JULIANA BRAGUIM NEVES

**Modelagens física e numérica tridimensional de dutos enterrados submetidos a cargas
móveis**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, pelo Programa de Pós-Graduação de Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogério
Esquivel

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Saboya
Albuquerque Jr.

São Carlos (SP)

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

N511m Neves, Juliana Braguim
Modelagens física e numérica tridimensional de
dutos enterrados submetidos a cargas móveis / Juliana
Braguim Neves; orientador Edmundo Rogério Esquivel;
coorientador Fernando Saboya. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2018.

1. Modelagem numérica. 2. Método dos elementos
finitos. 3. Modelagem física. 4. Centrífuga geotécnica.
5. Dutos enterrados. 6. Cargas móveis. 7. Posição da
carga. 8. Altura de recobrimento. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **JULIANA BRAGUIM NEVES**.

Título da dissertação: "Modelagem física e numérica tridimensional de dutos enterrados submetidos a cargas móveis".

Data da defesa: 14/12/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Ricardo Carrazedo**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Associado **Aldo Durand Farfán**
(Universidade Estadual do Norte Fluminense/UENF)

APROVADA

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Dedico este trabalho à minha querida família:

À minha mãe, Claudia. Ao meu pai, Laercio. Ao meu irmão, Thiago. À minha irmã, Nina. Ao meu companheiro, Rafael

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel, pela confiança e amizade de todos estes anos. Agradeço também por todo o seu conhecimento transmitido.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fernando Saboya, pela sua grande contribuição e orientação neste trabalho. Agradeço também a ótima recepção durante a minha viagem.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia, José Luís e Oscar, por toda a ajuda durante os ensaios de laboratório.

À toda a equipe do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV – UENF), por toda ajuda que tive neste trabalho e pela ótima recepção que me deram.

À minha família, por todo apoio e suporte que me deram nesta trajetória.

A todos os professores do departamento de Geotecnia, por todo o conhecimento transmitido nas aulas que tive durante a minha formação.

Aos funcionários do departamento de Geotecnia, pela prontidão e disposição em ajudar.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pelo fornecimento do material utilizado nesta pesquisa e pelo ótimo atendimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

Resumo

Neves, Juliana Braguim. (2018). **Modelagens física e numérica tridimensional de dutos enterrados submetidos a cargas móveis**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de dutos enterrados submetidos a carregamentos estáticos com posição variável, através de análises de tensões e deformações. Foram realizados dois tipos de análise: modelagem física em centrífuga geotécnica e modelagem numérica tridimensional. A modelagem física em centrífuga foi realizada na escala 1:13 e foi fundamental para a realização da retroanálise. O diferencial desta modelagem física foi a utilização do instrumento *Clip-Gauge* para medir diretamente os deslocamentos do duto. A modelagem numérica tridimensional foi conduzida utilizando o programa computacional de elementos finitos da *RocScience (RS³)*. A precisão da modelagem em centrífuga a partir de modelos simétricos e a influência do tapete superficial utilizado para evitar punção foram discutidos. Também foi verificado o comportamento elástico-linear da areia aumentando a carga aplicada. Um estudo paramétrico foi realizado variando a altura de recobrimento e a posição da carga. Os resultados mostram que mesmo com alturas de recobrimento inferiores ao recomendado pela norma API RP 1102 (2007), é possível adicionar uma sobrecarga veicular sobre o duto sem que o mesmo tenha proteção mecânica. Recomenda-se então que, para casos como a realização de uma obra de expansão ou manutenção executada próxima ao duto, se faça uma análise numérica. Em relação à posição da carga, os resultados mostram que para distâncias horizontais entre o centro do duto e a aplicação da carga a partir de $2D$ (duas vezes o diâmetro externo do duto) praticamente não há influência do carregamento no duto.

Palavras-chaves: Modelagem numérica. Método dos elementos finitos. Modelagem física. Centrífuga geotécnica. Dutos enterrados. Cargas móveis. Análise paramétrica. Posição da carga. Altura de recobrimento.

Abstract

Neves, Juliana Braguim. (2018). **Centrifuge and three-dimensional numerical modelling of buried pipes under live loads**. Master Thesis – São Carlos School of Engineering, São Paulo University, São Carlos, 2018

This work is aimed at studying the behavior of buried pipes under static loading with variable position, by analyzing the stresses and deformations. Two types of analyses were conducted: physical modelling in geotechnical centrifuge and three-dimensional numerical modelling. The centrifugal modelling was performed on the scale 1:13 and it was essential to carry out the retroanalysis. The differential of this centrifugal modelling was the *Clip-Gauge*, an instrument used for direct measurements of the pipe cross section displacement. The three-dimensional numerical modelling was conducted using the *RocScience* finite element program (*RS³*). The precision of centrifugal modelling from symmetrical models and the influence of the used superficial cover to avoid puncture were discussed. Additionally, the elastic-linear behavior of the sand was verified by increasing the applied load, and a parametric study was conducted varying the installation depth and the load position. The results show that, even with more superficial depths than the minimum cover recommended by the API RP 1102 (2007), it is possible to add vehicular loading on the pipe without having mechanical protection. Therefore, it is recommended that, in cases such as an expansion or maintenance work carried out close to the pipe, a numerical analysis to be done. Regarding the load position, the results show that there is no influence of the loading on the pipe for horizontal distances between the pipe center and the load application from $2D$ (twice the pipe outer diameter).

Keywords: Numerical modelling. Finite element method. Centrifugal modelling.

Geotechnical centrifuge. Buried pipes. Live loads. Parametric analysis. Load position.

Installation depth.

Índice

1	Introdução	29
1.1	Dutovias	29
1.2	Objetivos	32
1.3	Justificativa	32
1.4	Organização da dissertação	33
2	Revisão bibliográfica	35
2.1	Classificação de dutos	35
2.2	Carregamento veicular	38
2.3	Tensões no sistema solo-duto	41
2.4	Modelagem física em centrífuga geotécnica	43
2.5	Modelagem numérica	48
3	Materiais e métodos	51
3.1	Modelagem física	51
3.1.1	Montagem do modelo	52
3.1.2	Solo	55
3.1.3	Tapete superficial	65
3.1.4	Aplicação das cargas	68
3.1.5	Instrumentação	71
3.2	Modelagem numérica	73
3.2.1	Teste de malha	76
3.3	Tensões no duto – Norma API RP 1102 (2007)	78
4	Resultados e discussões	89
4.1	Influência do tapete	91
4.1.1	Modelo físico – $H/D = 1$	91

4.1.2	Modelagem numérica.....	93
4.2	Aumento da carga ($H/D = 1$, sem tapete).....	96
4.3	Análise de tensões	98
4.4	Resultados gerais	100
4.4.1	Comparação entre os resultados dos modelos.....	100
4.4.2	Ovalização.....	104
4.4.3	Influência da altura de recobrimento e a posição da carga	107
5	Conclusões	111
	Referências	115
	Apêndice A – Ensaio Oedométrico.....	119
	Apêndice B – Lista dos instrumentos (modelagem em centrífuga).....	129
	Apêndice C - Calibração da Célula de Carga	131
	Apêndice D – Calibração do <i>Clip-Gauge</i>	133
	Apêndice E – Tutorial RS^3 para modelos de dutos enterrados.....	137

Lista de Figuras

Figura 1.1: Previsão de produção 2017-2021 (Petrobras, 2016)	31
Figura 1.2: Esquema da situação estudada	33
Figura 2.1: Formas de instalação de dutos enterrados: (a) em vala com paredes verticais; (b) em vala com paredes escalonadas; (c) em vala com paredes inclinadas; (d) instalações múltiplas; (e) com saliência positiva; (f) com saliência negativa; (g) com saliência positiva e falsa trincheira (Adaptado de Bueno e Costa, 2012)	36
Figura 2.2: Esquema dos veículos-tipo (ABNT - NBR 7188, 2013)	38
Figura 2.3: Dimensões da área de contato das rodas do veículo-tipo Classe A (Adaptado de IRC6, 2014)	39
Figura 2.4: Parâmetros geométricos da carga em caminhões - mm (Adaptado de Rakitin e Xu, 2014).....	40
Figura 2.5: Veículo-tipo da norma OHBDC de 1991 (Adaptado de O'connor e Shaw, 2002).41	
Figura 2.6: Analogia das molas (Bueno e Costa, 2012)	42
Figura 2.7: Objeto em movimento circular uniforme (Wood, 2004)	43
Figura 2.8: Comparação entre a situação real e o modelo físico: (a) Elemento de solo na superfície da terra. (b) Elemento de solo na centrífuga geotécnica (Adaptado de Wood, 2004)	44
Figura 2.9: Esquema da aplicação da carga realizado no estudo da UENF (CENPES-PROTRAN, 2014)	46
Figura 3.1: Centrífuga geotécnica da Universidade Estadual do Norte Fluminense – vista frontal	52
Figura 3.2: Centrífuga geotécnica da Universidade Estadual do Norte Fluminense – vista lateral (CENPES-PROTRAN, 2014).....	52
Figura 3.3: Duto posicionado no modelo físico	53
Figura 3.4: Calibração do pluviador (Santiago, 2017)	55
Figura 3.5: Esquema de compressão lateralmente confinada.....	57

Figura 3.6: Conjunto do anel com o corpo de prova já moldado.....	58
Figura 3.7: Posicionamento do corpo de prova na prensa	59
Figura 3.8: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 1 (50 kPa a 400 kPa).....	61
Figura 3.9: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 2 (50 kPa a 400 kPa).....	61
Figura 3.10: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 3 (50 kPa a 400 kPa).....	62
Figura 3.11: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 4 (50 kPa a 400 kPa).....	62
Figura 3.12: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 5 (50 kPa a 400 kPa).....	63
Figura 3.13: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 6 (50 kPa a 400 kPa).....	63
Figura 3.14: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 7 (50 kPa a 400 kPa).....	64
Figura 3.15: Gráfico módulo de elasticidade $\times$ índice de vazios inicial - areia IPT #50, entre 50 kPa a 400 kPa.....	65
Figura 3.16: Esquema do ensaio de flexão para estimativa do módulo de elasticidade do tapete superficial.....	66
Figura 3.17: Gráfico módulo de elasticidade versus carga distribuída.....	68
Figura 3.18: Esquema da montagem do modelo.....	69
Figura 3.19: Aplicação da carga no modelo físico.....	69
Figura 3.20: Esquema dos ensaios físicos.....	70
Figura 3.21: Pequena punção da sapata na areia.....	71
Figura 3.22: Representação esquemática do <i>Clip-Gauge</i> (Pinheiro, 2015).....	72
Figura 3.23: Posicionamento das placas do <i>Clip-Gauge</i> na seção transversal do duto (Adaptado de Pinheiro, 2015)	72
Figura 3.24: Malha típica utilizada para a modelagem numérica deste trabalho.....	74
Figura 3.25: Esquema dos modelos numéricos.....	75
Figura 3.26: Região de refinamento (destacada em vermelho)	76
Figura 3.27: Teste de malha para a variação do diâmetro na direção vertical.....	77
Figura 3.28: Teste de malha para a variação do diâmetro na direção horizontal.....	77
Figura 3.29: Teste de malha para a tensão vertical no solo de contato no topo do duto.....	78

Figura 3.30: Ábaco do Fator de Rigidez para o cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento do solo sobre o duto, K_{He}	79
Figura 3.31: Ábaco do Fator de Recobrimento para o cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento do solo sobre o duto, B_e	80
Figura 3.32: Ábaco do Fator de Rigidez para o cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento veicular, K_{Hh}	82
Figura 3.33: Ábaco do Fator de Geometria para o cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento veicular, G_{Hh}	82
Figura 3.34: Ábaco do Fator de Rigidez para o cálculo da tensão longitudinal devida ao carregamento veicular, K_{Lh}	84
Figura 3.35: Ábaco do Fator de Geometria para o cálculo da tensão longitudinal devida ao carregamento veicular, G_{Lh}	84
Figura 4.1: Convenção de sinais dos deslocamentos nos pontos do duto, medidos através do Clip-Gauge (a esquerda) e calculados pela modelagem numérica (a direita). As setas indicam sinais positivos.....	91
Figura 4.2: Influência do tapete na variação do diâmetro vertical no modelo físico $H/D = 1$ ($Q = 297$ kPa).....	92
Figura 4.3: Influência do tapete na variação do diâmetro horizontal no modelo físico $H/D = 1$ ($Q = 297$ kPa)	92
Figura 4.4: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametrais verticais do modelo numérico elástico ($H/D = 2$)	93
Figura 4.5: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametrais horizontais do modelo numérico elástico ($H/D = 2$)	94
Figura 4.6: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametrais verticais do modelo numérico elástico ($H/D = 1,5$)	94
Figura 4.7: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametrais horizontais do modelo numérico elástico ($H/D = 1,5$)	95
Figura 4.8: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametrais verticais do modelo numérico elástico ($H/D = 1$)	95

Figura 4.9: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametrais horizontais do modelo numérico elástico ($H/D = 1$).....	96
Figura 4.10: Aumento da carga no modelo físico $H/D = 1$, sem tapete.....	96
Figura 4.11: Outlier da Tabela 4.2	98
Figura 4.12: Análise da tensão de tração equivalente no duto em função da relação H/D (modelos numéricos e norma API)	100
Figura 4.13: Deformação diametral vertical para altura de recobrimento $H/D = 2$ e carga aplicada de 297 kPa.....	101
Figura 4.14: Deformação diametral horizontal para altura de recobrimento $H/D = 2$ e carga aplicada de 297 kPa.....	101
Figura 4.15: Deformação diametral vertical para altura de recobrimento $H/D = 1,5$ e carga aplicada de 297 kPa.....	102
Figura 4.16: Deformação diametral horizontal para altura de recobrimento $H/D = 1,5$ e carga aplicada de 297 kPa.....	102
Figura 4.17: Deformação diametral vertical para altura de recobrimento $H/D = 1$ e carga aplicada de 297 kPa.....	103
Figura 4.18: Deformação diametral horizontal para altura de recobrimento $H/D = 1$ e carga aplicada de 297 kPa.....	103
Figura 4.19: Ovalização do duto em função da posição da carga para altura de recobrimento $H/D = 2$	105
Figura 4.20: Ovalização do duto em função da posição da carga para altura de recobrimento $H/D = 1,5$	106
Figura 4.21: Ovalização do duto em função da posição da carga para altura de recobrimento $H/D = 1$	107
Figura 4.22: Bulbos de tensões verticais formados nos modelos numéricos com carga centralizada ($0D$).....	109
Figura C.0.1: Aparato utilizado na calibração da célula de carga (visão geral)	131
Figura C.0.2: Aparato utilizado na calibração da célula de carga (foto aproximada).....	132
Figura C.0.3: Reta de calibração da célula de carga U4-290	132

Figura D.0.1: Suporte utilizado na calibração <i>Clip-Gauge</i>	133
Figura D.0.2: Curva de calibração da Placa 1 do <i>Clip-Gauge</i>	134
Figura D.0.3: Curva de calibração da Placa 2 do <i>Clip-Gauge</i>	134
Figura D.0.4: Curva de calibração da Placa 3 do <i>Clip-Gauge</i>	135
Figura D.0.5: Curva de calibração da Placa 4 do <i>Clip-Gauge</i>	135

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Classificação das características operacionais de cada modal* (Bowersox e Closs, 2001).....	29
Tabela 2.1: Classificação dos dutos enterrados segundo a rigidez relativa (Bueno e Costa, 2012).....	37
Tabela 2.2: Características dos trem-tipos utilizados no projeto de pontes rodoviárias (ABNT - NBR 7188, 2013).....	38
Tabela 2.3: Carregamento dos eixos e área de contato das rodas (Adaptado de IRC6, 2014).....	39
Tabela 2.4: Parâmetros de carga de caminhões (Adaptado de Rakitin e Xu, 2014)	40
Tabela 2.5: Leis de escala entre modelo e protótipo (Adaptado de Madabhushi, 2014).....	45
Tabela 3.1: Alturas de recobrimento utilizadas durante os ensaios na centrífuga geotécnica..	54
Tabela 3.2: Propriedades da areia IPT #50 (Adaptado de Santiago, 2010 e Neves, 2012)	55
Tabela 3.3: Procedimentos de moldagem dos corpos de prova do ensaio de compressão confinada	59
Tabela 3.4: Conversão da tangente da reta para o módulo de elasticidade (nível de tensões de 50 kPa a 400 kPa)	64
Tabela 3.5: Planilha do ensaio de flexão para estimativa do módulo de elasticidade do tapete superficial	66
Tabela 3.6: Propriedades do duto utilizado na modelagem numérica.....	74
Tabela 3.7: Propriedades do solo utilizado na modelagem numérica	75
Tabela 3.8: Propriedades utilizadas no cálculo que não variam com a altura de recobrimento	78
Tabela 3.9: Dados utilizados para o cálculo de S_{He}	80
Tabela 3.10: Fator do tipo de pavimento, R, e Fator de configuração dos eixos, L. Para altura de recobrimento inferior a 1,2 m e diâmetro superior a 305 mm	83
Tabela 3.11: Dados utilizados para o cálculo de ΔS_{Hh}	83
Tabela 3.12: Dados utilizados para o cálculo de ΔS_{Lh}	85

Tabela 3.13: Dados utilizados para o cálculo de S_I	85
Tabela 3.14: Dados utilizados para o cálculo de S_2	86
Tabela 3.15: Dados utilizados para o cálculo de S_{eq}	86
Tabela 3.16: Tensões mínimas de escoamento para cada tipo de aço (Adaptado de API 5L, 2004)	87
Tabela 3.17: Tensões cíclicas circunferencial (ΔS_{Hh}) e longitudinal (ΔS_{Lh}).....	88
Tabela 3.18: Tensões de resistência à fadiga para soldas circunferenciais (S_{FG}) e longitudinais (S_{FL}) (Adaptado de API RP 1102, 2007).....	88
Tabela 4.1: Resultados dos ensaios físicos com e sem o tapete superficial e suas diferenças.	92
Tabela 4.2: Aumento da deformação vertical relacionado ao aumento da carga	97
Tabela 4.3: Análise de tensões no duto – comparativo com a norma API RP 1102 (2007)....	99
Tabela 4.4: Tensão vertical no solo calculada pela solução de Newmark	108

Lista de símbolos

a = Relação entre a maior dimensão da aplicação da carga e a altura de recobrimento

a_{cp} = Aceleração centrípeta

b = Relação entre a menor dimensão da aplicação da carga e a altura de recobrimento

B_d = Diâmetro da escavação

B_e = Fator de recobrimento

b_p = Constante da prensa

c = Coesão

D = Diâmetro externo do duto

D_a = Diâmetro do anel

D_f = Flecha

$D_{f,1}$ = Flecha realizada pela leitura do relógio comparador

$D_{f,2}$ = Flecha resultante do cálculo do *FTOOL*

D_r = Compacidade relativa

D_v = Variação do diâmetro na direção horizontal

D_v = Variação do diâmetro na direção vertical

e = Índice de vazios do solo

E = Módulo de elasticidade

E' = Módulo de reação do solo

e_0 = Índice de vazios inicial

E_I = Módulo de elasticidade resultante do ensaio

E_2 = Módulo de elasticidade da primeira tentativa, inserido no *FTOOL*

E_a = Módulo de elasticidade do aço

E_C = Módulo de elasticidade do material constituinte do duto

E_e = Fator de escavação

EI = Rigidez a flexão por unidade de comprimento

$e_{m\acute{a}x}$ = Índice de vazios máximo

$e_{m\acute{i}n}$ = Índice de vazios mínimo

E_r = Módulo resiliente do solo

E_s = Módulo de deformabilidade do solo ao redor do duto

F = Fator de projeto

F_i = Fator de impacto

g = Aceleração da gravidade

G_{Hh} = Fator de geometria para o cálculo da tensão circunferencial

G_{Lh} = Fator de geometria para o cálculo da tensão longitudinal

H = Altura de recobrimento

h_a = Altura do anel

h_q = Altura de queda da areia durante a pluviação

I = Momento de inércia da parede do duto por unidade de comprimento

K_1 = Rigidez do solo

K_2 = Rigidez do duto

K_{He} = Fator de rigidez para o carregamento de terra

K_{Hh} = Fator de rigidez para o carregamento veicular para o cálculo da tensão circunferencial

K_{Lh} = Fator de rigidez para o carregamento veicular para o cálculo da tensão longitudinal

L = Fator de configuração dos eixos

L_i = Leitura do relógio comparador no estágio i

L_p = Largura da placa de distribuição de carga

m = Massa

m_i = massa acumulada dos blocos no estágio i

N = Fator de escala entre modelo e protótipo

P = Carregamento

q = Carga distribuída

Q = Força utilizada nos modelos

R = Fator do tipo de pavimento

r = Raio

R_C = Rigidez do duto

RR = Rigidez Relativa

R_S = Rigidez do solo

S_I = Tensão principal na direção circunferencial

S_2 = Tensão principal na direção longitudinal

S_3 = Tensão principal na direção radial

S_{eq} = Tensão de tração equivalente

S_{FG} = Limite de resistência à fadiga para soldas circunferenciais

S_{FL} = Limite de resistência à fadiga para soldas longitudinais

S_{He} = Tensão circunferencial devida ao carregamento de terra sobre o duto

S_{Hi} = Tensão circunferencial devida à pressão interna no duto

$SMYS$ = Tensão mínima específica de escoamento

T_I = Temperatura no momento da instalação

T_2 = Temperatura máxima ou mínima de operação

$\tan\alpha$ = Coeficiente angular

t_w = Espessura da parede do duto

v = Velocidade

w = Carregamento externo devido às cargas móveis

z = Profundidade

α_T = Coeficiente de dilatação térmica

γ = Peso específico do solo

$\delta_{h,2}$ = Deslocamento horizontal da lateral esquerda do duto

$\delta_{h,4}$ = Deslocamento horizontal da lateral direta do duto

$\delta_{v,1}$ = Deslocamento vertical do topo do duto

$\delta_{v,3}$ = Deslocamento vertical da base do duto

ε = Deformação axial do corpo de prova

ε_1 = Deformação diametral devida ao carregamento 1

ε_2 = Deformação diametral devida ao carregamento 2

ε_h = Deformação diametral horizontal do duto

ε_v = Deformação diametral vertical do duto

ε_x = Deformação linear na direção x

ε_y = Deformação linear na direção y

ε_z = Deformação linear na direção z

ν = Coeficiente de Poisson

ν_a = Coeficiente de Poisson do aço

ν_s = Coeficiente de Poisson do solo ao redor do duto

ρ = Massa específica

ρ_s = Massa específica dos sólidos

σ = Tensão vertical no estágio i

σ_0 = Carregamento uniformemente distribuído na superfície

σ_v = Tensão vertical

$\sigma_{v,0}$ = Tensão vertical no solo devido ao peso próprio

$\sigma_{v,f}$ = Tensão vertical total no solo na profundidade H

σ_x = Tensão normal na direção x

σ_y = Tensão normal na direção y

σ_z = Tensão normal na direção z

φ = Ângulo de atrito

φ'_{denso} = Ângulo de atrito da areia IPT #50 no estado compacto

$\varphi'_{interface}$ = Ângulo de atrito placa-areia

ψ = Ângulo de dilatação

ψ_{denso} = Ângulo de dilatação

ω = Velocidade angular

ΔS_H = Tensão circunferencial cíclica devida às cargas móveis

ΔS_{Hh} = Tensão circunferencial devida ao carregamento veicular de rodovia

ΔS_L = Tensão longitudinal cíclica devida às cargas móveis

ΔS_{Lh} = Tensão longitudinal devida ao carregamento veicular de rodovia

$\Delta \sigma_v$ = Acréscimo da tensão vertical gerada pela carga de superfície calculado pela solução de Newmark

1 Introdução

1.1 Dutos

As características de cada sistema modal (ou forma de transporte básica) são determinadas pela infraestrutura do transporte. Os principais modais de transporte básico são: ferroviário, rodoviário, aquaviário, aéreo e dutoviário.

