

Marianna Ansiliero de Oliveira Coelho

**Estabilidade de dutos enterrados sujeitos a cargas
térmicas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Deane Mesquita Roehl

Rio de Janeiro
Abril de 2007

Marianna Ansiliero de Oliveira Coelho

**Estabilidade de dutos enterrados sujeitos a cargas
térmicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Deane Mesquita Roehl

Orientadora

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Paulo Batista Gonçalves

PUC-Rio

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

PUC-Rio

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

UERJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Tecnológico Científico —

PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Abril de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marianna Ansiliero de Oliveira Coelho

Graduada na Universidade Estadual do Oeste do Paraná em 2004. Bolsista de Iniciação Científica do programa PIBIC/CNPq de 2003 a 2004.

Ficha Catalográfica

Marianna Ansiliero de Oliveira Coelho

Estabilidade de dutos enterrados sujeitos a cargas térmicas/ Marianna Ansiliero de Oliveira Coelho; orientadora: Deane Mesquita Roehl. - 2007.

85 f: il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Dutos enterrados. 3. Método dos elementos finitos. 4. Flambagem vertical. 5. Flambagem lateral. 6. Interação solo-duto. 7. Cargas térmicas. I. Roehl, Deane Mesquita. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

À minha mãe Lourdes, ao meu pai Eduardo, aos meus irmão Daniele, Anna Carolina e Edson por estarem sempre ao meu lado dando apoio, carinho e amor.

Ao meu namorado Alvaro, pela paciência, carinho, apoio e amor neste dois anos.

À minha orientadora Deane Roehl pela dedicação, compreensão, incentivo, paciência e amizade durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil.

Aos amigos da Pós-Graduação pela agradável convivência e por grandes amizades construídas ao longo destes dois anos. Em especial agradeço Amanda, Antônio, Fábio, André, Elvidio, Elaine, Viviana, Guilherme, Fernando, Jhoan, Leonardo e Fanny.

Às amigas da república, Maria Fernanda, Paôla, Nelly e Renata pela convivência, paciência e amizade.

Às minhas amigas Luciana, Lygia e Michele que mesmo estando longe me deram apoio.

Ao Rock and Roll, pela inspiração.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumo

Coelho, Marianna Ansiliero de Oliveira; Roehl, Deane Mesquita. **Estabilidade de dutos enterrados sujeitos a cargas térmicas**. Rio de Janeiro, 2007. 85p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho é realizado um estudo da estabilidade de dutos enterrados submetidos a cargas térmicas. As cargas térmicas são devidas ao aquecimento do fluido com o objetivo de facilitar o transporte dos óleos que são escoados nos dutos. O duto expande devido a estas cargas térmicas. Como o duto está restringido em suas extremidades e devido à expansão são causadas forças axiais de compressão no duto. Para a análise destes dutos submetidos à variação da carga térmica foram utilizados modelos teóricos e numéricos para o problema de flambagem vertical e lateral, considerando o duto perfeito e com imperfeição. Os modelos numéricos foram desenvolvidos utilizando o programa ABAQUS. Para estes modelos numéricos o duto foi considerado como uma viga e a o solo com elementos de interface e elementos de mola. Foi desenvolvido também um modelo de viga-casca onde parte do duto é modelada como uma casca cilíndrica para permitir a análise de enrugamento e da deformação da seção transversal. São realizados estudos paramétricos numéricos para investigar o efeito do recobrimento do duto, da forma e amplitude da imperfeição e da rigidez do solo na temperatura crítica de flambagem do duto.

Palavras-chave

Dutos enterrados; Método dos elementos finitos; Flambagem vertical; Flambagem lateral; Interação solo-duto; Cargas térmicas

Abstract

Coelho, Marianna Ansiliero de Oliveira; Roehl, Deane Mesquita.
Stability of buried pipes under thermal loads. Rio de Janeiro,
2007. 85p. MSc. Dissertation — Department of Engenharia Civil,
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work a study of the stability of buried pipelines subjected to thermal loads is developed. The thermal loads are due to the heated fluid that flows through the pipe. Fluid heating is for ease of oil transportation. The pipe expands due to the thermal loading. Axial forces are developed in the pipe due to the expansion since the pipe is restricted on its ends. The analysis of pipes subject to thermal loads were carried out with use of theoretical and numerical methods for upheaval and snaking buckling problems considering perfect pipes and pipes with imperfection. The numerical models were developed with the support of the ABAQUS software. The pipe was modeled as a beam and the soil is represented by interface elements and alternatively by spring elements. A beam-shell model was also developed where part of the pipe was modeled as a shell to allow a wrinkling analysis. Parametric studies were also carried out to investigate the effects of the soil stiffness, shape and amplitude of the imperfection and internal pressure on the critical temperature of the pipe.

