UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

EDUARDO RIBEIRO MALTA

Investigação do Comportamento Estrutural de Tubos Flexíveis sob Cargas
Compressivas

São Paulo
2016

EDUARDO RIBEIRO MALTA

**Investigação do Comportamento Estrutural de Tubos Flexíveis sob Cargas
Compressivas**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em
Ciência

São Paulo

2016

EDUARDO RIBEIRO MALTA

**Investigação do Comportamento Estrutural de Tubos Flexíveis sob Cargas
Compressivas**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em
Ciência

Área de Concentração: Engenharia
Naval e Oceânica

Orientador: Prof. Dr.
Clóvis de Arruda Martins

São Paulo
2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação da Publicação

Divisão de Bibliotecas

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Malta, Eduardo Ribeiro

Investigação do Comportamento Estrutural de Tubos Flexíveis sob Cargas Compressivas / E. R. Malta—versão corr. -- São Paulo, 2016.

264 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Tubos Flexíveis 2.Método dos Elementos Finitos 3.Estruturas *Offshore*
4.Modelo de estruturas oceânicas I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Nome: MALTA, Eduardo Ribeiro

Título: Investigação do Comportamento Estrutural de Tubos Flexíveis sob Cargas Compressivas

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciência

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Clóvis de Arruda Martins, que há quase dez anos atrás me recebeu em seu grupo de pesquisa. Orientador e amigo, cujo conhecimento e integridade serviram como exemplo para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Professor Doutor Celso Pupo Pesce, pelas ideias, pela confiança em mim, como engenheiro e pesquisador, durante os projetos em que participei sob sua supervisão. Certamente, nossas longas conversas contribuíram para esta tese.

À Petrobras e à ANP, pelo fomento deste trabalho, através do seu programa de recursos humanos. Em particular, ao PRH-19, e ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica por todo o apoio durante o doutorado.

Aos colegas de laboratório: Adson, Alessandro, Alfredo, César, Christiano, Fabiano, Fernanda, Franzini, Giória, Ivan, João, Leonardo, Lúcia, Marcos, Murilo, Nemoto, Provasi, Pedro, Reinaldo, Tanaka, Toni, Sérgio e Stergios. Amigos do passado e do presente, alguns cujo tempo de convivência foi breve, alguns que ainda estão por lá e se tornaram professores e alguns que foram para longe. Obrigado pela ajuda, pelos ensinamentos, pelas conversas e pela convivência.

Aos amigos Iury e Alan, pelo incentivo, mesmo que à distância.

À minha companheira Carla, que acompanhou o trabalho desde o início, sempre demonstrando interesse durante as minhas explicações.

Finalmente, agradeço aos meus pais, Adriana e Eduardo, pela fundação sobre a qual eu construí a minha vida e à minha irmã, Regina Célia pelo apoio. Sem eles, nada disso teria sido possível.

“A ciência, meu caro, foi construída com muitos erros; mas são erros convenientes de se cometer, pois eles levam à verdade.”

Julio Verne – Jornada ao Centro da Terra

RESUMO

MALTA, E. R. **Investigação do Comportamento Estrutural de Tubos Flexíveis sob Cargas Compressivas**. 2016. 264f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Os tubos flexíveis são amplamente utilizados na produção de petróleo *offshore*, para transporte de petróleo bruto, óleo e gás natural. Pelo fato de operarem em um ambiente muito agressivo e estarem sujeitos a diversos tipos de carregamentos como pressão interna, pressões externas, tração, compressão, flexão e torção, eles possuem uma estrutura bastante complexa composta por diversas camadas concêntricas, com finalidades estruturais diversas, que interagem entre si. Em termos de carregamento, a compressão, em especial, seja ela dinâmica ou estática representa um problema para estes tubos. Embora eles sejam projetados para suportar altas cargas de tração, por meio de armaduras metálicas helicoidais, têm resistência limitada para cargas de compressão. A presença de tais esforços pode causar falhas por instabilidade radial das armaduras de tração. Este modo de falha, conhecido há mais de duas décadas, é denominado *birdcaging*, devido à forma característica assumida pelas armaduras. Além dessa instabilidade radial, as armaduras podem sofrer uma instabilidade lateral, a qual é igualmente catastrófica para os tubos flexíveis. Este trabalho consiste em uma investigação destes modos de falha com base em modelos numéricos, usando o Método dos Elementos Finitos. Com tais ferramentas, objetiva-se estudar a mecânica dos fenômenos de instabilidade de armadura de tração, juntamente com os efeitos causados pela alteração de parâmetros construtivos e ambientais nestes modos de falha.

Palavras-chave: Instabilidade. Armadura de tração. Tubos flexíveis. Elementos finitos.

ABSTRACT

MALTA, E. R. **Investigation on the Structural Behavior of Flexible Pipes under Compressive Loads**. 2016. 264 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Flexible pipes are widely employed in *offshore* oil production. Their functions include transporting of crude oil, natural gas, chemicals and water injection. Since they operate in aggressive environments and are subjected to loads such as internal and external pressure, tension, compression, bending and torsion, these pipes are built with a complex multilayered structure. In terms of loading, compression, specially, dynamic or static, present a problem to these pipes. Their tensile armor layers are particularly designed to withstand high levels of tension, but not for compression. The presence of such loads may cause radial instability failure on the armor layers. This failure mode, known for almost three decades, is called birdcaging, due to the peculiar shape assumed by the armor tendons at the post-buckling. Besides radial instability, the tensile armor layers may also suffer from lateral instability, which is equally catastrophic in the operation of flexible pipes. This work consists on an investigation of these failure modes based on numerical models, using the Finite Element Method. With these tools, the mechanism that governs these instability phenomena can be understood, along with the effects caused by the alteration of design and environmental parameters on the failure modes.

Keywords: Instability. Tensile armor. Flexible pipes. Finite elements method.

Lista de Figuras

Figura 1-1 - <i>Riser</i> flexível conectado a uma unidade de produção flutuante (FPS).....	28
Figura 1-2 - O tubo flexível e as suas diversas camadas.	29
Figura 1-3 - Plataforma FPSO P-50 da Petrobras.	30
Figura 1-4 - Plataforma <i>Piper Alpha</i> , já perdida para as chamas.	31
Figura 1-5 - As camadas de um tubo da família "Rough Bore Reinforced".	33
Figura 1-6 - Perfil da carcaça intertravada.	33
Figura 1-7 - Perfis variados da armadura de pressão.....	35
Figura 2-1 - Os carregamentos atuantes em um trecho estático de <i>riser</i>	37
Figura 2-2 - Instabilidade radial ou <i>birdcaging</i>	39
Figura 2-3 - Instabilidade lateral.	40
Figura 3-1 - Área de contato em torno de um elemento de viga.	45
Figura 3-2 - Modelo de vigas e cascas.	46
Figura 3-3 - Modelo de sólidos e cascas de primeira ordem de Bahtui.....	47
Figura 3-4 - Modelo <i>3D/Periodic</i>	48
Figura 3-5 – Modelo <i>3D/Explicit</i>	49
Figura 3-6 - Modelo de oito camadas baseado em Cruz (1996) e Sousa (2005).....	50
Figura 3-7 - Modelo de Elementos Finitos apresentado em Cruz (1996).	51
Figura 3-8 - Modelo de um quarto de circunferência.....	53
Figura 3-9 - Modelo de carcaça de hélice.....	54
Figura 3-10 - Modelo de esmagamento da carcaça.	54
Figura 3-11 - Modelo bidimensional.	55
Figura 3-12 - Malha do modelo tridimensional axissimétrico.	56
Figura 3-13 - Modelo tridimensional de hélice.	56
Figura 3-14 - Modelo geometricamente verossímil.	57
Figura 3-15 - Modelo que usa a simplificação da armadura de pressão.....	57
Figura 3-16 - Visão geral do modelo 3D completo do núcleo estrutural.	58
Figura 3-17 - Modos de colapso "oito" (esq.) e "coração" (dir.).....	58
Figura 3-18 - Modelo de tubo sendo esmagado por uma sapata.	59
Figura 3-19 - Deslocamento radial para o modelo de esmagamento.	60
Figura 3-20 - Esquema do sistema de extração em Marlim Sul.....	61
Figura 3-21 - Esquema do mecanismo de testes em laboratório.	62

Figura 3-22 - Aspecto geral da malha do modelo em ABAQUS.....	63
Figura 3-23 - Curva de <i>speed up</i> para o ABAQUS <i>Explicit</i> e <i>Standard</i>	65
Figura 3-24 - Modelo usado para estudo de instabilidade armadura.	66
Figura 3-25 - Resultado mostrando o fenômeno do <i>birdcage</i>	67
Figura 3-26 - Offset da plataforma: a) Near b) Far c) Cross d) Trans.	71
Figura 3-27 - Aspecto geral do modelo feito no ABAQUS.....	72
Figura 3-28 - Detalhes do modelo de elementos finitos..	73
Figura 3-29 - Relações entre nos nós de cada seção do tubo do modelo.....	74
Figura 3-30 - Resultados de <i>birdcage</i> encontrados usando-se o ABAQUS.	75
Figura 3-31 - Deslocamento radial do modelo de EF (fator de escala x5). Nota-se as regiões de ocorrência de instabilidade radial.....	77
Figura 3-32 – Esquema de repetição do modelo 3D/Periodic. esq. tendão indeformado. dir. tendão deformado.....	78
Figura 3-33 - Efeito da fita na flambagem lateral da armadura..	80
Figura 4-1 - O modelo do <i>Outer Ring</i> e as suas camadas	88
Figura 4-2 - Pontos de integração ao longo da espessura do elemento.....	89
Figura 4-3 – O Kevlar® é um material próprio para uso na fita estrutural.....	90
Figura 4-4 - Esquema de contato que envolve elementos de viga.	91
Figura 4-5 - Elementos sólidos tridimensionais de primeira ordem.	92
Figura 4-6 - Superfície rígida e discretizada, com seu nó piloto.	93
Figura 4-7 - Um dos lados do modelo foi engastado (camadas externas removidas para visualização da armadura de tração)	94
Figura 4-8 - Um deslocamento foi aplicado na direção axial, enquanto os outros graus de liberdade foram restritos	95
Figura 4-9 - Curvas de energia interna (vermelha) e de energia cinética (azul/inferior) do modelo.....	97
Figura 5-1 - Curva de material para o HDPE.....	103
Figura 5-2 - Curva de material para o Kevlar®	104
Figura 5-3 - Vista isométrica do deslocamento radial da armadura	105
Figura 5-4 - Vista isométrica do deslocamento radial da armadura (a capa plástica externa foi removida para visualização).....	106
Figura 5-5 - Vista lateral do tubo (a capa plástica externa foi removida para visualização) .	106
Figura 5-6 - Vista em corte do tubo, com destaque para a deformação radial excessiva da armadura de tração	107

Figura 5-7 - Áreas destacadas para a inclusão das luvas	108
Figura 5-8 – Deslocamento radial na armadura após a adição das luvas	109
Figura 5-9 – Reação axial no engaste para todas as camadas	110
Figura 5-10 - Reação axial no engaste para a capa polimérica externa.....	110
Figura 5-11 - Reação axial no engaste para a armadura de tração interna	111
Figura 5-12 - Reação axial no engaste para a armadura de tração externa	112
Figura 5-13 - Surgimento de forças trativas na armadura superior	112
Figura 5-14 - Reação axial no engaste para ambas as armaduras de tração	113
Figura 6-1 - Deslocamento radial na capa polimérica externa, momentos antes da instabilidade	116
Figura 6-2 - Tensão de Von Mises para as armaduras de tração, momentos antes da instabilidade.....	117
Figura 6-3 - Curva de reação axial em função da deformação para o caso A1	118
Figura 6-4 - Tensão nos arames das armaduras antes do início do rearranjo	119
Figura 6-5 - Tensão nos arames das armaduras de tração logo após a carga máxima	119
Figura 6-6 - Tensão nos arames da armadura em seu arranjo final	120
Figura 6-7 - Curva de reação axial em função da deformação para o caso A2.....	121
Figura 6-8 - Distribuição de tensões na fita estrutural, pouco antes da carga máxima	122
Figura 6-9 - Tensão nas armaduras de tração imediatamente antes da carga limite	122
Figura 6-10 - Tensão nas armaduras de tração imediatamente depois da carga limite	123
Figura 6-11 - Curva de reação axial em função da deformação para o caso B1	123
Figura 6-12 - Tensão nas armaduras de tração antes do início do rearranjo	124
Figura 6-13 - Tensão nas armaduras de tração logo após o primeiro pico	125
Figura 6-14 - Distribuição de tensões dos tendões rearranjados	125
Figura 6-15 - Distribuição de tensões dos tendões no pós-flambagem	126
Figura 6-16 - Curva de reação axial em função da deformação para o caso B2	127
Figura 6-17 - Força de reação versus a deformação axial para as quatro variantes do modelo	129
Figura 7-1 - Curva de material da fita de alta resistência.....	132
Figura 7-2 - Aspecto da malha do modelo atualizado	133
Figura 7-3 - Amostra de 2 passos de armadura, pouco antes de apresentar instabilidade. Tensões em MPa.....	135
Figura 7-4 - Amostra de 2 passos de armadura, após a instabilidade. Tensões em MPa	136

Figura 7-5 - Amostra de 2 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada.....	137
Figura 7-6 - Amostra de 2 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto	138
Figura 7-7 - Amostra de 2,5 passos de armadura, pouco antes de apresentar instabilidade. Tensões em MPa	138
Figura 7-8 - Amostra de 2,5 passos de armadura, após a instabilidade. Tensões em MPa....	139
Figura 7-9 - Amostra de 2,5 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada.....	140
Figura 7-10 - Amostra de 2,5 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto	140
Figura 7-11 - Amostra de 3 passos de armadura. Instabilidade lateral na armadura de tração externa. Tensões em MPa	141
Figura 7-12 - Amostra de 3 passos de armadura. Instabilidade lateral na armadura de tração interna. Tensões em MPa	142
Figura 7-13 - Amostra de 3 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada.....	142
Figura 7-14 - Amostra de 3 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto	143
Figura 7-15 - Amostra com 3,5 passos de comprimento. Instabilidade lateral na armadura de tração interna. Tensões em MPa	144
Figura 7-16 - Amostra com 3,5 passos de comprimento. Armadura de tração externa pouco antes de apresentar instabilidade. Tensões em MPa	144
Figura 7-17 - Amostra com 3,5 passos de comprimento. Ambas armaduras de tração durante a instabilidade. Tensões em MPa.....	145
Figura 7-18 - Amostra de 3,5 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada.....	145
Figura 7-19 - Amostra de 3,5 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto	146
Figura 7-20 - Amostra com 4 passos de comprimento. Instabilidade lateral na armadura de tração externa. Tensões em MPa.....	147
Figura 7-21 – Amostra com 4 passos de comprimento. Instabilidade lateral na armadura de tração interna. Tensões em MPa	147

Figura 7-22 - Amostra de 4 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada	148
Figura 7-23 - Amostra de 4 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto.....	149
Figura 7-24 - Deformação de escoamento para cada camada em cada amostra analisada	150
Figura 7-25 - Força de reação versus deformação axial imposta para as cinco amostras	151
Figura 7-26 - Enrugamento da fita de alta resistência. Tensão de Von Mises em MPa.....	154
Figura 7-27 - Amostra com atrito 0,0, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	154
Figura 7-28 - Amostra com atrito 0,0, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	155
Figura 7-29 - Amostra com atrito 0,0, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	156
Figura 7-30 - Amostra com atrito 0,0, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	156
Figura 7-31 - Amostra com atrito 0,0. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	157
Figura 7-32 - Amostra com atrito 0,0. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	158
Figura 7-33 - Amostra com atrito 0,01, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	159
Figura 7-34 - Amostra com atrito 0,01, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	159
Figura 7-35 - Amostra com atrito 0,01, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	160
Figura 7-36 - Amostra com atrito 0,01. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	161
Figura 7-37 - Amostra com atrito 0,01. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	162
Figura 7-38 - Amostra com atrito 0,05, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	162
Figura 7-39 - Amostra com atrito 0,05, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	163

Figura 7-40 - Amostra com atrito 0,05, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	164
Figura 7-41 - Amostra com atrito 0,05. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto.....	164
Figura 7-42 - Amostra com atrito 0,05. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto.....	165
Figura 7-43 - Amostra com atrito 0,10, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	166
Figura 7-44 - Amostra com atrito 0,10, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	167
Figura 7-45 - Amostra com atrito 0,10, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	167
Figura 7-46 - Amostra com atrito 0,10. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto.....	168
Figura 7-47 - Amostra com atrito 0,10. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto.....	169
Figura 7-48 - Amostra com atrito 0,15. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto.....	170
Figura 7-49 - Amostra com atrito 0,15. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto.....	171
Figura 7-50 - Amostra com atrito 0,20. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto.....	171
Figura 7-51 - Amostra com atrito 0,20. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto.....	172
Figura 7-52 - Amostra com atrito 0,25, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa	173
Figura 7-53 - Amostra com atrito 0,25, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	173
Figura 7-54 - Amostra com atrito 0,25, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa	174
Figura 7-55 - Amostra com atrito 0,25. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto.....	175
Figura 7-56 - Amostra com atrito 0,25. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto.....	176

Figura 7-57 - Efeito do coeficiente de atrito na carga crítica	177
Figura 7-58 - Gráficos de comparação para o escoamento das camadas	178
Figura 7-59 - Comparação da força de reação versus deformação imposta para todos os modelos.....	180
Figura 7-60 - Defeito na capa externa e na fita de alta resistência causado durante o lançamento.....	182
Figura 7-61 - Janela retangular na capa polimérica externa.....	183
Figura 7-62 - Geometria final do rasgo na capa externa	183
Figura 7-63 - Amostra com rasgo de 20 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa	185
Figura 7-64 - Amostra com rasgo de 20 mm, concentração de tensões ao redor do rasgo. Tensão de Von Mises em MPa.....	186
Figura 7-65 - Amostra com rasgo de 20 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	186
Figura 7-66 - Amostra com rasgo de 20 mm, no final da simulação (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa	187
Figura 7-67 - Amostra com rasgo de 20 mm, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	187
Figura 7-68 - Amostra com rasgo de 20 mm, no final da simulação (capa externa). Deslocamento radial em mm	188
Figura 7-69 - Amostra com rasgo de 20 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	189
Figura 7-70 - Amostra com rasgo de 20 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	190
Figura 7-71 - Amostra com rasgo de 50 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	190
Figura 7-72 - Amostra com rasgo de 50 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	191
Figura 7-73 - Amostra com rasgo de 50 mm, no final da simulação (armadura externa). Deslocamento radial em mm	192
Figura 7-74 - Amostra com rasgo de 50 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	192
Figura 7-75 - Amostra com rasgo de 50 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	193

Figura 7-76 - Amostra com rasgo de 125 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	194
Figura 7-77 - Amostra com rasgo de 125 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	194
Figura 7-78 - Amostra com rasgo de 125 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm	195
Figura 7-79 - Amostra com rasgo de 125 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	196
Figura 7-80- Amostra com rasgo de 125 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	197
Figura 7-81 - Amostra com rasgo de 150 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	197
Figura 7-82 - Amostra com rasgo de 150 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	198
Figura 7-83 - Amostra com rasgo de 150 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm	199
Figura 7-84 - Amostra com rasgo de 150 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	199
Figura 7-85 - Amostra com rasgo de 150 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	200
Figura 7-86 - Amostra com rasgo de 165 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	201
Figura 7-87 - Amostra com rasgo de 165 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	201
Figura 7-88 - Amostra com rasgo de 165 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm	202
Figura 7-89 - Amostra com rasgo de 165 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	203
Figura 7-90 - Amostra com rasgo de 165 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	203
Figura 7-91 - Amostra com rasgo de 200 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	204
Figura 7-92 - Amostra com rasgo de 200 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	205

Figura 7-93 - Amostra com rasgo de 200 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm.....	205
Figura 7-94 - Amostra com rasgo de 200 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	206
Figura 7-95 - Amostra com rasgo de 200 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	207
Figura 7-96 - Amostra com rasgo de 300 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	207
Figura 7-97 - Amostra com rasgo de 300 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	208
Figura 7-98 - Amostra com rasgo de 300 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm.....	209
Figura 7-99 - Amostra com rasgo de 300 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	209
Figura 7-100 - Amostra com rasgo de 300 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	210
Figura 7-101 - Efeito do rasgo na carga crítica	212
Figura 7-102 - Gráficos de comparação para o escoamento das camadas	214
Figura 7-103 - Comparação da força de reação versus deformação imposta para todos os modelos.....	215
Figura 7-104 - Dano às camadas externas de um tubo flexível causado pelo contato com por um <i>bend stiffener</i>	217
Figura 7-105 – Geometria do rasgo na fita de alta resistência	218
Figura 7-106 - Amostra com rasgo de 20 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa	219
Figura 7-107 - Amostra com rasgo de 20 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	220
Figura 7-108 - Amostra com rasgo de 20 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	221
Figura 7-109 - Amostra com rasgo de 20 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	222
Figura 7-110 - Amostra com rasgo de 20 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	223

Figura 7-111 - Amostra com rasgo de 50 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa.....	223
Figura 7-112 - Amostra com rasgo de 50 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	224
Figura 7-113 - Amostra com rasgo de 50 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	225
Figura 7-114 - Amostra com rasgo de 50 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto.....	226
Figura 7-115 - Amostra com rasgo de 50 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto.....	227
Figura 7-116 - Amostra com rasgo de 100 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa.....	227
Figura 7-117 - Amostra com rasgo de 100 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	228
Figura 7-118 - Amostra com rasgo de 50 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	229
Figura 7-119 - Amostra com rasgo de 100 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto.....	229
Figura 7-120 - Amostra com rasgo de 100 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto.....	230
Figura 7-121 - Amostra com rasgo de 200 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa.....	231
Figura 7-122 - Amostra com rasgo de 200 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	231
Figura 7-123 - Amostra com rasgo de 200 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	232
Figura 7-124 - Amostra com rasgo de 200 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto.....	233
Figura 7-125 - Amostra com rasgo de 200 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto.....	234
Figura 7-126 - Amostra com rasgo de 400 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa.....	234
Figura 7-127 - Amostra com rasgo de 400 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa.....	235

Figura 7-128 - Amostra com rasgo de 400 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa	236
Figura 7-129 - Amostra com rasgo de 400 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	237
Figura 7-130 - Amostra com rasgo de 400 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	238
Figura 7-131 - Amostra com rasgo de 1000 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa	238
Figura 7-132 - Amostra com rasgo de 1000 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	239
Figura 7-133 - Amostra com rasgo de 1000 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	240
Figura 7-134- Amostra com rasgo de 1000 mm, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	240
Figura 7-135 - Amostra com rasgo de 1000 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	241
Figura 7-136 - Amostra com rasgo de 1000 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	242
Figura 7-137 - Amostra com rasgo de 2000 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa	242
Figura 7-138 - Amostra com rasgo de 2000 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa	243
Figura 7-139 - Amostra com rasgo de 2000 mm, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa.....	244
Figura 7-140 - Amostra com rasgo de 2000 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto	245
Figura 7-141 - Amostra com rasgo de 2000 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto	246
Figura 7-142 - Efeito do rasgo na carga crítica	247
Figura 7-143 - Gráficos de comparação para o escoamento das camadas	249
Figura 7-144 - Comparação da força de reação versus deformação imposta para todos os modelos.....	251
Figura 8-1 - Primeiro modelo, utilizado no estudo do contato entre vigas e sólidos.....	254

Lista de Tabelas

Tabela 4-1 - Velocidade de propagação da onda elástica	98
Tabela 5-1 - Propriedades geométricas do tubo (parte 1)	102
Tabela 5-2 - Propriedades geométricas do tubo (parte 2)	102
Tabela 5-3 - Propriedades gerais dos materiais	103
Tabela 5-4 - Comparação de rigidez axial de vários modelos	104
Tabela 6-1 – Casos selecionados para os testes preliminares	115
Tabela 6-2 - Comparação de resultados	127
Tabela 7-1 - Propriedades geométricas das camadas	131
Tabela 7-2 - Propriedades dos materiais do tubo	131
Tabela 7-3 - Casos para o estudo do comprimento da amostra	134
Tabela 7-4 - Comparação de resultados	149
Tabela 7-5 - Resultados de escoamento para as diferentes camadas	150
Tabela 7-6 – Casos para estudo do efeito do atrito	153
Tabela 7-7 – Comparação de resultados	176
Tabela 7-8 - Resultados de escoamento para as diferentes camadas	178
Tabela 7-9- Casos para o estudo do efeito do rasgo	184
Tabela 7-10 - Comparação dos resultados	211
Tabela 7-11 - Resultados de escoamento para as diferentes camadas	213
Tabela 7-12- Casos para o estudo do efeito do rasgo	218
Tabela 7-13 - Comparação de resultados	247
Tabela 7-14 – Resultados de escoamento para as diferentes camadas	248

Sumário

1	Introdução	27
1.1	O Tubo Flexível	27
1.2	Projeto, Verificação e Segurança	30
1.3	A Estrutura do Tubo Flexível	32
1.3.1	Carcaça Intertravada	33
1.3.2	Camada Polimérica Interna	34
1.3.3	Armadura de Pressão	34
1.3.4	Armadura de Tração	35
1.3.5	Camada Polimérica Externa	36
1.3.6	Fitas Anti-Desgaste	36
1.3.7	Fitas Estruturais	36
2	Instabilidade de Armadura de Tração	37
2.1	O Surgimento de Cargas Compressivas.....	37
2.2	Instabilidade Radial e Lateral	38
3	Revisão Bibliográfica.....	43
3.1	Comentários	43
3.2	Os Modelos “Completos”	44
3.3	Modelos Específicos	52
3.3.1	Núcleo estrutural.....	52
3.3.2	Armadura de tração, instabilidade e camadas mais externas.....	60
3.3.3	Modelos Analíticos.....	78
4	O Modelo de Elementos Finitos.....	85
4.1	O <i>software</i> Abaqus.....	85
4.2	O uso de <i>Scripts</i> em <i>Python</i>	86
4.3	Primeira versão do modelo do <i>Outer Ring</i>	88

4.3.1	Capa Polimérica Externa.....	89
4.3.2	Fita Estrutural de Alta Resistência.....	89
4.3.3	Armaduras de tração (Interna e Externa)	90
4.3.4	Núcleo Rígido	93
4.3.5	Condições de Contorno, Carregamentos e Contatos.....	93
4.4	Simulação Explícita e Efeitos Dinâmicos	95
5	Testes do Modelo e Primeiros Resultados.....	101
5.1	Descrição do Tubo Utilizado.....	101
5.2	Primeiros Resultados	105
5.3	Acréscimo da “Luva”	107
5.4	Acomodação Inicial das Camadas.....	109
6	Estudo Paramétrico Preliminar.....	115
6.1	Resultados com Atrito e sem Fita Estrutural.....	116
6.2	Resultados sem Atrito e sem Fita Estrutural	118
6.3	Resultados com Atrito e com Fita Estrutural	121
6.4	Resultados sem Atrito e com Fita Estrutural.....	124
6.5	Comentários sobre os Testes Preliminares	127
7	Análises paramétricas com o modelo completo.....	131
7.1	Novas Propriedades do Tubo	131
7.2	Testes com Comprimento de Amostra	133
7.2.1	Descrição do Ensaio.....	133
7.2.2	Resultados	134
7.2.3	Comparação dos Resultados	149
7.3	Análises paramétrica com o Coeficiente de Atrito.....	152
7.3.1	Descrição do Ensaio.....	152
7.3.2	Resultados	154
7.3.3	Comparação dos Resultados	176

7.4	Análises com o rasgo na capa polimérica	180
7.4.1	Descrição do Ensaio	182
7.4.2	Resultados.....	184
7.4.3	Comparação dos Resultados	210
7.5	Análises com o rasgo na fita de alta resistência.....	216
7.5.1	Descrição do Ensaio	217
7.5.2	Resultados.....	219
7.5.3	Comparação dos Resultados	246
8	Comentários Finais.....	253
8.1	Sobre o Modelo.....	254
8.2	Sobre as Análises Paramétricas	255
9	Bibliografia.....	259

1 Introdução

1.1 O Tubo Flexível

Tubos flexíveis são longas mangueiras formadas por várias camadas que possibilitam o transporte de fluidos como o petróleo bruto, óleo e gás. A principal característica que os define é o fato de apresentarem grande rigidez axial e baixa rigidez flexional. São muito utilizados em águas profundas, na forma de *risers* (trecho suspenso) e *flowlines* (trecho apoiado no solo), como na Figura 1-1. Mais especificamente, estes tubos podem ser utilizados, segundo a *API* (*American Petroleum Institute*) com a finalidade de:

1. Produção – petróleo, gás, condensados e água;
2. Injeção – água, gás e produtos químicos para o poço;
3. Exportação – petróleo semi-processado e gás;
4. Serviços – produtos químicos de topo de poço e fluidos de controle.

Figura 1-1 - *Riser* flexível conectado a uma unidade de produção flutuante (FPS). Extraído de: API Specification 17J.

Estruturalmente, o tubo flexível deve ser capaz de suportar os esforços oriundos do ambiente hostil onde ele está inserido. Os esforços vão desde cargas estáticas, que podem ser o peso próprio do tubo ou a pressão da coluna de água sob a qual o mesmo está inserido, a cargas dinâmicas resultantes de correntes marítimas e movimento da unidade flutuante. Além disso, o tubo deve ser capaz de resistir à corrosão marítima, reações químicas com o fluido no seu interior e mudanças de temperaturas. Por esse motivo, ele é formado por diversas camadas de materiais e geometrias diferentes (Figura 1-2). A quantidade e o tipo de tais camadas variam conforme o tipo de tubo.

Figura 1-2 - O tubo flexível a as suas diversas camadas. Extraído de: Kable 2013

O custo unitário de um tubo flexível atinge valores da ordem de US\$ 2.000,00 por metro. Estes tubos podem se estender a profundidades que variam de poucas dezenas a milhares de metros. Em uma plataforma (Figura 1-3) operando acima dos 1000 m de coluna de água, chega a se usar algumas dezenas de milhares de metros de tubos flexíveis. Estes ligam a unidade flutuante às diversas saídas de poço espalhadas no fundo do mar. A quantidade e o tipo de tubos flexíveis usados em uma determinada instalação dependem da profundidade, do local de operação, da plataforma empregada e de requisitos de segurança do operador. Para cada tipo de aplicação, o tubo projetado deve passar por um processo de qualificação para se tornar um produto de catálogo.

Figura 1-3 - Plataforma FPSO P-50 da Petrobras. Extraído de: UOL 2013

O projeto de tais componentes deve ser feito com extrema cautela e alta eficiência. Para um fabricante desses tubos, o preço final para uma determinada instalação depende muito do custo de projeto de cada um deles. Desta forma, o fabricante que possui boas ferramentas de projeto tem grandes chances de vencer uma licitação e conquistar parcelas cada vez maiores de mercado. Além disso, a aplicação de tubos flexíveis para profundidades superiores a 2000 metros não é consagrada. Para a exploração integral de regiões como a Bacia de Santos, é necessária uma tecnologia superior, baseada em novas concepções de tubos.