As dutovias se caracterizam como sendo a modalidade de transporte de grãos por dutos, funcionando por gravidade ou pressão mecânica. O principal produto transportado pelas dutovias é o petróleo e seus derivados. Além do petróleo, os dutos também são utilizados para transportar água, esgoto, minérios, produtos químicos, materiais secos e pulverizados a granel (por exemplo: cimento e farinha).

Na Tabela 1.1 é apresentada a classificação do desempenho de cada modal de transporte relativo às características operacionais: velocidade, disponibilidade, confiabilidade, capacidade e frequência.

Tabela 1.1: Classificação das características operacionais de cada modal* (Bowersox e Closs, 2001)

Características Operacionais	Ferrovário	Rodoviário	Aquaviário	Dutoviário	Aéreo
Velocidade	3	2	4	5	1
Disponibilidade	2	1	4	5	3
Confiabilidade	3	2	4	1	5
Capacidade	2	3	1	5	4
Frequência	4	2	5	1	3
Total	14	10	18	17	16

* A menor pontuação indica melhor classificação

- Velocidade: relaciona-se ao tempo de movimentação;
- Disponibilidade: refere-se à capacidade de um modal em atender qualquer origem e destino;
- Confiabilidade: diz respeito às alterações nas programações de transporte esperadas ou divulgadas;
- Capacidade: refere-se à capacidade de um modal em atender qualquer requisito de transporte (por exemplo: tamanho da carga);
- Frequência: depende da quantidade de movimentações programadas em um período.

Os dutos se destacam nas categorias de confiabilidade e frequência. Este modal é considerado o mais frequente, porque as dutovias funcionam continuamente durante as 24 horas do dia. É classificado também como o modal mais confiável por ser o mais consistente, ou seja, não varia ao longo do tempo. Isto se deve ao fato da baixa interferência das condições climáticas e de congestionamento neste modal de transporte. Como desvantagem, apresenta a menor velocidade, menor capacidade e menor disponibilidade (Bowersox e Closs, 2001).

O modal de transporte dutoviário apresenta diversas peculiaridades que o destaca em relação aos outros modais. Suas principais características são citadas a seguir (Vaz, Oliveira e Damasceno, 2005).

Vantagens:

- Operam 24 horas por dia, durante os sete dias da semana. Suas restrições ocorrem apenas quando há mudança do produto transportado ou quando as dutovias estão em manutenção;
- Inexistência da viagem de retorno, como ocorrem com o transporte em caminhões, por exemplo, em que o veículo retorna vazio ou com outro produto;
- Demanda de pouca mão-de-obra;
- Não necessidade de embalagens, pois os dutos são a unidade de carregamento deste modal;
- Custo operacional extremamente baixo, após sua construção;
- Elevada segurança, possibilitando o transporte de produtos perigosos;
- Condições do tempo não influenciam na operação.

Desvantagens:

- Elevado investimento inicial;
- Inflexibilidade de percurso;
- Limite quanto ao tipo de produto a ser transportado (somente produtos nas formas gasosa, líquida, mistura semifluida ou materiais secos e pulverizados).

Atualmente, o principal uso de dutos no Brasil está relacionado com o abastecimento das empresas petroleiras. Segundo a página da Transpetro (Transpetro, 2016), há mais de 7.500 km de oleodutos em todo o país, ligando 49 terminais da companhia, para movimentar os produtos entre as regiões produtoras de petróleo, refinarias, bases de processamento e bases

de distribuição. A rede de oleodutos da Transpetro é supervisionada e controlada pelo Centro Nacional de Controle Logístico, localizado no Rio de Janeiro, contando com uma capacidade de 10 milhões de m³, 543 tanques, 21 terminais terrestres e 28 terminais aquaviários.

Além dos oleodutos, as dutovias da Transpetro também contam com mais de 7100 km de gasodutos que integram as regiões Sudeste e Sul ao Norte e Nordeste do país. Estes gasodutos são responsáveis pelo escoamento de 75% de todo o gás natural que é consumido no Brasil. Esta rede tem capacidade de 19,7 milhões de m³/dia e conta com 29 pontos de recebimento, 136 pontos de entrega e 19 estações de compressão.

Em setembro de 2016, a Petrobras (Petrobras, 2016) divulgou um plano estratégico, referente ao período de 2017 a 2021. A previsão é que haja aumento da produção de óleo, líquido de gás natural (LGN) e gás (Figura 1.1).

Figura 1.1: Previsão de produção 2017-2021 (Petrobras, 2016)

À vista disso, com o aumento de produção, há aumento da demanda no transporte destes materiais. Consequentemente, será necessário aumentar a capacidade das dutovias, construindo novas vias ou ampliando as existentes. De uma forma ou de outra, será necessário realizar obras em áreas próximas aos dutos enterrados existentes. Tais obras requerem a passagem de veículos pesados sobre estes dutos, gerando uma sobrecarga veicular não prevista.

Algumas normas não permitem projeto de dutos enterrados superficiais quando há passagem de veículos na superfície. No caso da API RP 1102 (2007), não é permitido dutos enterrados a profundidades menores que 0,9 m, sem proteção mecânica, cruzando rodovias ou ferrovias.

No caso deste trabalho, o tráfego é menos intenso, pois refere-se a passagem de veículos referentes à caminhões e maquinários de uma obra de expansão próxima a dutos enterrados. Assim, um melhor entendimento do comportamento de dutos enterrados, sujeitos a cargas móveis na superfície do terreno, possibilita a otimização de novos projetos

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento de dutos enterrados, sujeitos a cargas móveis transitando pela superfície, tais como veículos e máquinas pesadas da construção civil.

Através de modelagens físicas e numéricas foi investigada a influência da altura de recobrimento e a posição da carga nas tensões e deformações do sistema solo-duto. O objetivo de realizar modelagens físicas e numéricas era que elas se complementassem umas às outras, possibilitando uma retroanálise.

1.3 Justificativa

Eventualmente, nos locais onde há dutos instalados podem ocorrer acréscimos de tensões, causando danos imprevisíveis, tais como deformações excessivas ou até mesmo ruptura do duto. Estes acréscimos de tensões são normalmente causados pelo tráfego de veículos em obras próximas ao local de instalação do duto. Tais obras podem ocorrer por causa de novas instalações de dutos ou manutenção de dutos pré-existentes (Figura 1.2).

Desta forma, é necessário o estudo do comportamento do sistema solo-duto frente a este acréscimo de tensões e deformações. Possibilita-se, assim, uma previsão do comportamento do sistema, garantindo sua integridade e segurança.

Figura 1.2: Esquema da situação estudada

1.4 Organização da dissertação

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: Esta seção contém uma breve introdução sobre dutovias, os objetivos da dissertação, a justificativa do trabalho e a organização da dissertação;

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: Capítulo que inclui os conceitos utilizados para execução do trabalho e referências sobre o tema;

Capítulo 3 – Materiais e métodos: Neste bloco, são apresentadas todas as informações pertinentes relativas aos métodos utilizados, para que seja possível uma futura reprodução do trabalho;

Capítulo 4 – Resultados e discussões: Esta seção é constituída dos resultados das análises realizadas e as discussões pertinentes a cada uma;

Capítulo 5 – Conclusões: Etapa final da dissertação, onde são apresentadas as conclusões obtidas após toda análise do trabalho.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Classificação de dutos

A classificação de dutos enterrados pode ser realizada de acordo com o método de instalação, material e geometria, comportamento estrutural ou ainda com a condição de trabalho (Bueno e Costa, 2012). Os dutos enterrados podem ser instalados de diversas formas, sendo que os métodos mais comuns são em vala ou saliente.

O método de instalação dos dutos em vala consiste inicialmente em escavar uma vala no local de instalação. Em seguida, posiciona-se o duto e reaterra-se a vala. Os dutos salientes são instalados sob um aterro e não há escavação de uma grande vala como citado no método anterior.

Os dutos enterrados em vala, podem ser instalados em valas estreitas onde as paredes da vala são verticais, ou em valas largas, em que as paredes da vala podem ser escalonadas (em degraus) ou inclinadas. Há também a possibilidade de uma vala acomodar mais de um duto, sendo denominada como “instalações múltiplas”.

Nos dutos salientes, o duto repousa sobre a superfície natural do terreno ou em uma vala rasa, de profundidade suficiente para apenas acomodar o duto. Posteriormente, constrói-se um aterro sobre o duto. A saliência neste método de instalação pode ser positiva (quando a geratriz superior do duto se posiciona acima da superfície natural do terreno) ou negativa (quando a geratriz superior do duto se posiciona abaixo da superfície natural do terreno).

Há também a possibilidade de se instalar um duto com falsa trincheira, quando este é instalado com saliência positiva. Para isto, inclui-se um material compressível no solo de aterro acima do duto, com o propósito de diminuir as tensões verticais. Na Figura 2.1 são apresentados os esquemas em corte de cada método de instalação.

Figura 2.1: Formas de instalação de dutos enterrados: (a) em vala com paredes verticais; (b) em vala com paredes escalonadas; (c) em vala com paredes inclinadas; (d) instalações múltiplas; (e) com saliência positiva; (f) com saliência negativa; (g) com saliência positiva e falsa trincheira (Adaptado de Bueno e Costa, 2012)

Os materiais que mais são utilizados na fabricação de dutos para obras civis são: aço, cerâmica, concreto, ferro fundido, plástico, fibra de vidro, cimento amianto. Em relação à geometria, os dutos mais utilizados apresentam seção transversal circular, porém existem outras seções de dutos como: trapezoidal, em arco, elíptica e ovoide.

Em relação ao comportamento estrutural de dutos enterrados, um duto pode ser rígido ou flexível. O duto é considerado rígido quando apresenta rigidez suficiente para sustentar por si só a carga a qual é submetido. O duto é considerado flexível quando é necessário considerar a interação solo-estrutura para sustentar o carregamento imposto.

Atualmente, a classificação quanto a rigidez mais utilizada é aquela classificada pela rigidez relativa (RR), que leva em consideração a rigidez de todo o sistema. A rigidez relativa é dada pela relação entre a rigidez da seção transversal da estrutura (R_C) e a rigidez do solo ao redor do duto (R_S).

Assim, pode-se utilizar as seguintes equações para a determinação da rigidez relativa do sistema (RR), do duto (R_C) e do solo (R_S):

$$RR = \frac{R_S}{R_C} \quad (2.1)$$

$$R_C = \frac{E_C \times I}{D^3} \quad (2.2)$$

$$R_S = \frac{E_S}{1 - \nu_S} \quad (2.3)$$

onde: D = diâmetro do duto (m); E_C = módulo de elasticidade do material constituinte do duto (kPa); I = momento de inércia da parede do duto por unidade de comprimento (m^4/m); E_S = módulo de deformabilidade do solo ao redor do duto (kPa); ν_S = coeficiente de Poisson do solo ao redor do duto. O momento de inércia (I) da parede do duto (corte longitudinal) é dado por:

$$I = \frac{t_w^3}{12} \quad (2.4)$$

onde: t_w = espessura da parede do duto (m).

Considerando o valor de RR , os dutos são classificados de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classificação dos dutos enterrados segundo a rigidez relativa (Bueno e Costa, 2012)

Rigidez Relativa (RR)	Proporção da carga suportada pelo duto, 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

Os dutos também podem ser classificados quanto a condição de trabalho. Isto é, dependendo da pressão interna atuante nos dutos em operação, as etapas de cálculo podem variar. Sendo assim, há duas possíveis classes de dutos quanto a condição de trabalho:

- Dutos livres: quando o material transportado está sob pressão atmosférica. Neste caso, o projeto geotécnico conta com apenas uma fase e é condicionado apenas pelas cargas externas, uma vez que não existem pressões internas.
- Dutos forçados: quando o material transportado está sob uma pressão. Neste caso, o projeto geotécnico é composto de duas etapas, sendo uma quando o duto está vazio (sem pressão interna) e outra quando o duto está em operação (com pressão interna).

2.2 Carregamento veicular

Nos projetos de pontes rodoviárias utilizam um veículo-tipo como base para o carregamento móvel. Na Tabela 2.2 são apresentadas as duas classes de veículo-tipo (ABNT - NBR 7188, 2013).

- Classe TB-240 - Veículo-tipo de peso total igual 240kN;
- Classe TB-450 – Veículo-tipo de peso total igual 450kN;

Tabela 2.2: Características dos trem-tipos utilizados no projeto de pontes rodoviárias (ABNT - NBR 7188, 2013)

Característica	Unidade	TB-450	TB-240
Quantidade de eixos	Eixo	3	3
Peso total de veículo	kN	450	240
Peso de cada roda dianteira	kN	75	40
Peso de cada roda traseira	kN	75	40
Peso de cada roda intermediária	kN	75	40
Largura de contato da roda	m	0,50	0,50
Comprimento de contato de cada roda	m	0,20	0,20
Distância entre os eixos	m	1,50	1,50
Distância entre os centros de roda de cada eixo	M	2,00	2,00

Na Figura 2.2, é apresentado o esquema geométrico dos veículos-tipo, onde são indicadas as distâncias e dimensões das rodas e eixos. Nestas configurações, os veículos-tipo das classes TB-450 e TB-240 aplicam tensões de 750 kPa e 400 kPa, em cada roda, respectivamente.

Figura 2.2: Esquema dos veículos-tipo (ABNT - NBR 7188, 2013)

Na Índia existe uma norma similar, que estabelece padrões de projeto e construção de pontes rodoviárias. Nesta norma, os carregamentos são divididos em quatro classes (*IRC Class 70R*, *IRC Class AA*, *IRC Class A*, *IRC Class B*) e dependem do tipo de carregamento que a ponte que será projetada irá suportar.

Os veículos-tipo Classe A, utilizados também como carregamento crítico das Classes 70R e AA, apresentam a distribuição de rodas e eixos apresentada na Figura 2.3. Na Tabela 2.3 são apresentados os valores dos carregamentos por eixo e da área de contato das rodas. Estes valores representam tensões na ordem de 450 kPa.

Figura 2.3: Dimensões da área de contato das rodas do veículo-tipo Classe A (Adaptado de IRC6, 2014)

Tabela 2.3: Carregamento dos eixos e área de contato das rodas (Adaptado de IRC6, 2014)

Carregamento por eixo (t)	Área de contato	
	B (mm)	W (mm)
11,4	250	500
6,5	200	380
2,7	150	200

Um estudo realizado em dutos enterrados, submetidos a cargas de tráfego pesado, utilizou a configuração geométrica de cargas e eixos apresentada na Figura 2.4. Na Tabela 2.4 são apresentadas as magnitudes destas cargas. As análises foram realizadas através de modelagem física em centrífuga geotécnica e os resultados foram comparados com ensaios realizados em

escala real. Os dutos estudados eram de grande diâmetro e fabricados em concreto reforçado (Rakitin e Xu, 2014).

Figura 2.4: Parâmetros geométricos da carga em caminhões - mm (Adaptado de Rakitin e Xu, 2014)

Tabela 2.4: Parâmetros de carga de caminhões (Adaptado de Rakitin e Xu, 2014)

Tipo de caminhão	Peso total (kN)	Carga por eixo (kN)		Carga por roda (kN)		Tensão aplicada por roda (kN/m²)	
		Dianteiro	Traseiro	Dianteira	Traseira	Dianteira	Traseira
Médio*	252	62	95	31	47,5	344,4	263,9
Pesado	850	283,3	566,7	141,65	283,35	468,3	468,3

* Caminhão tipo médio com dois eixos traseiros

A norma *Ontario Highway Bridge Design Code* (OHBDC) apresenta em sua última edição o veículo-tipo apresentado na Figura 2.5. De acordo com essa configuração de cargas e eixos, o eixo com mais carga apresenta 200 kN distribuídos em duas áreas de contato de 0,6 m × 0,25 m (0,3 m²). Isto corresponde a uma tensão aplicada no contato das rodas de 667 kPa. O eixo dianteiro (mais leve) distribui 60 kN em duas áreas de contato de 0,25 m × 0,25 m (0,125 m²), o que corresponde a uma tensão aplicada no contato das rodas de 480 kPa.

Figura 2.5: Veículo-tipo da norma OHBDC de 1991 (Adaptado de O'connor e Shaw, 2002).

Em geral, os trabalhos e normas publicados que analisam o efeito do carregamento de tráfego pesado utilizam tensões aplicadas entre 250 kPa e 750 kPa (dependendo do tipo de veículo). Há também alguns casos em que utilizam carregamento unitário, pois consideram o comportamento elástico. Noor e Dhar (2003), por exemplo, utilizam uma carga concentrada de 1 N. Desta forma, os resultados podem ser multiplicados pela magnitude da carga de interesse.

2.3 Tensões no sistema solo-duto

Um maciço onde há um duto enterrado possui uma distribuição de tensões diferente de um maciço sem a presença do duto. Isto ocorre por que os materiais apresentam diferenças na rigidez. Este fenômeno pode ser explicado através de uma analogia de molas (Figura 2.6).

Na Figura 2.6, a rigidez K_2 representa a rigidez do duto, a rigidez K_1 representa a rigidez do solo e a sobrecarga representa o peso do solo sobre o duto somado à eventuais sobrecargas superficiais. Neste caso, pode-se listar 3 situações: a) quando todas as molas tem a mesma rigidez ($K_1 = K_2$), b) quando a mola que representa o duto (central) é mais rígida que as que representam o solo ($K_1 < K_2$), c) quando as molas que representam o solo (laterais) são mais rígidas que a que representa o duto ($K_1 > K_2$).

Figura 2.6: Analogia das molas (Bueno e Costa, 2012)

No primeiro caso, todas as molas suportam igualmente a carga aplicada e o sistema deforma por igual. Este caso representa um maciço homogêneo, onde não há um duto instalado, ou quando o duto apresenta uma rigidez igual à do solo. No entanto, esta última situação é muito difícil de ocorrer na prática.

No segundo caso, quando a mola central é mais rígida, ocorre um alívio nas molas laterais e a mola central suporta a maior parcela da carga. Ou seja, em um caso em que há um duto rígido instalado, o duto suporta a maior parte do carregamento.

No terceiro caso, quando as molas laterais são mais rígidas, ocorre um alívio na mola central e as molas laterais suportam a maior parcela da carga. Ou seja, em um caso em que há um duto flexível instalado, o solo suporta a maior parte do carregamento.

Os dois últimos casos representam o fenômeno de arqueamento. Este fenômeno pode ser definido pela transferência de carga das zonas mais flexíveis para as zonas mais rígidas. Se diz que o arqueamento é positivo quando há o alívio de tensões no solo sobre o duto e o aumento de tensões no solo lateral (caso c). Quando ocorre o inverso (caso b), se diz que o arqueamento é negativo.

A Norma API RP 1102 (2007) – *Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways* fornece um procedimento detalhado para projetos de dutos enterrados sob vias com tráfego de veículos (rodovias e ferrovias).

O procedimento é listado a seguir.

- a) Definir as características iniciais do problema, tais como características do duto, do solo, da construção e operação;
- b) Calcular a tensão circunferencial devida à pressão interna no duto (S_{Hi}). Comparar com a máxima tensão permitida;
- c) Calcular a tensão circunferencial devida ao carregamento de terra sobre o duto (S_{He});

- d) Calcular o carregamento externo devido às cargas móveis (w) e determinar o fator de impacto apropriado (F_i);
- e) Calcular a tensão circunferencial cíclica (ΔS_H) e a tensão longitudinal cíclica (ΔS_L), devidas às cargas móveis;
- f) Calcular a tensão circunferencial devida à pressão interna (S_{Hi});
- g) Verificar se o duto não escoar pela tensão de tração equivalente (S_{eq});
 - Calcular as tensões principais: (S_1) – na direção circunferencial, (S_2) – na direção longitudinal, (S_3) – na direção radial;
 - Calcular a tensão de tração equivalente (S_{eq});
 - Comparar a tensão de tração equivalente com a máxima tensão permitida (tensão mínima de escoamento multiplicada pelo fator de projeto F);
- h) Verificar se não ocorre a fadiga nas soldas do duto;
- i) Se qualquer verificação falhar, modificar o projeto.

Especificamente para este trabalho, não foram verificados todos os itens listados acima. Os itens “b” e “f” não foram verificados por não se tratar de um duto em operação. Assim, não há pressão interna no duto. Desta forma, o procedimento adaptado da norma API RP 1102 (2007) utilizado, juntamente com a sua formulação, está descrita no item 3.3.

