



Igor Eduardo Otiniano Mejía

**Modelo numérico para o estudo
do comportamento de dutos enterrados**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Profa. Deane de Mesquita Roehl

Rio de Janeiro
Março de 2003



Igor Eduardo Otiniano Mejía

**Modelo numérico para o estudo
do comportamento de dutos enterrados**

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

Profa. Deane de Mesquita Roehl

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Março de 2003

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

Igor Eduardo Otiniano Mejía

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Privada de Tacna-Perú, em 1994/I. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil (Estruturas) no ano de 2001, atuando na área de Termomecânica. Desenvolveu pesquisa sobre dutos enterrados.

Ficha Catalográfica

Mejía, Igor Eduardo Otiniano

Modelo numérico para o estudo do comportamento de dutos enterrados / Igor Eduardo Otiniano Mejía; orientadora: Deane de Mesquita Roehl. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[16], 81 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Elementos finitos. 3. Técnica RMDI. 4. Equação de trabalho virtual. 5. Interação solo-duto. 6. Dutos enterrados. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

A meus pais Esperanza e Ricardo,
meus irmãos Jacqueline, Lisette, Ricardo
e Roger, e à minha paciente companheira Ana,
pelas orações, apoio e confiança.

Agradecimentos

À Pontifícia Universidade Católica (PUC-Rio), por ter me concedido a oportunidade de realizar este trabalho.

À Professora Deane Roehl, pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho, por sua orientação e confiança.

Aos professores do curso de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil-PUC-Rio pelos ensinamentos transmitidos durante o curso de Mestrado.

Aos meus amigos, Ricardo, Javier, Nelly, Pasquetti, André, Edgley, Walter, Ramires, Sandoval, a todos vocês pela amizade e agradável convívio.

Aos funcionários da secretaria de Engenharia Civil: Ana Roxo, Lenílson, Cristiano e Fátima, pela atenção e extraordinário desempenho com todos os alunos.

À Capes pelo apoio financeiro.

Resumo

Mejía, Igor Eduardo Otiniano; Deane de Mesquita Roehl. **Modelo Numérico para o Estudo do Comportamento de Dutos Enterrados**. Rio de Janeiro, 2003. 97p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apresenta-se uma metodologia de análise numérica para dutos enterrados usados no transporte de petróleo e gás, considerando não-linearidades geométricas e não-linearidades de material baseada na formulação Lagrangeana Total. Emprega-se uma modelagem com base em uma discretização com elementos especiais de viga. As equações de equilíbrio são formuladas a partir do princípio dos trabalhos virtuais, segundo as componentes de tensão e deformação no elemento viga-duto, com emprego da técnica do Módulo Reduzido de Integração Direta (RMDI), na qual incorpora-se o comportamento plástico do material. Esta técnica exclui da análise os efeitos da flambagem local nas paredes do duto. As matrizes para resolução por elementos finitos destas equações são derivadas. Incorporam-se, nesta metodologia os efeitos de pressão interna constante no duto assim como a interação solo-duto através da modelagem do solo por meio de molas elasto-plásticas verticais e horizontais. Na modelagem desenvolvida as cargas distribuídas são consideradas como constantes no sistema global de eixos. Desenvolve-se um programa para computador segundo a metodologia apresentada. São estudados alguns exemplos com o objetivo de avaliar numericamente os resultados de análise obtidos e formular algumas conclusões sobre o comportamento de dutos enterrados.

Palavras-chave

Elementos finitos; técnica RMDI, equação de trabalho virtual; interação solo-duto; dutos enterrados.

