



Carlos Roberto Charnaux

**Influência da instalação de sapatas de
anodo sobre a flambagem de dutos
sujeitos ao enrolamento**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Prof. José Luiz de França Freire
Ivan Carlos Pimentel da Cruz

Rio de Janeiro
Março de 2008

Carlos Roberto Charnaux

**Influência da instalação de sapatas de
anodo sobre a flambagem de dutos
sujeitos ao enrolamento**

Dissertação de Mestrado

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

Prof. José Luiz de França Freire

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Ivan Carlos Pimentel da Cruz

Co-orientador

Prof. Carlos Alberto de Almeida

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

CEFET-RJ

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de março de 2008

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

Carlos Roberto Charnaux

Graduou-se em Engenharia Mecânica na PUC-Rio(Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2000. Iniciou a carreira no mesmo ano na DSND Consob S.A., empresa de instalação de dutos flexíveis e rígidos Offshore. Participou do desenvolvimento de diversos equipamentos para embarcações de instalação de dutos flexíveis. A partir de 2003, iniciou as atividades na Subsea 7 do Brasil continuando com projeto de equipamentos. Em 2005, na Subsea 7, participou do projeto do Gasoduto de Golfinho para Petrobras, iniciando sua especialização em projeto de Tubulações. Atualmente é gerente de engenharia do projeto do gasoduto Sul Capixaba.

Ficha Catalográfica

Charnaux, Carlos Roberto

Influência da instalação de sapatas de anodo sobre a flambagem de dutos sujeitos ao enrolamento / Carlos Roberto Charnaux ; orientadores: José Luiz de França Freire, Ivan Carlos Pimentel da Cruz. – 2008.

243 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Flambagem. 3. Enrolamento. 4. Dutos rígidos. 5. Deformações plásticas. 6. Abaques. 7. Sapatas de anodo. 8. Esforços de flexão. 9. Fatores concentradores de deformação. I. Freire, José Luiz de França. II. Cruz, Ivan Carlos Pimentel da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Para minha esposa Bianca,
pelo amor, carinho e compreensão.

Agradecimentos

À Bianca, o amor da minha vida, por toda a paciência, incentivo e devoção nestes anos de estudos e trabalho. Sem o seu amor, sem a sua compreensão, sem a sua força este trabalho não seria finalizado.

Ao Professor José Luiz de França Freire por dedicar muitas horas do seu tempo para me auxiliar e orientar no desenvolvimento deste trabalho, sempre com paciência e atenção primando por um trabalho de qualidade.

Ao meu pai por me orientar nas escolhas corretas, formar meu caráter e por ter me ensinado a ter compromisso com os meus objetivos.

À minha mãe por me ensinar a ter devoção e amor por tudo que eu realizo na minha vida.

Às minhas irmãs, Anna Paula e Anna Beatriz, pois sempre foram meus alicerces durante os momentos mais difíceis da minha vida.

Aos meus chefes e amigos Ivan Cruz e Peter Tanscheit, pela minha brilhante orientação profissional e pela oportunidade de realizar este mestrado.

Aos amigos da Subsea 7 e à Subsea 7 por ser uma segunda família e por todo apoio dado nesta jornada.

A engenharia do escritório da Subsea 7 de Londres por ter me dado auxílio e orientação nas questões técnicas e por me ajudar a sobrepor problemas encontrados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus avôs Charnaux e Burnier, que apesar de não estarem mais ao meu lado seguraram a minha mão e me levantaram quando estava cansado para completar com sucesso este trabalho.

Obrigado a todos vocês!

