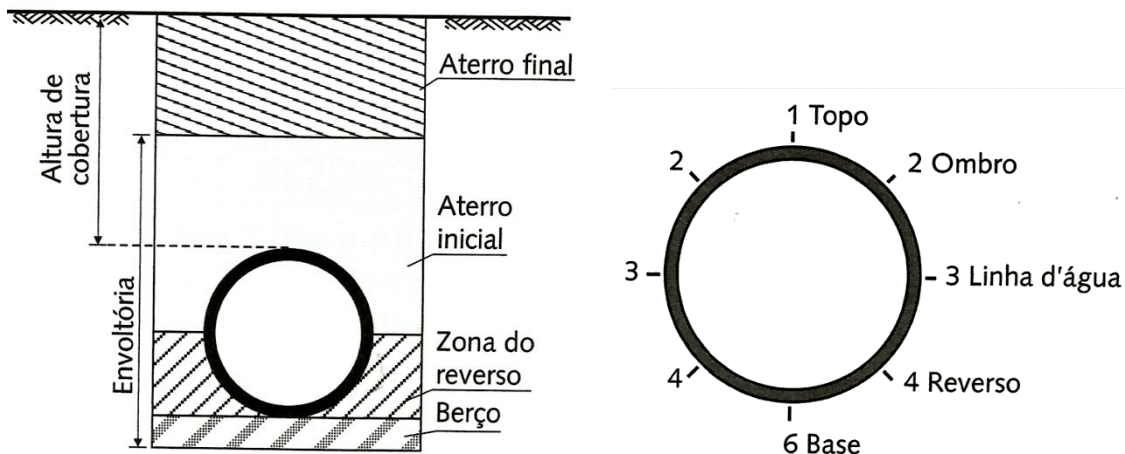


Figura 2.1: Definição dos elementos constituintes de uma instalação típica e terminologia adotada para a identificação dos locais da seção transversal do duto (Bueno e Costa, 2012).

A envoltória possui uma função estrutural muito importante, sobretudo em dutos mais flexíveis, cuja capacidade de sustentação das cargas impostas depende de um suporte lateral adequado. O berço pode ser executado de

várias formas, podendo ser constituído de uma camada compactada de solo de reaterro ou de concreto. A zona de reverso e o aterro inicial são regiões da envoltória que necessitam de um acompanhamento executivo criterioso para que o sistema apresente o desempenho desejado, principalmente quando a instalação envolve dutos flexíveis.

O solo de cobertura refere-se às camadas compactadas dispostas sobre a estrutura enterrada, desde o topo até a superfície do terreno natural, para dutos em vala, ou até a superfície do aterro, no caso de dutos salientes. A espessura do solo de cobertura é denominada altura de cobertura.

Os dutos podem apresentar seções transversais circulares, retangulares, lenticular, oval ou em arco. A classificação dos dutos pode ser feita de acordo com o tipo de material, rigidez e método construtivo.

2.1.1. Rigidez do duto

De acordo com o comportamento estrutural, os dutos enterrados são classificados como rígidos ou flexíveis.

A rigidez dos dutos foi inicialmente definida como a capacidade de deformação ao longo dos eixos horizontal e vertical, sem que fossem produzidas fissuras danosas ou que se atingisse a ruptura do duto. Considerando a porcentagem de distorção, Marston (1930, apud Santos, 2014) classificou os dutos em flexíveis, semirrígidos e rígidos, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classificação quanto à rigidez segundo Marston (1930).

Classificação	Deformação – $\Delta D/D$ (%)	Tipo de material
Flexível	> 3,0	Metal corrugado
Semirrígido	0,1 a 3,0	Ferro fundido
Rígido	< 0,1	Concreto e Cerâmica

Posteriormente, foram sugeridas outras definições, nas quais é observada a interação do duto com o solo circundante: dutos flexíveis promovem uma intensa interação com o solo, devido ao aumento de sua seção no eixo horizontal e redução no eixo vertical, enquanto que dutos rígidos sofrem deformações desprezíveis e não produzem perturbações.

Segundo Bueno e Costa (2012), um duto é considerado rígido se possuir rigidez estrutural suficiente para sustentar por si só as cargas que lhe são impostas. Por outro lado, duto flexível é aquele que depende de sua interação com o solo envolvente para suportar o carregamento aplicado.

Em resumo, dutos rígidos possuem parede suficientemente espessa, de forma a garantir uma rigidez à flexão capaz de resistir aos momentos fletores causados pelo efeito de seu peso próprio, do peso do solo de cobertura e de eventuais sobrecargas. Praticamente não se deformam sob carga, não mobilizando, portanto, o suporte passivo do solo lateral.

Dutos flexíveis, por outro lado, obtêm sua capacidade de suporte a partir da interação com o solo adjacente. Quando submetido à carga, o duto deflete e mobiliza o suporte passivo do solo lateral. Ao mesmo tempo, a deflexão alivia a carga no topo do duto.

2.1.2. Métodos de instalação dos dutos

Os dutos podem ser instalados na condição de vala (Figura 2.2) ou de aterro (Figura 2.3). No caso de serem instalados na condição de vala, produz-se o chamado “efeito arco”, fazendo com que as cargas do terreno do prisma central (que descarrega sobre o duto) sejam aliviadas, em parte, nas paredes laterais. Já a situação de instalação em aterro pode ser considerada mais crítica, pois não existem as paredes laterais para aliviar parte da carga fazendo com que o duto receba sozinho toda a carga do terreno do prisma central.

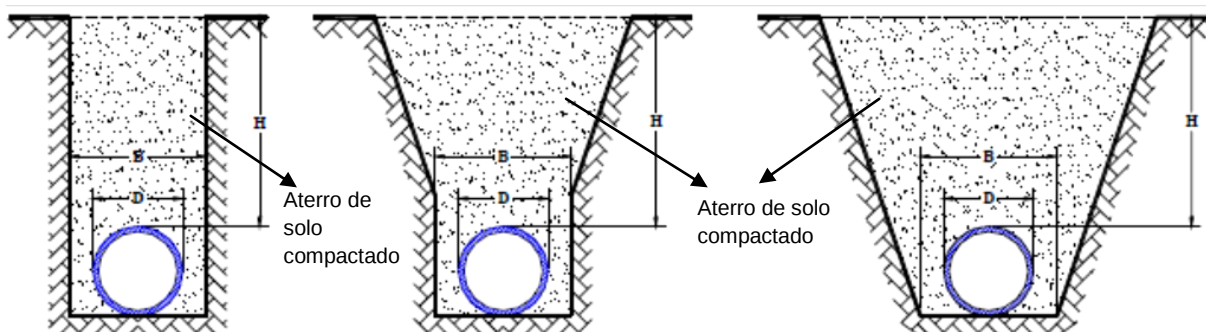


Figura 2.2: Duto instalado na condição de vala (Adaptado: Farrás e Pérez, 2003)

Os dutos instalados na condição de vala são executados em terreno natural, onde são assentados em valas com dimensões superiores ao diâmetro do duto e depois são recobertos com um aterro de solo compactado, conforme Figura 2.2 anteriormente apresentada. Esse método de instalação pode ser implantado em valas estreitas ou largas, com paredes escalonadas ou inclinadas. Além disso, cada instalação pode ser constituída de uma linha simples de dutos ou acomodar mais de uma rede, em instalações múltiplas.

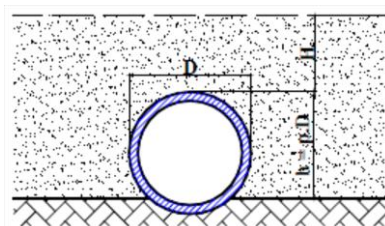


Figura 2.3: Duto instalado na condição de aterro (Farrás e Pérez, 2003)

Os dutos instalados na condição de aterro são assentes sobre a superfície do terreno natural, com o topo do duto acima ou abaixo da superfície e cobertos com aterro. Os dutos em aterro podem, devido a sua forma de instalação, serem nomeados como *Projeção Positiva* ou *Projeção Negativa* (Figura 2.4).

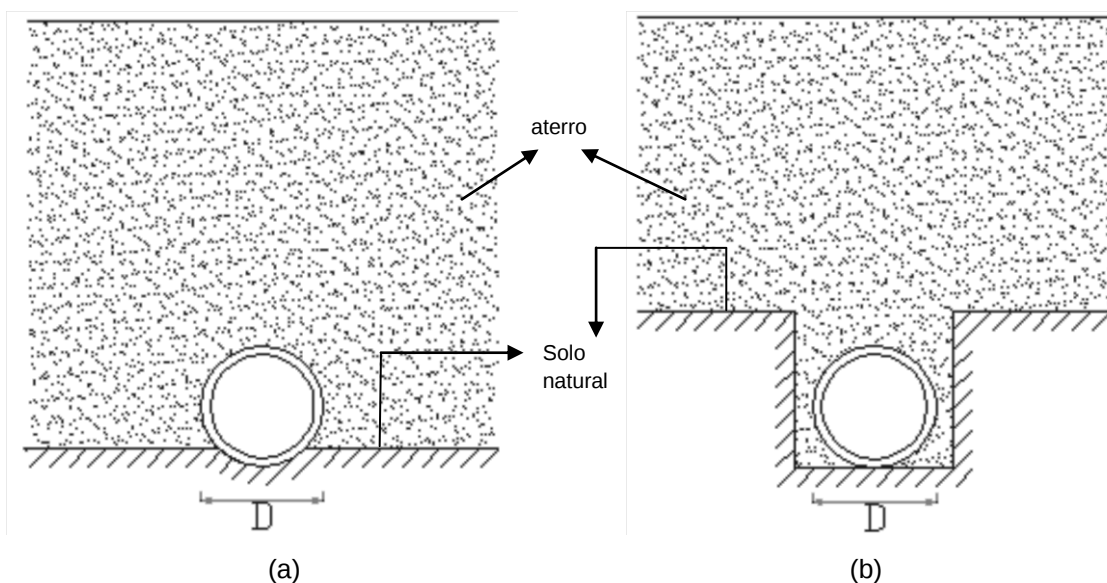


Figura 2.4: Instalação em aterro com projeção positiva (a) e com projeção negativa (b)

(Adaptado: Carvalho, 2010)

Na instalação por projeção positiva (Figura 2.4 (a)), a geratriz superior do duto encontra-se acima da superfície do solo natural e este é posteriormente recoberto por aterro. Esta instalação apenas obriga a uma pequena abertura no terreno, com a intenção de garantir que o duto seja fixado.

A instalação em projeção negativa difere da anterior pela existência de uma trincheira escavada abaixo da base do aterro, conforme Figura 2.4 (b). Nestas condições, a geratriz superior do duto encontra-se abaixo do nível da superfície do solo natural, sendo instalados em valas rasas em relação à altura do aterro e estreitas em relação ao diâmetro do duto.

Na situação de aterro é necessário distinguir o tipo de condição final de assentamento. Esta condição relaciona-se com o plano de igual recalque, que traduz o plano horizontal a partir do qual, acima desta cota, o solo não é perturbado pela presença do duto. Significa que as deformações acima desse plano serão iguais tanto nas laterais quanto no prisma central. Segundo Carvalho (2010), os aterros onde todo o solo colocado tem recalques diferenciais, indicando assim que o plano de igual recalque ainda não foi atingido, são denominados como *condição completa*. Por outro lado, quando se aterra um duto com alturas de solo que permitam existir um plano horizontal que estabelece o limite inferior da camada de solo com um recalque uniforme, atingindo a altura H_e , designa-se por *condição incompleta*.

Portanto, para a condição de projeção positiva, tem-se a projeção positiva completa e a projeção positiva incompleta, conforme Figura 2.5.

Já para a condição de projeção negativa, têm-se as projeções negativas completa e incompleta, conforme Figura 2.6.

2.1.3. Solicitações estáticas

A carga de terra é resultante do peso do prisma de solo situado diretamente acima da tubulação o qual é modificado por forças de atrito geradas pelo movimento relativo entre tal prisma e os prismas laterais adjacentes.

O cálculo da carga atuante em dutos enterrados pode ser realizado por meio de métodos analíticos e numéricos.

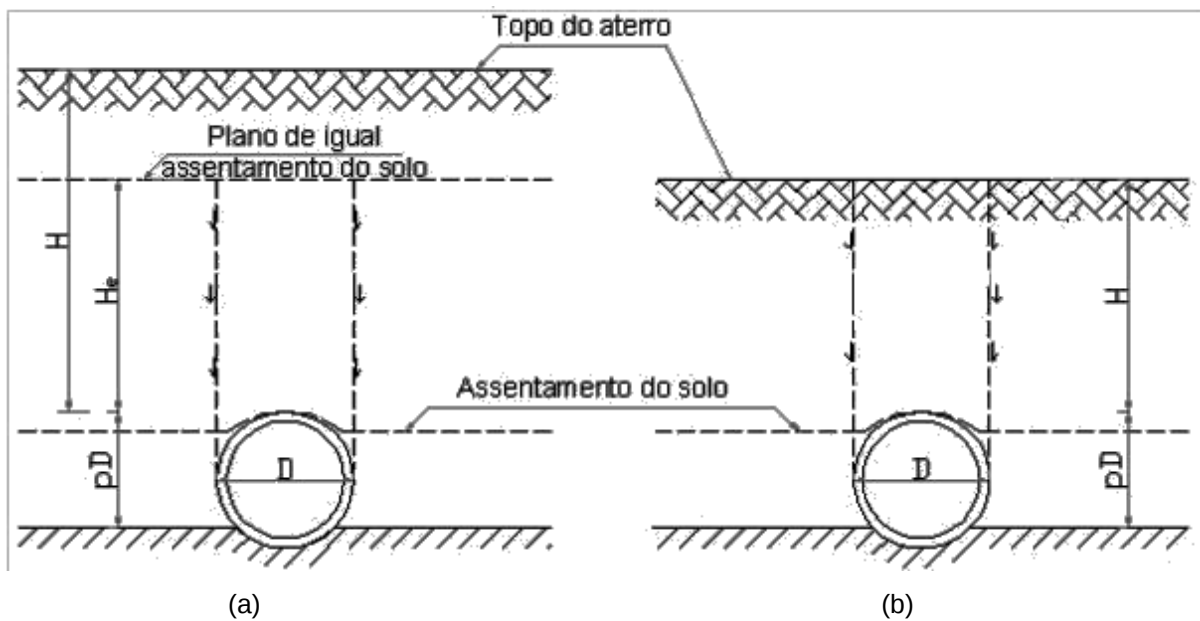


Figura 2.5: Instalações em aterro: (a) Projeção positiva incompleta; (b) Projeção positiva completa (Adaptado: Carvalho, 2010)

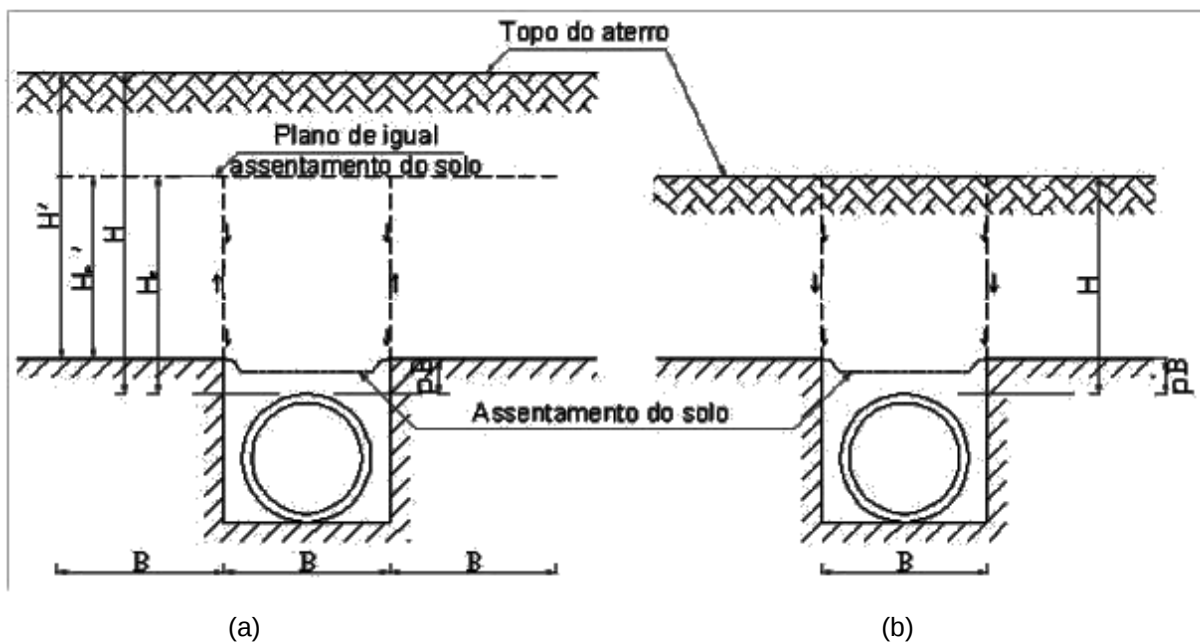


Figura 2.6: Instalações em aterro: (a) Projeção negativa incompleta; (b) Projeção negativa completa (Adaptado: Carvalho, 2010)

Os métodos analíticos, mais utilizados na prática para fins de dimensionamento, desprezam a interação solo-duto e também não fornecem informações quanto às deformações resultantes do processo construtivo. Os métodos de Janssen (1895, apud Bueno e Costa, 2012), Marston (1913, apud Bueno e Costa, 2012) e Engesser (1882, apud Bueno e Costa, 2012) foram

concebidos a partir de estudos de arqueamento. Posteriormente, Spangler (1950, apud Bueno e Costa, 2012) estendeu o método de Marston para outras situações diferentes. Já o método Alemão, introduzido por Jeyapalan e Hamida (1988), identifica diversas zonas no entorno do duto, aproximando o modelo analítico do comportamento real.

2.1.3.1. Marston e Anderson-Spangler

A carga de terra pode ser calculada pelas fórmulas de *Marston*, dependendo, principalmente, do tipo de duto (rígido ou flexível), tipo de solo, profundidade, e tipo de instalação.

A teoria de Marston-Spangler se baseia nos conceitos fundamentais de arqueamento de solo introduzidos por Janssen (1895, apud Bueno e Costa, 2012). Em 1913, Marston e Anderson apresentaram um método de análise para o cálculo de carga vertical atuante em dutos rígidos enterrados em valas estreitas. Spangler, em 1950, estendeu esse método para instalações em aterro.

- Duto Rígido instalado na condição de vala:

A carga de solo atuante sobre o duto por metro linear instalado na condição de vala é calculada através da Equação 2.1, assumidos constantes com a profundidade o peso específico e o ângulo de atrito do solo.

$$Q_{solo} = C_d \cdot \gamma \cdot b^2 \quad (2.1)$$

onde:

Q_{solo} = carga de solo atuante sobre o duto por metro linear;

b = largura da vala;

γ = peso específico do solo do aterro;

C_d = coeficiente de carga de *Marston* para tubos instalados em vala - parâmetro adimensional definido pela Equação 2.2.

$$C_d = \frac{1 - e^{-\alpha h}}{2k_a \tan \delta} \quad (2.2)$$

onde:

δ = ângulo de atrito entre a parede da vala e o solo;

h = profundidade de embutimento;

k_a = coeficiente de empuxo ativo;

α = coeficiente definido por:

$$\alpha = \frac{2k_a \tan \delta}{b} \quad (2.3)$$

tendo sido k_a , δ e b definidos anteriormente.

- Duto Rígido instalado na condição de aterro:

No caso da instalação do duto na condição de aterro a Equação 2.1 apresentada anteriormente não é mais válida (Ferreira et al., 2007; Debs, 2003; Neto e Figueiredo, 2002 dentre outros). Nessa condição o duto estará sujeito à carga máxima, pois não haverá alívio de carga devido ao atrito nas paredes da vala.

No caso de tubo em aterro com projeção positiva haverá uma tendência de movimentação relativa entre o prisma de solo sobre o duto e o solo adjacente, o que provocará o aparecimento de tensões de atrito no sentido ascendente (aliviando o tubo) ou descendente (sobrecarregando o tubo). Esta tendência ocorre até o nível do chamado plano de igual recalque, que depende da deformabilidade do duto, da compressibilidade do terreno de apoio do duto e do solo natural e da compressibilidade do aterro construído, exemplificado pela Figura 2.7 (Debs, 2003).

Para o caso de duto instalado na situação de aterro com projeção positiva, tem-se a seguinte equação:

$$Q_{solo} = C_c \cdot \gamma \cdot d_e^2 \quad (2.4)$$

onde:

Q_{solo} = carga de solo atuante sobre o duto por unidade de comprimento;

C_c = coeficiente de carga de *Marston* para dutos instalados na condição de aterro – parâmetro adimensional definido pelas Equações 2.5 e 2.6;

- Para o caso de dutos instalados em aterro com projeção positiva completa ($h_s < h_e$ na Figura 2.7):

$$C_c = \frac{e^{\pm 2k\mu \frac{h_s}{d_e}} - 1}{\pm 2k\mu} \quad (2.5)$$

- Para o caso de dutos instalados em aterro com projeção positiva incompleta ($h_s > h_e$ na Figura 2.7):

$$C_c = \frac{e^{\pm 2k\mu \frac{h_s}{d_e}} - 1}{\pm 2k\mu} \left(\frac{h_s}{d_e} - \frac{h_e}{d_e} \right) e^{\pm 2k\mu \frac{h_s}{d_e}} \quad (2.6)$$

sendo:

k = razão entre a pressão ativa lateral pela pressão vertical unitária;

μ = coeficiente de atrito entre o material e a parede da trincheira;

d_e = diâmetro nominal do duto;

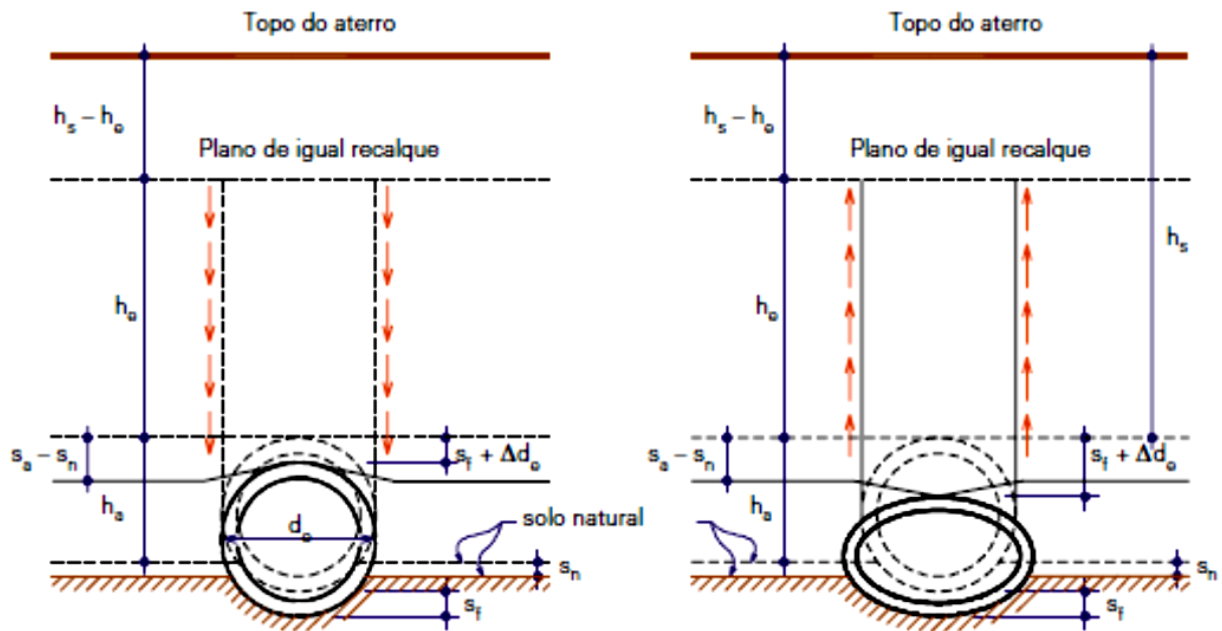
γ = peso específico do solo do aterro;

h_s = altura entre o topo do duto até o topo do aterro;

h_e = altura entre o topo do duto até o plano de igual recalque.

$k\mu$ varia de 0,111 e 0,165, dependendo das condições do solo.

