



**Nelly Piedad Rubio Rubio**

**Estudo de dutos enterrados considerando a interação  
solo-estrutura**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Deane de Mesquita Roehl  
Celso Romanel

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2008



**Nelly Piedad Rubio Rubio**

**Estudo de dutos enterrados considerando a interação  
solo-estrutura**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Deane de Mesquita Roehl**

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Celso Romanel**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Raul Rosas e Silva**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Giuseppe Barbosa Guimarães**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco**

Departamento de Engenharia Civil – UERJ

**Luiz Eloy Vaz**

Escola de Engenharia – UFRJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de dezembro de 2008

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

### **Nelly Piedad Rubio Rubio**

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ/RJ) em 1997. Em 2000, obteve o título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas, na PUC-Rio, com dissertação desenvolvida na linha de pesquisa de Comportamento Inelástico de Materiais e Estruturas. Em janeiro de 2005 passou a formar parte da equipe Grupo de Engenharia e Tecnologia de Petróleo (GTEP/PUC-Rio), e na linha de Estabilidade de Poços e Modelagem Geomecânica vem desenvolvendo trabalhos de Pesquisa, Desenvolvimento e Suporte.

### Ficha Catalográfica

Rubio Rubio, Nelly Piedad

Estudo de dutos enterrados considerando a interação solo-estrutura / Nelly Piedad Rubio Rubio ; orientadores: Deane de Mesquita Roehl, Celso Romanel. – 2008.

120 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia.

CDD: 624

A DEUS, a força maior do universo!

## Agradecimentos

A Deus, que me trouxe aqui e que me acompanhou em todos os momentos.

À Prof. Orientadora Deane Roehl, pelos ensinamentos transmitidos, pelo incentivo e suporte na pesquisa.

Ao Prof. Celso Romanel, pela contribuição na elaboração do trabalho.

Ao Prof. Sergio A. B. da Fontoura pelo apoio, incentivo e motivação.

Ao CNPq, e a PUC-Rio pelo apoio financeiro.

À minha família no Peru: meus pais Luis y Nelly, irmãos e sobrinhos, pelo amor incondicional sempre. Vocês são especiais demais na minha vida!

À minha família no Brasil: a família Tyrrell Rubio, pelo carinho e amparo, em todos os momentos desde que cheguei ao Brasil.

Aos todos meus colegas e amigos do GTEP/PUC-Rio, em especial: Olga Carvajal e Bruno Holzberg amigos muito queridos com que partilhei momentos para sempre.

Aos amigos da PUC, em especial: Isabelle, Luciana, Ciro, Walter, Joabson, Flávio, Ataliba e Ana Julia, Paôla, Michele, Emiliana, Cyntia, Luis e Maristâni, pelos momentos inesquecíveis partilhados.

Aos amigos da Pastoral da PUC, em especial: Pe. Emmanuel, Helena, Juliana, Ir. Graça e Fernanda. Muito obrigada pela força e pelas suas orações.

A todos os Professores do DEC/PUC-Rio, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos meus familiares e amigos do Peru pelo carinho e incentivo.

Aos funcionários da Secretária da Pós do DEC pela disponibilidade, em especial: Ana Roxo, Rita, Cristiano, Lenilson e Fátima.

A todos os colegas da Pós pelos momentos compartilhados.

Aos professores da Comissão Examinadora.

A todos os que me ajudaram nesta caminhada.