2.4 Modelagem física em centrífuga geotécnica

A função da centrífuga geotécnica é possibilitar que os fenômenos que governam o protótipo sejam também válidos para o modelo, independente do sistema de unidade fundamental adotado. Como consequência, as tensões de um modelo em escala reduzida são igualadas às tensões de um protótipo. Seu princípio é bastante simples e consiste em rotacionar o modelo reduzido, gerando uma aceleração, como é mostrado na Figura 2.7 (Wood, 2004).

Figura 2.7: Objeto em movimento circular uniforme (Wood, 2004)

Então, se um corpo de massa m rotacionar com raio constante r ao redor de um eixo, com velocidade constante v (ou velocidade angular constante ω), então a aceleração centrípeta radial (a_{cp}) é dada por:

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r} = r\omega^2 \quad (2.5)$$

É comum relacionar a aceleração centrípeta a_{cp} com a aceleração da gravidade da Terra g , através de um fator de escala N .

$$a_{cp} = N \times g \quad (2.6)$$

$$N = \frac{r\omega^2}{g} \quad (2.7)$$

Na Figura 2.8, é mostrada a comparação do equilíbrio de forças de um elemento de área transversal unitária e espessura infinitesimal δz em duas situações: (a) quando o elemento de solo é considerado em uma coluna de solo da superfície da Terra e (b) quando o elemento é considerado em um modelo em centrífuga.

Figura 2.8: Comparação entre a situação real e o modelo físico: (a) Elemento de solo na superfície da terra. (b) Elemento de solo na centrífuga geotécnica (Adaptado de Wood, 2004)

No primeiro caso, a força peso do elemento é equilibrada com o acréscimo de tensões verticais. Assim, tem-se que o equacionamento para o primeiro caso é dado por:

$$\delta \sigma_v = \rho \times g \times \delta z \quad (2.8)$$

Para massa específica constante, tem-se que a tensão vertical na profundidade z é dada por:

$$\sigma_v = \int_0^z \rho \times g \times dz = \rho \times g \times z \quad (2.9)$$

No segundo caso, o equilíbrio é dado por uma equação similar a Equação (2.8), porém a aceleração na equação é a aceleração centrípeta. Assim, tem-se que:

$$\delta\sigma_v = \rho \times a_{cp} \times \delta z = \rho \times N \times g \times \delta z \quad (2.10)$$

Assumindo massa específica constante, para uma profundidade z/N tem-se que a tensão vertical é dada por:

$$\sigma_v = \int_0^{1/N} N \times \rho \times g \times dz = \rho \times g \times z \quad (2.11)$$

Assim, percebe-se que tanto a Equação (2.9), como a Equação (2.11) resultam na mesma tensão vertical. Sendo assim, conclui-se que as tensões verticais são iguais, tanto no modelo, quanto no protótipo.

As principais relações entre um modelo reduzido ensaiado em centrífuga geotécnica e o protótipo são citadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Leis de escala entre modelo e protótipo (Adaptado de Madabhushi, 2014)

Parâmetro	Escala $\left(\frac{\text{modelo}}{\text{protótipo}} \right)$	Unidade
Comprimento	1/N	m
Área	1/N ²	m ²
Volume	1/N ³	m ³
Massa	1/N ³	N.s ² /m
Tensão	1	N/m ²
Deformação	1	-
Força	1/N ²	N
Momento fletor	1/N ³	N.m
Trabalho	1/N ³	N.m
Energia	1/N ³	J
Velocidade de infiltração	N	m/s
Tempo (adensamento)	1/N ²	s

Quando o material utilizado no modelo é diferente do utilizado no protótipo, é necessário que a relação da rigidez a flexão seja respeitada (Madabhushi, 2014).

$$\frac{(EI)_{\text{modelo}}}{(EI)_{\text{protótipo}}} = \frac{1}{N^3} \quad (2.12)$$

onde: EI = rigidez a flexão por unidade de comprimento ($\text{kN.m}^2/\text{m}$); E = módulo de elasticidade (kN/m^2); I = momento de inércia por unidade de comprimento (m^4/m); N = relação entre aceleração da gravidade no protótipo e aceleração centrípeta no modelo em centrífuga.

Em relação aos modelos reduzidos em centrífuga, foi realizado um estudo pela Universidade Estadual do Norte Fluminense em parceria com a Petrobras. Este estudo analisou o comportamento de dutos enterrados submetidos a carregamentos veiculares. Neste estudo, a carga foi aplicada através de um servomotor que girava uma polia, enrolando um cabo de aço, e deslocava um carro com peso. Na Figura 2.9 é apresentado o esquema da aplicação de carga deste trabalho. (CENPES-PROTRAN, 2014)

Figura 2.9: Esquema da aplicação da carga realizado no estudo da UENF (CENPES-PROTRAN, 2014)

Os parâmetros estudados foram a compacidade relativa da areia utilizada e a altura de recobrimento. Foram realizados nove ensaios em centrífuga com o intuito de extrair dados de tensão e deformação para complementar o estudo numérico e comparar com análises analíticas. Como resultado, concluíram que o método proposto por Spangler apresenta resultados mais conservadores quando analisadas as tensões e deflexões. O conservadorismo pode estar relacionado com algumas simplificações do método, como a consideração do meio

elástico linear, a desconsideração da interação solo-estrutura e do modelo de distribuição interna do carregamento sobre o duto.

Em 2015 foi desenvolvido um equipamento (*Clip-Gauge*) para medição direta da ovalização do duto, em milímetros. Os resultados foram bastante satisfatórios, com carregamentos relativamente pequenos ($\approx 500\text{N}$), sem a utilização da centrífuga geotécnica. Como complementação do estudo, foi proposto testar o equipamento em modelos físicos reduzidos realizados em centrífuga geotécnica, para verificar o comportamento deste quando submetido ao acréscimo de gravidade e cargas aplicadas de maior intensidade (Pinheiro, 2015). O funcionamento deste instrumento é explicado no item 3.1.5.

Um estudo conduzido com centrífuga geotécnica analisou a influência de tráfego pesado sobre dutos enterrados de concreto reforçado de grande diâmetro (1400 mm). Foram analisadas as influências da altura de recobrimento e a posição e magnitude do carregamento nos momentos fletores provocados no duto. Neste estudo, conclui-se que a condição mais desfavorável é quando o eixo mais pesado do veículo se encontra posicionado exatamente acima da coroa do duto. Os momentos fletores no duto resultaram significativamente maiores nesta situação quando comparados à situação em que a coroa do duto se posicionou centralizada aos eixos dianteiro e traseiro do veículo. Em relação à altura de recobrimento, percebeu-se que quanto mais profundo o duto se encontra, maiores são as tensões iniciais no duto, porém há menos influência do carregamento veicular (Rakitin e Xu, 2014)

Bryden, El Naggar e Valsangkar (2014) apresentam uma análise comparativa entre modelagem reduzida em centrífuga, modelagem numérica pelo programa computacional *Plaxis 3D*, o modelo teórico de Gumbel e a teoria da compressão de anel de Watkins. As análises foram realizadas para dutos muito flexíveis fabricados em plástico reforçado com fibras (FRP). Conclui-se que a região da coroa do duto é a mais afetada na presença de um carregamento superficial quando analisadas as tensões axiais e forças normais. Além disso, o efeito da carga superficial desaparece quando a carga está posicionada em distâncias horizontais maiores que o dobro do diâmetro ($2D$) em relação ao centro do duto quando analisadas as tensões e deformações. Também se concluiu que o efeito da carga superficial diminui quanto maior for a profundidade de instalação do duto.

2.5 Modelagem numérica

Na década de 80, o processamento dos modelos numéricos tridimensionais era extremamente demorado e requeria computadores muito potentes. Para resolver isso, foram desenvolvidas algumas técnicas para transformar estes problemas em modelos bidimensionais equivalentes. Um dos métodos é a técnica das transformadas de Fourier. Algumas aplicações deste método são: uma edificação sobre um túnel já existente, o carregamento de uma construção ao lado de uma escavação e um aterro construído sobre um duto enterrado (Small e Wong, 1988).

O efeito de um carregamento veicular aplicado na superfície de dutos enterrados também deve ser considerado tridimensional. Isso porque as dimensões do carregamento são finitas e dependem da área de contato dos pneus com a superfície do solo. Utilizando a técnica das transformadas de Fourier, um estudo paramétrico bidimensional foi conduzido por Fernando e Carter (1998). Atualmente, os programas computacionais evoluíram e existem outras opções para este tipo de análise tridimensional.

Noor e Dhar (2003) realizaram um estudo tridimensional de dutos enterrados de concreto submetidos a cargas veiculares. Esse trabalho utilizou o programa computacional *ANSYS*. O modelo foi considerado elástico-linear e analisou diferentes alturas de recobrimento ($0,5D$, $1D$ e $1,5D$). O duto desse estudo apresentava um diâmetro externo de 600 mm e uma espessura de 50 mm. Concluiu-se que para alturas de recobrimento maiores que $1,5D$, não há influência na transferência de carga do solo e não é necessário analisar a interação solo-duto. Entretanto, para dutos mais superficiais, com altura de recobrimento inferior a metade do diâmetro ($0,5D$), a interação solo-duto deve ser analisada. Também foi verificado que o módulo de elasticidade do duto e do solo também influencia nas tensões, pois este parâmetro altera a rigidez dos materiais. Assim, dutos com módulos elevados atraem tensões maiores (efeito de arqueamento – item 2.3).

Uma análise numérica tridimensional, realizada através do método dos elementos finitos, simula o comportamento de dutos enterrados pressurizados submetidos a impactos. Por meio de uma análise dinâmica utilizando o programa computacional *ABAQUS*, foram analisados os efeitos da energia de impacto, rigidez relativa do sistema solo-duto e a altura de recobrimento do duto. O duto estudado era fabricado em aço X70 e a pressão interna aplicada no duto foi de 10 MPa. O modelo constitutivo do solo adotado foi de Mohr-Coulomb e simulou um comportamento de deformação elástica perfeitamente plástica. Concluiu-se que a pressão de

impacto aumenta de acordo com o aumento da energia do impacto, porém diminui com a altura de recobrimento e rigidez relativa do sistema solo-duto. Também se verificou que a seção crítica da tubulação é aquela abaixo do impacto. Além disso, o intervalo de influência da tensão encontrado foi de 1,5 m a partir do eixo do impacto, na direção longitudinal do duto (Liu e Yang, 2014).

Zhang *et al.* (2016) estudaram o comportamento de dutos enterrados submetidos a um carregamento estático uniformemente distribuído. O duto era fabricado em aço e apresentava um diâmetro de 660 mm e uma espessura de 8 mm. O modelo constitutivo escolhido para o solo foi o Mohr-Coulomb elástico perfeitamente plástico. Em suas análises, concluíram que para pequenos carregamentos a máxima tensão Von Mises está localizada na coroa do duto, na seção abaixo do carregamento. Também concluíram que a distribuição de tensões é oval e conforme o carregamento aumenta, aparece uma área de plastificação, também com forma oval, no topo do duto. Além disto, verificaram que dutos sem pressão interna são mais propensos a ruptura do que dutos com pressão interna. Também determinaram uma relação crítica entre diâmetro e espessura do duto de 60. Ou seja, para relações inferiores a 60, não existe deformação plástica.

No tema de carregamentos veiculares, Neya *et al.* (2017) apresentam uma análise numérica tridimensional, pelo programa computacional *ABAQUS*. O trabalho consistiu em um estudo paramétrico em função da tensão principal máxima no duto em relação à altura de recobrimento, a direção do movimento do veículo, o tipo de solo, a velocidade do veículo e a geometria do duto (espessura e diâmetro). Entretanto, não foi realizada a análise de deslocamento ou deformação do sistema. Concluíram que a tensão principal máxima causada pelo tráfego só é significativa em alturas de recobrimento menores que 1 m. Para alturas de recobrimento e módulos de elasticidade baixos, o movimento da carga paralelo ao duto é mais crítico. No entanto, conforme esses dois parâmetros aumentam, a tensão principal máxima causada pela passagem do veículo nas duas direções tende a convergir para o mesmo valor. Em relação a velocidade do movimento, quanto menor for, maior será a tensão principal máxima no duto. Geralmente, a diminuição da relação entre diâmetro e espessura (D/t_w) resulta em tensões principais máximas menores. Para valores desta relação menores que 30, a tensão principal máxima é insignificante. Além disso, concluiu-se que a tensão principal máxima no duto é menor conforme o módulo de elasticidade do solo diminui. Para módulos maiores que 20 MPa, esta tensão é insignificante. Em relação ao coeficiente de Poisson, a tensão principal máxima diminui conforme este coeficiente também diminui.

3 Materiais e métodos

Neste estudo, foram realizadas modelagens numérica e física, sendo uma complementar à outra. Como na presente investigação o duto está instalado a pequenas profundidades e só nos interessam os esforços e deformações no duto, causados por cargas atuantes na superfície do terreno, os efeitos do peso próprio do solo não foram considerados.

Os modelos estudados neste trabalho representam um protótipo de um duto de aço enterrado em três diferentes alturas de recobrimento: 1,00 m ($2D$), 0,75 m ($1.5D$) e 0,50 m ($1D$). O duto apresenta diâmetro externo (D) igual a 520 mm e espessura (t_w) igual a 14,2 mm.

Para simular o carregamento veicular, foi considerada uma carga uniformemente distribuída de 297 kPa, aplicada em uma área retangular ($0,728\text{ m} \times 0,624\text{ m}$) na superfície do terreno. Os carregamentos foram aplicados na superfície em cinco diferentes posições em relação ao centro do duto ($0D$, $1D$, $2D$, $3D$, $4D$).

3.1 Modelagem física

A modelagem física constituiu-se de três modelos reduzidos (escala 1:13), construídos com areia para simular o solo, no qual foi inserido um duto de alumínio. Foi inicialmente construído um modelo considerando a maior altura de recobrimento do tubo. Posteriormente, para considerar um novo modelo com uma altura de recobrimento menor, a camada superior de solo do modelo existente foi removida com o auxílio de um aspirador de pó. Em seguida, a superfície foi nivelada com uma régua.

Para garantir a similaridade física entre o protótipo e o modelo, foi necessário utilizar o recurso de modelagem centrífuga. Para tanto foi utilizada a centrífuga geotécnica instalada no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

Figura 3.1: Centrífuga geotécnica da Universidade Estadual do Norte Fluminense – vista frontal

Figura 3.2: Centrífuga geotécnica da Universidade Estadual do Norte Fluminense – vista lateral (CENPES-PROTRAN, 2014)

3.1.1 Montagem do modelo

Para a montagem dos modelos, foi utilizada uma caixa de teste rígida fabricada em alumínio aeronáutico, com dimensões internas de 700 mm × 250 mm × 500 mm e massa igual a 160 kg. Essa caixa conta com duas faces em acrílico com espessura igual a 42,6 mm. A caixa foi revestida com folha de acetato nas quatro faces internas, com o intuito de diminuir o

atrito das partículas de areia com a parede caixa. A folha de acetato também possibilitou a marcação das camadas que seriam pluviadas. O duto utilizado no modelo apresenta seção transversal circular e diâmetro interno, diâmetro externo e espessura iguais a 38,1 mm, 41,3 mm e 1,58 mm, respectivamente.

Figura 3.3: Duto posicionado no modelo físico

Como a escala adotada para o modelo era 1:13, a aceleração utilizada na centrífuga foi igual a 13g. Assim, o duto utilizado no modelo equivale a um duto de aço no protótipo com diâmetro interno, diâmetro externo e espessura iguais a 495,3 mm (19½”), 523,6 mm e 14,17 mm, respectivamente, como mostrado a seguir.

Para que haja similaridade à rigidez à flexão, deve-se ter:

$$\frac{(EI)_{modelo}}{(EI)_{protótipo}} = \frac{1}{N^3} \quad (2.12 \text{ bis})$$

ou

$$E_{modelo} \times \frac{t_{w,modelo}^3}{12} \times N^3 = E_{protótipo} \times \frac{t_{w,protótipo}^3}{12}$$

Considerando que os módulos de elasticidade do aço e do alumínio são iguais a 210 GPa e 69 GPa, respectivamente, a espessura resulta em:

$$t_{w,protótipo} = \sqrt[3]{\frac{E_{modelo} \times t_{w,modelo}^3 \times N^3}{E_{protótipo}}} = \sqrt[3]{\frac{69 \times 1,58^3 \times 13^3}{210}} = 14,17 \text{ mm}$$

Para a classificação do comportamento estrutural, adotou-se $E_s = 30000$ kPa e $\nu_s = 0,3$. Tem-se pela Equação (2.3) que $R_s = 42857$ kPa. Pelas Equações (2.2) e (2.4), adotando $E_C = 2,1 \cdot 10^8$ kPa, $t = 14,17$ mm e $D = 0,52$ m, tem-se que $R_C = 354$ kPa. Substituindo estes valores na Equação (2.1), tem-se que a rigidez relativa (RR) equivale a 121. Classificando o duto pela Tabela 2.1, conclui-se que o duto apresenta comportamento intermediário.

Na modelagem física em centrífuga o modelo foi montado pelo método de saliência positiva, sem falsa trincheira. Para se conseguir a compacidade relativa desejada no modelo, a areia foi colocada na caixa através do processo de pluviação. Foram pluviadas quatro camadas de 50 mm de espessura cada, para o solo de base. Em seguida, foi posicionado o duto de alumínio não centralizado, pois as cargas seriam aplicadas do lado esquerdo, sendo necessário posicionar o duto deslocado para a direita. Para determinar as deformações diametrais do duto, no seu interior foi instalado um *Clip-Gauge*, cuja descrição é apresentada no item 3.1.5.

Depois de posicionado o duto, já com o *Clip-Gauge* inserido, os cabos dos instrumentos foram todos conectados ao sistema de aquisição de dados. Estes cabos foram presos com fita adesiva na parede da caixa para não se desconectarem durante o voo. Em seguida, continuou-se a pluviação da areia com mais quatro camadas, sendo a primeira com 41,3 mm de espessura, a segunda com 40 mm e as duas últimas com 20 mm de espessura cada. Como se desejava obter para a areia a maior compacidade relativa possível, foi utilizada a máxima altura disponível do equipamento de pluviação, que era de 300 mm.

Foram escolhidas três alturas de recobrimento do protótipo para realizar o estudo: 1,00 m, 0,75 m e 0,50 m ($2D$, $1,5D$ e $1D$, respectivamente). Considerando a escala adotada (1:13), as alturas de recobrimento nos modelos seriam de 76,9 mm, 57,7 mm e 38,5 mm, respectivamente.

Durante os ensaios, foram feitas algumas marcas na folha de acetato para possibilitar a medição das alturas de recobrimento efetivamente utilizadas. As alturas de recobrimento resultaram ligeiramente menores, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Alturas de recobrimento utilizadas durante os ensaios na centrífuga geotécnica

Proposto		Durante o ensaio	
Altura protótipo (m)	Altura modelo (mm)	Altura modelo (mm)	Altura protótipo (m)
0,50	38,5	37,8	0,49
0,75	57,7	55,6	0,72
1,00	76,9	71,3	0,93

3.1.2 Solo

3.1.2.1 Preparação do modelo

O solo utilizado nos modelos físicos em centrífuga foi uma areia industrial normalizada (#50), fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Este material é classificado como uma areia média mal graduada cujas propriedades são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Propriedades da areia IPT #50 (Adaptado de Santiago, 2010 e Neves, 2012)

Propriedade	Valor
Massa específica dos sólidos - ρ_s	2,67 g/cm ³
Índice de vazios mínimo - $e_{\min}$	0,72
Índice de vazios máximo - $e_{\max}$	1,06
Ângulo de atrito da areia IPT #50 no estado compacto - φ'_{denso}	41°
Ângulo de dilatância - ψ_{denso}	25°
Ângulo de atrito placa-areia - $\varphi'_{interface}$	29°

A técnica de pluviação da areia requer a curva de calibração do pluviador, que fornece o valor da compacidade relativa em função da altura de queda da areia (Figura 3.4).

Figura 3.4: Calibração do pluviador (Santiago, 2017)

De acordo com essa curva de calibração, para a altura de pluviação adotada (300 mm), a compacidade relativa resultante é igual a 64,3 %. Como a areia utilizada estava seca, pode-se admitir que a massa específica seca (ρ_d) da areia era igual à sua massa específica natural (ρ).

Por definição, a compacidade relativa (D_r) é dada pela expressão:

$$D_r = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{mín}} \times 100 (\%) \quad (3.1)$$

onde: e = índice de vazios do solo, $e_{máx}$ = índice de vazios máximo do solo, $e_{mín}$ = índice de vazios mínimo do solo.

Como os índices de vazios máximo e mínimo do solo são conhecidos, utilizando a Equação (3.1), foi encontrado o valor de 0,84 para o índice de vazios correspondente à compacidade relativa igual 64,3%. Com esse valor de índice de vazios, determinou-se então a massa específica da areia, utilizando a expressão:

$$\rho = \frac{\rho_s}{1 + e} \quad (3.2)$$

O valor encontrado foi de 1,45 g/cm³, que corresponde a um peso específico (γ) igual a 14,2 kN/m³.

3.1.2.1 Estimativa do módulo de elasticidade do solo

Para confirmar o valor do módulo de elasticidade do solo, determinado através das retroanálises, esse parâmetro também foi estimado a partir de ensaios de compressão confinados, também chamados de ensaios oedométricos. Estes ensaios são comumente utilizados para determinar os parâmetros de adensamento em solos finos e consistem em aplicar uma carga em um corpo de prova lateralmente confinado e medir sua deformação em função da carga.

Para se estimar o módulo de elasticidade com este ensaio, inicialmente foram feitas algumas considerações, conforme mostrado a seguir. A Lei de Hooke pode ser representada pelo seguinte sistema de equações:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right] \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right] \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right] \quad (3.5)$$

onde: ε_x , ε_y , ε_z = deformações lineares nas direções x, y e z, respectivamente; σ_x , σ_y , σ_z = tensões normais nas direções x, y e z, respectivamente; E = módulo de elasticidade; ν = coeficiente de Poisson.

