



Aimée Emanuel Cabral de Oliveira

**Vibração de dutos submarinos com apoio em
fundação elástica descontínua**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC – Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Deane de Mesquita Roehl

Rio de Janeiro
Abril de 2016.



Aimée Emanuel Cabral de Oliveira

**Vibração de dutos submarinos com apoio em
fundação elástica descontínua**

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^a. Deane de Mesquita Roehl

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Andreia Diniz de Almeida

Departamento de Engenharia Civil – UFF

Prof. Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de abril de 2016.

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

Aimée Emanuel Cabral de Oliveira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) no ano de 2012, com ênfase em Estruturas e Fundações. Atualmente trabalha como Engenheira Civil no Exército Brasileiro, sendo responsável pelas reformas nos PNR's (Próprio Nacional Residencial), dos militares residentes na Zona Sul.

Ficha Catalográfica

Oliveira, Aimée Emanuel Cabral de

Vibração de dutos submarinos com apoio em fundação elástica descontínua / Aimée Emanuel Cabral de Oliveira; orientadora: Deane de Mesquita Roehl. – 2016.

134 f. : il. color. ; 29,7 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Vibrações de dutos submarinos. 3. Viga sob base elástica. 4. Interação solo-estrutura. 5. Métodos numéricos. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus familiares e amigos que contribuíram na realização deste
trabalho.

Agradecimentos

A PUC - Rio e aos professores do departamento pela oportunidade.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A todos os amigos que, de uma forma ou de outra, me estimularam ou me ajudaram, ao longo desta jornada.

A Prof. Orientadora Deane Roehl, pelos ensinamentos transmitidos, paciência e incentivo para conclusão deste trabalho.

Ao meu marido, Antonio Augusto pela paciência e apoio.

A minha mãe, Sandra Regina, pelo amor, companheirismo, e conforto nos momentos difíceis.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

À PUC-Rio, pela oportunidade oferecida, instalações e aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial à Rita de Cássia, sempre presente e disposta a ajudar.

A todos que me ajudaram nesta caminhada.

Resumo

Oliveira, Aimée Emanuel Cabral de. Roehl, Deane de Mesquita. **Vibração de dutos submarinos com apoio em fundação elástica descontínua**. Rio de Janeiro, 2016. 134p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diversos acidentes envolvendo dutos submarinos já aconteceram no Brasil como o do Gasoduto PCR-01/Lubnor e o da plataforma P-55 de 2,3 km no campo de Roncador, na Bacia de Campos. Esses acidentes ocorrem em muitos casos devido à flambagem, à fadiga, ao intenso processo corrosivo, à deficiência de projeto, a falta de manutenção dos mesmos. Os dutos submarinos representam uma alta porcentagem no custo total de uma unidade de extração de petróleo. Sua importância se torna vital para a extração de petróleo em águas territoriais brasileiras. Seu projeto estrutural é uma atividade que pode ser dividida em várias etapas que devem ser seguidas à risca para garantir a conformidade do mesmo com as normas nacionais e internacionais sua operação em um dos mais inóspitos cenários da natureza: o fundo do mar. Nesta situação, o duto fica sujeito a carregamentos extremos, tanto estáticos quanto dinâmicos. Por este motivo, ele é constituído de uma estrutura de camadas bastante complexa. O objetivo deste trabalho é a avaliação das condições de operação de dutos submarinos sujeitos à ação de ondas e correntes marinhas. Um estudo paramétrico em elementos finitos é realizado para compreender a influência das condições de contorno, diferentes comprimentos de vão livre do duto submarino e variações do tipo de solo na resposta dinâmica do duto submarino. É desenvolvida também uma solução analítica para o problema. As soluções numérica, analítica e as recomendações da norma são confrontadas e tiradas conclusões sobre os principais fatores a serem considerados pelos engenheiros envolvidos na construção de estruturas deste tipo.

Palavras-chave

Vibração de dutos submarinos; Viga sob base elástica; Interação solo-estrutura; Métodos numéricos.