Resumo

Charnaux, Carlos Roberto; Freire, José Luiz de França. **Influência da instalação de sapatas de anodo sobre a flambagem de dutos sujeitos ao enrolamento.** Rio de Janeiro, 2008. 243p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos principais métodos de instalação offshore de dutos rígidos é o de enrolamento (“reeling”), o qual submete os dutos a esforços de flexão que ocasionam deformações plásticas. O processo de proteção catódica destas tubulações exige a instalação de uma determinada quantidade de anodos para a proteção contra corrosão. O contato dos anodos com os dutos é estabelecido através das “sapatas de anodo”. Estas geram imperfeições geométricas na espessura do duto, resultando em regiões concentradoras de deformações durante o processo de enrolamento nas embarcações de instalação. Esta dissertação propõe entender e quantificar o efeito da instalação das sapatas de anodo no que se refere à introdução das concentrações de deformações e sua influência na resistência à flambagem dos dutos durante o processo de enrolamento. O estudo das falhas estruturais por flambagem durante este processo requer a avaliação das deformações longitudinais para comparação com os critérios definidos pelas normas. Esta avaliação propõe a utilização de métodos de cálculos analíticos e numéricos. A partir do estudo desenvolvido foi possível propor um fluxograma para avaliação de dutos com sapatas de anodo. Desta forma foi possível definir um novo valor limite de deformação, caso uma análise simplificada de enrolamento não atenda os critérios propostos pelas normas. Considerando que o estudo de sapatas de anodo é apenas um exemplo para representar o problema de elementos concentradores de deformação durante o processo de enrolamento, a metodologia apresentada pode ser empregada com outros tipos de elementos anexados às tubulações, para a avaliação de falhas por flambagem.

Palavras-chave

Flambagem; enrolamento; dutos rígidos; deformações plásticas; Abaqus; sapatas de anodo; esforços de flexão; fatores concentradores de deformação.

Abstract

Charnaux, Carlos Roberto; Freire, José Luiz de França. **Influence of anode pad installation over the buckling of pipes subjected to reeling**. Rio de Janeiro, 2008. 243p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the main steel pipelines offshore installation methods is the “reeling”, which subject the pipes to bending loads that produces plastic strains. The cathodic protection process of these rigid pipelines demands the installation of a determined quantity of anodes for the corrosion protection. The anodes contact with the pipes is established through “anode pads”. These pads create geometrical imperfections at pipe wall thickness, resulting in strain concentration areas during the reeling process at installation vessels. This dissertation proposes to understand and quantify the pads installation effects with reference to the introduction of strain concentrations and its influence on the pipe buckling strength during the reeling process. The pipe buckling failure study during the reeling process requires the evaluation of longitudinal strains for the comparison with the standards defined criteria. This evaluation proposes the use of analytical and numerical calculation methods. From the developed study, it was possible to propose a flow chart for the evaluation of pipes with anode pads. From this, it was possible to define a newer strain limit value, in the event of a simplified reeling analysis is not in agreement with the standards proposed criteria. Considering that anode pads study is only one example to represent the strain concentration elements during reeling process, the herein presented methodology can be applied to other types of parts attached to the pipelines, for the evaluation of buckling failures.

Keywords

Buckling; reeling; rigid pipes; plastic strain; Abaqus; anode pads; bending stress; strain concentration factors.

Sumário

1 Introdução	26
1.1. Histórico	26
1.2. Motivação e objetivo	28
1.3. Revisão de literatura	30
1.4. Organização do trabalho	32
2 Conceitos básicos	34
2.1. Dutos rígidos	34
2.2. Materiais	38
2.3. Materiais elastoplásticos	40
2.3.1. Natureza fenomenológica da Teoria da Plasticidade	40
2.3.2. Diagrama de Tensão Deformação nominal sob tração simples	41
2.3.3. Diagrama de Tensão-Deformação verdadeiros sob tração simples	44
2.4. Embarcações do tipo PLSV	46
2.5. Processos e métodos instalação de dutos rígidos	51
2.6. Ciclo de deformações através do método de “enrolamento”	55
2.7. Anodos e sapatas de anodos (“anode pads”)	63
3 Critérios de avaliação	69
3.1. Geral	69
3.2. DNV OS-F101 – Flambagem localizada com deslocamento controlado	69
3.3. DNV OS-F101 - Ovalização	77
3.4. API RP 1111	77
3.5. Momento limite plástico – Yong Bai / Relatório SUPERB (1996)	81
4 Modelo analítico	84
4.1. Descrição geral	84
4.2. Cálculo da deformação longitudinal nominal em dutos no processo de enrolamento	85
4.3. Cálculo da mínima carga para enrolamento (“back tension”)	87
4.4. Cálculo do limite da zona elástica ao longo da seção transversal sob esforços de flexão	89