Onde aparece o símbolo +/- nas Equações 2.5 e 2.6 o sinal utilizado será “mais” (+) se a taxa de recalque (r_{sd}) – Tabela 2.2 – for positiva (sobrecarregando o duto) e será “menos” (-) se a taxa de recalque (r_{sd}) for negativa (aliviando o duto).



a) Tensões de atrito sobrecarregando o duto

b) Tensões de atrito aliviando o duto

Figura 2.7: Comportamento de dutos em aterro com projeção positiva (Debs, 2003)

Tabela 2.2: Valores da taxa de recalque (r_{sd}) em função do tipo de solo (Neto e Relvas, 2003)

Solo	r_{sd}
Rocha ou solo indeformável	(+1,0)
Do tipo corrente	(+0,5) a (+0,8)
Deformável	(0,0) a (0,5)
Correntes-tubos com projeção negativa	(-0,3) a (-0,5)

- Tensão Circunferencial:

O cálculo da tensão circunferencial é feito na base do duto, devido à carga vertical no topo do duto que considera o aterro e a carga de superfície, pela Equação de tensão de Spangler (Equação 2.7), apresentada por Warman et al. (2009).

$$\sigma = \frac{6.k_b.Q. E.t.r}{E.t^3+24.k_z.P.r^3} \quad (2.7)$$

onde:

σ = Tensão circunferencial na base do duto (psi);

Q = Carga vertical (Peso do solo + Peso da carga móvel) (lb/in);

E = Módulo de elasticidade do duto (psi);

t = Espessura da parede do duto (in);

r = Raio médio do duto (in);

k_b = Constante de deflexão;

k_z = Constante de berço;

P = Pressão interna no duto (psi).

Essa equação considera as características estruturais e geométricas do duto, além de considerar também dois parâmetros: a constante de berço e a constante de deflexão do duto que são tabeladas em função do ângulo de berço θ (Tabela 2.3). Usualmente considera-se o ângulo de berço de 30° , consequentemente, $k_b = 0,235$ e $k_z = 0,108$. No denominador da equação considera-se a rigidez do duto e a pressão interna, a qual é denominada como “*pressure stiffening*” considerando que a pressão interna fará resistência a ovalização do duto.

De acordo com Spangler (1964), essa equação é limitada para dutos assentados em valas reaterradas sem compactação.

Tabela 2.3: Parâmetros k_b e k_z

θ	k_b	k_z
0	0.294	0.11
30°	0.235	0.108
60°	0.189	0.103
90°	0.157	0.096
120°	0.138	0.089
150°	0.128	0.085
180°	0.125	0.083

2.1.4. Solicitações externas

As cargas aplicadas à superfície podem ser concentradas ou uniformes, e podem ser provenientes de veículos (estradas) ou aviões (aeroportos), por exemplo.

As sobrecargas a que os dutos estão sujeitos podem ser calculadas pela Teoria de *Boussinesq*.

A Teoria de *Boussinesq*, baseada na Teoria da Elasticidade, fornece as tensões, as deformações e os deslocamentos no interior de uma massa elástica, homogênea e isotrópica, num semiespaço infinito de superfície horizontal, devidos a uma carga pontual aplicada na superfície deste semiespaço.

Boussinesq assume que as cargas na superfície são concentradas (Q) e aplicadas a uma dada distância (x), transmitidas ao duto de diâmetro conhecido (D) de forma uniforme (σ_v) a uma dada profundidade (H), como se pode verificar na Figura 2.8.

A equação de *Boussinesq* (Equação 2.8) permite calcular os acréscimos de tensões verticais resultantes, em qualquer ponto, da aplicação da carga pontual Q , na superfície.

$$\sigma_v = \frac{Q}{\pi \cdot H^2} \cdot \frac{\frac{3}{2}}{\left(1 + \left(\frac{x}{H}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \quad (2.8)$$

onde:

Q = Carga concentrada aplicada à superfície (kN);

x = Distância horizontal entre o ponto de aplicação da carga concentrada e o centro geométrico do duto (m);

H = Profundidade da parte superior do duto (m);

σ_v = Acréscimo de tensão vertical sobre o duto (kN/m²).

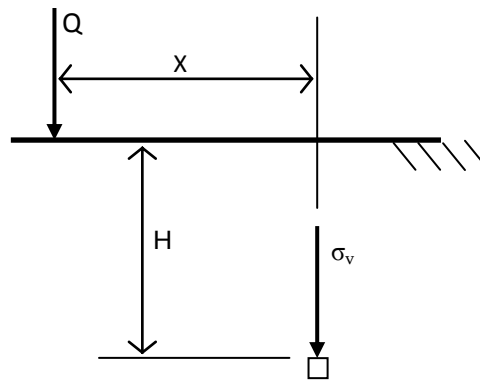


Figura 2.8: Tensões em um ponto no interior da massa de solo

Porém, o método de *Boussinesq* apresenta valores de carga muito exagerados para valores de altura de solo inferiores a 0,5m não sendo recomendado para profundidades de dutos muito reduzidas (Carvalho, 2010).

Neto e Relvas (2003) e Neto e Figueiredo (2002), dentre outros, apresentam a equação da integração de *Newmark* para a fórmula de *Boussinesq* para a determinação da carga móvel atuante sobre o duto.

Para cargas concentradas tem-se a Equação 2.9:

$$Q_{carga} = \frac{C_t \cdot (P \cdot f)}{L} \quad (2.9)$$

Para cargas distribuídas tem-se a Equação 2.10:

$$Q_{carga} = C_t \cdot q \cdot f \cdot D \quad (2.10)$$

onde:

C_t = coeficiente de carga – constante de correção;

f = fator de impacto (1,5 para rodovias; 1,75 para ferrovias; 1,0 para cargas estáticas – Zaidler, 1983);

q = carga distribuída na superfície do solo;

P = carga concentrada (roda de veículos, por exemplo) aplicada na superfície do solo;

D = diâmetro externo do duto;

L = comprimento do duto

2.1.5. Solicitação de Cálculo

De acordo com Neto e Figueiredo (2002), a determinação da carga dos dutos enterrados não é apenas a soma das cargas estáticas e dinâmicas. Isso se deve ao fato de que a capacidade de carga dos elementos enterrados não depende apenas da resistência da seção, mas também das condições de execução, principalmente devido à contribuição das pressões laterais do solo exercidas nos dutos.

A expressão que traduz esta ideia, de acordo com Neto e Figueiredo (2002) é a Equação 2.11 a seguir:

$$Q_{\text{cálculo}} = \frac{Q_{\text{estáticas}} + Q_{\text{dinâmicas}} + Q_{\text{outra}}}{f_e} \quad (2.11)$$

onde:

$Q_{\text{cálculo}}$ = carga de cálculo atuante (kN);

$Q_{\text{estáticas}}$ = carga relacionada ao peso do solo (kN);

$Q_{\text{dinâmicas}}$ = carga de cálculo representativa das cargas móveis (kN);

Q_{outras} = carga proveniente de outra origem (kN);

f_e = fator de equivalência em função do tipo de acomodação do duto.

Para o caso de aterros em projeção positiva, o cálculo do fator de equivalência, f_e , apresentado por Barreto (2003) e Neto e Relvas (2003) é dado pela Expressão 2.12:

$$f_e = \frac{1,431}{(N - X \cdot q)} \quad (2.12)$$

onde:

N = fator de instalação dependente do tipo de fundação (Tabela 2.4);

X = parâmetro que depende da taxa de projeção do duto (Tabela 2.5);

q = relação entre a pressão lateral total e a carga vertical total, calculado pela Equação 2.13.

Tabela 2.4: Fator de instalação (Barreto, 2003 e Neto e Relvas, 2003)

Tipo de assentamento	Fator de instalação
Base sem preparação	1,310
Base comum	0,840
Base de assentamento melhorado (1ª classe)	0,707
Base de concreto	0,505

Tabela 2.5: Valores do parâmetro X (Barreto, 2003)

ρ	Valores de X	
	Bases de concreto	Outras bases
0	0,150	0
0,3	0,743	0,217
0,5	0,856	0,423
0,7	0,811	0,594
0,9	0,678	0,655
1,0	0,638	0,638

$$q = \frac{\rho \cdot K}{C_c} \left(\frac{H}{D_e} + \frac{\rho}{2} \right) \quad (2.13)$$

onde:

ρ = taxa de projeção;

K = coeficiente de Rankine = 0,33 (Neto e Relvas, 2003);

C_c = coeficiente de carga de Marston para dutos instalados na condição de aterro;

H = altura do aterro (m);

D_e = diâmetro externo do duto (m).

2.1.6. Deformação/deflexão em dutos flexíveis

Entende-se por deformação a variação do diâmetro na direção vertical e/ou horizontal em relação ao diâmetro inicial.

O início da deformação nos dutos ocorre no processo construtivo, quando se inicia a colocação do solo de enchimento. A seção transversal tende a deformar-se em forma de elipse, provocando uma redução do diâmetro na direção vertical e um aumento na direção horizontal (ovalização). Esta variação na direção horizontal provoca uma reação passiva do solo envolvente, gerando um efeito de confinamento lateral no duto, o que implica um aumento de sua rigidez, como se pode observar na Figura 2.9.

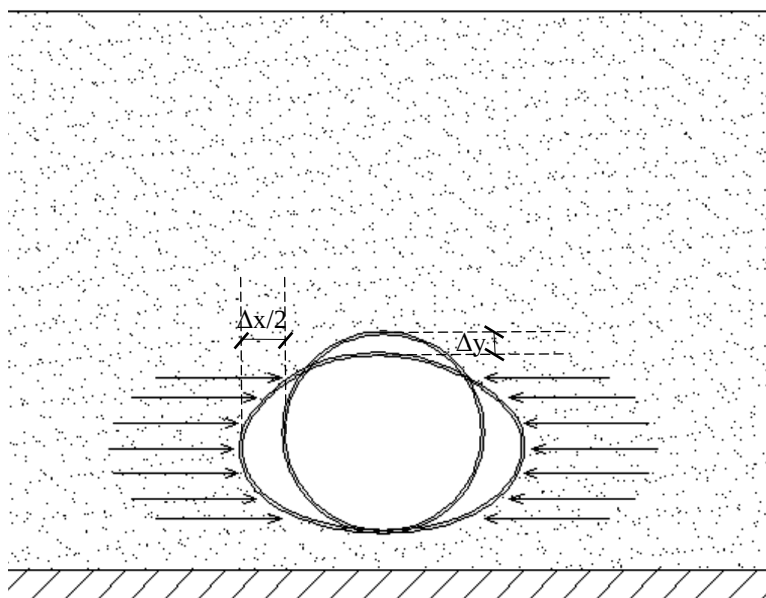


Figura 2.9: Reação do solo em dutos flexíveis (Adaptado: Neto e Relvas, 2003)

Apesar de ser um processo favorável, a ovalização da seção nos dutos flexíveis tem um valor limite, pois acima desse valor o duto corre sério risco de romper.

Dentre as formulações habitualmente utilizadas para avaliar as deflexões em tubulações enterradas, a fórmula de Iowa, desenvolvida por Spangler (1941), é a mais empregada. Esta fórmula assume que a deflexão depende de três parâmetros empíricos, dentre eles o mais complexo de ser determinado é o fator de rigidez do solo ou módulo de reação do solo E' e estima a ovalização do duto devido às cargas verticais (Warman et al., 2009). A expressão

resultante para obtenção do aumento do diâmetro horizontal é dada pela Equação 2.14.

$$\Delta x = \frac{k_z \cdot D_L \cdot Q \cdot r^3}{EI + 0,061 \cdot E' \cdot r^3} \quad (2.14)$$

onde:

Δx = máxima deflexão horizontal do duto (in);

k_z = constante de berço = 0,1 (Goddard, 1994);

D_L = Fator de deflexão retardada = 1,0 (Goddard, 1994);

Q = carga vertical atuante no topo do duto por unidade de comprimento (lb/in);

r = raio do duto (in);

E = módulo de elasticidade do duto (psi);

I = Momento de inércia da parede do duto ($I = t^3/12$, in³);

t = espessura da parede do duto (in);

E' = módulo de reação horizontal do solo (psi).

Spangler reconheceu que a consolidação do solo ao redor do duto após aplicação de carga continua com o tempo após a instalação do duto, e, as deflexões de ovalização podem aumentar mais que 30% em 40 anos (Warman, 2009 e Goddard, 1994), por esse motivo, a inclusão do fator de deflexão retardada na equação anterior.

O módulo de reação horizontal do solo, E' , define a resistência à ovalização e é um parâmetro extremamente importante da fórmula de *Iowa*, porém, difícil de ser mensurado.

A fórmula de *IOWA* foi baseada nos resultados dos estudos experimentais realizados com dutos de metal (Spangler, 1941). Jeyapalan et al. (1987) concluíram que para dutos muito flexíveis em solo rígido, a fórmula de *Iowa* não é aplicável. Além disso, observaram que dutos muito flexíveis não se deformam de uma maneira elíptica como assumido pela fórmula de *Iowa*.

Meyerhof e Fisher (1963) apresentam outra formulação a ser utilizada para a determinação das deflexões de dutos flexíveis:

$$\Delta x = 2,7 \cdot Q \cdot E' \quad (2.15)$$

Com Q e E' definidos anteriormente.

O deslocamento vertical Δy pode ser obtido pela Equação 2.16, desenvolvida por Masada (2000) segundo as mesmas hipóteses de Spangler (1941).

$$\Delta y = \frac{k_z \cdot D_L \cdot Q}{2 \cdot r \left(\frac{EI}{r^3} \right)} \left[\frac{0,0595 E'}{\frac{EI}{r^3} + 0,061 E'} - 1 \right] \quad (2.16)$$

Onde os parâmetros foram definidos anteriormente.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Todo duto enterrado está sujeito a deformações devido à atuação de cargas estáticas e dinâmicas sobre os mesmos. As análises do comportamento dos dutos enterrados são executadas, em sua maioria, através de algumas equações empíricas, e, em geral, mostrando-se conservadoras. Necessita-se, portanto, estudar propostas para uma análise das deformações realistas de dutos enterrados.

Nessa dissertação foi desenvolvido e testado um equipamento que auxilia na leitura direta das deformações (ovalização) dos dutos enterrados em modelos reduzidos.

Para testar esse equipamento, foram executados quatro (4) ensaios de carregamento estático sobre um modelo reduzido de duto enterrado, à gravidade normal de 1g, variando a densidade relativa do solo que compõem a base de apoio desse duto.

A variação da densidade relativa do solo da base de apoio foi necessária para poder analisar o comportamento do equipamento frente à interação solo-duto.

Neste capítulo da dissertação apresenta-se a metodologia de desenvolvimento e construção do equipamento, assim como a metodologia de execução dos ensaios de carregamento estático.

3.1. *Clip Gauge* – Transdutor de Deslocamentos

Para auxiliar na medição da deformação do duto em milímetros (mm) de maneira direta, foi desenvolvido um transdutor de deslocamentos denominado *Clip Gauge*.

Um transdutor de deslocamentos do tipo *Clip Gauge* é útil, pois permite medir deslocamentos lineares de pequenos cursos com acurácia, possibilitando a verificação da variação de diâmetro no interior do duto.

Um esquema em vista lateral do *Clip Gauge* desenvolvido neste projeto é apresentado na Figura 3.1, a seguir.

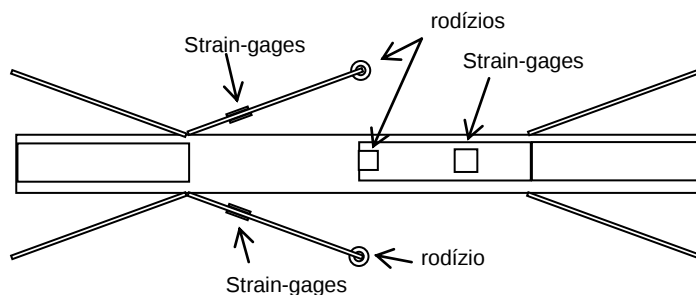


Figura 3.1: Representação esquemática do Transdutor de Deslocamentos.

Nesse instrumento o eixo é constituído de uma barra de seção quadrada fabricada em aço, onde em cada extremo são fixadas quatro lâminas de aço inox, a cada 90°, servindo de apoio para introduzi-lo dentro do duto, além de sustentarem o equipamento dentro do eixo central do duto. Outro grupo de quatro lâminas é posicionado na parte média do suporte. Esse último grupo de lâminas possui extensômetros com a finalidade de medir as deformações radiais no interior do duto.

Esses extensômetros são *strain-gages* de resistência que funcionam da seguinte forma: quando as lâminas centrais são defletidas, promovem uma mudança de voltagem linearmente proporcional ao deslocamento. Para cada lâmina foram instalados quatro (4) extensômetros sendo dois (2) na parte superior da lâmina e dois (2) na parte inferior da lâmina. Esses extensômetros foram ligados de forma a compor circuito de ponte de *Wheatstone*, conforme Figura 3.2. Os extensômetros utilizados foram do modelo PA-06-062TG-350-LEN com roseta dupla a 90° de $350 \Omega \pm 0,4$, fornecidos pela empresa Excel Sensores. A colagem dos mesmos foi realizada seguindo as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante e com o adesivo de colagem adquirido juntamente a ele.

Cada uma dessas lâminas centrais instrumentadas passou a ser denominada “Placa”, sendo identificadas com números sequenciais (Placa 1, Placa 2, Placa 3 e Placa 4), sendo a Placa 1 posicionada no topo, a placa 2 na linha d’água direita, a Placa 3 na base e a Placa 4 na linha d’água esquerda do duto, conforme Figura 2.1 apresentada no Capítulo anterior.

As lâminas que receberam os *strain-gages* possuem abertura e rigidez suficientes para medir os deslocamentos radiais tanto positivos (compressão)

quanto negativos (tração / expansão). Foram instalados, nas pontas desse grupo de lâminas, rodízios que permitem que as deformações ocorram sem que as lâminas apresentem resistência contrária ao movimento, devido ao contato com o duto, aliviando, assim, o atrito lâmina-duto.

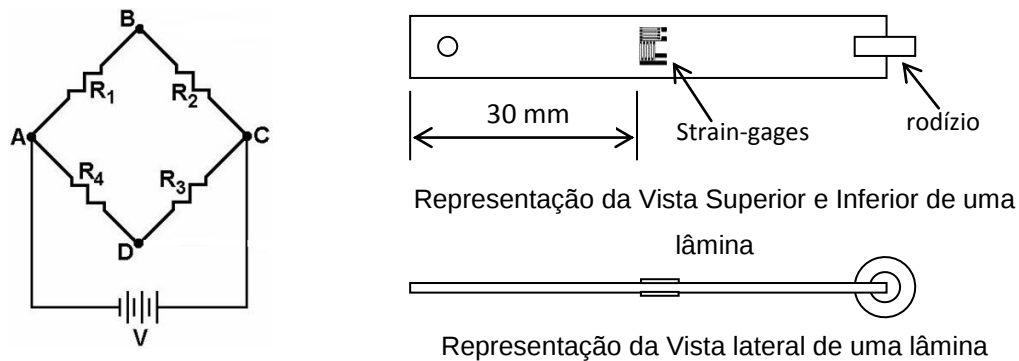
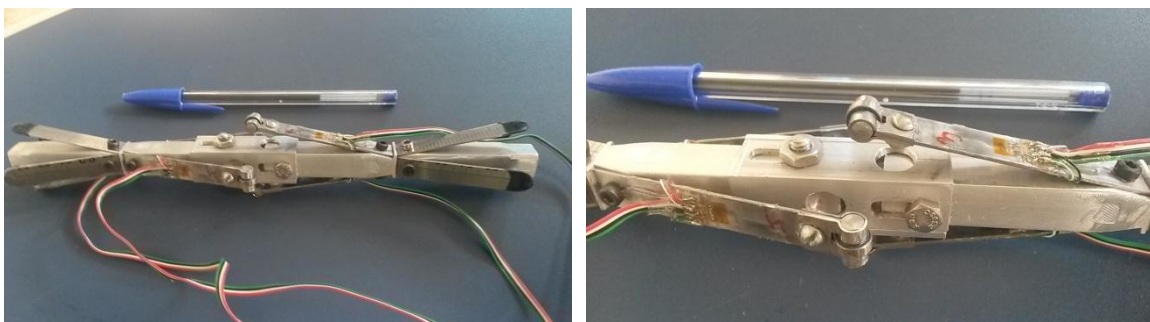


Figura 3.2: Representação esquemática da ponte de *Wheatstone* e esquema de colagem dos *Strain Gages* nas lâminas.

A Figura 3.3 retrata o *Clip Gauge* e um detalhe do rodízio que permite o deslocamento suave das lâminas centrais.

A calibração de cada Placa deste instrumento foi realizada através de incrementos de pequenos deslocamentos medidos com micrômetro de precisão de 0,0001 mm, em milímetros (mm), (Figura 3.4) os quais foram correlacionados com as leituras dos extensômetros em *strain*, conforme sugerido por Fleck (1983). Dessa forma, pôde-se traçar uma curva de calibração “leitura do micrômetro (mm) vs. leitura dos extensômetros (*strain*)” e a identificação de sua equação característica para cada Placa (Figura 3.5).



(a) *Clip Gauge*

(b) Detalhe das placas com as pontes de *Wheatstone* e rodízios.

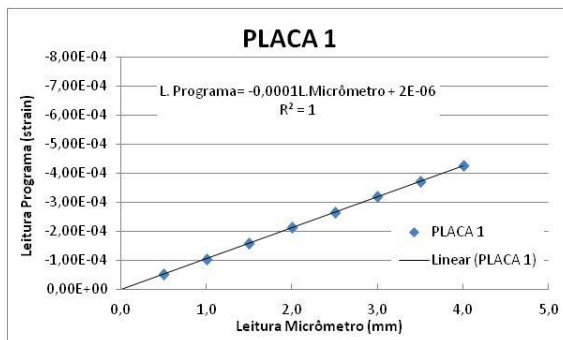
Figura 3.3: *Clip Gauge* desenvolvido.



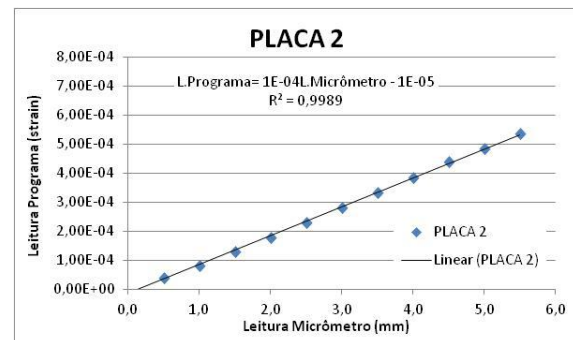
(a) Suporte para calibração



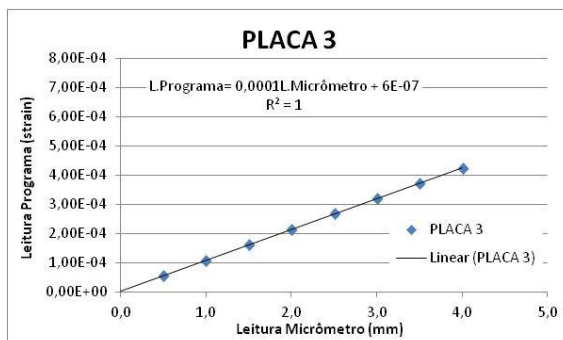
(b) Detalhe da aplicação de deslocamentos.

Figura 3.4: Calibração do *Clip Gauge*.

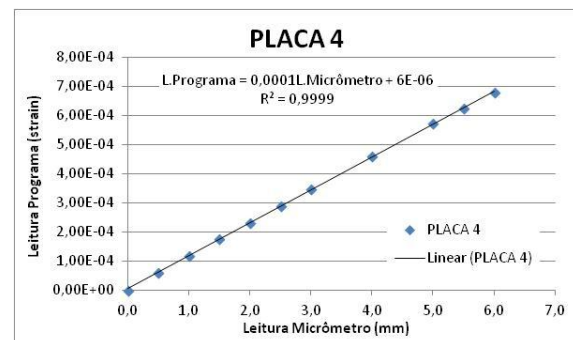
(a) Placa 1



(b) Placa 2



(c) Placa 3



(d) Placa 4

Figura 3.5: Curvas de calibração do *Clip Gauge*.

3.2. Caracterização do Solo

O solo utilizado para a montagem dos ensaios físicos é uma areia industrial normalizada, comercializada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) a qual foi ensaiada e caracterizada por Santiago (2010).