Abstract

Oliveira, Aimée Emanuel Cabral de. Roehl, Deane de Mesquita. (Advisor) **Vibration of submarine pipelines supported by an elastic discontinuous foundation.** Rio de Janeiro, 2016. 134p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Several accidents involving subsea pipelines have happened in Brazil as the pipeline PCR-01 / Lubnor and the P-55 platform 2.3 km in the Roncador field in the Campos Basin. These accidents occur in many cases due to buckling, fatigue, the intense corrosive process, design deficiency, lack of maintenance. The submarine pipelines represent a high percentage in the total cost of an oil extraction unit. Its importance becomes vital for the extraction of oil in Brazilian waters. Its structural design is an activity that can be divided into several steps that must be followed strictly to ensure its conformity with national and international standards operation in one of the harshest scenes of nature: the seabed. In this situation, the product is subject to extreme loads, both static and dynamic. For this reason, it consists of a complex layer structure. The objective of this study is the evaluation of the operating conditions of submarine pipelines subject to the action of waves and currents. A parametric study of finite element is performed to understand the influence of the boundary conditions, different span lengths of submarine pipeline and variations of soil type on the dynamic response of submarine pipeline. It is also developed an analytical solution to the problem. The numerical solutions, analytical and standard recommendations are compared and conclusions drawn on the main factors to be considered by the engineers involved in the construction of such structures.

Keywords

Vibration of submarine pipelines; Beam on elastic foundation Vibration; Soil-structure interaction; Numerical methods.

Sumário

1	Introdução	20
1.1.	Motivação	22
1.2.	Objetivo	22
1.3.	Estrutura da dissertação	23
2	Fenômeno de vibração induzida por vórtices	24
2.1.	Introdução	24
2.2.	Conceitos Básicos	24
2.3.	Equações do Escoamento	25
2.4.	Camada limite	27
2.5	Número de Reynolds e a Esteira de vórtices	28
2.6	Formação de vórtices	29
3	Vão livres de dutos submarinos- DNV RP F105	33
3.1	Introdução	33
3.2	Histórico	33
3.3	Filosofia e premissas	35
3.4	Critério Screening	37
3.5.	Forças Hidrodinâmicas	41
3.6	Valor da Rigidez do solo	42
4	Solução Analítica	43
4.1	Condições de Contorno	45

4.1.1. Extremidade engastada	45
4.1.2. Extremidade Apoiada	48
4.2 Análise numérica	52
4.3 Modelo	53
4.4 Condições de Contorno Aplicadas	54
4.5 Montagem dos Arquivos de dados	55
5 Estudos de caso	56
5.1. Estudo de caso 1	56
5.1.1. Dados Geométricos do modelo	56
5.1.2. Valores da rigidez do solo	57
5.1.3. Forças Atuantes no Duto Submarino	58
5.1.4. Resultados da DNV-RP-F105	58
5.1.5. Resultados da Análise Numérica	59
5.1.6. Resultados Analíticos	63
5.1.7. Resultado da Análise dos esforços	66
5.2. Estudo de caso 2	83
5.2.1. Dados Geométricos do modelo	83
5.2.2. Valores da rigidez do solo	83
5.2.3. Forças Atuantes no Duto Submarino	84
5.2.4. Resultados da DNV-RP-F105	85
5.2.5. Resultados da Análise Numérica	85
5.2.6. Resultados da Análise Analítica	88
5.2.7. Resultado da Análise dos esforços	89

6 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros	95
6.1. Conclusões	95
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	96
7 Referências Bibliográficas	97
Apêndice-A	101
Apêndice –B	118

Lista de figuras

Figura 1.1-Aplicação de dutos submarinos (Lima, 2007) [3]	20
Figura 1.2-Exemplo de vão livre de duto submarino [9]	22
Figura 2.1-Componente de tensão em um volume de controle (Carneiro, 2007) [13]	26
Figura 2.2-Comportamento do fluido dentro e fora da camada limite	27
Figura 2.3-Desprendimento de Vórtices (Lopes, 1995) [14]	30
Figura 2.4-Esteira de von Karman	31
Figura 2.5-Relação entre número de Reynolds x número de Strouhal(Carneiro,2007) [13]	32
Figura 3.1- Visão geral dos componentes envolvidos na análise de vãos livres (DNV-RP-F105,2006) [1]	34
Figura 3.2-Fluxograma da norma DNV-RP-F-105 para verificação de vão livre [1]	36
Figura 3.3-Ilustração de um modelo de duto submarino com dos ombros e do vão livre	39
Figura 4.1- Modelo representativo do duto submarino separado em partes	43
Figura 4.2-Representação do duto submarino com extremidade engastada (Oliveira, 2015)[23]	45
Figura 4.3-Representação do duto submarino com extremidade engastada (Oliveira,2015)[23]	48
Figura 4.4-Gráfico do Maple para retirar as frequências naturais do duto submarino.	52
Figura 4.5-Duto submarino bi-apoiado apoiado sobre molas	52
Figura 4.6-Duto submarino bi-engastado apoiado sobre molas	52
Figura 4.7-Elemento pipe59 do Ansys- [14]	53
Figura 4.8-Elemento combin39 do Ansys [14]	53
Figura 5.1- Forças atuantes no duto submarino	58