5 Avaliação dos fatores de concentração de deformação através do método de elementos finitos	95
5.1. Descrição geral	95
5.2. Método de elementos finitos	97
5.3. Propriedades dos materiais elastoplásticos	99
5.4. Validação dos critérios através do método de elementos finitos	106
5.4.1. Descrição	106
5.4.2. Modelo	106
5.4.3. Resultados – Comparação Valores Analíticos versus Método de Elementos Finitos	110
5.5. Modelo simples de enrolamento – Duto engastado 2D	119
5.5.1. Modelo	119
5.5.2. Resultados	121
5.6. Modelos simples de enrolamento – Duto engastado 3D	123
5.6.1. Modelo	123
5.6.2. Resultados	126
5.7. Modelo com sapatas de anodos – Duto engastado 3D	131
5.7.1. Modelo	131
5.7.2. Resultados	134
5.8. Modelo com sapatas de anodo e aplicação da carga para enrolamento (“back tension”)	144
5.8.1. Modelo	144
5.8.2. Resultados	145
5.9. Modelo complexo com sapatas de anodos e rotação do carretel – outra abordagem	149
5.9.1. Modelo	149
5.9.2. Resultados	152
5.10. Modelo simples para avaliação do ciclo completo - Duto engastado 2D	159
5.10.1. Modelo	159
5.10.2. Resultados	161
5.11. Modelo complexo para avaliação do ciclo completo - Duto engastado 3D	165
5.11.1. Modelo	165
5.11.2. Resultados	167
5.12. Avaliação dos efeitos de concentrações de deformação devido à	

sapata de anodo combinado com a presença de revestimento	174
5.12.1. Modelo	174
5.12.2. Resultados	177
5.13. Avaliação do critério DNV com a inclusão das sapatas de anodo no modelo de momento limite plástico	181
5.13.1. Modelo	181
5.13.2. Resultados	183
6 Conclusões	193
6.1. Retrospectiva e discussão dos resultados	193
6.2. Conclusões finais	197
7 Proposta para trabalhos futuros	199
8 Referências bibliográficas	200
9 APÊNDICE I – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem localizada utilizando a DNV OS-F101 (2000)	202
10 APÊNDICE II – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem utilizando os critérios da API RP 1111 (1999)	205
11 APÊNDICE III – Cálculo da mínima carga para enrolamento (“back tension”)	207
12 APÊNDICE IV – Cálculo do limite da zona elástica ao longo da seção de um duto sob esforços de flexão	209
13 APÊNDICE V – Resultados das análises de elementos finitos para verificação dos critérios de momento limite plástico e deformação característica	210
13.1. DE=6.625”, t=19.05mm, DE/t=8.8	210
13.2. DE=10.75”, t=25.4mm, DE/t=10.8	211
13.3. DE=12.75”, t=25.4mm, DE/t=12.8	212
13.4. DE=12.75”, t=17.5mm, DE/t=18.5	213
13.5. DE=12.75”, t=15.9mm, DE/t=20.4	214

14 APÊNDICE VI – Resultados dos modelos de sapata de anodo com duto engastado 3D	215
14.1. DE=6.625", t=19.05mm, Dsapanodo=60mm; Lsapanodo=50mm	215
14.2. DE=6.625", t=19.05mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm	216
14.3. DE=6.625", t=19.05mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=100mm	217
14.4. DE=6.625", t=19.05mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=150mm	218
14.5. DE=6.625", t=19.05mm, Dsapanodo=100mm; Lsapanodo=50mm	219
14.6. DE=10.75", t=25.4mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm	220
14.7. DE=12.75", t=25.4mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm	221
14.8. DE=12.75", t=25.4mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=100mm	222
14.9. DE=12.75", t=25.4mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=150mm	223
14.10. DE=12.75", t=25.4mm, Dsapanodo=100mm; Lsapanodo=50mm	224
14.11. DE=12.75", t=25.4mm, Dsapanodo=120mm; Lsapanodo=50mm	225
14.12. DE=10.75", t=17.5mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm	226
14.13. DE=12.75", t=17.5mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm	227
14.14. DE=12.75", t=17.5mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=100mm	228
14.15. DE=12.75", t=17.5mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=150mm	229
14.16. DE=12.75", t=17.5mm, Dsapanodo=100mm; Lsapanodo=50mm	230
14.17. DE=12.75", t=17.5mm, Dsapanodo=120mm; Lsapanodo=50mm	231
14.18. DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm	232
14.19. DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=100mm	233
14.20. DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=150mm	234
14.21. DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=100mm; Lsapanodo=50mm	235
14.22. DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=120mm; Lsapanodo=50mm	236
15 APÊNDICE VII – Cálculo analítico da deformação acumulada para um ciclo completo	237
16 APÊNDICE VIII – Resultados das análises de elementos finitos para verificação dos critérios da deformação característica com a presença da sapata de anodo	239
16.1. DE=6.625", t=19.05mm, DE/t=8.8	239
16.2. DE=10.75", t=25.4mm, DE/t=10.8	240
16.3. DE=12.75", t=25.4mm, DE/t=12.8	241
16.4. DE=10.75", t=17.5mm, DE/t=15.6	242
16.5. DE=12.75", t=15.9mm, DE/t=20.37	243