1.2 Projeto, Verificação e Segurança

A terceira edição da norma API 17B (*American Petroleum Institute*, 2002) lista 87 possíveis modos de falha para tubos flexíveis. Cada camada do tubo está sujeita a seus próprios defeitos, sejam eles de fabricação ou resultantes de ocorrências durante operação. Por outro lado, as consequências que a falha em componentes de um sistema de extração de petróleo *offshore* podem ser catastróficas, tanto em termos de danos ambientais, quanto em perda de vidas humanas. Um exemplo que pode ser mencionado é o acidente com a

plataforma Piper Alpha, no Mar do Norte (Figura 1-4). Em 1988, uma série de eventos desastrosos, incluindo a falha em *risers* de transporte de gás, levou a uma sequência de explosões, causando a morte de 168 pessoas e danos materiais da ordem de £ 1,7 bilhões.

Figura 1-4 - Plataforma *Piper Alpha*, já perdida para as chamas. Extraído de: BBC 2013

Apesar do fato de que acidentes deste tipo sejam atribuídos a inúmeros fatores, incluindo falhas de manutenção e erro humano, é importante ressaltar a importância do projeto à prova de falhas de todos os componentes envolvidos em atividades de prospecção de petróleo e gás *offshore*. A minimização de qualquer tipo de falha em todos os componentes pode evitar grandes acidentes. O uso de ferramentas numéricas entraria na fase de verificação do projeto, como complemento a ensaios de laboratório. Apesar de terem um custo associado ao seu uso, tais ferramentas tornam testes com protótipos mais acessíveis. Uma vez que se tem um modelo funcional e validado, este pode, com segurança, representar um tubo nos mais variados cenários de falha. Este trabalho visa contribuir com o estado da arte no que tange a modelagem de modos de falha em tubos flexíveis.

1.3 A Estrutura do Tubo Flexível

O tubo flexível tem como características principais o fato de apresentar baixa rigidez à flexão e alta rigidez axial. Além disso, o mesmo deve ser capaz de suportar altas pressões, impactos estruturais, o peso próprio e esforços dinâmicos extremos, tudo isso mantendo uma boa vedação do fluido interno e tendo uma vida útil esperada em torno de vinte anos. Todas estas características são possíveis graças à combinação das camadas que compõem um tubo flexível.

O modelo de tubo mais usual, e que será adotado nesta tese, é o de um tubo classificado segundo a norma *API* como “*Rough Bore Reinforced*”. A configuração escolhida (Figura 1-5) apresenta sete tipos de camadas principais que serão explicadas em mais detalhes logo em seguida:

- Carcaça Intertravada;
- Camada Polimérica Interna;
- Armadura de Pressão;
- Armadura de Tração;
- Camada Polimérica Externa;
- Fitas antidesgaste;
- Fitas estruturais.

Figura 1-5 - As camadas de um tubo da família "Rough Bore Reinforced". Extraído de: API Recommended 17B.

1.3.1 Carcaça Intertravada

Iniciando a descrição das camadas de dentro para fora do tubo, a primeira camada encontrada é a carcaça intertravada. Esta se constitui de uma hélice com um perfil semelhante ao apresentado na Figura 1-6. Este perfil varia conforme o fabricante, mas sempre mantém o mesmo aspecto característico.

Figura 1-6 - Perfil da carcaça intertravada. Extraído de: API Recommended 17B.

A função principal desta camada é a de proteger o tubo da pressão externa à qual está submetido, prevenindo seu colapso, para garantir o escoamento interno. A sua forma peculiar permite um deslocamento axial em relação a outras camadas do tubo inclusive, possibilitando a flexão. Quando a camada polimérica externa é avariada e o anular é inundado, a carcaça se torna fundamental para prevenir o colapso molhado do tubo.

A carcaça intertravada está em constante contato com o fluido que nela escoar. O seu material deve ser inerte, ou seja, deve estar preparado para resistir a agentes agressivos contidos no fluido circulando em seu interior. Além disso, a carcaça deve suportar o desgaste causado pelo deslocamento de sondas de inspeção (*pigs*) e ferramentas.

1.3.2 Camada Polimérica Interna

Seguindo a ordem da descrição das camadas do tubo, a camada seguinte é a camada polimérica interna. Em termos de aspecto construtivo, esta camada é mais simples do que as camadas metálicas: Esta possui uma forma de capa que recobre a carcaça por toda a sua extensão. Essa capa polimérica é adicionada ao tubo através de extrusão direta possuindo uma forte aderência à carcaça.

A função desta camada é de vedação, ou seja, ela garante a integridade do escoamento em seu interior evitando o seu contato com o meio externo. Em termos de material, a mesma deve se formada por um polímero capaz de suportar a pressão interna do fluido que escoar no interior do tubo. Ao mesmo tempo, ela deve possuir certa elasticidade axial para se deslocar juntamente com a carcaça sem que haja descolamento relativo.

1.3.3 Armadura de Pressão

Juntamente com a carcaça intertravada, a armadura de pressão tem como função resistir ao colapso do tubo. Também colabora na resistência à pressão interna do fluido no interior do tubo. Além disso, durante a fase de lançamento e instalação do tubo, as camadas sofrem um esmagamento resultante da ação das sapatas da lagarta durante a passagem pelo tensionador. Essa força de esmagamento deve ser suportada conjuntamente pela armadura de pressão e pela carcaça intertravada. A armadura de pressão também colabora na resistência ao estrangulamento causado pela tração das armaduras (*squeezing*). Sua forma possui o mesmo princípio da carcaça intertravada: o enrolamento em hélice de perfis como os da Figura 1-7. Diferentemente da carcaça (que é dobrado), o perfil da armadura de pressão é trefilado.

Com relação ao material da armadura de pressão, as características devem ser as mesmas do material da carcaça, exceto pelo fato de que o material não precisa resistir ao desgaste causado pela circulação de sondas em seu interior. Ela estará sujeita a um ambiente agressivo causado pela permeação de gases pela camada polimérica interna (*gas permeation*).

Figura 1-7 - Perfis variados da armadura de pressão. Extraído de: *API Recommended 17B*.

1.3.4 Armadura de Tração

A armadura de tração pode ser formada por duas ou quatro camadas de arames com perfil aproximadamente retangular ou circular. Essas camadas são cruzadas entre si, ou seja, se uma delas é inserida no sentido horário, a outra é inserida no sentido anti-horário, para balancear a resposta do tubo ao momento de torção. O ângulo de cruzamento entre as camadas varia conforme o tipo de tubo entre 20 e 55°. Se no tubo em questão houver uma armadura de pressão, o ângulo pode ser mais fechado, mais próximo de 20°. Dessa maneira, a camada irá resistir preferencialmente a esforços axiais. Caso não haja uma armadura de pressão, o ângulo deve ser mais próximo de 55° para que a armadura resista tanto a esforços no sentido axial quanto no sentido radial.

Sua função é, basicamente, como o nome já diz a de resistir à tração no tubo, ou seja, carregamentos axiais oriundos do peso próprio do tubo (com fluido no seu interior ou não) e dos movimentos causados por correntes marítimas e movimentos de topo. No caso deste trabalho, esta camada irá assumir uma importância fundamental, visto que é nela que surgem os fenômenos de instabilidade, oriundos da compressão.

1.3.5 Camada Polimérica Externa

A camada polimérica externa é semelhante à camada polimérica interna em termos de fabricação. A mesma também é extrudada sobre a camada imediatamente abaixo. Ela possui a forma simples de tubo, por isso também é chamada de “capa plástica”.

Suas funções principais são duas: a de vedação, ou seja, ela deve proteger a integridade dos componentes do interior do tubo ao ambiente externo e a de confinar a armadura de tração, provendo rigidez radial ao conjunto, de forma a colaborar para evitar instabilidade radial (*birdcaging*, que será mais bem explicado no capítulo 2). Além disso, ela estará em contato com o ambiente terrestre durante estocagem e transporte. Em termos de material, o polímero escolhido deve ser capaz de resistir a um meio bastante agressivo, abrasão, choques mecânicos e ainda garantir a integridade do seu conteúdo.

1.3.6 Fitas Anti-Desgaste

As fitas antidesgaste são colocadas entre pares de camadas. Sua função é a de reduzir o coeficiente de atrito entre pares metálicos. Outra aplicação é a de evitar a extrusão de camadas poliméricas nos interstícios das camadas metálicas. Geralmente, estas camadas podem ser encontradas entre as armaduras de tração e entre a armadura de pressão e a primeira camada de tração, em um tubo *rough bore reinforced*.

1.3.7 Fitas Estruturais

Existem fitas que são enroladas em torno da armadura de tração para aumentar a rigidez radial do conjunto, garantindo uma maior estabilidade estrutural das mesmas. O uso de tais fitas ajuda a proteger as armaduras contra o fenômeno do *birdcaging*. A sua espessura é relativamente pequena em relação às outras camadas. Essas fitas são feitas de um material com alta resistência à tração (Kevlar®, por exemplo) e são enroladas helicoidalmente sobre a armadura de tração mais externa.

2 Instabilidade de Armadura de Tração

2.1 O Surgimento de Cargas Compressivas

Cada camada de um tubo flexível é projetada para atender a um requisito específico. A armadura de tração é a principal responsável por suportar carregamentos axiais, como o peso próprio e as forças que surgem no lançamento do tubo. Todavia, a disposição desta camada em arames independentes enrolados em torno do núcleo estrutural, a torna suscetível a cargas compressivas, que estão associadas a problemas de instabilidade. Estas cargas podem surgir devido a diversos fatores.

Os movimentos da plataforma (em particular, o movimento de *heave*) podem causar forças compressivas dinâmicas no tubo. Neste caso, seriam especialmente afetadas as extremidades do tubo, tanto aquela conectada com a plataforma, quanto à ancorada na saída do poço. Estaticamente, a compressão também pode surgir no tubo, porém, o surgimento de tais forças compressivas deve ser explicado usando-se o conceito de tração efetiva. Gay Neto (2011), em sua tese, traz uma explicação detalhada sobre o conceito de tração efetiva. Em um exemplo, pode-se demonstrar em como ela pode resultar em uma compressão.

Em um trecho de um *riser* imerso em uma determinada profundidade, atuam a pressão (interna e externa) e o peso próprio. A Figura 2-1 mostra o carregamento atuante em uma seção de *riser* sendo dividido em duas partes.

Figura 2-1 - Os carregamentos atuantes em um trecho estático de *riser*. Extraído de: Gay Neto (2011)

A primeira parte equivale ao empuxo na seção (oriundo da pressão hidrostática). A segunda parte, por sua vez representa um conjunto de forças que surgem em sentido oposto à pressão atuante, mas com valor equivalente. Estas forças são necessárias para que o equilíbrio do sistema mecânico seja respeitado (visto que o tubo originalmente não possui as tampas) e definem a tração atuante na seção para um valor conhecido como tração efetiva, que pode ser descrito pela equação:

$$T_{ef}(s) = T(s) + p(z)\pi r^2 \quad (2.1)$$

Neste caso, T_{ef} é a tração efetiva para uma determinada seção s , T é uma tração solicitante atuante na seção, $p(z)$ é a pressão hidrostática da cota em que se situa a seção e πr^2 seria a área da “tampa” que fecha as extremidades da seção.

Caso a pressão interna seja acrescentada na equação, a mesma vai equilibrar a pressão hidrostática. Sendo assim, a equação 1.1 fica da seguinte forma:

$$T_{ef}(s) = T(s) + p(z)\pi r^2 - p_i(z)\pi r^2 \quad (2.2)$$

Nota-se que a pressão interna p_i entra na equação com um sinal oposto dos outros. Caso o tubo esteja em uma situação em que a pressão interna seja maior do que a soma da tração atuante e da pressão hidrostática, irá surgir uma “compressão efetiva”. Esta compressão muitas vezes é referida na literatura como “efeito de *endcap*”.

2.2 Instabilidade Radial e Lateral

A instabilidade na armadura de tração surge devido a cargas compressivas, sejam elas de natureza dinâmica ou estática, conforme discutido anteriormente. Este modo de falha pode ocorrer de duas formas distintas: radial ou lateral.

A instabilidade radial é um fenômeno conhecido há quase três décadas, inicialmente como “efeito de *endcap* reverso”. A sua forma característica lhe valeu o nome de *birdcage* ou “gaiola de passarinho”. Ela ocorre quando a carga compressiva excede um determinado limite

tal que induz uma tendência ao deslocamento radial dos arames. Este deslocamento radial é uma consequência direta da forma de hélice em que os tendões estão assentados.

Esta tendência a deslocamento radial pode ser causada por um efeito expansivo de mola ou até mesmo uma torção induzida pela compressão. O único obstáculo para o deslocamento radial das armaduras consiste na capa polimérica externa e nas fitas estruturais. Caso as camadas mais externas apresentem uma rigidez inferior à tendência de expandir das armaduras, estas sofrem um grande deslocamento radial, conforme pode ser visto na Figura 2-2.

Figura 2-2 - Instabilidade radial ou *birdcaging*. Extraído de: Braga & Kaleff (2004)

Existem casos em que a instabilidade radial pode ser associada a outros modos de falha. Caso a capa polimérica externa se rompa, por exemplo, a pressão externa não contribui mais para conter a tendência de expansão radial da armadura de tração. As cargas axiais que atuam sobre a linha permanecem as mesmas, só que, sem a capa polimérica a seção resistiva do tubo ficou reduzida, logo, mais carga é suportada pela armadura de tração. A probabilidade de ocorrer uma instabilidade radial nesta situação é alta. Naturalmente, o próprio rasgo na capa polimérica contribui para o surgimento de uma instabilidade radial, removendo a restrição externa das armaduras.

Para prevenir o surgimento de instabilidade radial nas armaduras, uma nova camada foi acrescida à estrutura dos tubos flexíveis. Esta camada consiste em uma fita de material de alta resistência de membrana capaz de conter o deslocamento radial da armadura de tração. Um exemplo de material usado nesta fita é o Kevlar®, muito conhecido pelo seu uso em coletes balísticos. Entretanto, caso esta fita apresente algum defeito, ela pode não cumprir

com a sua função. Rupturas na fita podem servir como perturbações que viriam a induzir o *birdcaging*.

Rizzo (2010) afirma que a adição desta fita estrutural colaborou com o surgimento do modo de instabilidade lateral da armadura de tração. Neste caso, com a restrição radial imposta, os tendões da armadura adquirem uma tendência de se deslocar na direção circunferencial do tubo. Nesta situação, o atrito entre as armaduras e as camadas vizinhas desempenha um papel fundamental, que pode ser visto na Figura 2-3.

Figura 2-3 - Instabilidade lateral. Extraído de: Braga & Kaleff (2004)

Diferentemente do *birdcaging*, a instabilidade lateral é mais difícil de ser detectada, visto que a mesma não causa deslocamentos significativos na direção radial. Sua detecção é feita removendo-se a capa polimérica externa. Novitsky & Sertã (2002) afirmam que a flambagem lateral de armadura pode acontecer de duas maneiras diferentes.

1. **Capa Polimérica Externa Intacta:** Na presença de um momento fletor e sob compressão axial as forças de atrito assumem um valor alto. Estas forças causam uma tensão de compressão que pode plastificar o material das armaduras. Neste caso, a flambagem lateral seria plástica;
2. **Falha na Capa Polimérica Externa:** Com o anular inundado, a pressão externa não mais atua sobre as armaduras de tração. Isso reduz significativamente as forças de atrito e permitem que os tendões da armadura se desloquem lateralmente sem que necessariamente saiam do regime elástico.

Apesar do que foi afirmado pelos autores aqui citados, este trabalho deve executar uma investigação independente sobre este fenômeno. O objetivo é esclarecer o mecanismo que governa a instabilidade, tanto lateral quanto radial, e verificar os fatores que influenciam a ocorrência de um ou outro modo de flambagem.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Comentários

Esta seção é dividida em três partes. A primeira parte trata do que vem sendo desenvolvido em termos de modelos numéricos de tubos atualmente. A segunda parte fala sobre alguns modelos específicos que foram desenvolvidos por membros do Núcleo de Dinâmica e Fluidos (NDF) e do Laboratório de Mecânica *Offshore* (LMO). A terceira parte, por sua vez, tem seu foco nos modelos dedicados ao estudo do comportamento da armadura de tração e na sua estabilidade. Na primeira parte será visto que, nos últimos três anos, há um esforço para desenvolver um modelo de tubo flexível mais geral, que seja capaz de fornecer uma resposta precisa a diversos carregamentos. Apesar de tudo, os modelos ainda apresentam algumas limitações. Alguns deles apresentam hipóteses questionáveis e simplificações não de todo bem justificadas. Não existem ainda modelos realmente completos de um tubo flexível considerando todas as suas camadas em detalhe, tanto geometricamente quanto em termos das interações entre as camadas.

Com relação aos modelos específicos citados na segunda parte, são modelos que apresentam um maior grau de sofisticação. Estes modelos buscam, no entanto, estudar o comportamento de camadas específicas sob um particular tipo de esforço. Uma das propostas deste trabalho é a de acrescentar muito do que já foi aprendido com estes modelos específicos a um novo modelo.

Na terceira parte, é feito um estudo de diversos artigos que possuem como tema a parte mais externa do tubo. A armadura de tração é o foco de muitos deles, visto que esta apresenta modos de falha únicos e que ainda não foram inteiramente compreendidos. Estes modos de falha estão relacionados à estabilidade, o que torna a sua modelagem algo extremamente complexo. Muitos artigos apresentam modelos, mas são pouco detalhados e possuem uma validação questionável. Pelo fato de muitos deles serem desenvolvidos por fabricantes de tubos, as informações disponíveis são limitadas.

3.2 Os Modelos “Completo”

A abordagem do problema dos tubos flexíveis por elementos finitos já é algo que vem sendo feito há pelo menos três décadas. Uma parte considerável deste esforço privilegia o desenvolvimento de ferramentas próprias e elementos dedicados. Nos últimos anos, porém, nota-se um crescente número de publicações a respeito de modelos feitos usando-se ferramentas de elementos finitos de múltiplo uso.

Le Corre e Probyn (2009) fazem uso do pacote comercial Abaqus para avaliar um trecho de cabo umbilical de plataforma de petróleo (Figura 3-2). Os carregamentos aplicados são a tração e o carregamento cíclico de flexão. O modelo utilizado faz uso de elementos de casca para representar a camada plástica externa (HDPE), elementos de membrana para as fitas, com propriedades de material ortotrópicas, e elementos de viga para as mangueiras e fios internos. Para modelar o atrito entre as camadas, os autores fazem uso do modelo de atrito de Coulomb. Para simular os efeitos do restante do tubo na parte considerada, é aplicada uma condição de contorno nas duas extremidades conhecida como *coupling* em que os nós são “amarrados” a um nó central de tal forma que este passa a representar todos os outros nós. Para aplicar um carregamento na extremidade inteira do tubo, por exemplo, basta aplicar no nó principal. Uma consequência direta deste recurso é que a seção em que são aplicados os *couplings* permanece plana e sua rigidez aumenta consideravelmente em relação ao restante do tubo.

Um problema encontrado pelos autores no artigo foi a dificuldade do Abaqus/Explicit em tratar os contatos em elementos de viga. Vale ressaltar que o elemento de viga possui apenas o comprimento como dimensão característica. Desta forma, o programa cria uma superfície cilíndrica cuja seção circunscreve a seção da viga (Figura 3-1) e a usa como área de contato. Isso torna o contato entre vigas bastante impreciso. Efeitos como o giro da seção e o espaço ocupado pelo elemento são negligenciados.

Figura 3-1 - Área de contato em torno de um elemento de viga. Extraído de: Le Corre e Probyn (2009)

Apesar de os autores terem obtido uma aderência razoável entre resultados de deformação em comparação com modelos analíticos e numéricos, o modelo carece de qualidade para a representação do umbilical no seu ambiente de operação, pelo fato de não considerar o contato entre os elementos da melhor forma possível. O modelo possui uma grande utilidade, porém, para avaliar o comportamento de histerese do escorregamento entre as camadas do tubo quando sujeito a cargas axiais e ciclos de flexão.

Figura 3-2 - Modelo de vigas e cascas. Extraído de: Le Corre e Probyn (2009)

O modelo apresentado por Bahtui *et al.* (2009) representa um tubo flexível com seis camadas. Indo de dentro para fora (Figura 3-3), o modelo faz uso de elementos de casca de primeira ordem para a carcaça intertravada (modelada como tubo equivalente ortotrópico). As armaduras helicoidais de tração e as fitas antidesgaste são modeladas com elementos sólidos de primeira ordem. Os carregamentos avaliados foram uma combinação de uma carga cíclica de flexão com uma pressão diferencial. O estudo foi feito objetivando-se calibrar um modelo simplificado de viga de Euler-Bernoulli que seja capaz de representar o comportamento do tubo flexível em questão.

É interessante notar que o mesmo modelo de elementos finitos utilizado para calibrar o modelo simplificado de viga foi utilizado para a sua validação, o que naturalmente gerou resultados muito parecidos. Foi constatado um comportamento de histerese na resposta de momento fletor do tubo. Os autores não deixam claras as hipóteses utilizadas. O critério usado para definir a espessura da camada equivalente foi o de simplesmente conservar a espessura da mesma. Pode se verificar em publicações anteriores que o modelo de tubo equivalente deve ter uma espessura inferior à da camada, visto que a mesma não é inteiriça e possui vazios internos que reduzem a seção resistiva. O modelo de tubo equivalente com mesma espessura é, portanto, pouco conservador.

Um outro aspecto relevante deste modelo é o fato de terem sido usados somente elementos de primeira ordem, tanto no caso dos sólidos quanto nas cascas. Sabe-se que tais elementos apresentam uma distribuição interna de tensões pouco precisa. Desta forma, é de uso comum a utilização de mais de um elemento ao longo da espessura do tubo e das armaduras de tração. Naturalmente, o custo computacional da simulação aumenta, mas o

resultado é mais confiável. Pode-se observar, pela Figura 3-3 que foi utilizado apenas um elemento de primeira ordem na espessura destas camadas.

Figura 3-3 - Modelo de sólidos e cascas de primeira ordem de Bahtui. Extraído de: Bahtui et al (2009)

Leroy et al. (2010), faz uma comparação entre três modelos diferentes de tubo flexível. O objetivo do trabalho é avaliar a tensão axial no tubo. O primeiro dos modelos citados é um modelo analítico denominado “Life6”. O segundo modelo, denominado “3D/Periodic”, que faz uso da hipótese de curvatura constante e da hipótese da periodicidade das soluções. Além disso, é assumido o fato de que todos os arames da armadura de tração se deformam de maneira idêntica. O foco maior deste modelo é a armadura de tração, sendo que cada camada é construída utilizando-se elementos sólidos hexaédricos de primeira ordem. As camadas anteriores (camada plástica e fitas) foram agrupadas e modeladas por elementos de casca. Este modelo faz uso do conceito de tubo equivalente. A carcaça, a armadura de pressão e camadas espirais com ângulo de assentamento próximos a 90° são representados por elementos de viga. Um tubo equivalente externo, com elementos de casca e de viga representa a capa plástica externa e a fita estrutural (*antibirdcaging*). As fitas antidesgaste são modeladas com elementos sólidos de primeira ordem. Todos os contatos foram considerados, inclusive aqueles entre os arames adjacentes da armadura de tração. Como carregamentos, foram considerados a pressão interna, carregamentos axiais e flexão (individualmente).

Figura 3-4 - Modelo 3D/Periodic. Extraído de: Leroy *et al* (2010)

O terceiro modelo usado elimina a necessidade de algumas das hipóteses assumidas no *3D/Periodic*. O novo modelo, denominado *3D/Explicit* é mais realista. Neste caso, o modelo pode levar em conta uma curvatura irregular ao longo do comprimento. Pelo fato de o modelo possuir cerca de 10m de comprimento, a periodicidade não é mais uma hipótese também. A desvantagem deste modelo é o fato de que o mesmo requer muito mais tempo computacional para *resolver* o problema. No interior do tubo há um núcleo (tubo equivalente) que representa a carcaça, a armadura de pressão, as fitas e a camada plástica interna. Este tubo é modelado com elementos sólidos de primeira ordem. As armaduras são modeladas com arames independentes, cada qual com elementos sólidos e entre as camadas de armadura há uma fita modelada com uma malha de casca. Na parte exterior, há outro tubo equivalente que representa a capa plástica externa e as fitas estruturais. As duas extremidades do tubo foram acopladas (*coupling*) de forma a simular o restante do tubo. Os três modelos foram comparados e os dois últimos se mostraram bem menos conservadores do que o primeiro. Naturalmente, o modelo analítico faz uso de muitas hipóteses, o que certamente o deixa mais conservador.

Em comparação com o seu antecessor, o modelo *3D/Explicit* apresenta muitas vantagens, entretanto, carrega consigo muitas das suas características. Entre elas, a modelagem do núcleo estrutural (carcaça, capa polimérica interna e armadura de pressão) como uma camada equivalente formada por cascas e vigas. A fim de se manter a equivalência, tanto a área quanto a inércia das seções das camadas são transferidas para a viga equivalente. Neste caso, perde-se muita informação acerca dos deslocamentos relativos e interações entre estas camadas que possuem grande influência no comportamento radial do

tubo como um todo. Esta abordagem é válida para quando se deseja estudar apenas o comportamento das camadas mais externas, como a armadura de tração. Entretanto, para a modelagem da resposta do tubo, como um todo, aos variados carregamentos propostos, esta abordagem limita o modelo da mesma forma que um grande número de hipóteses limita uma formulação analítica.

Figura 3-5 – Modelo 3D/Explicit. Extraído de: Leroy *et al* (2010)

Outro modelo de tubo flexível pode ser encontrado em três publicações recentes. O modelo é usado em Merino *et al.* (2009)/(2010) e em Sousa *et al.* (2009). Pesquisando mais a fundo, é possível constatar que o modelo foi desenvolvido baseado nos trabalhos de Cruz (1996) e Sousa (2005). O modelo é composto por várias camadas de cilindros equivalentes que interagem entre si através de elementos de contato (Figura 3-6) e vigas, que representam as armaduras de tração. Como o modelo das armaduras é bastante complexo e exige muito poder computacional, são feitas algumas hipóteses para amenizar estes problemas. A primeira delas é que o atrito interno das camadas é negligenciado, a segunda é que não é levada em conta a interação entre a direção de assentamento dos tendões e a sua direção normal. O termo “tendão” se refere a um dos arames que compõem a carcaça intertravada ou a armadura de pressão. A camada polimérica interna, as fitas antidesgaste e a camada polimérica externa são modeladas com elementos de casca isotrópicos. As armaduras de tração são modeladas fio a fio com elementos de viga de Euler-Bernoulli. Estes elementos têm a característica de

negligenciar o efeito das forças cortantes na viga. Os contatos são considerados superfície a superfície com o mecanismo de contato do tipo “pinball” no qual é definida uma região em torno de um elemento. Esta região deve conter as duas superfícies que entram em contato. O atrito entre as camadas é simulado utilizando-se o modelo de atrito de Coulomb. O *software* utilizado desta vez foi o ANSYS, diferentemente de todos os modelos citados anteriormente.

Figura 3-6 - Modelo de oito camadas baseado em Cruz (1996) e Sousa (2005). Extraído de: Sousa et al (2009)

Este modelo foi utilizado em vários trabalhos com múltiplos propósitos. Em Merino et al. (2009) ele foi utilizado para avaliar os efeitos de carregamento acoplado de torção e tração (peso próprio). Deste trabalho, foram feitas algumas conclusões baseadas no estudo de sensibilidade do modelo a diferentes coeficientes de atrito entre as camadas. Em Sousa et al. (2011) foi avaliado o efeito do rompimento de arames da armadura na distribuição de tensão nas armaduras e em Merino et al. (2010) o mesmo modelo foi usado para avaliar as deformações do tubo flexível sob torção combinada com tração. Em todos os casos o modelo foi comparado com resultados experimentais e os resultados diferem muito pouco, salvo o caso de torção no sentido horário, no qual este apresentou diferenças significativas em relação ao experimento. Infelizmente, os autores omitem alguns dados a respeito das condições de contorno do modelo. Outro fator não explicado até o presente momento é o contato entre o elemento de viga e a malha de casca. Finalmente, o recurso de tubo equivalente também é um ponto fraco do modelo, visto que a espessura dos tubos é igual à espessura das camadas. Mais uma vez, a armadura de tração é substituída por um elemento de viga equivalente.

Na sua versão original Figura 3-7, o modelo foi construído para as cargas oriundas da situação de lançamento. Nesta etapa de operação, o tubo está sujeito a carregamentos extremos. Segundo Cruz (1996), no caso de uma aplicação de *flowline*, é neste momento que

as armaduras são mais solicitadas. Os esforços atuantes no tubo são a tração, causada pelo peso próprio (a tração no tubo, associada a um ângulo de assentamento da armadura, causa uma força radial de esmagamento no tubo denominada “squeeze”) e o esmagamento causado pela ação das sapatas que atuam no sentido radial, denominado “crush”. Essas cargas se somam e podem danificar as camadas metálicas do tubo.

Figura 3-7 - Modelo de Elementos Finitos apresentado em Cruz (1996). Extraído de: Cruz (1996)

O modelo de Elementos Finitos usado no estudo de caso (Figura 3-7) consiste de cinco camadas concêntricas e uma tampa na extremidade. A malha é descrita mais detalhadamente a seguir:

- **Camada Plástica Externa:** Modelada como um tubo com elementos sólidos isoparamétricos de primeira ordem;
- **Armaduras de Tração:** Modelada como uma série de hélices, as quais foram representadas por elementos de viga comuns de dois nós. Nota-se que cada helicóide representa um conjunto de n arames vizinhos;
- **Camada de Pressão:** Esta camada apresenta a maior engenhosidade do modelo. A mesma foi feita utilizando-se elementos de placa ortotrópicos. Isto simula o fato da camada resistir melhor a esforços no sentido radial;
- **Camada Plástica Interna:** Modelada como um tubo com elementos sólidos isoparamétricos de primeira ordem;

- **Carcaça Intertravada:** Semelhantemente à armadura de pressão, a carcaça intertravada também é constituída de elementos ortotrópicos de casca.
- **Tampa de Fechamento:** Foram considerados elementos de placa altamente rígidos unindo os nós da extremidade livre do tubo. Ela foi colocada para garantir a compatibilidade de deslocamentos dos nós da extremidade.

Os contatos foram uma preocupação à parte neste modelo. Devido às limitações de *hardware*, o uso de elementos de contato e a adição de não linearidades no modelo aumentaria enormemente o tempo necessário para a convergência. Desta forma, no caso do contato entre a armadura de tração e a camada de pressão, o mesmo foi representado por elementos de viga ligando os nós de cada camada. A flexão destes elementos simula a resistência ao deslizamento entre as camadas e a torção destes elementos simula a resistência a uma possível rotação relativa entre as camadas. No caso do contato direto entre camadas plásticas e camadas metálicas o contato foi representado por um nó comum, fato que restringe completamente o movimento relativo entre elas.

Os resultados obtidos na análise de tensões do modelo mostram que o mesmo apresentou boa correlação com experimentos de carregamentos axiais. Com relação a outros tipos de carregamento como momento de flexão e torção, o modelo apresenta resultados insatisfatórios. Além disso, as tensões oriundas da análise (na carcaça e na armadura de pressão) não podem ser utilizadas imediatamente. As mesmas devem ser corrigidas segundo a formulação da casca ortotrópica. Desta forma, pode-se concluir que o modelo cumpre bem o propósito pelo qual foi construído, que é o de simular cargas axiais e de esmagamento, porém, em matéria de versatilidade e pós-processamento, ainda é deficiente.