Figura 5.2- Modelo parametrizado adotado para análise numérica e analítica	59
Figura 5.3-Esforço cortante para argila muito fofa (K=50.000 N/m/m) para um duto bi-apoiado	67
Figura 5.4-Momento fletor para argila muito fofa (K=50.000 N/m/m) para duto bi-apoiado	68
Figura 5.5-Esforço Cortante para o para argila fofa (K=160.000 N/m/m) de um duto bi-apoiado	69
Figura 5.6-Momento Fletor para argila fofa (K=160.000 N/m/m) de um duto bi-apoiado	70
Figura 5.7-Esforço Cortante de argila rígida (K=500.000 N/m/m) de um duto bi-apoiado	71
Figura 5.8-Momento fletor de argila rígida (K=500.000 N/m/m) de um duto bi-apoiado	72
Figura 5.9-Esforço Cortante de argila muito rígida (K=2.000.000 N/m/m) de um duto bi-apoiado	73
Figura 5.10-Momento fletor de argila muito rígida (K=2.000.000 N/m/m) de um duto bi-apoiado	74
Figura 5.11-Esforço Cortante de argila muito fofa (K=50.000 N/m/m) de um duto bi-engastado	75
Figura 5.12-Momento fletor de uma argila muito fofa (K=50.000 N/m/m) de um duto bi-engastado	76
Figura 5.13-Esforço cortante de uma argila fofa (K=160.000 N/m/m) de um duto bi-engastado	77
Figura 5.14-Momento fletor de uma argila fofa (K=160.000 N/m/m) de um duto bi-engastado	78

Figura 5.15-Esforço cortante de uma argila rígida ($K=500.000$ N/m/m) de um duto bi-engastado	79
Figura 5.16-Momento fletor de uma argila rígida ($K=500.000$ N/m/m) de um duto bi-engastado	80
Figura 5.17-Esforço Cortante de uma argila muito rígida ($K=2.000.000$ N/m/m) de um duto bi-engastado	81
Figura 5.18-Momento fletor de uma argila muito rígida ($K=2.000.000$ N/m/m) de um duto bi-engastado	82
Figura 5.19-Esforço Cortante de uma Argila muito fofa ($K=50.000$ N/m/m) para um duto bi-apoiado	89
Figura 5.20-Momento Fletor de uma argila muito fofa ($K=50.000$ N/m/m) para um duto bi-apoiado	89
Figura 5.21-Esforço Cortante de uma Argila fofa ($K=160.000$ N/m/m) para um duto bi-apoiado	90
Figura 5.22-Momento Fletor de uma argila fofa ($K=160.000$ N/m/m) para um duto bi-apoiado	90
Figura 5.23-Esforço Cortante de uma Argila rígida ($K=500.000$ N/m/m) para um duto bi-apoiado	90
Figura 5.24-Momento Fletor de uma argila rígida ($K=500.000$ N/m/m) para um duto bi-apoiado	91
Figura 5.25-Esforço Cortante de uma Argila muito rígida ($K=2.000.000$ N/m/m) para um duto bi-apoiado	91
Figura 5.26-Momento Fletor de uma argila muito rígida ($K=2.000.000$ N/m/m) para um duto bi-apoiado	91
Figura 5.27-Esforço Cortante de uma Argila muito fofa ($K=50.000$ N/m/m) para um duto bi-engastado	92
Figura 5.28-Momento Fletor de uma Argila muito fofa ($K=50.000$ N/m/m) para um duto bi-engastado	92

Figura 5.29-Esforço Cortante de uma Argila fofa ($K=160.000 \text{ N/m/m}$) para um duto bi-engastado	93
Figura 5.30-Momento Fletor de uma Argila fofa ($K=160.000 \text{ N/m/m}$) para um duto bi-engastado	93
Figura 5.31-Esforço Cortante de uma Argila rígida ($K=500.000 \text{ N/m/m}$) para um duto bi-engastado	93
Figura 5-32-Momento Fletor de uma Argila rígida ($K=500.000 \text{ N/m/m}$) para um duto bi-engastado	94
Figura 5-33-Esforço Cortante de uma Argila muito rígida ($K=2.000.000 \text{ N/m/m}$) para um duto bi-engastado	94
Figura 5.34-Momento Fletor de uma Argila muito fofa ($K=2.000.000 \text{ N/m/m}$) para um duto bi-engastado	94