Abstract

Mejía, Igor Eduardo Otiniano; Deane De Mesquita Roehl. **A Numerical Model for the Analysis of Buried Pipes**. Rio de Janeiro, 2003. 97p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a numerical methodology for the analysis of buried pipes employed by the transport of oil and gas. Both geometric and material non-linearities are considered in a total Lagrangean formulation. A special type of beam element is employed in the finite element discretization. The equilibrium equations are formulated based on the virtual work principle considering the stress and deformation components of the beam-pipe element. The Reduced Modulus Direct Integration (RMDI) technique is employed through which the plastic material behavior is incorporated. This technique excludes from the analysis the local buckling effects of the pipe walls. The corresponding finite element matrices for this element are obtained. In this methodology the effects of the constant internal pressure as well as the soil-pipe interaction by means of elastic-plastic uplift, bearing and longitudinal springs are included. Distributed loads are considered constant with respect to the global axis. A computer code is developed according to the methodology presented. Some examples are studied with the objective to evaluate numerically the analysis results and to formulate some conclusions to the behavior of buried pipes.

Keywords

Finite elements; RMDI technique; virtual work equation; pipeline-soil interaction; buried pipes.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Revisão Bibliográfica	19
1.1.1 Critérios de Projeto Usados na Indústria	19
1.1.2 Estudos Experimentais da Deformação de Flambagem	20
1.1.3 Estudos Analíticos da Deformação de Flambagem	22
1.1.3.1 Soluções Baseadas em Equações Diferenciais	22
1.1.3.2 Soluções Baseadas em Elementos Finitos	25
1.1.4 Análises de Dutos Submetidos a Recalque	26
1.1.5 Resposta de Linhas de Tubulação sem Flambagem	29
1.2 Organização do Texto	30
2 FORMULAÇÃO DO ELEMETO VIGA - DUTO	31
2.1 Introdução	31
2.2 Hipóteses Cinemáticas Fundamentais	32
2.3 Relações Deformações-Deslocamentos	33
2.4 Relações Constitutivas	38
2.5 Procedimento de Solução para Avaliar Incrementos de Tensão	42
2.6 Iteração Duto-Solo	45
2.6.1 Deformação de Molas de Solo	45
2.6.2 Relações Constitutivas para Molas de Solo	47
2.7 Equação de Trabalho Virtual Incremental	48
2.7.1 Referenciais Lagrangeanos	48
2.7.2 Equação de Trabalho Virtual Incremental para a Formulação Lagrangeana Total	50
2.8. Discretização do Elemento Finito	52
2.8.1 Interpolação de Deslocamentos	53
2.8.2 Matrizes de Deformação-Deslocamento	56

2.8.3 Equações de Equilíbrio para o Elemento Finito	58
3 METODO DE SOLUÇÃO	62
3.1 Introdução	62
3.2 Revisão de Procedimentos de Solução	62
3.3 Procedimento de Solução Incremental e Iterativo	63
3.3.1 Procedimento Iterativo de Newton-Raphson	67
3.4 Atualização da Geometria	69
3.5 Critérios de Convergência	70
4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	72
4.1 Introdução.....	72
4.2 Descrição do Programa	72
4.2.1 Entrada de Dados.....	73
4.2.2 Solução Passo a Passo	73
4.3 Resultados.....	76
5 EXEMPLOS.....	78
5.1 Exemplo 1.....	78
5.2 Exemplo 2.....	80
5.3 Exemplo 3.....	82
5.4 Exemplo 4.....	84
5.5 Exemplo 5.....	87
6 CONCLUSÕES	90
6.1 Considerações Gerais	90
6.2 Conclusões e Sugestões	91
7 REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