Santiago (2010) identificou o solo como sendo uma areia média uniforme, classificada como SP (areia mal graduada) pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos, possuindo um coeficiente de uniformidade (CU) de 1,52, coeficiente de curvatura (CC) de 0,95 e o diâmetro efetivo do solo (D_{10}) de 0,277 mm. Abaixo é apresentada a distribuição granulométrica do solo utilizado (Figura 3.6).

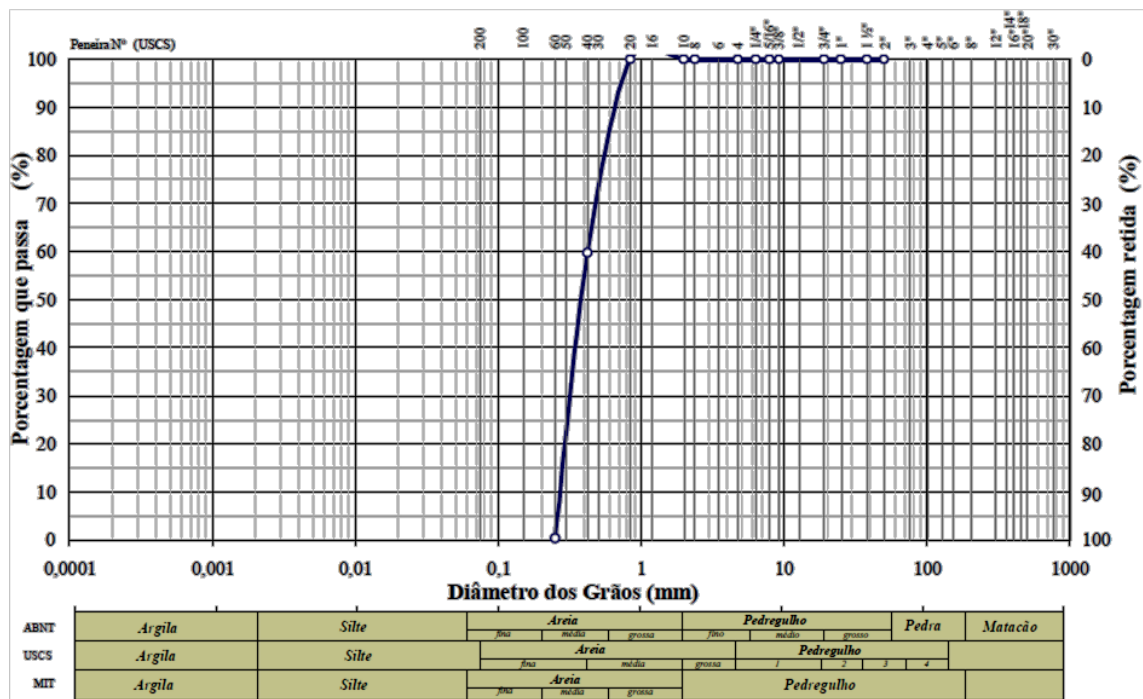


Figura 3.6: Curva granulométrica do solo usado no modelo reduzido (Santiago, 2010).

O valor do peso específico máximo foi de 15,47 kN/m³ e do peso específico mínimo foi de 12,94 kN/m³.

O quadro resumo dos resultados de caracterização do solo realizados por Santiago (2010) é apresentado na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1: Propriedades físicas da areia IPT (Santiago, 2010)

Propriedade	Valor
Diâmetro efetivo D_{10}	0,27 mm
Peso Específico dos grãos (G)	2,67
Índice de vazios mínimos ($e_{\min}$)	0,72
Índice de vazios mínimos ($e_{\max}$)	1,06
Ângulo de atrito residual (ϕ'_{crit})	33°
Ângulo de resistência ao cisalhamento (ϕ'_{denso})	38°
Ângulo de resistência ao cisalhamento (ϕ'_{fofo})	36°
Ângulo de dilatância (ψ_{fofo})	4,6°
Ângulo de dilatância (ψ_{denso})	25°

3.3. Ensaios de carregamento estático a 1g

Na Figura 3.7 é apresentado um esquema ilustrativo do ensaio, mostrando a configuração e os materiais que foram utilizados. Neste esquema pode-se observar a caixa teste onde foi realizado o ensaio, a disposição do duto ensaiado, o solo que preenche a caixa, o posicionamento do atuador servo controlado, a célula de carga e a sapata utilizada para aplicação da carga.

Para os ensaios foi utilizada uma caixa teste de alumínio aeronáutico pesando 160 Kg, com uma das faces em acrílico de 42,6 mm de espessura de modo a possibilitar a visualização do modelo. A caixa teste possui dimensões internas de 700 mm de comprimento, 250 mm de largura e 500 mm de altura (Figura 3.8). Objetivando minimizar o atrito entre a caixa e o solo, visualizar as alturas das camadas pré-definidas de solo e proteger o acrílico, a face de acrílico foi revestida com uma folha de acetato.

O duto utilizado para modelagem é composto de alumínio com diâmetro interno de 38,1 mm e espessura de 1,58 mm (Figura 3.9). Este modelo representa, aproximadamente, um duto real de aço com 495,3 mm (19,5") de

diâmetro e espessura de parede de 20,5 mm (0,81”), sendo assim, a escala utilizada no modelo em relação ao protótipo é 1:13.

A sapata utilizada para aplicação da carga estática possui dimensões de 56 mm de comprimento, 48 mm de largura e 25 mm de altura, com área de distribuição de carga retangular de 26,88 cm² (Figura 3.10).

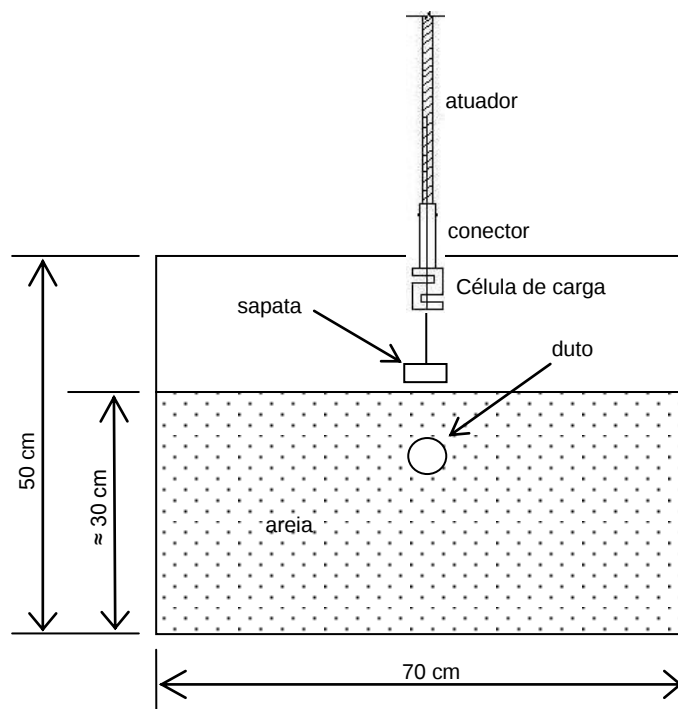


Figura 3.7: Esquema de configuração do ensaio.

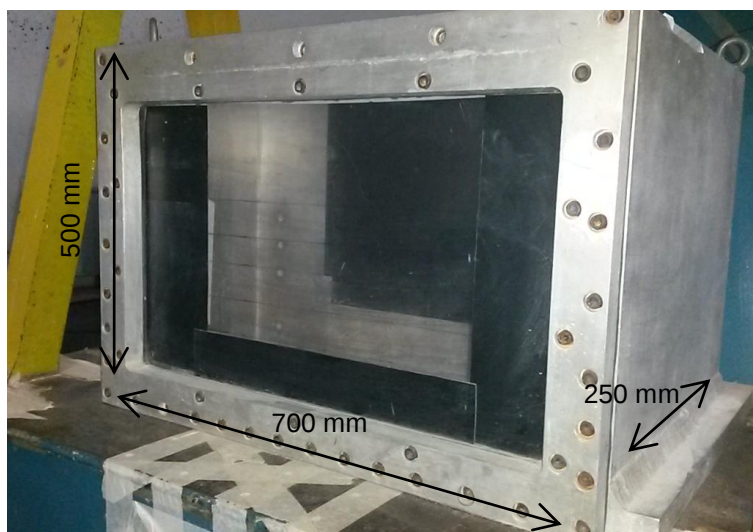


Figura 3.8: Caixa utilizada nos ensaios (medidas internas).

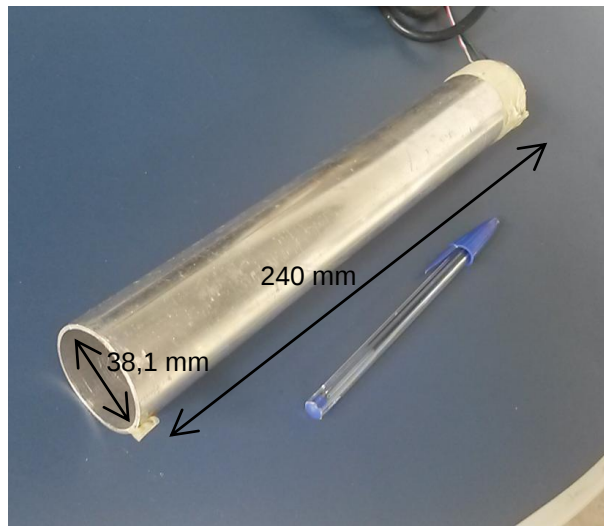


Figura 3.9: Duto utilizado no ensaio.

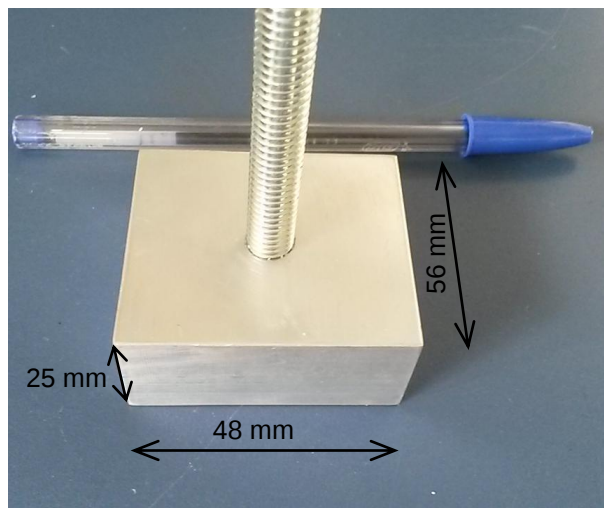


Figura 3.10: Sapata utilizada para aplicação de carga no ensaio.

3.3.1. Instrumentação e Aquisição de Dados

Para realizar a aquisição de dados e utilizar os sistemas existentes, o ensaio foi montado no cesto da Centrífuga Geotécnica da UENF (Figura 3.11). A centrífuga é um equipamento de grande porte que permite realizar ensaios de modelo reduzido aumentando a força gravitacional atuante sobre esse modelo.

Para a leitura da carga aplicada na sapata durante os ensaios foi utilizada a célula de carga fabricada pela ALFA INSTRUMENTOS, série SV50 e capacidade de 50 kg (500 N) (Figura 3.12).



Figura 3.11: Centrífuga Geotécnica da UENF.



Figura 3.12: Célula de carga.

Essa célula de carga foi calibrada através da aplicação de acréscimos de carga com bolachas de ferro (anilhas) com massas variando entre 1 e 10 kg, devidamente aferidas, Figura 3.13, as quais foram correlacionadas com as leituras da tensão, em Volts. Dessa forma, pôde-se traçar uma curva de calibração “Carga Aplicada (kg) vs. leitura da tensão (volts)” e a identificação da equação característica de calibração da célula de carga (Figura 3.14).

O pino superior da célula de carga foi conectado ao atuador servo controlado disponível no laboratório da Centrífuga, através de um conector sextavado de latão fabricado no próprio laboratório. Na Figura 3.15 é apresentada a célula de carga e o conector sextavado necessário para a conexão no atuador.



Figura 3.13: Calibração da célula de carga.

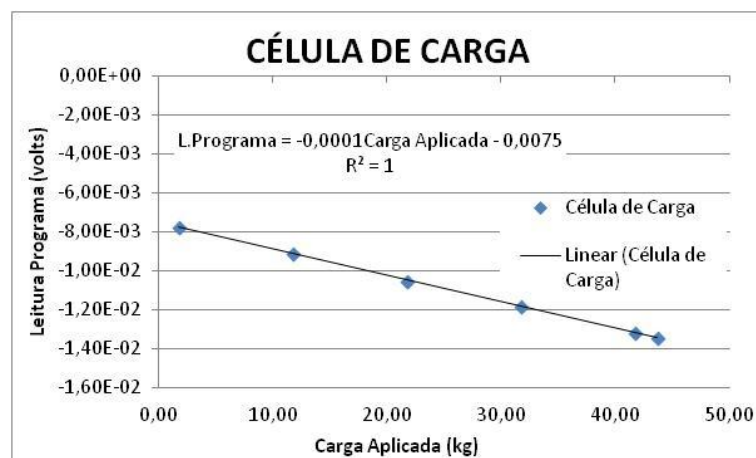


Figura 3.14: Curva de calibração da Célula de Carga.

O atuador elétrico, conectado à célula de carga, foi apoiado sobre uma viga de forma a posicionar a sapata no centro do duto, conforme Figura 3.16. O controle do servo-motor *brushless DC* do atuador é feito pelo módulo NI PXI 7350, instalado no chassi NI-PXI 1050, ambos da *National Instruments* e presos no braço da centrífuga. O *software* utilizado foi a versão mais recente do LabVIEW.

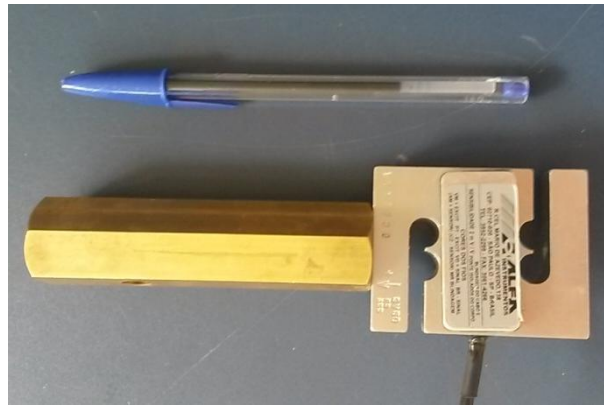


Figura 3.15: Célula de Carga conectada ao atuador.

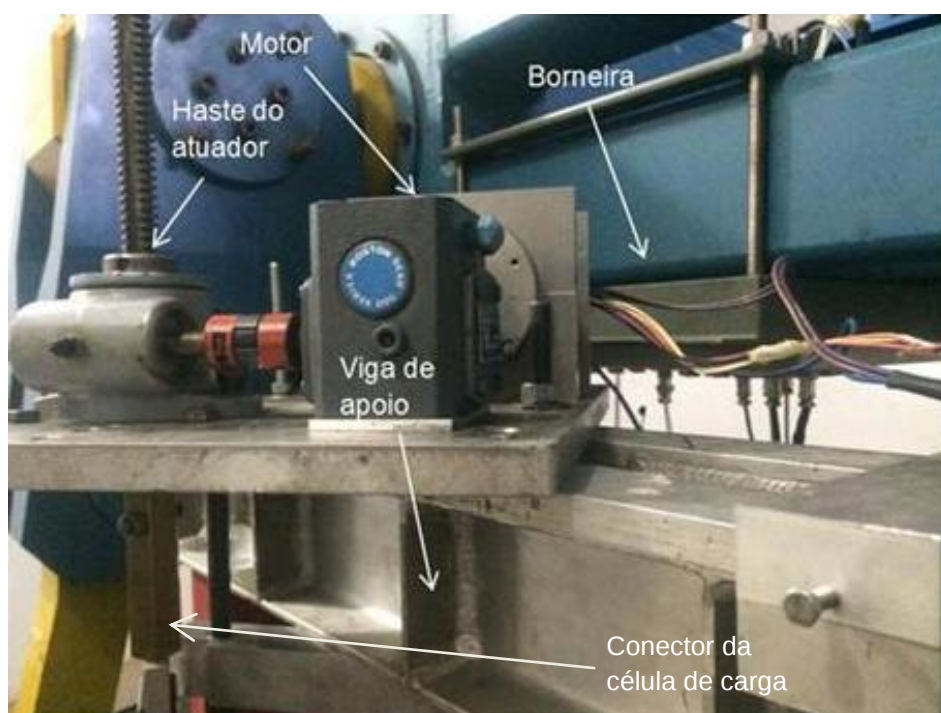


Figura 3.16: Atuador apoiado na viga (adaptado: Melo, 2015).

Os *strain-gages* do *Clip-Gauge* e das rosetas instaladas no duto (ver item 3.3.2) são interligados no mesmo sistema de aquisição de dados da célula de carga, porém em canal diferente desta.

Uma central de controle foi montada para controlar o atuador e fazer a aquisição dos dados. A Figura 3.17 apresenta a posição da central de controle instalada no braço da centrífuga (estrutura azul).

A Figura 3.18 apresenta, de forma esquemática, como os elementos estão interligados na central de controle. Esta central foi instalada próximo ao

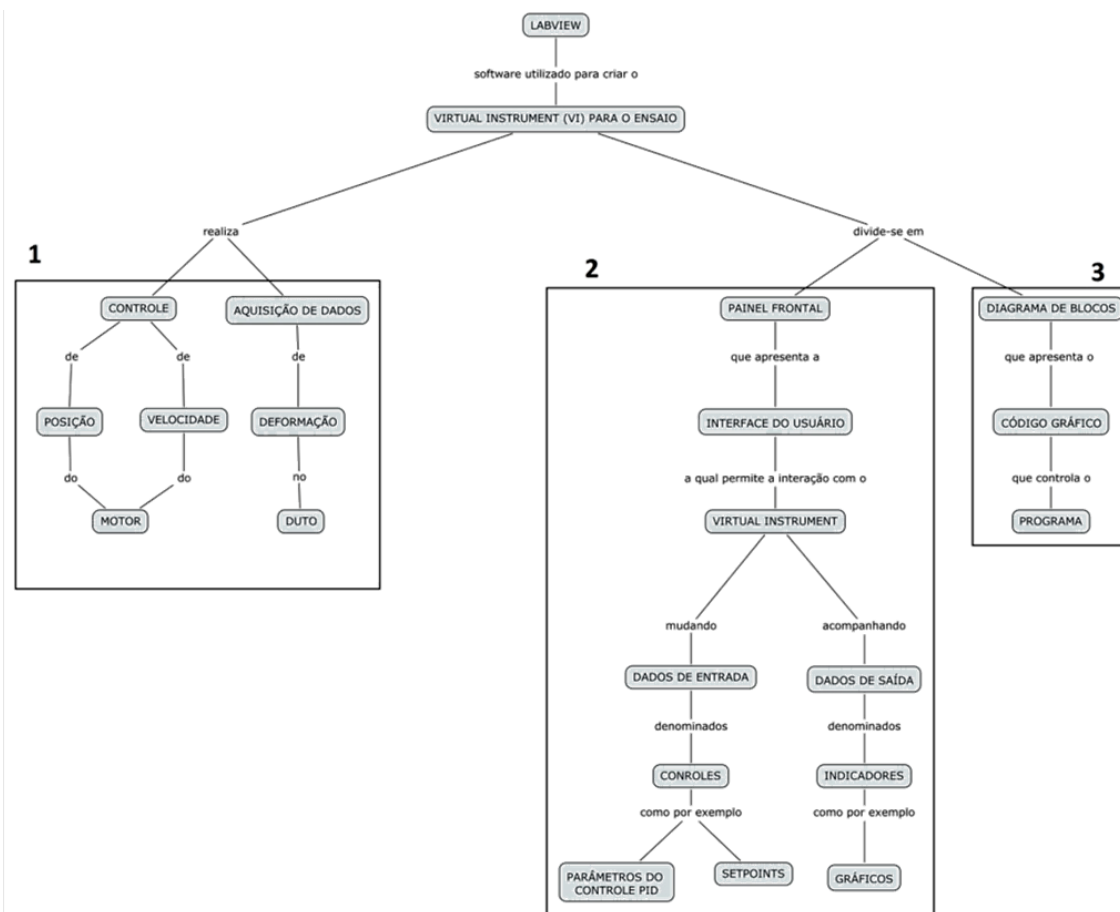


Figura 3.19: Fluxograma do programa desenvolvido

3.3.2. Instrumentação do Duto

A instrumentação do ensaio consistiu, além da célula de carga mencionada anteriormente, em extensômetros colados ao duto e em instrumentação inserida internamente no duto através do *Clip-Gauge* desenvolvido.

Para conferir o funcionamento do *Clip-Gauge* foi utilizada uma instrumentação externa ao duto. Para tanto, foram adquiridos extensômetros da KYOWA do modelo KFG-2-350-D17-23 com roseta tripla de $350 \Omega \pm 2,4$. A colagem dos mesmos foi realizada seguindo as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante e com o adesivo de colagem adquirido juntamente a ele.

O objetivo imediato dos ensaios foi medir as deformações do duto impostas pela carga estática de superfície aplicada através da sapata apresentada no item 3.3. Para isto foram coladas quatro (4) rosetas com três

(3) *strain-gauge*'s cada. Estas rosetas foram coladas na superfície externa do centro do duto e posicionadas a 90° uma da outra. Na Figura 3.20 é apresentado o procedimento da colagem de uma das rosetas.

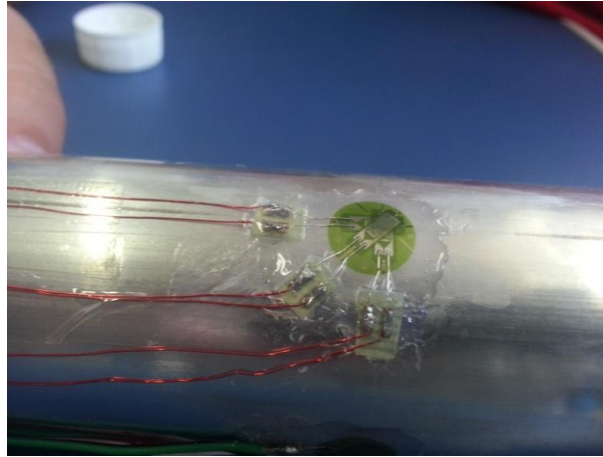


Figura 3.20: Colagem de uma roseta

Nas análises, o *strain-gage* 1 é o longitudinal, o *strain-gage* 2 é o transversal, e o *strain-gage* 3 é o que faz 45° com a longitudinal (Figura 3.21).

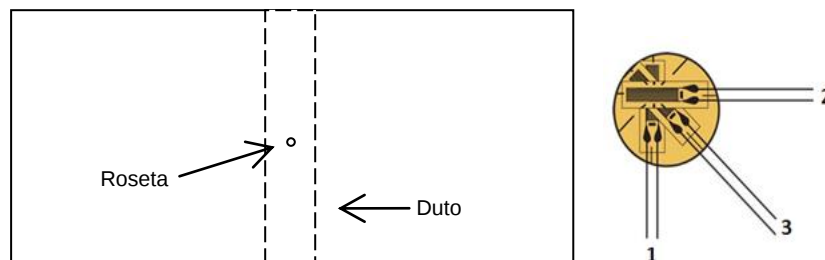


Figura 3.21: Posição dos *Strain-gage*'s em relação ao duto: 1 *Strain-gage* longitudinal, 2 *strain-gage* transversal e 3 *strain-gage* a 45°

No interior do duto foi inserido o *Clip-Gauge* com o cuidado de centralizá-lo, além de fazer coincidir suas placas com as rosetas coladas externamente no duto. Desta forma, a Placa 1 coincide com a roseta 1, a Placa 2 coincide com a roseta 2 e assim para as todas as quatro (4) placas e quatro (4) rosetas.

O esquema abaixo (Figura 3.22) apresenta a posição de cada roseta e de cada placa do *Clip-Gauge* em relação à aplicação da carga de superfície.