Durante um ensaio de compressão confinado, as deformações radiais são nulas (Figura 3.5), ou seja:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_1, \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma_2 \\ \varepsilon_z &= \varepsilon_{axial} = \varepsilon_1, \quad \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_{radial} = \varepsilon_2 = 0 \end{aligned}$$

Então pode-se escrever:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{axial} = \varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - 2\nu\sigma_2] \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_{radial} = \varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] = 0 \quad (3.7)$$

Figura 3.5: Esquema de compressão lateralmente confinada

Combinando as Equações (3.6) e (3.7), resulta:

$$\sigma_1 = \left[\frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \right] \varepsilon_1 = \tan \alpha \times \varepsilon_1 \quad (3.8)$$

Nesta equação, $\tan \alpha$ representa a declividade da curva no gráfico de tensão versus deformação, obtido com o ensaio de compressão confinada. Assim,

$$E = \frac{\tan \alpha (1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \quad (3.9)$$

Assumindo que o valor do coeficiente de Poisson seja conhecido, pode-se então estimar o valor do módulo de elasticidade.

O procedimento foi similar àquele preconizado pela norma ASTM D 2435 – 96, com algumas adaptações devido a peculiaridade do material granular seco. Diferentemente do ensaio oedométrico usual, não foi necessário realizar medições em função do tempo.

A primeira etapa deste ensaio foi determinar o diâmetro e altura dos anéis onde seriam moldados os corpos de prova. A etapa seguinte foi determinar a tara do conjunto do anel. A membrana impermeabilizante é imprescindível em ensaios oedométricos usuais, pois durante o adensamento de solos finos ocorre a drenagem de água. No caso da presente pesquisa, apesar de não haver água, a membrana foi mantida com o intuito de diminuir a entrada de grãos nas reentrâncias do conjunto.

Figura 3.6: Conjunto do anel com o corpo de prova já moldado

Foram ensaiados sete corpos de prova, sendo que para sua moldagem foram utilizados quatro procedimentos diferentes, visando obter diferentes valores para o índice de vazios inicial (e_0).

Tabela 3.3: Procedimentos de moldagem dos corpos de prova do ensaio de compressão confinada

Ensaio	e_0	Estado	Procedimento
1	0.97	Fofo	Funil grande com altura de queda 0,01 m
2	0.83	Intermediário	Posicionamento do material todo, seguido de leves marteladas - Realizado em uma única camada
3	0.86	Intermediário	Tentativa de vibração do corpo de prova. Não recomendado ¹
4	0.73	Compacto	Posicionamento do material, seguido de leves marteladas - Realizado com pequenas camadas de cada
5	0.71	Compacto	Chuva de areia com altura de queda 0,1 m
6	1.07	Fofo	Funil pequeno, o mais próximo do fundo possível - Altura de queda praticamente nula
7	0.72	Compacto	Chuva de areia com altura de queda 0,05 m

Figura 3.7: Posicionamento do corpo de prova na prensa

A massa total foi determinada somente após o ensaio, pois o índice de vazios pode se alterar caso ocorram vibrações. Então, para evitar vibrações desnecessárias antes do ensaio como a limpeza do conjunto, o transporte até a balança e a pesagem, essa etapa foi realizada por último. Desta forma, o índice de vazios inicial permaneceu inalterado no início do ensaio.

Como já foi dito anteriormente, o objetivo deste ensaio foi estimar o módulo de elasticidade da areia, através dos gráficos tensão versus deformação obtidos a partir dos

¹ Procedimento não recomendado, pois o equipamento de vibração não tem encaixe para conjunto do anel, sendo necessário segurá-lo com a mão. Nestas condições, deve-se utilizar uma frequência de vibração muito baixa e ainda assim tem-se o grande risco de perder material durante a moldagem.

ensaios. A tensão, que foi incrementada com a adição de blocos de metal de massa conhecida ao equipamento, foi calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{\frac{m_i \times g}{1000} \times b_p}{\pi \times \left(\frac{D_a}{2}\right)^2} \quad (3.10)$$

onde, σ = tensão vertical no estágio em um determinado estágio de carregamento (kPa), m_i = massa acumulada dos blocos no estágio i (kg), g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²), b_p = constante da prensa, D_a = diâmetro do anel (m²).

As tensões utilizadas nos ensaios foram de aproximadamente: 3 kPa, 6 kPa, 12 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 750 kPa, 1500 kPa.

A deformação correspondente à tensão atuante foi obtida pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{10 - L_i}{h_a} \quad (3.11)$$

onde, ε = deformação axial do corpo de prova, L_i = leitura do relógio comparador (mm), h_a = altura do anel (mm). Vale ressaltar que como a compressão é confinada, não ocorre deformação radial. Assim, a deformação axial é igual a deformação volumétrica. As medidas realizadas em cada ensaio estão apresentadas no *Apêndice A*.

Para cada corpo de prova ensaiado, plotou-se o gráfico tensão versus deformação (Figura 3.8 à Figura 3.14). O nível de tensões dos modelos deste trabalho está no intervalo entre 50 kPa e 400 kPa. Sendo assim, para este intervalo de tensões, foi ajustada uma reta, cuja declividade relaciona-se diretamente com o módulo de elasticidade, conforme foi visto anteriormente.

Figura 3.8: Gráfico tensão × deformação do ensaio oedométrico 1 (50 kPa a 400 kPa)

Figura 3.9: Gráfico tensão × deformação do ensaio oedométrico 2 (50 kPa a 400 kPa)

Figura 3.10: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 3 (50 kPa a 400 kPa)

Figura 3.11: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 4 (50 kPa a 400 kPa)

Figura 3.12: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 5 (50 kPa a 400 kPa)

Figura 3.13: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 6 (50 kPa a 400 kPa)

Figura 3.14: Gráfico tensão $\times$ deformação do ensaio oedométrico 7 (50 kPa a 400 kPa)

A

Tabela 3.4. apresenta os valores dos módulos de elasticidade calculados a partir das declividades das retas ajustadas para o intervalo de tensões de interesse. A Figura 3.15 mostra o gráfico módulo de elasticidade versus índice de vazios e a reta ajustada para esses pontos. Assumindo essa correlação linear, resulta que para o índice de vazios inicial igual a 0,84, o correspondente módulo de elasticidade é igual a 31524 kPa.

Tabela 3.4: Conversão da tangente da reta para o módulo de elasticidade (nível de tensões de 50 kPa a 400 kPa)

Ensaio	e_0	$\tan \alpha$	E (kPa)
1	0.97	29262	21737
2	0.83	46156	34287
3	0.86	39744	29524
4	0.73	51992	38622
5	0.71	47610	35367
6	1.07	29720	22077
7	0.72	52949	39333

Figura 3.15: Gráfico módulo de elasticidade $\times$ índice de vazios inicial - areia IPT #50, entre 50 kPa a 400 kPa

3.1.3 Tapete superficial

Nos modelos em centrífuga a carga foi aplicada por meio de uma sapata. Para evitar a punção da sapata na areia foi colocado um tapete na superfície do solo. Este tapete superficial é um piso vinílico, cujo comportamento é muito similar ao de uma borracha. Para calibrar o modelo numérico através dos ensaios em centrífuga, foi necessário estimar o módulo de elasticidade deste tapete. Para isto, foi realizado uma variação do ensaio a flexão com este material.

Para a realização do ensaio, uma placa do material vinílico foi apoiada sobre dois cutelos, como se fosse uma viga sobre dois apoios, conforme mostrado na Figura 3.16. As cargas foram aplicadas no centro da placa através de uma placa metálica rígida, de modo a distribuir a uniformemente ao longo da largura da placa. Abaixo do centro da placa foi instalado um relógio comparador para medir as deflexões.

A placa de material vinílico ensaiada apresentava as dimensões 118,00 mm $\times$ 163,30 mm $\times$ 3,60 mm. As dimensões da base da placa metálica eram 32,46 mm $\times$ 163,30 mm. De acordo com o arranjo montado para o ensaio, o vão livre medido entre o centro dos apoios era de 128 mm.

Figura 3.16: Esquema do ensaio de flexão para estimativa do módulo de elasticidade do tapete superficial

Após a montagem do arranjo, as cargas foram aplicadas a partir de massas conhecidas. Entre a aplicação de uma carga e outra, esperou-se 5 minutos para garantir a completa estabilização do sistema.

A partir da massa adicionada, foi calculado o peso (em N) e, em seguida, a carga equivalente distribuída na placa (em N/m):

$$q = \frac{m \times g}{L_p} \quad (3.12)$$

onde: P = carregamento (N); m = massa (g); g = aceleração da gravidade ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$);

q = carga distribuída (N/m); L_p = largura da placa de distribuição de carga (mm).

Tabela 3.5: Planilha do ensaio de flexão para estimativa do módulo de elasticidade do tapete superficial

Massa m (g)	Carregamento P (N)	Carga distribuída q (N/m)	Flecha D_f (mm)	Módulo de elasticidade E (MPa)
50,29	0,49	15,20	0,09	500,67
101,37	0,99	30,63	0,51	178,08
152,83	1,50	46,18	1,04	132,31
205,06	2,01	61,97	1,58	116,31
267,45	2,62	80,82	1,92	125,15
357,53	3,51	108,04	2,58	124,42
452,08	4,43	136,61	3,23	125,43
551,16	5,41	166,55	3,82	129,29
652,22	6,40	197,09	4,49	130,16
768,12	7,54	232,11	5,28	130,36
893,28	8,76	269,93	6,04	132,63
1020,62	10,01	308,41	7,23	150,53
1227,28	12,04	370,86	8,15	156,26
1440,46	14,13	435,28	9,05	161,83

Para a determinação dos módulos de elasticidade apresentados na Tabela 3.5, foi utilizado o programa computacional *FTOOL*. Este programa foi desenvolvido pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (disponível em: <https://www.ftool.com.br/Ftool/>).

O procedimento utilizado consistiu em calcular a flecha central no tapete superficial a partir de um módulo de elasticidade qualquer (1ª tentativa). Em seguida, tendo o valor da flecha medido pelo relógio comparador, foi calculado um novo módulo de elasticidade a partir da seguinte proporção:

$$E_1 = \frac{E_2 \times D_{f,1}}{D_{f,2}} \quad (3.13)$$

onde: E_1 = módulo de elasticidade resultante do ensaio (kPa); E_2 = módulo de elasticidade da primeira tentativa, inserido no *FTOOL* (kPa); $D_{f,1}$ = flecha realizada pela leitura do relógio comparador (mm); $D_{f,2}$ = flecha resultante do cálculo do *FTOOL* (mm).

Em seguida, o novo valor do módulo de elasticidade foi inserido no programa, para verificação do resultado. Este procedimento foi realizado para todas as cargas utilizadas no ensaio, resultando um valor de módulo de elasticidade para cada par de dado (carga e flecha).

Com o intuito de encontrar um valor único equivalente para o módulo de elasticidade do tapete que pudesse ser utilizado na modelagem numérica, foi criado um gráfico do módulo de elasticidade versus carga distribuída (Figura 3.17). Assim, descartando o primeiro ponto que notadamente é um *outlier*, os valores são bem próximos. Com os dados restantes, foi realizada uma média aritmética. Conclui-se, assim, que o módulo de elasticidade do tapete superficial é de 137,9 MPa.

Figura 3.17: Gráfico módulo de elasticidade versus carga distribuída

3.1.4 Aplicação das cargas

As cargas foram aplicadas através de uma sapata conectada a uma célula de carga. A sapata apresenta dimensões de 56 mm (comprimento), 48 mm (largura) e 25 mm (altura), resultando em uma área de aplicação da carga equivalente a 2688 mm². Foram aplicadas cargas de 800 N e 1200 N, resultando em uma tensão de 297 kPa e 446 kPa, respectivamente. Estas cargas e dimensões foram escolhidas com base no intervalo de tensões geradas por carregamentos veiculares encontrado na literatura (250 kPa e 750 kPa), apresentado no item 2.2. Além disto, era necessário que o bulbo de tensões atingisse maiores profundidades (aproximadamente 2 m no protótipo).

Figura 3.18: Esquema da montagem do modelo.

→ Célula de carga

→ Sapata

Figura 3.19: Aplicação da carga no modelo físico

Foram realizados um total de 22 ensaios. Todos os ensaios foram realizados com o mesmo modelo, sem necessidade de desmontá-lo. Iniciou-se com maior altura de recobrimento, com a aplicação da carga mais distante ($4D$).

Iniciou-se o ensaio rotacionando a centrífuga. Depois de estabilizado o voo, iniciou-se a aplicação da carga. A carga foi aplicada a uma velocidade de aproximadamente 0,05 mm/s.

Isto significa que o motor deslocou o atuador para baixo 0,05 mm a cada segundo. A carga de parada foi 800 N que representava o limite da célula de carga, ou seja, ao alcançar aproximadamente 800 N de compressão na sapata (medida pela célula de carga), o motor foi desligado. A partir daí, iniciou-se a descarga do modelo. Ao fim da descarga, a centrífuga geotécnica foi desacelerada, até sua parada total.

Então, a sapata foi reposicionada e o modelo foi testado novamente, até que o ensaio transcorresse todas as posições pré-estabelecidas. Ao fim dos ensaios em todas as posições para uma determinada altura de recobrimento, o sistema de aplicação de carga foi desmontado para a retirada da camada de areia.

A camada de areia foi retirada com o auxílio de um aspirador de pó comum e alisada com uma régua. Após a retirada da camada de areia, o sistema de aplicação de carga foi montado novamente e os testes foram repetidos. Este procedimento foi realizado para todas as alturas de recobrimento.

No total, foram realizados 22 ensaios na centrífuga geotécnica. Estes ensaios foram distribuídos da seguinte forma (Figura 3.20):

Figura 3.20: Esquema dos ensaios físicos

* Nota: A carga do ensaio com altura de recobrimento igual a 0,72 m e posição da carga em 4D não foi aplicada de forma contínua. Este ensaio teve pausa na aplicação da carga nos valores de 100N, 200N, 400N, 600N e 800N. O objetivo desta mudança no ensaio foi de analisar a influência do modo de aplicação da carga. No entanto, não houve influência.

Os ensaios sem o tapete foram os últimos realizados. Nesses mesmos ensaios, a carga de parada foi elevada de 800 N para 1200 N. O objetivo da elevação da carga foi analisar o comportamento do duto quando submetido a cargas mais elevadas. Entretanto, ainda foi possível a comparação com os outros ensaios, pois, como a aplicação da carga foi aplicada de forma gradual, é possível retirar dados equivalentes a 800 N, mesmo tendo a carga de parada em 1200 N.

Na Figura 3.21 é apresentado o modelo após os ensaios sem o tapete superficial. É possível perceber que houve uma pequena ruptura localizada na superfície do modelo. Entretanto não houve grande punção da sapata no modelo.

Figura 3.21: Pequena punção da sapata na areia

3.1.5 Instrumentação

Para a instrumentação do modelo físico foi utilizada o instrumento proposto por Pinheiro (2015), que desenvolveu e testou um equipamento que realiza a leitura direta dos deslocamentos da parede do duto, tornando mais fácil a determinação das variações de diâmetro dos dutos enterrados (ovalização).

Nesse método, utiliza-se um transdutor de deslocamento denominado *Clip-Gauge* (Figura 3.22). Este transdutor permite realizar a leitura de pequenos deslocamentos lineares na coroa, no piso e na linha d'água, permitindo a determinação da variação do diâmetro do duto.

O *Clip-Gauge* consiste em uma barra de aço, com quatro lâminas de aço inoxidável em cada extremidade e na região central. As lâminas posicionadas nas extremidades têm a função

de fixar o instrumento dentro do tubo, enquanto que nas lâminas centrais são instalados extensômetros (*strain-gauges*).

Estes extensômetros têm suas voltagens alteradas quando as lâminas em que estão fixados são defletidas. A voltagem é linearmente proporcional ao deslocamento das lâminas. Um sistema de aquisição de dados que capta a variação de voltagem é conectado ao instrumento, de forma que ao se obter a voltagem, é possível obter o deslocamento ocorrido.

Figura 3.22: Representação esquemática do *Clip-Gauge* (Pinheiro, 2015)

Cuidados especiais são necessários para que o *Clip-Gauge* seja instalado centralizado na seção transversal e posicionado de forma adequada (Figura 3.23). Na seção transversal, os pontos 2 e 4 foram denominados de *pontos laterais* (linha d'água), enquanto que o ponto 1 foi denominado de *topo do duto* (coroa) e o ponto 3 de *base do duto* (piso).

Figura 3.23: Posicionamento das placas do *Clip-Gauge* na seção transversal do duto (Adaptado de Pinheiro, 2015)

Além do *Clip-Gauge*, foi utilizada uma célula de carga para medir a carga aplicada na superfície representando o veículo. Para aplicar a carga no modelo foi utilizada uma sapata, conectada a uma célula de carga.

Os três principais elementos (célula de carga, motor, extensômetros do *Clip-Gauge*) utilizados na instrumentação do modelo são listados no *Apêndice B*. A calibração da célula de carga (*Apêndice C*) e do *Clip-Gauge* (*Apêndice D*).

3.2 Modelagem numérica

Foram realizadas análises numéricas tridimensionais, pelo método dos elementos finitos (FE) para simular o efeito de cargas superficiais em dutos enterrados. As análises foram realizadas através do *software RS³*, da *RocScience*.

Nestas análises, o método de instalação foi desprezado e o modelo foi criado como se o duto já estivesse sido instalado. Neste caso, o material ao redor do duto é completamente homogêneo, sem perturbações. Vale ressaltar, que foram analisados somente os efeitos da carga móvel, de forma que as tensões e deformações devido ao peso próprio foram desprezadas.

Um modelo com dimensões de 10 m × 10 m × 10 m foi criado. Estas dimensões foram escolhidas para que as condições de contorno ficassem posicionadas distantes do duto, para não interferir no estado de tensões da região de interesse. Nestas análises, a opção *Auto Restraints (surface)* foi escolhida, o que corresponde a condições travadas em todas as direções, exceto na superfície.

Os elementos da malha foram divididos automaticamente usando o tipo de elemento *10-Noded Tetrahedra*, com malha graduada (*Graded*), que corresponde a uma malha com mais refinamento perto da estrutura. Para maior precisão, foi criada uma região de refinamento (item 3.2.1), incluindo as regiões do duto e da aplicação da carga (Figura 3.24), com elementos dimensionados com 0,1 m.

Figura 3.24: Malha típica utilizada para a modelagem numérica deste trabalho

A estrutura do duto foi definida com comportamento elástico, com as propriedades da Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Propriedades do duto utilizado na modelagem numérica

Propriedades elásticas	Valor
Módulo de elasticidade - E	$2,1 \times 10^8$ kPa
Coefficiente de Poisson - ν	0,3
Geometria	Valor
Espessura - t_w	0,01417 m
Raio - r	0,26 m

Para o solo, foi escolhido o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e o material foi considerado com rigidez linear isotrópica. As propriedades utilizadas são apresentadas na Tabela 3.7. Para a determinação do módulo de elasticidade, foi realizada uma retroanálise a partir dos dados obtidos pelos modelos físicos.

Tabela 3.7: Propriedades do solo utilizado na modelagem numérica

Propriedade	Valor
Ângulo de atrito - φ	41°
Coesão - c	0 kPa
Ângulo de dilatação - ψ	25°
Peso específico - γ	14,2 kN/m ³
Módulo de elasticidade - E	30000 kPa
Coefficiente de Poisson - ν	0,3

Na biblioteca do programa RS^3 não há elementos de interface. Assim, foi criada uma região ao redor do duto, de espessura igual a 0,40 m, com solo menos resistente para simular a interação solo-estrutura. O material de interface utilizado foi semelhante ao solo do modelo, com exceção ao ângulo de atrito, que foi adotado com o valor de 29°.

O carregamento foi aplicado de forma uniformemente distribuída, com magnitude de 297 kPa. A área de aplicação foi retangular, com dimensões de 0,728 m $\times$ 0,624 m.

Um esquema dos modelos utilizados neste trabalho é apresentado na Figura 3.25.

Figura 3.25: Esquema dos modelos numéricos

3.2.1 Teste de malha

Para o teste de malha, escolheu-se o modelo com altura de recobrimento igual a 0,93 m ($H/D = 2D$) e com a carga centralizada ao duto ($0D$). Neste modelo, foi criada uma região de refinamento que englobasse toda a área crítica, que é delimitada pela região de aplicação da carga e o duto. Esta região representa a parte do modelo onde a carga tem mais influência. Na Figura 3.26, esta região é representada por um cubo em destaque e o parâmetro escolhido para essa verificação foi a variação do diâmetro do duto e as tensões verticais no topo.

Figura 3.26: Região de refinamento (destacada em vermelho)

A seguir, são apresentados gráficos (da Figura 3.27 à Figura 3.29) que mostram a estabilização dos resultados em relação ao número de elementos da malha. A linha tracejada mostra os pontos que estabilizaram e o primeiro ponto da linha tracejada é o ponto ótimo. A partir desse ponto, os resultados têm variação desprezível.

Figura 3.27: Teste de malha para a variação do diâmetro na direção vertical

Figura 3.28: Teste de malha para a variação do diâmetro na direção horizontal

Figura 3.29: Teste de malha para a tensão vertical no solo de contato no topo do duto

O ponto ótimo escolhido apresenta 335529 elementos e o refinamento estabelecido por este modelo foi $Element\ Size = 0,1\ m$ (ver mais detalhes no tutorial – *Apêndice E*).

3.3 Tensões no duto – Norma API RP 1102 (2007)

A fim de comparar os resultados obtidos na modelagem numérica, foi realizado um cálculo de tensões no duto, de acordo com a norma API RP 1102 (2007). A Tabela 3.8 apresenta as características iniciais do problema. O método e a formulação utilizada são descritos na sequência.