3.3 Modelos Específicos

3.3.1 Núcleo estrutural

Atualmente, dentro das instalações do Núcleo de Dinâmica e Fluidos da Escola Politécnica, vem sendo desenvolvidos uma série de modelos de tubos flexíveis. A diferença entre estes e os citados na seção anterior é o fato de que estes modelos não representem o tubo como um todo, mas partes separadas. Cada um destes modelos tem o seu propósito. Estes

buscam a representação fidedigna das camadas metálicas para avaliar o efeito das simplificações de caráter geométrico que podem ser feitas. De maneira geral, busca-se a compreensão de certos fenômenos associados a uma camada em especial ou a melhoria da modelagem em si. No artigo de Gay Neto e Martins (2009) é feita uma comparação entre três modelos de carcaça intertravada. Um dos modelos é analítico, de tubo equivalente, os outros dois são numéricos.

O primeiro modelo numérico recria o perfil da carcaça e usa a hipótese de axissimetria (Figura 3-8). O segundo modelo, por sua vez, tem um passo de carcaça de comprimento e é em forma de hélice (Figura 3-9). As extremidades do modelo axissimétrico têm condições de contorno de simetria e o modelo representa um quarto da circunferência. No caso do modelo mais complexo, as extremidades da carcaça são acopladas, de forma a simular a continuidade da armadura. Além disso, acoplamentos são feitos para que os dois perfis de carcaça presentes em cada modelo não se soltem. O carregamento é a pressão diferencial transmitida à carcaça pela camada polimérica interna.

O propósito deste modelo é o de estudar o comportamento de flambagem da carcaça. Os três modelos apresentam uma resposta muito parecida na região de pré-flambagem. Isso significa que a simplificação de axissimetria é válida para estas condições.

Figura 3-8 - Modelo de um quarto de circunferência. Extraído de: Gay Neto e Martins (2009).

Figura 3-9 - Modelo de carcaça de hélice. Extraído de: Gay Neto e Martins (2009)

O modelo da carcaça também foi usado em mais uma publicação. Em Gay Neto et al. (2009) a versão axissimétrica do modelo foi usada, em conjunto com um modelo de capa polimérica para simular o esmagamento causado pelas sapatas do mecanismo de tração na operação de lançamento. A carga foi aplicada pelas sapatas. A Figura 3-10 mostra as duas sapatas modeladas como uma malha rígida. O modelo foi comparado com um experimento.

Figura 3-10 - Modelo de esmagamento da carcaça. Extraído de: Gay Neto et al (2009)

Os resultados da comparação se mostraram muito satisfatórios para a deformação da carcaça em regime linear. Quando o regime passa a ser plástico, os resultados passam a diferir. A possível causa desta divergência é apontada pelo autor como sendo o comportamento não linear do material. Este modelo demonstra a importância de se considerar um modelo de material que leve em conta não linearidades como o encruamento, por exemplo.

Da mesma forma que no primeiro caso citado nesta seção, em Gay Neto *et al.* (2010) é feita uma comparação entre quatro modelos diferentes de um tubo submetido a uma grande pressão interna. Desta vez, o foco é a armadura de pressão. O primeiro modelo é um modelo analítico de tubo equivalente, usado para comparação com os outros três modelos numéricos. Um desses modelos numéricos é metade de uma coroa circular de duas camadas (Figura 3-11). Esta é uma grande simplificação que se pode fazer.

Figura 3-11 - Modelo bidimensional. Extraído de: Gay Neto *et al* (2010).

As duas camadas deste modelo representam a armadura de pressão e a camada polimérica interna. Ambas possuem condições de simetria nas extremidades e o carregamento é uma pressão por unidade de comprimento do tubo. Os outros dois modelos numéricos, assim como em Gay Neto e Martins (2009) são tridimensionais. Um deles considera a hipótese de axissimetria (Figura 3-12) e o outro tem a forma de hélice (Figura 3-13). Nesses casos, leva-se em conta a geometria do perfil da armadura de pressão e a camada polimérica também é incluída para transmitir o carregamento de pressão. Feitas as comparações, concluiu-se que o modelo bidimensional apresenta uma pequena diferença. Provavelmente isso ocorre devido a não linearidades geométricas negligenciadas. Vale ressaltar que em todos os modelos é considerada uma ovalização inicial, ou seja, uma imperfeição que altera de forma significativa a maneira como o tubo responde aos carregamentos.

Figura 3-12 - Malha do modelo tridimensional axissimétrico. Extraído de: Gay Neto *et al* (2010).

Figura 3-13 - Modelo tridimensional de hélice. Extraído de: Gay Neto *et al* (2010).

Em 2011 foi feito um estudo de colapso que incluía a carcaça intertravada, a camada polimérica interna e a armadura de pressão. Em Gay Neto e Martins (2011) são propostos dois modelos diferentes. O primeiro destes modelos, ambos numéricos, é fiel à geometria de todas as camadas (Figura 3 14). A hipótese de axissimetria é considerada para os dois modelos, logo, ambos são representados como um quarto de anel.

Figura 3-14 - Modelo geometricamente verossímil. Extraído de: Gay Neto e Martins (2011).

O segundo modelo (Figura 3 15) faz uso de uma simplificação. A representação da armadura de pressão é feita através de um tubo equivalente. Isso faz com que a malha fique muito mais simples e o custo computacional do modelo diminui. Todos os contatos entre as camadas são considerados, inclusive os contatos entre os tendões da mesma camada metálica. O tubo equivalente considerado tem a sua espessura calculada através de uma metodologia proposta em Gay Neto e Martins (2009).

Figura 3-15 - Modelo que usa a simplificação da armadura de pressão. Extraído de: Gay Neto e Martins (2011).

Em termos de colapso de tubos flexíveis, no entanto, o estado da arte pode ser visto no artigo apresentado por Gay Neto et al. (2012). Neste trabalho é proposto um modelo tridimensional completo do núcleo estrutural (carcaça intertravada, capa polimérica interna e armadura de pressão). O modelo contempla todas as não linearidades do problema, incluindo os contatos entre os arames de uma mesma armadura.

Figura 3-16 - Visão geral do modelo 3D completo do núcleo estrutural. Extraído de: Gay Neto et al (2012).

O propósito deste trabalho foi o de criar um paradigma para o estudo de colapso seco e molhado de tubos flexíveis. O grande avanço, neste caso, foi a possibilidade de incluir a curvatura no tubo e verificar a sua influência no colapso. Foram feitas poucas hipóteses, o que torna o modelo, embora bastante complexo, uma boa ferramenta para a validação dos modelos simplificados. Apesar da alta qualidade dos resultados, o número de graus de liberdade envolvidos é grande (da ordem de milhões). Desta forma, o modelo não é prático para realizar um grande número de análises.

Entre as aplicações mais recentes de modelos parciais, pode ser citado Malta et al. (2012). Neste artigo, os autores fazem uso de um modelo de estado plano para representar o núcleo estrutural de um tubo flexível durante o colapso molhado. Neste caso, o objetivo foi o de estudar a forma de colapso da seção transversal de tubos flexíveis após a falha. O modelo em questão, inspirado em Gay Neto et al. (2010), apresenta as três camadas de um tubo flexível do tipo *rough bore reinforced* (Figura 3-17).

Figura 3-17 - Modos de colapso "oito" (esq.) e "coração" (dir.). Extraído de: Malta et al (2012).

Foi demonstrado que, para diferentes imperfeições de fabricação, o tubo poderia assumir duas formas de colapso distintas, denominadas “oito” e “coração”. Além disso, pode-se provar que a espessura da armadura de pressão (no caso, a camada mais externa) influi de forma direta na escolha de um ou outro modo. Apesar da aparência simplificada, o modelo conta com não linearidade geométrica, de material e contato entre as camadas adjacentes.

Em Malta et al. (2013), um modelo semelhante ao visto em Gay Neto e Martins (2011) foi utilizado para estudar o tubo flexível durante o lançamento. Mais especificamente, foi estudado o efeito de esmagamento causado por um equipamento conhecido como “lagarta”. Este equipamento serve para controlar a descida do tubo ao fundo do mar, mantendo a velocidade lenta e constante. Para isso, é aplicada uma forte pressão no tubo através de certo número de sapatas. O aspecto geral do modelo pode ser visto na Figura 3-18.

Figura 3-18 - Modelo de tubo sendo esmagado por uma sapata. Extraído de: Malta et al (2013).

Além do modelo da Figura 3-18, três variantes foram propostas no trabalho. Cada uma delas apresentava uma simplificação diferente envolvendo a substituição da geometria original de uma ou mais camadas por um anel equivalente (obtido por equivalência de inércia mínima do perfil). Todas as variantes do modelo foram submetidas à mesma carga de esmagamento; desta forma os resultados puderam ser comparados (Figura 3-19). Como critério de comparação foram escolhidos o critério de falha por escoamento da norma N2409

(Petróleo Brasileiro S.A., 2003) da Petrobras e de falha por ovalização, também regulamentada pela N2409.

Entre as conclusões deste artigo está o fato de que o uso de simplificações em camadas metálicas acarreta alterações significativas na rigidez do tubo como um todo. O efeito mais evidente foi no decréscimo da rigidez radial. Axialmente, entretanto, o efeito é oposto e o tubo tende a ficar mais rígido, isto porque as camadas equivalentes restringem o deslocamento axial dos perfis. Fora isso, mostrou-se que a armadura de pressão é aquela que pode ser substituída por uma camada equivalente com o mínimo de prejuízo em termos de qualidade de resultado.

Figura 3-19 - Deslocamento radial para o modelo de esmagamento. Extraído de: Malta et al (2013).

3.3.2 Armadura de tração, instabilidade e camadas mais externas

As armaduras de tração representam uma dificuldade extra na modelagem por elementos finitos. As mesmas podem ser modeladas usando elementos sólidos, de cascas ou de vigas. A dificuldade, entretanto, reside no fato de serem necessários muitos elementos para modelar com certa precisão cada tendão e, em um tubo flexível, existem dezenas de tendões. O contato entre elas também representa uma dificuldade a parte. Essas dificuldades são mais bem discutidas no capítulo 4.

Inúmeros trabalhos têm sido feitos com foco apenas nesta região do tubo flexível (armaduras e capa plástica). Em especial, busca-se estudar o efeito da instabilidade local da

armadura. Esta instabilidade, que pode surgir na direção radial ou circunferencial é conhecida como *birdcaging* e instabilidade lateral de armadura, respectivamente.

Custódio et al. (2007) descrevem as primeiras impressões referentes à ocorrência de flambagem lateral em um tubo flexível durante a completção de um poço em 1997, Bacia de Campos. Este episódio é citado por diversas referências como uma das primeiras ocorrências reportadas de instabilidade lateral de armadura. Segundo os autores, durante a completção do poço MLS-3 do campo de Marlim Sul (Figura 3-20), “os engenheiros e técnicos da Petrobras foram surpreendidos pela ocorrência de um novo modo de falha compressiva”. Devido à natureza da instabilidade lateral, este modo de falha só foi visto após uma dissecação de um trecho de tubo.

Figura 3-20 - Esquema do sistema de extração em Marlim Sul. Extraído de: Kable (2013 b)

Após o ocorrido, a primeira abordagem para a investigação do fenômeno foi a execução de uma série de ensaios DIP (Deepwater Immersion Performance). Tais ensaios são conduzidos em alto mar, com amostras de tubo em escala real e envolvem o uso de um grande aparato logístico, incluído o uso de navios de lançamento e plataformas. Naturalmente, tanto o custo quanto a mão-de-obra necessária para tais ensaios são altos. Com a finalidade de reduzir os custos, um novo aparato de testes foi proposto para a realização de ensaios no próprio laboratório, com amostras consideravelmente menores.

Figura 3-21 - Esquema do mecanismo de testes em laboratório. Extraído de: Custódio et al (2007)

Os modelos numéricos começaram a surgir no início dos anos 2000. Uma vez que os computadores possuíam uma limitação de memória virtual, estes modelos tinham a característica de englobarem um grande número de simplificações. Troina et al. (2002) e Brack et al. (2005) usam um modelo de Elementos Finitos similar, composto por elementos de viga e mola. Mais precisamente, um único tendão é modelado usando elementos de viga, ao passo que as outras camadas são representadas por um conjunto de molas não lineares. Este modelo foi feito baseado na hipótese de que cada arame da armadura de tração é independente, ou seja, não influencia a resposta dos arames vizinhos. Além disso, o efeito das forças de atrito entre cada camada é negligenciado. O *software* comercial ANSYS foi utilizado e o modelo foi inserido no programa por meio de sub-rotinas em FORTRAN.

Com o aumento da capacidade computacional e *software* cada vez mais sofisticados, os modelos foram ficando cada vez mais complexos e com maior acurácia. Em Perdizet et al. (2011), o foco é posto sobre as tensões em um tendão de armadura de tração. Os autores constroem modelos usando o *software* comercial Abaqus e comparam os resultados com os de experimentos. Para tal, tanto um modelo implícito quanto um explícito foram usados, cuja malha pode ser vista na Figura 3-22.

Figura 3-22 - Aspecto geral da malha do modelo em ABAQUS. Extraído de: Perdizet et al (2011).

Para construir o modelo, foi usado um tubo de cinco camadas do tipo *Rough Bore Reinforced*. O núcleo estrutural (região composta por carcaça intertravada, capa polimérica interna e armadura de pressão) foi representado como uma casca embutida com elementos de viga. Esta combinação tem por objetivo simular o efeito de “casca ortotrópica”. Infelizmente, não foi divulgado o tipo de elemento finito utilizado na armadura de tração. Pelas imagens e semelhança com o modelo de Leroy et al. (2010), pode se deduzir que a armadura é composta por elementos sólidos.

Os carregamentos são aplicados em dois passos:

1. Pressão interna e tração;
2. Flexão cíclica.

Os contatos foram considerados utilizando o *General Contact*, no caso do Abaqus *Explicit* e par a par, no caso do Abaqus *Standard*. Devido ao grande número de pares de contato, uma macro em *Python* foi utilizada para fazer o pareamento. O modelo de Coulomb foi utilizado para simular o atrito entre as camadas, nas regiões de contato. Na região das

condições de contorno, foram utilizados *Multi Point Constraints (MPCs)* para simular os acessórios na terminação da amostra de tubo.

Um aspecto interessante deste artigo é que este é um dos primeiros a discutir o fato de se usar o *solver* explícito para uma análise quase estática, para este problema. Ele ressalta a importância de se controlar os passos de carga para amenizar os efeitos dinâmicos da simulação. Além disso, o tempo de simulação deve ser grande o suficiente. Isso, somado ao grande comprimento das amostras (até dez metros) torna as simulações mais demoradas. Para lidar com esta situação, foi utilizado um cluster com até 64 processadores para reduzir o tempo ao máximo.

Os resultados foram apresentados na forma de curvas de tensão axial *versus* deslocamento com comportamento de histerese. Estas apresentam uma boa correlação com os experimentos realizados. Os melhores resultados, entretanto foram obtidos para as simulações usando o *solver* Abaqus *Standard*. A diferença entre os experimentos e os resultados do Abaqus *Explicit* foi explicada como sendo oriunda de efeitos dinâmicos que poderiam ser amenizados com um tempo de aplicação de carga maior. Uma distribuição de tensões nas armaduras teria sido útil para verificar a qualidade do modelo. Esta, entretanto, foi omitida pelos autores.

Outro resultado interessante deste artigo é a curva de *speed up* feita para comparar o desempenho das simulações com mais processadores. Estas curvas são construídas calculando um fator de ganho de tempo com base em uma simulação com apenas um processador (para um fator dois, por exemplo, lê-se que a simulação foi concluída em metade do tempo). Este fator é então colocado em função do número de processadores utilizados para cada comparação. Nota-se pela Figura 3-23 que o Abaqus tem uma boa capacidade de paralelização com mais de dez processadores. Outro aspecto notável da curva é o fato de o Abaqus *Standard* apresentar um ganho maior de tempo de simulação com o aumento do número de processadores em relação ao *Explicit*.

Figura 3-23 - Curva de *speed up* para o ABAQUS *Explicit* e *Standard*. Extraído de: Perdizet et al (2011).

Ainda no âmbito da modelagem de armaduras de tração por elementos finitos, o artigo apresentado por Sertã et al. (2012) mostra um modelo com um alto grau de complexidade cujo propósito é o estudo da instabilidade radial de armaduras de tração. Para a validação, foram feitos testes em laboratório com um tubo flexível real. Neste caso, são induzidos dois modos de instabilidade de armadura de tração: a flambagem lateral e a radial.

O modelo lida com o núcleo estrutural de uma maneira semelhante ao modelo apresentado em Perdizet et al. (2011). Isto significa que o núcleo é modelado usando-se uma combinação de elementos de viga e casca, formando uma única camada com propriedades equivalentes. Essa combinação garante um núcleo deformável e que interage com as outras camadas. O aspecto geral da malha pode ser vista na Figura 3-24. Infelizmente, informações mais completas como o tipo de elementos utilizados, suas propriedades, condições de contorno são omitidas neste artigo.

Figura 3-24 - Modelo usado para estudo de instabilidade armadura. Extraído de: Sertã et al (2012).

Para se obterem os resultados, foi utilizado o *solver* Abaqus *Explicit*. Novamente, o tempo de simulação deve ser maior para se evitar efeitos dinâmicos. No artigo, diz-se que a simulação é quase estática. É de conhecimento geral que são necessárias algumas adaptações no *solver* explícito para se efetuar este tipo de simulação. Neste caso são duas as técnicas mais utilizadas:

1. Controle de *Load Step*;
2. *Mass scaling*.

Essas duas técnicas serão mais bem explicadas adiante neste documento. Com relação aos carregamentos, foram feitos dois estudos de caso:

Caso 1: Carregamento de compressão axial, para induzir flambagem radial;

Caso 2: Carregamentos de compressão axial, pressão externa de 3000 mH₂O e flexão cíclica, para induzir flambagem lateral da armadura.

Vale observar que, no caso 1, foi colocada uma barra rígida ao longo da extensão do tubo. Esta possui a função de inibir a flambagem global do tubo.

No que diz respeito a resultados, o caso 1 teve uma boa correspondência com os experimentos. Além disso, também foi feito um estudo sobre a inclusão de efeitos de pré-tensão e fitas anti-*birdcage* no tubo. A Figura 3-25 mostra o rompimento desta camada de proteção em um caso extremo. A conclusão foi a de que tanto a pré-tensão e a fita tornam o tubo mais resistente a este modo de falha.

Figura 3-25 - Resultado mostrando o fenômeno do *birdcage*. Extraído de: Sertã et al (2012).

Em 2013, o mesmo modelo foi usado em Connaire et al. (2013). Neste caso, além de simular a instabilidade da armadura de tração, os autores usaram o modelo para verificar as tensões resultantes de carregamentos extremos nos arames dentro de um acoplamento (*end fitting*). Assim como em Sertã et al. (2012), os resultados foram comparados com uma série de ensaios realizados em laboratório do fabricante de tubos flexíveis e, segundo os autores, apresentaram uma boa correspondência. Todavia, informações detalhadas sobre o modelo foram omitidas neste artigo, impossibilitando uma compreensão detalhada do modelo e a reprodução do mesmo.

Em termos de modelo de instabilidade de armadura, o artigo escrito por Brack et al. (2005) traz uma discussão sobre a mecânica do fenômeno e ainda apresenta um modelo de elementos finitos simplificado para o estudo de flambagem. Inicialmente, é feita uma discussão de metodologias de R & D para tubos flexíveis para águas profundas. Nesta

discussão, é feita a afirmação de que o tubo é superdimensionado para a maior parte da sua vida útil. Uma proposta é feita de um *riser* com duas seções transversais diferentes:

- **Parte suspensa (*riser*):** Estrutura capaz de resistir a altas trações e cargas dinâmicas;
- **Parte apoiada no solo (*flowline*):** Estrutura dimensionada para resistir a altas pressões, compressão axial, flexão e torção (especialmente na região próxima ao *touchdown point*).

Assim como nos dois últimos artigos, este afirma que a instabilidade lateral da armadura está associada a uma compressão axial associada com uma flexão cíclica. Sendo assim, o autor afirma que a parte suspensa do tubo está mais vulnerável a este tipo de fenômeno, devido ao fato de estar sujeita a cargas dinâmicas maiores do que a parte apoiada.

Mais adiante no artigo é feito um estudo de carga crítica e resposta de momento de flexão em tendões de armadura. Para tal, usa-se um modelo de Elementos Finitos e um modelo analítico. O último faz parte de um *software* proprietário da Petrobras denominado *FRAES (Flexible Riser Analysis Expert System)*. Entretanto, o modelo analítico possui uma resposta limitada quando se busca analisar a compressão da armadura. Neste aspecto, o modelo numérico apresenta uma forte vantagem, visto que é capaz de lidar com vários aspectos não lineares ligados ao fenômeno.

O modelo de Elementos Finitos foi construído usando o pacote comercial ANSYS e apresente um alto grau de semelhança com o apresentado em Troina et al. (2002). Este é descrito como sendo composto por dois tipos de elementos diferentes:

1. **Elementos de viga tridimensionais**, que representam o tendão de armadura de tração;
2. **Molas não lineares**, que representam o núcleo estrutural e a fita *anti-birdcage*.

Apesar de não haver figuras mostrando o aspecto geral da malha, o modelo é detalhadamente descrito e é possível imaginar algo como uma cadeia de DNA. A diferença é que o DNA é uma dupla hélice e o modelo em questão apresenta apenas uma. Esta é construída em torno de um cilindro base. O modelo é simplificado e conta com uma série hipóteses:

- Cada tendão é independente do vizinho;
- Não linearidade geométrica é considerada;
- Tensões residuais do processo de fabricação foram ignoradas;
- Material linear;
- O modelo tem o comprimento mínimo de quatro passos da armadura de tração;
- O atrito entre camadas é ignorado;
- O tendão é livre para girar em torno do próprio eixo.

A última hipótese favorece a instabilidade lateral, visto que o arame pode girar para o lado de menor inércia. Para amenizar este efeito, é inserida uma inércia de rotação artificial no tendão. Neste momento, é interessante observar o efeito da inércia de rotação na carga crítica na estabilidade do sistema. No caso, a carga crítica é diretamente proporcional à inércia de rotação.

Entre as observações pertinentes deste artigo está a de que, segundo os autores, a instabilidade tende a ocorrer na direção de maior inércia, na situação de giro restrito. Outra observação interessante é a de que a resposta de momento fletor tem um comportamento cíclico, ou seja, se repete ao longo do comprimento do tubo. Desta forma, pode se estimar um comprimento de amostra mínimo de aproximadamente dois passos de armadura de tração. No final do artigo, os autores descrevem a seguinte mecânica da instabilidade:

1. Sob compressão axial, o tendão da armadura pode se mover lateralmente ou radialmente. Neste momento, a fita anti-*birdcage* se opõe ao movimento radial;
2. O movimento lateral do tendão só é influenciado pela inércia da seção. Quando o tendão é livre para girar em torno do próprio eixo, o movimento lateral ocorre na direção de menor inércia;
3. Como resultado da redução de inércia lateral, o tendão atinge seu limite de estabilidade;
4. Quanto maior a restrição da rotação do tendão, menor a influência da redução de inércia (na direção lateral) e maior é o limite de estabilidade.

Altamente relevante para este trabalho é o artigo de Vaz e Rizzo, (2011). O mesmo trata especificamente de estabilidade de armadura através do Método dos Elementos finitos. Este começa com uma introdução geral sobre o fenômeno e aponta duas possíveis situações onde o mesmo pode ocorrer:

1. **Durante a instalação:** Devido a efeitos de *end cap* associados a uma alta pressão hidrostática;
2. **Quando a unidade flutuante opera em condição NEAR (Figura 3-26):** Pequeno ângulo de topo somado a movimentos da plataforma.

Além disso, a instabilidade radial da armadura ainda pode ocorrer após uma falha do tubo por colapso molhado. A ausência de pressão externa na armadura de tração favorece a deformação radial da mesma. A instabilidade lateral, por sua vez, pode ser associada às seguintes situações:

1. **Anular seco:** A capa plástica externa está intacta e o deslocamento lateral dos arames é impedido por forças de atrito. Neste caso, altas tensões de compressão surgem e a falha pode ser elastoplástica;
2. **Anular molhado:** No colapso molhado, as forças de atrito ficam muito menores, portanto a falha tende a ser mais elástica.

Figura 3-26 - Offset da plataforma: a) Near b) Far c) Cross d) Trans. Extraído de: I-ET-3010.00-1500-960-PPC-006.

Ainda no início do artigo, é feita uma discussão acerca das dificuldades de se modelar corretamente o fenômeno e da necessidade de modelos de elementos finitos para tal. As diversas não linearidades presentes tornam a modelagem mais complexa. Tais modelos são escassos e pouco divulgados devido ao fato de pertencerem a fabricantes de tubos ou operadores. Assim como reportado nos artigos anteriores, pouca informação está disponível sobre este assunto, na literatura.

Este artigo, em especial, propõe um modelo de elementos finitos construído utilizando o pacote comercial Abaqus. Este modelo é proposto para prever a carga crítica e a morfologia do arame após a ocorrência da instabilidade. Além disso, os autores propõem:

- Verificar a influência da pressão e do coeficiente de atrito entre as armaduras externa e interna no modo resultante;
- Verificar a instabilidade nas situações de colapso seco e molhado.

O aspecto visual do modelo (Figura 3-27) mostra apenas dois arames helicoidais sobre uma base não linear elástica. Uma observação mais criteriosa, entretanto, mostra um modelo complexo de tubo completo, que responde de maneira axissimétrica a cargas compressivas. A base interna resiste somente a cargas radiais de compressão, ao passo que a base externa só resiste à expansão radial (ambas as bases são compostas por molas não lineares).

Figura 3-27 - Aspecto geral do modelo feito no ABAQUS. Extraído de: Vaz e Rizzo (2011).

A amostra possui três passos de armadura de tração de comprimento. O contato entre os arames é modelado através de uma superfície cilíndrica acoplada a um deles. Este recurso faz com que eles interajam entre si. As molas não lineares simulam a interação dos arames com as outras camadas. As propriedades axiais e torcionais das camadas poliméricas do tubo são dadas por uma viga no eixo central do tubo. Este arranjo é mais facilmente compreensível através da Figura 3-28.

Figura 3-28 - Detalhes do modelo de elementos finitos. Extraído de: Vaz e Rizzo (2011).

Vale ressaltar que, esta forma peculiar de representar o contato torna desnecessário o uso de contato entre vigas, o qual é bastante problemático em termos geométricos e numéricos. Conforme a Figura 3-29, os nós das armaduras são conectados aos nós da casca cilíndrica base. Isso simula o efeito dos outros arames. Uma consequência direta disso é a de que o modelo sempre responderá de forma axissimétrica aos carregamentos, o que é uma simplificação considerável.

Isto só é possível graças ao uso de *Constraint Equations*, ou *CEs*. Estas acoplam os graus de liberdade dos nós da armadura (*master*) aos nós do cilindro base (*slave*). Um exemplo simples de *Constraint Equation* é:

$$0 = 2U_{y1} - U_{x2} \quad (3.1)$$

A equação 2.5 diz que o deslocamento em y do nó 2 é igual a duas vezes o deslocamento em x do nó 2. No caso do modelo em questão, os graus de liberdade estão em um sistema de coordenadas radial. As relações das *Constraint Equations*, nos programas como o ABAQUS, são dadas por elementos especiais denominados MPCs. A fita anti-atrito entre as armaduras é modelada simplesmente com uma redução no coeficiente de atrito.

Figura 3-29 - Relações entre nos nós de cada seção do tubo do modelo. Extraído de: Vaz e Rizzo (2011).

Resumidamente, o contato entre as armaduras possui as seguintes características:

- Interação entre a superfície cilíndrica e a armadura interna equivalente;
- Escorregamento pequeno ou finito é permitido;
- Contato superfície com superfície;
- Atrito considerado como o modelo de Mohr-Coulomb;
- *Gaps* podem ser considerados.

Os carregamentos foram inseridos em dois passos:

1. Pressão externa aplicada;
2. Compressão nos arames.

É importante ressaltar que o carregamento axial causou um momento fletor seguido de escoamento local nas extremidades dos arames. Devido a este fato, o mesmo foi rotacionado de forma a se alinhar com o sistema de coordenadas do arame da armadura. A análise estática foi usada para as simulações, entretanto, foi necessário o uso do recurso *STABILIZE* do

Abaqus para solucionar as dificuldades de convergência. Este recurso permite que o programa acrescente amortecedores fracos automaticamente na estrutura para eliminar grandes acelerações. Esta técnica permite a simulação de um fenômeno “dinâmico” com um *solver* estático.

Uma macro em FORTRAN foi utilizada para fazer o pós-processamento da geometria, da malha, das condições de contorno, carregamentos e contatos. Os autores procuram deixar claro que não foi inserida nenhuma imperfeição inicial com a finalidade de induzir a instabilidade. Entretanto, a fita anti-*birdcage* foi “enfraquecida” ao longo de 1/30 do seu comprimento (no meio do tubo). Alega-se que isso foi feito apenas para induzir a localização do *birdcage* no meio do tubo.

Como resultados, são encontrados quatro modos distintos de instabilidade, denominados A, B, C e D pelos autores. É importante mencionar apenas que estes surgiram devido a diferenças entre coeficientes de atrito e pressões externas, parâmetros estes que possuem uma forte influência no fenômeno.

Figura 3-30 - Resultados de *birdcage* encontrados usando-se o ABAQUS. Extraído de: Vaz e Rizzo (2011).

Uma observação pertinente dos autores refere-se ao fato de a armadura responder ao carregamento com instabilidade radial ou lateral. Conclui-se através de diversas análises que a escolha depende do coeficiente de atrito. Se este for pequeno, a instabilidade lateral tende a ocorrer. Com o coeficiente maior, a estrutura “opta” pela instabilidade radial. A situação em que a carga crítica de flambagem é menor é aquela em que o anular está inundado (colapso molhado). Nesta situação, a pressão atuante nas armaduras que se opõe ao deslocamento radial desaparece. Isso faz com que a força de atrito entre as armaduras caia, facilitando a ocorrência de instabilidade.

Em um de seus artigos mais recentes, Sousa et al. (2012) fazem a associação da instabilidade na armadura com a integridade do tubo e usam o Método dos Elementos Finitos

para fazer a verificação. De forma similar a Novitsky & Sertã (2002), uma vez que a capa polimérica é danificada e a água inunda a região do anular, a influência da pressão externa na contenção da expansão radial da armadura é anulada. Diferentemente dos autores originais, ao invés de associar este efeito a instabilidade lateral, Sousa et al. (2012) busca verificar esta afirmação no caso do *birdcaging*.

Neste trabalho, os autores lançaram mão de um modelo em ANSYS de um tubo completo (contemplando todas as camadas) e inteiramente tridimensional. O modelo é o mesmo descrito em Sousa et al. (2009) e representa uma versão modernizada do trabalho de Cruz (1996). Desde a versão original, o modelo foi dotado de um sistema de contatos mais completo, condições de contorno melhoradas e novas camadas, como a fita estrutural.