Keywords

Buried pipelines; Finite Element Method; Upheaval buckling; Snaking buckling; Pipe-soil interaction; Thermal loads

Sumário

1	Introdução	15
2	Estabilidade de dutos	18
2.1	Flambagem e pós-flambagem	18
2.2	Método de Riks	20
2.3	Flambagem local	21
2.4	Pressão interna	24
2.5	Carga térmica	25
3	Modelos Teóricos	26
3.1	Modelos analíticos para flambagem vertical	26
3.1.1	Hobbs - Modelo sem imperfeição	27
3.1.2	Ju e Kyriakides - Modelo com imperfeição	31
3.1.3	Pedersen e Jensen - Modelo com imperfeição	33
3.2	Modelo analítico para flambagem lateral	34
3.2.1	Martinet - Modo 1	35
3.2.2	Martinet - Modo 3	36
3.2.3	Kerr - Modo 2	39
3.2.4	Kerr - Modo 4	41
3.3	Interação solo-duto	44
3.3.1	Direção lateral	45
3.3.2	Direção vertical	49
3.3.3	Direção axial	53
4	Comparação de modelos com ABAQUS	55
4.1	Modelo numérico de viga-mola	55
4.2	Modelo viga-elemento de interface	56
4.3	Modelo misto viga-casca (enrugamento)	57
4.4	Modelo experimental de flambagem global - Souza	58
4.4.1	Modelo numérico viga-elemento de interface para duto reto e em zig-zag	59
4.5	Modelo numérico de Cunha e Benjamim	63
4.5.1	Modelo numérico viga-elemento de interface para duto reto com imperfeição	64
4.5.2	Modelo viga-casca de duto reto com imperfeição	66
4.6	Modelo numérico de Battista, Pasqualino e Alves	67
4.6.1	Modelo numérico viga-elemento de interface do caso da Baía de Guanabara	69
4.6.2	Modelo viga-casca do caso da Baía de Guanabara	73
5	Análises Paramétricas	75
5.1	Imperfeição	75
5.2	Rigidez vertical do solo	79

5.3	Rigidez axial do solo	81
5.4	Pressão interna	82
6	Conclusão	84
7	Referências Bibliográficas	90

Lista de Figuras

2.1	Flambagem com snap-through e/ou bifurcação para cilindros comprimidos axialmente	19
2.2	Carga versus deslocamento para uma resposta estática instável [11]	20
2.3	Flambagem local [14] (a) modo diamante, (b) modo pata de elefante	22
2.4	Corte da distorção da seção transversal [13] (a) modo diamante, (b) modo pata de elefante	22
2.5	Limite de desempenho de dutos enterrados submetidos a pressão do solo	23
3.1	Variação da temperatura versus comprimento de flambagem para dutos com e sem imperfeições geométricas [18]	27
3.2	Flambagem vertical - Variação da força axial ao longo do duto .	28
3.3	Condições de compatibilidade para a região de flambagem . . .	30
3.4	Configuração do problema proposto por [18]. (a) Geometria do problema (b) Distribuição da força axial	32
3.5	Modos da Flambagem Lateral	35
3.6	Modo 3 - Trecho BC	36
3.7	Modo 3 - Trecho CD	37
3.8	Modo 4	41
3.9	Modelo bilinear do carregamento lateral versus deslocamento [36]	48
4.1	(a) elemento PIPE31, (b) elemento SPRING1, (c) representação do modelo viga-mola	55
4.2	Força versus deslocamento para o comportamento elasto-plástico do solo	56
4.3	Elemento PSI (Pipe-soil interaction)[12]	57
4.4	Elemento de viga com elemento de casca	58
4.5	Traçado geométrico do duto reto [19]	59
4.6	Traçado geométrico do duto em zig-zag [19]	59
4.7	Deslocamento lateral versus Temperatura do modelo do duto em zig-zag	60
4.8	Deslocamento lateral versus temperatura do modelo do duto reto	61
4.9	Representação dos deslocamentos para: (a) duto em zig-zag (escala=20) (b) duto reto (escala=5)	62
4.10	Temperatura versus tensão longitudinal para modelo do duto zig-zag	63
4.11	Temperatura versus deslocamento vertical [20]	65
4.12	Temperatura versus deslocamento vertical para modelos de viga-casca e viga-elemento de interface	66
4.13	Flambagem local com elemento viga-casca	67
4.14	Baía de Guanabara - Foto aérea [46]	68
4.15	Representação dos nós principais com suas coordenadas [21] . .	68