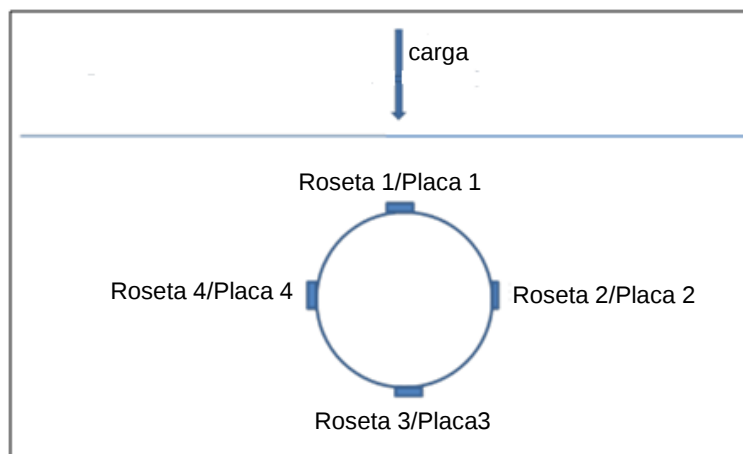


Figura 3.22: Posição de colagem das rosetas em relação ao posicionamento da carga

3.3.3. Preparação da Amostra

O duto foi apoiado em uma camada de vinte centímetros (20 cm) de areia com densidade relativa variando para cada ensaio (23%, 40%, 70% e 90%). A camada de preenchimento lateral do duto e a camada superior ao duto (com cinco centímetros de espessura) foram completadas com areia com densidade relativa de 23%. Essa densidade de 23% foi escolhida, pois, de acordo com Tibana et al. (2014), quanto menor a densidade do modelo, menor o confinamento do duto. Dessa forma, o solo fofo tende a permitir uma transferência de carga maior ao duto que um solo mais denso.

A montagem do solo no modelo foi realizada em camadas de cinco centímetros (5 cm) de espessura cada. Na posição do duto a camada foi de aproximadamente 4 cm de espessura, rasada no diâmetro externo do duto, e a espessura da camada superior foi novamente de cinco centímetros (5 cm). Para cada camada foi calculada a massa de areia necessária para o modelo ter a densidade relativa desejada (Figura 3.23).

A areia foi lançada na base da caixa teste e o duto posicionado na superfície da camada de solo, de espessura total de 20 cm, que serviu de base de apoio.

O preenchimento da caixa teste foi realizado através de uma chuva de areia feita por um pluviador apresentado e desenvolvido por Santiago, 2010 (Figura 3.24) que direciona e controla a velocidade de deposição do material. A densidade do solo depende da altura e da velocidade de deposição, onde as

maiores alturas de queda resultam em maiores energias de deposição e consequentemente em solos mais densos. Segundo Ratton (1993), a pluviação no ar permite uma adequada reconstituição de depósitos naturais formados pelo vento que normalmente se constituem de areias ou siltes.

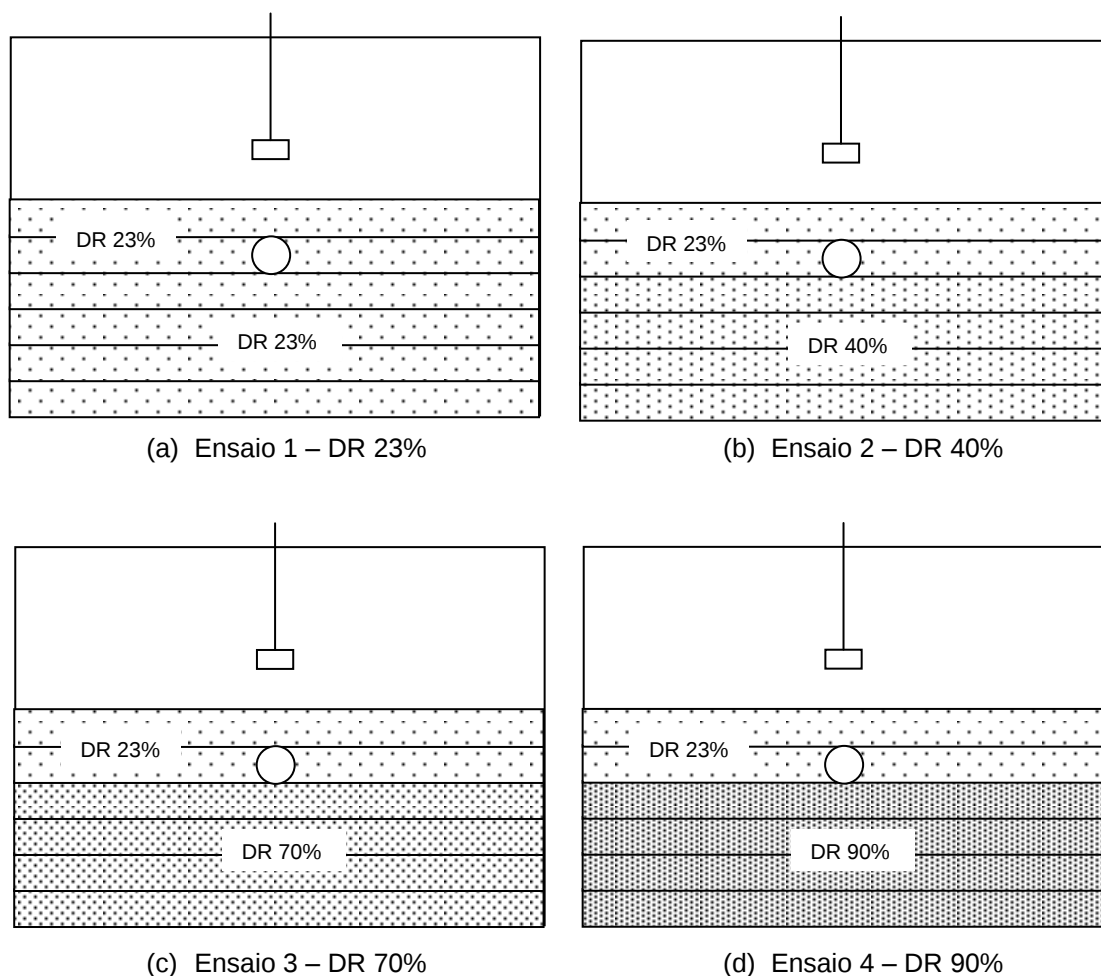
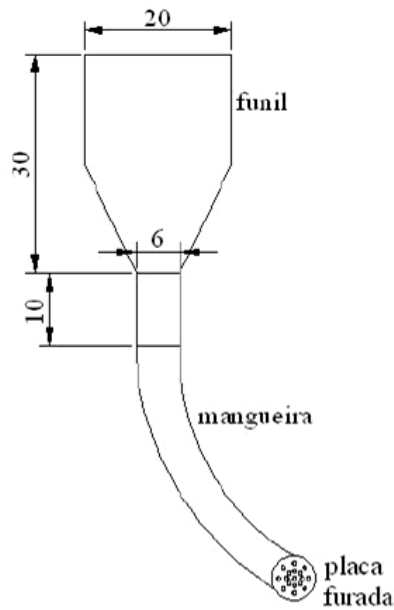


Figura 3.23: Esquema de montagem das Densidades Relativas de solo no ensaio.

O pluviador é composto por um funil de alimentação do material e neste funil é conectada uma mangueira flexível por onde o material escoar por gravidade. Na extremidade desta mangueira é conectado um bocal com tampa perfurada. A chuva de areia é distribuída uniformemente em camadas dentro da caixa teste.



(a) Esquema do Pluviador



(b) Vista do Pluviador

Figura 3.24: Pluviador (Santiago, 2010).

O preenchimento foi feito em camadas de 50 mm e com uma altura de queda de acordo com a densidade requerida. Para os ensaios foram utilizadas quatro (4) densidades diferentes para a camada de apoio e para cada densidade foi adotada uma altura de queda baseada na curva de calibração apresentada por Santiago (2010) onde são relacionadas as alturas de queda e as densidades relativas obtidas (Figura 3.25).

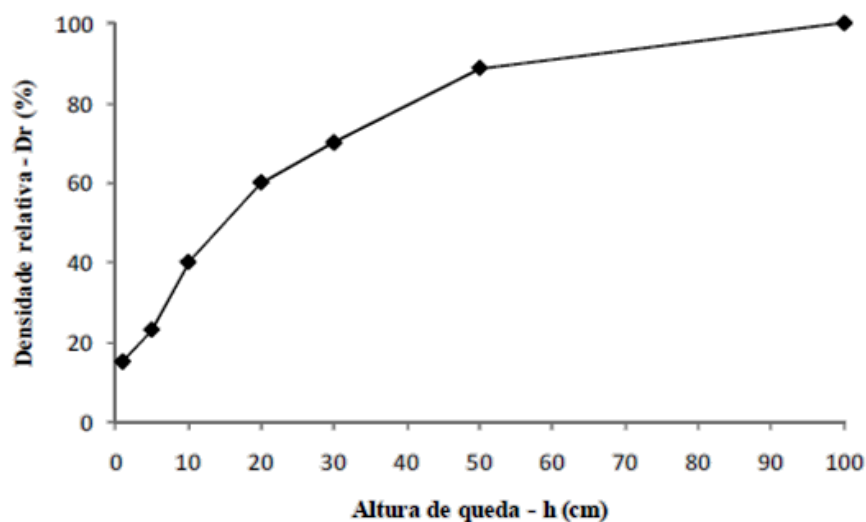
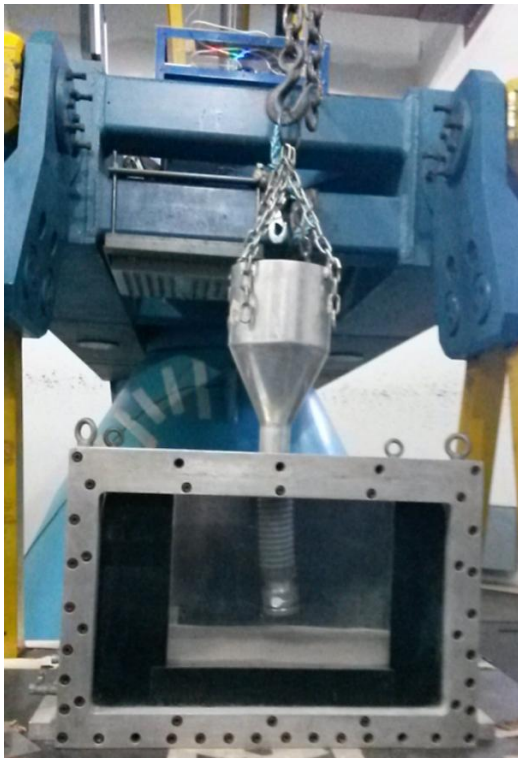


Figura 3.25: Curva de calibração do pluviador com areia IPT (Santiago, 2010).

A pluviação do solo na caixa teste foi executada com a caixa posicionada na plataforma da centrífuga. O processo de pluviação do solo foi feito em camadas de 50 mm para as quais, havia um determinado peso de solo a ser pluviado. Como descrito anteriormente, a pluviação é feita com alturas de queda bem definidas para se obter a densidade desejada do solo. À medida que a espessura da camada de solo aumentava, o pluviador era erguido para se manter em uma altura de queda constante no processo. O pluviador foi pendurado num equipamento de içamento de cargas (girafa hidráulica), o que permitiu a liberdade de movimentos durante toda a pluviação. Uma imagem durante o processo de pluviação é apresentada na Figura 3.26.



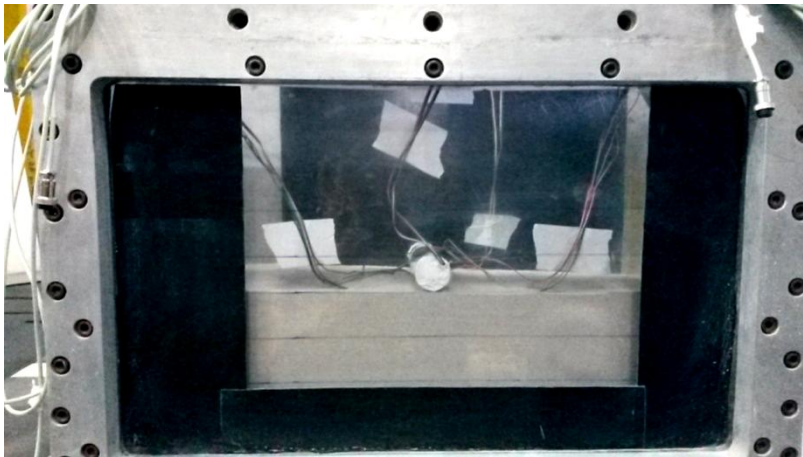
(a) Visão geral (altura de pluviação de 10 cm)



(b) Detalhe da “chuva” de areia (altura de pluviação de 50 cm)

Figura 3.26: Pluviação.

Na Figura 3.27 é apresentado o duto instalado na cota de apoio indicada anteriormente, e na Figura 3.28 é apresentada uma visão geral do modelo montado e preparado para ensaio.



(a) Visão geral



(b) Detalhe

Figura 3.27: Duto assentado na areia.

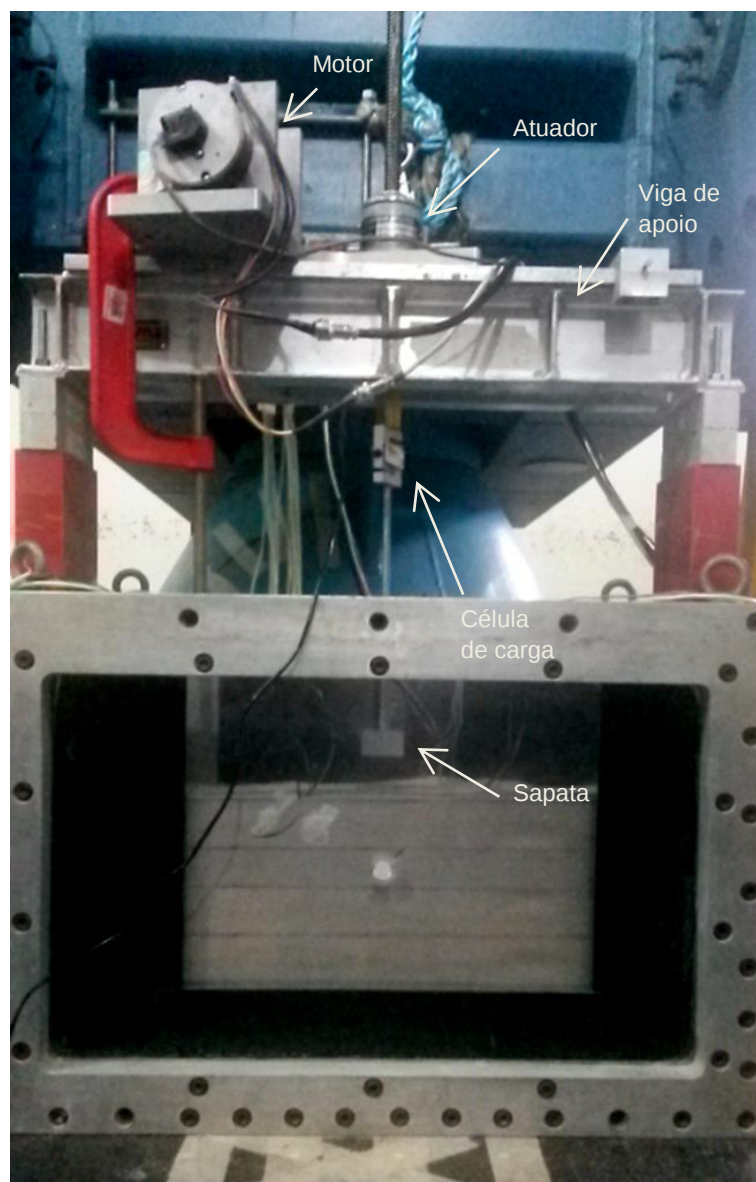


Figura 3.28: Modelo pronto para ensaio.

3.3.4. Apresentação dos Ensaios

Os ensaios de carregamento estático a 1g foram realizados em dutos de alumínio embutidos em areia, apoiados em camada de 20 cm de altura.

Quatro ensaios foram realizados. Cada um deles com uma densidade relativa da base de apoio do duto diferente, conforme apresentado na Tabela 3.2 abaixo. Para todos os ensaios, a camada de preenchimento lateral e a camada superior onde atua a sapata possuía densidade relativa de 23%.

Tabela 3.2: Resumo dos ensaios realizados

Ensaio nº	Densidade relativa da base de apoio do duto
1	23%
2	40%
3	70%
4	90%

A carga na sapata foi aplicada por um atuador servo passo controlado a uma velocidade constante de 0,5 mm/s.

O critério de parada da aplicação da carga foi definido em função da capacidade suportada pela célula de carga (500 N). Portanto, quando a leitura da carga aplicada, visualizada no programa, chegava a um valor próximo de 500 N, o ensaio era manualmente interrompido.

Importante ressaltar que toda instrumentação utilizada foi zerada antes do início de cada ensaio propriamente dito.

Ao final de cada ensaio, o programa exportou um arquivo com as grandezas lidas pela instrumentação (célula de carga, rosetas e extensômetros do *Clip-Gauge*) em função do tempo decorrido nos ensaios.

CAPÍTULO 4

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios executados a 1g e suas análises, com intuito de se obter uma metodologia de ensaio, conhecimento e comportamento do *Clip Gauge* frente ao mecanismo de transferência de carga solo/duto. Para todos os ensaios são apresentados os gráficos obtidos através do software de aquisição de dados *LabVIEW*. Os gráficos foram gerados com base nos diversos pontos aquisitados através do atuador servo-controlado, da célula de carga, das rosetas com *strain-gages* instalados no exterior do duto e dos *strain-gages* instalados no *Clip-Gauge*.

Os resultados obtidos são apresentados em gráficos que relacionam a carga vs. a deformação de cada *strain-gage* (duto e *clip-gauge*), onde o zero da abscissa corresponde ao início do ensaio. É importante salientar que as deformações medidas são única e exclusivamente devidas à carga aplicada já que os valores de toda instrumentação eram zerados ao início da aplicação da carga. Assim, a influência do solo nas deformações não foi considerada.

4.1. Resultados da instrumentação externa ao duto (Rosetas)

Para esse grupo de resultados, são apresentados os gráficos “Força (N) vs. Deformação (*strain*)” para cada uma das quatro (4) rosetas coladas no duto, para cada densidade relativa da base de apoio.

Cada roseta apresenta três (3) *strain-gages* sendo um na posição longitudinal ao duto (1- longitudinal), outro na posição transversal ao duto (2 – transversal) e o terceiro à 45° com o duto (3 – à 45°), conforme identificado em cada gráfico.

A localização de cada roseta em relação ao duto também está apresentada em seu respectivo gráfico, sendo a roseta 1 localizada no topo do duto, roseta 2 a 90°, roseta 3 a 180° e roseta 4 a 270°.

Para todos os quatro (4) ensaios, a instrumentação apresentou resultados similares. Os *strain-gages* longitudinais indicam que há uma flexão no duto no local de aplicação da carga. Já os *strain-gages* transversais

mostram que na posição superior e inferior do duto ocorre uma deformação de compressão enquanto nas posições laterais identificam-se deformações de tração (expansão do diâmetro), caracterizando a ovalização do duto. Os *strain-gages* posicionados à 45° apresentam uma composição das deformações longitudinais e transversais, corroborando as análises realizadas.

4.1.1. Densidade Relativa da Base de 23% (DR 23%)

Neste ensaio, na aquisição de dados da roseta 1, o *strain-gage* 3 (a 45°) apresentou um resultado incoerente que não se repetiu nas outras rosetas desse ensaio bem como nos outros ensaios. Assim, os gráficos apresentados abaixo não incluirão uma análise do *strain-gage* 3, para facilitar a comparação com as outras rosetas. Além disto, na roseta 4, o *strain-gage* 3 (a 45°) não funcionou.

Percebe-se que em três (3) rosetas analisadas, a deformação máxima na direção longitudinal ao duto manteve-se na mesma ordem de grandeza (em torno de 5×10^{-5} strain - tração), sendo diferente na roseta 1 (topo do duto), apresentando valor na ordem de $1,2 \times 10^{-4}$ strain - compressão. Esses resultados sugerem que, para DR23%, apenas o local de aplicação da carga sofre uma deformação de flexão no sentido longitudinal do duto.

Já nas deformações na direção transversal ao duto, percebe-se um comportamento diferente. As rosetas 1 e 3 (superior e inferior ao duto) apresentam resultados de compressão, sendo o valor no topo do duto ligeiramente maior que o encontrado na base do duto, enquanto as rosetas 2 e 4 apresentam resultados de tração (expansão). Esses resultados são coerentes com a teoria de deformação/deflexão dos dutos, que afirma que os dutos sofrem um processo de ovalização com a aplicação de cargas pontuais. Além do exposto, a base do duto tendo a se deformar menos que o topo pois existe o solo de apoio impedindo um pouco essas deformações.

As deformações medidas a 45° no duto ficaram impossibilitadas de maiores análises devido aos problemas apresentado em duas rosetas.

Os resultados desse ensaio são apresentados nos gráficos das Figuras 4.1 a 4.4.

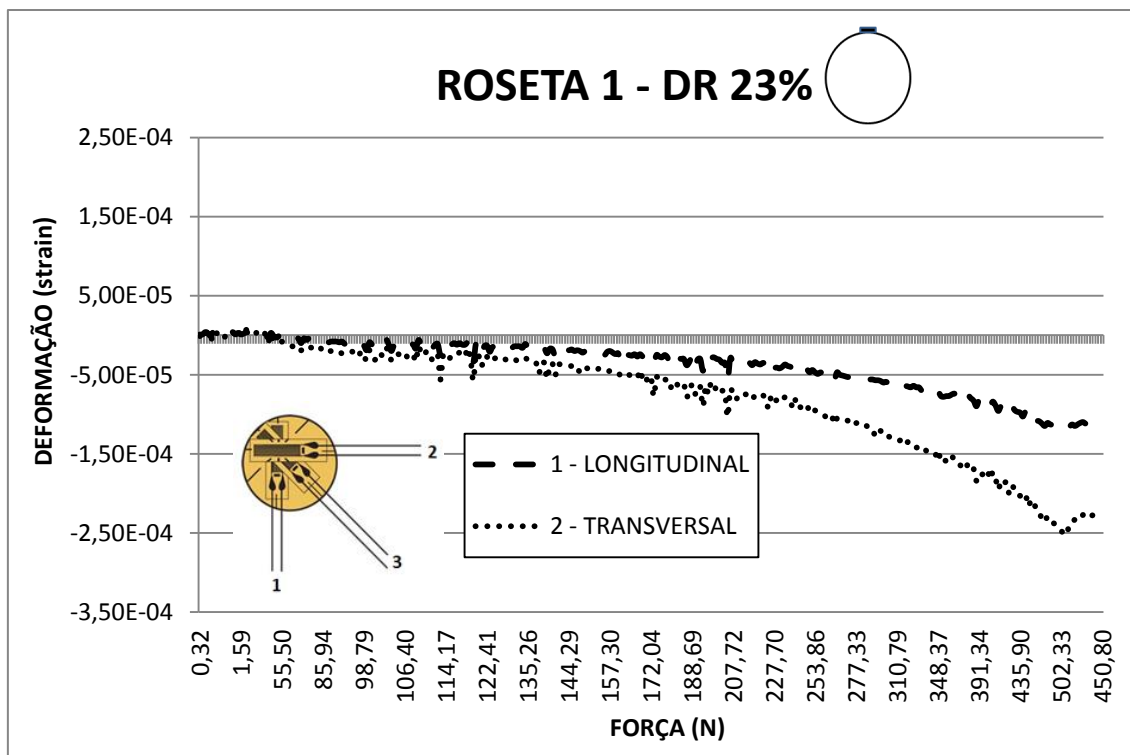


Figura 4.1: Resultados Roseta 1 – DR 23%.