Tabela 3.8: Propriedades utilizadas no cálculo que não variam com a altura de recobrimento

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade	Observação
Espessura do duto	t_w	14,17	mm	-
Diâmetro do duto	D	0,52	m	-
Relação entre espessura e diâmetro	t_w/D	0,027	-	-
Módulo de reação do solo	E'	6,9	MPa	Adotado - Anexo A da API RP 1102 (2007)
Peso específico do solo	γ	14,2	kN/m ³	-
Módulo resiliente do solo	E_r	69	MPa	Adotado - Anexo A da API RP 1102 (2007)

a) Cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento do solo sobre o duto (S_{He}).

$$S_{He} = K_{He} \times B_e \times E_e \times \gamma \times D \quad (3.14)$$

onde: K_{He} = fator de rigidez; B_e = fator de recobrimento; E_e = fator de escavação; γ = peso específico do solo (kN/m³); D = diâmetro externo do duto (m).

O fator de rigidez (K_{He}) é obtido do ábaco que o relaciona com a relação entre espessura e diâmetro do duto (t_w/D) e o módulo de reação do solo (E') (Figura 3.30).

Figura 3.30: Ábaco do Fator de Rigidez para o cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento do solo sobre o duto, K_{He}

O fator de recobrimento (B_e) é obtido do ábaco que o relaciona com a relação entre a altura de recobrimento e o diâmetro da escavação (H/B_d) e o tipo de solo (Figura 3.31).

Figura 3.31: Ábaco do Fator de Recobrimento para o cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento do solo sobre o duto, B_e

Quando o diâmetro da escavação (B_d) for desconhecido, assume-se que o Fator de escavação (E_e) seja igual à unidade. A seguir são apresentados os valores determinados para o problema em particular.

Tabela 3.9: Dados utilizados para o cálculo de S_{He}

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores			Observação
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49	-
Diâmetro enterrado	B_d	m	0,57	0,57	0,57	Se B_d for desconhecido, adotar $D + 51$ mm
Relação entre H/B_d	H/B_d	-	1,62	1,25	0,85	-
Tipo de solo	-	-	A			-
Fator de rigidez	K_{He}	-	1500			Devido ao carregamento do solo
Fator de recobrimento	B_e	-	0,51	0,38	0,19	-
Fator de escavação	E_e	-	1			-
Tensão circunferencial	S_{He}	KPa	5649	4209	2104	Causada pelo carregamento do solo

b) Cálculo do carregamento externo devido às cargas móveis (w) e determinação do fator de impacto apropriado (Fi).

O carregamento externo (w) proveniente das cargas móveis foi adotado igual ao carregamento das modelagens física e numérica. Desta forma, a comparação com estes métodos se torna mais justa. Portanto, tem-se que $w = 297$ kPa.

Nos casos em que a altura de recobrimento for inferior a 1,5, o fator de impacto (F_i) deve ser adotado igual a 1,50 (rodovias) ou 1,75 (ferrovias). Como todas as alturas de recobrimento deste projeto são inferiores a 1,50, adotou-se $F_i = 1,50$.

c) Cálculo das tensões circunferencial cíclica (ΔS_H) e longitudinal cíclica (ΔS_L) devidas às cargas móveis.

Neste item há a opção de calcular considerando que a via é uma rodovia ou uma ferrovia. Foi adotado o procedimento para rodovias. Sendo assim, a tensão circunferencial será denominada por ΔS_{Hh} e a tensão longitudinal será denominada por ΔS_{Lh} . O índice “h” nos símbolos tem origem da palavra “highway”.

(ΔS_{Hh}) – tensão circunferencial cíclica devida ao carregamento veicular de uma rodovia:

$$\Delta S_{Hh} = K_{Hh} \times G_{Hh} \times R \times L \times F_i \times w \quad (3.15)$$

onde: K_{Hh} = fator de rigidez, G_{Hh} = fator de geometria, R = fator do tipo de pavimento, L = fator de configuração dos eixos, F_i = fator de impacto, w = carga aplicada na superfície (kPa)

O fator de rigidez (K_{Hh}) é obtido do ábaco que o relaciona com a relação entre espessura e diâmetro do duto (t_w/D) e o módulo resiliente do solo (E_r) (Figura 3.32).

Figura 3.32: Ábaco do Fator de Rigidez para o cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento veicular, K_{Hh}

O fator de geometria (G_{Hh}) é obtido do ábaco que o relaciona com a altura de recobrimento (H) e o diâmetro (D) (Figura 3.33).

Figura 3.33: Ábaco do Fator de Geometria para o cálculo da tensão circunferencial devida ao carregamento veicular, G_{Hh}

O fator do tipo de pavimento (R) e o fator de configuração dos eixos (L) são obtidos da tabela que os relaciona com o tipo de pavimento e com a configuração dos eixos da carga veicular (Tabela 3.10).

Tabela 3.10: Fator do tipo de pavimento, R , e Fator de configuração dos eixos, L . Para altura de recobrimento inferior a 1,2 m e diâmetro superior a 305 mm

Tipo de pavimento	Configuração do eixo	R	L
Pavimento flexível	Eixo Tandem	1,00	1,00
	Eixo Único	1,00	0,65
Sem pavimento	Eixo Tandem	1,10	1,00
	Eixo Único	1,10	0,65
Pavimento rígido	Eixo Tandem	0,90	1,00
	Eixo Único	0,90	0,65

Com todos os parâmetros definidos e utilizando a Eq. 3.13, tem-se que $\Delta S_{Hh} = 4434$ kPa (para $H = 0,93$), 5173 kPa (para $H = 0,72$) e 5542 kPa (para $H = 0,49$). A seguir são apresentados os valores determinados para o problema em particular.

Tabela 3.11: Dados utilizados para o cálculo de ΔS_{Hh}

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores			Observação
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49	-
Fator de rigidez	K_{Hh}	-	11,6			Devido ao carregamento veicular
Fator de geometria	G_{Hh}	-	1,2	1,4	1,5	-
Fator do tipo de pavimento	R	-	1,1			-
Fator de configuração dos eixos	L	-	0,65			-
Tensão circunferencial	ΔS_{Hh}	KPa	4434	5173	5542	Causada pelo carregamento veicular

(ΔS_{Lh}) – tensão longitudinal cíclica devida ao carregamento veicular de uma rodovia:

$$\Delta S_{Lh} = K_{Lh} \times G_{Lh} \times R \times L \times F_i \times w \quad (3.16)$$

onde: K_{Lh} = fator de rigidez, G_{Lh} = fator de geometria, R = fator do tipo de pavimento, L = fator de configuração dos eixos, F_i = fator de impacto, w = carga aplicada na superfície (kPa)

De forma muito similar ao cálculo efetuado para ΔS_{Hh} , obtém-se os valores de K_{Lh} (Figura 3.34) G_{Lh} (Figura 3.35); R e L (Tabela 3.10).

Figura 3.34: Ábaco do Fator de Rigidez para o cálculo da tensão longitudinal devida ao carregamento veicular, K_{Lh}

Figura 3.35: Ábaco do Fator de Geometria para o cálculo da tensão longitudinal devida ao carregamento veicular, G_{Lh}

Com todos estes fatores definidos e utilizando a Eq. 3.14, tem-se que $\Delta S_{Lh} = 3153$ kPa (para $H = 0,93$), 3440 kPa (para $H = 0,72$) e 3727 kPa (para $H = 0,49$). A seguir são apresentados os valores determinados para o problema em particular.

Tabela 3.12: Dados utilizados para o cálculo de ΔS_{Lh}

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores			Observação
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49	-
Fator de rigidez	K_{Lh}	-	9			Devido ao carregamento veicular
Fator de geometria	G_{Lh}	-	1,1	1,2	1,3	-
Fator do tipo de pavimento	R	-	1,1			-
Fator de configuração dos eixos	L	-	0,65			-
Fator de impacto	F_i	-	1,5			-
Carga aplicada na superfície	w	kPa	297			-
Tensão longitudinal	ΔS_{Lh}	KPa	3153	3440	3727	Causada pelo carregamento veicular

d) *Verificar a ocorrência de escoamento pelo duto a partir da tensão de tração equivalente (S_{eq}):*

(S_I) – tensão máxima circunferencial:

$$S_I = S_{He} + \Delta S_H + S_{Hi} \quad (3.17)$$

onde: S_{He} = tensão circunferencial devida ao carregamento de solo - calculada no item b (kPa), ΔS_H = tensão circunferencial devida ao carregamento veicular de uma rodovia - calculada no item d (kPa), S_{Hi} = tensão circunferencial devida à pressão interna - desprezada neste trabalho (kPa).

Tabela 3.13: Dados utilizados para o cálculo de S_I

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores			Observação
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49	-
Tensão circunferencial	S_{He}	kPa	5649	4209	2104	Causada pelo carregamento de solo
Tensão circunferencial cíclica	ΔS_{Hh}	kPa	4434	5173	5542	Causada pelo carregamento veicular
Tensão máxima circunferencial	S_I	kPa	10083	9382	7647	-

(S_2) – tensão máxima longitudinal:

$$S_2 = \Delta S_{Lh} - E_a \times \alpha_T \times (T_2 - T_1) + \nu_a \times (S_{He} + S_{Hi}) \quad (3.18)$$

onde: ΔS_{Lh} = tensão longitudinal devida ao carregamento veicular de uma rodovia - calculada no item d (kPa), E_a = módulo de elasticidade do aço (kPa), α_T = coeficiente de dilatação

térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), T_I = temperatura no momento da instalação ($^{\circ}\text{C}$), T_2 = temperatura máxima ou mínima de operação ($^{\circ}\text{C}$), ν_a = coeficiente de Poisson do aço, S_{He} = tensão circunferencial devida ao carregamento de solo - calculada no item b (kPa), S_{Hi} = tensão circunferencial devida à pressão interna - desprezada neste trabalho (kPa).

Neste trabalho foi desprezada a influência da temperatura, portanto a segunda parcela da Equação (3.18) “ $E_S \times \alpha_T \times (T_2 - T_I)$ ” é nula.

Tabela 3.14: Dados utilizados para o cálculo de S_2

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores			Observação
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49	-
Tensão longitudinal cíclica	ΔS_{Lh}	kPa	3153	3440	3727	Causada pelo carregamento veicular
Coeficiente de Poisson	ν	-	0,3			-
Tensão circunferencial	S_{He}	kPa	5649	4209	2104	Causada pelo carregamento de solo
Tensão máxima longitudinal	S_2	kPa	4848	4703	4358	-

(S_3) – tensão máxima radial: Neste trabalho o duto não está em operação. Sendo assim não há pressão interna e $S_3 = 0$.

(S_{eq}) – tensão de tração equivalente:

$$S_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \times \left[(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 \right]} \quad (3.19)$$

Tabela 3.15: Dados utilizados para o cálculo de S_{eq}

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores		
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49
Tensão máxima circunferencial	S_I	kPa	10083	9382	7647
Tensão máxima longitudinal	S_2	kPa	4848	4703	4358
Tensão máxima radial	S_3	kPa	0	0	0
Tensão de tração equivalente	S_{eq}	kPa	8734	8125	6644

Verificação de escoamento:

$$S_{eq} \leq SMYS \times F \quad (3.20)$$

onde: S_{eq} = tensão de tração equivalente (kPa); $SMYS$ = tensão mínima específica de escoamento (kPa); F = fator de projeto.

De acordo com o regulamento 49 *Code of Federal Regulations Part 192.111*, para áreas pouco povoadas deve-se utilizar o fator de projeto igual a 0,72. No entanto, adverte que se

houver algum tipo de passagem de veículos, o fator de projeto deve ser adotado igual a 0,6 ou menos. Neste caso, adota-se $F = 0,6$.

Na Tabela 3.16 são apresentados os valores máximos de tensão permitidos. Assim, verifica-se que a tensão de tração equivalente para todas as alturas de recobrimento é inferior ao máximo permitido.

Tabela 3.16: Tensões mínimas de escoamento para cada tipo de aço (Adaptado de API 5L, 2004)

Grau	SMYS (MPa)	SMYS $\times$ 0,6 (MPa)
A25	172	103
A	207	124
B	241	145
X42	290	174
X46	317	190
X52	359	215
X56	386	232
X60	414	248
X65	448	269
X70	483	290
X80	552	331

e) *Verificar se não ocorre a fadiga nas soldas do duto.*

$$\Delta S_{Lh} \leq S_{FG} \times F \quad (3.21)$$

onde: ΔS_{Lh} = tensão longitudinal devida ao carregamento veicular de uma rodovia - calculada no item d (kPa), S_{FG} = limite de resistência à fadiga para soldas circunferenciais (=82740 kPa para todos os tipos de soldas), F = fator de projeto.

$$\Delta S_{Hh} \leq S_{FL} \times F \quad (3.22)$$

onde: ΔS_{Hh} = tensão circunferencial devida ao carregamento veicular de uma rodovia - calculada no item d (kPa); S_{FL} = limite de resistência à fadiga para soldas longitudinais (Tabela 3.18), F = fator de projeto.

Comparando os dados da Tabela 3.17 com os dados da Tabela 3.18, verifica-se que não ocorre fadiga para nenhum dos tipos de aço listados, para nenhuma altura de recobrimento e para nenhum tipo de emenda.

Tabela 3.17: Tensões cíclicas circunferencial (ΔS_{Hh}) e longitudinal (ΔS_{Lh})

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores			Observação
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49	-
Tensão circunferencial cíclica	ΔS_{Hh}	kPa	4434	5173	5542	Causada pelo carregamento veicular
Tensão longitudinal cíclica	ΔS_{Lh}	kPa	3153	3440	3727	Causada pelo carregamento veicular

Tabela 3.18: Tensões de resistência à fadiga para soldas circunferenciais (S_{FG}) e longitudinais (S_{FL}) (Adaptado de API RP 1102, 2007)

Grau	S_{FG} (kPa)	$S_{FG} \times 0,6$ (kPa)	S_{FL} (kPa)		$S_{FL} \times 0,6$ (kPa)	
	Todos os tipos de soldas		Sem emenda e ERW	SAW	Sem emenda e ERW	SAW
A25	82740	49644	144795	82740	86877	49644
A	82740	49644	144795	82740	86877	49644
B	82740	49644	144795	82740	86877	49644
X42	82740	49644	144795	82740	86877	49644
X46	82740	49644	144795	82740	86877	49644
X52	82740	49644	144795	82740	86877	49644
X56	82740	49644	158585	82740	95151	49644
X60	82740	49644	158585	82740	95151	49644
X65	82740	49644	158585	82740	95151	49644
X70	82740	49644	172375	89635	103425	53781
X80	82740	49644	186165	96530	111699	57918

4 Resultados e discussões

Todos os resultados apresentados a seguir, referentes à modelagem física em centrífuga, foram obtidos através da leitura do instrumento *Clip-Gauge*. Todos os resultados foram obtidos para o carregamento de 297 kPa, aplicado em uma área de 2688 mm² (56 mm × 48 mm), com exceção ao tópico 4.2. Neste tópico, além do carregamento de 297 kPa, também há resultados do carregamento de 446 kPa, aplicado na mesma área.

Os carregamentos foram nomeados da seguinte forma:

- a) Carregamento 1: 297 kPa, aplicado em uma área de 2688 mm² (56 mm × 48 mm)
- b) Carregamento 2: 446 kPa, aplicado em uma área de 2688 mm² (56 mm × 48 mm)

Também vale ressaltar que o efeito do peso próprio do solo não foi considerado nos modelos físicos. Os deslocamentos foram zerados no início da etapa de carregamento. Para efeito de comparação, os resultados dos modelos numéricos também correspondem somente a etapa de carregamento.

As posições escritas em função de D referem-se a uma distância horizontal medida entre a linha vertical que passa pelo centro da sapata e a linha vertical que passa pelo centro do duto. Esta distância faz referência ao diâmetro do duto. Portanto, uma distância de $2D$, por exemplo, equivale ao dobro do diâmetro do duto.

As deformações diametraais foram calculadas a partir das equações a seguir e a Figura 4.1 esquematiza a convenção de sinais utilizada:

- Resultados do *Clip-Gauge*:

$$\varepsilon_v = -\frac{\delta_{v,1} + \delta_{v,3}}{D} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_h = -\frac{\delta_{h,2} + \delta_{h,4}}{D} \times 100 \quad (4.2)$$

- Resultados da modelagem numérica:

$$\varepsilon_v = \frac{\delta_{v,1} - \delta_{v,3}}{D} \times 100 \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_h = \frac{\delta_{h,4} - \delta_{h,2}}{D} \times 100 \quad (4.4)$$

onde: ε_v e ε_h = deformações diametrais vertical e horizontal, respectivamente (%), $\delta_{v,1}$ = deslocamento vertical do topo do duto (mm), $\delta_{v,3}$ = deslocamento vertical da base do duto (mm), $\delta_{h,2}$ = deslocamento horizontal da lateral esquerda do duto (mm), $\delta_{h,4}$ = deslocamento horizontal da lateral direita do duto (mm), D = diâmetro do duto (mm).

a) Convenção de sinais para as deformações diametrais:

Valores de ε_v e ε_h negativos correspondem a uma diminuição do diâmetro, enquanto que valores positivos indicam um aumento do diâmetro.

b) Convenção de sinais para as medições do *Clip-Gauge* (sinal relativo ao centro do duto):

Valores de $\delta_{v,1}$, $\delta_{v,3}$, $\delta_{h,2}$ e $\delta_{h,4}$ negativos correspondem a uma deflexão da extremidade da lâmina do *Clip-Gauge* no sentido exterior ao duto, enquanto que valores positivos indicam esta deflexão no sentido interior ao duto (centro do duto). Na Figura 4.1 são esquematizados os sentidos utilizados no cálculo. No esquema, as setas representam os sentidos positivos.

c) Convenção de sinais para os resultados dos modelos numéricos (sinal relativo ao eixo de referência do programa RS3, de acordo com a geometria desenhada):

Sinal negativo para $\delta_{v,1}$ e $\delta_{v,3}$ corresponde a um deslocamento na direção vertical para baixo, enquanto que o sinal positivo indica um deslocamento vertical para cima. No caso do eixo z (vertical), a origem se encontra abaixo do duto e o seu sentido é crescente para cima. Para os deslocamentos $\delta_{h,2}$ e $\delta_{h,4}$, sinal negativo corresponde a um deslocamento na direção horizontal para a esquerda, enquanto que um sinal positivo indica deslocamento horizontal para direita. No caso do eixo x (horizontal e transversal ao duto), a origem se encontra a esquerda do duto e o seu sentido é crescente para direita. Na Figura 4.1 são esquematizados os sentidos utilizados no cálculo. No esquema, as setas representam os sentidos positivos.

Figura 4.1: Convenção de sinais dos deslocamentos nos pontos do duto, medidos através do Clip-Gauge (a esquerda) e calculados pela modelagem numérica (a direita). As setas indicam sinais positivos

4.1 Influência do tapete

4.1.1 Modelo físico – $H/D = 1$

Na modelagem física em centrífuga, a última camada ($H/D = 1$) foi ensaiada com e sem o tapete superficial colocado para evitar a punção da sapata no solo. Com isso, foi possível analisar a influência do tapete nos modelos físicos. Os resultados discutidos neste tópico foram obtidos através das leituras do *Clip-Gauge*. Na Figura 4.2 e na Figura 4.3 são apresentados os resultados das deformações diametrais vertical e horizontal, respectivamente.

Na posição $0D$, as deformações diametrais são maiores do que nas outras posições, tanto nos modelos com tapete e sem tapete, e alcançam valores de 0,16%. Nesta mesma posição, o tapete superficial tem a maior influência e a diferença de deformação (entre os modelos com e sem o tapete) neste ponto é de 0,04 pontos percentuais (Tabela 4.1). Assim, podemos concluir que a influência do tapete pode ser desprezada. No entanto, é válido observar que este modelo utilizou areia compacta e que não houve punção da sapata no material. Em modelos compostos de material menos resistente (como solos finos mal compactados ou areia fofas) é necessário avaliar a sua necessidade e influência.

Figura 4.2: Influência do tapete na variação do diâmetro vertical no modelo físico $H/D = 1$ ($Q = 297$ kPa)

Figura 4.3: Influência do tapete na variação do diâmetro horizontal no modelo físico $H/D = 1$ ($Q = 297$ kPa)

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios físicos com e sem o tapete superficial e suas diferenças

Modelo	H/D = 1 (modelo físico)					
Posição da carga	Deformação diametral vertical - ε_v (%)			Deformação diametral horizontal - ε_h (%)		
	sem tapete	com tapete	diferença	sem tapete	com tapete	diferença
1D-	-0,0294	-	-	-0,0363	-	-
0D	-0,1639	-0,1469	-0,0171	0,1494	0,1055	0,0439
1D+	0,0348	-0,0047	0,0395	0,0954	0,0983	-0,0029
2D	0,0437	0,0537	-0,0100	-0,0159	-0,0065	-0,0094
3D	0,0202	0,0214	-0,0012	-0,0165	-0,0106	-0,0059
4D	0,0093	0,0122	-0,0029	-0,0037	-0,0079	0,0042

4.1.2 Modelagem numérica

Nos modelos construídos utilizando material plástico, o tapete superficial é necessário. Caso ele não seja inserido, o processamento do modelo não converge. Isso se deve ao fato de que utilizando este tipo de material ocorre ruptura localizada próxima a superfície, na região de contato da sapata com o solo.

Nos modelos considerados elásticos, a influência do tapete é desprezível. Isto pode ser verificado nas figuras a seguir (da Figura 4.4 à Figura 4.9). Nesses gráficos é apresentado o comportamento do diâmetro vertical e horizontal em relação ao posicionamento da carga.

A partir desses dados, pode-se concluir dois pontos importantes. O primeiro é que os pontos nos modelos com e sem tapete ficaram praticamente sobrepostos. Isto é, o resultado obtido para os dois modelos é muito próximo e o tapete superficial pode ser desprezado na modelagem numérica elástica.

Figura 4.4: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametrais verticais do modelo numérico elástico ($H/D = 2$)

Figura 4.5: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametraais horizontais do modelo numérico elástico ($H/D = 2$)

Figura 4.6: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametraais verticais do modelo numérico elástico ($H/D = 1,5$)

Figura 4.7: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametraais horizontais do modelo numérico elástico ($H/D = 1,5$)

Figura 4.8: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametraais verticais do modelo numérico elástico ($H/D = 1$)

Figura 4.9: Influência do tapete superficial nos deslocamentos diametrais horizontais do modelo numérico elástico ($H/D = 1$)

4.2 Aumento da carga ($H/D = 1$, sem tapete)

O aumento na tensão aplicada aumenta a deformação do diâmetro. Nota-se na Figura 4.10 que, em módulo, as deformações que ocorrem no carregamento 1 (297 kPa) são inferiores as que ocorrem no carregamento 2 (446 kPa).