A malha de elementos finitos pode ser vista na Figura 3-6. Na região do núcleo estrutural, são usadas cascas ortotrópicas na carcaça intertravada e na armadura de pressão. A fita estrutural de alta resistência também foi modelada como casca ortotrópica. Para as camadas poliméricas (capas poliméricas interna e externa), foram usadas cascas isotrópicas. As armaduras de tração foram construídas usando elementos de viga não lineares com a formulação de Euler-Bernoulli. O contato foi considerado entre as camadas através da Formulação Lagrangeana Aumentada (*Augmented Lagrange Formulation*), mas não são fornecidas informações sobre a sua implementação em elementos de viga. O modelo é capaz de lidar com carregamentos axissimétricos como tração, compressão e pressão. Estas cargas são aplicadas utilizando um “nó piloto”, rigidamente ligado com os nós das extremidades de cada camada. Este artifício é usado para simular o efeito de *endcap*.

Com a finalidade de validar o modelo, os autores conduziram uma série de experimentos. Amostras longas (com pelo menos quatro passos de armadura de tração) foram comprimidas por atuadores e foi medido o deslocamento radial. Uma amostra de tubo de 4 polegadas foi utilizada nas simulações numéricas e nos ensaios experimentais. A compressão foi aplicada linearmente e os resultados foram coletados até a perda de resistência do tubo (Figura 3-31), ou seja, a resposta pós-flambagem não foi considerada para este estudo.

Figura 3-31 - Deslocamento radial do modelo de EF (fator de escala x5). Nota-se as regiões de ocorrência de instabilidade radial. Extraído de: Sousa et al. (2012)

Segundo os autores, o modelo numérico teve uma boa correspondência com os ensaios experimentais. Todavia, a ocorrência da instabilidade foi reportada com uma carga crítica maior no modelo numérico, em comparação com os experimentos. Além disso, nos dois modelos, numérico e experimental, não foi considerada a possibilidade de instabilidade lateral de armadura, somente a radial.

Em um dos modelos mais recentes, Caleyron et al. (2014) detalha uma nova versão do modelo *3D/Periodic*, mencionado previamente, desenvolvido pelo IFP. Desta vez, todavia, o foco é dado para a aplicação deste modelo em análises de instabilidade de armadura de tração. Através da Figura 3-4 é possível notar que o modelo é bastante curto. Ele faz uso da periodicidade da configuração das armaduras para reduzir o comprimento necessário. A Figura 3-32 mostra um exemplo de um dos tendões sendo decomposto em cinco partes. Desta forma, nota-se que todos os “tendões” que podem ser vistos no modelo cortado são, na realidade, várias partes de um único tendão. Para adotar tal simplificação, os autores precisaram lançar mão de uma hipótese forte, que é a de que o comportamento de cada arame da armadura de tração é independente.

Figura 3-32 – Esquema de repetição do modelo 3D/Periodic. Esq. tendão indeformado. Dir. tendão deformado.
Extraído de Caleyron et al. (2015)

O modelo em si conta com a representação da não linearidade de contato entre as camadas. Para o contato é adotado um modelo de atrito de Coulomb, com coeficiente calibrado a partir de resultados experimentais. As camadas mais externas são representadas por uma casca reforçada com vigas e as armaduras são formadas por elementos sólidos de oito nós. Por causa das simplificações, o modelo é capaz de reproduzir apenas casos onde há alteração no ângulo de assentamento. Sendo assim, o modelo não é capaz de reproduzir instabilidade radial.

3.3.3 Modelos Analíticos

Uma explicação mais completa sobre os fenômenos de instabilidade de armadura pode ser encontrada em Tan et al. (2006) e Zhu et al. (2014). Como mencionado anteriormente, este fenômeno é resultante da compressão axial do tubo. Segundo os autores, esta compressão está associada ao fato de o núcleo do tubo se encontrar vazio durante a instalação. O núcleo vazio reduz o peso próprio do tubo e, por consequência, a tração no topo. Isso o torna mais vulnerável a oscilações do navio e fica sujeito a compressão dinâmica. Em operação podem ocorrer quedas abruptas de pressão devido a desligamento do poço fazendo com que a pressão externa fique bem maior do que a interna e favorecendo a flambagem lateral.

Os artigos mencionam que a instabilidade lateral foi reportada no final dos anos 90 em uma instalação de 1700 m de profundidade (Marlin Sul). É mencionado também que, além da compressão axial, o surgimento da instabilidade de armadura está associada a uma flexão do tubo. Esta seria a responsável por gerar o “defeito inicial” que induz a instabilidade. Além deste, também há o modo de instabilidade lateral da armadura, o qual é mais difícil de reportar devido ao fato de não causar deformação radial e ficar praticamente indetectável sob

as camadas mais externas. Este fato torna a observação experimental do fenômeno mais difícil.

O modelo em si, apresentado superficialmente, é baseado na energia de deformação total e pode ser escrito na seguinte equação:

$$\Pi(a) = U_{tração}(a) + U_{fita}(a) - W_p(a) \quad (3.2)$$

Onde Π é a energia de deformação total e o parâmetro a representa a deflexão do arame. $U_{tração}$ e U_{fita} representam as contribuições de energia do arame defletido e da fita anti-*birdcage* respectivamente. O trabalho $W_p(a)$ é o trabalho necessário para superar a pressão externa durante a expansão. Neste contexto, a condição de equilíbrio é dada por:

$$\frac{d\Pi(a)}{da} = 0 \quad (3.3)$$

No caso da instabilidade radial (*birdcaging*), na condição de tubo inundado, a pressão deixa de oferecer uma barreira na expansão radial. Desta forma, a equação completa pode ser reescrita como:

$$\Pi(a) = U_{tração}(a) + U_{fita}(a) \quad (3.4)$$

Neste trabalho, em particular, a pressão externa não é considerada em meio aos carregamentos. Todavia, a fita de alta resistência inicia a simulação em uma situação de interferência. Sendo assim, um estrangulamento ocorre no tubo desde o início. Este efeito é similar a uma pressão aplicada.

A instabilidade lateral, por sua vez, depende apenas da deflexão do arame da armadura e a equação 3.4 fica reduzida a:

$$\Pi(a) = U_{tração}(a) \quad (3.5)$$

Em seguida, foi deduzido o sistema de equações que rege o problema de instabilidade, tanto radial quanto lateral. Ainda com relação à equação (3.4), deve se notar que esta é resultado de a adoção de uma hipótese forte. O trabalho apresentado nesta tese mostra que a instabilidade

lateral é influenciada por vários fatores. Nos casos onde foi reportado o modo lateral, de fato, foi observada a deflexão do arame, todavia, junto com ela foram observados efeitos nas outras camadas que contribuíram para a instabilidade. Vale ressaltar que o sistema completo não foi apresentado no artigo.

Entre os resultados apresentados, foi mostrada a influência que a fita anti-*birdcage* tem nos dois tipos de instabilidade. No caso de instabilidade radial, seu efeito é conhecido por aumentar a resistência radial do tubo e inibir o modo de falha, ao menos no princípio. No caso da instabilidade lateral, o efeito é diferente. Isso pode ser mais facilmente compreendido ao observar a Figura 3-33. Na ausência da fita, por causa da folga existente entre as camadas adjacentes, um tendão da armadura de tração pode sofrer uma rotação, reduzindo o seu momento de inércia na direção circunferencial. A fita reduz essa folga e, consequentemente, dificulta a rotação do tendão.

Figura 3-33 - Efeito da fita na flambagem lateral da armadura. Extraído de: Tan et al (2006).

De forma intrigante, este efeito da torção do tendão não foi observado nos modelos numéricos apresentados neste trabalho. Dentre as inúmeras análises paramétricas realizadas, foram incluídas algumas sem a fita de alta resistência. Nestes casos, o modo de instabilidade foi sempre radial. Além disso, o efeito da torção pode ter uma representatividade maior quando se considera o efeito do atrito alto. Isso porque a rotação reduz a superfície do tendão em contato com as camadas adjacentes e diminui o efeito das forças de atrito, cuja importância é significativa na instabilidade.

Em Zhu et al. (2014), é apresentada uma aplicação prática do modelo para uso e verificação de normas da API. Um aspecto interessante é a discussão do critério de instabilidade da norma, que caracteriza a situação ou risco de instabilidade quando a folga entre uma das armaduras e a camada adjacente é superior a meia espessura de tendão. Ensaio

DIP foram feitos para validar este modelo, todavia, estes foram infrutíferos e não foi possível observar a instabilidade.

Uma observação pertinente a ser feita com relação a este modelo é o tratamento dado ao atrito entre as camadas. O atrito é levado em conta de duas formas diferentes: sem escorregamento (solução geodésica) e com escorregamento (solução loxodrômica). Neste caso, não existe um valor intermediário. Isso é uma abordagem recorrente em modelos analíticos, devido a grande dificuldade que se tem em programar a condição *stick/slip* do atrito.

Com outro modelo bastante notável, Østergaard et al. (2012) atribui a causa da instabilidade lateral a três fatores:

- Compressão axial no tubo vazio (efeito de *endcap*);
- Ciclos de flexão ocasionados por correntes marítimas, ondas ou movimento da unidade de superfície;
- Ruptura da camada externa, que gera condições favoráveis à instabilidade. A pressão externa contribui para aumentar as forças de atrito atuantes nos tendões. Este atrito é um parâmetro fundamental para a ocorrência de instabilidade lateral.

Com relação ao mecanismo que governa o fenômeno, foi observado pelos autores que a interação complexa entre as camadas causa cargas compressivas mais altas nos tendões da armadura interna. A diferença entre o número de tendões da camada interna e da camada externa é apontada como uma das causas desta diferença de tensão. Depois disso, uma carga de momento fletor é aplicada.

Os arames migram de uma configuração de hélice curvada para um novo estado de equilíbrio. Esta nova configuração compromete a capacidade da armadura interna de suportar a carga. Nesta situação, cargas de torção e de flexão se acoplam e o tubo sofre um giro em torno do próprio eixo (*twist*). Este giro acaba causando maior compressão na armadura de tração interna, o que pode resultar em *gaps*, plastificação e finalmente: instabilidade.

O modelo apresenta resultados de instabilidade lateral comparáveis aos experimentos citados nas referências do próprio artigo. Todavia, foi observada uma limitação com relação ao modelo de atrito adotado. Vaz e Rizzo, (2011) chamam atenção para a importância do atrito na instabilidade da armadura de tração. Mas no caso do modelo analítico apresentado, o atrito é considerado inexistente entre os tendões.

Este mesmo tratamento é dado para o atrito em Sævik e Ji (2014). Neste artigo, é apresentado um modelo analítico para flambagem transversal da armadura de tração. A compressão no tubo é atribuída ao que os autores denominam *true wall compressive axial force*. Esta força pode ser entendida como um efeito de *endcap* semelhante ao apresentado no artigo anterior.

O modelo em si é construído baseado nas equações de vigas curvas de Love sofrendo o efeito da flambagem de Euler. No final, é obtido um sistema de equações diferenciais que é linearizado. Portanto, este modelo é linear. Apesar disso, os autores mencionam que, devido aos grandes deslocamentos envolvidos, os tendões da armadura podem sofrer plastificação (algo que poderá ser observado no resultado desta tese). Uma vantagem que pode ser observada, em relação ao modelo anterior, é a possibilidade de se incluir curvatura nos tubos analisados.

O programa comercial BFlex foi usado como base de comparação para os resultados obtidos. Para tal, foi testada uma configuração com apenas quatro tendões de armadura. O carregamento é aplicado em duas etapas: aplicação da pressão, seguido de curvatura. Foi reportada uma boa correspondência com o modelo do BFlex, levando se em conta uma série de critérios arbitrários. Todavia, houve uma divergência na rotação dos tendões e na carga crítica. Isso é atribuído pelos autores a uma divergência no modelo de atrito.

Um ponto notável deste artigo é uma explicação detalhada sobre o porquê da armadura de tração interna ser mais solicitada e, por consequência, sofrer instabilidade antes da externa:

1. Compressão é aplicada;
2. Armadura externa expande radialmente devido ao efeito mola;
3. Surgimento de um *gap* entre as armaduras interna e externa;
4. A camada externa mantém o contato com a fita de Kevlar®. As forças de atrito auxiliam na contenção do deslocamento lateral dos tendões;
5. A camada interna não conta com este atrito, portanto, ela é livre para deslizar tangencialmente.

Modelos analíticos como este apresentam inúmeras vantagens. Dentre elas, pode se citar a rapidez em que se obtêm resultados e a sua alta representatividade no regime linear. Por outro lado, a implementação de tais modelos requer a adoção de uma série de hipóteses que acabam limitando a sua aplicação. Um dos efeitos que acaba sendo negligenciado nestes modelos é o atrito. Neles, esta importante não linearidade é considerada de forma binária, através das soluções loxodrômica e geodésica.

Neste âmbito, os modelos numéricos se mostram superiores, dada a sua capacidade de levar em conta as inúmeras não linearidades, presentes nos sistema real. Em muitos casos, tais efeitos tornam a simulação menos ágil e podem parecer supérfluos. Todavia, as informações que podem ser obtidas com tais modelos, em especial quando se estuda os efeitos destas não linearidades pode contribuir de forma significativa com os modelos analíticos. Tais contribuições vêm na forma de novas hipóteses, que simplificam os modelos ou até mesmo a confirmação de hipóteses já utilizadas. Neste caso, um modelo numérico completo assume a função do tão necessário paradigma.

4 O Modelo de Elementos Finitos

O conteúdo apresentado nas partes que seguem é o resultado de um trabalho que se iniciou em 2011, com o processo de familiarização com o *software*. Para maior objetividade, apenas os resultados mais importantes e as principais lições aprendidas serão comentados neste capítulo.

4.1 O *software* Abaqus

O Abaqus foi o pacote comercial de Elementos Finitos selecionado para a realização deste trabalho. Este foi escolhido devido a uma série de atributos que serão apresentadas a seguir:

1. ***Solver Explícito:*** Vale ressaltar que a instabilidade de estruturas é um fenômeno dinâmico que ocorre em um espaço de tempo curto. Desta maneira, para uma reprodução fiel do problema, uma análise dinâmica deve ser usada. Devido ao alto grau de não linearidade envolvido no problema, um *solver* explícito torna-se essencial. Neste caso, o Abaqus Explicit é uma das ferramentas mais usadas em trabalhos publicados no meio *offshore*, em especial, quando se deseja acompanhar a estrutura no pós-flambagem;
2. ***General Contact:*** O contato é uma não linearidade que impõe uma série de problemas em uma análise de elementos finitos. Estes problemas começam no pré-processamento, quando se tem que definir os pares de contato. Individualmente, estas regiões precisam ser destacadas e propriedades especiais a elas atribuídas. Este procedimento é simples quando se têm poucas regiões de contato, todavia, quando estas regiões superam o número dezenas,

alguma automatização é desejável. O Abaqus conta com um algoritmo de detecção automática de pares de contato denominado *General Contact*. Este algoritmo simplifica, inclusive, a parametrização dos contatos;

3. **Interface Gráfica:** Uma interface gráfica “amigável” é um recurso valorizado em um programa de elementos finitos, em especial para usuários em adaptação. Neste caso, a interface do Abaqus apresenta os principais controles e ferramentas de manipulação do modelo de uma forma intuitiva e simplificada;
4. **Paralelização:** Quando se trabalha com um grande número de graus de liberdade, o tempo de simulação tende a ser alto, especialmente se um *solver* explícito é usado. O Abaqus realiza os cálculos da simulação de tal forma que o uso de mais processadores incorre na redução de tempo de processamento. Isso significa que, até um determinado limite, o uso de mais núcleos de processamento aumenta a eficiência da simulação. A Figura 3-23 mostra os efeitos da paralelização em uma análise com o Abaqus Explicit, com até 64 processadores.

Devido aos fatores apresentados anteriormente, decidiu-se que seria vantajoso investir no aprendizado e no uso do Abaqus para a realização deste trabalho. Para tal, uma parcela considerável de tempo foi investida neste processo antes de se iniciar a construção do modelo.

4.2 O uso de *Scripts* em *Python*

Apesar das inúmeras vantagens da interface gráfica do *software*, a parametrização requer o uso de *scripts* para estabelecer um controle mais rigoroso sobre os comando executados pelo programa. O Abaqus, assim como a maior parte dos programas comerciais de elementos finitos, permite que um usuário mais avançado tenha a possibilidade de inserir

linhas de código dentro do programa. Estes trechos de código permitem acesso a comandos avançados ou até mesmo comandos especiais, ainda não implementados pelo fabricante do *software*, inacessíveis via interface. Outra aplicação prática é a possibilidade de se parametrizar um modelo.

Quando se trata de ferramenta de verificação de tubos flexíveis, devido à natureza única de cada projeto, a parametrização é praticamente uma necessidade. O projeto destes tubos pode variar em inúmeros aspectos, desde o diâmetro interno da carcaça, até o número de arames da armadura de tração. Além disso, pode-se precisar alterar propriedades de material e acrescentar ou excluir camadas na construção do tubo. Por estes motivos, um modelo como o proposto por este trabalho deve ser paramétrico, de tal forma que estes fatores possam ser modificados sem a necessidade de uma reconstrução completa e manual do modelo.

Os trechos de código podem ser inseridos através de um console, visível na própria interface do programa ou podem ser agrupados formando *scripts*. Para tal, a linguagem utilizada pelo Abaqus é o *Python*. Além dos recursos da própria linguagem, o programa permite a utilização de pacotes de ferramentas projetadas exclusivamente para interface com o Abaqus. Desta forma, é possível reproduzir qualquer comando encontrado na interface usando programação orientada a objeto. No estado atual, o modelo foi parametrizado nas seguintes variáveis:

- Diâmetro do núcleo rígido;
- Número de arames da armadura de tração externa;
- Número de arames da armadura de tração interna;
- Altura do arame retangular da armadura de tração;
- Largura do arame retangular da armadura de tração;
- Espessura da capa polimérica interna;
- Espessura da fita de alta resistência;
- Ângulo de assentamento da armadura de tração externa;
- Ângulo de assentamento da armadura de tração interna;
- Folgas entre as camadas;
- Comprimento da amostra (em passos da armadura de tração);
- Coeficiente de atrito entre as camadas.

4.3 Primeira versão do modelo do *Outer Ring*

No início deste trabalho, modelos rudimentares foram construídos para se estudar a maneira como programa de elementos finitos lidava com as não linearidades contempladas neste projeto. Após esta etapa de desenvolvimento, iniciou-se o trabalho de construção do modelo de tubo flexível, uma camada de cada vez. Até se chegar ao modelo denominado *Outer Ring*.

Os modelos da família *Outer Ring* (Figura 4-1) representam um novo avanço no desenvolvimento do trabalho. O mesmo surgiu da ideia de se modelar o tubo flexível a partir das camadas mais externas. Estes modelos apresentam o realismo visto nos modelos de tubo completo somado aos conhecimentos adquiridos nos modelos rudimentares. Até o presente momento estão sendo criadas novas versões deste modelo, cada qual com características que as tornam superiores aos modelos anteriores.

Figura 4-1 - O modelo do *Outer Ring* e as suas camadas

Entre a versão inicial e a última, o número de camadas é o mesmo, o modelo consiste no conjunto da capa plástica externa, fita de alta resistência, duas camadas de armadura de tração e do núcleo rígido. As cinco camadas que compõem o modelo já são suficientes para constituir um modelo de instabilidade de armadura. Cada camada deve ser descrita em mais detalhes nas seções seguintes.

4.3.1 Capa Polimérica Externa

O modelo do tubo foi construído de fora para dentro, logo a primeira camada a ser modelada foi a capa polimérica externa. Apesar de possuir uma espessura razoável (entre 5 e 8 milímetros), o raio interno é relativamente grande. Por este fato, esta camada pode ser modelada considerando a hipótese de tubo de parede fina. Desta forma, uma malha estruturada de elementos de casca foi utilizada para discretizar esta camada.

Os elementos usados foram cascas de primeira ordem com integração completa e precisão de segunda ordem. Na biblioteca do Abaqus, tais elementos atendem pela codificação “S4”. Estes são os elementos de casca mais robustos da biblioteca, recomendados para casos onde se esperam grandes deformações. Com relação ao comportamento fora do plano destes elementos, a rigidez da seção é calculada no decorrer da simulação. Este cálculo é feito através da quadratura de Gauss, usando três pontos equidistantes ao longo da espessura (Figura 4-2).

Figura 4-2 - Pontos de integração ao longo da espessura do elemento. Extraído de: Simulia (2011)

As propriedades de material são um parâmetro do modelo, todavia, o modelo utilizado para esta camada é multilinear-plástico. Neste caso, a curva de tensão e deformação do material é discretizada e inserida no programa. O primeiro par tensão/deformação define o comportamento linear elástico. Os pontos subsequentes definem a plasticidade, até o ponto em que o comportamento é assumido como perfeitamente plástico.

4.3.2 Fita Estrutural de Alta Resistência

Depois da capa polimérica externa, a camada seguinte é a fita estrutural de alta resistência. Este nome é dado devido às características excepcionais do material que constitui a fita. A tensão de escoamento do material da fita é muitas vezes superior à da capa polimérica externa, superando até mesmo as camadas metálicas do tubo (Figura 4-3). Neste

caso, uma malha semelhante a da capa polimérica externa foi utilizada, com o adicional de ser mais discretizada.

Figura 4-3 – O Kevlar® é um material próprio para uso na fita estrutural. Extraído de: Zhu et al. (2011)

O elemento escolhido foi o mesmo S4 utilizado na capa polimérica, só que em maior número. A espessura desta camada é consideravelmente menor do que as outras e o modelo de material pode trazer uma grande influência aos resultados. Para os primeiros testes, o modelo utilizado para o material da fita de alta resistência é semelhante ao usado na capa polimérica, diferindo nos valores de escoamento e na topologia da curva. Na primeira versão, o material é isotrópico, mas para as análises paramétricas, uma nova versão com material ortotrópico foi utilizado. Suas propriedades serão exibidas em uma seção posterior deste trabalho.

4.3.3 Armaduras de tração (Interna e Externa)

Envolvidas pela fita estrutural e pela capa polimérica externa, estão as armaduras de tração. Estas são formadas por conjuntos de arames de seção retangular dispostos em hélices. O número destes arames depende das características geométricas do tubo, ou seja, do diâmetro da camada sobre a qual eles estão assentados e da carga a ser suportada. O ângulo de assentamento varia com a camada, buscando uma armadura balanceada ao torque. Isso significa que, uma vez que seja aplicado um carregamento de tração na armadura, o momento de torção resultante no engaste deve ser nulo. Uma camada de armadura deve compensar o torque da outra, por este fato, os ângulos de assentamento costumam ter sinais opostos. No caso deste trabalho, a importância desta camada é indiscutível, visto que é nos arames desta camada que se detectam os efeitos da instabilidade.

Inicialmente, se propôs a discretização dos arames utilizando elementos de viga não lineares. Estes apresentam uma vantagem em termos de tempo computacional e estruturação de malha, ou seja, é possível fazer uma malha estruturada, com boa qualidade e com maior eficiência em termos de tempo de simulação. Entretanto uma grande desvantagem levou ao abandono desta ideia: o problema do contato.

Para se efetuar um estudo adequado da instabilidade da armadura, é necessário considerar todos os aspectos do problema. Desta forma, a geometria de cada arame, assim como a interação deste com as camadas vizinhas e outros arames devem ser levados em conta na modelagem. A Figura 4-4 mostra a maneira como o Abaqus lida com a situação de contato com vários tipos de elementos diferentes. Nota-se que, em torno do elemento de viga, foi criado o que o manual do programa chama de “aresta de contato”.

Figura 4-4 - Esquema de contato que envolve elementos de viga. Adaptado de: SIMULIA (2011)

As arestas de contato também foram citadas no trabalho de Le Corre e Probyn (2009). A Figura 3-1 mostra com mais clareza essa região de contato do elemento de viga. Essa região é uma solução encontrada pelo *software* para levar em conta a dimensão da seção transversal da viga na formulação de contato. Assim sendo, o programa define uma área cilíndrica que circunscreve a seção transversal da viga (independentemente do formato da seção), e aquela região passa a ser considerada superfície de contato.

Apesar de ser uma alternativa engenhosa em comparação com os contatos nó/superfície ou nó/nó mais usados em elementos de viga, no caso deste trabalho, elimina alguns efeitos importantes do arame. Um desses efeitos é a região ocupada por este arame, que seria muito maior do que a original, visto que o perfil é retangular. Outro contraponto desta abordagem é o fato de se perder o efeito da rotação do tendão, o qual, segundo autores citados na revisão, é importante na mecânica da instabilidade. Sendo assim, os tendões das armaduras de tração passaram a ser modelados através de elementos sólidos tridimensionais (Figura 4-5).

Figura 4-5 - Elementos sólidos tridimensionais de primeira ordem. Extraído de: Simulia (2011)

Para cada arame retangular da armadura, foi feita uma malha estruturada com dois elementos ao longo da espessura e outros dois ao longo da largura. Esta distribuição permite que os deslocamentos e as tensões sejam propriamente registrados em todas as direções. Os elementos em cada arame são hexaédricos de primeira ordem, com integração completa e controle de *hourglass*¹ (C3D8 na codificação do Abaqus). Tais elementos são fortemente recomendados para problemas que envolvem grandes deslocamentos e grandes deformações. O fato de serem lineares é compensado por uma maior discretização da malha. Para tornar possível a malha mapeada, nas extremidades de cada arame, foi cortada uma seção triangular, para a qual foram designados poucos elementos lineares prismáticos (C3D6).

¹ Um erro de mapeamento de deslocamentos em elementos que pode causar perda de rigidez no elemento e distorção excessiva do mesmo.

4.3.4 Núcleo Rígido

O núcleo rígido é a camada mais central do modelo. Esta consiste apenas em uma superfície cilíndrica discretizada. Uma malha estruturada foi construída em torno deste cilindro e cada elemento é rigidamente ligado a um “nó piloto” (Figura 4-6). Com este sistema, a superfície rígida não pode se deformar, todavia, ela pode sofrer movimentos de corpo rígido, caso o nó piloto não esteja corretamente restrito. Sendo assim, um nó foi criado na origem do sistema de coordenadas. A este nó, foi aplicada uma condição de contorno de engaste (todos os graus de liberdade com deslocamento nulo).

Figura 4-6 - Superfície rígida e discretizada, com seu nó piloto. Extraído de: Simulia (2011)

Este núcleo não possui massa ou inércia. O mesmo foi criado com a única finalidade de contenção de possíveis deslocamentos iniciais espúrios na direção radial das armaduras. Como as armaduras tendem a se abrir quando o tubo está sob compressão, a presença do núcleo rígido só vai alterar os resultados na situação pós-flambagem. É uma solução temporária, que permite simular cargas compressivas sem problemas com o modelo. Futuramente, o núcleo rígido deve ser substituído por um núcleo estrutural.

4.3.5 Condições de Contorno, Carregamentos e Contatos

O modo de falha que é objeto de estudo deste trabalho tende a ocorrer tanto em amostras de laboratório quanto em tubos flexíveis operando em alto mar. Neste contexto, duas possibilidades de condições de contorno são possíveis:

1. **Tubo infinito:** Permite simular um tubo contínuo por meio de um trecho de tubo usando acoplamentos e restrições de deslocamentos nas extremidades para representar a continuidade. Represente uma situação mais perto daquela do tubo em alto mar;
2. **Trecho de tubo:** Representação de uma amostra de testes, somente com restrições de deslocamento aplicadas (Figura 4-7).

Para este trabalho, a segunda opção foi selecionada. No entanto, se for escolhido um comprimento de amostra suficiente, tanto a abordagem (1) quanto a abordagem (2) devem levar aos mesmos resultados.

Figura 4-7 - Um dos lados do modelo foi engastado (camadas externas removidas para visualização da armadura de tração)

Em termos de condições de contorno, todos os nós nas duas extremidades do tubo foram restritos em todos os seus graus de liberdade. Esta restrição é aplicada individualmente, para cada nó. Com relação aos carregamentos, um deslocamento controlado (Figura 4-8) foi aplicado na direção axial em uma das extremidades do tubo. Este deslocamento foi aplicado para todos os nós da extremidade de todas as camadas, exceto para o núcleo rígido.

Figura 4-8 - Um deslocamento foi aplicado na direção axial, enquanto os outros graus de liberdade foram restritos

Todas as interações entre as camadas foram levadas em conta para este modelo. Para isso, o algoritmo *General Contact*, do Abaqus, foi empregado. Foi usado o método das penalidades para solução do problema. O atrito entre as camadas foi levado em conta através do modelo de atrito de Coulomb, cujo coeficiente de atrito foi alterado para alguns estudos de caso. As interferências iniciais e folgas foram ajustadas no início de cada simulação. Estes ajustes ocorreram durante a fase de acomodação, no início de cada simulação, através do algoritmo de inicialização de contato.

4.4 Simulação Explícita e Efeitos Dinâmicos

O Abaqus *Explicit*, foi utilizado para realizar as simulações deste trabalho. Este é capaz de capturar fenômenos dinâmicos como o *snapthrough*, usualmente associado a problemas de instabilidade. Além disso, o *Explicit* foi escolhido pelo fato de contar com um *solver* robusto, capaz de lidar com todas as não linearidades contidas no problema.

O método de diferenças centrais é utilizado para efetuar a integração das equações de movimento do problema. A principal característica de tal método é o fato de ser condicionalmente convergente, ou seja, a chance de convergência do método depende da dimensão do incremento temporal, o qual é estabelecido utilizando as seguintes equações (SIMULIA 2011):

$$\dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N = \dot{u}_{\left(i-\frac{1}{2}\right)}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)}^N \quad (4.1)$$

$$\dot{u}_{(i+1)}^N = u_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N \quad (4.2)$$

A variável $u_{(i)}^N$ é o deslocamento em um grau de liberdade qualquer durante um incremento de tempo i . O método é tido como explícito, pelo fato de o estado cinemático futuro do sistema $\dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N$ ser calculado utilizando informações do estado do incremento atual $\ddot{u}_{(i)}^N$ e anterior $\dot{u}_{\left(i-\frac{1}{2}\right)}^N$. O incremento de tempo Δt deve ser pequeno o bastante para garantir a estabilidade do método, caso contrário, a resposta temporal do sistema pode oscilar em amplitudes cada vez mais altas, por isso, se busca um incremento que obedeça a seguinte regra:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \quad (4.3)$$

onde ω_{max} é a maior frequência natural do sistema a ser simulado.

O Abaqus Explicit é particularmente eficiente em situações onde ocorre uma grande troca de energia em um curto período de tempo, como o impacto estrutural, por exemplo. O modelo deste trabalho não se encaixa nesta categoria, por isso, algumas providências foram tomadas para evitar efeitos dinâmicos indesejados na simulação:

- Além do critério do próprio método explícito, foi empregado o **controle de Time Step**, de forma a regular o tempo de incremento. Este controle fixa um valor de incremento máximo que seja pequeno o bastante para manter a energia cinética do sistema em níveis muito inferiores aos da energia interna. O uso adequado deste controle pode ser verificado através das curvas de energia do sistema, no pós-processamento;

Figura 4-9 - Curvas de energia interna (vermelha) e de energia cinética (azul/inferior) do modelo.

- A velocidade de aplicação da carga foi calculada para ser inferior à velocidade de propagação da onda elástica no modelo. Desta forma, é possível garantir uma aplicação quase estática do carregamento e a resposta da estrutura, nos primeiros instantes, é similar à resposta de uma análise estática.