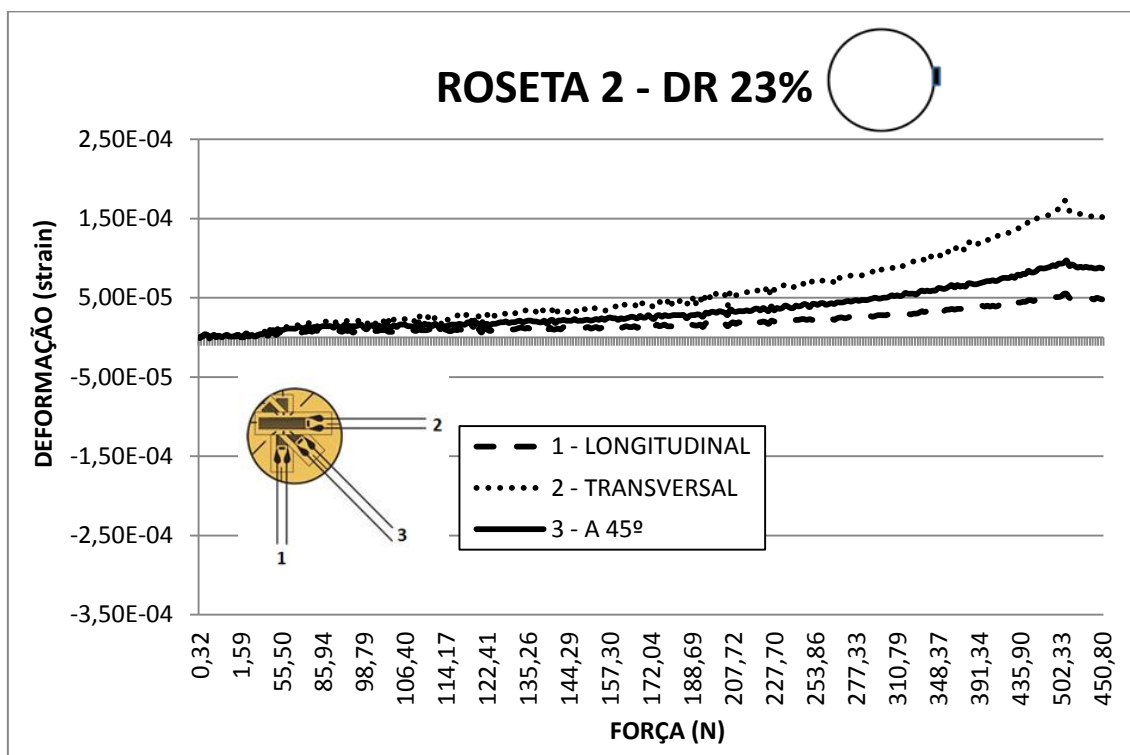


Figura 4.2: Resultados Roseta 2 – DR 23%.

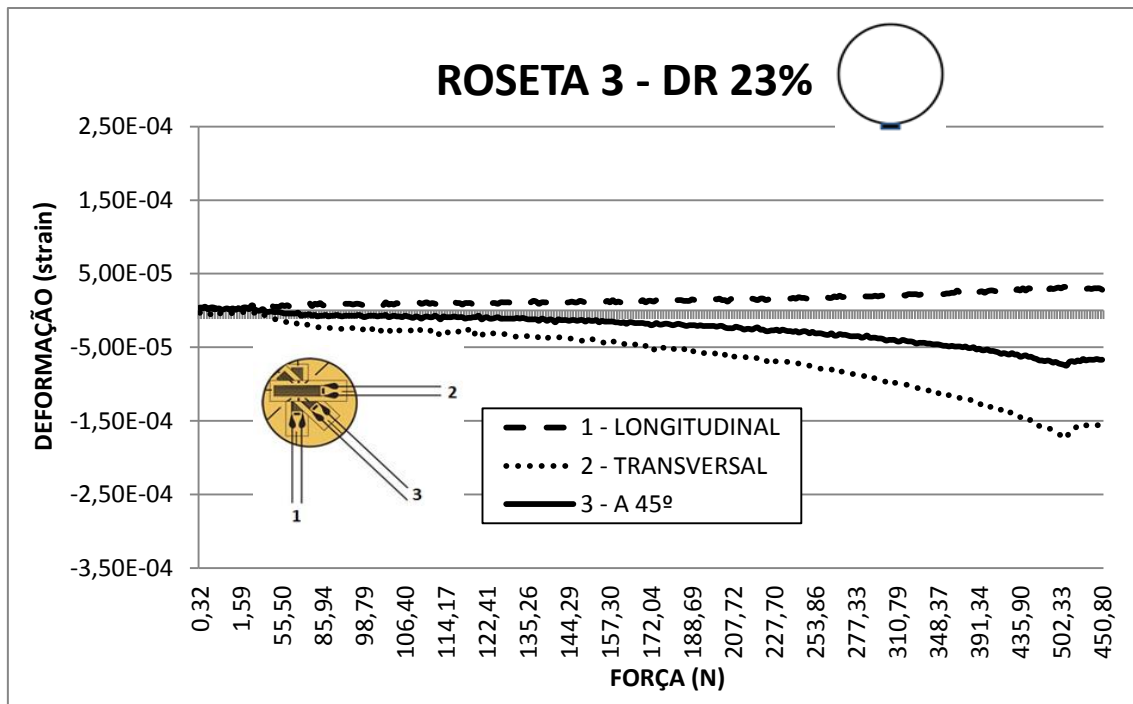


Figura 4.3: Resultados Roseta 3 – DR 23%.

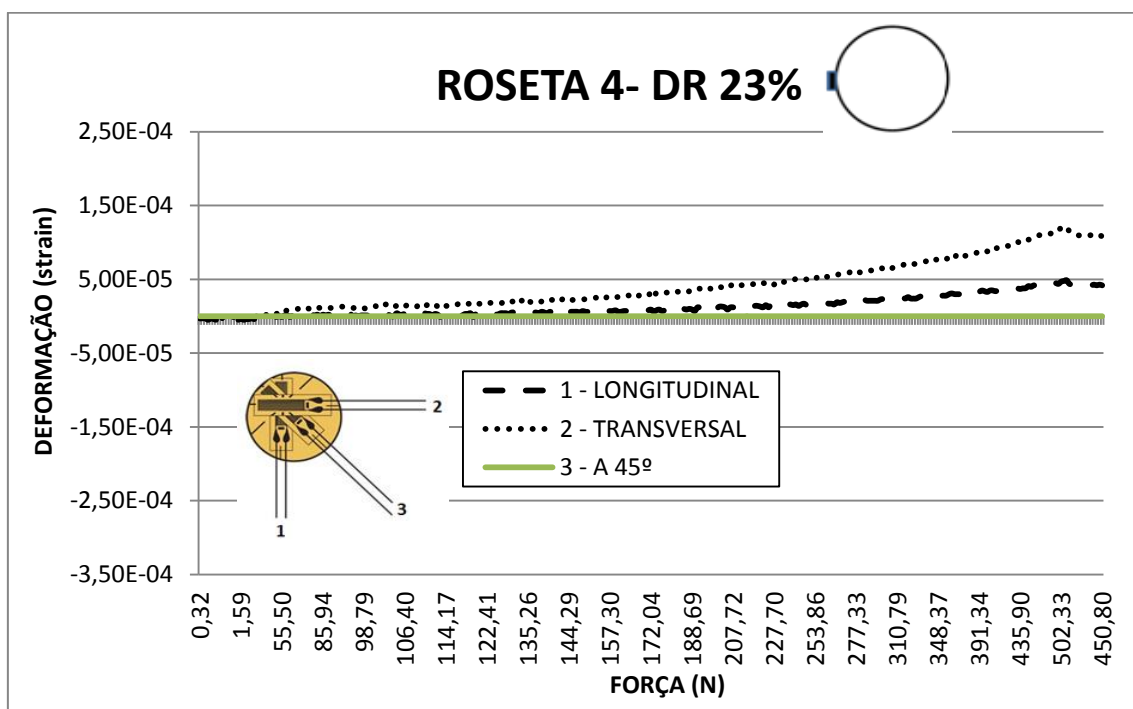


Figura 4.4: Resultados Roseta 4 – DR 23%.

4.1.2. Densidade Relativa da Base de 40% (DR 40%)

Neste ensaio, na aquisição de dados da roseta 1, o *strain-gage* 3 (a 45°) apresentou um resultado que indica que o “zero” desse *strain-gage* não

funcionou corretamente. Desta forma, ele não será utilizado nas análises desse ensaio.

Os resultados das deformações na direção longitudinal ao duto indicam um comportamento similar ao encontrado no ensaio de DR23%. Em três (3) rosetas analisadas, a deformação na direção longitudinal ao duto manteve-se na mesma ordem de grandeza (em torno de 5×10^{-5} strain - tração), sendo diferente na roseta 1 (topo do duto), apresentando valor na ordem de $1,5 \times 10^{-4}$ strain - compressão. Esses resultados sugerem que, assim como para o ensaio com DR23%, no ensaio com DR40% apenas o local de aplicação da carga sofre uma deformação de flexão no sentido longitudinal do duto.

Para as deformações na direção transversal ao duto, o comportamento se mantém similar ao ensaio de DR23%, com deformações de compressão no topo e na base do duto e deformações de tração (expansão) nas laterais do duto, confirmando que a teoria da ovalização dos dutos com a aplicação de carga pontual também se repete com o aumento da densidade da base de apoio do duto.

Os gráficos desse ensaio são apresentados nas Figuras 4.5 a 4.8.

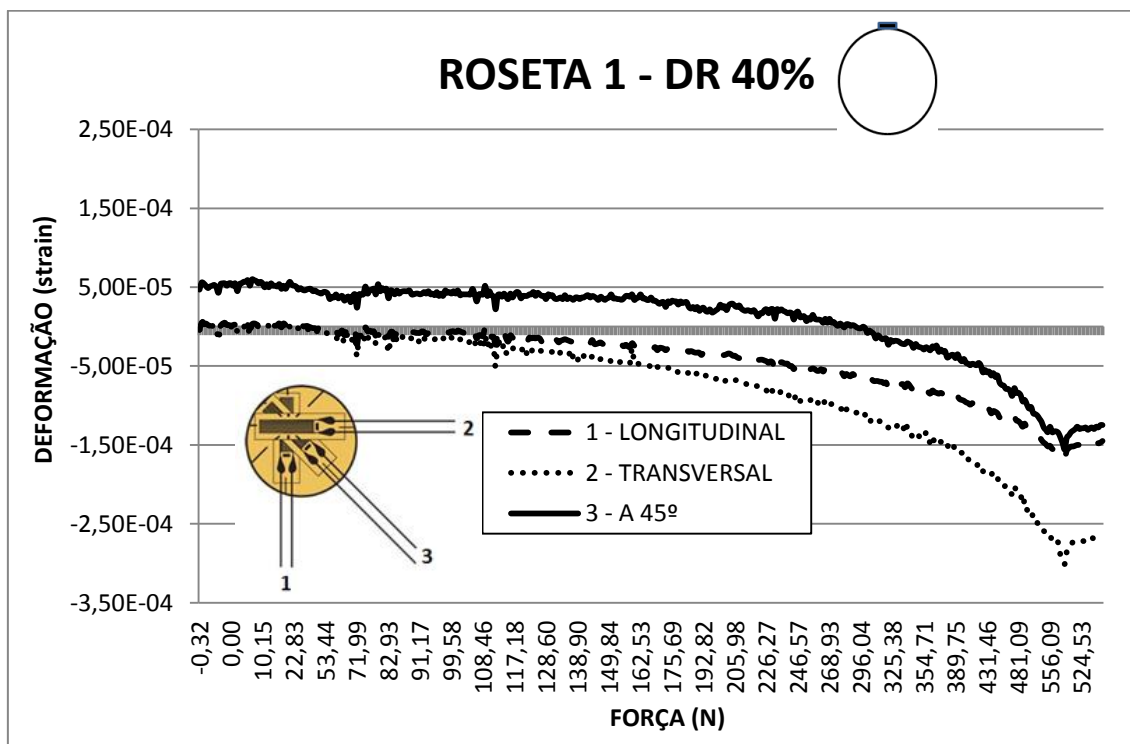


Figura 4.5: Resultados Roseta 1 – DR 40%.

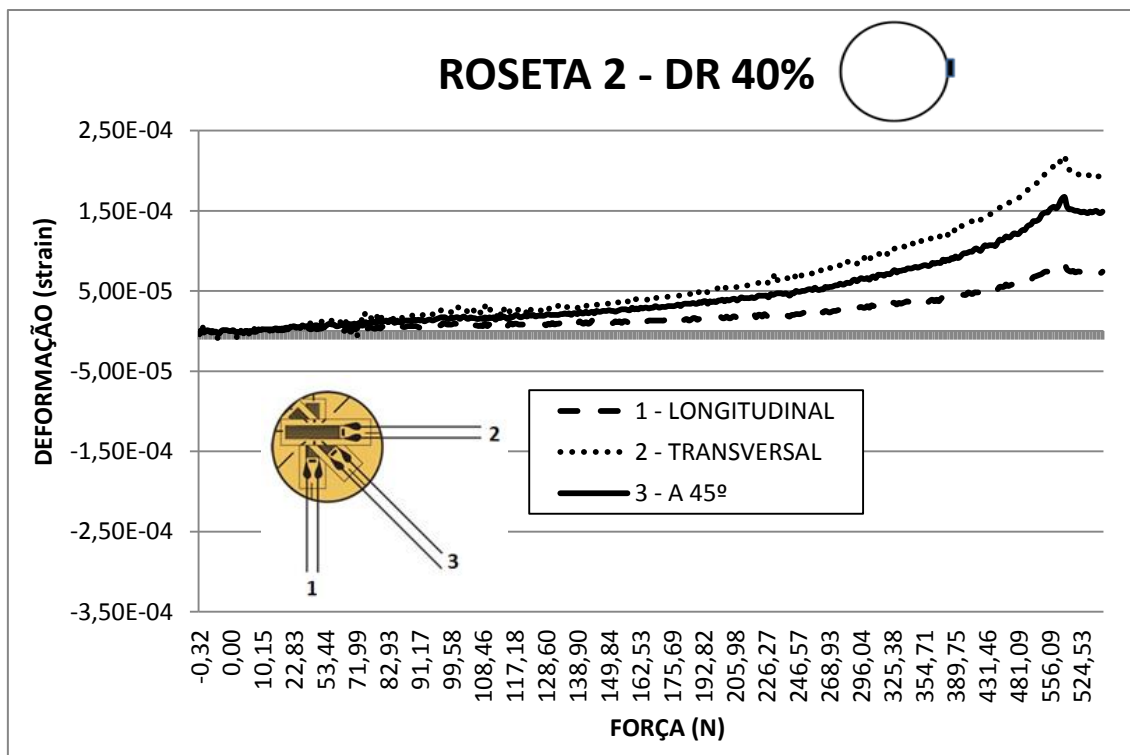


Figura 4.6: Resultados Roseta 2 – DR 40%.

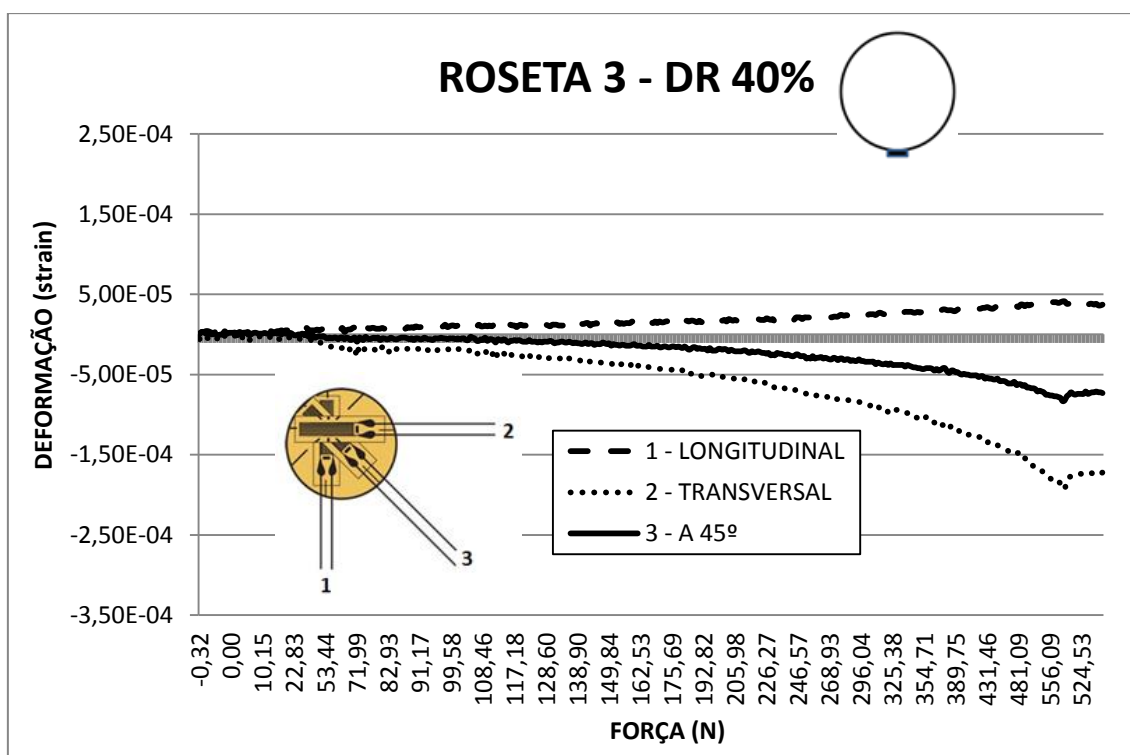


Figura 4.7: Resultados Roseta 3 – DR 40%.

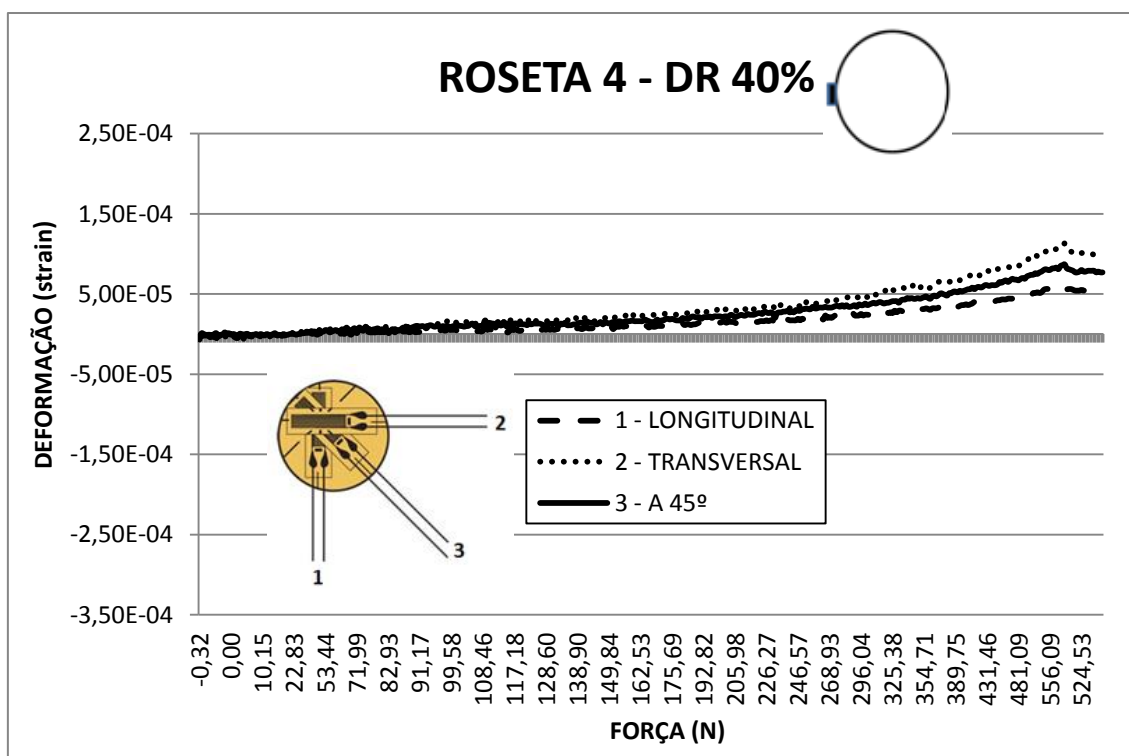


Figura 4.8: Resultados Roseta 4 – DR 40%.

4.1.3. Densidade Relativa da Base de 70% (DR 70%)

Os resultados das deformações tanto na direção longitudinal ao duto quanto na direção transversal ao duto apresentam um comportamento similar aos resultados apresentados nos ensaios anteriores (DR 23% e DR40%), sugerindo que, mesmo que a densidade da base aumente, o comportamento frente às deformações segue o mesmo padrão: flexão longitudinal no local de aplicação da carga e ovalização ao redor do duto.

Os gráficos desse ensaio são apresentados nas Figuras 4.9 a 4.12.

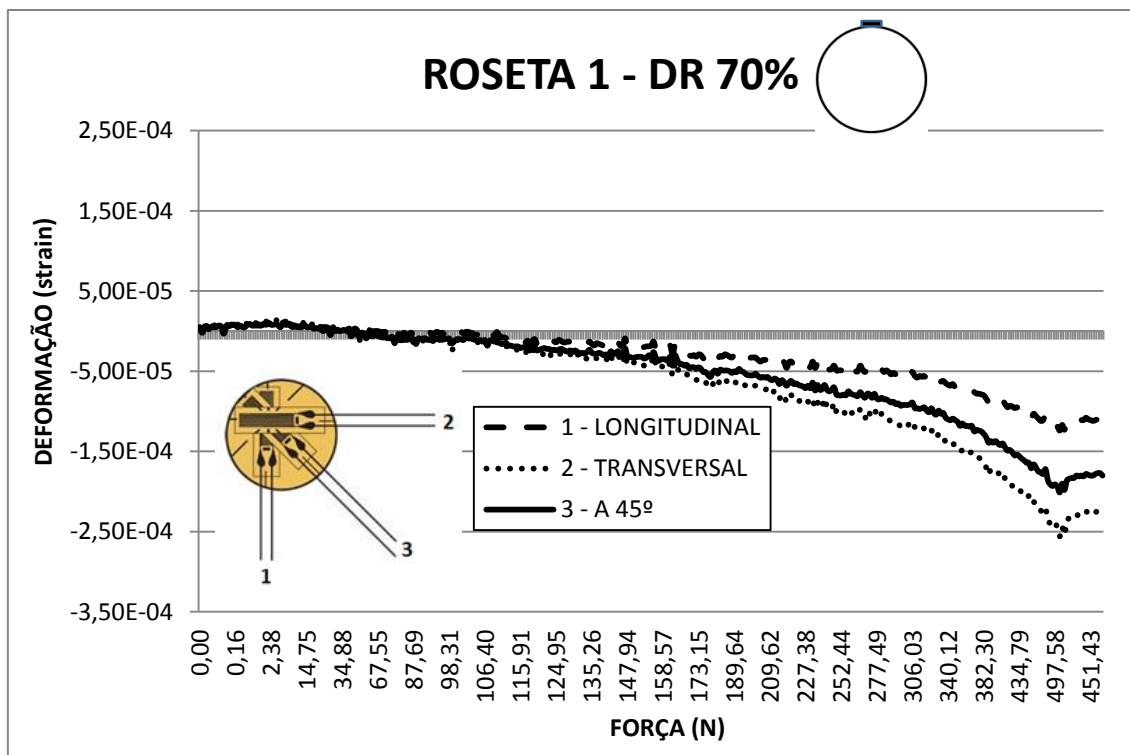


Figura 4.9: Resultados Roseta 1 – DR 70%.

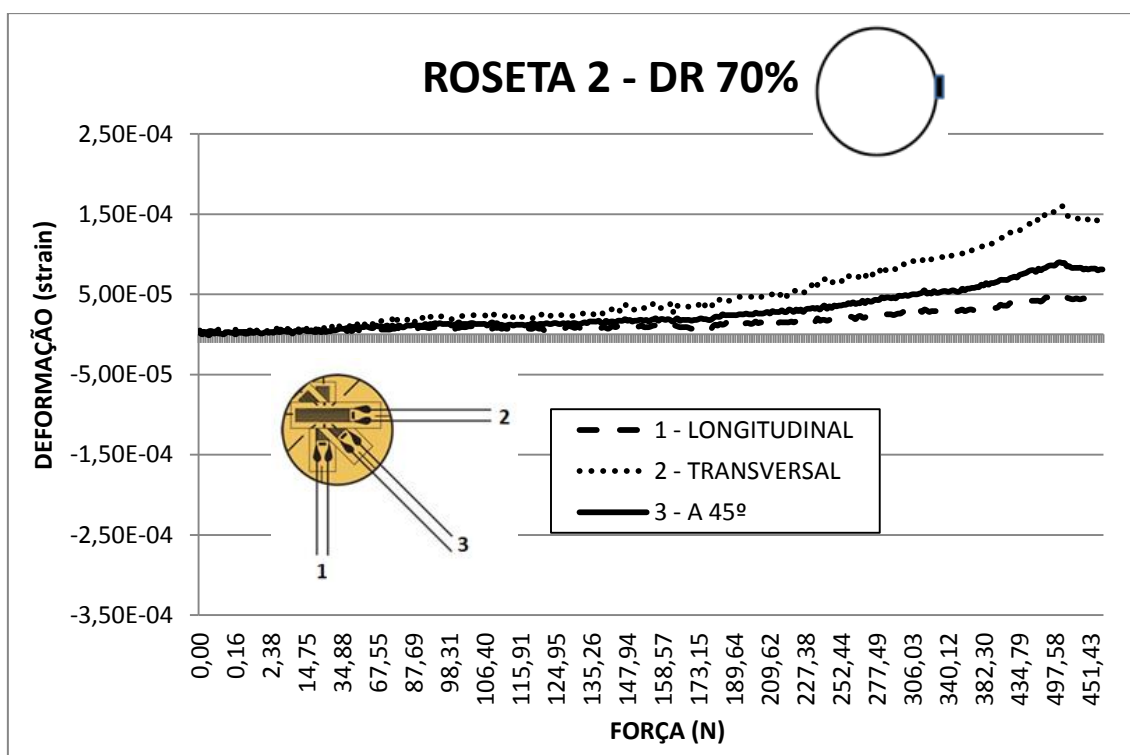


Figura 4.10: Resultados Roseta 2 – DR 70%.