## Resumo

Rubio, Nelly Piedad Rubio. Roehl, Deane de Mesquita; Romanel, Celso (Orientadores). **Estudo de dutos enterrados considerando a interação solo-estrutura**. Rio de Janeiro, 2008. 120 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia com base no método de elementos finitos para o estudo do problema de contato com atrito que surge na interação solo-duto no comportamento de dutos enterrados. O tratamento das restrições de contato e a incorporação da lei do atrito (tipo Coulomb) é feita através do Método da Penalidade, tomando como referência o trabalho de Laursen & Simo (2002), onde as restrições de contato são impostas de maneira aproximada com o uso de parâmetros de penalidade para as forças normal e tangencial no contato. As relações cinemáticas são descritas em termos de uma função diferenciável da distancia entre os corpos (gap). Para a discretização são empregados elementos hexaédricos de 8 nós com uma formulação híbrida - Enhanced Assumed Strain (EAS) e os efeitos de comportamento não-linear dos materiais envolvidos são considerados na presença de grandes deslocamentos e grandes deformações. A teoria da plasticidade é utilizada para modelar a natureza não-linear das relações constitutivas do duto. Aplicações considerando o problema de contato com atrito que surge na interação solo-duto são apresentadas.

## Palavras-chave

Problema de contato com atrito; método da Penalidade; Método dos Elementos Finitos; dutos enterrados; interação solo-estrutura.

## Abstract

Rubio, Nelly Piedad Rubio; Roehl, Deane de Mesquita; Romanel, Celso (Advisors). **Design of buried pipelines considering the reciprocal soil-structure interaction.** Rio de Janeiro, 2008. 120 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research aims the development of a methodology based on the finite element method for 3D frictional contact problems such as the frictional contact problem that arises from the soil-pipe interaction of buried pipelines. The treatment of the contact restrictions and the incorporation of the friction law of the Coulomb type are carried out through a penalty method, where the contact restrictions are imposed in an approximated manner using penalty parameters for both normal and tangential forces. The cinematic relations are established in terms of the differential function of the gap between bodies. Hexahedral eight-node elements are employed based on the Enhanced Assumed Strain (EAS) concept and the effects of the non-linear behavior of the materials are considered in presence of large displacements and large deformations. The theory of plasticity is used to model the non-linear nature of the constitutive relations of the pipe. Applications are presented considering the frictional contact problem that arises on the interaction surfaces of a buried structure such as an oil pipeline.

## Keywords

Frictional contact problem; penalty method; finite element method; buried pipelines; soil-structure interaction.



# Sumário

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Definição do Problema	18
1.2 Motivação	19
1.3 Justificativa	20
1.4 Objetivo	21
1.5. Estrutura da Tese	21
2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO ESTRUTURAL DE DUTOS ENTERRADOS	23
2.1 Introdução	23
2.2 Pressão Interna	26
2.3 Transporte/Instalação	27
2.4 Deformações do Anel	29
2.5 Deflexão do anel devido à pressão interna	31
2.6 Pressão Vertical do solo (P)	31
2.7 Resistência do solo	32
2.8 Mecanismos do Duto	32
2.8.1 Análises longitudinais	33
2.8.2 Análise do anel: tensão, deformação e estabilidade	33
2.9 Mecanismos Longitudinais	35
2 3 MODELOS DE INTERAÇÃO SOLO-DUTO	36
3.1 Introdução	36
3.2 Modelos Propostos na Literatura	37
3.2.1 Modelo de Selvadurai & Pang (1998) <sup>6</sup>	37
3.2.2 Modelo de Zhou & Murray (1993, 1996) <sup>7,8,9</sup>	37
3.2.3 Modelo de Rajani, Robertson & Morgenstern(1995) <sup>10</sup>	38
3.2.4 Modelo de Veiga, Romanel & Roehl (2000) <sup>11</sup>	38
3.2.5 Modelo de Lim, Kim, Kim & Jang (2001) <sup>12</sup>	39
3.2.6 Modelo de Mandolini, Minutolo e Ruocco (2001) <sup>13</sup>	40
3.2.7 Modelo de Mejia & Roehl (2003) <sup>14</sup>	40
3.2.8 Modelo de Souza, Guimarães & Roehl (2004) <sup>15</sup>	41
3.2.9 Modelo de Lazaro, Hecke, Roehl & Machado (2004) <sup>16</sup>	41
3.2.10 Modelo de Souza, Hecke, Roehl & Machado (2005) <sup>17</sup>	42

