

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Bárbara Azevedo da Silva

**Análise de estabilidade de taludes
ao longo da rota de um duto submarino
na Bacia de Campos, RJ**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura
Arthur Ayres Neto

Rio de Janeiro
Abril de 2005



Bárbara Azevedo da Silva

**Análise de estabilidade de taludes
ao longo da rota de um duto submarino
na Bacia de Campos, RJ**

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

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura
Presidente / Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Arthur Ayres
Co-Orientador
PETROBRAS

Prof. Alberto Garcia de Figueiredo Jr.
UFF

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de abril de 2005

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

Bárbara Azevedo da Silva

Graduou-se em Engenharia Civil na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2001, mesmo ano em que ingressou no Mestrado e começou a trabalhar em empresa prestadora de serviços a Petrobras. Atuou no setor de Engenharia de Dutos e Instalações com aquisição de dados geotécnicos no mar para projetos de dutos e plataformas, programação de ensaios de laboratório e controle e manutenção de banco de dados geotécnicos. Atualmente tem seus interesses voltados para a área de análise de estabilidade de taludes submarinos.

Ficha Catalográfica

Silva, Bárbara Azevedo da

Análise de estabilidade de taludes ao longo da rota de um duto submarino na Bacia de Campos, RJ / Bárbara Azevedo da Silva ; orientadores: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura, Arthur Ayres Neto. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

117 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estabilidade de taludes. 3. Taludes submarinos. 4. Talude infinito. 5. Dutos submarinos. 6. Geofísica. I. Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. II. Ayres Neto, Arthur. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho à
Cíntia (*in memoriam*)

Agradecimentos

Agradeço ao professor Sérgio Fontoura que além de me orientar, me deu algumas dicas para encarar o mestrado com mais tranquilidade nos momentos difíceis; ao professor Alberto Sayão pelos ótimos esclarecimentos de alguns conceitos de Mecânica dos Solos. Ao meu co-orientador e colega de trabalho Arthur Ayres, porque foi através dele que escolhi o tema, por ter sido tão atencioso e paciente, e por ter tantas vezes lido e comentado o meu trabalho. Agradeço a ajuda da secretária da pós-graduação Ana Roxo em todos os processos burocráticos pelos quais tive que passar durante o mestrado.

Agradeço aos meus colegas da Petrobras que tiveram participação direta na dissertação, seja processando e interpretando dados, explicando métodos, tirando dúvidas, esclarecendo termos técnicos ou emprestando livros: a geotécnica Luciana Thomasi, os geofísicos Georgina Ocampo, Cláudio Gallea e Sérgio Ventura e Pedro Piauilino, a engenheira Priscila de Paula, os oceanógrafos Valéria Rego e Henrique Fernandes e os “duteiros” Mário Ângelo Carvalho, Alexandre Lagoa, Eduardo Florence, Cláudio Mansur e Mônica Genai. Agradeço ainda ao desenhista Marco Dias pela confecção dos desenhos e ao gerente Marcelo Teixeira por me ceder horas para que eu me dedicasse aos estudos e à dissertação. E claro, à Petrobras, por ter permitido que eu fizesse uso dos dados confidenciais aqui apresentados.

As amigas também tiveram sua participação. Agradeço à Patrícia pela indicação de alguns livros e pela pesquisa de alguns termos geológicos, e à Lu e Flavinha por ouvirem meus desabafos.

Não posso esquecer dos meus pais Bento e Penha que junto comigo chegaram até aqui. Sem eles nada disso seria possível.

Por fim, agradeço ao Edu, por ter me motivado nos tantos momentos difíceis de pesquisa e trabalho pelos quais passei.

Resumo

Bárbara Azevedo da Silva; Sérgio Augusto Barreto da Fontoura; Arthur Ayres Neto. **Análise de estabilidade de taludes ao longo da rota de um duto submarino na Bacia de Campos, RJ.** Rio de Janeiro, 2005. 117p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho são avaliadas as condições de estabilidade do subsolo marinho ao longo da rota de um duto rígido de aço revestido com concreto, de 10" de diâmetro, localizado na Bacia de Campos, RJ. Os dados geológicos e geotécnicos foram adquiridos a partir de um amplo levantamento geofísico e geotécnico realizado na diretriz do duto. Devido as adversidades à estabilidade do fundo marinho, várias análises vêm sendo realizadas de forma qualitativa e quantitativa. Atualmente, por questões ambientais e de segurança de obras de engenharia, busca-se uma avaliação mais quantitativa dos riscos geológicos associados à condição de estabilidade do fundo marinho, pois os escorregamentos de taludes representam o principal risco para estas estruturas. As análises de estabilidade foram feitas a partir da teoria do talude infinito, em metodologia aplicada por Nowacki *et al.* (2003) nos campos profundos de Mad Dog e Atlantis, no Golfo do México, e comparadas com os resultados encontrados a partir da formulação clássica do talude infinito. Uma integração de dados geotécnicos e geofísicos foi necessária, para que todos os parâmetros utilizados na metodologia pudessem ser obtidos. Os resultados indicaram dois pontos críticos ao longo da rota, ambos associados aos flancos do cânion Itapemirim, que apresentam gradientes altos. Foram realizados breves estudos com o objetivo de se avaliar a possibilidade de ocorrência de mecanismos disparadores (terremotos e ondas de tempestade) nesses pontos críticos mas os resultados descartaram esta possibilidade. Concluiu-se ainda que os dados geotécnicos utilizados neste trabalho não foram suficientes e de certo modo não apropriados para a análise de estabilidade de taludes. Uma nova campanha de ensaios geotécnicos de laboratório foi proposta para futuros estudos.