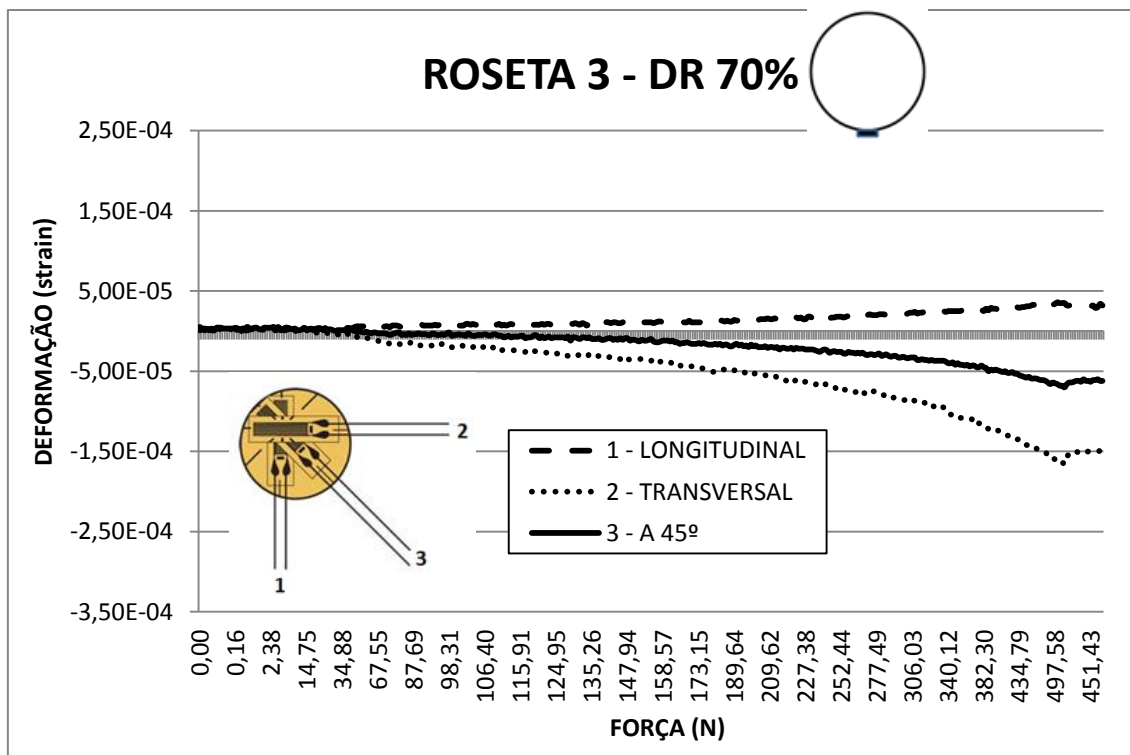


Figura 4.11: Resultados Roseta 3 – DR 70%.

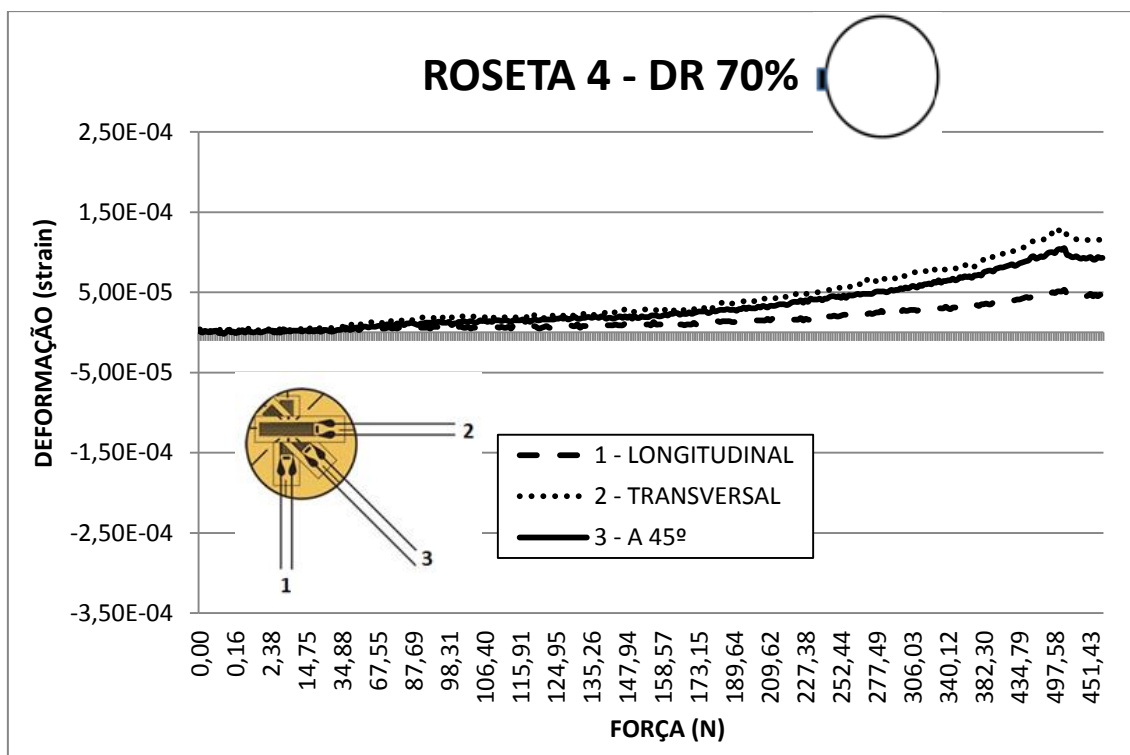


Figura 4.12: Resultados Roseta 4 – DR 70%.

4.1.4. Densidade Relativa da Base de 90% (DR 90%)

Os resultados desse ensaio mantiveram o mesmo padrão dos ensaios anteriores indicando que o comportamento do duto mantém o que diz a teoria da ovalização independente da densidade de sua base de apoio.

Os gráficos desse ensaio são apresentados nas Figuras 4.13 a 4.16.

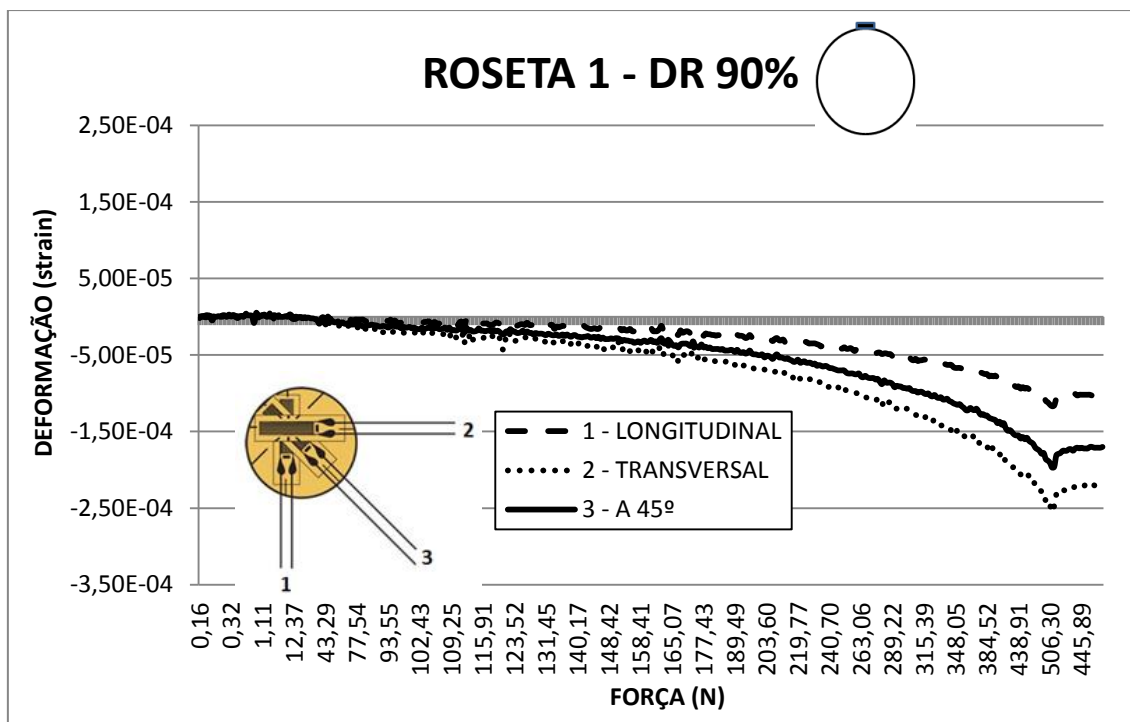


Figura 4.13: Resultados Roseta 1 – DR 90%.

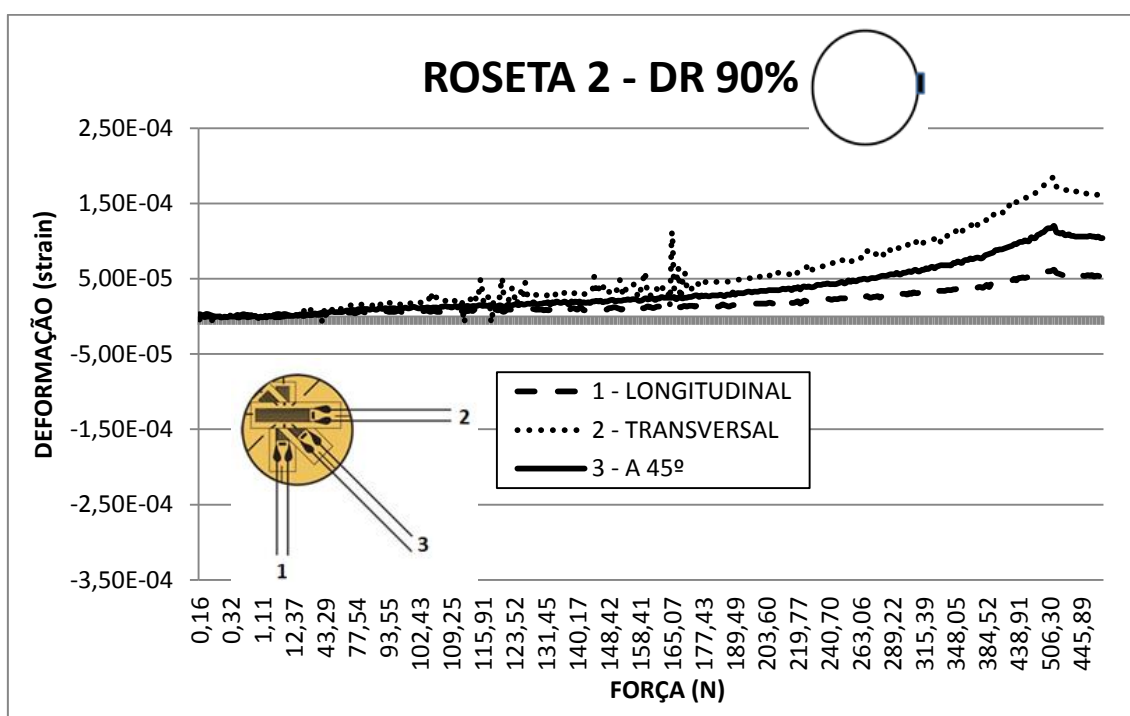


Figura 4.14: Resultados Roseta 2 – DR 90%.

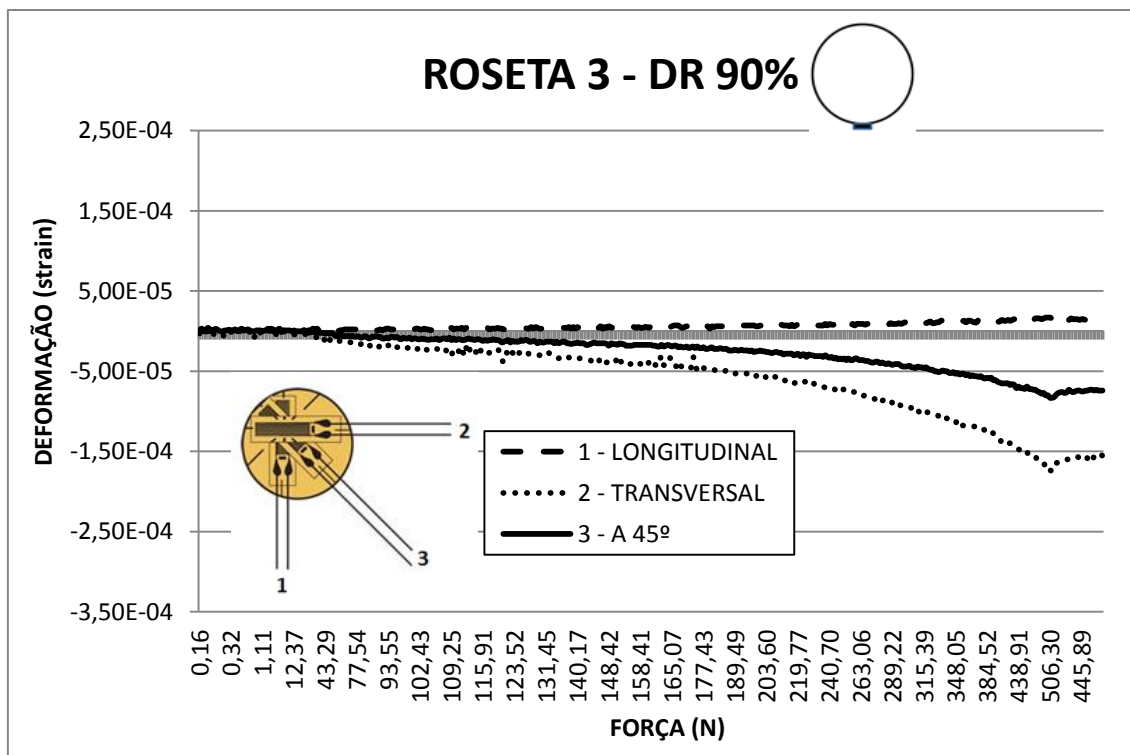


Figura 4.15: Resultados Roseta 3 – DR 90%.

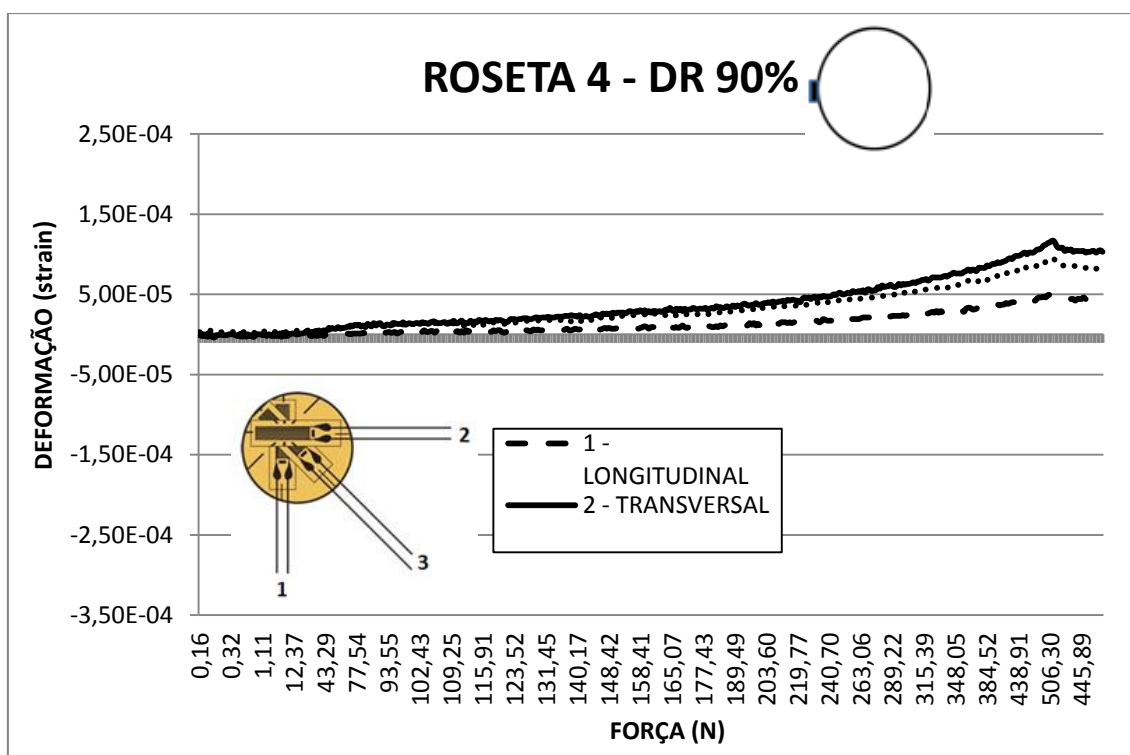


Figura 4.16: Resultados Roseta 4 – DR 90%.

4.2. Resultados do *Clip Gauge*

Para esses resultados são apresentados os gráficos “Força (N) vs. Deslocamentos Medidos (mm)”, “Força (N) vs. Diâmetro (mm)” e “Força (N) vs. Deformação (%)”. Os deslocamentos em mm são lidos diretamente no programa.

Nos gráficos onde estão correlacionados os diâmetros, apresentam-se a variação de medidas dos diâmetros verticais e horizontais conforme a carga aumenta. Esses diâmetros foram calculados adicionando-se ao diâmetro inicial, as variações de deslocamento medidas. Esse procedimento de adição simples é possível, pois as leituras de deslocamento já foram programadas para saírem com os valores positivos ou negativos conforme o movimento seja de contração ou expansão.

Percebe-se que todos os ensaios apresentaram resultados satisfatórios, com o *clip-gauge* identificando o processo de ovalização já analisado nas deformações medidas com as rosetas. Porém, a ordem de grandeza das deformações é muito pequena devido ao ensaio ter sido realizado a 1g com carga máxima de 500N.

4.2.1. Densidade Relativa da Base de 23% (DR 23%)

Percebe-se que o *Clip Gauge* funcionou da maneira esperada, com as Placas 1 e 3 tendo deslocamentos de compressão e as placas 3 e 4 com deslocamentos de tração.

O gráfico dos diâmetros confirma o funcionamento coerente, mostrando que o diâmetro na direção horizontal aumentou enquanto na direção vertical diminuiu, confirmando a teoria da ovalização do duto.

Os gráficos desse ensaio são apresentados nas Figuras 4.17 a 4.19.

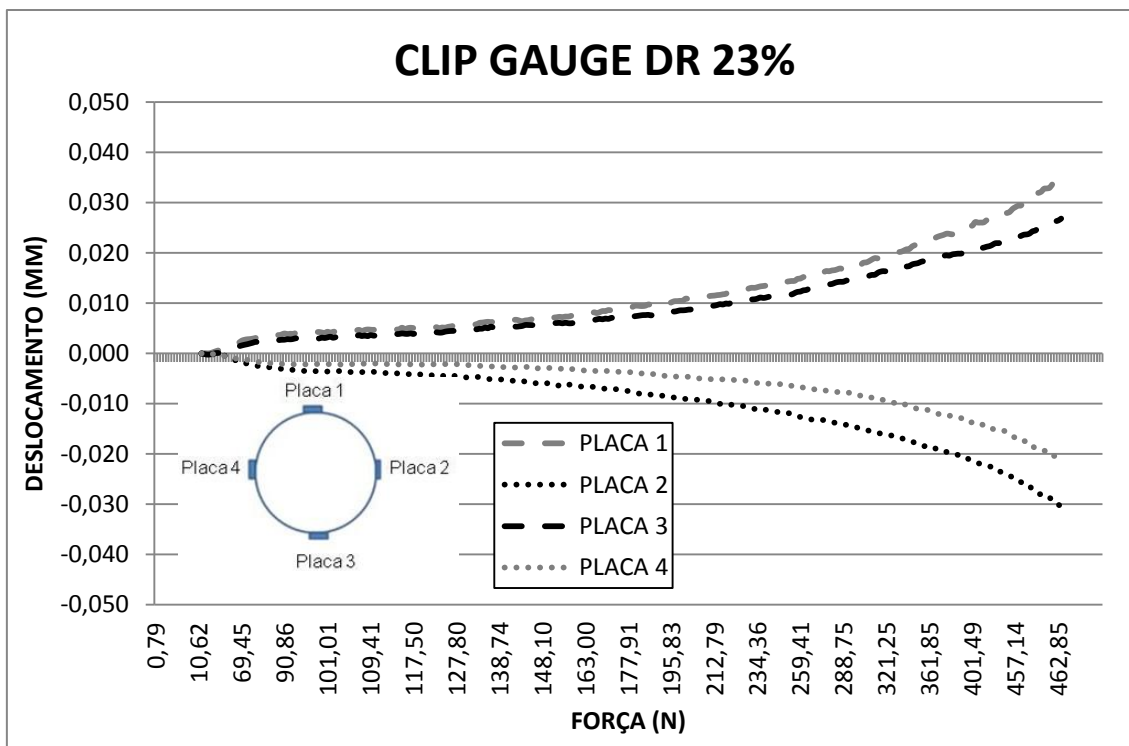


Figura 4.17: Deslocamentos do *Clip-Gauge* – DR 23%.

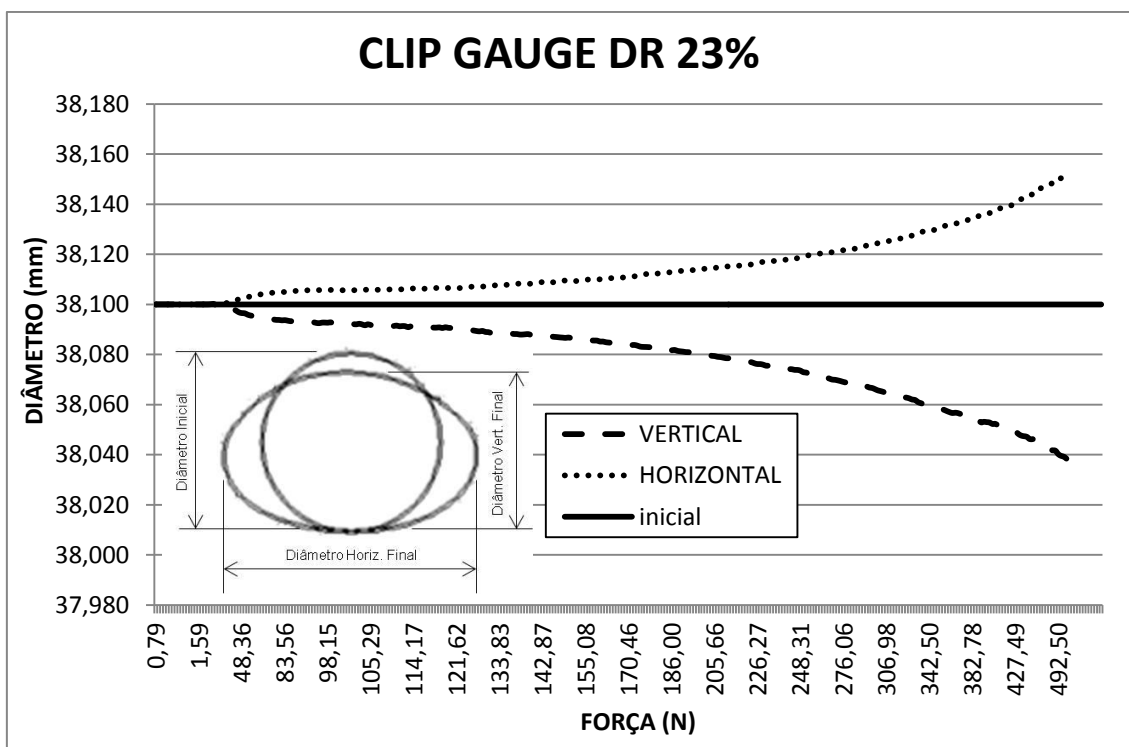


Figura 4.18: Variação de diâmetro do *Clip-Gauge* – DR 23%.