No caso deste modelo, como apenas cargas compressivas estão sendo aplicadas neste estágio, a propagação da onda elástica foi considerada uniaxial. Segundo Braun (2002) a velocidade desta onda é dada por:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.4)$$

onde E é o módulo de Young, ou módulo elástico equivalente do tubo flexível, e ρ é a sua densidade. A equação 4.4 pode ser modificada para ser utilizada com as propriedades do tubo flexível na forma mais usual. Para tanto, convém utilizar a densidade como a razão entre a massa m do modelo e o seu volume V .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.5)$$

Substituindo a equação da densidade na equação 4.4, tem-se:

$$c = \sqrt{\frac{EV}{m}} \quad (4.6)$$

O volume, no caso de um tubo flexível, é o produto entre a área da seção transversal e o seu comprimento total. Assim sendo, a equação 4.6 pode ser reescrita como:

$$c = \sqrt{\frac{EAL}{m}} \quad (4.7)$$

A última alteração a ser feita remete ao fato de que, quando se trabalha com tubos flexíveis e cabos umbilicais, o uso da massa normalizada por unidade de comprimento (m') é mais usual do que o uso da massa total nos cálculos. Desta forma, basta dividir o dividendo e o divisor da equação 4.7 pelo comprimento da amostra de tubo. A operação resulta na equação final da velocidade de propagação da onda elástica usada neste trabalho.

$$c = \sqrt{\frac{EA}{m'}} \quad (4.8)$$

Para os estudos de caso iniciais do modelo, este valor foi calculado para um tubo que será mais bem descrito no capítulo que segue. A velocidade da onda foi calculada para duas situações distintas, com e sem a fita estrutural de alta resistência. Com isso, a Tabela 4-1 foi criada:

Tabela 4-1 - Velocidade de propagação da onda elástica

Modelo	Velocidade da Onda (m/s)
Sem a Fita	1535,69
Com a Fita	542,92

A carga compressiva pode ser inserida no Abaqus como uma curva de deslocamento em função do tempo. No caso, se esta aplicação for linear, tem-se um valor constante, uma taxa de carregamento. Com este valor em mãos e a velocidade da onda elástica (calculada pela

equação 4.8) é possível definir um “número de Mach”, que vai determinar o surgimento ou não de efeitos dinâmicos indesejados na simulação.

5 Testes do Modelo e Primeiros Resultados

Com a finalidade de testar o modelo criado, um tubo de 6 polegadas fictício, menos armado que um tubo real, foi usado para análises preliminares. Foram executadas mais de uma dezena de simulações diferentes cujos resultados são apresentados. Neste capítulo, as conclusões mais importantes serão mostradas na ordem cronológica em que foram obtidos.

5.1 Descrição do Tubo Utilizado

Conforme dito anteriormente, o modelo não contempla todas as camadas do tubo flexível, as camadas relativas ao núcleo estrutural do tubo (carcaça intertravada, capa polimérica interna e armadura de pressão) são representadas pelo núcleo rígido. As propriedades geométricas básicas para todas as camadas podem ser encontradas na Tabela 5-1 e na Tabela 5-2.

Nota-se que o número de arames é menor do que o encontrado em um tubo padrão de 6 polegadas. Isso foi feito para aumentar a eficiência computacional do modelo para os primeiros testes (mais arames foram acrescentados na última versão do modelo). O ângulo de assentamento dos arames foi calculado para garantir o equilíbrio de momento de torção, no caso das extremidades do tubo fixas.

Tabela 5-1 - Propriedades geométricas do tubo (parte 1)

Camada	Material	Dimensões (mm)	Espessura (mm)
Núcleo Rígido	-	-	-
Armadura de Tração 1	Aço Carbono	8 x 4	-
Armadura de Tração 2	Aço Carbono	8 x 4	-
Fita Estrutural	Kevlar® 49	-	0,2
Capa Externa	HDPE	-	7

Tabela 5-2 - Propriedades geométricas do tubo (parte 2)

Camada	Número de Arames	Ângulo de Assentamento (°)	Diâmetro Externo (mm)
Núcleo Rígido	-	-	198,5
Armadura de Tração 1	50	36	206,5
Armadura de Tração 2	52	-38	214,5
Fita Estrutural	-	-	214,9
Capa Externa	-	-	228,9

Três modelos de material diferentes foram adotados para este tubo flexível (Tabela 5-3). O material metálico das armaduras de tração é bilinear, elastoplástico com encruamento isotrópico (equivalente a um aço carbono). O material da capa polimérica externa é um polietileno de alta densidade (*HDPE*) representado por uma curva de material multilinear e elastoplástico (Figura 5-1).

Para a fita de alta resistência, foi selecionado um tipo de fibra sintética de Aramida, conhecida pelo seu nome comercial “Kevlar®”. Mais especificamente, o Kevlar® 49®, fabricado pela DuPont (Figura 5-2). As suas propriedades do modelo isotrópico foram extraídas de Zhu et al. (2011). Neste artigo, os autores levantam as propriedades do Kevlar® 49® para diversas velocidades de aplicação de carga diferentes, o que é conveniente para este trabalho. Assim como o *HDPE*, o modelo de material do Kevlar® é multilinear e elastoplástico. A curva usada como referência vem de uma amostra ensaiada no LMO.

Tabela 5-3 - Propriedades gerais dos materiais

Camada	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão de Escoamento (MPa)	Módulo Tangente (MPa)
Armadura de Tração	207	0,3	650	1172,58
Fita Estrutural	120	0,36	1310	-
Capa Externa	0,571	0,45	20,74	-

Vale ressaltar que, para as curvas de material do polietileno e do Kevlar®, o material é elástico no primeiro trecho reto. Do segundo ponto em diante, o material é plástico (deformações permanentes). Após o final da curva, o material se comporta como perfeitamente plástico. Como o modelo de Abaqus foi construído usando uma macro em Python, as propriedades de material também são parametrizadas e podem ser facilmente modificadas sem que seja necessário uma reconstrução do modelo via interface gráfica.

Figura 5-1 - Curva de material para o HDPE

Figura 5-2 - Curva de material para o Kevlar®

Com a finalidade de verificar a qualidade geral do modelo, em relação a um tubo flexível real, alguns testes básicos de consistência foram realizados. O modelo numérico foi comparado com outros dois modelos analíticos lineares. Estes estão implementados em ferramentas testadas e utilizadas para o projeto de tubos flexíveis na indústria. A comparação foi feita em termos de propriedades gerais da seção, como a rigidez axial. Os resultados desta comparação podem ser vistos na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 - Comparação de rigidez axial de vários modelos

Modelo	Tração (MN)	Compressão (MN)
Abaqus	82,485	3,9318
UtilFlex	117,317	2,5845
PipeDesign	-	2,4542

O tubo usado para os testes da Tabela 5-4 não possui fita de alta resistência. Ela teve que ser removida devido a limitações dos modelos analíticos. Outro aspecto relevante é o fato de que os resultados para tração não estão disponíveis no PipeDesign. Este *software* não possibilita a inserção de uma camada de núcleo rígido, que é importante para os resultados de tração. Entretanto, a resposta à compressão é adequada.

Dado que o modelo do Abaqus conta com alto grau de não linearidade e considerando todas as hipóteses assumidas nos modelos analíticos, os resultados dos testes de consistência foram satisfatórios. Certamente tais testes não correspondem a uma validação completa do

modelo, mas mostram que o tubo construído no Abaqus é consistente com a realidade. Uma redução na diferença dos resultados deve ser obtida com a adição do núcleo estrutural, mais tendões nas armaduras de tração e coeficientes de atrito mais condizentes com a realidade.

5.2 Primeiros Resultados

Com os parâmetros apresentados na seção anterior, um modelo de tubo foi simulado com um carregamento compressivo. A carga foi aplicada a uma taxa de 400 milímetros por segundo, valor muito inferior à velocidade de propagação da onda elástica. As primeiras versões do modelo não possuíam a fita de alta resistência, a qual foi acrescentada para o estudo paramétrico inicial. As imagens de Figura 5-3 a Figura 5-6 mostram um dos resultados de uma das análises iniciais sem a fita de alta resistência.

Figura 5-3 - Vista isométrica do deslocamento radial da armadura

Figura 5-6 - Vista em corte do tubo, com destaque para a deformação radial excessiva da armadura de tração

Em uma primeira vista, o fenômeno observado tem as características geométricas de uma instabilidade radial de armadura, entretanto, este fato deve ser confirmado. Nota-se que o deslocamento radial da armadura ocorreu nas proximidades da região de aplicação do deslocamento compressivo. Este fato pode significar uma interferência da condição de contorno no resultado.

Apesar de ser uma possibilidade de resultado válido, existe o risco de que as tensões que causaram o fenômeno terem sofrido influência da região de aplicação de carga. Timoshenko (1951) afirma que, em regiões próximas à aplicação da carga, a forma de aplicação do carregamento causa distorções no estado de tensões de um ponto. Estas distorções tendem a se tornar irrelevantes à medida que se distancia da região de aplicação de carga. Esta afirmação, baseada no princípio de *Saint-Venant*, pode levar a uma invalidação dos resultados apresentados. Por este motivo, antes mesmo de se avaliar o estado de tensões do modelo, buscou-se uma solução para este problema.

5.3 Acréscimo da “Luva”

Para explicar o surgimento da possível instabilidade da armadura na extremidade do tubo, foram feitas duas hipóteses. A primeira possibilidade é a de que o aparecimento do fenômeno na extremidade do tubo seja causada por uma mera instabilidade numérica. Um

pequeno resíduo de forças em uma das iterações de equilíbrio do método de Newton-Raphson pode ser a perturbação necessária para que a armadura (fortemente solicitada) sofra uma instabilidade local. Neste caso, o resultado é de fato um caso de *birdcaging* e a sua ocorrência na extremidade é uma obra do acaso. É importante ressaltar que, neste modelo, não há qualquer tipo de artifício para induzir a instabilidade em uma determinada região, como imperfeições iniciais.

A segunda possibilidade é a de que o fenômeno seja influenciado por efeitos de borda, causadas pelas condições de contorno de engaste nas extremidades do tubo. Uma investigação mais aprofundada foi feita no sentido de verificar o estado de tensões nesta região específica, ao longo da aplicação do carregamento. De fato, algumas anomalias na distribuição de tensões foram observadas.

Foi verificado que tensões altas surgiam também na capa plástica externa. Pelo fato de o material ser um polímero, com baixa tensão de escoamento, a camada plástica externa apresentava rótulas plásticas na região próxima às extremidades do tubo. Estas rótulas serviam de “gatilho” para que as armaduras de tração, cujo estado de tensões era uniforme, sofressem a instabilidade naquela região específica. Para confirmar esta hipótese, foi separada uma região de 100 milímetros em cada extremidade do tubo (Figura 5-7). Estas regiões foram denominadas “luvas”.

Figura 5-7 - Áreas destacadas para a inclusão das luvas

A diferença das luvas para o restante do tubo reside no fato de que as propriedades de material das mesmas foram alteradas. Nestes locais, ao invés de elastoplástico, o modelo de material foi substituído por um perfeitamente elástico. Desta forma, por mais altas que fossem as tensões, não haveria plastificação da capa polimérica externa nas proximidades da condição de contorno. Testes foram executados e os resultados foram satisfatórios, de tal sorte que o fenômeno migrou para a região central do tubo (Figura 5-8).

Figura 5-8 – Deslocamento radial na armadura após a adição das luvas

5.4 Acomodação Inicial das Camadas

Uma vez que a influência da condição de contorno foi aparentemente eliminada do problema, a investigação do fenômeno tomou um novo rumo. O objetivo passou a ser o da averiguação de que o deslocamento radial é de fato resultado de uma instabilidade na armadura de tração. Um dos resultados pertinentes a esta análise é a curva de força aplicada *versus* o deslocamento axial. Para isso, a reação à compressão na direção axial do tubo foi extraída de todos os nós da região do engaste na versão do modelo que gerou a Figura 5-8. Este resultado pode ser visto na Figura 5-9.

Figura 5-9 – Reação axial no engaste para todas as camadas

O gráfico da Figura 5-9 mostra uma força de reação resultante que atinge um valor máximo (ponto 3). Após o máximo, a força decresce suavemente até um limite (ponto 4) e em seguida decresce bruscamente. Este súbito descarregamento é uma característica da instabilidade de estruturas. Logo no início, entre os pontos 2 e 3 nota-se que a resposta axial apresenta um comportamento bilinear. Mais informações sobre o que de fato ocorre nestas duas regiões podem ser obtidas observando-se a reação axial por camada. A primeira a ser analisada é a capa polimérica externa (Figura 5-10).

Figura 5-10 - Reação axial no engaste para a capa polimérica externa

O gráfico da Figura 5-10 foi marcado com os mesmos quatro pontos da Figura 5-9 e com um quinto ponto (designado P) que marca o momento do início da plastificação da camada. Nota-se que o mesmo comportamento bilinear é observado entre os pontos 1 e 2, só que, desta vez, a inflexão ocorre no sentido oposto. Aparentemente, a plastificação da camada polimérica não está relacionada com a mudança de comportamento do ponto 1. Após o ponto 2, o aspecto geral da curva é bastante semelhante ao da curva de reação global do modelo (Figura 5-9).

Figura 5-11 - Reação axial no engaste para a armadura de tração interna

A reação na armadura de tração mais interna pode ser vista na Figura 5-11. Assim como a reação global e a capa polimérica externa, o comportamento bilinear também é observado até o ponto 2. Um aspecto interessante desta curva é o fato de que o máximo da reação surge antes do ponto 3, ou seja, quando o máximo da reação global é atingido, a armadura de tração interna já está em descarregamento. Neste caso, convém analisar a curva de reação da armadura de tração externa, juntamente com esta.

Figura 5-12 - Reação axial no engaste para a armadura de tração externa

A curva da Figura 5-12 apresenta uma peculiaridade. No início do carregamento, a sua reação no engaste é de compressão. Este fato é bastante interessante, visto que se esperava que o carregamento compressivo devesse gerar uma reação trativa. Nesta situação, por causa de seu ângulo de assentamento mais fechado, a armadura de tração interna responde ao carregamento compressivo antes da externa e, por efeito de hélice, expande radialmente. Essa expansão radial faz com que a armadura interna empurre a armadura externa para fora (Figura 5-13), causando, em um primeiro momento, uma força resultante de tração que supera a compressão no engaste.

Figura 5-13 - Surgimento de forças trativas na armadura superior

Até o ponto 1, a resultante das forças nas duas armaduras de tração se anula (Figura 5-14) em termos de resposta a compressão. Isso faz com que, nos primeiros estágios da simulação, a capa polimérica resista a toda a carga compressiva. Desta forma, pode se concluir que o ponto 1 marca o instante em que as camadas do tubo começam a resistir de forma conjunta ao carregamento compressivo imposto. Este fato pode ser comprovado pela observação da armadura de tração interna. Os pontos marcados como P_i e P_e indicam o início da plastificação da armadura de tração interna e externa respectivamente.

Figura 5-14 - Reação axial no engaste para ambas as armaduras de tração

Com base nas figuras apresentadas anteriormente, pode se traçar o histórico da resposta das camadas do tubo a um carregamento compressivo. Do início da aplicação da carga até o ponto 1, tem-se um período de adaptação do sistema. Nesta região, os contatos começam a se estabelecer. As armaduras de tração se acomodam, fazendo com que a carga seja suportada pela capa polimérica externa. Do ponto 1 ao ponto 2, as armaduras passam a suportar uma parte da carga imposta. Isso gera um pequeno alívio na capa polimérica, todavia, próximo ao ponto 2, ela começa a escoar, causando uma mudança na resposta global do sistema.

Entre os pontos 2 e 3, com a camada polimérica escoando, a resistência ao deslocamento radial da armadura de tração externa é reduzida. Nesta região, abre-se um espaço entre as duas armaduras e a armadura externa passa a suportar a maior parte do carregamento. Próximo ao ponto 3, a carga máxima do sistema é atingida. Neste ponto, o

deslocamento radial das duas armaduras aumenta consideravelmente até que ocorre a plastificação das duas camadas. Ao chegar no ponto 4, uma perturbação numérica induz um grande deslocamento radial em ambas as armaduras em uma determinada região do tubo. Neste momento, instantaneamente, a armadura sofre uma instabilidade.

6 Estudo Paramétrico Preliminar

A partir do momento que se tem um entendimento razoável sobre o comportamento das camadas do tubo no modelo, novos testes podem ser executados. Como este modelo apresenta uma quantidade alta de não linearidades, é importante verificar como o programa lida com cada uma delas no modelo de tubo. Sendo assim, dois parâmetros diferentes foram selecionados para um estudo preliminar do modelo: o coeficiente de atrito e a existência ou não de uma fita de alta resistência. O objetivo primário deste estudo é investigar a influência desses dois fatores na mecânica da instabilidade dos arames da armadura. Com esta finalidade, foram criados quatro casos diferentes, que podem ser vistos na Tabela 6-1. Fora estes dois parâmetros, o modelo usado foi exatamente o mesmo.

Tabela 6-1 – Casos selecionados para os testes preliminares

Nome do Caso	Fita Estrutural	Coefficiente de Atrito
A1	não	0,2
A2	não	0,0
B1	sim	0,2
B2	sim	0,0

O carregamento aplicado é um deslocamento axial compressivo em uma das extremidades do tubo, para todos os casos, com uma taxa de 400 milímetros por segundo. O tempo de simulação foi estipulado para um máximo de 0,4 segundos, o que possibilita um deslocamento máximo de 160 milímetros. Conforme os dados mostrados na seção 5.1, a amostra apresenta um comprimento de 1693 mm, sendo assim, a deformação máxima obtida seria de 9,45 %.

Todos os casos atingiram a convergência no tempo total previsto e foram pós-processados usando as ferramentas do Excel e do próprio Abaqus. Inicialmente, um sistema de coordenadas cilíndrico foi criado para auxiliar na visualização dos resultados. Desta forma, todos os resultados serão dados em função das coordenadas cilíndricas.

Os resultados foram avaliados para as armaduras de tração, capa polimérica externa e fita de alta resistência (quando disponível). Além da tensão equivalente de Von Mises e do deslocamento radial, as reações de engaste axiais foram registradas individualmente para cada camada e algumas combinações.

6.1 Resultados com Atrito e sem Fita Estrutural

O primeiro caso avaliado foi o do tubo com atrito entre as camadas $\mu = 0,2$ e sem a fita estrutural (caso A1). Nos primeiros estágios da compressão, tanto as camadas poliméricas quanto as camadas metálicas apresentaram um pequeno deslocamento radial. No instante imediatamente anterior à ocorrência da instabilidade, a capa polimérica externa assumiu uma forma similar a um modo de instabilidade de casca (Figura 6-1). Nesta situação, os deslocamentos radiais atingiram a ordem de 30 milímetros.

Figura 6-1 - Deslocamento radial na capa polimérica externa, momentos antes da instabilidade

Embaixo da capa polimérica externa, ambas as armaduras de tração assumiram uma forma similar (Figura 6-2). É importante ressaltar que as tensões na armadura de tração estavam acima do limite de escoamento, logo, em regime plástico imediatamente antes da

súbita mudança geométrica. A capa polimérica externa também superou o seu limite de escoamento em algumas regiões antes da ocorrência da instabilidade.

Figura 6-2 - Tensão de Von Mises para as armaduras de tração, momentos antes da instabilidade

Assim que a carga limite foi atingida, a armadura de tração subitamente mudou de forma para aquela que é usualmente reportada em casos de *birdcaging*. Esta nova geometria pode ser descrita como um grande deslocamento radial da armadura que se limita a uma determinada região do comprimento do tubo. Vale ressaltar que nenhuma imperfeição inicial ou perturbação foi acrescentada no modelo. Devido a esta escolha, o fato de que a instabilidade tenha ocorrido no meio do tubo é provavelmente devido a uma perturbação numérica.

Em termos de tensões, uma redução substancial foi observada em ambas as camadas de armadura de tração, com exceção da região de instabilidade, que sofreu deformação plástica em grande escala. A capa polimérica externa acompanhou a armadura de tração, na forma de *birdcage*, e apresentou o mesmo comportamento em termos de acúmulo e alívio de tensão. A força de reação foi medida na região do engaste e os resultados podem ser vistos na Figura 6-3. Os pontos destacados e numerados da curva marcam a ocorrência do início do escoamento para cada camada do tubo. O número 1 representa o escoamento da capa polimérica externa, 2 é a o da armadura de tração interna e 3 é o da armadura de tração externa.

Figura 6-3 - Curva de reação axial em função da deformação para o caso A1

6.2 Resultados sem Atrito e sem Fita Estrutural

O atrito foi completamente removido para o estudo de caso A2. Por causa desta modificação, o comportamento da estrutura é drasticamente alterado, até o momento em que os arames da armadura começam a se rearranjar. As figuras Figura 6-4 a Figura 6-6 mostram

a sequência de formas assumidas pelos tendões das armaduras de tração, juntamente com a distribuição de tensões, em cada momento.

Figura 6-4 - Tensão nos arames das armaduras antes do início do rearranjo

Figura 6-5 - Tensão nos arames das armaduras de tração logo após a carga máxima

Pode se notar, observando a Figura 6-4, que ambas as armaduras de tração estavam no regime elástico. Logo após os tendões repentinamente iniciarem o escorregamento lateral, ambas as armaduras de tração iniciam o escoamento. As armaduras são seguidas pela capa polimérica externa, que apresenta uma pequena deformação durante o deslocamento do tendão. Após a estrutura assumir a nova configuração de equilíbrio, os tendões começaram a se deslocar na direção radial, no sentido de expansão. A Figura 6-6 mostra um espaço considerável entre as armaduras de tração e o núcleo rígido.

Figura 6-6 - Tensão nos arames da armadura em seu arranjo final

Naturalmente, este estudo de caso não representa de forma exata nenhuma situação de operação de um tubo flexível, uma vez que a ausência de atrito é uma situação absolutamente hipotética. Mesmo a inclusão de fitas anti-atrito entre as armaduras não é capaz de remover por completo a fricção entre as camadas. Além disso, se houvesse mais tendões em ambas as armaduras de tração, o espaço para deslizamento seria eliminado, impossibilitando o rearranjo. Por outro lado, a importância deste estudo de caso reside no fato de mostrar a influência do coeficiente de atrito sobre o comportamento geral dos arames da armadura de tração.

De forma similar ao caso anterior, a força de reação foi medida e plotada em uma curva. A Figura 6-7 mostra a reação axial no engaste em função da deformação axial do tubo. Neste caso, só há dois pontos destacados. O número 1 mostra o momento em que ambas as armaduras de tração começam a escoar. Pouco depois, o número 2 mostra o momento em que a capa polimérica externa começa a escoar. Nota-se que, quando a força máxima de reação é atingida, todas as camadas estão em regime elástico.

Figura 6-7 - Curva de reação axial em função da deformação para o caso A2

6.3 Resultados com Atrito e com Fita Estrutural

Para o terceiro estudo de caso (B1), uma camada de fita estrutural de alta resistência é adicionada ao modelo de tubo flexível. O coeficiente de atrito para este caso foi restaurado como 0,2. A fita é colocada entre a armadura de tração externa e a capa polimérica de forma a envolver a armadura com um pequeno aperto. Este aperto é resultado da interferência inicial e causa tensão na direção circunferencial desde o primeiro momento.

Pouco antes do surgimento dos grandes deslocamentos radiais que se assemelham a um caso de *birdcaging*, todas as camadas já estavam em regime de deformações plásticas. A capa polimérica externa foi a última camada a escoar, pouco antes do súbito deslocamento radial das armaduras. A Figura 6-8 mostra que as tensões na fita estrutural estavam muito altas, porém, com uma distribuição homogênea, com exceção da região de fronteira entre a parte elastoplástica e a luva.

Figura 6-8 - Distribuição de tensões na fita estrutural, pouco antes da carga máxima

Nas armaduras de tração (Figura 6-9), a distribuição de tensões é homogênea também. Todavia, na região localizada abaixo da fronteira da luva na fita de alta resistência, as tensões estavam nos seus níveis mais baixos. O súbito deslocamento radial ocorreu precisamente neste local do tubo. O resultado pode ser visto na Figura 6-10.

Figura 6-9 - Tensão nas armaduras de tração imediatamente antes da carga limite

Diferentemente do primeiro caso, a aparição da forma de *birdcage* na região próxima à extremidade do tubo não foi uma coincidência. A fronteira entre a região elastoplástica e a luva teve alguma influência no fenômeno. O enrugamento na fita de alta resistência comprimiu as armaduras de tensão em dois lugares diferentes, causando a perturbação

necessária para a aparição de um grande deslocamento radial. Todavia, pode se notar pela distribuição de tensões, que a fita estrutural apresenta valores acima da tensão de escoamento.

Figura 6-10 - Tensão nas armaduras de tração imediatamente depois da carga limite

O gráfico da reação de força pela deformação axial no engaste mostrado na Figura 6-11 resume este estudo de caso. O ponto destacado 1 marca o início do escoamento da fita estrutural. Os números 2 e 3 marcam o início da plastificação para as armaduras de tração interna e externa, respectivamente. Finalmente, o número 4 indica o escoamento na capa polimérica externa.

Figura 6-11 - Curva de reação axial em função da deformação para o caso B1

6.4 Resultados sem Atrito e com Fita Estrutural

O último estudo de caso é aquele em que o atrito foi removido e a fita de alta resistência foi mantida (caso B2). O comportamento no início da curva é muito similar ao caso A2. Todas as camadas ainda estão no regime elástico antes de os tendões iniciarem o súbito escorregamento (Figura 6-12). Os contatos sem atrito permitem um escorregamento circunferencial dos tendões. O amplo espaço disponível entre os arames contribui para este movimento (certamente isso não ocorreria em um tubo com o número adequado de arames, uma vez que o esse espaço seria muito pequeno).

Figura 6-12 - Tensão nas armaduras de tração antes do início do rearranjo

Um primeiro pico de força de reação é atingido pouco antes do início do escorregamento em grande escala dos tendões. Depois deste evento, um alívio geral de tensões é observado nas camadas de armadura. Entretanto, a fita de alta resistência está sob altas tensões circunferenciais e inicia o escoamento. A fita de alta resistência é a primeira camada a escoar neste caso, assim como no anterior. A Figura 6-13 mostra as tensões nos tendões logo após o primeiro pico, durante a translação.

Figura 6-13 - Tensão nas armaduras de tração logo após o primeiro pico

Durante a translação dos tendões, a armadura de tração interna inicia o escoamento seguida imediatamente pela armadura de tração externa e pela capa polimérica externa, nesta ordem. A Figura 6-14 mostra a distribuição de tensões nas armaduras com os arames no seu estado rearranjado. Neste momento, todas as camadas já estão plastificadas. Neste estágio, os tendões não podem mais se deslocar na direção radial, como no caso A2.

Figura 6-14 - Distribuição de tensões dos tendões rearranjados

Impedidos pela fita de se mover radialmente, os tendões agrupados iniciam um processo de flambagem. A sua forma final em muito se assemelha à de uma instabilidade lateral de armadura de tração (Figura 6-15). Este tipo de resposta é o que se pode esperar de um tubo completo com mais tendões do que este modelo, uma vez que a flambagem ocorreu

sem que houvesse espaço entre eles. Todavia, este ainda se trata de um cenário irreal para um tubo típico, visto que o coeficiente de atrito é nulo. A Figura 6-15 mostra a forma final dos tendões agrupados.

Figura 6-15 - Distribuição de tensões dos tendões no pós-flambagem

A resposta do modelo é concatenada na Figura 6-16. O primeiro pico (ponto destacado 0) pode ser visto logo no início da curva e é seguido pelo ponto destacado 1, que marca o início do escoamento da fita estrutural. Os pontos 2 e 3 marcam o início do escoamento das armaduras de tração interna e externa, respectivamente. Novamente, a última camada a iniciar o escoamento é capa polimérica externa, marcada pelo ponto 4.

No ponto 4, os tendões já estão organizados no seu novo estado de equilíbrio, como pode ser visto na Figura 6-14. A curva de força de reação forma um patamar até o momento em que indica uma queda abrupta. É neste momento que os tendões vão da sua configuração rearranjada para a forma final pós-flambagem (Figura 6-15).

Figura 6-16 - Curva de reação axial em função da deformação para o caso B2

6.5 Comentários sobre os Testes Preliminares

Algumas lições foram aprendidas da observação crítica dos resultados e comentários apresentados na seção anterior. Com a finalidade de fazer comparações entre as quatro diferentes variantes do modelo, três critérios foram escolhidos: a carga máxima suportada por cada variante, a primeira deformação de escoamento de cada um e as curvas de reação axial pela deformação. Comparando a carga máxima e o primeiro escoamento de cada modelo, a tabela foi construída.

Tabela 6-2 - Comparação de resultados

Caso	Carga Máxima (kN)	Primeiro Escoamento (%)	Primeira Camada a Escoar
A1	162,241	2,60	Capa Externa
A2	81,811	2,13	Ambas armaduras de tração
B1	399,616	0,95	Fita estrutural
B2	132,114	0,71	Fita estrutural

A Tabela 6-2 mostra a diferença entre as cargas máximas suportadas por cada variante do modelo. O primeiro aspecto a ser notado é que o acréscimo da fita estrutural aumenta a carga máxima suportada. O coeficiente de atrito também aumenta a carga suportada, comparativamente com aqueles casos com atrito nulo e similar condição de fita estrutural. A tabela também mostra qual é a camada que escoa primeiro e a deformação do tubo no momento em que ocorre. Pode-se notar, também, que o atrito não nulo retarda o primeiro escoamento entre as camadas do tubo. A alteração da camada que falha também pode ser atribuída ao coeficiente de atrito (casos A1 e A2).

Com relação à resposta generalizada do sistema, esta foi alterada drasticamente com a alteração do coeficiente de atrito. Sem o atrito para limitar o movimento circunferencial dos tendões, eles se rearranjaram em uma nova condição de equilíbrio. Somente a partir deste momento, a fita de alta resistência influenciou o seu movimento.

Os tendões, no modelo A2, com pouco impedimento ao deslocamento radial, apresentaram uma expansão radial depois do rearranjo. Por outro lado, o acréscimo da fita estrutural restringiu os tendões no caso B2 de tal forma que uma flambagem ocorreu na direção circunferencial, de forma semelhante a uma instabilidade lateral de armadura. Por sua vez, as variantes do modelo A1 e B1, com um coeficiente de atrito 0,2, apresentaram um grande deslocamento radial dos tendões. A forma final das armaduras se assemelhou a um caso de *birdcaging*.

O local de ocorrência do deslocamento radial súbito mudou para esses dois casos. Uma vez que não houve qualquer tipo de indução artificial, a localização do fenômeno é determinada por fatores numéricos, como pequenos truncamentos e resíduos de força no equilíbrio. No caso A1, o fenômeno ocorreu no meio do tubo, ao passo que no caso B1, a ocorrência foi mais próxima da extremidade, devido a uma influência da luva.

A Figura 6-17 foi construída plotando todas as quatro curvas de força de reação na mesma escala. Uma observação cautelosa do início de cada curva mostra que os pares A1/A2 e B1/B2 apresentam o mesmo comportamento linear no início de cada análise. O momento de separação entre as curvas é o momento em que os tendões intensificam a velocidade de escorregamento circunferencial nos casos sem atrito.

Figura 6-17 - Força de reação versus a deformação axial para as quatro variantes do modelo

O número de casos ainda é pequeno para um resultado mais conclusivo. Todavia, nas seções finais deste trabalho, uma análise de atrito é feita com um espaço amostral maior. Como o novo modelo possui a fita de alta resistência, é possível traçar um paralelo entre os novos casos e os casos B1 e B2 e confirmar alguns dos comentários feitos nesta seção.