3.2.11 Modelo de Coelho & Roehl (2007) <sup>18</sup>	43
3.2.12 Modelo de Teixeira & Romanel (2008) <sup>19</sup>	43
3.3 Comentários Finais	44
4 MODELOS PARA O PROBLEMA DE CONTATO	47
4.1 Introdução	47
4.2 Modelos Propostos na Literatura	49
Modelo de Lee & Kwak <sup>43</sup>	49
Modelo de Simo, Wriggers & Taylor <sup>44</sup>	49
Modelo de Nour-Omid & Wriggers <sup>45</sup>	49
Modelo de Klarbring <sup>46</sup>	50
Modelo de Fisher & Melosh <sup>47</sup>	50
Modelo de Kwak & Lee <sup>63</sup>	50
Modelo de Gakwaya & Lambert <sup>64</sup>	50
Modelo de Laursen <sup>48,50</sup> - Laursen & Simo <sup>49</sup>	50
Modelo de Björkman <sup>76</sup>	50
Modelo de Kwak <sup>62</sup>	51
Modelo de Changming & Yongjie <sup>52</sup>	51
Modelo de Peric & Owen <sup>53</sup>	51
Modelo de Klarbring & Bjorkman <sup>65</sup>	51
Modelo de Heegaard & Curnier <sup>54</sup>	51
Modelo de Lee, Kwak & Kwon <sup>66</sup>	51
Modelo de Kim & Kwak <sup>77</sup>	52
Modelo de Hongwu, Wanxie & Yuanxian <sup>78</sup>	52
Modelo de Garrido & Lorenzana <sup>67</sup>	52
Modelo de Liolios, Pitilakis & Yeroyianni <sup>68</sup>	52
Modelo de Guyot, Kosior & Maurice <sup>79</sup>	52
Modelo de Pietrzak & Curnier <sup>57</sup>	52
Modelo de Ferreira & Roehl <sup>58,80</sup>	53
Modelo de Bandeira <sup>59</sup>	53
4.3 Modelo Proposto	53
5 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CONTATO COM ATRITO	55
5.1 Formulação Contínua do Problema de Contato	55
5.1.1 Notação	55
5.1.2 Restrições de contato normal	56
5.1.3 Contato com atrito	58
5.1.4 Método da Penalidade	62
5.1.5 Algoritmos para mapeamento de retorno do atrito	63

5.1.6 Formulação Variacional do Problema de Contato	65
5.2 Implementação da Formulação em Elementos Finitos: Método da Penalidade	70
5.3 Fluxograma do Método da Penalidade: PC com atrito	77
6 APLICAÇÕES	79
6.1 EXEMPLOS DE VALIDAÇÃO	80
6.1. 1 BLOCO ELÁSTICO com $L \gg H$	80
Solução Numérica: Método de Penalidade considerando contato com atrito	84
6.1. 2 LIGAÇÃO DE PLACA DE EXTREMIDADE	87
6.1. 3 PUNÇÃO ELÁSTICA DE UM BLOCO SOBRE UMA FUNDAÇÃO RÍGIDA	91
6.1. 4 DESLIZAMENTO DE UM BLOCO ELÁSTICO	93
6.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	95
6.2.1 DUTO ENTERRADO	95
6.2.2 INTERAÇÃO SOLO-DUTO DE UM DUTO ENTERRADO QUE ATRAVESSA UMA ENCOSTA	98
Modelagem do Duto	98
Modelagem Sistema Solo-Duto	103
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