Figura 4.10: Aumento da carga no modelo físico $H/D = 1$, sem tapete

Com o intuito de analisar quantitativamente os resultados obtidos nestes ensaios, foi criada a Tabela 4.2. O cálculo da relação (α) entre as deformações obtidas para o carregamento 2 e carregamento 1 foi realizado de acordo com a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (4.5)$$

onde: ε_2 = deformação diametral devida ao carregamento 2, ε_1 = deformação diametral devida ao carregamento 1.

Pela Figura 4.11, é possível notar que a relação α , referente à posição da carga 4D, é um outlier e pode ser desprezado. Realizando a média aritmética para os valores restantes, observa-se que o resultado é próximo de 50% (valor do aumento da carga). Assim, pode-se concluir que o modelo permanece em seu comportamento elástico linear durante a modelagem em centrífuga. Desta forma, a variação do diâmetro é linearmente proporcional a variação da força aplicada. O método utilizado por Noor e Dhar (2003) em aplicar uma carga concentrada unitária e considerar seu modelo com comportamento elástico-linear é consistente

Tabela 4.2: Aumento da deformação vertical relacionado ao aumento da carga

	Q (kPa)	Posição da carga						Média
		1D-	0D	1D+	2D	3D	4D	
<i>Direção vertical</i>	297	-0,0220	0,0504	-0,0390	-0,0152	-0,0143	-0,0058	
	446	-0,0397	0,0750	-0,0558	-0,0251	-0,0188	-0,0091	
	α	1,80	1,49	1,43	1,66	1,31	1,56	1,54
<i>Direção horizontal</i>	297	0,03629	-0,14943	-0,09536	0,01588	0,01648	0,00369	
	446	0,04874	-0,24929	-0,13991	0,03128	0,02944	0,01072	
	α	1,34	1,67	1,47	1,97	1,79	2,91	1,65

Figura 4.11: Outlier da Tabela 4.2

Em projeto de dutos de aço enterrados, algumas normas como a AWWA M11 (2011) apresentam como o limite da deformação diametral valores entre 2% a 5% do diâmetro do duto, a depender dos materiais do sistema. Ou seja, a deformação diametral deve ser inferior a 2%. Este tópico contempla a maior deformação diametral obtida dentre todos os modelos estudados, pois é analisada a influência da maior carga. Assim, nota-se que mesmo a maior deformação medida (ordem de 0,25%) é muito inferior à permitida (2%).

4.3 Análise de tensões

A tensão de tração equivalente no duto foi obtida para os três diferentes casos analisados na modelagem numérica (modelo elástico – com tapete, modelo elástico – sem tapete, modelo elasto-plástico) e para o cálculo da norma API RP 1102 (2007). As tensões analisadas neste tópico são referentes à geratriz superior do duto e correspondem a posição da carga centralizada (0D) (Tabela 4.3 e Figura 4.12).

Os valores determinados através da modelagem numérica resultaram em valores muito diferentes daqueles determinados pela norma. Isso se deve ao fato de que a norma não recomenda a instalação de dutos muito superficiais onde há tráfego. A altura de recobrimento mínima recomendada varia de 0,9 m a 1,2 m, independente do diâmetro do duto.

Não extrapolar as curvas dos ábacos da norma é outra recomendação. No entanto, duas das alturas de recobrimento estudadas neste projeto não estão representadas nos ábacos por serem

demasiadamente pequenas. Assim, para essas alturas as curvas foram extrapoladas. Com isso, pode-se confirmar que o cálculo sugerido pela norma não é válido para as alturas de recobrimento estudadas. Desta forma, só serão discutidos neste tópico os resultados da norma obtidos para a altura de recobrimento de 0,93 m ($H/D = 2$).

Outra observação pertinente a se fazer neste tópico é que o cálculo da norma é pouco preciso, pois é realizado através de ábacos e não abrange muitas situações. Os modelos numéricos podem ser criados de acordo com as particularidades de cada situação. Com isso, conclui-se que o cálculo da norma é prático, rápido e suficiente para uma estimativa dos valores. Entretanto, para realizar um projeto mais seguro e detalhado é importante que os cálculos sejam acompanhados de modelos numéricos e/ou físicos.

Tabela 4.3: Análise de tensões no duto – comparativo com a norma API RP 1102 (2007)

Modelo elástico – com tapete					
Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores		
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49
Tensão máxima circunferencial	S_1	kPa	864	1276	2155
Tensão máxima longitudinal	S_2	kPa	12870	16229	21140
Tensão máxima radial	S_3	kPa	0	0	0
Tensão de tração equivalente	S_{eq}	kPa	12461	15630	20149
Modelo elástico – sem tapete					
Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores		
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49
Tensão máxima circunferencial	S_1	kPa	958	1425	2395
Tensão máxima longitudinal	S_2	kPa	13763	17287	22743
Tensão máxima radial	S_3	kPa	0	0	0
Tensão de tração equivalente	S_{eq}	kPa	13310	16620	21645
Modelo plástico					
Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores		
Altura de recobrimento	H	m	0,93	0,72	0,49
Tensão máxima circunferencial	S_1	kPa	1363	2103	2951
Tensão máxima longitudinal	S_2	kPa	13274	19674	22791
Tensão máxima radial	S_3	kPa	0	0	0
Tensão de tração equivalente	S_{eq}	kPa	12648	18712	21468
Norma API RP 1102 (2007)					
Propriedade	Símbolo	Unidade	Valores		
Altura de recobrimento	H	m	0,93		
Tensão máxima circunferencial	S_1	kPa	10083		
Tensão máxima longitudinal	S_2	kPa	4848		
Tensão máxima radial	S_3	kPa	0		
Tensão de tração equivalente	S_{eq}	kPa	8734

Figura 4.12: Análise da tensão de tração equivalente no duto em função da relação H/D (modelos numéricos e norma API)

4.4 Resultados gerais

4.4.1 Comparação entre os resultados dos modelos

Nos gráficos a seguir (Figura 4.13 à Figura 4.18) são apresentados os resultados de todas as modelagens numéricas e físicas realizadas. A partir destes gráficos é possível concluir que todos os modelos resultaram em valores muito próximos.

Os modelos físicos foram essenciais para a criação dos modelos numéricos. Com os resultados obtidos pela modelagem centrífuga foi possível calibrar o modelo numérico e realizar uma retroanálise para determinar o módulo de elasticidade do solo. Estes resultados foram bastante coerentes, pois os ensaios em laboratório resultaram o mesmo valor para este parâmetro ($E \approx 30$ MPa).

Figura 4.13: Deformação diametral vertical para altura de recobrimento $H/D = 2$ e carga aplicada de 297 kPa

Figura 4.14: Deformação diametral horizontal para altura de recobrimento $H/D = 2$ e carga aplicada de 297 kPa

Figura 4.15: Deformação diametral vertical para altura de recobrimento $H/D = 1,5$ e carga aplicada de 297 kPa

Figura 4.16: Deformação diametral horizontal para altura de recobrimento $H/D = 1,5$ e carga aplicada de 297 kPa

Figura 4.17: Deformação diametral vertical para altura de recobrimento $H/D = 1$ e carga aplicada de 297 kPa

Figura 4.18: Deformação diametral horizontal para altura de recobrimento $H/D = 1$ e carga aplicada de 297 kPa

Pode-se concluir que o melhor modelo é o modelo elástico sem o tapete, pela sua simplicidade e por apresentar resultados similares aos dos outros modelos. Em teoria, o modelo mais complexo representaria melhor o problema estudado (modelo constitutivo elasto-plástico), por considerar a influência do tapete e a plastificação dos pontos mais críticos (contato da sapata na superfície do modelo). No entanto, o tempo de processamento de cada modelo elasto-plástico foi de aproximadamente 24h.

Em contrapartida, o modelo elástico sem tapete resultou em valores muito próximos. Este modelo pouparia bastante tempo em trabalhos futuros. Além do tempo de processamento do modelo elástico (≈ 10 minutos por modelo) ser bem inferior ao do modelo elasto-plástico (≈ 24 horas por modelo), também se economiza tempo por não ser necessário realizar ensaios de laboratório para se determinar parâmetros do tapete (≈ 1 semana).

4.4.2 Ovalização

Pinheiro (2015) comprovou a ocorrência da ovalização do duto, submetido a um carregamento estático. Além disto, comprovou a eficiência do *Clip-Gauge* em medir esse fenômeno nos modelos reduzidos a 1g, com uma carga aplicada de 500 N.

Este trabalho complementa esta conclusão, pois é possível verificar a ocorrência da ovalização do duto nos modelos realizados em centrífuga, com cargas aplicadas de até 446 kPa. Os modelos numéricos também comprovaram a ocorrência desse fenômeno. Esta conclusão pode ser observada em todos os gráficos apresentados no item anterior (da Figura 4.13 à Figura 4.18), onde é possível notar que os sinais de ε_v e ε_h são majoritariamente opostos.

Nas Figuras a seguir (da Figura 4.19 à Figura 4.21) é apresentada a ovalização do duto em função da posição da carga. A linha tracejada preta refere-se à seção transversal inicial do duto, sem deformações. A linha contínua vermelha refere-se à seção transversal do duto, obtida pela modelagem numérica, realizada com o modelo constitutivo elástico, sem o tapete superficial, após o carregamento. Ressalta-se aqui que as deformações geradas durante o estado inicial foram desprezadas. Os símbolos em formato de círculos cheios referem-se a pontos da seção transversal do duto obtida pelas medidas do *Clip-Gauge*, na modelagem física.

A escala apresentada nestas imagens deve ser utilizada com cautela, pois as deformações foram amplificadas para melhor visualização. Sendo assim, a escala é válida somente para as medidas de deformação, ou seja, a distância entre a linha vermelha contínua e a linha preta tracejada, ou entre os pontos referentes à modelagem centrífuga e a linha preta tracejada. A dimensão do duto (diâmetro) não é contemplada por esta escala.

Figura 4.19: Ovalização do duto em função da posição da carga para altura de recobrimento $H/D = 2$

Figura 4.20: Ovalização do duto em função da posição da carga para altura de recobrimento $H/D = 1,5$

Figura 4.21: Ovalização do duto em função da posição da carga para altura de recobrimento $H/D = 1$

Nota-se que quanto maior a relação H/D , menor é a influência do carregamento veicular sobre o duto. Outra importante observação é que novamente verifica-se que cargas posicionadas a distâncias horizontais maiores que $2D$ do centro do duto podem ser desprezadas.

4.4.3 Influência da altura de recobrimento e a posição da carga

Observando os gráficos apresentados anteriormente, pode-se confirmar que quanto menor a altura de recobrimento, maior é a deformação diametral do duto gerada pela aplicação da carga. Isto ocorre devido ao fato de haver menos solo para distribuir a tensão aplicada.

Para efeito de comparação, as tensões verticais no solo foram calculadas pela solução de Newmark e apresentadas na Tabela 4.4. Para o cálculo, foram utilizadas as seguintes equações:

$$\Delta\sigma_v = \frac{\sigma_0}{4\pi} \left\{ \frac{\left[\frac{2ab(a^2 + b^2 + 1)^{0,5}}{(a^2 + b^2 + 1 + a^2b^2)(a^2 + b^2 + 1)} \right] (a^2 + b^2 + 2)}{+ \arctg \left[\frac{2ab(a^2 + b^2 + 1)^{0,5}}{a^2 + b^2 + 1 - a^2b^2} \right]} \right\} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{v,0} = \gamma H \quad (4.2)$$

$$\sigma_{v,f} = \sigma_{v,0} + \Delta\sigma_v \quad (4.3)$$

onde: $\Delta\sigma_v$ = acréscimo da tensão vertical gerada pela carga de superfície calculado pela solução de Newmark (kPa), σ_0 = carregamento uniformemente distribuído na superfície (kPa), a = relação entre a maior dimensão da aplicação da carga (0,728 m) e a altura de recobrimento, b = relação entre a menor dimensão da aplicação da carga (0,624 m) e a altura de recobrimento, $\sigma_{v,0}$ = tensão vertical no solo devido ao peso próprio (kPa), γ = peso específico do solo (kN/m³), H = altura de recobrimento (m), $\sigma_{v,f}$ = tensão vertical total no solo na profundidade H (kPa)

Tabela 4.4: Tensão vertical no solo calculada pela solução de Newmark

H (m)	H/D	a	b	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_{v,0}$ (kPa)	$\sigma_{v,f}$ (kPa)
0,49	1	0,743	0,637	148,3	7,0	155,3
0,72	1,5	0,506	0,433	90,6	10,2	100,8
0,93	2	0,391	0,335	60,9	13,2	74,1

Na Figura 4.22 são apresentadas curvas de isovalores de tensão vertical no solo. Os valores representados correspondem aos valores calculados pela solução de Newmark. O modelo em questão é o elástico (sem tapete), com carga aplicada a $0D$.

Nota-se que os valores obtidos pelo método numérico são muito próximo ao da solução de Newmark, pois a posição das curvas de isovalores coincidiram com a profundidade do topo do duto.

Figura 4.22: Bulbos de tensões verticais formados nos modelos numéricos com carga centralizada ($0D$)

A norma API RP 1102 (2007) recomenda que as alturas de recobrimento sejam de pelo menos 0,9 m. Caso esta altura não possa ser respeitada, a norma sugere a instalação de proteção mecânica. Esta recomendação existe exatamente para que a tensão no topo do duto não alcance valores muito elevados. Em dutos muito superficiais não há uma camada de solo suficiente para evitar tensões excessivas no topo do duto geradas por alguma eventual sobrecarga ou impacto.

No entanto, caso seja necessária alguma obra nas proximidades de um duto já instalado, cuja altura de recobrimento não satisfaça a mínima recomendada, este estudo propõe uma análise específica para o caso. Neste estudo, pode-se perceber que em alguns casos é possível a sobrecarga de um veículo, mesmo quando não há a proteção mecânica, nem a altura de recobrimento recomendada.

Outra informação muito importante que podemos extrair deste estudo é que quando a carga é aplicada a distâncias superiores à $2D$, o mesmo não sofre deformações significativas. No caso deste trabalho, recomenda-se isolar uma faixa com largura de 1 m do centro do duto, para cada lado. Assim, a carga aplicada não terá grande influência no duto enterrado.

5 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de um duto enterrado submetido a um carregamento móvel. Esse carregamento foi aplicado de forma estática e seu posicionamento foi variado. Os carregamentos foram nomeados da seguinte forma:

- a) Carregamento 1: 800 N (≈ 297 kPa), aplicado em uma área de 2688 mm² (56 mm $\times$ 48 mm)
- b) Carregamento 2: 1200 N (≈ 446 kPa), aplicado em uma área de 2688 mm² (56 mm $\times$ 48 mm)

Foram realizados três tipos de modelos: físico em centrífuga (escala 1:13), modelo numérico tridimensional (RS^3) elástico e elasto-plástico. Além disto, os resultados foram comparados com as recomendações da norma API RP 1102 (2007).

As distâncias escritas em função do diâmetro do duto (D) referem-se a uma distância horizontal medida entre a linha vertical que passa pelo centro da sapata e a linha vertical que passa pelo centro do duto.

As conclusões deste trabalho podem ser sumarizadas pelos seguintes itens:

- Foi determinado o módulo de elasticidade da areia a partir de uma retroanálise. Os modelos físicos e numéricos trabalharam de forma complementar, sendo que os modelos numéricos foram calibrados a partir dos resultados dos modelos físicos. O módulo de elasticidade encontrado foi o mesmo no ensaio oedométrico (≈ 30 MPa).
- O uso do tapete superficial na modelagem física em centrífuga nas condições deste trabalho (areia compacta e carga estática de até 446 kPa – carregamento 2) é desnecessário. Sua influência é desprezível (diferença de deformação diametral máxima de 0,04%), pois não houve punção da sapata no solo.
- O uso do tapete superficial nos modelos numéricos elásticos também é desnecessário. No entanto, seu uso foi necessário para os modelos elasto-plásticos. Caso ele não seja considerado, o processamento do modelo não converge. Isso se deve ao fato de que utilizando este modelo constitutivo (elasto-plástico) ocorre ruptura localizada próxima a superfície, na região de contato da sapata com o solo.
- O comportamento da areia pode ser considerado como elástico-linear até a carga de 446 kPa (carregamento 2). Com o aumento de 50% na carga aplicada, a deformação

diametral vertical aumentou, em média, 54,2% e a deformação diametral horizontal aumentou, em média, 64,7%. Não foi testado para cargas maiores.

- O método da norma API RP 1102 (2007) se mostrou bastante simples e rápido. Entretanto, por se tratar de um método manual com uso de ábacos, esse método não é suficientemente acurado. Para altura de recobrimento de 0,93 m (que é abrangida pela norma) a estimativa das tensões foi razoável em relação às modelagens. Entretanto, para realizar um projeto mais detalhado recomenda-se que os cálculos sejam feitos através de modelos mais completos, tais como modelos numéricos e/ou centrífugos

- Todos os valores de tensão calculados, tanto pela norma API RP 1102 (2007), quanto pelos modelos computacionais, são inferiores aos valores máximos de resistência estipulados pelas normas API RP 1102 (2007) e API 5L (2004).

- Dentre todos os modelos numéricos, conclui-se que o modelo tridimensional elástico, sem o tapete superficial, foi a melhor opção. Esse modelo apresentou resultados bastante satisfatórios e seu tempo de criação e processamento é muito inferior ao modelo elasto-plástico (≈ 10 minutos vs. ≈ 24 horas).

- O instrumento *Clip-Gauge* testado neste trabalho forneceu leituras bastante satisfatórias. Com ele foi possível comprovar a ovalização do duto nos modelos físicos em centrífuga, com cargas aplicadas de até 446 kPa (carregamento 2). Os modelos numéricos também comprovaram a ocorrência desse fenômeno.

- Cargas aplicadas a distâncias superiores que $2D$ não afetam o duto.

- A altura de recobrimento tem grande influência na distribuição de tensões no solo acima do duto. Quanto menor a altura de recobrimento, maiores as tensões no contato entre solo e duto devidas ao carregamento veicular.

- Os resultados dos modelos numéricos se mostraram bastante próximos dos resultados dos modelos físicos. Pode-se concluir que as modelagens física e numérica são complementares.

Como conclusão final deste trabalho, nota-se que a tensão no duto não atingiu a tensão limite de escoamento em nenhum dos modelos estudados (numérico, físico e norma API RP 1102). Isto comprova que em algumas situações excepcionais, pode haver o fluxo de veículos sobre o duto, mesmo quando instalados com uma altura de recobrimento inferior à recomendada, sem proteção mecânica.

Como recomendação, este trabalho sugere que em casos de obras em locais onde há dutos enterrados, propõe-se isolar uma faixa com largura de pelo menos $2D$ em relação à linha

longitudinal do duto, de cada lado. Nos casos em que isso não for viável, recomenda-se conduzir uma análise completa com as peculiaridades de cada caso para determinar a possibilidade de execução de alguma obra, ou até mesmo, diminuir os custos de tais obras.

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Avaliar através de modelos físicos e numéricos a carga máxima de aplicação para ruptura do solo ou escoamento do duto. Estudar a influência do modelo elasto-plástico com esta carga.
- Realizar novos estudos paramétricos variando a espessura do duto e/ou a compactidade relativa da areia.
- Analisar a influência das etapas de construção nos modelos para os diversos métodos de instalação.

Referências

- ABNT, NBR. (2013). 7188 – **Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ASTM D 2435–96. **Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading**.
- API 5L (2004). **Specification for Line Pipe**. Edition March.
- API RP 1102 (2007). **Piping Inspection Code: Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways**.
- AWWA M11 (2011). **Steel Pipe: A Guide for Design and Installation, (M11)**. American Water Works Association.
- Bowersox, D. J., & Closs, D. J. (2001). **Logística empresarial**. São Paulo: Atlas, 11.
- Bryden, P., El Naggar, H., & Valsangkar, A. (2014). **Soil-structure interaction of very flexible pipes: centrifuge and numerical investigations**. *International Journal of Geomechanics*, 15(6), 04014091.
- Bueno, B. S., & Costa, Y. D. J. (2012). **Dutos enterrados: aspectos geotécnicos**. Oficina de Textos.
- CENPES-PROTRAN (2014). **Modelos centrífugados para estudos de comportamento de dutos enterrados sujeitos à carregamentos veiculares de superfície**. Relatório Técnico.
- CFR. National Highway Traffic Safety Administration. **49 Code of Federal Regulations (CFR) Part 192 Section 111**.
- Fernando, N. S. M; Carter, J. P. (1998) **Elastic analysis of buried pipes under surface patch loadings**. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v. 124, n. 8, p. 720-728.
- IRC 006. **Code of practice for standard specifications and code of practice for road bridge**. 2014.

Liu, M.; Yang, M. (2014). **Modeling the behavior of natural gas pipeline impacted by falling objects**. Engineering Failure Analysis, v. 42, p. 45-59.

Madabhushi, G. (2014). **Centrifuge modelling for civil engineers**. CRC Press.

Neves, D. P. (2012). **Estudo da Capacidade de Carga ao Arrancamento de Estacas Tubulares Vazadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brasil.

Neya, B. N. *et al.* (2017). **Three-Dimensional Analysis of Buried Steel Pipes under Moving Loads**. Open Journal of Geology, v. 7, n. 01, p. 1.

Noor, M. A.; Dhar, A. S. (2003). **Three-dimensional response of buried pipe under vehicle loads**. In: New Pipeline Technologies, Security, and Safety. 2003. p. 658-665.

O'Connor, C., & Shaw, P. (2002). **Bridge loads: An international perspective**. CRC Press.

OHBD, O. H. B. D. C. (1991). **Highway Engineering Division**. Ontario Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario.

Petrobras (2014). **Plano Estratégico 2030 e Plano de Negócios e Gestão 2014 – 2018**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/plano-estrategico-2030-e-plano-de-negocios-e-gestao-2014-2018.htm>>. Acesso em: 23 de outubro de 2017.