7 Análises paramétricas com o modelo completo

7.1 Novas Propriedades do Tubo

Uma vez constatada a eficiência deste tipo de modelo de tubo, iniciou-se o processo de atualização, que foi feito por etapas. A primeira fase leva em conta o número de arames.

A versão do modelo apresentada anteriormente foi de grande importância para a compreensão do comportamento dos arames quando sujeitos a compressão. Todavia, o número de arames ainda estava baixo em relação ao tubo flexível usual. Sendo assim, o número foi aumentado de 34 para 102 tendões, no total das duas armaduras (conforme a Tabela 7-1).

Tabela 7-1 - Propriedades geométricas das camadas

Camada	Número de Arames	Ângulo de Assentamento (graus)	Diâmetro do Tubo (mm)
Núcleo Rígido	-	-	198,5
Armadura Interna	50	36	206,5
Armadura Externa	52	-38	214,5
Fita de Alta resistência	-	-	214,9
Capa Externa	-	-	228,9

A segunda etapa do processo de atualização leva em consideração o modelo de material da fita de alta resistência. O Kevlar® 49® teve suas propriedades alteradas de isotrópica para transversalmente isotrópica. Os dados do comportamento transversal da fibra foram retirados de Burgoyne & Brown (1997).

Tabela 7-2 - Propriedades dos materiais do tubo

Camada	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão de Escoamento (MPa)	Módulo Tangente (MPa)
Armadura de Tração	207	0,3	650	1172,58
Fita de Alta Resistência (TP)	129	0,31	1310	-
Fita de Alta Resistência (L)	2,49	-	1310	-
Capa Externa	0,571	0,45	20,74	-

A Tabela 7-2 mostra as novas propriedades dos materiais das camadas. Nota-se que a fita de alta resistência foi dividida em duas partes. A primeira parte mostra as propriedades transversais (TP), ao passo que a segunda parte mostra as propriedades longitudinais (L). Após a tensão de escoamento, a fita se comporta conforme a curva da Figura 7-1, nas duas direções. Vale ressaltar que as propriedades de material foram inseridas em coordenadas cilíndricas.

Figura 7-1 - Curva de material da fita de alta resistência

Em termos práticos, estas modificações levaram a uma menor resistência longitudinal do tubo formado pela fita de alta resistência. Na compressão, sua resistência foi consideravelmente reduzida. Em certos casos, foi reportada uma distorção excessiva dos elementos desta camada devido a um enrugamento, o qual é de se esperar. Todavia, na direção radial, a fita manteve a sua função de conter a expansão das camadas de armadura.

Comparado com a versão anterior da fita de alta resistência, houve um avanço considerável. Com um material isotrópico, a camada se comportava de forma semelhante a uma fina casca metálica. A nova versão da fita apresenta um comportamento muito mais próximo a um tecido de malha. O aspecto do novo modelo pode ser visto na Figura 7-2.

Figura 7-2 - Aspecto da malha do modelo atualizado

Com as alterações na fita de alta resistência e o aumento no número de tendões de armadura, o modelo se aproxima mais do tubo padrão de seis polegadas. Uma vez verificada a consistência dos resultados preliminares, este modelo passa a ser usado para os testes com parâmetros.

7.2 Testes com Comprimento de Amostra

7.2.1 Descrição do Ensaio

O modelo de tubo flexível utilizado na primeira fase deste trabalho possuía dois passos de armadura de tração como comprimento de amostra. Levando em conta os ângulos de assentamento e diâmetros apresentados na Tabela 7-1, o comprimento da amostra pode ser estimado em cerca de 1690 milímetros. Tal comprimento é condizente com o dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica. Entretanto, nenhum dos trabalhos pesquisados justifica a escolha de tal comprimento ou até mesmo apresenta um estudo dos efeitos do comprimento da amostra nos resultados do modelo.

Além da ausência de um critério específico para a escolha do comprimento da amostra, outro motivador deste estudo foi a verificação da influência das condições de contorno no resultado da análise. Em muitos dos resultados apresentados com a versão

anterior do modelo, foi constatada a ocorrência da instabilidade nas proximidades da extremidade do tubo. Este fato levantou a um questionamento sobre a influência da condição de contorno e da luva nos resultados.

Para tal, foram construídos cinco casos distintos. A variação entre eles foi o comprimento da amostra, que vai de dois a quatro passos da armadura de tração. Um resumo destes casos pode ser visto na Tabela 7-3.

Tabela 7-3 - Casos para o estudo do comprimento da amostra

Nome do Caso	Número de Passos	Comprimento (mm)
L1	2	1693
L2	2,5	2116
L3	3	2539
L4	3,5	2962
L5	4	3386

Na maior parte dos casos, o deslocamento total prescrito não foi inteiramente aplicado. A partir do momento que a instabilidade ocorreu, a súbita perda de rigidez das armaduras causou um aumento na solicitação das outras camadas. Em especial, a fita de alta resistência começou a enrugar, uma vez que esta possui uma pequena rigidez axial devido ao material ortotrópico. Este efeito causou uma distorção excessiva nos elementos, interrompendo a simulação.

Entretanto, todas as simulações forneceram resultados de instabilidade até o ponto da pós-flambagem. Para o pós-processamento, os resultados foram avaliados em coordenadas cilíndricas em termos de tensões, deslocamentos e reações de apoio. Tais resultados foram avaliados para cada uma das camadas e para o conjunto.

7.2.2 Resultados

O primeiro caso analisado foi o da amostra com dois passos de comprimento (aproximadamente 1,7 metros). À medida que a compressão estava sendo aplicada, o “efeito mola” causou uma expansão radial no tubo. Tal expansão ocorreu de maneira uniforme até que a camada mais externa começou a apresentar os primeiros sinais de instabilidade. As armaduras de tração, todavia, ainda estavam na sua forma expandida radialmente (aproximadamente 12 milímetros em 250 milímetros de diâmetro). A Figura 7-3 mostra o

estado de tensões neste instante (fita de alta resistência e capa externa foram removidas para a visualização).

Figura 7-3 - Amostra de 2 passos de armadura, pouco antes de apresentar instabilidade. Tensões em MPa

Após atingir a carga limite, ambas as armaduras de tração sofreram uma expansão radial. Diferentemente da expansão que já ocorria por causa do efeito mola, esta ocorreu abruptamente e acarretou em uma perda de rigidez para todas as camadas. A forma assumida se assemelha a aquela normalmente descrita em casos de *birdcaging*, como pode ser visto na Figura 7-4. É importante ressaltar que o fenômeno ocorreu nas proximidades da extremidade do tubo, diretamente abaixo da fronteira entre a região denominada “luva” e a seção central do tubo. Uma vez que não foi colocada uma imperfeição no modelo, a luva pode ter uma influência no local da ocorrência da instabilidade.

Figura 7-4 - Amostra de 2 passos de armadura, após a instabilidade. Tensões em MPa

Em uma análise quadro a quadro, a impressão geral é a de que todas as camadas sofrem a instabilidade ao mesmo tempo. Entretanto, após verificar as reações de apoio para cada camada, nota-se que a armadura de tração externa começa a perder rigidez antes da armadura interna. O gráfico da Figura 7-5 mostra que a armadura externa é a primeira a atingir a carga crítica. Depois de alguns instantes, verifica-se a ocorrência da queda abrupta de rigidez para as outras camadas, com aproximadamente 3% de deformação axial imposta (encurtamento da amostra foi normalizado pelo seu comprimento total).

Figura 7-5 - Amostra de 2 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada

Finalmente, o gráfico da Figura 7-6 mostra a reação resultante no tubo. Os pontos destacados e numerados marcam o início da ocorrência de escoamento para cada camada. O número 1 corresponde à fita de alta resistência e o número 2 é a capa polimérica externa. O número 3 marca o início do escoamento para ambas as armaduras de tração, instantes antes da abrupta perda de rigidez que indica a instabilidade.

Figura 7-6 - Amostra de 2 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto

Para a amostra de tubo com 2,5 passos de comprimento (aproximadamente 2.1 metros), os resultados foram similares ao caso anterior. Uma vez iniciado o deslocamento axial imposto, o modelo começou a expandir radialmente, devido ao efeito mola nas armaduras de tração. Com o aumento da compressão, a capa polimérica externa começou a assumir formas características de instabilidade de casca. A Figura 7-7 mostra o tubo no instante imediatamente anterior à ocorrência de instabilidade. Nota-se que a forma já não é mais um cilindro perfeito. Esta alteração foi causada por mudanças na capa polimérica externa.

Figura 7-7 - Amostra de 2,5 passos de armadura, pouco antes de apresentar instabilidade. Tensões em MPa

De forma similar ao caso anterior, um grande deslocamento radial ocorreu no quadro seguinte. A Figura 7-8 mostra a ocorrência de instabilidade localizada perto da extremidade da amostra. Deste evento recorrente, é possível presumir que, mesmo com amostras mais compridas, a luva ainda tem influência no local de aparição da instabilidade. Em termos de tensões, a expansão radial súbita foi seguida por um alívio geral de tensões no tubo, exceto na região da instabilidade. Nesta região, especificamente, as tensões aumentaram.

Figura 7-8 - Amostra de 2,5 passos de armadura, após a instabilidade. Tensões em MPa

A curva de força de reação para cada camada pode ser vista na Figura 7-9. Neste caso, a armadura de tração externa é a primeira a perder rigidez, de forma similar ao primeiro caso. Com aproximadamente 3% de compressão axial normalizada, todas as outras camadas seguem a armadura externa e sofrem uma súbita perda de rigidez. É interessante observar que, na região pós-flambagem da curva, uma fração considerável da resistência axial é dada pela armadura de tração externa apenas.

Figura 7-9 - Amostra de 2,5 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada

O gráfico na figura Figura 7-10 mostra a reação axial de todas as camadas combinadas. Os pontos destacados mostram o início do escoamento para cada camada. Número 1 corresponde à fita de alta resistência, 2 a capa polimérica externa, 3 a armadura de tração interna e 4 a armadura externa de tração.

Figura 7-10 - Amostra de 2,5 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto

Sem qualquer mudança significativa no comportamento observada nos últimos dois casos, a amostra foi aumentada em meio passo de armadura de tração. A nova amostra, agora com 3 passos de armadura de comprimento, começa a mostrar uma resposta diferente.

No princípio, a compressão imposta causou uma expansão radial uniforme no modelo, a qual evoluiu para uma forma que se assemelhava a uma flambagem de casca, na capa externa. Desta vez, todavia, não houve uma expansão radial súbita. A instabilidade ocorreu, mas só foi observada após a remoção da capa polimérica externa e da fita de alta resistência . A amostra mais longa induziu um modo lateral de instabilidade de armadura de tração (Figura 7-11).

Figura 7-11 - Amostra de 3 passos de armadura. Instabilidade lateral na armadura de tração externa. Tensões em MPa

A remoção da armadura de tração externa da visualização mostrou uma armadura de tração interna ainda mais deslocada (Figura 7-12). Após uma revisão cautelosa dos resultados quadro a quadro, é possível constatar que as instabilidades na armadura externa e interna ocorreram em tempos ligeiramente diferentes.

Figura 7-12 - Amostra de 3 passos de armadura. Instabilidade lateral na armadura de tração interna. Tensões em MPa

A reação axial das camadas também foi medida para esta amostra. O gráfico na Figura 7-13 mostra uma perda de rigidez da armadura externa anterior à súbita queda de rigidez na armadura interna.

Figura 7-13 - Amostra de 3 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada

A Figura 7-14 mostra a reação axial para todas as camadas combinadas. Pode-se notar que a região pós-flambagem foi encurtada neste caso; isto ocorreu devido a uma interrupção na simulação. Uma vez que não havia um deslocamento radial para esticar a fita de alta

resistência, ela começou a enrugar. Estas rugas causaram uma distorção excessiva nos elementos e a subsequente interrupção na análise.

Os pontos destacados marcam o início do escoamento para cada camada. Assim sendo, o número 1 corresponde à fita de alta resistência, o número 2 à capa polimérica externa e o número 3 representa ambas as armaduras de tração interna e externa.

Figura 7-14 - Amostra de 3 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto

O quarto estudo de caso tem uma amostra de 3,5 passos de armadura de tração de comprimento (aproximadamente 3 metros). A resposta inicial à compressão do tubo apresentou similaridade em relação aos casos anteriores. A expansão radial devido ao efeito mola nas armaduras de tração e as formas de flambagem de casca na capa plástica externa foram reportadas neste caso.

As diferenças começaram a surgir durante a instabilidade. A Figura 7-15 mostra a armadura de tração interna sofrendo deslocamento lateral, indicando uma instabilidade lateral. Por outro lado, a armadura de tração externa apresentava apenas uma concentração de tensões nas proximidades da extremidade direita (Figura 7-16).

Figura 7-15 - Amostra com 3,5 passos de comprimento. Instabilidade lateral na armadura de tração interna. Tensões em MPa

No quadro seguinte, a armadura de tração externa apresentou um grande deslocamento radial na parte superior e algum deslocamento lateral na parte inferior, como pode ser visto na Figura 7-17. A armadura de tração interna também sofreu um grande deslocamento radial (em concordância com a armadura externa).

Figura 7-16 - Amostra com 3,5 passos de comprimento. Armadura de tração externa pouco antes de apresentar instabilidade. Tensões em MPa

Uma vez que não foi verificada a dominância de qualquer modo de instabilidade, neste caso, pode se afirmar que um modo misto surgiu em ambas as armaduras. O fato de que o fenômeno ocorreu nas proximidades da extremidade do tubo pode ser atribuído à fronteira entre a luva e a região central do tubo. Tal zona de transição, presente tanto na capa polimérica externa quanto na fita de lata resistência, provavelmente forneceu a perturbação necessária para desencadear a instabilidade.

Figura 7-17 - Amostra com 3,5 passos de comprimento. Ambas armaduras de tração durante a instabilidade. Tensões em MPa

A Figura 7-18 mostra as reações de apoio versus o deslocamento axial imposto para cada camada. As curvas apresentam a mesma tendência da armadura de tração externa de perder a rigidez axial antes da armadura interna. Não foram observadas diferenças qualitativas, quando comparado com a amostra de 3 passos de comprimento.

Figura 7-18 - Amostra de 3,5 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada

A curva de força de reação para a resposta combinada de todas as camadas pode ser vista na Figura 7-19. O ponto destacado 1 marca o início do escoamento para a fita de alta

resistência; o número 2 representa tanto a armadura de tração interna quanto a capa polimérica externa e o número 3 marca a armadura de tração externa como a última camada a iniciar o escoamento.

Figura 7-19 - Amostra de 3,5 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto

Para o último estudo de caso, o comprimento de amostra foi de 4 passos de armadura (aproximadamente 3,4 metros). De forma qualitativa, a resposta do modelo foi similar a do modelo com 3 passos de comprimento. Até que a carga limite fosse alcançada, o tubo sofreu expansão radial uniforme e a capa polimérica externa mostrou formas de instabilidade de casca. Após a carga limite ser atingida, a armadura de tração externa assumiu uma forma de instabilidade lateral (Figura 7-20).

Figura 7-20 - Amostra com 4 passos de comprimento. Instabilidade lateral na armadura de tração externa. Tensões em MPa

Embaixo da armadura de tração externa, a armadura interna apresentou o mesmo modo de instabilidade, em uma escala maior. A Figura 7-21 mostra um substancial espaçamento entre os tendões da armadura, causado pela instabilidade lateral.

Figura 7-21 – Amostra com 4 passos de comprimento. Instabilidade lateral na armadura de tração interna. Tensões em MPa

As curvas de força de reação para cada camada podem ser vistas na Figura 7-22. É interessante observar que as armaduras de tração externa e interna possuem curvas praticamente paralelas, cada qual suportando aproximadamente metade da carga axial imposta no tubo. Isto também pode ser verificado nas amostras anteriores.

Figura 7-22 - Amostra de 4 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para cada camada

A força de reação versus deformação axial imposta normalizada para a combinação de todas as camadas pode ser vista na Figura 7-23. O ponto destacado 1 marca o início do escoamento para a fita de alta resistência, o número 2 representa o escoamento na armadura de tração externa, o número 3 marca o escoamento para a capa polimérica e finalmente, a armadura de tração interna começa a escoar no ponto marcado 4.

Figura 7-23 - Amostra de 4 passos de armadura. Reação de apoio versus deformação axial imposta para o conjunto

7.2.3 Comparação dos Resultados

Além das curvas de força de reação, foram escolhidos quatro parâmetros para avaliar as diferenças e similaridades entre os casos. Com todas as informações dos casos descritas na seção anterior, este final de capítulo será dedicado a uma comparação entre os resultados desta avaliação paramétrica. A Tabela 7-4 mostra um breve resumo para comparação.

Tabela 7-4 - Comparação de resultados

Caso	Carga Crítica (kN)	Primeira Deformação de Escoamento (%)	Deformação Axial Imposta no Momento da Instabilidade (%)	Modo de Instabilidade
L1	716,82	0,71	2,84	Radial
L2	713,96	0,95	2,84	Radial
L3	710,02	0,79	2,84	Lateral
L4	710,49	0,95	2,84	Misto
L5	694,08	0,71	2,71	Lateral

Pela análise da Tabela 7-4, o primeiro aspecto notável é a deformação axial imposta na instabilidade. Este parâmetro indica o instante em que cada amostra sofreu uma perda abrupta de rigidez, e todas tiveram praticamente o mesmo valor. A carga máxima suportada sofreu uma ligeira queda toda vez que o comprimento da amostra era aumentado, exceto para o caso L4, quando esta sofreu um aumento. A coluna intitulada “Primeira Deformação de

Escoamento” mostra o instante em que a primeira camada do modelo começou a sofrer escoamento. Para este resultado, os valores variaram entre 0,71 e 1% da deformação axial imposta. Em todos os casos, a fita de alta resistência foi a primeira camada a escoar.

Uma comparação entre os “instantes de escoamento” (medidos em termos de deformação axial imposta relativa) de todas as camadas pode ser vista na Tabela 7-5. Cada linha da tabela representa um dos cinco casos analisados. Nota-se que a diferença entre as deformações relativas de escoamento existe, porém é pequena. O gráfico da Figura 7-24 coloca esta mesma informação de uma forma mais visual, de tal sorte que fica evidente a pequena diferença entre os instantes de escoamento.

Tabela 7-5 - Resultados de escoamento para as diferentes camadas

Caso	Armadura Interna (%)	Armadura Externa (%)	Fita de Alta Resistência (%)	Capa Polimérica (%)
L1	2,6	2,60	0,71	2,36
L2	2,65	2,84	0,95	2,46
L3	2,52	2,52	0,79	2,36
L4	2,7	2,43	0,95	2,43
L5	2,6	2,24	0,71	2,36

Figura 7-24 - Deformação de escoamento para cada camada em cada amostra analisada

O gráfico da Figura 7-25 mostra a comparação entre todas as curvas de força de reação (neste caso, as curvas de resposta combinada de todas as camadas). As curvas mostram que o comportamento pré-flambagem é basicamente o mesmo para todos os casos. Isto é uma forte

evidência de que o comprimento da amostra não altera o comportamento pré-flambagem do modelo.

Figura 7-25 - Força de reação versus deformação axial imposta para as cinco amostras

Do gráfico, outra observação pode ser feita. Os modelos com comprimento de amostra de 2,5 e 2 passos perderam menos rigidez do que as amostras mais longas. Isto pode ser uma consequência direta do modo de instabilidade reportado em cada caso. As amostras de 2,5 e 2 passos apresentaram um modo radial, ao passo que as amostras de 3 e 4 passos sofreram instabilidade lateral. A amostra de 3,5 passos apresentou um modo lateral em um primeiro momento que em seguida evoluiu para o modo radial. Isto pode ser visto nas curvas da amostra com 3,5 passos. O comportamento pós-flambagem, no gráfico começa a migrar do ramo superior para o inferior.

Por fim, com exceção do modo de instabilidade, o comprimento da amostra teve um efeito mínimo nos resultados de instabilidade. Quanto ao modo, em si, é possível afirmar que se trata de uma resposta extremamente sensível aos fatores externos. Em particular, na ausência de uma perturbação, o modo de instabilidade pode ser alterado sem qualquer tipo de padrão observável.

7.3 Análises paramétricas com o Coeficiente de Atrito

Quando duas superfícies estão em contato, elas trocam forças normais e de cisalhamento entre si, na interface. A questão do atrito é um dos obstáculos para a correta modelagem do tubo flexível. Baseado nas referências apresentadas neste trabalho é possível constatar que os modelos analíticos abordam o atrito de uma forma binária: ou as camadas escorregam sem qualquer resistência ou sofrem um travamento completo. Neste sentido, é possível destacar um dos trunfos dos modelos numéricos.

O Abaqus, assim como outros programas comerciais de elementos finitos, apresenta em sua formulação um modelo de atrito de Coulomb. Segundo SIMULIA (2007), não há movimento relativo entre as superfícies quando a tensão equivalente:

$$\tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \quad (7.1)$$

onde τ_1 e τ_2 são as tensões de cisalhamento nas direções vertical e horizontal no plano da superfície de contato, for menor do que uma tensão crítica τ_{crit} , que é proporcional à pressão de contato p :

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (7.2)$$

O escorregamento ocorre quando a tensão equivalente τ_{eq} é igual à tensão crítica τ_{crit} .

O coeficiente de atrito μ é um dos parâmetros mais importantes no modelo de contato. No mundo real, seu valor depende de vários fatores como os materiais que constituem o par, a temperatura ambiente, o acabamento superficial das peças e a velocidade de escorregamento. Estes fatores tornam o coeficiente de atrito extremamente difícil de determinar. Sendo assim, torna-se necessário verificar a importância deste parâmetro na resposta de instabilidade do modelo.

7.3.1 Descrição do Ensaio

Para as análises de atrito, o modelo utilizado foi a nova versão apresentada na seção anterior. Os contatos estão presentes entre todas as camadas do tubo. Para simplificar a

análise, o coeficiente de atrito foi considerado igual para todos os pares. Seu valor foi alterado conforme a Tabela 7-6.

Tabela 7-6 – Casos para estudo do efeito do atrito

Nome do Caso	Coeficiente de Atrito μ
A1	0,00
A2	0,01
A3	0,05
A4	0,10
A5	0,15
A6	0,20
A7	0,25

Dada a dificuldade de se obter o coeficiente de atrito, esta análise visa investigar a influência deste parâmetro na instabilidade do tubo. Dentre os fatores analisados estão: a carga crítica da estrutura, o escoamento das várias camadas e a resposta global da estrutura, como o modo de flambagem. É importante ressaltar que, devido às experiências anteriores (vide análise do comprimento do tubo), todos os resultados foram obtidos usando-se o mesmo computador e as mesmas configurações de processamento.

Para todos os casos, foi aplicado um deslocamento axial no sentido de comprimir a amostra e gerar uma instabilidade. Assim como a maioria das simulações apresentadas, o deslocamento não foi aplicado até o fim. Todavia, o deslocamento foi suficiente para obter os resultados desejados. A interrupção súbita da análise é causada pela deformação excessiva de diversos elementos, em especial na região da fita de Kevlar®. A Figura 7-26 ilustra este efeito observado. Nota-se que a baixa rigidez axial oriunda das propriedades ortotrópicas da fita de alta resistência faz com que a fita sofra um enrugamento. Tal efeito só é observado depois da instabilidade das armaduras, garantindo assim, a validade dos resultados.

A armadura externa sofre um deslocamento semelhante. Neste caso, observando atentamente a Figura 7-28 é possível ver listras diagonais denotando as regiões de maior tensão. Estas listras aparecem apenas na camada externa e são resultado do contato direto com a fita de alta resistência, que está “estrangulando” esta camada. Outra observação pertinente a este caso é que as tensões ainda estão abaixo do limite de escoamento do material das armaduras. Desta forma, os tendões devem retornar à sua posição original, uma vez retirado o carregamento compressivo.

Figura 7-28 - Amostra com atrito 0,0, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Após ultrapassar a carga limite, a estrutura deixa o equilíbrio estável e se torna instável. Os tendões já estão relativamente agrupados e, graças aos contatos laterais, estão trocando esforços normais entre si. De forma bastante coesa, eles sofrem um grande deslocamento lateral. Deslocamento este que ocorre de forma súbita e vem acompanhado de uma forte perda de rigidez axial do conjunto. A Figura 7-29 mostra o estado em que os tendões se encontram após o deslocamento. É possível observar ainda que o campo de tensões já acusa valores acima do limite de escoamento do material. Isso significa que a instabilidade acarretou deformações permanentes.

Figura 7-29 - Amostra com atrito 0,0, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Neste caso, tanto a armadura externa quanto a armadura interna tiveram respostas semelhantes no que diz respeito à forma de instabilidade e à distribuição de tensões. No instante final da simulação, os tendões assumiram sua forma final de equilíbrio, conforme mostra a Figura 7-30. Nesta imagem é possível notar o agrupamento evidente dos tendões.

Figura 7-30 - Amostra com atrito 0,0, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Ainda para este caso, gráficos foram construídos para visualizar a contribuição de cada camada para a resistência do conjunto. O gráfico da Figura 7-31 mostra a distribuição de forças por camada do tubo. Nestas curvas pode se notar que as duas armaduras compartilham a maior parte da resistência axial do tubo até um determinado ponto. Neste

momento, que é pouco antes da carga crítica, nota-se que a armadura externa passa a responder com o dobro da resistência da camada interna. Dado que antes da instabilidade as duas camadas ainda estão operando em regime elástico, este efeito não pode ser atribuído a uma diferença no escoamento das armaduras. Sendo assim, a diferença no ângulo de assentamento pode ser considerada responsável por esta mudança de comportamento, visto que este foi sendo gradualmente alterado desde o início da análise.

Figura 7-31 - Amostra com atrito 0,0. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Com o gráfico da Figura 7-32, é possível entender melhor o comportamento do conjunto. Nele é possível ver a reação para o tubo como um todo. Além disso, os pontos enumerados correspondem aos diversos escoamentos observados nas camadas, sendo 1 o momento em que as armaduras começam a entrar em regime plástico e 2 o momento em que a fita de alta resistência inicia o seu escoamento. A capa polimérica externa, neste caso, se manteve em regime elástico até o final da simulação. Isso demonstra o quanto pouco ela foi solicitada durante o processo de instabilidade, passando a adquirir mais importância no regime pós-crítico.

Figura 7-32 - Amostra com atrito 0,0. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Para a segunda análise, o coeficiente de atrito foi levemente aumentado para 0,01. Esta pequena alteração já foi suficiente para causar uma mudança qualitativa na resposta do sistema no início da aplicação da carga. Em determinados aspectos como, por exemplo, o deslocamento radial inicial, o sistema continua respondendo da mesma forma. O aumento de diâmetro causado pelo efeito mola continua presente. A diferença agora é que a maior parte dos tendões já não entra em contato lateral. Isto pode ser visto na Figura 7-33. Aparentemente, o estrangulamento causado pela fita de reforço começa a fazer efeito na força normal, que por sua vez, gera um atrito que detém o movimento lateral dos tendões.

Figura 7-33 - Amostra com atrito 0,01, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

Com relação à separação dos arames durante o equilíbrio estável, a armadura externa apresentou um comportamento semelhante. Assim como no caso anterior, as tensões máximas nas armaduras ainda estavam abaixo do limite de escoamento do material, portanto, a instabilidade aconteceu em regime elástico. A Figura 7-34 mostra a armadura externa no instante seguinte à instabilidade. Neste momento, é possível observar o agrupamento dos tendões da armadura. Agora, o campo de tensões mostra valores acima do escoamento, portanto, a armadura sofreu deformações permanentes.

Figura 7-34 - Amostra com atrito 0,01, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Acompanhando a evolução do deslocamento dos tendões observa-se um agrupamento cada vez maior entre eles. A partir deste ponto, a resposta do sistema é similar ao do caso sem atrito. A Figura 7-35 mostra a armadura externa no instante final da simulação. A armadura interna, por sua vez, teve uma resposta aparentemente similar, com as armaduras se agrupando e sofrendo um deslocamento lateral excessivo. Todavia, analisando as curvas de reação de força nas camadas, é possível fazer algumas observações adicionais.

Figura 7-35 - Amostra com atrito 0,01, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

As curvas apresentadas no gráfico da Figura 7-36 mostram a reação de apoio em cada uma das camadas do tubo. Na prática, estas curvas são úteis para se avaliar a contribuição individual de cada camada na resistência global da estrutura. Quando a isso, é indiscutível que, neste caso, as duas camadas de armadura dividiram de forma equivalente a resistência axial até a queda abrupta de rigidez. Esta queda, como no caso anterior, aponta o momento em que a instabilidade aconteceu para as camadas do tubo, em particular, para as armaduras.

A capa polimérica externa e a fita de alta resistência parecem não terem sido afetadas por este fenômeno. Todavia, à medida que a carga compressiva vai sendo aplicada, a capa polimérica ganha importância na resistência global da estrutura. A armadura interna ainda apresenta um resquício de resistência axial e acompanha a capa polimérica. Isto ocorre devido à posição favorável de alguns dos seus tendões. Em um determinado momento, ambas sofrem uma queda abrupta de rigidez. Isto pode ser visto como uma instabilidade da capa polimérica externa que acaba deflagrando uma instabilidade dos tendões restantes da armadura interna.

Figura 7-36 - Amostra com atrito 0,01. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

O gráfico da Figura 7-37 fornece algumas informações a mais que podem ajudar na compreensão desta resposta peculiar da armadura interna e da capa polimérica. Os pontos destacados mostram o momento em que as camadas iniciaram o processo de plastificação. Na ordem, 1 é a fita de alta resistência, 2 são as armaduras de tração e 3 é a capa polimérica externa.

Diferentemente do caso anterior, a capa polimérica externa acaba escoando no final da simulação. Isto provavelmente ocorre devido à instabilidade sofrida por esta camada. Outra observação importante diz respeito à fita de alta resistência. O coeficiente de atrito não nulo fez com que esta camada restringisse o deslocamento dos tendões da armadura. Isso acabou gerando nela uma solicitação maior que acabou por levá-la ao escoamento. Isso ocorreu simultaneamente com a instabilidade.

Figura 7-37 - Amostra com atrito 0,01. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Alguns dos casos estudados são muito parecidos entre si e serão descritos de forma mais resumida, apontando apenas para as diferenças mais críticas. Este é o caso do coeficiente de atrito 0,05. Uma vez aplicado o carregamento axial, o efeito mola causou a expansão esperada nas armaduras de tração. As armaduras de tração, de forma semelhante ao caso anterior não se agruparam e mantiveram a distância inicial uma da outra. Este é um dos efeitos mais evidentes do atrito neste modelo. A Figura 7-38 mostra a armadura externa, uma fração de segundo antes da instabilidade.

Figura 7-38 - Amostra com atrito 0,05, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Uma vez atingida a carga crítica, é possível observar uma pequena variação de comportamento entre a armadura interna e a externa. A Figura 7-39 mostra a instabilidade ocorrendo na armadura externa. O estrangulamento causado pela fita de alta resistência faz com que os efeitos do atrito se tornem mais evidentes nesta camada. Por outro lado, na armadura de tração interna, a instabilidade leva a um maior escorregamento lateral dos tendões. Outro ponto notável deste caso é que os tendões entram em regime plástico antes da instabilidade. Este é o primeiro caso em que isso ocorre. Até então, a instabilidade acontecia de forma elástica.