## Lista de Figuras e Tabelas

Figura 2.1 – Esquema da definição da seção transversal de dutos enterrados	24
Figura 2.2 – Possíveis limites de execução do sistema solo-duto <sup>1</sup>	24
Figura 2-3 – Limites de Execução do duto enterrado devido à pressão externa do solo <sup>1</sup>	25
Figura 2.4 - Diagrama de corpo livre da seção transversal (metade) incluindo pressão interna	27
Figura 2.5 – Cargas mais comuns nos dutos devido ao transporte/instalação <sup>1</sup>	28
Figura 2.6 - Diagramas de corpo livre do duto: rígido e flexível sujeito à força F.	28
Figura 2.7 - Diagrama de corpo livre da seção transversal (metade) incluindo pressão externa	29
Figura 2.8 – O círculo imaginário como um anel flexível	30
Figura 2.10 – Pressão vertical do solo no nível do topo de um duto enterrado (P)	32
Figura 2.11 – Comparação da análise de tensão: coluna curta x anel de duto	34
Figura 2.12 – Colapso de um anel circular flexível devido à pressão externa baseado na rigidez do duto	35
Figura 5.1 – Notação das deformações finitas do Problema de Contato com atrito	56
Figura 5.2 – Definição da função de folga (“gap”)	57
Figura 5.3 – Parametrizações das superfícies de contato $\Gamma^{(2)}$ e $\gamma^{(2)}$	58
Figura 5.4 – Definição do ponto escravo e da superfície mestre em 3D	72
Figura 5.5 – Fluxograma do Método da Penalidade: PC com atrito	78
Figura 6.1 – Definição do problema do bloco elástico $L \gg H$	80
Figura 6.2 – Tensões atuando no elemento infinitesimal	81
Figura 6.3 – Comportamento Constitutivo do elemento de interface: tensão cisalhante versus deslocamento de cisalhamento relativo	82
Figura 6.4 – Deslocamentos Horizontais na interface obtidos com a formulação analítica	84
Figura 6.5 - Discretização da malha em elementos finitos para o problema bloco $L \gg H$	85
Figura 6.6 - Deslocamentos Horizontais na Interface obtidos na	

Formulação Analítica e na Formulação desenvolvida (CARAT 3D)	86
Figura 6.7 - Deslocamentos na interface CARAT versus Hird & Russell: diferentes níveis de carregamento	86
Figura 6.8 - Detalhe da zona de contato e o carregamento no plano <sup>89</sup> .	87
Figura 6.9 – Características geométricas do modelo reduzido <sup>89</sup>	88
Figura 6.10 – Comparação dos resultados das análises experimental de Rother et al. E a análise numérica com CARAT 3D com elementos Hexa8-E3.	89
Figura 6.11 – Deformada da ligação de placa de extremidade no instante final (maximização em 25 vezes)	89
Tabela 6.1 – Variação de parâmetros de penalidade nas análises realizadas	90
Figura 6.12 – Comparação dos resultados das análises experimental de Rother et al. e as análise numérica com CARAT 3D com elementos Hexa8-E3 para diferentes parâmetros de penalidade normal e tangencial (pn e pt respectivamente).	90
Figura 6.13 – Geometria do bloco sobre uma fundação rígida <sup>90,91,92</sup> .	91
Figura 6.14 – Discretização em elementos finitos do bloco sobre uma fundação rígida.	92
Figura 6.15 – Geometria do Bloco Elástico sobre uma Fundação Rígida <sup>49,50,93,94</sup>	93
Figura 6.16 – Deslocamentos tangenciais na interface de contato com atrito $\mu = 0.5$	94
Figura 6.17 – Deformada do bloco elástico devido ao carregamento aplicado	94
Figura 6.18 – Geometria do Sistema Solo-Duto	96
Figura 6.19 - Malha em Elementos Finitos do Sistema Solo-Duto (365 elementos Hexa8-E3)	96
Figura 6.20 - Campo de Deslocamentos DX (eixo horizontal) no sistema solo-duto	97
Figura 6.21 - Campo de Deslocamentos DY (eixo vertical) no sistema solo-duto	97
Figura 6.22 - Esquema da linha de duto e as suas condições de contorno	98
Figura 6.23 - Discretização da malha em elementos finitos do duto	100
Figura 6.24 – Curva fator carga versus deslocamento (vertical) para o nó localizado no comprimento 2.5 m da linha de duto.	101
Figura 6.25 - Campo de deslocamento DX devido a uma pressão interna equivalente a 9.0 MPa: elemento HEXA8	101
Figura 6.26 - Campo de deslocamento DX devido a uma pressão	