Lista de figuras

Figura 1.1 - Linha de Tubulação	17
Figura 1.2 - Esquema de duto enterrado	18
Figura 1.3 - Duto submetido à compressão no eixo longitudinal	23
Figura 1.4 - Discretização com elementos tipo casca.....	25
Figura 1.5 - Análise de recalques de degelo para dutos enterrados NYMAN (1983)	28
Figura 2.1 - Sistemas de coordenadas global e local	33
Figura 2.2 - Configurações deformadas para $t = 0$, $t = t$ e $t = t + \Delta t$	34
Figura 2.3 - Deformações no duto fletido.....	35
Figura 2.4 - Exemplo de divisão da seção transversal	44
Figura 2.5 - Tipos de molas	46
Figura 2.6 - Relação força deformação para molas.....	47
Figura 2.7 - Referencial Lagrangeano total	49
Figura 2.8 - Referencial Lagrangeano atualizado	49
Figura 2.9 - Elemento de viga com três nós	53
Figura 2.10 - Orientação do elemento	56
Figura 3.1 - Força equilibradora	64
Figura 3.2 - Trajetória de equilíbrio.....	65
Figura 3.3 - Procedimento incremental iterativo	67
Figura 3.4 - Iteração Newton-Raphson completa	68
Figura 3.5 - Iteração Newton-Raphson modificada	69
Figura 4.1 - Perfil do solo e tubulação	73
Figura 4.2 - Entrada de dados para à discretização	74
Figura 4.3 - Discretização de elementos tipo viga	74
Figura 4.4 - Tabela para informação de tipo de apoio	75
Figura 4.5 - Arquivo de saída.....	77

Figura 5.1 - Exemplo 1: Viga engastada livre com carga distribuída uniforme.....	79
Figura 5.2 - Deslocamentos na extremidade livre vs carga para a viga engastada e livre do exemplo 1	80
Figura 5.3 - Exemplo 2: viga biapoiada com momentos nas extremidades	81
Figura 5.4 - Comparação da deflexão vertical (SAP2000 e Itera) exemplo 2	82
Figura 5.5 - Viga biapoiada sob base elástica com momentos nas extremidades.	83
Figura 5.6 - Comparação da deflexão vertical (formulação semi-analítica e ITERA).....	83
Figura 5.7 - Deflexão vertical com e sem fundação (programa ITERA) ...	84
Figura 5.8 - Viga biapoiada com pressão interna e momentos nos apoios sobre base elástica.....	85
Figura 5.9 - Configuração deformada obtida com o programa SAP2000 para uma viga biapoiada com pressão interna sobre uma base elástica .	86
Figura 5.10 - Modelagem do SAP2000 para molas de solo na seção transversal do duto	86
Figura 5.11 - Deflexão para uma viga biapoiada com pressão interna sobre base elástica.....	87
Figura 5.12 - Exemplo 5:Duto enterrado.....	87
Figura 5.13 - Deflexão vertical do duto enterrado.....	87

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Propriedades e resultados dos testes de Korol21

Tabela 1.2 - Propriedades e resultados dos testes de Sherman22

Lista de símbolos

B	Operador de deformação deslocamento
$C_{\theta x}$	Razão entre deformação circunferencial e deformação longitudinal
C_{rx}	Razão entre deformação radial e deformação longitudinal
C^{EP}	Modulo elasto-plástico
D	Diâmetro exterior
E	Modulo de Elasticidade
F	Força axial
${}^tF_{eq}$	Força axial equivalente
${}_tF_{BS}$	Força incremental da mola de solo de apoio
${}_tF_{US}$	Força incremental da mola de solo uplift
${}_tF_{LS}$	Força incremental da mola de solo longitudinal
G	Modulo de cisalhamento
H'	Constante de encruamento equivalente
K_1	Coeficiente de rigidez da seção transversal de uma viga (axial)
K_2	Coeficiente de rigidez da seção transversal de uma viga (flexão)
K_3	Coeficiente de rigidez da seção transversal de uma viga (acoplamento)
${}^tK_{BS}$	Coeficiente de rigidez corrente da mola de solo de apoio
${}^tK_{US}$	Coeficiente de rigidez corrente da mola de solo uplift
${}^tK_{LS}$	Coeficiente de rigidez corrente da mola de solo longitudinal
tL	Comprimento corrente do elemento viga-tubo
M	Momento
${}^tM_{eq}$	Momento equivalente
tN_i	funções de interpolação de elementos finitos