Lista de tabelas

Tabela 3.1-Coeficientes para as diferentes condições de contorno (DNV-RP-F-105, 2006) [11]	40
Tabela 3.2-Dados da rigidez do solo basicamente de acordo com o comprimento do vão e o tipo de solo	41
Tabela 5.1-Parâmetros do modelo para o caso 1	57
Tabela 5.2-Parâmetros do solo (DNV- RP- F-105, 2006) [1]	58
Tabela 5.3-Tabela com valores da frequência natural da análise numérica do duto bi-apoiado	60
Tabela 5.4-Tabela com valores da frequência natural da análise numérica do duto bi-engastado	61
Tabela 5.5-Tabela com resultados da análise dinâmica no tempo para duto bi-apoiado das frequências	62
Tabela 5.6-Tabela com resultados da análise dinâmica no tempo para duto bi-engastado	63
Tabela 5.7-Resultado analítico das frequências naturais para duto bi-engastado	64
Tabela 5.8-Resultados analítico das frequências naturais do duto bi-apoiado	65
Tabela 5.9-Parâmetros do modelo do caso 2	83
Tabela 5.10-Parâmetros do solo para o caso 2 (DNV- RP- F-105, 2006) [1]	84
Tabela 5.11-Resultados da análise numérica dinâmica do duto bi-engastado	85
Tabela 5.12-Resultados da análise numérica dinâmica do duto bi-apoiado	86
Tabela 5.13-Resultado da analise numérica das frequências Naturais do duto bi-apoiado	86

Tabela 5.14-Resultado numérico das frequências naturais do duto bi-engastado	87
Tabela 5.15-Resultado analítico das frequências naturais do duto bi-apoiado	88
Tabela 5.16-Resultado analítico das frequências naturais do duto bi-engastado	88

Lista de Símbolos

∇	vetor velocidade
ρ	densidade do fluido
p	pressão hidrostática
g	aceleração da gravidade
μ	viscosidade do fluido
V	velocidade do escoamento incidente
θ	ordenada angular do ponto na superfície do cilindro
U	velocidade nominal do escoamento
D	diâmetro do duto submarino
ν	viscosidade cinemática do fluido
ρ	massa específica
Re	número de Reynold
St	número de Strouhal
ω_s	frequência de desprendimento de vórtice
W_v	frequência de vibração
ω_s/ω_v	razão das frequências
UR	velocidade reduzida
A/D	amplitude adimensional
$f_{n,IL}$	frequência natural de vibração na direção do fluxo
γ_{IL}	coeficiente de segurança
L	comprimento do vão livre
$U_{c,100\text{ year}}$	velocidade de correnteza incidente no duto para um período de recorrência de 100 anos
$V_{R,onset}^{IL}$	velocidade reduzida para início das vibrações na direção do fluxo
α	parâmetro que relaciona as velocidades de fluxo de correnteza e onda
γ_{CF}	coeficiente de segurança
$U_{w,1\text{ year}}$	velocidade da onda incidente no duto para um período de recorrência de 1 ano
$V_{R,onset}^{CF}$	velocidade reduzida para vibração transversal ao fluxo
$C_1, C_2 e C_3$	coeficientes que variam em função das condições de contorno assumidas para o duto
E	módulo de elasticidade do material do duto

I	momento de inércia
CSF	fator de contribuição do concreto à rigidez
kc	constante empírica definida em função do tipo de revestimento anticorrosivo aplicado ao duto;
L_{eff}	comprimento efetivo do vão
m_e	massa efetiva por unidade de comprimento
δ	deflexão estática
q	peso submerso do duto para direção transversal ou carregamento devido ao arraste para direção <i>in-line</i>
C_6	coeficiente em função da condição de contorno do duto
S_{eff}	força axial efetiva
K	rigidez do solo
ζ_T	razão de amortecimento total
ζ_{STR}	amortecimento estrutural
ζ_{solo}	amortecimento do solo
ζ_h	amortecimento hidrodinâmico
KC	número de Keulegan-Carpenter
f_w	frequência da onda
U_w	velocidade do fluxo induzida pela onda
F_H	força horizontal no duto submarino
C_D	coeficiente de arraste
C_M	coeficiente de inércia
$U(t)$	velocidade da onda
$ U(t) $	módulo da velocidade da onda
$\frac{\partial U(t)}{\partial t}$	aceleração
C_L	coeficiente de lift
A	área da seção transversal
M	momento fletor