Petrobras (2016). **Plano Estratégico - Plano de Negócios e Gestão 2017 – 2021**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia/plano-de-negocios-e-gestao/>>. Acesso em: 23 de outubro de 2017.

Petrobras (2018). **Relacionamento com Investidores – Produção e Comercialização**. Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/producao-e-comercializacao>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2018.

Pinheiro, A. D. (2015). **Desenvolvimento de Instrumentação para Medição de Deformação em Modelos Físicos de Dutos Enterrados**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brasil.

Rakitin, B., & Xu, M. (2014). **Centrifuge modeling of large-diameter underground pipes subjected to heavy traffic loads**. Canadian Geotechnical Journal, 51(4), 353-369.

Santiago, P. A. C. (2010). **Estudo experimental de arrancamento de dutos enterrados ancorados com geogrelhas utilizando centrífuga geotécnica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brasil.

Santiago, P. A. C. (2017). **Comunicação pessoal**, em 15 de março de 2017, via e-mail.

Small, J. C., & Wong, H. K. W. (1988). **The use of integral transforms in solving three dimensional problems in geomechanics**. Computers and Geotechnics, 6(3), 199-216.

Transpetro (2016). **Área de Negócios: Dutos e Terminais**. Disponível em: <http://www.transpetro.com.br/pt_br/areas-de-negocios/terminais-e-oleodutos.Html>. Acesso em: 26 de julho de 2016.

Vaz, A. V., Oliveira, K., & Damasceno, P. E. G. (2005). **O Modal Dutoviário: Análise da Importância e Considerações Sobre Suas Principais Características**. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

Wood, D. M. (2004). **Geotechnical modelling**. CRC Press.

Zhang, J.; Liang, Z.; Zhao, G. (2016). **Mechanical behavior analysis of a buried steel pipeline underground overload**. Engineering Failure Analysis, v. 63, p. 131-145.

Apêndice A – Ensaio Oedométrico

Identificação da amostra – Ensaio 1					
Nome da amostra	Areia fofa (funil grande)		Prensa	2	
Índice de vazios inicial	0,97		Anel	1	
Características gerais					
Diâmetro (mm)	75,91	Área (mm²)		4525,72	
Altura (mm)	25,21	Volume (mm³)		114078,36	
Tara do conjunto (g)	2560,89	Aceleração da gravidade (m/s²)		9,81	
Massa do conjunto + CP (g)	2715,86	Constante da prensa		14	
Massa do CP (g)	154,97	Massa específica (g/cm³)		1,358	
Carregamento					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)	103,35	199,76	196,42	407,14	813,13
Massa acumulada (g)	103,35	199,76	396,18	803,32	1616,45
Tensão (kPa)	3,14	6,06	12,02	24,38	49,05
Inicial (mm)	10,000	9,960	9,910	9,900	9,860
Final (mm)	9,960	9,910	9,900	9,860	9,800
Índice de vazios do estágio	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95
Deformação (%)	0,16%	0,36%	0,40%	0,56%	0,79%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1622,78	3239,28	6482,00	12004,00	25976,00
Massa acumulada (g)	3239,23	6478,51	12960,51	24964,51	50940,51
Tensão (kPa)	98,30	196,60	393,31	757,59	1545,87
Inicial (mm)	9,800	9,730	9,635	9,500	9,310
Final (mm)	9,730	9,635	9,500	9,310	8,975
Índice de vazios do estágio	0,94	0,94	0,93	0,91	0,89
Deformação (%)	1,07%	1,45%	1,98%	2,74%	4,07%
Descarregamento					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25976,00	12004,00	6482,00	3239,28
Massa acumulada (g)	50940,51	24964,51	12960,51	6478,51	3239,23
Tensão (kPa)	1545,87	757,59	393,31	196,60	98,30
Inicial (mm)	8,975	8,920	8,990	9,060	9,110
Final (mm)	8,920	8,990	9,060	9,110	9,150
Índice de vazios do estágio	0,88	0,89	0,89	0,90	0,90
Deformação (%)	4,28%	4,01%	3,73%	3,53%	3,37%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1622,78	813,13	407,14	196,42	199,76
Massa acumulada (g)	1616,45	803,32	396,18	199,76	0,00
Tensão (kPa)	49,05	24,38	12,02	6,06	0,00
Inicial (mm)	9,150	9,190	9,240	9,255	9,300
Final (mm)	9,190	9,240	9,255	9,300	9,340
Índice de vazios do estágio	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91
Deformação (%)	3,21%	3,02%	2,96%	2,78%	2,62%

Identificação da amostra – Ensaio 2					
Nome da amostra	Areia (marteladas)		Prensa	2	
Índice de vazios inicial	0,83		Anel	1	
Características gerais					
Diâmetro (mm)	75,91	Área (mm²)		4525,72	
Altura (mm)	25,21	Volume (mm³)		114078,36	
Tara do conjunto (g)	2561,03	Aceleração da gravidade (m/s²)		9,81	
Massa do conjunto + CP (g)	2727,53	Constante da prensa		14	
Massa do CP (g)	166,5	Massa específica (g/cm³)		1,460	
Carregamento					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)	103,35	199,76	196,42	407,14	813,13
Massa acumulada (g)	103,35	199,76	396,18	803,32	1616,45
Tensão (kPa)	3,14	6,06	12,02	24,38	49,05
Inicial (mm)	10,000	9,710	9,695	9,670	9,620
Final (mm)	9,710	9,695	9,670	9,620	9,570
Índice de vazios do estágio	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80
Deformação (%)	1,15%	1,21%	1,31%	1,51%	1,71%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1622,78	3239,28	6482,00	12004,00	25976,00
Massa acumulada (g)	3239,23	6478,51	12960,51	24964,51	50940,51
Tensão (kPa)	98,30	196,60	393,31	757,59	1545,87
Inicial (mm)	9,570	9,520	9,460	9,380	9,280
Final (mm)	9,520	9,460	9,380	9,280	9,110
Índice de vazios do estágio	0,79	0,79	0,78	0,78	0,76
Deformação (%)	1,90%	2,14%	2,46%	2,86%	3,53%
Descarregamento					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25976,00	12004,00	6482,00	3239,28
Massa acumulada (g)	50940,51	24964,51	12960,51	6478,51	3239,23
Tensão (kPa)	1545,87	757,59	393,31	196,60	98,30
Inicial (mm)	9,110	9,095	9,155	9,220	9,270
Final (mm)	9,095	9,155	9,220	9,270	9,315
Índice de vazios do estágio	0,76	0,77	0,77	0,78	0,78
Deformação (%)	3,59%	3,35%	3,09%	2,90%	2,72%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1622,78	813,13	407,14	196,42	199,76
Massa acumulada (g)	1616,45	803,32	396,18	199,76	0,00
Tensão (kPa)	49,05	24,38	12,02	6,06	0,00
Inicial (mm)	9,315	9,345	9,380	9,390	9,400
Final (mm)	9,345	9,380	9,390	9,400	9,415
Índice de vazios do estágio	0,78	0,78	0,79	0,79	0,79
Deformação (%)	2,60%	2,46%	2,42%	2,38%	2,32%

Identificação da amostra – Ensaio 3					
Nome da amostra	Areia (vibração)		Prensa	6	
Índice de vazios inicial	0,86		Anel	3	
Características gerais					
Diâmetro (mm)	76,12	Área (mm²)		4550,80	
Altura (mm)	24,71	Volume (mm³)		112450,19	
Tara do conjunto (g)	2548,05	Aceleração da gravidade (m/s²)		9,81	
Massa do conjunto + CP (g)	2709,18	Constante da prensa		10,9	
Massa do CP (g)	161,13	Massa específica (g/cm³)		1,433	
Carregamento					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)	102,38	219,57	200,91	407,49	814,04
Massa acumulada (g)	102,38	219,57	420,48	827,97	1642,01
Tensão (kPa)	2,41	5,16	9,88	19,45	38,58
Inicial (mm)	10,000	9,875	9,840	9,820	9,795
Final (mm)	9,875	9,840	9,820	9,795	9,760
Índice de vazios do estágio	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Deformação (%)	0,51%	0,65%	0,73%	0,83%	0,97%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1621,15	3244,65	6502,40	12922,00	25950,00
Massa acumulada (g)	3263,16	6507,81	13010,21	25932,21	51882,21
Tensão (kPa)	76,67	152,91	305,70	609,32	1219,06
Inicial (mm)	9,760	9,720	9,660	9,595	9,500
Final (mm)	9,720	9,660	9,595	9,500	9,360
Índice de vazios do estágio	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82
Deformação (%)	1,13%	1,38%	1,64%	2,02%	2,59%
Descarregamento					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25950,00	12922,00	6502,40	3244,65
Massa acumulada (g)	51882,21	25932,21	13010,21	6507,81	3263,16
Tensão (kPa)	1219,06	609,32	305,70	152,91	76,67
Inicial (mm)	9,360	9,350	9,405	9,450	9,490
Final (mm)	9,350	9,405	9,450	9,490	9,525
Índice de vazios do estágio	0,81	0,82	0,82	0,82	0,83
Deformação (%)	2,63%	2,41%	2,23%	2,06%	1,92%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1621,15	814,04	407,49	200,91	219,57
Massa acumulada (g)	1642,01	827,97	420,48	219,57	0,00
Tensão (kPa)	38,58	19,45	9,88	5,16	0,00
Inicial (mm)	9,525	9,555	9,570	9,590	9,600
Final (mm)	9,555	9,570	9,590	9,600	9,635
Índice de vazios do estágio	0,83	0,83	0,83	0,83	0,84
Deformação (%)	1,80%	1,74%	1,66%	1,62%	1,48%

Identificação da amostra – Ensaio 4 (Cíclico)					
Nome da amostra	Areia densa (marteladas)		Prensa	1	
Índice de vazios inicial	0,73		Anel	1	
Características gerais					
Diâmetro (mm)	75,91	Área (mm²)		4525,72	
Altura (mm)	25,21	Volume (mm³)		114078,36	
Tara do conjunto (g)	2586,35	Aceleração da gravidade (m/s²)		9,81	
Massa do conjunto + CP (g)	2762,88	Constante da prensa		14	
Massa do CP (g)	176,53	Massa específica (g/cm³)		1,547	
Carregamento					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)	102,38	197,83	200,92	407,51	814,08
Massa acumulada (g)	102,38	197,83	398,75	806,26	1620,34
Tensão (kPa)	3,11	6,00	12,10	24,47	49,17
Inicial (mm)	10,000	9,985	9,955	9,940	9,920
Final (mm)	9,985	9,955	9,940	9,920	9,890
Índice de vazios do estágio	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Deformação (%)	0,06%	0,18%	0,24%	0,32%	0,44%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1621,17	3244,72	6482,00	12924,00	25954,00
Massa acumulada (g)	3241,51	6486,23	12968,23	25892,23	51846,23
Tensão (kPa)	98,37	196,83	393,54	785,74	1573,35
Inicial (mm)	9,890	9,850	9,800	9,720	9,615
Final (mm)	9,850	9,800	9,720	9,615	9,480
Índice de vazios do estágio	0,72	0,71	0,71	0,70	0,69
Deformação (%)	0,60%	0,79%	1,11%	1,53%	2,06%
Descarregamento					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25954,00	12924,00	6482,00	3244,72
Massa acumulada (g)	51846,23	25892,23	12968,23	6486,23	3241,51
Tensão (kPa)	1573,35	785,74	393,54	196,83	98,37
Inicial (mm)	9,480	9,480	9,520	9,575	9,620
Final (mm)	9,480	9,520	9,575	9,620	9,650
Índice de vazios do estágio	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70
Deformação (%)	2,06%	1,90%	1,69%	1,51%	1,39%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1621,17	814,08	407,51	200,92	197,83
Massa acumulada (g)	1620,34	806,26	398,75	197,83	0,00
Tensão (kPa)	49,17	24,47	12,10	6,00	0,00
Inicial (mm)	9,650	9,680	9,710	9,730	9,740
Final (mm)	9,680	9,710	9,730	9,740	9,760
Índice de vazios do estágio	0,70	0,71	0,71	0,71	0,71
Deformação (%)	1,27%	1,15%	1,07%	1,03%	0,95%

Continuação do Ensaio 4 (Cíclico) – Etapa do segundo carregamento

Carregamento 2					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)		197,83	200,92	407,51	814,08
Massa acumulada (g)		197,83	398,75	806,26	1620,34
Tensão (kPa)		6,00	12,10	24,47	49,17
Inicial (mm)		9,760	9,775	9,765	9,745
Final (mm)		9,775	9,765	9,745	9,725
Índice de vazios do estágio		0,71	0,71	0,71	0,71
Deformação (%)		0,89%	0,93%	1,01%	1,09%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1621,17	3244,72	6482,00	12924,00	25954,00
Massa acumulada (g)	3241,51	6486,23	12968,23	25892,23	51846,23
Tensão (kPa)	98,37	196,83	393,54	785,74	1573,35
Inicial (mm)	9,725	9,695	9,655	9,600	9,535
Final (mm)	9,695	9,655	9,600	9,535	9,430
Índice de vazios do estágio	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69
Deformação (%)	1,21%	1,37%	1,59%	1,84%	2,26%
Descarregamento 2					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25954,00	12924,00	6482,00	3244,72
Massa acumulada (g)	51846,23	25892,23	12968,23	6486,23	3241,51
Tensão (kPa)	1573,35	785,74	393,54	196,83	98,37
Inicial (mm)	9,430	9,430	9,480	9,525	9,575
Final (mm)	9,430	9,480	9,525	9,575	9,600
Índice de vazios do estágio	0,69	0,69	0,69	0,70	0,70
Deformação (%)	2,26%	2,06%	1,88%	1,69%	1,59%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1621,17	814,08	407,51	200,92	197,83
Massa acumulada (g)	1620,34	806,26	398,75	197,83	0,00
Tensão (kPa)	49,17	24,47	12,10	6,00	0,00
Inicial (mm)	9,600	9,630	9,660	9,675	9,690
Final (mm)	9,630	9,660	9,675	9,690	9,710
Índice de vazios do estágio	0,70	0,70	0,70	0,70	0,71
Deformação (%)	1,47%	1,35%	1,29%	1,23%	1,15%

Identificação da amostra – Ensaio 5 (Cíclico)					
Nome da amostra	Areia (chuva)		Prensa	2	
Índice de vazios inicial	0,71		Anel	3	
Características gerais					
Diâmetro (mm)	76,12	Área (mm²)		4550,80	
Altura (mm)	24,71	Volume (mm³)		112450,19	
Tara do conjunto (g)	2522,81	Aceleração da gravidade (m/s²)		9,81	
Massa do conjunto + CP (g)	2698,74	Constante da prensa		14	
Massa do CP (g)	175,93	Massa específica (g/cm³)		1,565	
Carregamento					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)	103,35	199,76	196,42	407,14	813,13
Massa acumulada (g)	103,35	199,76	396,18	803,32	1616,45
Tensão (kPa)	3,12	6,03	11,96	24,24	48,78
Inicial (mm)	10,000	9,970	9,800	9,790	9,760
Final (mm)	9,970	9,800	9,790	9,760	9,730
Índice de vazios do estágio	0,70	0,69	0,69	0,69	0,69
Deformação (%)	0,12%	0,81%	0,85%	0,97%	1,09%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1622,78	3239,28	6486,00	12004,00	25976,00
Massa acumulada (g)	3239,23	6478,51	12964,51	24968,51	50944,51
Tensão (kPa)	97,76	195,52	391,26	753,53	1537,47
Inicial (mm)	9,730	9,680	9,625	9,550	9,465
Final (mm)	9,680	9,625	9,550	9,465	9,320
Índice de vazios do estágio	0,68	0,68	0,68	0,67	0,66
Deformação (%)	1,30%	1,52%	1,82%	2,17%	2,75%
Descarregamento					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25976,00	12004,00	6486,00	3239,28
Massa acumulada (g)	50944,51	24968,51	12964,51	6478,51	3239,23
Tensão (kPa)	1537,47	753,53	391,26	195,52	97,76
Inicial (mm)	9,320	9,320	9,370	9,420	9,465
Final (mm)	9,320	9,370	9,420	9,465	9,500
Índice de vazios do estágio	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67
Deformação (%)	2,75%	2,55%	2,35%	2,17%	2,02%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1622,78	813,13	407,14	196,42	199,76
Massa acumulada (g)	1616,45	803,32	396,18	199,76	0,00
Tensão (kPa)	48,78	24,24	11,96	6,03	0,00
Inicial (mm)	9,500	9,525	9,555	9,560	9,575
Final (mm)	9,525	9,555	9,560	9,575	9,595
Índice de vazios do estágio	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68
Deformação (%)	1,92%	1,80%	1,78%	1,72%	1,64%

Continuação do Ensaio 5 (Cíclico) – Etapa do segundo carregamento

Carregamento 2					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)		199,76	196,42	407,14	813,13
Massa acumulada (g)		199,76	396,18	803,32	1616,45
Tensão (kPa)		6,03	11,96	24,24	48,78
Inicial (mm)		9,595	9,590	9,580	9,570
Final (mm)		9,590	9,580	9,570	9,550
Índice de vazios do estágio		0,68	0,68	0,68	0,68
Deformação (%)		1,66%	1,70%	1,74%	1,82%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1622,78	3239,28	6486,00	12004,00	25976,00
Massa acumulada (g)	3239,23	6478,51	12964,51	24968,51	50944,51
Tensão (kPa)	97,76	195,52	391,26	753,53	1537,47
Inicial (mm)	9,550	9,520	9,490	9,440	9,390
Final (mm)	9,520	9,490	9,440	9,390	9,290
Índice de vazios do estágio	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66
Deformação (%)	1,94%	2,06%	2,27%	2,47%	2,87%
Descarregamento 2					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25976,00	12004,00	6486,00	3239,28
Massa acumulada (g)	50944,51	24968,51	12964,51	6478,51	3239,23
Tensão (kPa)	1537,47	753,53	391,26	195,52	97,76
Inicial (mm)	9,290	9,290	9,340	9,390	9,430
Final (mm)	9,290	9,340	9,390	9,430	9,460
Índice de vazios do estágio	0,66	0,66	0,66	0,67	0,67
Deformação (%)	2,87%	2,67%	2,47%	2,31%	2,19%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1622,78	813,13	407,14	196,42	199,76
Massa acumulada (g)	1616,45	803,32	396,18	199,76	0,00
Tensão (kPa)	48,78	24,24	11,96	6,03	0,00
Inicial (mm)	9,460	9,490	9,520	9,530	9,535
Final (mm)	9,490	9,520	9,530	9,535	9,580
Índice de vazios do estágio	0,67	0,67	0,67	0,67	0,68
Deformação (%)	2,06%	1,94%	1,90%	1,88%	1,70%

Identificação da amostra – Ensaio 6					
Nome da amostra	Areia (funil pequeno)		Prensa	1	
Índice de vazios inicial	1,07		Anel	1	
Características gerais					
Diâmetro (mm)	75,91	Área (mm²)		4525,72	
Altura (mm)	25,21	Volume (mm³)		114078,36	
Tara do conjunto (g)	2585,94	Aceleração da gravidade (m/s²)		9,81	
Massa do conjunto + CP (g)	2733,17	Constante da prensa		14	
Massa do CP (g)	147,23	Massa específica (g/cm³)		1,291	
Carregamento					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)	102,38	197,83	200,92	407,51	814,08
Massa acumulada (g)	102,38	197,83	398,75	806,26	1620,34
Tensão (kPa)	3,11	6,00	12,10	24,47	49,17
Inicial (mm)	10,000	9,965	9,930	9,900	9,865
Final (mm)	9,965	9,930	9,900	9,865	9,810
Índice de vazios do estágio	1,07	1,06	1,06	1,06	1,05
Deformação (%)	0,14%	0,28%	0,40%	0,54%	0,75%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1621,17	3244,72	6482,00	12924,00	25954,00
Massa acumulada (g)	3241,51	6486,23	12968,23	25892,23	51846,23
Tensão (kPa)	98,37	196,83	393,54	785,74	1573,35
Inicial (mm)	9,810	9,740	9,645	9,515	9,315
Final (mm)	9,740	9,645	9,515	9,315	8,960
Índice de vazios do estágio	1,05	1,04	1,03	1,01	0,98
Deformação (%)	1,03%	1,41%	1,92%	2,72%	4,13%
Descarregamento					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25954,00	12924,00	6482,00	3244,72
Massa acumulada (g)	51846,23	25892,23	12968,23	6486,23	3241,51
Tensão (kPa)	1573,35	785,74	393,54	196,83	98,37
Inicial (mm)	8,960	8,960	9,010	9,070	9,115
Final (mm)	8,960	9,010	9,070	9,115	9,150
Índice de vazios do estágio	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00
Deformação (%)	4,13%	3,93%	3,69%	3,51%	3,37%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1621,17	814,08	407,51	200,92	197,83
Massa acumulada (g)	1620,34	806,26	398,75	197,83	0,00
Tensão (kPa)	49,17	24,47	12,10	6,00	0,00
Inicial (mm)	9,150	9,180	9,200	9,215	9,225
Final (mm)	9,180	9,200	9,215	9,225	9,250
Índice de vazios do estágio	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01
Deformação (%)	3,25%	3,17%	3,11%	3,07%	2,98%

Identificação da amostra – Ensaio 7					
Nome da amostra	Areia (chuva)		Prensa	2	
Índice de vazios inicial	0,72		Anel	3	
Características gerais					
Diâmetro (mm)	76,12	Área (mm²)		4550,80	
Altura (mm)	24,71	Volume (mm³)		112450,19	
Tara do conjunto (g)	2522,93	Aceleração da gravidade (m/s²)		9,81	
Massa do conjunto + CP (g)	2697,03	Constante da prensa		14	
Massa do CP (g)	174,1	Massa específica (g/cm³)		1,548	
Carregamento					
Número do carregamento	Ajuste	1	2	3	4
Massa do bloco (g)	103,35	199,76	196,42	407,14	813,13
Massa acumulada (g)	103,35	199,76	396,18	803,32	1616,45
Tensão (kPa)	3,12	6,03	11,96	24,24	48,78
Inicial (mm)	10,000	9,975	9,940	9,925	9,900
Final (mm)	9,975	9,940	9,925	9,900	9,870
Índice de vazios do estágio	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Deformação (%)	0,10%	0,24%	0,30%	0,40%	0,53%
Número do carregamento	5	6	7	8	9
Massa do bloco (g)	1622,78	3239,28	6486,00	12004,00	25976,00
Massa acumulada (g)	3239,23	6478,51	12964,51	24968,51	50944,51
Tensão (kPa)	97,76	195,52	391,26	753,53	1537,47
Inicial (mm)	9,870	9,830	9,775	9,710	9,620
Final (mm)	9,830	9,775	9,710	9,620	9,475
Índice de vazios do estágio	0,71	0,71	0,70	0,70	0,69
Deformação (%)	0,69%	0,91%	1,17%	1,54%	2,12%
Descarregamento					
Número do carregamento	Ajuste	9	8	7	6
Massa do bloco (g)	0	25976,00	12004,00	6486,00	3239,28
Massa acumulada (g)	50944,51	24968,51	12964,51	6478,51	3239,23
Tensão (kPa)	1537,47	753,53	391,26	195,52	97,76
Inicial (mm)	9,475	9,475	9,530	9,585	9,635
Final (mm)	9,475	9,530	9,585	9,635	9,670
Índice de vazios do estágio	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70
Deformação (%)	2,12%	1,90%	1,68%	1,48%	1,34%
Número do carregamento	5	4	3	2	1
Massa do bloco (g)	1622,78	813,13	407,14	196,42	199,76
Massa acumulada (g)	1616,45	803,32	396,18	199,76	0,00
Tensão (kPa)	48,78	24,24	11,96	6,03	0,00
Inicial (mm)	9,670	9,700	9,720	9,735	9,745
Final (mm)	9,700	9,720	9,735	9,745	9,765
Índice de vazios do estágio	0,70	0,70	0,71	0,71	0,71
Deformação (%)	1,21%	1,13%	1,07%	1,03%	0,95%

Apêndice B – Lista dos instrumentos (modelagem em centrífuga)

- Célula de carga:
 - . Fabricante: Entran Devices;
 - . Modelo: ELH-TC590*-1000;
 - . Série/Número: U4-290;
 - . Medida: tensão e compressão;
 - . Alcance: 1000 lbs;
 - . Não exceder: 1500 lbs.
- Motor:
 - . Tipo: Elétrico – Servo motor – Brushless DC;
 - . Fabricante: Electro Craft;
 - . Modelo: BDC-T330-BVL;
 - . Constante K_E : 24,0 V/Krpm;
 - . Constante K_T : 32,4 oz-in/A.
- Extensômetros do *Clip-Gauge*:
 - . Fabricante: Excel sensores;
 - . Material da base e do filme metálico: Base de poliamida com filme metálico de constantan;
 - . Auto compensação de temperatura: 13 – Alumínio;
 - . Comprimento ativo da grelha: 062 (unidade: 1/1000 polegada);
 - . Forma geométrica: TG;
 - . Resistência elétrica: 350 Ω ;
 - . Característica opcional: LEN – Encapsulados com fio de cobre;
 - . Lote: 100120;
 - . Fator de sensibilidade (*Gauge Factor*): 2,16.

