



**Luciana Muniz Teixeira**

**Análise Numérica do Comportamento de um Oleoduto  
sujeito a movimentos de Encosta**

**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

Orientador: Celso Romanel

Rio de Janeiro, Junho de 2008



**Luciana Muniz Teixeira**

## **Análise Numérica do Comportamento de um Óleoduto Sujeito a Movimentos de Encosta**

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.

**Prof. Celso Romanel**

Orientador/Presidente

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Paulo Batista Gonçalves**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Raul Rosas e Silva**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Andréa Sell Dyminski**

UFPR

**Prof. Fernando Saboya Albuquerque Junior**

UENF

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do  
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de junho de 2008.

## Ficha Catalográfica

Teixeira, Luciana Muniz

Análise numérica do comportamento de um oleoduto sujeito a movimentos de encosta / Luciana Muniz ; orientador: Celso Romanel. – 2008.

123 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estabilidade de talude. 3. Método de elementos finitos. 4. Duto enterrado. 5. Análise 3D. I. Romael, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

À Deus, que me acompanhou em cada minuto dessa caminhada, que me concedeu  
muitas graças e me amparou nos momentos mais difíceis. O seu amor  
incondicional me presenteou com o essencial : amar-Te mais do que todas as  
coisas e tudo nos é dado por acréscimo.

## Agradecimentos

Ao Prof. Celso Romanel pela sua orientação e confiança.

À Prof. Andrea Dyminski por ter viabilizado a realização dos ensaios na UFPR.

Aos meus pais Eli e Maria da Graça que foram incansáveis durante todo esse período do doutorado, muitas vezes tendo que esperar em DEUS. Obrigada por estarem comigo sempre, não só em presença, mas em apoio e orações. Vocês me ensinaram que o que está além das nossas possibilidades é cuidadosamente resolvido por Deus, que nos criou e nos permite prosseguir.

Ao meu amor, Antonio, que apesar de ter chegado quando o “projeto doutorado” estava bem adiantado, o assumiu junto comigo para que eu chegasse até aqui. O seu incentivo e apoio, frutos do amor, traduzidos em cobranças extremamente necessárias foram cruciais para o fim desse projeto. Agora, nossos projetos são sempre em comum porque escolhemos partilhar a nossa vida com o outro, para sempre!

Aos meus queridos irmãos Leonardo e Thiago por terem sido sempre amigos. Por termos dividido muitos momentos e experiências. A nossa convivência com certeza nos fez mais unidos e comprometidos.

Aos meus primos Karlan, Roger e Pollyana, e Flávia por terem sido a minha família em Curitiba no período da realização dos ensaios.

A todos os amigos que fiz na PUC-Rio. A vocês que viveram junto comigo disciplinas, provas, trabalhos, a convivência na sala 608, o meu muito obrigado.

Às amigas que fiz na PUC-Rio e fazem parte da minha história pessoal : Nelly Rubio, Cassiane e Patrícia Vitória Vanzan. Vocês são especiais.....

Á Ir. Graça Maria pelas incansáveis orações, pelo carinho, paciência e direção.

Á Thaís Abreu, Pedro Thá, Roberta Boszczowki, e todos os colegas da UFPR que de alguma forma me auxiliaram na realização dos ensaios e nas atividades desenvolvidas.

À todos os amigos e familiares que rezaram comigo e por mim, que em muitos momentos sentiram a minha ausência. Agradeço a DEUS por vocês existirem.

Finalmente, agradeço ao Autor da vida e à intercessão de Nossa Senhora das Graças: Senhor, tu me abençoastes sempre, em cada passo, em cada decisão. Agradeço-te pela Sua Igreja, pela fé que me fortalece e pelas oportunidades de te servir. Glorificado seja o seu santo nome pois fizestes maravilhas em favor dessa vossa filha.