Lista de figuras

Figura 1 – Mapa da Bacia de Campos	27
Figura 2 – Projeto PDEG-B [Subsea 7]	28
Figura 3 – Linha de montagem de dutos através do processo U-O-E [Confab]	35
Figura 4 – Desenho esquemático do processo de conformação U-O-E [Kyriakides (2007)]	36
Figura 5 – Linha de montagem de dutos através do processo por Extrusão tipo “Plug Mill” [Kyriakydes (2007)]	37
Figura 6 – Linha de montagem de dutos através do processo por Extrusão tipo “Mandrel Mill” [Kyriakides (2007)]	37
Figura 7 – Gráfico típico Tensão versus Deformação para uma barra de aço usinada [Johnson (1975)]	41
Figura 8 – Gráfico típico Tensão versus Deformação para metais ou ligas [Johnson (1975)]	43
Figura 9 – Modelo tridimensional da embarcação Seven Oceans [Subsea 7]	48
Figura 10 – Posições dos equipamentos de lançamento no Seven Oceans [Subsea 7]	50
Figura 11 – Representação esquemática do método de lançamento “S-Lay” [Kyriakides (2007)]	52
Figura 12 – Representação esquemática do método de lançamento “J-Lay” [Kyriakides (2007)]	53
Figura 13 – Representação esquemática do efeito de “Lift Off”	54
Figura 14 – Desenho esquemático para convenção das posições de referência da seção de um duto	55
Figura 15 - Gráfico típico da evolução de momento aplicado em um tubo submetido à flexão	56
Figura 16 – Gráfico Tensão-Deformação típico do Ciclo de carregamento e descarregamento do método de “Enrolamento”	57
Figura 17 – Enrolamento no carretel (Trecho 0-1)	58
Figura 18 – Desenrolamento do carretel em direção ao aligner (Trecho 1-2)	59
Figura 19 – Dobramento sobre o aligner (Trecho 2-3)	59
Figura 20 – Retificação no straightener (Trecho 3-4)	60
Figura 21 – Descarregamento elástico (Trecho 4-5)	60

Figura 22 - Foto aérea da Base de Ubu pertencente a Subsea 7 no Espírito Santo	61
Figura 23 - Foto de um enrolamento típico na embarcação Skandi Navica pertencente à Subsea 7	62
Figura 24 - Foto do carretel em um enrolamento típico na embarcação Skandi Navica pertencente à Subsea 7	62
Figura 25 – Desenho esquemático das possíveis montagens de anodos	64
Figura 26 – Fotos de anodos de dutos rígidos da empresa SACOR	65
Figura 27 – Posicionamento da Sapata de Anodo sobre uma seção de duto	66
Figura 28 – Foto de uma sapata de anodo instalada no meio de uma seção de duto	66
Figura 29 – Desenho esquemático de uma sapata de anodo instalada em dutos com revestimento de pequena espessura	67
Figura 30 – Desenho esquemático de uma sapata de anodo instalada em dutos com revestimento de grande espessura	68
Figura 31 – Gráfico de “ α_{GW} ” versus a relação DE/t [Figura 12-1, DNV OS-F101 (2000)]	74
Figura 32 – Gráfico da deformação característica versus a relação DE/t	75
Figura 33 – Gráfico das deformações versus DE/t para diferentes valores de “ a_h ” na DNV (2000) e para o critério API (1999)	76
Figura 34 – Exemplo da relação do momento devido à flexão versus a curvatura em um duto	81
Figura 35 – (a) Duto antes do enrolamento (b) Duto após o enrolamento	85
Figura 36 – Desenho esquemático de duto sendo enrolado em um carretel	87
Figura 37 – (a) Modelo elástico perfeitamente elástico (b) modelo elastoplástico com endurecimento linear	90
Figura 38 – Componentes elástica e plástica de uma deformação total	91
Figura 39 – Distribuição e tensões na seção transversal de uma viga sob efeito de flexão. (a) $M=M_y$ (b) $M=M_y$ (c) $M_y < M < M_p$ (d) $M=M_p$	92
Figura 40 – Desenho esquemático da seção de um duto parcialmente plastificada	92
Figura 41 – Flambagem localizada de um duto com sapata de anodo	98
Figura 42 – Curva tensão-deformação nominal do aço API 5L X60 a partir da equação de Ramberg-Osgood	101
Figura 43 – Curva tensão-deformação nominal do Polipropileno Sólido [Bredero-Shaw]	103