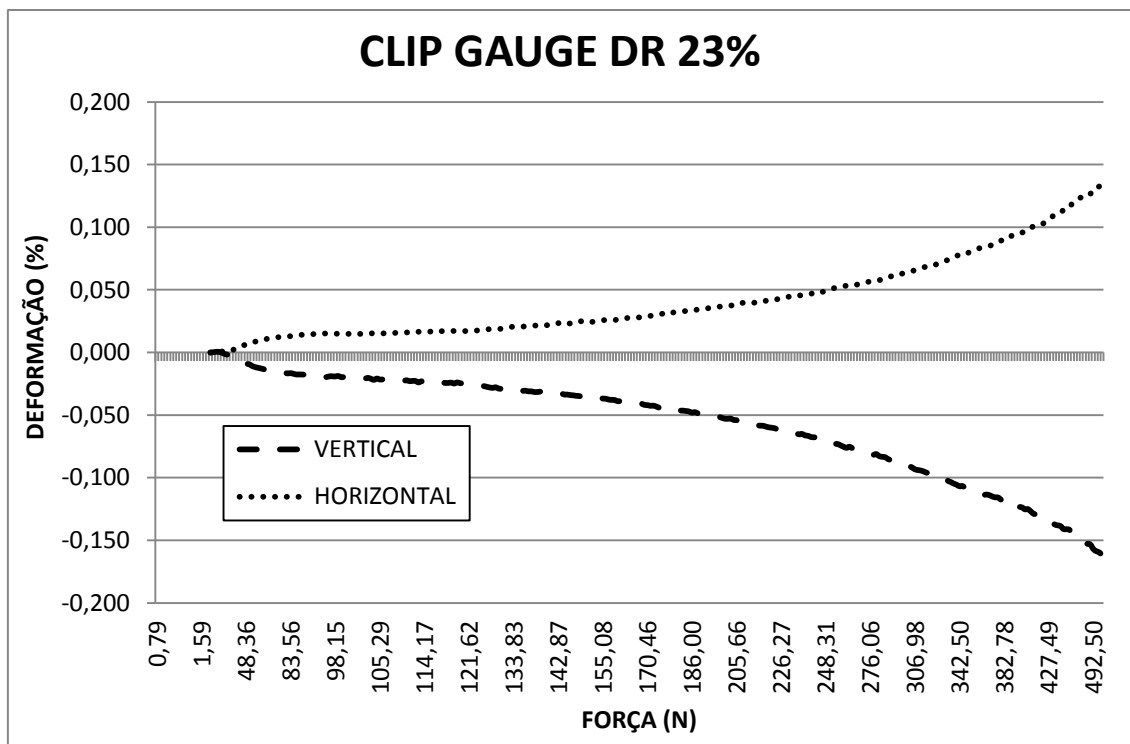


Figura 4.19: Deformações do *Clip-Gauge* – DR 23%.

4.2.2. Densidade Relativa da Base de 40% (DR 40%)

Para esse ensaio, o *Clip-Gauge* também apresentou comportamento coerente, com a diminuição do diâmetro vertical e aumento do diâmetro horizontal. Porém, assim como identificado no comportamento analisado com as rosetas, o deslocamento no topo do duto (placa 1) foi maior que o deslocamento na base do duto (placa 3), indicando que o solo da base de apoio apresenta maior resistência à deformação com o aumento de sua densidade relativa.

Nos cálculos da variação de diâmetro os resultados são coerentes, apresentando uma ovalização maior que a do ensaio anterior (com base mais fofa).

Os gráficos desse ensaio são apresentados nas Figuras 4.20 a 4.22.

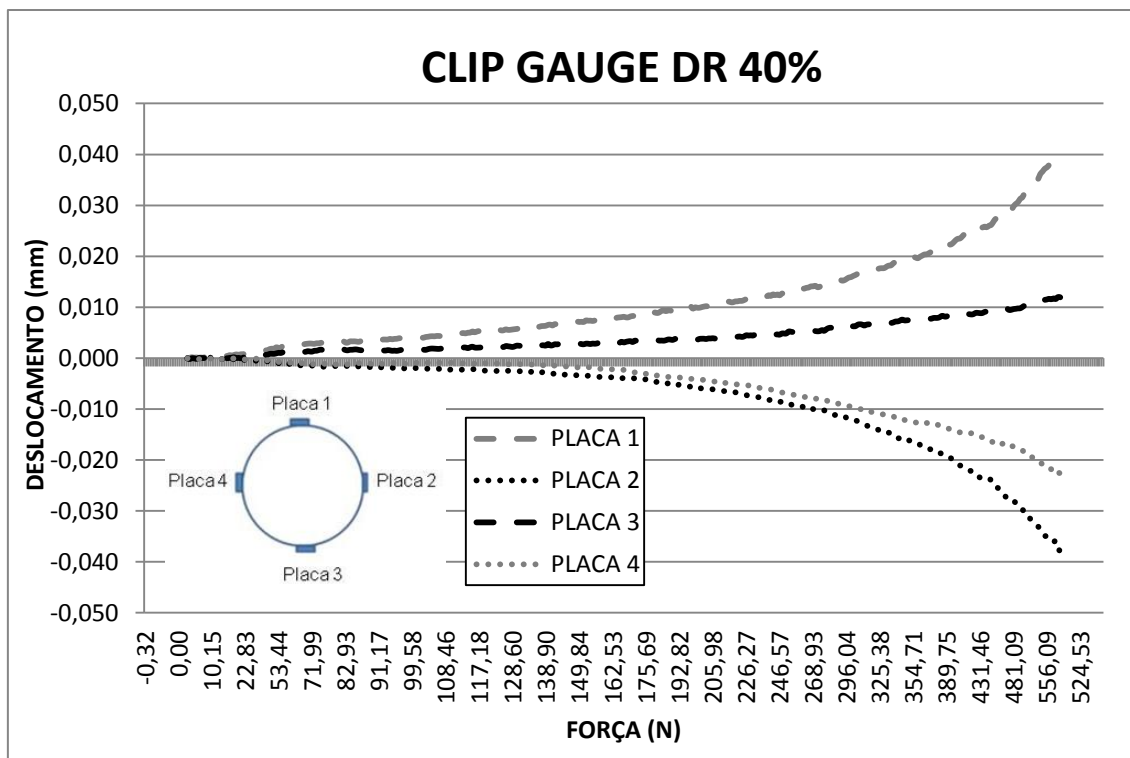


Figura 4.20: Deslocamentos do *Clip-Gauge* – DR 40%.

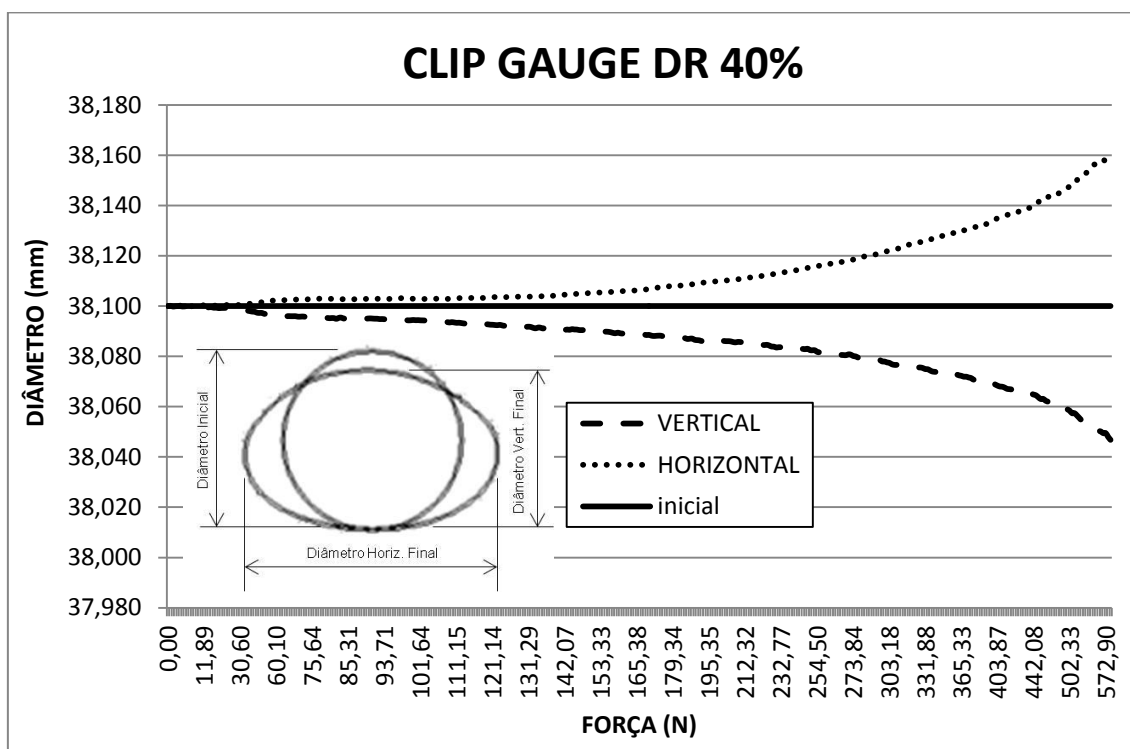


Figura 4.21: Variação de diâmetro do *Clip-Gauge* – DR 40%.

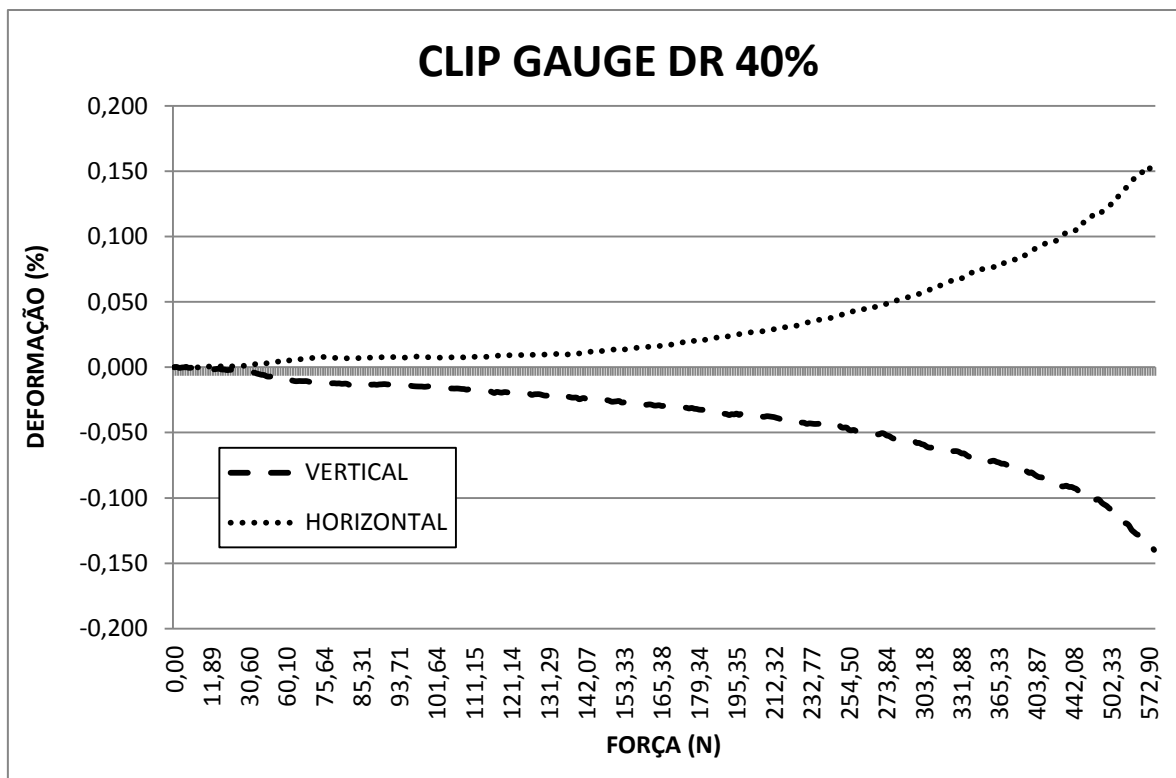


Figura 4.22: Deformações do *Clip-Gauge* – DR 40%.

4.2.3. Densidade Relativa da Base de 70% (DR 70%)

Novamente os resultados do *Clip-gauge* são compatíveis, confirmando a ovalização identificada pelas rosetas.

Os gráficos desse ensaio são apresentados nas Figuras 4.23 a 4.25.

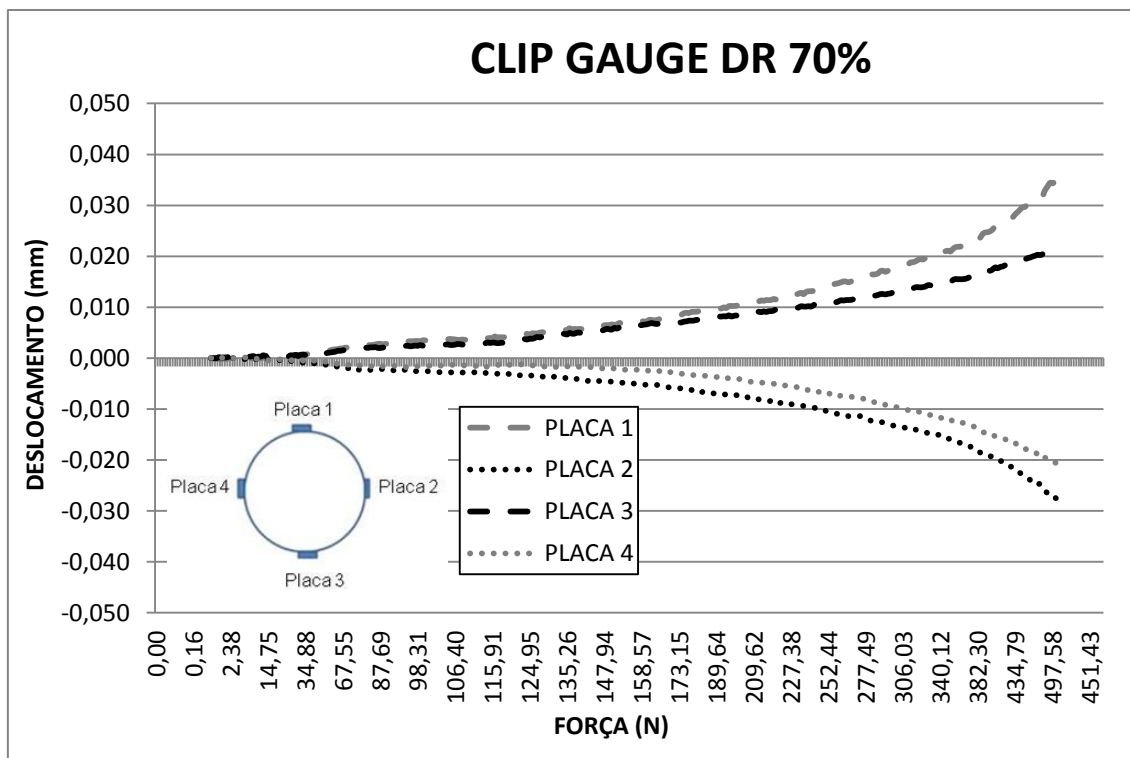


Figura 4.23: Deslocamentos do *Clip-Gauge* – DR 70%.

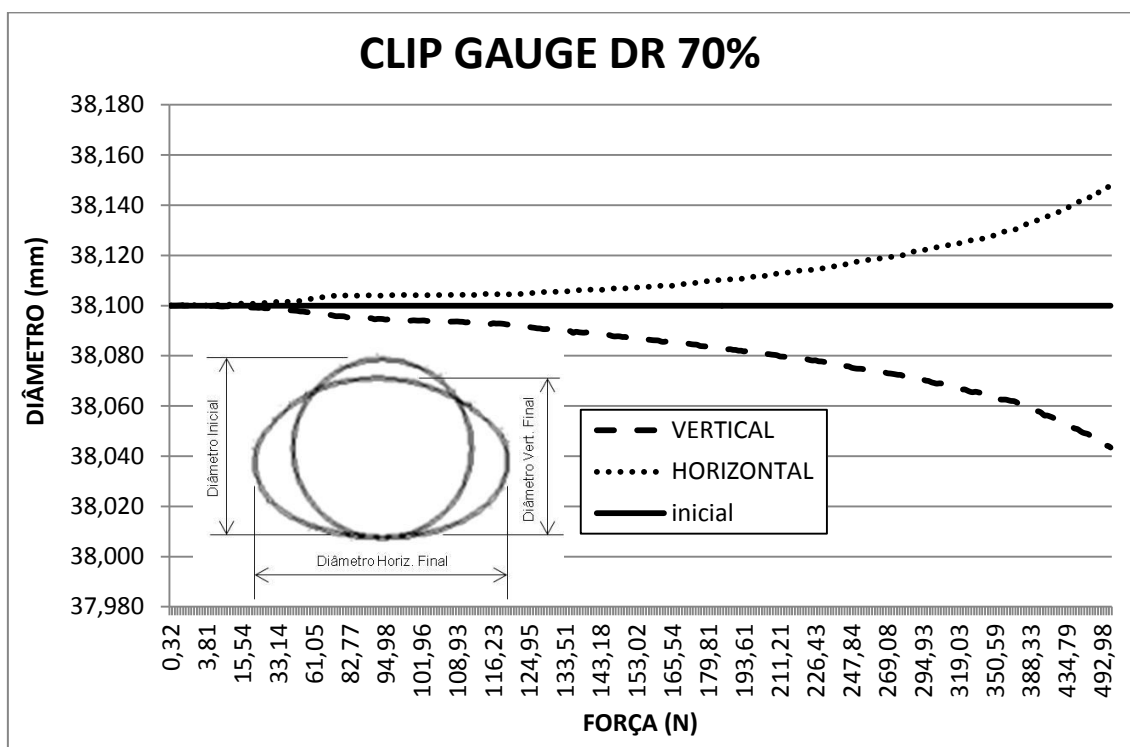


Figura 4.24: Variação de diâmetro do *Clip-Gauge* – DR 70%.

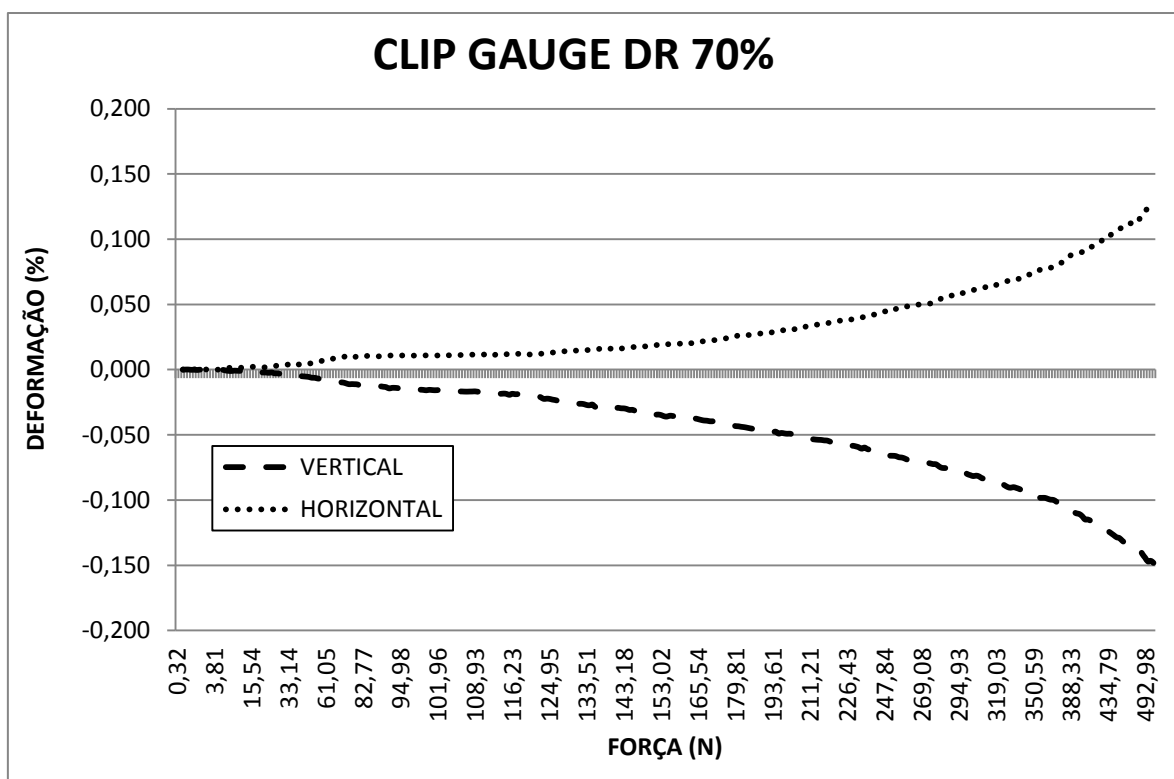


Figura 4.25: Deformações do *Clip-Gauge* – DR 70%.

4.2.4. Densidade Relativa da Base de 90% (DR 90%)

Os resultados aqui apresentados também apresentam comportamentos similares aos ensaios anteriores, comprovante a ovalização independente da variação da densidade relativa da base de apoio.

Os gráficos desse ensaio são apresentados nas Figuras 4.26 a 4.28.

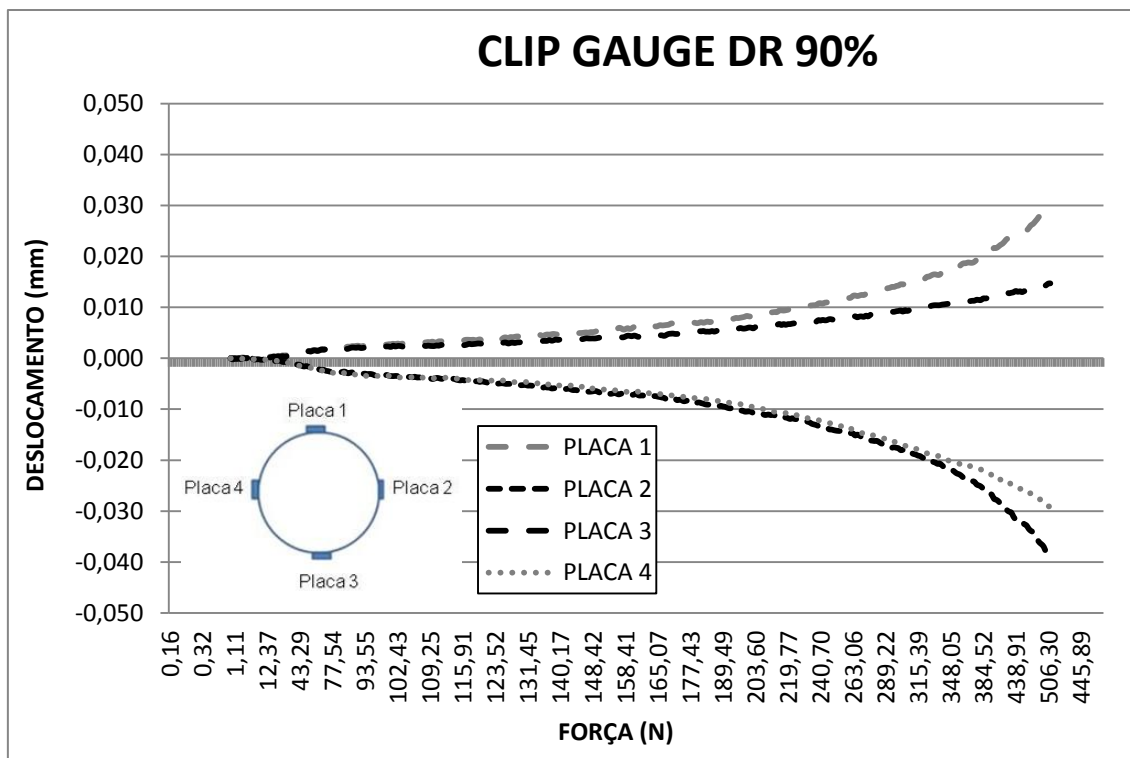


Figura 4.26: Deslocamentos do *Clip-Gauge* – DR 90%.