## Resumo

Teixeira, L. M.. **Análise Numérica do Comportamento de um Oleoduto sujeito a movimentos de Encosta**. Rio, 2008. 123p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Movimentos de terra em encostas frequentemente causam grandes prejuízos econômicos, ambientais, sociais e, com frequência, perda de vidas humanas. O mecanismo que desencadeia o processo de movimentação geralmente ocorre em períodos de chuvas intensas, principalmente nas encostas com pouca cobertura vegetal ou naquelas que sofreram mudanças recentes na topografia, geralmente pela execução de cortes. Neste trabalho foram realizadas análises de estabilidade de um trecho da encosta da BR-376, que liga as cidades de Curitiba a Joinville no km 55+800 do oleoduto OSPAR da Transpetro. Em 1995, cortes executados para duplicação da rodovia provocaram instabilidade em certa área da encosta. Em janeiro de 1997, durante um período de fortes chuvas, um novo escorregamento da porção inferior do talude provocou a ruptura do muro existente e uma série de escorregamentos sucessivos, que chegaram a atingir a faixa dos oleodutos. Diante desse cenário, utilizou-se primeiramente o programa de elementos finitos PLAXIS para as análises de estabilidade e posteriormente, a fim de comparação, o programa Slope/W e Sigma/W. Para as análises no PLAXIS foi utilizado o *hardening soil model* para o solo, com os parâmetros sendo determinados através de ensaios triaxiais com amostras obtidas de dois blocos de solo coletados das encostas. Os efeitos da movimentação da encosta no oleoduto OSPAR foram analisados por programa 3D de elementos finitos, dando-se ênfase às tensões e deformações para se a fim de verificar a integridade do duto.

### Palavras-chave

estabilidade de talude; método de elementos finitos; duto enterrado; *hardening soil model*; análise 3D

## Abstract

Teixeira, L. M.. **Numerical Analysis of the Behavior of a Pipeline Subject to mass movement.** Rio de Janeiro, 2008. 123p. D. Sc. Thesis – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In densely populated urban areas, landslides generally cause large economic, social and environmental damages as well as, quite frequently, the loss of human lives. The main triggering factor for soil slope failures is the occurrence of heavy rainfalls and the most affected slopes are those with little vegetal covering or that had suffered recent changes in topography, generally due to the execution of cuts and excavations. In this work, stability analyses of a soil slope located at km 55+800 of the Transpetro's OSPAR oil pipeline were carried out. In 1995, the works for the duplication of the BR-376 highway, connecting the cities of Curitiba and Joinville, caused some instability in certain area of the soil slope. Later, in January 1997, during a period of heavy rainfall, a new landslide near the slope toe provoked the failure of the existing retaining wall and triggered a series of successive slides that reached the protected area where the oil pipeline was buried. In order to better understand the mechanics involved in this process, numerical analyses were carried out using the computational programs Slope/W, Sigma/W and Plaxis v.8. The soil behavior was simulated considering the hard soil model, whose constitutive parameters were estimated from triaxial tests. The influence of soil movements on the OSPAR oil pipeline were investigated through a 3D finite element analysis, with emphasis on stress and strain distributions in order to check the pipeline structural integrity.

## Palavras-chave

Slope stability; finite element method; buried pipeline; *hardening soil model*; 3D analysis



# Sumário

1 Introdução	18
2 Comportamento mecânico de dutos enterrados	20
2.1. Considerações gerais sobre comportamento mecânico de dutos enterrados.	20
2.1.1. Deformações em Dutos	22
2.1.2. Mecânica dos Dutos	24
2.2. Tensões em cilindros estruturais enterrados	24
2.3. Comportamento de Dutos de Concreto Enterrados	28
2.4. Estudo experimental da influência da rigidez relativa duto-solo no momento fletor e no deslocamento vertical do duto	30
2.5. Distribuição de tensões no solo ao redor de dutos enterrados	32
2.6. Distribuição de Tensões ao longo de dutos rígidos enterrados superficialmente	34
2.7. Coeficientes de reação do solo para dutos flexíveis enterrados.	35
2.8. Restrição lateral do solo para duto enterrado	37
2.8.1. Ensaio de elemento unitário	37
2.8.2. Análise por elementos finitos	38
2.8.3. Cálculos da viga elástica	39
2.9. Previsão da restrição do solo ao duto enterrado usando elementos de interface	40
2.10. Elementos de interface para modelar a reação do solo de fundação para o projeto de duto	41
2.11. Modelagem por elementos finitos de um duto de polietileno para o sistema de coleta de resíduos de minério de cobre	44
2.12. Análise elástica de dutos enterrados sujeitos a carregamento na superfície	45
2.13. Interação solo-duto no movimento lento de encostas – Uma aplicação da análise inversa utilizando o método de elementos de contorno.	46