Figura 44 – Curva tensão-deformação nominal do Polipropileno Sintático	104
Figura 45 – Modelo tridimensional típico da seção de duto utilizada	107
Figura 46 – Malha utilizada no modelo de elementos finitos	108
Figura 47 – Condições de contorno e carregamento utilizados no modelo	109
Figura 48 – Gráfico do Momento Crítico versus DE/t	113
Figura 49 – Gráfico dos resultados das análises de Elementos Finitos versus o critério DNV	114
Figura 50 – Gráfico do Momento aplicado versus Deformação longitudinal	115
Figura 51 – Evolução da flambagem localizada – $DE=10.75''$ e $t=17.5\text{mm}$ – Vista lateral	117
Figura 52 - Evolução da flambagem localizada – $DE=10.75''$ e $t=17.5\text{mm}$ – Vista corte	118
Figura 53 – Montagem do modelo de enrolamento simples bidimensional	119
Figura 54 – Condições de contorno e carregamentos aplicados no modelo bidimensional	120
Figura 55 – Resultado das deformações longitudinais compressivas do modelo de viga 2D	121
Figura 56 – Gráfico de resultados do modelo de viga 2D. Deformações longitudinais compressivas versus posição ao longo do duto	122
Figura 57 – Montagem do modelo de enrolamento simples tridimensional	124
Figura 58 – Malha utilizada no modelo de enrolamento simples tridimensional	124
Figura 59 – Condições de contorno e carregamento aplicados ao modelo tridimensional	125
Figura 60 - Resultado das deformações longitudinais compressivas para o modelo tridimensional – vista lateral	126
Figura 61 – Resultados das deformações longitudinais compressivas para o modelo tridimensional – vista em ângulo	127
Figura 62 - Gráfico de resultados do modelo tridimensional. Deformações longitudinais compressivas versus posição ao longo do duto	127
Figura 63 – Gráfico da distância do duto ao carretel (mm) versus comprimento do duto (mm)	129
Figura 64 – Visualização do descolamento do duto da superfície do carretel	129
Figura 65 – Limite da zona elástica na seção transversal do duto enrolado	130
Figura 66 – Variáveis utilizadas nos modelos	132
Figura 67 – Geometria da sapata de anodo no modelo de elementos finitos	133