Figura 7-39 - Amostra com atrito 0,05, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Depois da instabilidade, o regime pós-crítico segue sem diferença entre as duas camadas. A partir deste momento, os tendões da armadura de tração externa também começam a deslizar para os lados, se agrupando. Neste ponto, o ângulo de assentamento original, que garante a resistência à tração desta armadura já não existe mais. A Figura 7-40 mostra a forma como se agruparam os tendões.

Figura 7-40 - Amostra com atrito 0,05, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

De forma semelhante ao caso anterior, as armaduras compartilham a carga axial de forma equivalente. A curva da Figura 7-41 mostra uma distribuição igualitária do carregamento entre as armaduras. Todavia, no patamar da curva, em torno de 1% de deformação imposta é possível observar uma diferença entre as duas. Neste momento, a armadura de tração externa recebe uma parte maior do carregamento e surge uma diferença entre as duas camadas. Em seguida, uma pequena perda de rigidez é observada na camada externa e as duas sofrem instabilidade ao mesmo tempo.

Figura 7-41 - Amostra com atrito 0,05. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

O gráfico anterior pode ser complementado pela curva apresentada na Figura 7-42. Nela é possível ver os pontos em que as camadas do tubo iniciaram o processo de plastificação. O número 1 corresponde à fita de alta resistência, o número 2 corresponde a ambas as armaduras de tração e o ponto 3, no final, marca o escoamento da capa polimérica. Um ponto a se destacar nesta curva é o fato de o escoamento das armaduras ocorrer antes da instabilidade. Além disso, é possível notar um comportamento mais suave do ganho de força de reação durante o equilíbrio estável. A curva tem um patamar maior, quando comparada à transição brusca da Figura 7-37

Figura 7-42 - Amostra com atrito 0,05. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

O caso com atrito 0,10 apresenta uma mudança mais significativa nos resultados. No início, o efeito mola é mais evidente, atingindo cerca de 5% do diâmetro, pouco antes da ocorrência da instabilidade. Nos casos com coeficiente de atrito maior, como este, os tendões não se deslocam lateralmente antes da instabilidade. Todavia, o movimento radial é mais significativo. A Figura 7-43 mostra os tendões da armadura externa ainda mantendo a distância inicial entre si. Todavia, é possível observar um deslocamento radial.

Figura 7-43 - Amostra com atrito 0,10, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

A armadura interna tem um comportamento semelhante, até o momento em que a carga crítica é atingida e o sistema fica instável. Neste momento, os tendões de ambas as armaduras sofrem o deslocamento lateral característico dos casos anteriores. Uma diferença observada, todavia é que, neste caso, o efeito é mais localizado. Enquanto a instabilidade era reportada ao longo de todo o comprimento da amostra, nos casos anteriores, neste é possível ver que apenas a região da extremidade dos tendões foi afetada. A Figura 7-44 mostra este deslocamento lateral na armadura externa.

Pelas figuras, é evidente que os efeitos nos campos de tensões não se limitam a esta região da extremidade. Em ambas as armaduras, é possível observar tensões altas na região de instabilidade. Estas tensões ultrapassam o limite de escoamento do material em determinadas regiões, portanto, a instabilidade pode ser considerada plástica.

Figura 7-44 - Amostra com atrito 0,10, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

No final da simulação, os tendões ficam agrupados de forma mais evidente apenas na armadura interna. Isto é de se esperar, visto que os efeitos do atrito são mais evidentes no contato entre a fita de alta resistência e a armadura de tração externa. Na última, os tendões se deslocam e se agrupam de uma forma menos contundente. A imagem da Figura 7-45 mostra os tendões da armadura externa, não muito diferente do que se vê na Figura 7-44.

Figura 7-45 - Amostra com atrito 0,10, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

A diferença entre este caso e os anteriores se faz mais evidente ao analisar o gráfico da Figura 7-46. As armaduras resistem a praticamente toda a carga axial aplicada, cada uma respondendo com cerca da metade da força de reação. A instabilidade acaba ocorrendo após

os 2% de deformação axial aplicada. Se este gráfico for comparado ao equivalente dos casos anteriores, pode-se notar um retardo na perda de rigidez do sistema, que antes ocorria antes de 1,5%. Outra observação importante reside no fato de as armaduras sofrerem a perda de rigidez em momentos diferentes. A camada interna fica instável pouco antes da externa. Esta perda de rigidez não precisa necessariamente estar associada a uma instabilidade. Próximo de 0,8% de compressão, pode se notar uma ligeira alteração nas curvas das duas armaduras. Esta alteração está associada à plastificação de camadas adjacentes.

Figura 7-46 - Amostra com atrito 0,10. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Uma parte da resposta observada no gráfico anterior pode ser explicada observando o gráfico da Figura 7-47. Os pontos destacados mostram o momento em que as camadas iniciaram o escoamento. O número 1 marca o escoamento da fita de alta resistência, o 2 mostra o escoamento da armadura de tração interna e o número 3 marca o escoamento simultâneo da armadura externa e da capa polimérica externa. Além disso, este gráfico mostra a reação combinada de todas as camadas para resistir ao carregamento axial imposto.

Um detalhe importante é que os limites de escoamento coincidem com pontos onde as curvas da Figura 7-46 mudam de comportamento. Nota-se que a armadura externa suporta um pouco mais de carga do que a interna até um determinado ponto (0,78%). Neste momento, a fita de Kevlar® entra em regime plástico, fazendo com que a maior parte da carga passe a ser suportada pela armadura interna. Esta pequena diferença de carga faz com que a armadura

interna escorrega primeiro e sofre instabilidade também., sendo seguida pela armadura externa. A capa polimérica externa também alterou o seu comportamento, iniciando o escoamento antes dos 2,5%.

Figura 7-47 - Amostra com atrito 0,10. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Em termos qualitativos, os casos com coeficiente de atrito 0,15 e 0,20 tiveram um resultado igual ao do caso anterior. Ambos sofreram instabilidade lateral, com os tendões da armadura interna com um deslocamento lateral maior do que os da externa. Em ambos os casos, a instabilidade ocorre depois que todas as camadas entraram em regime plástico. A Figura 7-48 mostra a distribuição da reação de apoio por camada. De forma semelhante ao caso anterior, a armadura externa começa suportando a maior parte da carga. Depois de certo ponto, a situação inverte e a armadura interna passa a resistir a uma solicitação maior, até sofrer instabilidade.

Figura 7-48 - Amostra com atrito 0,15. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Assim como no caso anterior, as mudanças de comportamento mostradas na Figura 7-48 estão associadas ao momento em que as camadas trabalham em regime plástico. Na Figura 7-49, o número 1 representa o início do escoamento para a fita de alta resistência, o número 2 marca o início do escoamento para a armadura interna e o número 3 marca o escoamento simultâneo da armadura externa e da capa polimérica.

Figura 7-49 - Amostra com atrito 0,15. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

A Figura 7-50 mostra a força de reação para cada camada no caso com atrito de 0,2. A diferença entre esta curva e a equivalente dos dois casos anteriores é sutil. Nela é possível observar um aumento no patamar da curva da armadura interna e uma queda menos acentuada na rigidez da armadura externa.

Figura 7-50 - Amostra com atrito 0,20. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Mudanças na ordem de escoamento das camadas também foram observadas neste caso. O gráfico na Figura 7-51 mostra os pontos em que as camadas iniciaram o escoamento. O ponto 1 marca o início do escoamento para a fita de alta resistência, o 2 marca o escoamento da capa polimérica e o 3 marca o escoamento simultâneo das duas armaduras de tração. Esta mudança de ordem de escoamento da capa polimérica mostra a importância dela como parte do tubo flexível. É interessante notar a maneira como ela se relaciona à armadura de tração externa.

Quando a capa polimérica inicia o escoamento, a armadura de tração começa a perder rigidez. Isto pode ser observado neste caso e no anterior. Outro ponto notável é o de que as duas armaduras escoam ao mesmo tempo, logo depois da capa polimérica, marcando uma das diferenças mais significativas deste caso.

Figura 7-51 - Amostra com atrito 0,20. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

No último caso desta série, o valor do coeficiente de atrito é de 0,25. De início, o comportamento do sistema foi semelhante ao dos dois casos anteriores. O efeito do atrito manteve os tendões de ambas as armaduras com uma separação fixa entre si. O efeito mola causou a usual expansão radial em ambas as armaduras. A Figura 7-52 mostra a armadura de tração interna, um quadro antes da instabilidade. Nota-se que não há qualquer indicativo da iminência da instabilidade.

Figura 7-52 - Amostra com atrito 0,25, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

À medida que o modelo ia sendo comprimido, o campo de tensões foi adquirindo valores cada vez mais altos. Estas tensões, todavia, não são medidas nas extremidades. A aplicação das condições de contorno gera uma concentração de tensões local. A Figura 7-53 mostra a armadura externa, prestes a sofrer instabilidade. Nota-se uma concentração de tensões do lado direito da imagem.

Figura 7-53 - Amostra com atrito 0,25, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Uma vez que a carga crítica é atingida, o sistema se torna instável. Neste momento, as duas armaduras sofrem um súbito deslocamento radial, no sentido de expandir. Diferentemente dos outros casos, este apresentou um modo de instabilidade radial. A Figura

Figura 7-55 - Amostra com atrito 0,25. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Para melhor compreender o comportamento destas camadas, é necessário verificar os instantes em que cada camada iniciou o escoamento. O gráfico da Figura 7-56 mostra a reação de apoio para o conjunto de camadas e marca o instante em que cada camada iniciou o escoamento. No gráfico, o número 1 marca o início do escoamento para a fita de alta resistência, o número 2 para capa polimérica e o número 3 para as armaduras de tração. Um fato notável nesta curva é o de que a capa polimérica agora dá início ao escoamento antes das armaduras de tração. Já é possível notar um padrão que indica um adiamento do escoamento das armaduras à medida que se aumenta o coeficiente de atrito.

Figura 7-56 - Amostra com atrito 0,25. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

7.3.3 Comparação dos Resultados

A seção anterior descreve em detalhes cada um dos resultados obtidos com cada variação do coeficiente de atrito. Baseado nos gráficos e figuras individuais dos casos, é possível observar alguns padrões nos resultados de instabilidade. Todavia, é necessário fazer algumas análises comparativas, para que fique mais evidente o efeito da variação do coeficiente de atrito nos resultados do modelo. A Tabela 7-7 mostra a comparação da carga crítica para todos os casos.

Tabela 7-7 – Comparação de resultados

Caso	Carga Crítica (kN)	Primeira Deformação de Escoamento (%)	Deformação Axial Imposta no Momento da Instabilidade (%)	Modo de Instabilidade
A1	302,10	0,79	0,63	Lateral
A2	413,03	0,79	0,79	Lateral
A3	468,07	0,79	1,26	Lateral
A4	648,24	0,79	2,36	Lateral
A5	707,30	0,79	2,52	Lateral
A6	710,02	0,79	2,84	Lateral
A7	731,68	0,79	2,68	Radial

A tabela mostra que a carga crítica aumenta na medida em que o coeficiente de atrito é aumentado. Houve também uma variação do momento em que a instabilidade ocorre. Nota-se que o aumento do coeficiente de atrito atrasa a ocorrência da instabilidade. O gráfico da Figura 7-57 ilustra esta variação da carga crítica, na qual é possível ajustar uma linha de tendência.

Figura 7-57 - Efeito do coeficiente de atrito na carga crítica

Ainda pelo gráfico da Figura 7-57, pode se notar que a carga crítica tende a convergir para um determinado valor à medida que o atrito aumenta. Isso é um indicativo de que a solução se aproxima da Loxodrômica, ou seja, o modelo com as camadas coladas. De certa maneira, pode se dizer, por esta comparação que o atrito contribui para aumentar a resistência das armaduras de tração à instabilidade, tornando o tubo mais seguro. Uma possível razão para isto é o fato de que as forças de atrito contribuem para a coesão das camadas. Este mesmo resultado pode ser comparado ao obtido nos testes preliminares (seção 6.5 deste trabalho). Mesmo com menos arames, o efeito do coeficiente de atrito tende a ser o mesmo.

Quando o coeficiente de atrito é baixo, as camadas trocam menos forças entre si, em especial, forças de cisalhamento. Tais esforços surgem devido ao escorregamento dos tendões de armadura e são particularmente importantes quando se trabalha com estruturas helicoidais. Uma vez sob compressão, as armaduras sofrem rotação e translação dos tendões. Cada

camada resiste ao carregamento aplicado assumindo a sua configuração mais estável. A Tabela 7-8 fornece informações relevantes sobre o escoamento das camadas.

Tabela 7-8 - Resultados de escoamento para as diferentes camadas

Caso	Coef. Atrito	Armadura Interna (%)	Armadura Externa (%)	Fita de Kevlar® (%)	Capa Polimérica (%)
A1	0,00	0,79	0,79	1,10	-
A2	0,01	0,95	0,95	0,79	3,15
A3	0,05	1,26	1,26	0,79	2,84
A4	0,10	2,21	2,36	0,79	2,36
A5	0,15	2,36	2,52	0,79	2,52
A6	0,20	2,52	2,52	0,79	2,36
A7	0,25	2,68	2,68	0,79	2,52

O momento em que a camada inicia o escoamento pode ser um indicativo do quanto a mesma está sendo solicitada. Pela Tabela 7-8, é possível notar que o escoamento das armaduras de tração é postergado, na medida em que o coeficiente de atrito é aumentado. Na prática isso significa que, com um coeficiente de atrito baixo, a solicitação individual destas camadas é maior. Isso significa que o conjunto não funciona de forma coesa para resistir ao carregamento. Tal coesão é essencial para que os tubos flexíveis suportem os carregamentos mais extremos e ela se perde quando o atrito é baixo ou nulo. O gráfico da Figura 7-58 mostra de uma forma mais visual a evolução do escoamento de cada camada.

Figura 7-58 - Gráficos de comparação para o escoamento das camadas

Pela análise das curvas da Figura 7-58 é possível notar, primeiramente, que a fita de alta resistência é a camada que menos sofre influência do coeficiente de atrito. Apenas no caso com atrito nulo é possível relatar uma mudança de comportamento. As outras camadas, por outro lado, mudam completamente. A camada polimérica opera em regime elástico durante toda a simulação, quando o atrito é nulo. Com valores de atrito baixos, a capa polimérica inicia o escoamento depois de todas outras camadas. O aumento do coeficiente de atrito antecipa o escoamento até que a capa polimérica entre em escoamento antes das armaduras.

Por outro lado, é possível observar um efeito inverso nas armaduras de tração. De forma coerente, o escoamento de uma das armaduras ocorre próximo ao da outra, quando não ocorrem ao mesmo tempo. No modelo com atrito nulo, as armaduras são as primeiras camadas do modelo a sofrer os efeitos da plastificação. Todavia, na medida em que se aumenta o valor do atrito, o escoamento é postergado. Um ponto interessante é que, a partir do coeficiente de atrito 0,1, os valores de escoamento parecem não se alterar significativamente. Sendo assim, no que diz respeito a escoamento das camadas, a influência do atrito fica reduzida.

Por fim, o gráfico da Figura 7-59 mostra a comparação da força de reação para o conjunto de camadas em função da deformação axial aplicada. Nestas curvas, é possível comparar as cargas críticas referentes a cada coeficiente de atrito. Neste quesito, é possível confirmar a observação feita anteriormente referente ao aumento da carga crítica com o aumento do coeficiente de atrito. Os patamares das curvas também se alteram, mas não há um padrão observável neste caso. O que se pode afirmar é que, em casos com coeficiente de atrito menor, a queda de rigidez que caracteriza a instabilidade ocorre de maneira mais abrupta do que em casos com atrito mais alto.

Figura 7-59 - Comparação da força de reação versus deformação imposta para todos os modelos

7.4 Análises com o rasgo na capa polimérica

Até o presente momento, todos os modelos ensaiados nas análises paramétricas anteriores contavam com um modelo de tubo perfeito. Na versão ensaiada na seção anterior, as armaduras de tração são hélices de seção retangular perfeita, o tubo é um cilindro perfeito e as propriedades de material são idealizadas. Naturalmente, todo modelo é uma representação simplificada da realidade e a idealização é uma etapa necessária na sua concepção.

É evidente a mudança de comportamento mostrada por estes gráficos, mas as suas similaridades também têm a sua importância. Em especial, o início da compressão (até 0,5% de deformação axial imposta) é idêntico para todos os modelos. Naturalmente, o atrito é uma não linearidade que surte efeito após um determinado momento na simulação. Mesmo no trecho não linear, as curvas tendem a seguir o mesmo caminho, até que a instabilidade faz com que tomem um novo rumo na bifurcação.

Com relação ao regime pós-crítico, cada caso se comportou de uma maneira diferente. Um aspecto observável é o modo de flambagem. Nos testes que fazem parte desta análise

houve uma predominância do modo de instabilidade lateral. No último caso apenas, as armaduras sofreram instabilidade radial ou *birdcaging*. Com o número de amostras utilizado, não é possível estabelecer uma correlação entre o coeficiente de atrito e o modo de instabilidade observado.

Por outro lado, tubos flexíveis estão sujeitos a defeitos, como qualquer objeto construído pelo homem. Imperfeições de fabricação como excentricidades, ovalizações, rasgos nas fitas, nas camadas poliméricas, quebras e entortamento de armaduras e corrosão são apenas alguns exemplos de defeitos que podem ser encontrados em um tubo flexível. Desde a sua fase de fabricação até o descomissionamento, estes tubos estão expostos a diversos agentes causadores de danos. Particularmente, as camadas mais externas estão sujeitas a estes efeitos, visto que estão mais expostas e sofrem a ação direta do ambiente externo.

A capa polimérica externa é a primeira barreira que separa os componentes internos de um tubo flexível do ambiente. Conforme mencionado anteriormente, no capítulo deste trabalho dedicado à descrição dos componentes do tubo, uma das funções da capa polimérica externa é a de proteger os componentes do tubo de agentes externos. Sendo assim, não é incomum encontrar nesta camada rasgos, furos e outros possíveis defeitos. Durante a operação de instalação do tubo, por exemplo, a capa é esmagada pelas sapatas do tensionador e as forças de atrito nesta camada são responsáveis por sustentar o peso do tubo pendurado durante uma parte considerável do processo. A Figura 7-60 mostra um dano causado nas camadas externas durante o lançamento.

Figura 7-60 - Defeito na capa externa e na fita de alta resistência causado durante o lançamento. Fonte: Picksley et al (2012)

No âmbito deste trabalho, é estudado o fenômeno de instabilidade das armaduras de tração. Sabe-se que a instabilidade nas estruturas pode vir a causar uma súbita alteração na configuração de equilíbrio do componente sob ação de cargas compressivas. Uma vez que a carga ultrapassa a carga crítica da estrutura, esta se encontra na situação de equilíbrio instável. A partir deste momento, a menor das perturbações é capaz de deflagrar uma migração de configuração geométrica. Em um tubo flexível, um rasgo em uma camada externa pode ser esta perturbação.

7.4.1 Descrição do Ensaio

Dentro deste contexto, torna-se justificável o acréscimo de um defeito inicial no modelo com o intuito de se avaliar o efeito deste na resposta compressiva das armaduras de tração. Sendo assim, o modelo deste trabalho foi alterado para englobar um rasgo com uma geometria determinada situado na capa polimérica externa. Uma geometria possível para este rasgo seria o de uma janela retangular. Testes foram realizados com um rasgo retangular com cerca de 200 mm de comprimento e 10 mm de largura. A Figura 7-61 mostra este corte em uma capa externa de elementos de casca com espessura renderizada.

Figura 7-61 - Janela retangular na capa polimérica externa

A probabilidade de ocorrência de um dano com esta geometria regular na capa externa é muito baixa. Se o objetivo deste modelo fosse o de fazer uma comparação com algum ensaio de laboratório, este dano poderia ser reproduzido. Todavia, foi feita a opção por um rasgo de aparência menos artificial, que mais se assemelhasse a um corte causado pela interação com alguma superfície cortante. Sendo assim, foi desenhada uma geometria formada por dois segmentos circulares ligadas por uma corda comum. Tal geometria pode ser imaginada como uma variação da *vesica piscis*. Neste caso, porém, o centro de uma das circunferências não está no perímetro da outra. Esta pode ser vista na Figura 7-62 com um comprimento de 200 mm.

Figura 7-62 - Geometria final do rasgo na capa externa

Apesar de a Figura 7-60 mostrar um dano tanto na capa polimérica externa quanto na fita de alta resistência, para este estudo, apenas a capa polimérica externa será cortada. Em um estudo posterior, será avaliada a influência do corte na fita de alta resistência. Desta forma, será possível estudar o efeito em cada camada separadamente. Para o caso do rasgo na capa polimérica, foram preparados sete casos nos quais o comprimento do rasgo longitudinal do rasgo é variado e um caso sem rasgo, como controle. A largura dos rasgos é mantida constante, no valor de 2 mm, sendo que o comprimento varia de 20 a 300 mm conforme a Tabela 7-9.

Tabela 7-9- Casos para o estudo do efeito do rasgo

Nome do Caso	Rasgo (mm)
R1	0
R2	20
R3	50
R4	125
R5	150
R6	165
R7	200
R8	300

Todos os outros aspectos da análise permanecem idênticos aos casos de estudo anteriores. Sendo assim, o carregamento continua sendo um deslocamento compressivo aplicado a uma taxa de 800 mm/s. A análise é interrompida em todos os casos antes de chegar ao seu valor máximo. Tal interrupção ocorre devido à deformação excessiva da fita de alta resistência e não compromete a qualidade dos resultados, visto que ela ocorre sempre depois da instabilidade.

7.4.2 Resultados

Seguindo a ordem de casos da Tabela 7-9 o primeiro caso a ser descrito seria o do tubo sem rasgo. Entretanto, este caso já foi descrito anteriormente em outra seção (ver caso A6 das

análises com atrito). Sendo assim, a análise vai começar pelo caso com um rasgo de 20 mm, o menor de todos.

Uma vez iniciada a compressão, as armaduras iniciaram uma expansão radial, forçando as camadas mais externas. Este deslocamento já foi reportado em casos anteriores e se faz presente neste novo conjunto de análises. Os tendões permaneceram com o distanciamento usual um do outro, isto é, não sofreram nenhum tipo de translação antes da instabilidade. O estado dos tendões pode ser visto na Figura 7-63, onde se vê a armadura interna.

Figura 7-63 - Amostra com rasgo de 20 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

A armadura de tração externa apresenta um comportamento análogo ao da interna neste caso, em todos os momentos. Um aspecto interessante deste conjunto de análises pode ser notado quando se observa a capa polimérica. A compressão é aplicada em todas as camadas, incluindo as mais externas. Devido a esta compressão e à expansão radial das camadas anteriores, é observada uma tendência de o rasgo se abrir. Este tipo de efeito é de se esperar e pode ser visto na Figura 7-64. Outro fato que pode ser observado da figura em questão é o estado de tensões em torno do rasgo.

É importante lembrar que a geometria do rasgo apresenta dois cantos que podem vir a causar concentração das tensões. Esta concentração é nitidamente vista na Figura 7-64. Nota-se que o campo de tensões é quase simétrico em torno do furo. Uma parte da pequena assimetria pode ser atribuída à distribuição de elementos irregular do lado direito. Por outro lado, esta distribuição irregular é compensada pelo grande número de elementos.

Figura 7-64 - Amostra com rasgo de 20 mm, concentração de tensões ao redor do rasgo. Tensão de Von Mises em MPa

Mais importante para a resposta compressiva do modelo, é o início de escoamento prematuro causado pelo rasgo. Escoamento este que inicia nas pontas e vai se propagando na direção longitudinal do tubo. Neste caso, em particular, o escoamento ocorreu muito antes do esperado. Para as armaduras, o efeito não foi tão expressivo, visto que a fita de alta resistência permanece intacta e as mantém em posição até que a instabilidade ocorre. A Figura 7-65 mostra o momento da instabilidade para a armadura interna. Nota-se que ocorreu um deslocamento lateral, caracterizando o modo lateral de instabilidade.

Figura 7-65 - Amostra com rasgo de 20 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

Nota-se, pela Figura 7-65 que os tendões se deslocaram até o momento em que o contato lateral impediu alguns deles de se moverem sozinhos. Neste sentido, o deslocamento lateral individual dos tendões se transformou em um deslocamento de grupo, seguido de uma

flexão dos grupos de tendões. Os tendões mantêm este padrão de flexão até o final da análise. Sendo assim, não é reportada uma mudança significativa de comportamento. A Figura 7-66 mostra o posicionamento dos tendões no último instante da análise.

Figura 7-66 - Amostra com rasgo de 20 mm, no final da simulação (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

A armadura externa apresentou uma resposta semelhante à compressão, por isso não se fez necessário a apresentação de imagens da mesma. Entretanto, após a ocorrência da instabilidade, os tendões da armadura externa sofreram um deslocamento radial, juntamente com o lateral. A Figura 7-67 mostra este modo de instabilidade indefinido apresentado pela armadura de tração externa, no final da simulação.

Figura 7-67 - Amostra com rasgo de 20 mm, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Outro ponto deste modelo que pode ser ressaltado é a deformação da capa polimérica em si. A Figura 7-68 mostra uma espécie de instabilidade radial ocorrida na capa externa.

Este deslocamento radial foi iniciado pelo deslocamento da armadura de tração externa, mas aumentou graças aos esforços compressivos na capa. Isto fez com que surgisse uma lacuna entre a capa e a armadura externa nesta região.

Ainda pela análise da Figura 7-68, é possível notar que a instabilidade ocorreu nas proximidades do rasgo na capa polimérica, mas não na região diretamente abaixo dela. Na figura, é possível ver o rasgo, um pouco à direita da legenda, relativamente distante do bulbo radial que surgiu na capa polimérica. Era de se esperar que um pequeno defeito em uma camada externa pudesse de fato alterar a posição da instabilidade no tubo. Neste caso, como a instabilidade foi lateral, não é possível afirmar se há ou não uma correlação.

Figura 7-68 - Amostra com rasgo de 20 mm, no final da simulação (capa externa). Deslocamento radial em mm

O gráfico da Figura 7-69 mostra a reação de apoio para cada uma das camadas que compõem o modelo de tubo flexível. Nele é possível verificar a divisão de carga axial entre as duas armaduras. Juntas elas respondem quase que pela totalidade da resposta compressiva do tubo. As curvas das armaduras seguem muito próximas uma da outra até que a armadura externa sofre duas alterações de comportamento, uma pouco antes de 1% de deformação axial e outra antes dos 2,5%. Provavelmente, estas mudanças estão associadas a alterações no status do contato e escoamento de camadas.

Figura 7-69 - Amostra com rasgo de 20 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Para possibilitar uma melhor interpretação das mudanças de rigidez observadas no gráfico da Figura 7-69, os pontos que marcam o início do escoamento para todas as camadas foram marcados no gráfico da Figura 7-70. O ponto marcado 1 mostra o instante em que a fita de alta resistência iniciou o seu escoamento, a capa polimérica escoou pouco depois, no ponto marcado 2. As duas armaduras de tração iniciam seu escoamento nos pontos 3 (armadura externa) e 4 (armadura interna). Com o conhecimento provido por esta curva, é possível afirmar que este foi um caso em que a instabilidade ocorreu com as camadas operando em regime plástico. A posição destes pontos na curva também permite fazer uma associação que explica as alterações de comportamento observadas na Figura 7-69.

Figura 7-70 - Amostra com rasgo de 20 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Para o caso seguinte, o rasgo é aumentado para 50 milímetros de largura. Em termos qualitativos, este caso apresentou uma resposta muito semelhante ao anterior. Com a aplicação da carga compressiva, as camadas helicoidais incitaram a usual expansão radial sem que nenhum dos tendões iniciasse um deslizamento. Vale lembrar que, para esta série de análises paramétricas, o coeficiente de atrito é fixo e igual a 0,2. Na Figura 7-71 é possível notar que os tendões não se deslocaram lateralmente, porém, o deslocamento radial foi considerável.

Figura 7-71 - Amostra com rasgo de 50 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

As regiões em vermelho, na Figura 7-71 indicam possíveis localidades para a ocorrência de instabilidade. Nota-se que os valores das tensões já ultrapassaram o limite de escoamento do material da armadura de tração. Uma vez ultrapassado o valor da carga crítica do tubo flexível, os tendões sofrem um deslocamento lateral e se agrupam. Este deslocamento pode ser visto na Figura 7-72. A armadura de tração interna apresentou uma resposta análoga.

Figura 7-72 - Amostra com rasgo de 50 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

De forma um pouco diferente do caso anterior, a instabilidade lateral ocorreu diretamente abaixo da região da capa polimérica onde se situa o rasgo de 50 mm. Um fato interessante é que a capa polimérica externa exibiu sinais de flambagem de casca. Isto provavelmente se deve ao fato de as armaduras não terem apresentado um deslocamento radial muito grande. Na falta da interferência da armadura de tração, a capa assumiu suas próprias formas de instabilidade.

Na Figura 7-73 pode se ver o campo de deslocamentos radiais para a capa polimérica externa. Nota-se um padrão característico de modo de instabilidade de casca. Outro detalhe importante que pode ser visto na figura é o rasgo, situado na metade do modelo. Neste caso, a malha da capa polimérica é estruturada. Sendo assim, o campo de tensões em torno do rasgo é simétrico.

Figura 7-73 - Amostra com rasgo de 50 mm, no final da simulação (armadura externa). Deslocamento radial em mm

No gráfico da Figura 7-74 é possível notar que o rasgo de 50 mm pouco alterou a distribuição de forma por camada da estrutura. Excetuando-se uma leve alteração qualitativa na curva da armadura externa, a resposta compressiva é essencialmente a mesma. As alterações de rigidez mostradas nas curvas da figura em questão podem ser justificada pela ordem de escoamento das camadas.

Figura 7-74 - Amostra com rasgo de 50 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

O gráfico da Figura 7-75 mostra a sequência de plastificação das camadas do modelo. O número 1 marca o início do escoamento para a fita de alta resistência. Uma outra mudança que pode ser vista nesta curva é a alteração do escoamento da capa polimérica externa (número 2). O ponto 3 marca o início do escoamento para ambas as armaduras. Um ponto interessante a ser comentado é que, como as armaduras de tração escoaram ao mesmo tempo, a armadura externa não tem aquela rigidez residual que surgiu perto do escoamento (aproximadamente 3%).

Figura 7-75 - Amostra com rasgo de 50 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Com 125 mm de comprimento, o rasgo já atinge um tamanho considerável (quase 5% do comprimento da amostra). O modelo responde ao início da compressão de forma semelhante ao observado no caso anterior. Um fato notável deste caso é o de que a expansão radial das armaduras de tração começou uniforme, mas foi gradualmente assumindo um padrão repetitivo. Isto pode ser visto na Figura 7-76, onde se vê um padrão ondulado nas armaduras. Outro aspecto interessante que pode ser visto nesta figura é o campo de tensões, que fornece uma indicação do local onde a armadura vai flambar.

Figura 7-76 - Amostra com rasgo de 125 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

O campo de tensões mostrado na Figura 7-76 mostra que as tensões já ultrapassaram o limite de escoamento do material. Em particular, nas regiões em vermelho, formaram-se rótulas plásticas. O modelo segue em compressão até que a carga crítica é atingida pela estrutura e o equilíbrio se torna instável. Em uma fração de segundo, a região central do tubo sofre um deslocamento radial considerável, formando a geometria característica da instabilidade radial. Este deslocamento pode ser visto Figura 7-77.