Palavras-chave

estabilidade de taludes; taludes submarinos; talude infinito; dutos submarinos; geofísica.

Abstract

Bárbara Azevedo da Silva; Sérgio Augusto Barreto da Fontoura (Advisor); Arthur Ayres Neto (Advisor). **Slope stability analysis along a submarine pipeline's route at Campos Basin, RJ.** Rio de Janeiro, 2005. 117p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research analyses stability conditions of marine sediments superficial layers of along a 10 in. diameter pipeline's route, located at Campos Basin, RJ. The geological and geotechnical data were obtained during a wide geophysical and geotechnical survey along the pipeline's route. Due to adversities to bottom stability found in the marine environment, several qualitative and quantitative stability analysis have been made. Nowadays, because of environmental and safety issues, the researches are more focused on quantitative analysis of geohazards associated with the stability condition of the sea bottom, since slope slides represent the main risk for those structures. The stability analyses were based on the infinite slope theory. The methodology applied was the same used by Nowacki *et al.* (2003) at the deep fields of Mad Dog and Atlantis, in the Gulf of Mexico. The results were compared with the results from the classical formulation of the infinite slope. An integration of geotechnical and geophysical data was necessary, in order to obtain all the parameters used in the methodology. The results indicated two critical points along the route, both associated with the flanks of the Itapemirim Canyon, which have steep slopes. Brief studies were made to evaluate the importance of triggering mechanisms (earthquakes and storm waves) at these critical points but the results discard this possibility. It was also concluded that the geotechnical data used in this research were insufficient and in a certain way not appropriate for the slope stability analysis. A new geotechnical lab tests campaign was proposed for future studies.

Key-words

slope stability; submarine slopes; infinite slope; submarine pipelines; geophysics.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Generalidades	15
1.2.	Objetivos	16
1.3.	Escopo	18
2	Revisão Bibliográfica	19
2.1.	Introdução	19
2.2.	Fatores que Influenciam na Estabilidade do Fundo Marinho	21
2.3.	Trabalhos Anteriores	23
2.3.1.	Estudos Qualitativos	23
2.3.2.	Estudos Quantitativos	24
2.4.	Rotas de Dutos: Critérios de Escolha	28
2.4.1.	Fatores que Influenciam a Escolha de uma Rota	29
2.4.2.	Estudos de Caso	32
3	Aquisição de dados, processamento e campanha de ensaios	35
3.1.	Introdução	35
3.2.	Aquisição de Dados	36
3.2.1.	Dados Existentes	36
3.2.2.	Levantamento Geofísico	36
3.2.3.	Coleta de Dados Oceanográficos	40
3.2.4.	Amostragem Geotécnica e Ensaios <i>In-situ</i>	40
3.3.	Processamento dos Dados Geofísicos	49
3.3.1.	Batimetria	49
3.3.2.	Sonar	49
3.3.3.	Sísmica	49
3.4.	Campanha de Ensaios	50
3.4.1.	Ensaios Geológicos	50
3.4.2.	Ensaios Geotécnicos	51
4	Características Geológicas e Geotécnicas da Rota	53
4.1.	Resultados dos Levantamentos Geofísicos	53

4.1.1. Batimetria	53
4.1.2. Sonar	58
4.1.3. Sísmica	64
4.2. Resultados dos Ensaio Geológicos	68
4.2.1. Descrições Geológicas	68
4.2.2. Resultados da Análise Bioestratigráfica	73
4.3. Resultados dos Ensaio Geotécnicos	75
5 Análise de Estabilidade	79
5.1. Introdução	79
5.2. Descrição do Método	80
5.2.1. Análise de estabilidade	82
5.3. Resultados	84
5.4. Discussão dos Resultados	86
6 Conclusões e recomendações para futuros trabalhos	92
7 Referências bibliográficas	94

Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa de Localização	17
Figura 2 – Gráfico ilustrativo da extensão em área <i>versus</i> número de casos de escorregamentos submarinos	20
Figura 3 – Gráfico ilustrativo da ocorrência de movimentos de massa em diferentes tipos de ambientes submarinos	20
Figura 4 – Gráfico ilustrativo da inclinação do talude <i>versus</i> número de casos de movimentos de massa	21
Figura 5 – Sistema sonográfico rebocado – “peixe”	38
Figura 6 – Posicionamento das linhas sísmicas	39
Figura 7 – Desenho Esquemático do Kullenberg	41
Figura 8 – Processo de Cravação do Kullenberg	42
Figura 9 – Controle de qualidade das amostras	44
Figura 10 – Localização das investigações geológicas e geotécnicas	46
Figura 11 – Comparação entre PCPT e Kullenberg	48
Figura 12 – Mapa batimétrico regional	54
Figura 13 – Mapa batimétrico de detalhe	55
Figura 14 – Bloco diagrama 3D do TRECHO 2	57
Figura 15 – Mapa de gradientes	58
Figura 16 – Mosaico de imagens sonográficas	59
Figura 17 – Mapa de distribuição superficial de sedimentos	60
Figura 18 – Detalhes do padrão 1 de reflexão sonográfico	61
Figura 19 – Detalhe do padrão 2 de reflexão sonográfico	62
Figura 20 – Padrão 4 de reflexão sonográfico	63
Figura 21 – Detalhe do padrão 5 de reflexão sonográfico	63
Figura 22 – Mapa de interpretação sísmica	65
Figura 23 – Refletor sísmico pouco definido abaixo do fundo marinho	64
Figura 24 – Refletores sísmicos truncados	64
Figura 25 – Camada de material oriundo do talude acima	67
Figura 26 – Padrão sísmico do talvegue do cânion Itapemirim	67
Figura 27 – Registro sísmico da quarta área	67
Figura 28 – Altos batimétricos	68
Figura 29 – Foto do testemunho KGL-1	70
Figura 30 – Foto do testemunho KGL-2	71
Figura 31 – Foto do testemunho KGL-3	72

Figura 32 – Croqui de localização dos furos K-18, K-19, K-20 e K-21	76
Figura 33 – Carta de plasticidade	78
Figura 34 – Trajetórias das partículas de água para diferentes profundidades relativas	90

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Causas dos movimentos de massa submarinos	22
Tabela 2 – Coordenadas dos pontos limites da rota	36
Tabela 3 – Análises bioestratigráficas	51
Tabela 4 – Datação do testemunho KGL-1	73
Tabela 5 – Datação do testemunho KGL-2	74
Tabela 6 – Datação do testemunho KGL-3	74
Tabela 7 – Taxas de sedimentação	75
Tabela 8 – Fatores de segurança partir da formulação clássica do talude infinito	85
Tabela 9 – Fatores de segurança por Nowacki <i>et al.</i> (2003)	86
Tabela 10 – Fatores de segurança por Nowacki <i>et al.</i> (2003)	86
Tabela 11 – Fatores de segurança por Nowacki <i>et al.</i> (2003)	86
Tabela 12 – Comparação dos resultados	88
Tabela 13 – Frequência anual e o intervalo de recorrência para terremotos na região sudeste do Brasil	90

Lista de Símbolos

a – atração = $c' / \tan \phi'$

AP – antes do presente

c' – intercepto coesivo efetivo do solo

CD – consolidado, drenado

CIU – consolidado isotropicamente, não drenado

C_v – coeficiente de adensamento

DR – densidade relativa da areia

e – recuperação da amostra

e_{\min} – índice de vazios mínimo

e_{\max} – índice de vazios máximo

FS – fator de segurança

G – massa real dos grãos do solo

H – altura vertical da camada de solo analisada

IP – índice de plasticidade

L – comprimento de onda

L_0 – comprimento de onda em águas profundas.

LDA – lâmina d'água

LL – limite de liquidez

LP – limite de plasticidade

m_b – magnitude de sismos

p – penetração do amostrador no solo

PCPT – PiezoCone Penetration Test (Ensaio de Penetração do PiezoCone)

S_u – resistência não-drenada do solo

S_u^C – resistência não drenada obtida através do ensaio triaxial convencional

S_u^{DSS} – resistência não-drenada obtida através do ensaio de cisalhamento simples (*direct simple shear*)

T – período da onda

USCS – classificação unificada dos solos

UU – não consolidado, não drenado

w – umidade natural do solo

β – ângulo de inclinação do talude

β_c – ângulo crítico de inclinação do talude

Δu – excesso de poropressão

ϕ' – ângulo de atrito interno efetivo do solo

γ' – peso específico submerso do solo

γ_{nat} ou γ – peso específico natural do solo

γ_{sat} – peso específico saturado do solo

κ – razão de anisotropia = Su^C / Su^{DSS}

σ'_{vo} – tensão efetiva vertical de campo