Figura 68 – Distribuição dos tipos de malha no modelo	133
Figura 69 – Malha típica do modelo tridimensional com sapata de anodo	134
Figura 70 – Resultado das deformações longitudinais para DE= 12.75", t=17.5mm, D _{sapanodo} =80mm e L _{sapanodo} =50mm	136
Figura 71 – Resultado das deformações longitudinais para DE=12.75", t=17.5mm, D _{sapanodo} =80mm e L _{sapanodo} =50mm (região sob compressão)	136
Figura 72 – Gráfico das deformações longitudinais para DE=12.75", t=17.5mm, D _{sapanodo} =80mm e L _{sapanodo} =50mm (região 0 a 9m)	137
Figura 73 – Gráfico das deformações longitudinais para DE=12.75", t=17.5mm, D _{sapanodo} =80mm e L _{sapanodo} =50mm (região 3.5m à 5m)	137
Figura 74 – Gráfico comparativo da região da sapata de anodo para DE=12.75, t=17.5mm e L _{sapanodo} =50mm. D _{sapanodo} =80mm, 100mm e 120mm.	139
Figura 75 – Gráfico comparativo da região da sapata de anodo para DE=12.75, t=25.4mm e L _{sapanodo} =50mm. D _{sapanodo} =80mm, 100mm e 120mm.	139
Figura 76 – Gráfico SNCF versus DE/t para L _{sapanodo} =50mm	140
Figura 77 - Gráfico comparativo da região da sapata de anodo para DE=12.75, t=25.4mm e D _{sapanodo} =80mm. L _{sapanodo} =50mm, 100mm e 150mm.	141
Figura 78 - Gráfico SNCF versus DE/t para D _{sapanodo} =80mm	141
Figura 79 - Gráfico SNCF versus t/t _{sapanodo} para DE=12.75", D _{sapanodo} =80mm e L _{sapanodo} =50mm	142
Figura 80 – Gráfico geral de resultados	143
Figura 81 – Carregamento aplicado ao modelo tridimensional	144
Figura 82 – Gráfico dos resultados das análises de carga de enrolamento versus a deformação longitudinal	145
Figura 83 – Resultados das deformações longitudinais para cargas de enrolamento de 8.65t, 25t, 60t e 100t	146
Figura 84 – Resultados das deformações longitudinais para diferentes cargas de enrolamento	147
Figura 85 – Resultados das deformações longitudinais para diferentes cargas de enrolamento na seção de 3.5m até 5m	147
Figura 86 – Montagem do modelo de rotação do carretel	149
Figura 87 – Condições de contorno e carregamentos aplicados no Passo 1	151
Figura 88 – Condições de contorno e carregamento aplicados no Passo 2	151
Figura 89 – Seqüência de enrolamento do duto no modelo de rotação	

do carretel (vista lateral)	153
Figura 90 – Seqüência de enrolamento do duto no modelo de rotação do carretel (vista em ângulo)	154
Figura 91 – Resultado do modelo de rotação do carretel.	155
Figura 92 – Gráfico de deformações longitudinais do modelo de rotação do carretel	155
Figura 93 – Gráfico comparativo do modelo convencional de flexão do duto com o modelo de rotação do carretel (região de 0 a 9m)	156
Figura 94 – Gráfico comparativo do modelo convencional de flexão do duto com o modelo de rotação do carretel (região de 3.5m a 5m)	156
Figura 95 – Montagem do modelo bidimensional de ciclo completo	160
Figura 96 – Condições de contorno e carregamento do modelo bidimensional de ciclo completo	161
Figura 97 – Evolução da tensão longitudinal ao longo do ciclo completo (posição 6 e 12 horas)	162
Figura 98 – Evolução da deformação longitudinal ao longo do ciclo completo (posição 6 e 12 horas)	163
Figura 99 – Gráfico Tensão-deformação do ciclo completo (posições 6 e 12 horas)	163
Figura 100 – Montagem do modelo de ciclo completo 3D	165
Figura 101 – Malha do modelo de ciclo completo 3D	166
Figura 102 – Condições de contorno e carregamentos do modelo de ciclo completo 3D	167
Figura 103 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 1 para o modelo de ciclo completo 3D	168
Figura 104 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 2 para o modelo de ciclo completo 3D	168
Figura 105 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 3 para o modelo de ciclo completo 3D	169
Figura 106 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 4 para o modelo de ciclo completo 3D	169
Figura 107 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 5 para o modelo de ciclo completo 3D	170
Figura 108 – Posições dos nós mensurados para avaliação do ciclo completo	170
Figura 109 – Evolução da tensão longitudinal ao longo do ciclo	