.

Apêndice C - Calibração da Célula de Carga

Neste trabalho foi utilizada a célula de carga U4-290. Sua calibração consistiu em apoiá-la sobre uma base. Sobre ela, apoiou-se um suporte para a carga, sendo que este suporte contém um pino de encaixe. A Figura C.0.1 apresenta uma visão geral do aparato montado para a calibração da célula de carga, enquanto que a Figura C.0.2 apresenta uma foto aproximada.

A calibração deste instrumento consistiu basicamente em apoiar uma massa conhecida no suporte e anotar a tensão de saída. Primeiramente, foi anotada a tensão proveniente da célula de carga sem o suporte (0 kg). Em seguida, foi anotada a tensão de saída para quando o suporte (vazio) estivesse apoiado na célula de carga, sendo que a massa do suporte foi determinada previamente (2,69821 kg). Depois, seguiu-se a calibração adicionando massas de 10 kg.

Tendo os valores da massa em cada uma das etapas de calibração, tem-se o valor da carga, sabendo que:

$$F = m \times g \quad (\text{C.1})$$

onde: F = carga (N), m = massa (kg), g = aceleração da gravidade (m/s^2)

Figura C.0.1: Aparato utilizado na calibração da célula de carga (visão geral)

Figura C.0.2: Aparato utilizado na calibração da célula de carga (foto aproximada)

Para a calibração da célula de carga utilizou-se $9,80665 \text{ m/s}^2$ como valor da aceleração da gravidade. Tendo os valores de carga e tensão obtidos pela calibração, pode-se traçar a curva de calibração (Figura C.0.3).

Após plotar os pontos da calibração da célula de carga no gráfico, foi traçada uma linha de tendência linear. A partir desta linha de tendência foi possível obter os coeficientes angular e linear da reta (parâmetros “a” e “b”). Assim, tem-se que o coeficiente linear vale -9×10^{-6} e o coeficiente angular vale 0,0157. Ademais, pode-se observar que o coeficiente de determinação R^2 resultou em um valor muito próximo de 1. Portanto, conclui-se que a reta está muito bem ajustada aos pontos de calibração.

Tendo os dois coeficientes da reta, foi possível inseri-los no programa computacional *LabVIEW*. Desta maneira, foi possível retirar o dado de saída diretamente em Newtons (N).

Figura C.0.3: Reta de calibração da célula de carga U4-290

Apêndice D – Calibração do *Clip-Gauge*

Para calibrar o *Clip-Gauge*, foi necessário um suporte com um micrômetro. Neste suporte deve-se encaixar o *Clip-Gauge* de modo que uma de suas placas fique alinhada com o micrômetro, como é apresentado na Figura D.0.1. O micrômetro então é ajustado de forma que fique encostado na placa do *Clip-Gauge*, porém sem pressioná-la.

Figura D.0.1: Suporte utilizado na calibração *Clip-Gauge*

Com o *Clip-Gauge* conectado a um sistema de aquisição de dados, que por sua vez é conectado a um computador, é possível iniciar a calibração. Gira-se a haste do micrômetro até que marque 0,5 mm de deslocamento no sentido de compressão na placa. Com isto, o *Clip-Gauge* medirá a deformação e esta medida será apresentada pelo computador.

Este procedimento foi realizado até 5,0 mm, sendo aplicado 0,5 mm de deslocamento de cada vez. Desta forma, é possível relacionar o deslocamento aplicado pelo micrômetro com a deformação medida pelo extensômetro instalado na placa. Isto foi realizado para cada uma das quatro placas do *Clip-Gauge*. A seguir são apresentados as curvas de calibração e os coeficientes lineares e angulares de cada curva, resultantes da calibração.

Juntamente com os coeficientes das curvas de calibração são apresentados os valores do coeficiente de determinação R^2 de cada curva. É possível notar que todos estes valores estão muito próximos de 1. Portanto, conclui-se que as curvas estão muito bem ajustadas aos pontos de calibração.

- Placa 1 (slot 4 – canal 4):

Figura D.0.2: Curva de calibração da Placa 1 do *Clip-Gauge*

- Coeficiente Linear: -3,10791E-06; Coeficiente Angular: -1,15949E-04
 - R^2 : 0,99988987
- Placa 2 (slot 4 – canal 5):

Figura D.0.3: Curva de calibração da Placa 2 do *Clip-Gauge*

- Coeficiente Linear: -1,82734E-05; Coeficiente Angular: 9,71485E-05
 - R^2 : 0,99681357
- Placa 3 (slot 4 – canal 6):

Figura D.0.4: Curva de calibração da Placa 3 do *Clip-Gauge*

- Coeficiente Linear: -4,02699E-06; Coeficiente Angular: 1,00162E-04
- R^2 : 0,99987511
- Placa 4 (slot 4 – canal 7):

Figura D.0.5: Curva de calibração da Placa 4 do *Clip-Gauge*

- Coeficiente Linear: -7,00874E-06; Coeficiente Angular: 1,00357E-04
- R^2 : 0,99996226

Apêndice E – Tutorial RS³ para modelos de dutos enterrados

Itens abordados no tutorial:

- Passo 1: Criando o modelo
- Passo 2: Editando as configurações do projeto
- Passo 3: Definindo os materiais
- Passo 4: Criando a geometria
- Passo 5: Adicionando a parede do duto (*Liner*)
- Passo 6: Adicionando o tapete superficial (*Liner*)
- Passo 7: Carregamento
- Passo 8: Condições de contorno
- Passo 9: Criando a malha
- Passo 10: Calculando
- Passo 11: Interpretando

Passo 1: Criando o modelo

Inicie RS3 2.0

Salve o arquivo: [File → Save As](#)

Passo 2: Editando as configurações do projeto

Para configurar os principais parâmetros para o seu modelo, abra a opção: [Analysis → Project Settings](#)

Na primeira aba [Units](#), utilize configurações padrão, como mostrado na figura:

Na segunda aba [Stages](#), crie 2 estágios, como mostrado na figura:

Na terceira aba Stress Analysis, altere Maximum Number of Iterations = 1e+06, como mostrado na figura:

Na quinta aba Groundwater, altere Method = None, como mostrado na figura:

Nas demais abas, mantenha a configuração padrão e clique em OK.

Passo 3: Definindo os materiais

Com a aba Geology ativa, selecione Materials → Define Materials. Nesta janela, insira as propriedades do solo.

Propriedades do solo na aba Strength:

- Name = Areia
- Unit Weight = 14.2 kN/m^3
- Friction Angle (peak) = 41°
- Cohesion (peak) = 0
- Material Type = Plastic
- Friction Angle (resid) = 41°
- Cohesion (resid) = 0
- Dilation Angle = 25°

Propriedades do solo na aba Stiffness:

- Young's Modulus = 30000 kPa
- Poisson's Ratio = 0.3

Na lista de materiais situada do lado esquerdo da janela, selecione Material 2 e insira as propriedades do material de interface.

Propriedades do material de interface na aba Strength:

- Name = Areia - Interface
- Unit Weight = 14.2 kN/m³
- Friction Angle (peak) = 29°
- Cohesion (peak) = 0
- Material Type = Plastic
- Friction Angle (resid) = 29°
- Cohesion (resid) = 0
- Dilation Angle = 25°

Propriedades do material de interface na aba Stiffness:

- Young's Modulus = 30000 kPa
- Poisson's Ratio = 0.3

Clique em OK.

Passo 4: Criando a geometria

- Geometria externa

Com a aba [Geology](#) ativa, selecione [Geometry → Create External Box](#). Nesta janela, devem ser inseridas as coordenadas (x, y, z) de dois vértices opostos do paralelepípedo. As dimensões usadas foram 10m × 10m × 10m. Foi escolhida essas dimensões para que as condições de contorno não influenciassem na análise do modelo.

- Plano para aplicação da carga

Com a aba [Geology](#) ativa, selecione [Geometry → 3D Primitive Geometry → Plane](#). Nesta janela, clique em [Plane Definition](#) e [Plane Size](#) para expandir as opções.

Na opção [Origin](#), deve-se inserir as coordenadas do centro do plano da carga (x = 5, y = 5). Como a carga está sendo aplicada na superfície, o plano também deve estar na superfície (z = 10).

Obs.: $x = 5$ corresponde a carga centralizada, alinhada com o centro do duto (0D). Para afastar a carga do eixo do duto foram utilizados os seguintes valores: $x = 4.48$ (para 1D), $x = 3.96$ (para 2D), $x = 3.44$ (para 3D) e $x = 2.92$ (para 4D).

Na opção **Normal**, deve-se inserir o valor 1 no eixo normal ao plano. Neste caso, o plano está em XY, de forma que o eixo normal ao plano é o eixo Z. (Obs.: Este campo pode ser preenchido automaticamente ao clicar no plano de interesse na primeira linha da janela – XY Plane, YZ plane ou ZX plane – neste caso, XY Plane)

Em **Plane Size**, deve-se inserir as dimensões da sapata. Em **Role**, selecione **Geology**. Em seguida, clique em **OK**.

Create Plane

XY Plane YZ Plane ZX Plane

^ Plane Definition

Origin: X 5 Y 5 Z 10

Plane Orientation

Defined by: Normal Vector

X: 0 Y: 0 Z: 1

Normalized: [0, 0, 1]

^ Plane Size

Fit Plane To Selected

Width: 0.728 Height: 0.624

Role: Geology

OK Cancel

Selecione o plano pelo painel *Visibility* e selecione Geometry → Extrude/Sweep/Loft Tools → Extrude. Altere a coordenada Z para -0.1 e clique em OK.

Selecione [Geometry → 3D Boolean → Divide All Geometry](#)

- Escavação do duto

Com a aba [Excavations](#) ativa, selecione [Geometry → 3D Primitive Geometry → Cylinder](#).

As coordenadas (x, z) correspondem ao centro da circunferência da seção transversal do duto; x = 5, porque a largura do modelo é 10m e o duto está centralizado; z = 8.81, porque a altura

de recobrimento é 0,93 m e o raio do duto é 0,26 m. Utilizou-se $z = 9.02$ m para altura de recobrimento de 0,72 m e $z = 9.25$ m para altura de recobrimento de 0,49 m.

A coordenada y, foi propositalmente criada para que o duto ficasse maior que a *External Box* criada anteriormente (a rigor, deveria ser 0 e 10, porém foram inseridos os valores de -1 e 11. As sobras serão posteriormente cortadas).

Selecione Geometry → 3D Boolean → Divide All Geometry. Note que o excedente do cilindro no quadrante inferior direito será cortado.

- Interface

Com a aba Geology ativa, selecione Geometry → 3D Primitive Geometry → Cylinder. Crie um cilindro, similar ao anterior, porém um novo valor de raio. Para uma interface de 4 cm, crie um cilindro com raio de 0,30 m.

$\text{espessura da interface} = \text{raio do cilindro da interface} - \text{raio do cilindro do duto}$

$$\text{espessura da interface} = 0,30 \text{ m} - 0,26 \text{ m} = 0,04 \text{ m}$$

Selecione Geometry → 3D Boolean → Divide All Geometry. Note que o excedente do cilindro no quadrante inferior direito será cortado.

No painel *Visibility*, selecione o item *External* referente a interface (a região da interface ficará vermelha como na imagem abaixo). No painel *Properties*, localizado abaixo do painel *Visibility*, altere o material: Applied Properties = Areia – Interface.

Note que neste painel pode ser alterado o nome dos itens para melhor localização deles no futuro.

Passo 5: Adicionando a parede do duto (Liner)

Com a aba **Support** ativa, selecione a ferramenta **Faces Selection** e, em seguida, selecione todas as faces que formam cilindro da geometria do duto. **DICA 1:** Se desativar a geometria correspondente ao solo, torna mais fácil a seleção das paredes do duto (para desativar, clique no ícone em formato de olho que fica no painel *Visibility*). **DICA 2:** A tecla CTRL permite selecionar mais de uma região.

Selecione Support → Liner → Add Liner. Clique no lápis de edição ao lado de *Liner Property*.

Altere o nome para “Parede do duto” e clique novamente no ícone do lápis de edição na coluna *Edit*.

Na nova janela, insira as propriedades do material (aço):

- Name: Parede do duto
- Young's Modulus = 2.1×10^8 kPa
- Poisson's Ratio = 0.3
- Thickness = 0.01417 (m)
- Include Weight in Analysis = Ativo
- Unit Weight = 78 kN/m^3

Clique em **OK** (três vezes) para fechar todas as janelas de criação do *Liner*. O modelo deve aparentar da seguinte forma:

Obs.: As dimensões do cilindro foram feitas em relação ao diâmetro externo do duto. Sendo assim, a parede do duto deve ser inserida do lado de dentro do cilindro. Ao selecionar as faces do cilindro, deve-se atentar por onde está selecionando. Se selecionar as faces externas, a parede será criada para dentro. Se selecionar as faces internas, a parede será criada para fora.

A figura a seguir mostra as duas diferentes formas: no lado esquerdo do duto, foram selecionadas as faces internas (a parede foi criada para fora). No lado direito do duto, foram selecionadas as faces externas (a parede foi criada para dentro).

A figura a seguir mostra como deveria ficar (espessura para dentro):

Passo 6: Adicionando o tapete superficial (Liner)

Reative todos os itens do modelo no ícone em formato de olho no painel *Visibility*. Com a aba Support ativa, selecione a ferramenta Faces Selection e, em seguida, selecione a superfície do modelo da região do solo e da região de aplicação da carga.

Selecione Support → Liner → Add Liner. Clique no lápis de edição ao lado de *Liner Property*.

Clique no símbolo + no canto inferior esquerdo da janela (*Add new property*). Altere o nome para “Tapete”. Clique novamente no ícone do lápis de edição na coluna *Edit*.

Novamente, clique no símbolo + no canto inferior esquerdo da janela (*Add new property*) e insira as propriedades do material:

- Name: Tapete
- Young's Modulus = 137900 kPa
- Poisson's Ratio = 0.49
- Thickness = 0.0468 (m)
- Include Weight in Analysis = Ativo
- Unit Weight = 16.79 kN/m³

Clique em **OK** (três vezes) para fechar todas as janelas de criação do *Liner*. O modelo deve aparentar da seguinte forma:

Passo 7: Carregamento

Na aba **Loads**. Clique em **Loading → Field Stress**. Insira $K_1 = 0,429$. O programa nomeia o coeficiente de empuxo em repouso K_0 de “K1”. Como está sendo utilizado o coeficiente de Poisson igual 0,3. O valor de K_0 corresponde a $0,429$. $\left(K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}\right)$. Clique em **OK**.

Com a aba **Loads** ativa, selecione a ferramenta **Faces Selection** e, em seguida, selecione o plano superficial da aplicação da carga.

Clique em **Loading → Add Load**. Altere **Magnitude = 297 kN/m²** e **Install at stage = Carregamento**. Clique em **Apply**.

Passo 8: Condições de contorno

Na aba **Restraints**, selecione **Restraints → Auto Restraints (Surface)**.

Passo 9: Criando a malha

Na aba **Mesh**, selecione **Mesh → Define Refinement Regions**. Insira as coordenadas da região que se deseja obter o refinamento da malha e observe que será criado um bloco verde no modelo. Clique em **OK** e observe que o bloco se tornou vermelho.

Obs.: Conforme a carga se distanciou do centro, a coordenada *x* da linha *First Corner* foi diminuindo. Isso porque a região de refinamento deve conter o plano de aplicação da carga. Os valores utilizados foram $x = 4$ (para $0D$), $x = 3$ (para $1D$ e $2D$), $x = 2$ (para $3D$ e $4D$).

Clique com o botão direito do mouse em qualquer região da tela do modelo e selecione a opção **Done**.

Na janela que aparecer, insira o valor de 0.1 na opção *Element Size*. Clique em **OK**.

Selecione **Mesh** → **Mesh Settings**. Selecione *10-Noded Tetrahedra* em *Element Type* e selecione *Graded* em *Mesh Gradation*. Clique em **OK**.

Selecione **Mesh** → **Mesh**.

Obs.: A malha que é apresentada é a malha superficial do bloco todo. Para visualizar a malha dentro bloco, pode-se clicar no ícone YZ (View mesh on YZ plane) .

Passo 10: Calculando

Na aba **Compute**, selecione **File → Save Compute File**.

Selecione **Compute → Compute**.

Passo 11: Interpretando

Na aba **Results**, selecione **Interpret → Refresh Results**.

a) Interpretando o resultado ao redor do duto (no solo)

Selecione **Interpret → Add Line Query**. Aparecerá um novo painel no lado esquerdo chamado de *Draw Polyline*.

Neste painel, selecione:

- Plane Orientation = ZX (plano transversal ao duto)
- ZX Origin = 0.00, 5.00, 0.00 (coordenadas onde estará a origem do plano)
- Path Definition = Circle
- Circle Definition = Center and Radius, Radius = 0.26 (equivalente ao raio do duto)
- Coordinate Input = 5,8.81 (coordenadas x, z do centro do duto). Obs.: Utilizou-se 5,9.02 para altura de recobrimento de 0,72 m e 5,9.25 para altura de recobrimento de 0,49 m.

Em seguida, clique em **Enter**. Depois, clique no ícone , localizado na parte superior do painel.

Aparecerá uma janela para especificar as coordenadas de interesse da linha. No caso, selecione a primeira opção.

Note que no painel *Visibility* aparecerá um novo item chamado de *Polyline1_results*. No painel *Legend* localizado do lado direito, selecione o resultado de interesse a ser exportado como arquivo de extensão *.csv* (pode ser aberto com o *Excel*). Em seguida, selecione o item *Polyline1_results* no painel *Visibility* e selecione [Interpret → Export Query Data](#). Salve o arquivo como desejar.

Obs.: Nesse trabalho, foram exportados os resultados:

Solid Displacement → X Displacement

Solid Displacement → Z Displacement

b) Interpretando o resultado em um plano (no solo)

Selecione **Interpret → XZ Plane**. As configurações padrão já representam um plano na região central. Clique em **OK**.

Para visualizar o plano nos diferentes estágios, selecione o estágio de interesse na região inferior da tela.

c) Interpretando o resultado no duto (*Liner*)

No painel *Legend* localizado do lado direito, selecione a opção *Liner* na primeira caixa e o dado de interesse na segunda caixa. Aparecerão dois novos elementos para cada *Liner* do modelo. Selecione o elemento de interesse e em seguida [Interpret → Export Query Data](#). O resultado de interesse será exportado como arquivo de extensão *.csv* (pode ser aberto com o *Excel*). Salve o arquivo como desejar.

Obs.: Nesse trabalho, foram exportados os resultados: Axial Force X, Axial Force Y, Axial Force Z, Shear Force YZ, Shear Force XZ, Shear Force XY.

d) Convenção de sinais

Todos os dados extraídos neste programa utilizam o sistema global de referência.

A direção y equivale a direção longitudinal para todos os pontos analisados. Para os pontos laterais, as direções x e z equivalem às direções radial e circunferencial, respectivamente. Para os pontos do topo e da base do duto, a direção x representa a direção circunferencial e a direção z representa a direção radial.