p	Pressão interna
${}^t s_{ij}$	Tensor desviador do segundo tensor de tensões Piola-Kirchhoff
${}^t S_{ij}$	Segundo tensor de tensões Piola-Kirchhoff
$\bar{S}$	Tensão efetiva
${}^t S_y$	Tensão de escoamento corrente
${}^t S_\theta$	Tensão circunferencial constante
t	Espessura da tubulação
tol	Tolerância
U	Forças desbalanceadas
u, v	Deslocamentos em coordenadas locais x, y
$\tilde{u}, \tilde{v}$	Deslocamentos em coordenadas globais $\tilde{x}, \tilde{y}$
$\tilde{x}, \tilde{y}$	Coordenadas globais
α	Angulo de orientação
κ	Fração elástica
${}_i \Delta_{BS}$	Deformação incremental da mola de solo de apoio
${}_i \Delta_{US}$	Deformação incremental da mola de solo uplift
${}_i \Delta_{LS}$	Deformação incremental da mola de solo longitudinal
ε_{cr}	Deformação unitária critica (flambagem)
$d\bar{\varepsilon}^p$	Deformação plástica efetiva incremental
$\bar{\varepsilon}^p$	Deformação plástica efetiva acumulada
${}^t \varepsilon_0$	Deformação longitudinal no centróide do elemento
${}_i \varepsilon_0$	Deformação longitudinal incremental no centróide do elemento
${}_i \varepsilon^p$	Deformação plástica efetiva incremental
${}_i \varepsilon_\theta^p$	Deformação plástica na direção circunferencial
${}_i \varepsilon_r^p$	Deformação plástica na direção radial
${}_i \varepsilon_x^p$	Deformação unitária plástica na direção longitudinal
${}^t \varepsilon_x$	Deformação unitária longitudinal
${}_i \varepsilon_x$	Deformação unitária incremental longitudinal

ϕ	Curvatura
σ	Tensão
ν	Coeficiente de Poisson
ξ	Coordenada natural axial
η	Parâmetro usado para definir $[{}^t B^S]$
$[{}^t B^L]$	Matriz linear deformação-deslocamento
$[{}^t B_1^{NL}]$	Matriz não-linear deformação-deslocamento
$[{}^t B_2^{NL}]$	Matriz não-linear deformação-deslocamento
$[{}^t B]$	Matriz deformação-deslocamento para molas de solo
$[{}^t D^P]$	Matriz de propriedades de material da seção transversal da tubulação
$[{}^t D^S]$	Matriz de propriedades de material de molas de solo
$[{}^t F]$	Matriz de força axial
$[{}^t N]$	Matriz de funções de interpolação
$[K]$	Matriz de rigidez
$[K_E]$	Matriz de rigidez elástica para um elemento
$[K_E]$	Matriz de rigidez elasto-plástica para um elemento
$[K_G]$	Matriz de rigidez geométrica para um elemento
$[K_S]$	Matriz de rigidez das molas para um elemento
$[K_{EP}^{Ens}]$	Matriz de rigidez elasto-plástica ensablada
$[K_G^{Ens}]$	Matriz de rigidez geométrica ensablada
$[K_S^{Ens}]$	Matriz de rigidez das molas ensablada
$[{}^t M]$	Matriz de momento
$[{}^t T]$	Matriz de transformação
$\{P\}$	Vetor de carga externa
$\{\Delta P\}$	Vetor de carga externa incremental
$\{Q\}$	Vetor de força equilibradora
$\{P_{ext}^{Ens}\}$	Vetor de forças externas, ensablado

$\{Q_p^{Ens}\}$ Vetor de forças internas do tubo, ensablado

$\{Q_s^{Ens}\}$ Vetor de forças internas das molas, global.

$\{u\}$ Vetor deslocamento

$\{du\}$ Vetor deslocamento incremental associado a uma iteração

$\{\Delta u\}$ Vetor deslocamento associado a um incremento

$\{u^{Ens}\}$ Vetor de deslocamentos ensablado

Γ Configuração da estrutura