completo (posição 6 e 12 horas)	171
Figura 110 – Evolução da deformação longitudinal ao longo do ciclo completo (posição 6 e 12 horas)	171
Figura 111 – Evolução da tensão – deformação longitudinal ao longo do ciclo completo (posição 6 e 12 horas)	172
Figura 112 – Montagem do modelo das análises de enrolamento com revestimento	176
Figura 113 – Condições de contorno e carregamentos das análises de enrolamento com revestimento	176
Figura 114 – Malha da análise de enrolamento com revestimento de 8mm	177
Figura 115 – Malha da análise de enrolamento com revestimento de 85mm	177
Figura 116 – Resultados da análise de enrolamento com revestimento de 8mm	178
Figura 117 – Resultados da análise de enrolamento com revestimento de 85mm	178
Figura 118 – Resultados comparativos das análises sem revestimento, com revestimento de 8mm e com revestimento de 85mm (Região 0 a 9m)	179
Figura 119 – Resultados comparativos das análises sem revestimento, com revestimento de 8mm e com revestimento de 85mm (Região 3 a 5.5m)	179
Figura 120 – Malha típica utilizada no modelo de avaliação do critério DNV (2000) com sapata de anodo	182
Figura 121 – Condições de contorno e carregamento aplicados no modelo	183
Figura 122 – Gráfico dos resultados das análises de elementos finitos versus o critério DNV (2000)	184
Figura 123 - Gráfico dos resultados das análises de elementos finitos versus o critério DNV (2000) modificado para sapatas de anodo	186
Figura 124 - Gráfico dos resultados das análises de elementos finitos versus o critério DNV (2000) modificado para sapatas de anodo com fator de ajuste de 0.9	187
Figura 125 – Gráfico Momento aplicado versus deformação longitudinal	188
Figura 126 - Evolução da flambagem localizada com sapata de anodo – DE=12.75” e t=17.5mm – Vista lateral	191
Figura 127 - Evolução da flambagem localizada com sapata de anodo – DE=12.75” e t=17.5mm – Vista corte	192

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dutos utilizados nos estudos realizados	30
Tabela 2 – Composição Típica de Aços utilizados na fabricação de dutos rígidos [Mannesmann]	38
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas típicas de aços utilizados na fabricação de dutos rígidos conforme API [Mannesmann]	39
Tabela 4 – Especificações técnicas da embarcação Seven Oceans	51
Tabela 5 – Propriedades Mecânicas de dutos API 5L [Tabela 6-3, DNV OS-F101 (2000)]	73
Tabela 6 - Fator de resistência à deformação [Tabela 5-8, DNV OS-F101 (2000)]	75
Tabela 7 – Comparação dos valores de deformação admissíveis apresentados nas normas	80
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do aço API 5L X60 [Vallourec-Mannesmann]	100
Tabela 9 – Parâmetros para a curva Ramberg-Osgood do material API 5L X60	100
Tabela 10 – Valores de tensão e deformação para o aço API 5L X60	101
Tabela 11 – Dados de entrada do ABAQUS da curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira do API 5L X60	102
Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos materiais poliméricos	103
Tabela 13 – Valores de tensão e deformação para o Polipropileno Sólido [Bredero-Shaw]	104
Tabela 14 - Valores de tensão e deformação para o Polipropileno Sintático	105
Tabela 15 – Dados de entrada do ABAQUS da curva tensão verdadeira versus deformação plástica verdadeira do Polipropileno Sólido e do Polipropileno Sintático	105
Tabela 16 – Valores calculados do Momento Crítico e Deformação Característica em função da relação DE/t	111
Tabela 17 – Resultados das análises de elementos finitos	112
Tabela 18 – Comparações percentuais das respostas analíticas com o modelo de elementos finitos	112
Tabela 19 – Resultados da análise do modelo de viga 2D	123

Tabela 20 – Resultados da análise do modelo tridimensional	128
Tabela 21 – Casos analisados	131
Tabela 22 – Resultados do modelo com sapata de anodo	135
Tabela 23 – Resultados das análises de carga de enrolamento	145
Tabela 24 – Resultados comparativos do modelo convencional de flexão do duto com o modelo de rotação do carretel	157
Tabela 25 – Tabela das deformações as 6 e às 12 horas ao longo das etapas do ciclo.	164
Tabela 26 – Resultados de deformação acumulada para seção longe da sapata de anodo (nós 863 e 1774)	172
Tabela 27 - Resultados de deformação acumulada para seção à esquerda da sapata de anodo (nós 1828 e 1886)	173
Tabela 28 - Resultados de deformação acumulada para seção à direita da sapata de anodo (nós 1938 e 1960)	173
Tabela 29 – Resultados da ovalização acumulada do duto a partir do modelo de elementos finitos segundo a DNV (2000)	174
Tabela 30 – Resultados de deformações longitudinais do modelos com revestimento	180
Tabela 31 – resultados das análises de elementos finitos	183
Tabela 32 – Resultados percentuais das respostas analíticas com o modelo de elementos finitos	184
Tabela 33 – Comparação dos valores de momento limites obtidos das análises de elementos finitos	187
Tabela 34 – Resultados das deformações admissíveis calculadas a partir dos valores das análises de elementos finitos e da deformação característica da DNV (2000)	190