interna equivalente a 9.0 MPa: elemento HEXA8-E3	101
Figura 6.27 - Campo de deslocamento DY devido a uma pressão interna equivalente a 9.0 MPa: elemento HEXA8	102
Figura 6.28 - Campo de deslocamento DY devido a uma pressão interna equivalente a 9.0 MPa: elemento HEXA8-E3	102
Figura 6.29 - Campo de deslocamento DZ devido a uma pressão interna equivalente a 9.0 MPa: elemento HEXA8	102
Figura 6.30 - Campo de deslocamento DZ devido a uma pressão interna equivalente a 9.0 MPa: elemento HEXA8-E3	102
Figura 6.31 – Tensões de von Mises devido a uma pressão interna equivalente a 9.0 MPa: elemento HEXA8	103
Figura 6.32 – Tensões de von Mises devido a uma pressão interna equivalente a 9.0 MPa: elemento HEXA8-E3	103
Tabela 6.1 – Carregamento solicitado pelo duto por trechos.	103
Figura 6.33 - Discretização da malha em elementos finitos do duto	104
Tabela 2 – Variação de deslocamentos (em mm) nos nós de contato em função da variação de coeficiente de atrito para $\mu = 0.1$ e $\mu = 0.3$ .	105
Figura 6.34 – Tensões Von Mises, na configuração final, considerando o sistema solo-duto, para $\mu = 0.6$ : Vistas 1 e 2.	106
Figura 6.35 – Tensões longitudinais, na configuração final, considerando o sistema solo-duto, para o caso $\mu = 0.6$ .	107
Tabela 6.3 – Verificação de Modelo do Solo: Critério de Falha Mohr-Coulomb 3D.	108
Figura 6.36 – Tensões Von Mises, no sistema solo-duto, para a configuração final de carregamento com parâmetros de penalidade: $\epsilon_N = 10^3$ e $\epsilon_T = 10^2$ e coef. de atrito $\mu = 0.6$ .	109

## Lista de Símbolos

$\gamma^{(i)}$	Posição corrente da superfície de contorno
$\Gamma^{(i)}$	Superfícies dos contornos dos corpos $\partial\Omega^i$
$\delta\Phi_c^k$	Vetor das variações nodais correspondente ao ponto $k$ da quadratura
$\Delta$	Redução do diâmetro $D$ devido à força $F$
$\Delta\Phi_c^k$	Vetor dos valores nodais de $\mathbf{u}^h$
$\Delta r$	Acréscimo do raio devido à pressão interna
$\Delta D$	Acréscimo do raio devido à pressão interna
$\varepsilon$	Deformação
$\varepsilon_N$	Penalidade normal
$\varepsilon_T$	Penalidade tangencial
$\zeta \frac{\mathbf{t}_T^b}{\ \mathbf{t}_T^b\ }$	Taxa de deslizamento
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\xi$	Variável do domínio paramétrico
$\sigma$	Tensão circunferencial
$\varphi_{(a)}^1$	Valor nodal de $\varphi^{(1)h}$
$\varphi_t^i$	Configuração no tempo $t$ do corpo (i)
$\bar{\varphi}_t^{(i)}$	Deslocamento prescrito
$\Psi_t^{(i)}$	Serie de mapeamentos indexados pelo tempo $t$
$\Omega^i$	Configuração inicial do corpo deformável (i)
$A$	Seção transversal do duto
$\mathbf{B}^i$	Definição do corpo deformável (i)
$d$	Deflexão do anel (percentagem)
$D$	Diâmetro médio do duto
$E$	Módulo de Elasticidade
$\mathbf{E}_\alpha(\xi)$	Base para $\Gamma^{(2)}$