3 Encosta dos oleodutos OSPAR/OPASC	49
3.1. Histórico	50
3.2. Características do OSPAR e do OPASC	54
3.3. Ensaio de laboratório	55
3.3.1. Descrição dos dados pré-existent	55
3.3.2. Caracterização do material	58
3.3.2.1. Material da Encosta	58
3.3.2.2. Material da cava do duto	59
3.3.3. Ensaio de Cisalhamento Direto	60
3.3.4. Ensaio Triaxiais	62
3.3.4.1. Bloco da Encosta	64
3.3.4.2. Bloco da cava do duto	65
3.3.5. Modelo Constitutivo para o solo	67
4 Estabilidade da Encosta por MEF	71
4.1. Introdução	71
4.2. Análise da estabilidade de taludes pelo Método dos elementos finitos	73
4.2.1. Método direto utilizado - simulação de Colapso	74
4.2.2. Método indireto utilizado - equilíbrio Limite Aperfeiçoado	75
4.3. Considerações sobre o método dos elementos finitos	75
4.4. Modelagem com o programa computacional PLAXIS	79
4.4.1. Modelagem da encosta	80
4.4.2. Resultados da análise pelo PLAXIS	84
4.4.2.1. Modelo constitutivo: hardening soil model	84
4.4.2.2. Modelo de solo – Mohr Coulomb	86
4.4.3. Comparação das Análises de Estabilidade pelos programas PLAXIS e Geoslope.	88
4.4.3.1. Encosta antes da Duplicação da BR-376	89
4.4.3.2. Encosta com a escavação para a duplicação da BR-376 e contenção – cortina atirantada	90
4.4.3.3. Encosta com a contenção – cortina atirantada – na BR-376 e a jusante da plataforma do duto	92
4.4.4. Análise da encosta com duas simulações: aumento do nível do	

lençol freático e alargamento na BR-376	93
4.4.4.1. Aumento do nível do lençol freático na encosta	93
4.4.4.2. Alargamento da BR-376 em 2 metros	95
4.4.5. Redução do ângulo de atrito para determinação do $\phi$ residual do solo coluvionar.	96
4.4.5.1. Análise com $\Phi = 27.8^\circ$ no Geoslope	97
4.4.5.2. Análise com $\Phi = 27.8^\circ$ no PLAXIS	98
4.4.5.3. Análise com $\Phi = 12,9^\circ$ no Geoslope	100
4.4.5.4. Análise de $\phi = 13^\circ$ no PLAXIS	100
 5 Análise 3D do Oleoduto OSPAR	 102
5.1. Deslocamento prescrito constante ao longo de z	105
5.2. Deslocamento prescrito variável ao longo de z	110
 6 Conclusões e Sugestões	 115
6.1. Conclusões	115
6.2. Sugestões	116
 Referências Bibliográficas	 118
 Anexo 1	 122

## Lista de figuras

Figura 1 Força lateral no duto devido ao transporte e instalação (Adaptado de Watkins and Anderson, 2000)	21
O caso básico analisado é mostrado na	25
Figura 2 Análise por deformação plana (Höeg, 1968)	26
Um carregamento normal é aplicado sobre os quatro contornos ilustrados na	26
Figura 3 Esquema da caixa do ensaio experimental	31
Figura 4 Momento fletor avaliado a partir de deformações ao longo do duto sob areia. Ângulo de acamamento de 90° e 85% de compactação Proctor Normal (Shmulevich and Galili - 1986)	32
Figura 5 Momento fletor avaliado a partir de deformações ao longo do duto sob areia. Ângulo de acamamento de 120° e 97% de compactação Proctor Normal (Shmulevich and Galili - 1986)	32
Figura 6 Resultados do ensaio do elemento unitário (Ng et al, 1994)	38
Figura 7 Malha de elementos finitos 2-D (Ng et al, 1994)	39
Figura 8 Resultados previstos para a partir de uma viga elástica em um programa de fundações sob carregamento de 296 kN (Ng et al, 1994)	40
Figura 9 duto segmentado (Backer et al, 1997)	42
Figura 10 modelo de elementos finitos para um duto segmentado; os anéis possuem a mesma coordenada (Backer et al, 1997)	42
Figura 11 elemento de viga de cinco nós (Backer et al, 1997)	43
Figura 12 elemento de interface de dez nós (Backer et al)	43
Figura 13 Malha de elementos finitos típica utilizada na análise (Fernando e Carter, 1998)	46
Figura 14 Superfície de deslocamento estimada através de medidas de inclinômetros e furos de sondagem (Mandolini et al, 2001)	48
Figura 15 – Localização dos oleodutos OSPAR/OPASC	49
Figura 16 Vista da plataforma dos dutos	50
Figura 17 Forma esquemática das fendas ao longo da encosta, dentro da área da coberta por vegetação (Vasconcelos, 1997)	51