Lista de abreviaturas e siglas

API	American Petroleum Institute
DNV	Det Norske Veritas
ECA	Avaliação de criticalidade de engenharia (“Engineering Criticality Assessment”)
FBE	Epóxi aderido por fusão (“Fusion Bonded Epóxi”)
FEA	Análise de Elementos Finitos (“Finite Element Analysis”)
FJC	Revestimento de junta de campo (“Field Joint Coating”)
FSO	Floating Storage and Offloading
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
NDT	Teste não destrutivo (“Non destructive test”)
PLEM	Pipeline End Manifold
PLET	Pipeline End Termination
PLSV	Pipe Laying Support Vessel
SCF	Fator de concentração de tensão (“Stress Concentration Factor”)
SMYS	Mínima Tensão de Escoamento Especificada (“Specified Minimum Yield Strength”)
SMTS	Mínima Tensão de Ruptura Especificada (“Specified Minimum Tensile Strength”)
SNCF	Fator de concentração de deformação (“Strain Concetration Factor”)

Lista de símbolos

DE	Diâmetro externo nominal do duto
DI	Diâmetro interno nominal do duto
D _{max}	Diâmetro externo máximo do duto
D _{maxtol}	Diâmetro externo na máxima tolerância de espessura de parede do duto
D _{min}	Diâmetro externo mínimo do duto
D _{car}	Diâmetro do cubo do carretel
D _{sapanodo}	Diâmetro da sapata de anodo
E	Módulo de elasticidade
E _T	Módulo tangente
F _{min}	Força mínima de tracionamento do duto
f ₂	Fator de segurança para flexão com deformações localizadas
Δp _d	Pressão de projeto ("Design pressure")
I	Momento de Inércia
k	Curvatura
L _{sapanodo}	Distância da sapata de anodo até a solda
M	Momento aplicado
M _y	Momento Elástico
M _p	Momento Plástico
yy	Altura da seção elástica
r _{car}	Raio do cubo do carretel
r _e	Raio externo do duto
r _{elast}	Raio de curvatura elástico
r _i	Raio interno do duto
r _{LN}	Raio de curvatura da Linha Neutra do duto
r _{plast}	Raio de curvatura plástico
S _y	Resistência ao escoamento
S _u	Resistência à ruptura
t	Espessura nominal da parede do duto

$t_{\min}$	Espessura mínima da parede do duto
U	Grau de liberdade de deslocamento em uma dada direção
UR	Grau de liberdade de rotação em uma dada direção
Z	Módulo de seção

Lista de caracteres gregos

α_ϵ	Fator de resistência à deformação
α_{GW}	Fator de solda circumferencial (“Girth weld factor”)
α_h	Razão entre tensão de escoamento e de ruptura (“Maximum allowable yield to tensile ratio”)
δ	Ovalização segundo norma da API (1999)
ϵ_0	Deformação no limite de escoamento
ϵ_A	Deformação devido a cargas acidentais (“Accidental strain”)
ϵ_{adm}	Deformação admissível
$\epsilon_{analitica}$	Deformação longitudinal nominal analítica
ϵ_c	Deformação característica (“Characteristic strain”)
ϵ_b	Deformação de flambagem sob flexão pura (“Buckling strain under pure bending”)
ϵ_d	Deformação de projeto (“Design strain”)
ϵ_E	Deformação devido a cargas ambientais (“Environmental strain”)
ϵ_F	Deformação devido a cargas funcionais (“Functional strain”)
ϵ_{FEA}	Deformação longitudinal nominal resultante da análise de elementos finitos
ϵ_{pl}	Deformação plástica
ϵ_{tot}	Deformação total
ϵ_v	Deformação verdadeira
ϵ_u	Deformação de ruptura
ϵ_y	Deformação elástica
σ_{max}	Tensão máxima
σ_v	Tensão verdadeira
ν	Coeficiente de Poisson
y_A	Fator de efeito de carregamento para cargas acidentais (“Load effect factor for accidental load”)
y_ϵ	Fator de resistência à deformação (“Resistance strain factor”)

- y_c Fator de condição de efeito de carga (“Condition load effect factor”)
- y_E Fator de efeito de carregamento para cargas ambientais (“Load effect factor for environmental load”)
- y_F Fator de efeito de carregamento para cargas funcionais (“Load effect factor for functional load”)