4.16	Representação da geometria dos modelos com geometria simplificada [21] e com nova geometria	70
4.17	Deslocamento lateral versus Temperatura para o duto da Baía de Guanabara ($T_i = 20^0C$)	71
4.18	Representação do deslocamento do duto da Baía de Guanabara	72
4.19	Representação dos deslocamentos para o modelo de viga-casca do caso da Baía de Guanabara (a) visão geral (b) detalhe da região da casca	74
5.1	Perfil das imperfeições	76
5.2	Deslocamento vertical versus Temperatura para as funções da imperfeição f_1, f_2, f_3 e f_4 com 50mm de amplitude	76
5.3	Deslocamento vertical versus Temperatura para as funções da imperfeição f_1, f_2, f_3 e f_4 com 100mm de amplitude	77
5.4	Deslocamento vertical versus Temperatura para as funções da imperfeição f_1, f_2, f_3 e f_4 com 200mm de amplitude	77
5.5	Deslocamento vertical versus Temperatura para as funções da imperfeição f_1, f_2, f_3 e f_4 com 300mm de amplitude	78
5.6	Deslocamento vertical versus Temperatura para as funções da imperfeição f_1, f_2, f_3 e f_4 com 400mm de amplitude	78
5.7	Amplitude da imperfeição versus Temperatura crítica	79
5.8	Temperatura versus deslocamento vertical para os fatores de rigidez vertical de 1,0, 1,5 e 2,0	80
5.9	Temperatura versus deslocamento axial para os fatores de rigidez vertical de 1,0, 1,5 e 2,0	80
5.10	Temperatura versus deslocamento vertical para os fatores de rigidez axial de 1,0, 1,5 e 2,0	81
5.11	Temperatura versus deslocamento axial para os fatores de rigidez axial de 1,0, 1,5 e 2,0	82
5.12	Temperatura versus deslocamento vertical com pressão interna e sem pressão interna	83

Lista de Tabelas

3.1	Valores para os coeficientes b , f_c e f_d	51
3.2	Valores para os coeficientes b_{ad} e b_{ac}	53
4.1	Reações força-deslocamento para a reação lateral do solo [19] . .	58
4.2	Características dos tubos de aço [19]	59
4.3	Temperatura crítica para o duto reto	61
4.4	Reações do solo para cobertura $h=1.0\text{m}$ e diâmetro externo do duto $D_e=0.508\text{m}$ (valores em N/m) [20]	64
4.5	Características do duto [20]	64
4.6	Valores dos coeficientes de rigidez das molas para as regiões: Canal, Acidente e Baía [21]	69
4.7	Características do duto para as três regiões: Canal, Acidente e Baía [21]	69
4.8	Valores da relação tensão-deformação do duto	69
4.9	Análise da temperatura crítica [21]	72

Lista de Símbolos

Caracteres Romanos

A	→ Área da seção transversal do duto
A_{lat}	→ Área lateral de contato solo-duto
D	→ Diâmetro do duto
E	→ Módulo de elasticidade
f_d	→ Fator de carregamento
H	→ Cobrimento do duto
H_0	→ Cobrimento até a metade do duto
I	→ Momento de inércia
K	→ Coeficiente lateral de pressão do solo
K_T, K_z	→ Rigidez lateral do solo
K_{T1}	→ Rigidez lateral inicial do solo
K_{T2}	→ Segunda rigidez lateral do solo
K_v	→ Rigidez vertical do solo
K_u	→ Rigidez axial do solo
$l_{peridico}$	→ Fator do comprimento de arco total
L	→ Comprimento de flambagem do duto
L_d	→ Comprimento do duto
L_e	→ Comprimento equivalente de flambagem
L_q	→ Comprimento do atrito

M	→	Momento externo
$N_{ch}, N_{cv}, N_{qh}, N_{qv}, N_c, N_q, N\gamma$	→	Fatores de capacidade de carga
p	→	Pressão interna no duto
p_c	→	Pressão interna crítica no duto
P	→	Carga axial no trecho flambado
P_a	→	Reação axial do solo
P_0	→	Carregamento axial inicial ou carregamento permanente
P_c	→	Carga crítica de Euler
P_{lat}	→	Reação lateral do solo
P_p	→	Reação lateral passiva de dutos
P_{ref}	→	Carregamento de referência
P_{total}	→	Carregamento atual
P_{vS}, P_{vT}	→	Resistência vertical do solo
P_{va}	→	Resistência vertical ascendente do solo
P_{vc}	→	Resistência vertical descendente do solo
P_μ	→	Reação contato solo-duto
q	→	Carregamento distribuído devido ao atrito
Q	→	Reação devido ao atrito
S_u	→	Resistência não drenada do material
t	→	Espessura do duto
T	→	Temperatura
y_0	→	Imperfeição da fundação
w	→	Carregamento vertical do solo
W_{sub}	→	Peso submerso do duto
z	→	Deslocamento na direção lateral
z_I	→	Deslocamento inicial na direção lateral

Caracteres Gregos

α	→ Coeficiente linear de expansão térmica
δ	Amplitude da imperfeição
Δ_0	Imperfeição inicial da fundação
$\Delta\lambda_{in}$	Fator de proporcionalidade do carregamento inicial
Δl_{in}	Incremento inicial do comprimento de arco
Δl_{max}	Incremento do comprimento de arco máximo
Δl_{min}	Incremento do comprimento de arco mínimo
ϵ	Deformação de membrana na viga
ϕ	Coeficiente de atrito
γ	Densidade do solo
κ	Deformação de flexão na viga
λ	Fator de proporcionalidade do carregamento
μ_{axi}	Coeficiente de atrito axial
μ_{lat}	Coeficiente de atrito lateral
ν	Coeficiente de Poisson