Figura 18 Esboço dos tipos de solo da encosta	51
Figura 19 Cortina atirantada feita pelo DNER na BR-372	52
Figura 20 Esboço do perfil de solo simplificado considerado nas análises de estabilidade feitas pela Geoprojetos.	56
Figura 21 Coleta do bloco da encosta na variante do GASBOL.	57
Figura 22 Coleta do bloco da cava do duto	58
Figura 23 Curva de distribuição granulométrica do material da encosta do Km 55+800 do OSPAR	59
Figura 24 Curva granulométrica do material da cava do duto	60
Figura 25 Prensa do cisalhamento (a) e caixa de ensaio (b)	61
Figura 26 Determinação de $c$ e $\phi$ para o bloco da encosta na condição submerso: (a) Tensão normal x tensão cisalhante (b) deslocamento horizontal x tensão cisalhante	61
Figura 27 Determinação de $c$ e $\phi$ para o bloco da encosta na condição não-submerso: (a) Tensão normal x tensão cisalhante (b) deslocamento horizontal x tensão cisalhante	61
Figura 28 Determinação de $c$ e $\phi$ para o bloco da encosta na condição submerso: (a) Tensão normal x tensão cisalhante (b) deslocamento horizontal x tensão cisalhante	62
Figura 29 Determinação de $c$ e $\phi$ para o bloco da encosta na condição não-submerso: (a) Tensão normal x tensão cisalhante (b) deslocamento horizontal x tensão cisalhante	62
Figura 30 Prensa Triaxial GDS	63
Figura 31 Moldagem do corpo de prova	63
Figura 32 Gráfico $\sigma_{desv}$ x $\varepsilon$ (%) do ensaio triaxial drenado para o bloco da encosta	64
Figura 33 Gráfico deformação axial x deformação volumétrica do bloco da encosta	64
Figura 34 Gráfico $p$ x $q$ do ensaio triaxial para determinação dos parâmetros $c$ e $\phi$ - bloco da encosta	65
Figura 35 Gráfico $\sigma_{desv}$ x $\varepsilon$ (%) do ensaio triaxial drenado para o bloco da cava do duto	66
Figura 36 Gráfico deformação axial x deformação volumétrica do bloco da cava do duto	66

Figura 37 Gráfico $p \times q$ do ensaio triaxial para determinação dos parâmetros $c$ e $\phi$ - bloco da cava do duto	67
Figura 38 Relação hiperbólica tensão $\times$ deformação no carregamento primário para o ensaio triaxial (Material Model Manual V8 - Plaxis - modificado)	68
Figura 39 Definição do $E_{oed}^{ref}$ a partir do resultado do ensaio oedométrico	69
Figura 40 Comparação das Curvas $\sigma_{desv} \times \epsilon(\%)$ dos ensaios e do modelo HS para o solo da encosta.	69
Figura 41 Comparação das Curvas $\sigma_{desv} \times \epsilon(\%)$ dos ensaios e do modelo HS para o solo da cava do duto.	70
Figura 42 Seção transversal da encosta onde foram feitas as análises.	83
Figura 43 Encosta com o duto	84
Figura 44 Malha de elementos finitos deformada – modelo Hardening Soil para o solo	84
Figura 45 Deslocamentos totais no final da análise – modelo Hardening Soil para o solo	85
Figura 46 Tensões totais no final da análise considerando o hardening soil model	86
Figura 47 Malha de elementos finitos deformada considerando o modelo de Mohr Coulomb.	86
Figura 48 Deslocamentos totais no final da análise considerando o modelo de Mohr Coulomb.	87
Figura 49 Tensões totais no final da análise considerando o modelo de Mohr Coulomb.	88
Figura 50 Superfície de ruptura do talude sem a escavação para a duplicação da BR-376 com fator de segurança igual a 1,160 – Programa PLAXIS	89
Figura 51 Superfície de ruptura do talude sem a escavação para a duplicação da BR-376 com fator de segurança igual a 1,174 – Slope/W	90
Figura 52 Superfície de ruptura do talude sem a escavação para a duplicação da BR-376 com fator de segurança igual a 0,726 – tensões calculadas por elementos finitos pelo Sigma/W – análise de estabilidade utilizando o Slope/W	90
Figura 53 Superfície de ruptura do talude com a escavação para a duplicação da BR-376 e os tirantes de contenção com fator de segurança igual a 1,144 – Programa PLAXIS	91