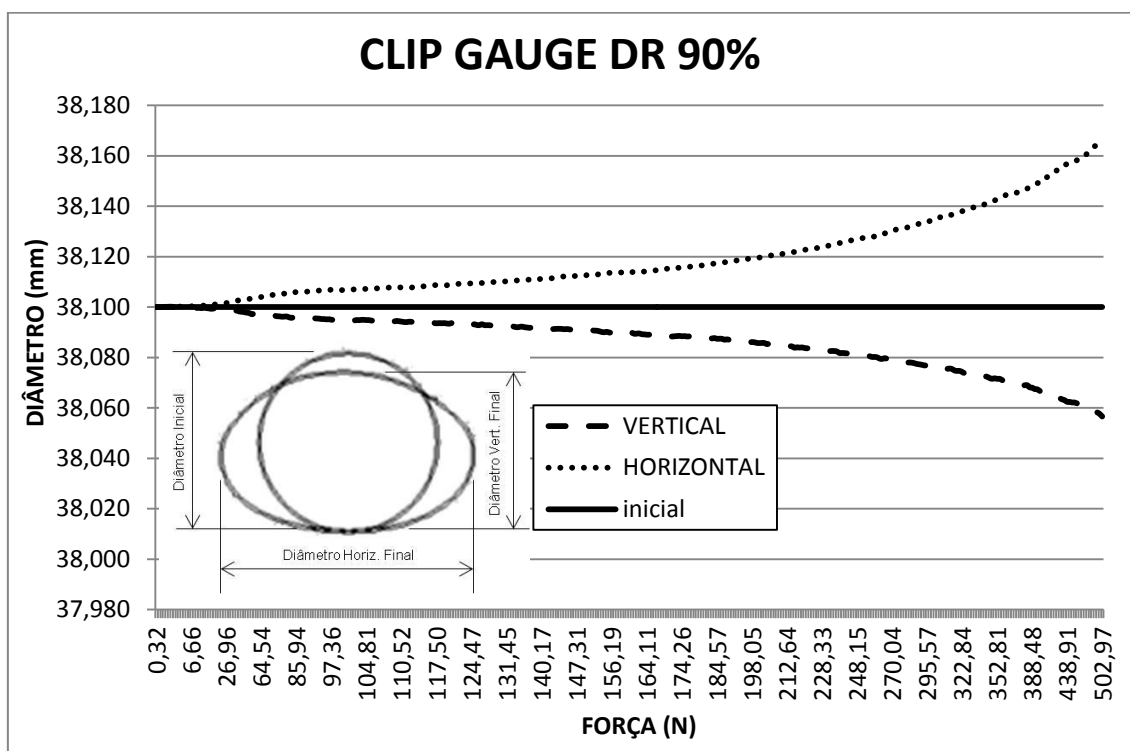


Figura 4.27: Variação de diâmetro do *Clip-Gauge* – DR 90%.

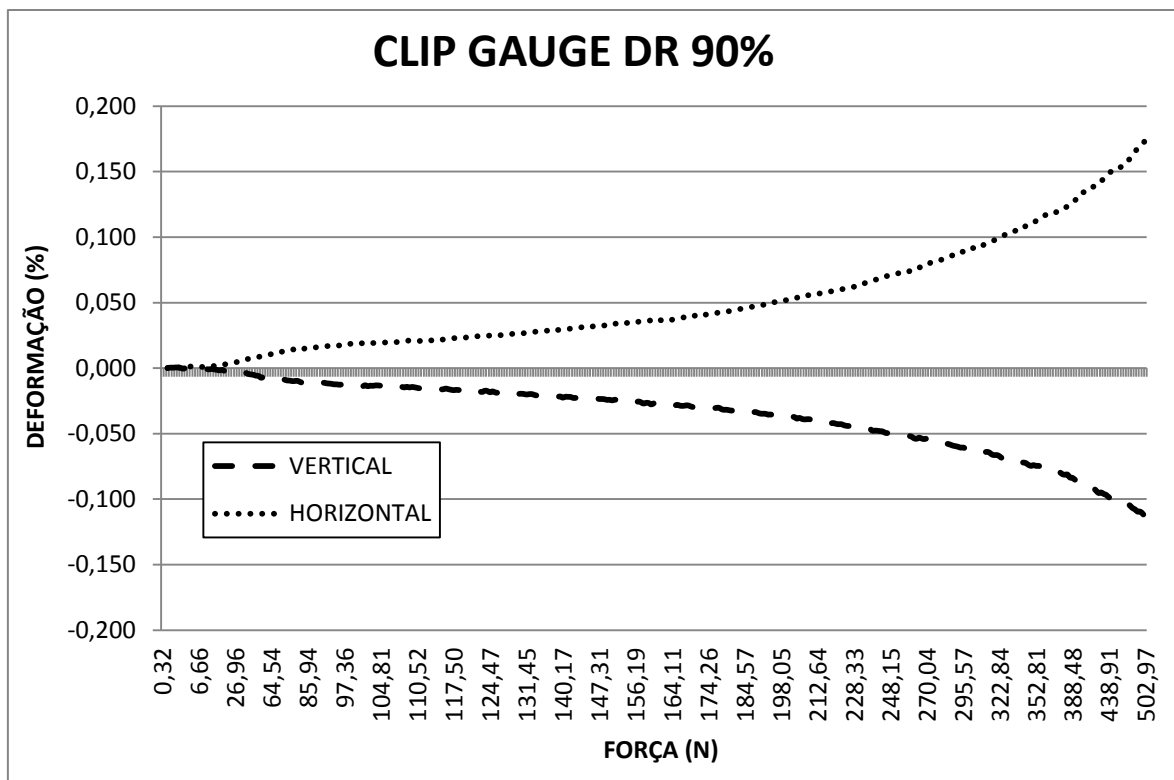


Figura 4.28: Deformações do *Clip-Gauge* – DR 90%.

4.3. Comparativos

Para fazer o comparativo da análise solo x duto com o carregamento, apresentam-se gráficos correlacionando as deformações com a densidade relativa da base de apoio do duto. Dessa forma, tem-se o gráfico “Força (N) vs. Deformação Vertical (%)” (Figura 4.29) e “Força (N) vs. Deformação Horizontal (%)” (Figura 4.30) para cada uma das quatro densidades relativas ensaiadas. Também apresentado o gráfico da Figura 4.31 representando a densidade relativa da base de apoio vs. a relação entre o diâmetro vertical final e o horizontal final. Os diâmetros finais citados foram obtidos com a carga de aproximadamente 500N.

O gráfico da deformação vertical (Figura 4.29) indica que essa deformação diminui com o aumento da densidade relativa da base. Esse comportamento pode ser justificado, pois um solo mais denso tende a impedir a movimentação do duto, enquanto o solo mais fofo tende a facilitar essa movimentação. Excetua-se desse comportamento o ensaio com densidade

relativa da base de 40% o qual deve ser mais bem analisado em pesquisas futuras.

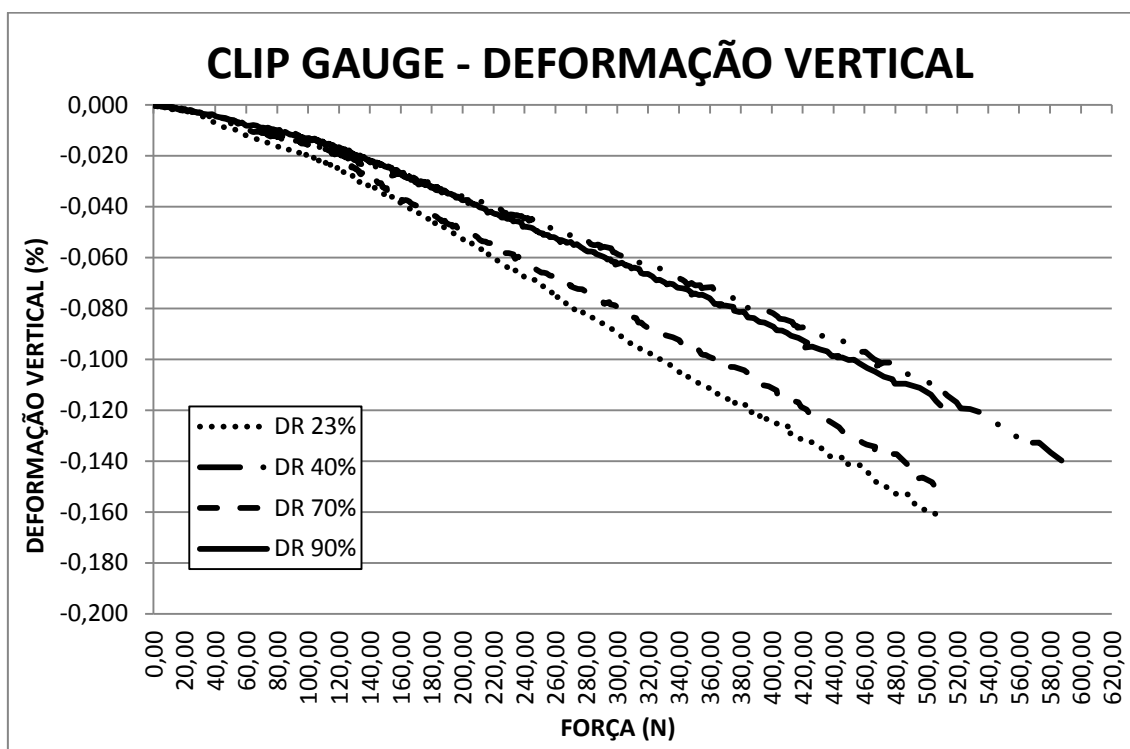


Figura 4.29: Comparativo entre as deformações verticais para cada densidade relativa da base de apoio do duto.

A análise do gráfico da deformação horizontal (Figura 4.30) mostra que essa deformação se manteve constante independente da variação da densidade relativa da base. Justifica-se, pois para todos os quatro (4) ensaios a densidade relativa do solo nas laterais do duto apresentava a mesma densidade relativa (23%). Esse comportamento não se repetiu apenas no ensaio com densidade relativa da base de 90%. É provável que em um solo mais denso, a deformação vertical do duto torne-se bastante restrita sendo necessária uma compensação, com o aumento da deformação horizontal de forma a não ocorrer a ruptura do duto.

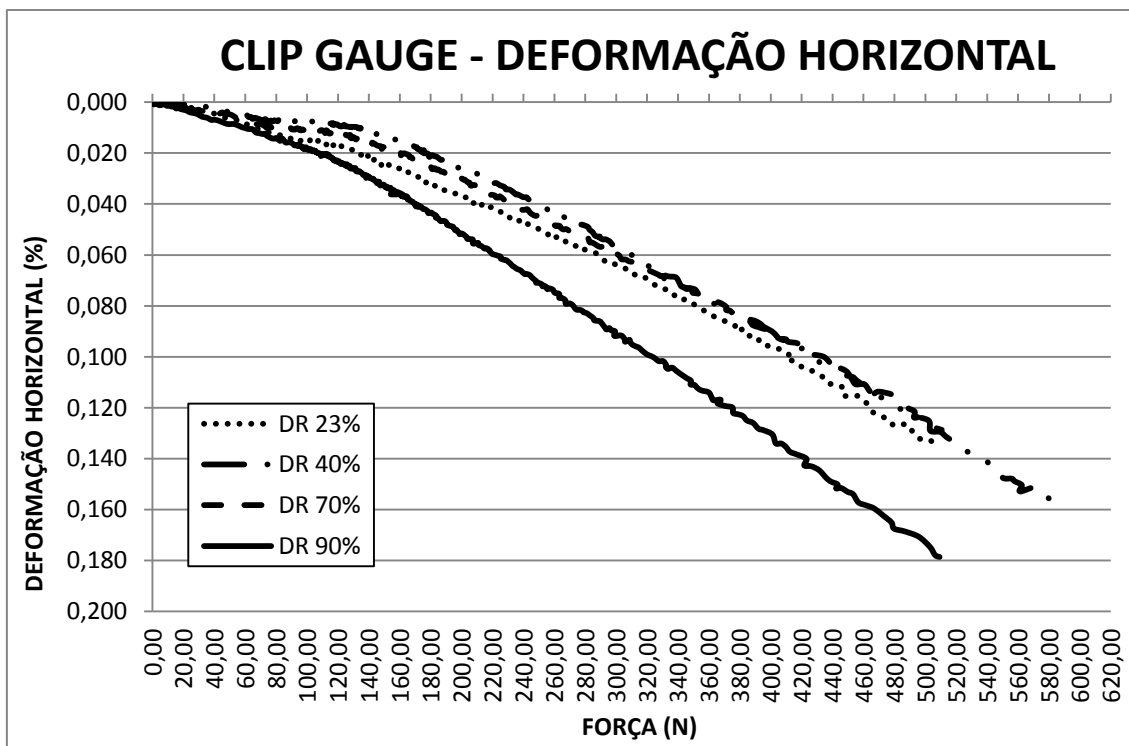


Figura 4.30: Comparativo entre as deformações horizontais para cada densidade relativa da base de apoio do duto.

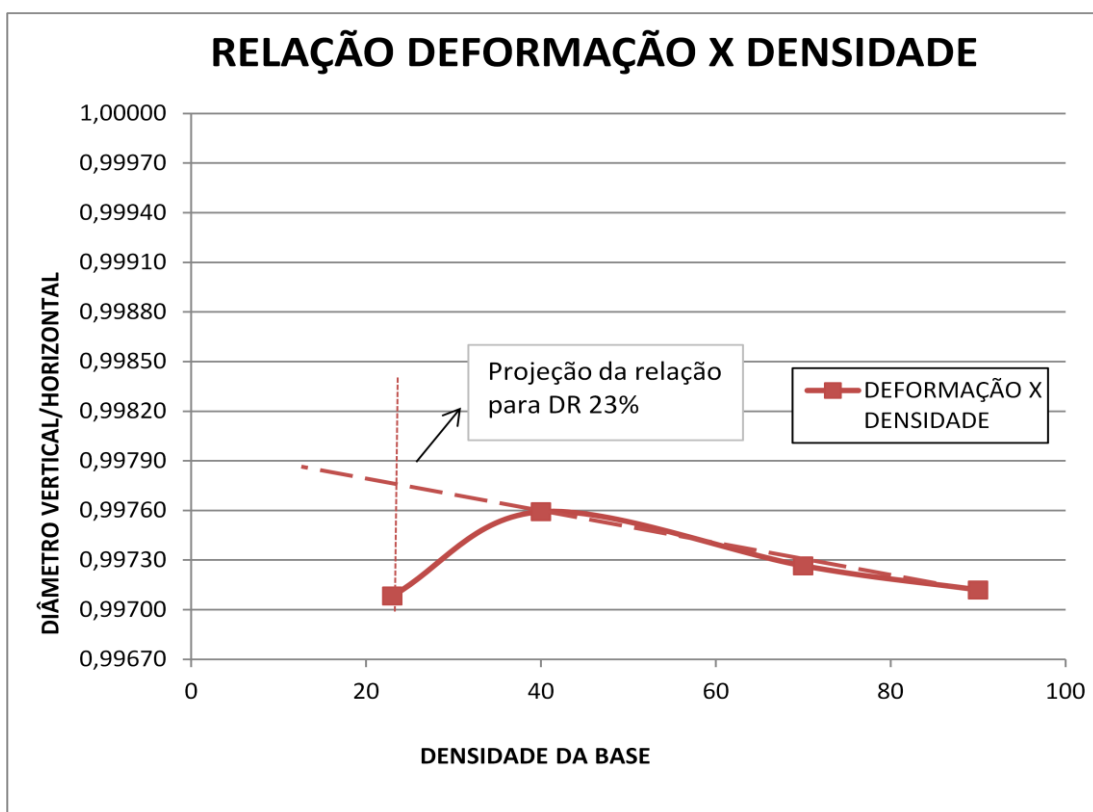


Figura 4.31: Comparação entre a densidade relativa da base de apoio do duto e a relação entre o diâmetro vertical final/diâmetro horizontal final.

A partir da Figura 4.31 acima, identifica-se que existe uma tendência, a partir da densidade relativa de 40%, da relação diâmetro vertical/diâmetro horizontal diminuir com o aumento dessa densidade. Isso significa que as deformações verticais tendem a diminuir enquanto as deformações horizontais tendem a aumentar.

Porém, como o nível de carga aplicado é muito baixo e o ensaio foi realizado a 1g, a ordem de grandeza das deformações é muito pequena, tornando difícil essa análise em detalhes.

Além do exposto, a relação apresentada para a densidade relativa de 23% também apresenta uma incógnita. Pode-se considerar que esse ensaio não foi representativo e ele seguiria a mesma linha de tendência dos outros ensaios, ou o comportamento da interação solo x duto ocorre de maneira diferente para solos muito fofos.

Serão necessárias maiores análises nesse quesito de forma a entender o comportamento do solo com densidade de 23% frente a esse problema.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1. Conclusões

Neste trabalho foi proposto um novo método de medição de deformações em modelos reduzidos de dutos enterrados, através do desenvolvimento de um equipamento que auxilia na leitura direta das deformações sofridas pelo duto durante e após aplicação de carga estática, em milímetros.

Nos ensaios realizados puderam-se comparar as deformações medidas através de rosetas com *strain-gages* colados na superfície do duto com as medições realizadas no interior do duto com o uso do *Clip-Gauge*. A metodologia de ensaio utilizada se mostrou bastante satisfatória, pois representou o processo de ovalização do duto com a aplicação de carga estática.

A partir dos resultados obtidos nessa pesquisa, pode-se concluir que o *Clip-Gauge* funcionou de maneira satisfatória apresentando resultados de leituras de deformações compatíveis com as apresentadas pelas rosetas coladas na superfície do duto. Dessa forma, pode-se considerar que o *Clip-Gauge* desenvolvido atende à necessidade da realização de leituras de deformações diretas em milímetros, sob a aplicação de carregamento estático.

Devido a carga máxima aplicada ter sido relativamente baixa ($\approx 500\text{N}$), as deformações sofridas pelo duto tiveram variações muito pequenas, tornando-se difícil analisar a influência da variação da densidade relativa da base de apoio no comportamento dessas deformações.

5.2. Sugestões para pesquisas futuras

Para o objetivo proposto nesse trabalho os resultados foram muito satisfatórios. Porém alguns itens devem complementar o estudo:

- Testar o funcionamento do *Clip-Gauge* instalado no interior de um duto submetido ao acréscimo de gravidade na Centrífuga Geotécnica, de forma a aumentar a intensidade da carga aplicada;
- Testar a aplicabilidade do *Clip-Gauge* em situações de carregamento dinâmico para simular as situações reais de dutos enterrados sujeitos à esse tipo de carregamento (carga veicular, por exemplo);
- Criar mecanismos que impeçam a variação de posição do *Clip-Gauge* dentro do duto em ensaios com o aumento da gravidade ou que possam precisar a sua localização no interior do duto após sofrer algum deslocamento de posição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbato, M.; Bowman, M.; Herbin, A. (2010). Performance Evaluation of Buried Pipe Installation. USA Report Nº FHWA/LA 10/467, the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, LTRC Project Nº 08-6 GT, State Project Nº 739.99.1520.

Barreto, D. (2003). Critérios Técnicos para seleção de tubos de concreto para redes coletoras de esgoto e drenagem urbana, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, Brasil.

Bueno, B., Costa, Y. (2012). Dutos Enterrados: aspectos geotécnicos, 2ª Ed., São Paulo, Oficina de Textos, 240p.

Carvalho, J.J.C. (2010). Dimensionamento de Conduitas Enterradas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Debs, M. K. (2003). Projeto Estrutural de Tubos Circulares de Concreto Armado, Instituto Brasileiro de Telas Soldadas (I.B.T.S.), Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto (ABTC), Brasil.

Engesser, F. (1882) Ueber den Erddruck Gegen Innere Stützwände (Tunnelwände). Deutsch Bauzeitung, n. 16, p. 91-93. apud Bueno, B., Costa, Y. (2012). Dutos Enterrados: aspectos geotécnicos, 2ª Ed., São Paulo, Oficina de Textos, 240p.

Farrás, L.E.P.; Pérez, S.M. (2003). Nociones sobre Cálculo Estructural de Conducciones Enterradas. Apostila da disciplina de Construcciones Hidráulicas, Departamento de Hidráulica, Faculdade de Engenharia, Universidade de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 60p.

Ferreira, A.M.; Gerscovich, D.M.S.; Sieira, A.C.C.F. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de Dutos Enterrados. XXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Porto, Portugal.

Fleck, N.A. (1983). Some Aspect sod Clip Gauge Design, Strain, Vol.19, Nº1, pp.17-22.

Goddard, J.B. (1994). Plastic Pipe Design, Technical Report 4.103, Advanced Drainage Systems, Inc., p.27.

Janssen, H.A. (1895). Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Z.D. Vereins Deutscher Ingenieure, v. 39, p. 1045 apud Bueno, B., Costa, Y. (2012). Dutos Enterrados: aspectos geotécnicos, 2ª Ed., São Paulo, Oficina de Textos, 240p.

Jeyapalan, J.K. (1987). Behaviour and Design of Buried very Flexible Plastic Pipes. Journal of Transportation Engineering, Madison: ASCE, v. 113, n.6, p.642-657.

Jeyapalan, J.K.; Hamida, H.B. (1988). Comparasion of German to Marston Design Methods. Journal of Transportation Engineering, v. 114, n.4, p. 420-434.

Marston, A. (1930). The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments. Bulletin 96, Iowa Engineering Experiment Station, Ames, Iowa. apud Santos, S. N. (2014). Simulação numérica de dutos enterrados, submetidos à perda de apoio e elevação localizada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ, Rio de Janeiro, RJ, 139p.

Marston, A.; Anderson, A.O. (1913). The Theory of loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe. Bulletin 31, Iowa Engineering Experiment Station. apud Bueno, B., Costa, Y. (2012). Dutos Enterrados: aspectos geotécnicos, 2ª Ed., São Paulo, Oficina de Textos, 240p.

Masada, T. (2000). Modified Iowa Formula for Vertical Deflection od Buried Flexible Pipe. Journal of Transportation Engineering, ASCE, v.126, n.5, p.440-446.

Melo, C. M. A. R. (2010). Avaliação da influência da geometria do fuste na capacidade de carga das estacas de sucção por modelos centrifugados. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, 239p.

Meyerhof, G.G., Fisher, C.L. (1963). Composite Design of Underground Steel Structures, Engineering Journal of the engineering institute of Canada, EIC-63, Geotech 5, p. 36-41.

Neto, P. J. C. e Figueiredo A. D. (2002) – Critérios de projeto e dimensionamento de tubos de concreto para esgotos sanitários, São Paulo, Brasil.

Neto, P. J. C. e Relvas, F. J. (2003). Avaliação Comparativa de Desempenho entre Tubos Rígidos e Flexíveis para Utilização em Obras de Drenagem de Águas Pluviais, Boletim Técnico ABTC / ABCP, São Carlos, Brasil.

Ratton, R.B. (1993). Ensaio Triaxiais em areia Saturada. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 167p.

Santiago, P. A. C. (2010). Estudo experimental de arrancamento de dutos enterrados ancorados com geogrelhas utilizando centrífuga geotécnica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, 101p.

Santos, S. N. (2014). Simulação numérica de dutos enterrados, submetidos à perda de apoio e elevação localizada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Estado do Rio de Janeiro- UERJ, Rio de Janeiro, RJ, 139p.

Silva, E.B., Silva, R.M.S. (2009). Levantamento de Carga sobre Dutos Enterrados Utilizando as Teorias de Marston-Spangler e Boussinesq, In: IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de educação Tecnológica, Belém, PA.

Spangler, M. G. (1941). The structural design of flexible pipe culverts, Bul. 153. Iowa Eng. Expt. Station.

Spangler, M.G. (1950) Theory of Loads on Negative Projecting Conduits. Proceedings of HRB, v.30, p. 153-161. apud Bueno, B., Costa, Y. (2012). Dutos Enterrados: aspectos geotécnicos, 2ª Ed., São Paulo, Oficina de Textos, 240p.

Tibana, S., ET AL.. (2014). Modelagem em centrífuga de dutos enterrados submetidos a carregamento veicular de superfície, XVII Cobramseg, Goiânia, Goiás.

Viana, P.M.F. (2003). Geovalas: Um Novo Processo Construtivo para Dutos Enterrados. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, S.P., 238p.

Warman, D.I.; Hart, J.D.; Francini, R.B. (2009). Development of a Pipeline Surface Loading Screening Process & Assessment of Surface Load Dispersing Methods. Canadian Energy Pipeline Association (CEPA), 40p.

Zaidler, W. (1983). Projetos estruturais de tubos enterrados, PINI Editora, São Paulo, Brasil.