$\mathbf{e}_\alpha(\xi)$	Base para $\gamma^{(2)}$
$F$	Carga diametral atuante no duto durante o transporte e instalação
$\mathbf{F}_t^{(2)}$	Gradiente de deformação correspondente a $\varphi^{(2)}$
$g(\mathbf{X}, t)$	Função de folga (“gap”)
$\dot{g}(\mathbf{X}, t)$	Derivada da Função de folga (“gap”)
$g_T$	Função de folga tangencial
$G^{(i)}(\varphi_t^{(i)}, \varphi^{(i)})$	Soma do trabalho virtual interno e o trabalho virtual das forças aplicadas no corpo ( $i$ )
$H(g)$	Função Heaviside
$ID$	Diâmetro interno
$j(\boldsymbol{\eta}^k)$	Jacobiano da transformação em relação ao domínio de referência
$\mathbf{K}_c^k$	Matriz de rigidez de contato
$\mathbf{K}_{c_N}$	Rigidez normal
$\mathbf{K}_{c_t}$	Rigidez tangencial
$L_v \mathbf{t}_T^b$	Derivada de Lie
$M_{\alpha\beta}$	Métrica na configuração inicial
$m^{\alpha\beta}$	Métrica na configuração corrente
$N^a(\boldsymbol{\eta})$	Função de forma isoparamétrica padrão
$n_{\text{mt}}$	Número de pontos de integração para a superfície de cada elemento
$\mathbf{n}_0^{(1)}(\mathbf{X})$	Normal a $\mathbf{X}$ na configuração de referência
$P$	Pressão vertical total do solo no topo do duto (pressão externa)
$P(ID)$	Força máxima de ruptura
$P'$	Pressão interna
$P_d$	Peso do solo no topo do duto
$P_l$	Cargas correspondentes às cargas da superfície
$\mathbf{P}^{(1)}(\mathbf{X}, t)$	Primeiro tensor de Piola-Kirchhoff em $\mathbf{X}$
$P_v \mathbf{t}^{(1)}$	Projeção de $\mathbf{t}^{(1)}$ no plano tangente associado
$r$	Raio médio do duto



$\mathbf{R}_c$	Vetor residual
$\mathbf{R}_c^k$	Vetor residual para o ponto $k$ da quadratura
$S$	Força de escoamento
$sf$	Fator de segurança
$t$	Espessura da parede do duto
$\mathbf{t}^{(1)}(\mathbf{X}, t)$	Força superficial de contato
$t_N(\mathbf{X}, t)$	Pressão normal de contato em $\mathbf{X}$
$\mathbf{t}_T^b(\mathbf{X}, t)$	Força superficial de atrito na base dual
$\bar{t}_t^{(i)}$	Força superficial prescrita
$\mathbf{T}_\alpha$ e $\mathbf{t}_\alpha$	Vetores tangentes (particularização das bases para o ponto $\bar{\xi}$ )
$\mathbf{T}_\alpha$	Base co-variante ou tangente
$\mathbf{T}^\beta$	Base contra-variante
$\mathbf{v}$	Normal externa a $\gamma^{(1)}$ em $\mathbf{x} = \varphi_t^{(1)}(\mathbf{X})$
$V_T(\mathbf{X}, t)$	Velocidade tangencial relativa
$\mathbf{v}_T^b(\mathbf{X}, t)$	$\mathbf{V}_T$ na base dual, na configuração corrente
$W^k$	Peso da quadratura correspondente ao ponto local da quadratura $k$
$\mathbf{X}$	Representação dos pontos de $\Gamma^{(1)}$ na configuração inicial
$\mathbf{x}$	Representação dos pontos de $\Gamma^{(1)}$ na configuração corrente
$\mathbf{Y}$	Representação dos pontos de $\Gamma^{(2)}$ na configuração inicial
$\mathbf{y}$	Representação dos pontos de $\Gamma^{(2)}$ na configuração corrente