Figura 54 Superfície de ruptura do talude com a escavação para a duplicação da BR-376 e os tirantes de contenção com fator de segurança igual a 1,274 – Slope/W	91
Figura 55 Superfície de ruptura do talude com a escavação para a duplicação da BR-376 e os tirantes de contenção com fator de segurança igual a 1,194 – tensões calculadas por elementos finitos pelo SIGMA/W – análise de estabilidade utilizando o Slope/W	92
Figura 56 Superfície de ruptura do talude com tirantes de contenção na BR-376 e a jusante da plataforma do duto, com fator de segurança igual a 1,139 – Programa PLAXIS	92
Figura 57 Superfície de ruptura do talude com tirantes de contenção na BR-376 e a jusante da plataforma do duto, com fator de segurança igual a 1,278 – Slope/W	93
Figura 58 Superfície de ruptura do talude com os tirantes de contenção na BR-376 e a jusante da plataforma do duto com fator de segurança igual a 1,181 – tensões calculadas por elementos finitos pelo SIGMA/W – análise de estabilidade utilizando o Slope/W	93
deslocamento total máximo = 2,59m	94
Figura 59 Deslocamentos totais para a simulação do aumento do nível do lençol freático	94
Figura 60 Deslocamentos totais para o cálculo do fator de segurança	95
Figura 61 Deslocamento total para alargamento de 2m na BR-376	96
Figura 62 Análise no Geoslope. Superfície de ruptura definida.	97
Figura 63 Resultado da análise no Geoslope com $\phi = 27,8^\circ$ – Fator de Segurança igual a 2,044	98
Figura 64 Malha de elementos finitos para análise no PLAXIS	98
Figura 65 Deslocamento total – Análise no Plaxis – $\phi = 27.8^\circ$	99
Figura 66 Deslocamentos totais para o cálculo do fator de segurança – $\phi = 27.8^\circ$	99
Figura 67 Resultado da análise no Geoslope com $\phi = 12,9^\circ$ – Fator de Segurança igual a 0,995	100
Figura 68 Deslocamentos totais – Análise no Plaxis – $\phi = 13^\circ$	101
Figura 69 Deslocamentos totais para o cálculo do fator de segurança – $\phi = 13^\circ$	101
Figura 70 Fatia da encosta utilizada para as análises do oleoduto OSPAR	102
Figura 71 Diagrama de momento fletor para uma viga bi-engastada.	103

Figura 72 – Deslocamento prescrito constante em todo comprimento do bloco (deslocamento de corpo rígido)	104
Figura 73 – Deslocamento prescrito variável – zero para $z=0$ e $z=130$ m e máximo para $z=65$ m	104
Figura 76 malha deformada – deslocamento prescrito constante - plano da frente	106
Figura 77 Malha deformada – deslocamento prescrito constante - plano A	107
Figura 78 Deslocamento horizontal – deslocamento prescrito constante - (a) plano da frente e (b) plano A	107
Figura 79 Deslocamento vertical – deslocamento prescrito constante - (a) plano da frente e (b) plano A	108
Figura 80 Tensão total média – deslocamento prescrito constante - (a) plano da frente (b) plano A	108
Figura 81 Deslocamentos horizontais do duto – (a) plano da frente (b) plano A	109
Figura 82 Deslocamentos verticais do duto – (a) plano da frente (b) plano A	109
Figura 83 Malha deformada – deslocamento prescrito variável – plano da frente	110
Figura 84 Malha deformada – deslocamento prescrito variável – plano A	111
Figura 87 Deslocamento horizontal – deslocamento prescrito variável (a) plano da frente e (b) plano A	112
Figura 88 Deslocamento vertical – deslocamento prescrito variável - (a) plano da frente e (b) plano A	112
Figura 89 Tensão total média – deslocamento prescrito constante - (a) plano da frente (b) plano A	113
Figura 90 Deslocamentos horizontais do duto – deslocamento prescrito variável - (a) plano da frente (b) plano A	114
Figura 91 Deslocamentos verticais do duto – deslocamento prescrito variável - (a) plano da frente (b) plano A	114



## Lista de tabelas

Tabela 1 Parâmetros hiperbólicos utilizados para elementos de solo	35
Tabela 2 Dados dos oleodutos OSPAR e OPASC (Vasconcelos, 1997)	55
Tabela 3 Parâmetros do solo da encosta	56
Tabela 4 Parâmetros $c$ e $\phi$ para o solo da encosta e da cava do duto	60
Tabela 5 Propriedades dos solos	81
Tabela 6 Propriedades da Cortina Atirantada	81
Tabela 7 Propriedades dos tirantes e do bulbo de ancoragem	81
Tabela 8 Posição do lençol freático em relação à rodovia BR-376 (afastamento=0; cota = 76,5m)	82
Tabela 9 Nível do lençol freático original e proposto em relação a rodovia BR-376 (afastamento =0; cota=76,5m)	94