Figura 7-77 - Amostra com rasgo de 125 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Neste caso, o surgimento da instabilidade radial na região central do tubo não é coincidência. Certamente, o rasgo de 125 mm teve influência na localidade da instabilidade, agindo como imperfeição inicial. Deve se notar, todavia que a instabilidade não é tão uniforme. O deslocamento radial ocorreu de forma mais contundente na região do rasgo. Do

outro lado, o fenômeno foi mais sutil. A Figura 7-78 mostra a situação do rasgo no final da simulação.

Apesar de a fita de alta resistência estar intacta, o modelo sofreu uma instabilidade radial. Uma observação mais detalhada da região do rasgo mostra que os elementos que constituem a malha da fita de alta resistência estão com um alto nível de deformação e tensões muito acima do escoamento. Isso indica que, neste caso, a fita de alta resistência não iria suportar o carregamento e rasgaria, juntamente com a capa polimérica. Por este motivo, este modelo seria amplamente beneficiado pela implementação de uma rotina de malha adaptativa, que permita a desconexão de elementos na medida em que as tensões atinjam um valor limite.

Figura 7-78 - Amostra com rasgo de 125 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm

O gráfico da Figura 7-79 mostra a distribuição do carregamento axial entre as camadas do tubo flexível. Com relação aos casos anteriores, não ocorreu uma mudança significativa na resposta qualitativa da estrutura. Nota-se que as duas armaduras de tração suportam praticamente todo o carregamento de compressão. Uma diferença grande entre as armaduras é observada quando a estrutura se aproxima da carga crítica, quando a armadura interna assume a maior parte da reação compressiva do sistema. Esta diferença aumenta até o momento em que ambas sofrem instabilidade.

Figura 7-79 - Amostra com rasgo de 125 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

As mudanças de comportamento observadas nas curvas de reação de apoio das camadas do tubo normalmente estão associadas a fenômenos que ocorrem em camadas adjacentes. Assim como nos casos anteriores, é necessário observar a ocorrência do escoamento em todas as camadas. O gráfico da Figura 7-80 apresenta estes pontos, que estão numerados. O ponto marcado 1 indica o início do escoamento para a fita de alta resistência, o ponto 2 marca o início do escoamento da capa polimérica e os pontos 3 e 4 marcam a plastificação das armaduras de tração externa e interna respectivamente.

Figura 7-80- Amostra com rasgo de 125 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Para o caso seguinte, o rasgo foi aumentado para 150 mm. Espera-se que um dano mais significativo na capa polimérica ressalte o efeito local na instabilidade. Antes disso, entretanto, o modelo se comporta de forma semelhante ao caso anterior, com um pequeno deslocamento radial uniforme. Em seguida, pode se observar o padrão repetitivo no deslocamento radial que pode ser visto na Figura 7-81. Este geometria peculiar se deve ao estrangulamento causado pela fita de alta resistência associado a um modo de instabilidade de casca nas camadas externas.

Figura 7-81 - Amostra com rasgo de 150 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

O campo de tensão na Figura 7-81 mostra tensões altas na região central do modelo. Os valores ultrapassam o limite de escoamento do material, portanto as armaduras já estão trabalhando em regime plástico. Nesta mesma região, após o carregamento superar a carga crítica, os tendões sofrem um abrupto deslocamento radial assumindo a geometria característica da instabilidade radial. A Figura 7-82 mostra este modo de instabilidade bastante evidente no centro do modelo.

Figura 7-82 - Amostra com rasgo de 150 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Assim como no caso anterior, o aumento de raio dos tendões não ocorreu de forma homogênea. Naturalmente, isso se deve à natureza da imperfeição que está sendo colocada no modelo. Na região imediatamente abaixo do rasgo, os tendões sofreram um deslocamento consideravelmente maior. Na Figura 7-83 é possível verificar esta diferença. A abertura do rasgo foi de tal magnitude que é possível ver a fita de alta resistência, que não foi capaz de impedir a ocorrência da instabilidade radial.

O estado de tensão do modelo como um todo também revela que, junto com a instabilidade, ocorreu uma redução no valor das tensões na maior parte do tubo. A tensão passa a ser concentrada na região do *birdcaging* e o restante do tubo que não sofreu deformações permanentes é descarregado.

Figura 7-83 - Amostra com rasgo de 150 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm

A Figura 7-84 mostra a reação de apoio fracionada para cada camada. Este gráfico é útil para determinar quais camadas trabalham para suportar o carregamento aplicado. Neste caso, assim como nos anteriores, a carga axial é quase que inteiramente suportada pelas armaduras de tração. As duas curvas seguem trajetórias concorrentes, separando-se em determinados momentos. Naturalmente, esta separação está associada ao escoamento de camadas adjacentes e efeitos de contato.

Figura 7-84 - Amostra com rasgo de 150 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Para auxiliar na compreensão das mudanças de comportamento observadas nas curvas do gráfico da Figura 7-84, foi construída uma nova curva. A Figura 7-85 mostra a reação de apoio do sistema como um todo e marca o instante em que cada camada iniciou o escoamento. No gráfico, o ponto 1 marca o início do escoamento da fita de alta resistência, o ponto 2 marca o início do escoamento da capa polimérica e o ponto 3 marca o escoamento de ambas armaduras de tração.

Figura 7-85 - Amostra com rasgo de 150 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Para o caso seguinte, o rasgo foi aumentado para 165 mm. Qualitativamente, este caso apresentou pouca diferença em relação ao caso anterior. O deslocamento compressivo aplicado na extremidade do tubo causou um aumento de raio inicial na armadura de tração. Entretanto, a geometria das armaduras migrou sutilmente para o padrão repetitivo que pode ser visto na Figura 7-86. Ainda nesta figura, nota-se que a distribuição de tensões irregular nas proximidades da metade do tubo acusam a posição onde vai surgir a instabilidade.

Figura 7-86 - Amostra com rasgo de 165 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Ultrapassada a carga crítica, os tendões sofrem uma rápida expansão radial. Como pode ser visto na Figura 7-87, esta expansão radial é seguida por um alívio no estado de tensões do tubo em geral. As tensões altas ficam concentradas na parte do tubo que sofreu instabilidade. O valor máximo das tensões ultrapassa o valor limite de escoamento, portanto a instabilidade é plástica.

Figura 7-87 - Amostra com rasgo de 165 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

A partir da observação destas imagens, fica evidente a influência do rasgo na indução da instabilidade radial em um ponto específico da armadura. A Figura 7-88 mostra o rasgo no último instante registrado da simulação. Neste momento, é possível notar que a assimetria da

instabilidade radial é eliminada à medida que se comprime o tubo durante o regime pós-crítico. Na figura em questão, a fita de alta resistência foi removida para possibilitar uma melhor visualização das armaduras de tração.

Figura 7-88 - Amostra com rasgo de 165 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm

O gráfico da Figura 7-89 mostra a reação de apoio devido ao deslocamento compressivo, para cada camada do tubo. Como é de se esperar, as armaduras de tração são responsáveis pela rigidez axial do tubo na compressão. Vale ressaltar que os valores máximos de força de reação permanecem inalterados com relação ao caso anterior. Algo que parece ter alterado com o aumento do rasgo foi a dimensão do “planalto” no topo da curva de força de reação para as armaduras. À medida que se aumenta o rasgo, as curvas de força de reação das armaduras passam a ter uma transição de instabilidade mais abrupta.

Figura 7-89 - Amostra com rasgo de 165 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Como informação complementar ao gráfico da Figura 7-89, o gráfico da Figura 7-90 mostra informações sobre o comportamento global da estrutura e os instantes de início de escoamento para todas as camadas. No gráfico, o ponto marcado 1 indica o início do escoamento para todas as camadas. O ponto 2 marca o escoamento da fita de alta resistência, o ponto 3 marca o início do escoamento de ambas as armaduras. Nota-se que o ponto de escoamento das armaduras é coincidente com o ponto de carga máxima da estrutura.

Figura 7-90 - Amostra com rasgo de 165 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Até o presente momento, o aumento na dimensão do rasgo não pareceu afetar a resposta do modelo de forma significativa. Desta forma, o rasgo foi aumentado para 200 mm no penúltimo caso analisado. A princípio, o deslocamento de compressão causou um deslocamento radial homogêneo na amostra. Assim como no caso anterior, o deslocamento homogêneo transitou suavemente para um deslocamento periódico. A Figura 7-91 mostra o estado de tensões das armaduras antes da instabilidade e pode se notar que o estado de tensões já ultrapassa o valor limite de escoamento nas regiões em vermelho.

Figura 7-91 - Amostra com rasgo de 165 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Uma vez que a carga crítica da estrutura é ultrapassada e o sistema se encontra em equilíbrio instável, os tendões da região central do modelo sofrem um deslocamento radial expressivo. A geometria resultante é característica do modo de instabilidade radial. Na Figura 7-92, este deslocamento pode ser nitidamente visto. O deslocamento radial é seguido de um alívio no estado de tensões das armaduras e uma maior concentração na região da instabilidade.

Figura 7-92 - Amostra com rasgo de 200 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

A Figura 7-92 também mostra que, assim como nos dois últimos casos, o deslocamento radial ocorreu de forma mais expressiva na região imediatamente abaixo do rasgo na capa polimérica. No lado oposto, o deslocamento radial é mais sutil. À medida que a simulação avança, todavia, esta diferença diminui e o deslocamento radial se torna mais homogêneo. Na Figura 7-93 é possível ver as armaduras deformando embaixo do rasgo.

Figura 7-93 - Amostra com rasgo de 200 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm

O gráfico da Figura 7-94 mostra a evolução da resposta compressiva para cada camada do tubo. Desta forma, é possível avaliar a eficácia das camadas em resistir a cargas compressivas. É evidente que as armaduras de tração dividem entre si a resistência ao esforço compressivo aplicado. As duas curvas caminham juntas na maior parte do tempo e se separam em pontos chave da análise. A primeira separação ocorre nas proximidades de 1% de

deformação axial e a outra pouco depois de 2%. Estas variações na resposta das armaduras se devem a ocorrências nas camadas adjacentes.

Figura 7-94 - Amostra com rasgo de 200 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

A Figura 7-95 complementa o gráfico da figura anterior. Os pontos marcados indicam o instante em que regiões de algumas camadas apresentaram tensão acima do limite de escoamento. O ponto marcado 1 mostra o escoamento da fita de alta resistência, o ponto 2 mostra o escoamento da capa polimérica e o ponto marcado 3 mostra o escoamento das duas armaduras. Os pontos 1 e 3 coincidem com as mudanças de comportamento reportadas no gráfico da figura anterior. Isso mostra a importância da fita de alta resistência e das armaduras de tração na instabilidade. Por outro lado, a capa polimérica não parece ter influência significativa nas curvas de resposta da armadura de tração.

Figura 7-95 - Amostra com rasgo de 200 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Para o último caso desta série, o rasgo foi aumentado para 300 mm. Assim como os outros casos, o deslocamento compressivo causou uma expansão radial uniforme nos tendões da armadura. A Figura 7-96 mostra a geometria dos tendões antes da instabilidade. Os valores das tensões nas regiões em vermelho já ultrapassam o limite de escoamento do material. Outro aspecto interessante na figura é o de que o campo de tensões tem uma forma helicoidal. Isso ocorre provavelmente por causa do ângulo de assentamento dos tendões e da maneira como a fita de alta resistência “estrangula” as armaduras.

Figura 7-96 - Amostra com rasgo de 300 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Uma vez ultrapassada a carga crítica, as armaduras entram em equilíbrio instável. No instante seguinte, o modelo sofre os efeitos da instabilidade, que se manifesta na forma de um deslocamento radial excessivo dos tendões da armadura. A Figura 7-97 mostra o deslocamento que ocorreu nas proximidades da região central do tubo. Diferentemente dos outros casos, a ocorrência foi menos sutil, com deslocamentos maiores. Todavia, ainda pode se notar uma assimetria na saliência das armaduras.

Figura 7-97 - Amostra com rasgo de 300 mm, depois de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

O rasgo certamente teve influência na localização da instabilidade. Neste sentido, pode se notar a alteração mais significativa deste defeito no modelo. Além disso, os arames se deslocam mais na região onde se encontra o rasgo. Por menor que seja a sua resistência, a ausência da capa polimérica dá mais liberdade para os tendões se deslocarem. No lado em que a capa polimérica está intacta, o deslocamento é muito menor. Isto pode ser visto na Figura 7-98, que mostra o campo de deslocamento radial no modelo no último instante registrado da simulação.

Figura 7-98 - Amostra com rasgo de 300 mm, no final da simulação. Deslocamento radial em mm

O gráfico da Figura 7-99 mostra a reação de apoio axial para cada camada do tubo separadamente. Neste caso, em particular, a armadura externa suportou mais carga do que a interna durante a maior parte da compressão. Por ter sido mais atuante, a armadura externa é a primeira a falhar. Nota-se também que a diferença entre as cargas críticas da armadura interna e da externa é bem menor neste caso. Pela primeira vez neste estudo, é possível relatar uma mudança significativa na resposta compressiva das camadas.

Figura 7-99 - Amostra com rasgo de 300 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Para facilitar a compreensão das curvas do gráfico da Figura 7-99, o gráfico da Figura 7-100 é necessário. Além de fornecer a reação de apoio axial para o modelo todo, também mostra o instante em que cada uma das camadas entrou em regime plástico. O ponto marcado 1 corresponde à fita de alta resistência, o ponto 2 indica o escoamento da capa polimérica e os pontos 3 e 4 mostram o início do escoamento para as armaduras externa e interna respectivamente. Sendo assim, no momento em que as armaduras sofrem instabilidade, elas já estão em regime plástico.

Figura 7-100 - Amostra com rasgo de 300 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

7.4.3 Comparação dos Resultados

Na seção anterior, os resultados das análises foram descritos em detalhes. A observação e comparação das respostas dos modelos permitiu determinação de alguns padrões. Para facilitar a análise, aqui serão mostradas diversas tabelas e gráficos comparativos. Inicialmente, a Tabela 7-10 mostra uma comparação dos resultados mais evidentes.

Tabela 7-10 - Comparação dos resultados

Caso	Carga Crítica (kN)	Primeira Deformação de Escoamento (%)	Deformação Axial Imposta no Momento da Instabilidade (%)	Modo de Instabilidade
R1	710,02	0,79	2,84	Lateral
R2	708,07	0,79	2,52	Lateral
R3	706,31	0,79	2,52	Lateral
R4	705,71	0,79	2,36	Radial
R5	701,27	0,79	2,36	Radial
R6	701,23	0,79	2,36	Radial
R7	679,10	0,79	2,21	Radial
R8	686,16	0,79	2,36	Radial

Alguns padrões podem ser determinados com clareza pela tabela. Entre eles, nota-se que a primeira deformação do escoamento permanece inalterada. O comportamento do modo de instabilidade também merece um destaque. Este é um dos poucos atributos em que foi observada uma mudança significativa. Nos casos com rasgo 20 e 50 mm, apesar do pequeno deslocamento radial, o modo de instabilidade observado foi predominantemente lateral.

De 125 mm em diante, o modo de instabilidade observado foi sempre radial. Isso mostra que, apesar de ter pouca influência na resistência radial do modelo, quando comparada com a fita de alta resistência, a ausência da capa polimérica favorece uma expansão radial das armaduras de tração. Isso fica ainda mais evidente quando se observa que a instabilidade radial é mais significativa na região situada abaixo do rasgo. Outros parâmetros da tabela requerem uma visualização na forma gráfica para facilitar a análise. O gráfico da Figura 7-101 mostra o efeito do rasgo na carga crítica do modelo.

Figura 7-101 - Efeito do rasgo na carga crítica

O primeiro aspecto notável do gráfico reside no fato de que os pontos estão um tanto quanto dispersos. Isto ocorre pelo fato de que a escala utilizada é pequena. Ainda assim, uma observação cautelosa permite determinar um padrão de curva decrescente. O ponto referente ao caso de 200 mm foge do padrão, mas ainda assim é possível ajustar uma linha de tendência polinomial. Se apenas a tendência decrescente for observada, é possível deduzir que o rasgo tende causar um decréscimo pequeno no valor da carga crítica (como é de se esperar de uma imperfeição inicial em um problema de instabilidade). Por outro lado, se os valores forem levados em conta, nota-se que a diferença percentual entre o maior o menor valor da carga crítica é de apenas 4,35%. Esta pequena diferença relativa mostra que um rasgo cuja dimensão é maior do que o próprio diâmetro do tubo não é capaz de afetar a carga crítica de forma significativa.

Entretanto, o efeito em outros parâmetros, como o modo de instabilidade e a indução do fenômeno em um local determinado é bastante evidente. Sendo assim, a investigação continua com a análise do escoamento das camadas do tubo e o efeito que o rasgo tem sobre estes valores. A Tabela 7-11 resume os valores de escoamento das camadas para cada um dos casos descritos na seção anterior.

Tabela 7-11 - Resultados de escoamento para as diferentes camadas

Caso	Rasgo (mm)	Armadura Interna (%)	Armadura Externa (%)	Fita de Alta Resistência (%)	Capa Polimérica (%)
R1	0	2,52	2,52	0,79	2,36
R2	20	2,68	2,36	0,79	1,10
R3	50	2,52	2,52	0,79	2,21
R4	125	2,52	2,36	0,79	2,05
R5	150	2,36	2,36	0,79	1,89
R6	165	2,36	2,36	0,79	1,58
R7	200	2,21	2,21	0,79	1,58
R8	300	2,36	2,21	0,79	1,10

Assim como na Tabela 7-10, a variação de alguns parâmetros é evidente pela observação da própria tabela. Este é o caso do escoamento da fita de alta resistência, que ocorreu sempre no mesmo momento, independente da dimensão do rasgo na capa polimérica. Coincidentemente, a fita de alta resistência foi a primeira camada a iniciar o escoamento em todos os casos também. Isto é uma evidência da importância desta camada na contenção das armaduras de tração, visto que ela é muito solicitada. Esta observação foi um dos motivadores do estudo do defeito na fita de alta resistência que será apresentado posteriormente neste trabalho.

Com relação ao escoamento das outras camadas, o padrão não é tão evidente. Para auxiliar na compreensão da sua alteração, foi construído o conjunto de curvas da Figura 7-102. Em uma primeira observação, é possível reiterar que a fita de alta resistência não sofreu qualquer alteração com o aumento do rasgo. As armaduras de tração, por outro lado, sofreram certa alteração nos seus instantes de escoamento. As curvas permitem determinar um sutil tendência de queda para o valor de deformação de escoamento. Isso significa que, ao passo que a dimensão do rasgo aumenta, o escoamento das armaduras de tração é antecipado. Esta alteração é da ordem de 17% entre o maior e o menor valor de deformação de escoamento para as duas camadas, o que é um valor significativo.

Figura 7-102 - Gráficos de comparação para o escoamento das camadas

O gráfico que mostra a variação da deformação de escoamento da capa polimérica é o mais peculiar dentre os quatro. Este mostra a redução na deformação de escoamento da camada que mais foi afetada pelo rasgo. Este comportamento é, de todas as formas esperado, visto que o rasgo foi feito na própria capa polimérica. O valor do escoamento da camada para o rasgo de 20 mm, entretanto, é um ponto fora da curva. Por algum motivo, a deformação de escoamento foi alterada excessivamente neste caso, quebrando o padrão apresentado pelos outros pontos.

Ainda com relação à capa polimérica, a diferença percentual entre a deformação de escoamento para o caso sem rasgo e o caso com maior rasgo é de cerca de 53%. Isso significa que um rasgo da dimensão do diâmetro do tubo reduz a carga de escoamento da capa polimérica pela metade. Este valor pode parecer significativo se a capa for analisada individualmente, mas como a sua resistência axial representa uma parcela muito pequena da resistência axial do conjunto, este valor se torna insignificante.

Uma última comparação entre os casos pode ser feita colocando todas as curvas de resposta axial global em uma mesma escala. O resultado desta comparação pode ser vista no gráfico da Figura 7-103.

Figura 7-103 - Comparação da força de reação versus deformação imposta para todos os modelos

Pela Figura 7-103 é possível constatar que a resposta axial do sistema ficou inalterada com o aumento do rasgo durante uma parcela considerável do carregamento (até cerca de 2,2% de compressão normalizada). À partir deste ponto, as curvas assumem uma resposta divergente. A alteração mais evidente na resposta é a redução marginal da carga crítica. Isso acaba acarretando na ocorrência prematura da instabilidade em alguns dos casos mais críticos. Entretanto, esta mesma variação de carga crítica é mostrada no gráfico da Figura 7-101 e, conforme discussão prévia é de pouca importância na instabilidade geral do sistema.

A maior alteração nestas curvas é na faixa de valores referentes à resposta pós-crítica da estrutura. Todavia, muitas das simulações foram interrompidas pouco depois da ocorrência da instabilidade, o que dificulta a análise mais detalhada destes casos. O que se pode observar é que as curvas dependem do modo de instabilidade apresentado. Nota-se que os casos com rasgo menor (entre 20 e 100 mm) apresentam uma resistência axial residual maior do que os outros. Coincidentemente, nestes casos foi observado o modo de instabilidade lateral.

Em termos práticos, esta alteração no pós-crítico não é relevante, pois o comprometimento estrutural do tubo ocorre pouco antes da flambagem em si. Desta forma, pode se concluir que a alteração mais significativa do rasgo da capa polimérica na resposta compressiva do sistema é o efeito que aquele tem de influenciar na posição da ocorrência da instabilidade. Fora este efeito, um defeito apenas na capa polimérica externa é incapaz de

comprometer de forma significativa o tubo flexível no que diz respeito à falha por instabilidade de armadura de tração.

O carregamento de pressão hidrostática não foi contemplado neste trabalho. Se este fosse um parâmetro de análise, certamente o efeito do rasgo na capa polimérica seria mais significativo. Uma vez que a sua capacidade de vedação foi comprometida, a capa polimérica perde o efeito de confinamento. A pressão externa seria transmitida diretamente para a próxima camada estanque, ou seja, a capa polimérica interna e o tubo apresentaria uma chance maior de apresentar uma instabilidade radial.

7.5 Análises com o rasgo na fita de alta resistência

A análise da influência de um rasgo na capa polimérica na resposta do tubo flexível à instabilidade foi mostrada na seção anterior. Pela análise dos resultados apresentados, foi possível constatar que um defeito na camada mais externa do tubo não é capaz de alterar significativamente a resposta mecânica do mesmo. Todavia, a capa polimérica é apenas a primeira barreira das muitas camadas que seguem na estrutura do tubo. Logo em seguida, de fora para dentro, a camada seguinte seria a fita de alta resistência.

Conforme mencionado na seção 1.3.7 e na seção 4.3.2 deste trabalho, a fita de alta resistência é enrolada sobre os conjuntos de armadura de tração com o intuito de prevenir a formação de instabilidade radial. As fitas normalmente são feitas de materiais compósitos conhecidos por apresentarem uma alta resistência a esforços mecânicos. Um exemplo deste material é a fibra de aramida balística de alta resistência conhecida comercialmente como Kevlar®. Conforme consta na descrição do modelo do tubo flexível utilizado no trabalho, um material baseado no Kevlar® 49® foi reproduzido para este trabalho.

Sendo uma das camadas mais externas do tubo flexível, a fita de alta resistência também está sujeita a danos causados pelos mais diversos fatores. Impacto com o casco de embarcações, colisões com hélices, e esmagamento pelas sapatas durante o lançamento são apenas alguns dos possíveis agentes causadores de dano nas camadas externas. A Figura 7-104 mostra um exemplo de dano causado pelo contato de um *bend stiffener*. Uma análise mais cautelosa da imagem mostra uma série de fibras rompidas, junto à armadura de tração

externa, que ficou exposta. Estas fibras, nada mais são do que a fita de alta resistência rasgada.

Figura 7-104 - Dano às camadas externas de um tubo flexível causado pelo contato com um *bend stiffener*. Fonte: Carneval et al (2006)

As chances de um dano à fita de alta resistência ocorrer com a capa polimérica externa intacta são remotas. Normalmente, o agente causador do dano deve passar primeiro pela capa polimérica, para depois danificar as fibras da fita de alta resistência. Apesar disto, neste trabalho os efeitos dos danos nas duas camadas serão considerados de forma independente. Esta abordagem permite uma análise mais sistemática e detalhada da importância individual da camada como parte do conjunto.

7.5.1 Descrição do Ensaio

Assim como nos ensaios com a capa polimérica danificada, foi feito um corte passante na fita de alta resistência. A geometria utilizada pode ser descrita como dois segmentos circulares ligados por uma corda comum. A geometria, que muito se assemelha a uma *vesica piscis* pode ser vista na Figura 7-105. Naturalmente, a geometria do corte é semelhante à do defeito que foi introduzido na capa polimérica em item anterior e foi adotada após uma série de testes com cortes retangulares.

Apesar de o rasgo na Figura 7-104 ser na direção transversal, o rasgo do modelo é na direção longitudinal. Esta direção foi escolhida pelo fato de comprometer a fita na transversal, ou seja, na direção de maior resistência.

Figura 7-105 – Geometria do rasgo na fita de alta resistência

Com a finalidade de verificar o efeito da dimensão do dano na resposta do sistema à compressão, foram definidos oito casos. Em cada um deles, o comprimento longitudinal do rasgo é aumentado conforme a Tabela 7-9. A largura do rasgo é mantida constante e igual a 2 milímetros. Nota-se que o primeiro caso é o controle, visto que não possui um rasgo. Para o último caso, a fita de alta resistência é quase que completamente removida, com um rasgo de 2000 milímetros.

Tabela 7-12- Casos para o estudo do efeito do rasgo

Nome do Caso	Rasgo (mm)
RK1	0
RK2	20
RK3	50
RK4	100
RK5	200
RK6	400
RK7	1000
RK8	2000

Como será visto posteriormente, a subsequente abertura do rasgo e a plastificação local tiveram uma influência considerável na instabilidade local. Neste momento, as armaduras apresentam tensões ainda abaixo do escoamento. Estas tensões seguem aumentando, conforme a compressão é aplicada. A armadura de tração externa começa a apresentar tensões mais altas, concentradas na região imediatamente abaixo do rasgo na fita, ao passo que a armadura interna não apresenta qualquer perturbação em um campo de tensões uniforme. A Figura 7-107 mostra a concentração de tensões na armadura externa.

Figura 7-107 - Amostra com rasgo de 20 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Uma fração de segundo depois, os tendões sofrem um misto de deslocamento lateral e radial. Este deslocamento ocorre de forma abrupta, mas a sua localização é antecipada pela concentração de tensões. Um aspecto interessante é a assimetria da deformação. Do lado em que está situado o rasgo, o deslocamento radial é reportado e do lado oposto, é possível ver o deslocamento lateral. Na Figura 7-108, o deslocamento radial é evidente.

Figura 7-109 - Amostra com rasgo de 20 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

De forma a auxiliar na compreensão das mudanças de comportamento observadas na figura anterior, o gráfico da Figura 7-110 torna-se útil. Nesta curva, é possível observar a evolução da resultante da reação de apoio do conjunto. A fita de alta resistência é a primeira camada a iniciar o escoamento, no ponto marcado pelo número 1. O ponto 2 marca o início simultâneo do escoamento das duas armaduras e da capa polimérica externa. Pode-se notar também, que após a carga crítica, a instabilidade ocorre de forma mais sutil, pouco antes da simulação ser interrompida.

Figura 7-110 - Amostra com rasgo de 20 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Para o caso RK3, o rasgo adquiriu uma dimensão mais considerável. Com 50 milímetros, os efeitos do rasgo na instabilidade são mais evidentes. O primeiro efeito notável é o estado de tensões na fita de alta resistência. O escoamento foi adiantado para esta camada. A Figura 7-111 mostra concentração de tensão nas extremidades do rasgo. Neste ponto a camada começa a escoar.

Figura 7-111 - Amostra com rasgo de 50 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa

É interessante notar que, se houvesse uma malha adaptativa implementada, o rasgo aumentaria de tamanho conforme a compressão é aplicada. O deslocamento radial homogêneo também ocorre no início da simulação. As armaduras de tração passam a apresentar um campo de tensões cada vez mais heterogêneo, na medida em que a compressão aumenta. A Figura 7-112 mostra o campo de tensões na armadura interna, no instante imediatamente anterior à ocorrência da instabilidade. É possível observar que os valores das tensões já ultrapassam o limite de escoamento do material e as regiões de concentração (em vermelho) dão uma indicação da localização da instabilidade.

Figura 7-112 - Amostra com rasgo de 50 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

As imagens mostram a armadura interna apenas, mas a armadura externa também teve uma distribuição de tensões semelhante. Ambas as armaduras trabalharam de forma coesa neste caso e tiveram respostas semelhantes. Mesmo após a carga crítica, os tendões das duas camadas sofreram um deslocamento lateral, indicando instabilidade. A Figura 7-113 mostra a armadura interna neste instante. Este é um dos casos em que se torna difícil classificar o modo de instabilidade da estrutura, visto que também pode se notar um pequeno deslocamento radial dos tendões.

Figura 7-113 - Amostra com rasgo de 50 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

Para este caso, a Figura 7-114 mostra a força de reação medida em cada camada do tubo flexível. Naturalmente, as duas armaduras de tração suportam a maior parte do esforço axial. A armadura externa, todavia suporta mais carga do que a interna. Provavelmente isso se deve à pequena diferença de ângulo de assentamento e a um número maior de tendões. Outro aspecto notável é visível em uma diferença no trecho de descarregamento das curvas de reação das armaduras. A armadura de tração externa sofre uma queda bem mais sutil do que a armadura interna, que possui um pico mais visível.

Figura 7-114 - Amostra com rasgo de 50 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

A reação global da estrutura pode ser vista no gráfico da Figura 7-115. Pela sua forma peculiar, é possível reafirmar a dominância das armaduras na resposta da estrutura. É também possível constatar que, como um todo, a instabilidade fica mais evidente, com uma visível queda na força de reação. Os pontos destacados marcam o momento de início de escoamento para as camadas. O ponto marcado 1 corresponde ao início da plastificação da fita de alta resistência e o ponto 2 corresponde ao início simultâneo da plastificação da capa polimérica e das armaduras de tração.

Figura 7-115 - Amostra com rasgo de 50 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

O caso RK4, com um rasgo de 100 milímetros, teve curta duração. Aparentemente, o aumento do tamanho do defeito induziu um final prematuro na simulação. Todavia, este final ocorreu após a instabilidade, assim como nos outros casos. O primeiro escoamento do modelo se deu na fita de alta resistência. De forma similar aos casos anteriores, o rasgo na fita desencadeou o processo de plastificação. A concentração de tensão pode ser vista nos cantos do rasgo mostrado na Figura 7-116.

Figura 7-116 - Amostra com rasgo de 100 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa

A compressão inicialmente levou a estrutura a sofrer o deslocamento radial homogêneo. As tensões em ambas as armaduras aumentaram até atingir o escoamento. As tensões sofreram um acúmulo na região central do tubo para as duas camadas de armadura. Estas concentrações de tensão, que podem ser vistas na Figura 7-117 são os primeiros indícios da instabilidade prestes a ocorrer.

Figura 7-117 - Amostra com rasgo de 100 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

No momento em que a carga compressiva aplicada na estrutura atinge um valor crítico, o equilíbrio da estrutura se torna instável. Este equilíbrio dura pouco, visto que imediatamente após a carga crítica, os tendões das armaduras sofrem um considerável deslocamento lateral. Neste caso, o deslocamento radial foi ínfimo, de tal sorte a possibilitar a classificação da instabilidade ocorrida como lateral. Na Figura 7-118 é possível observar o deslocamento lateral destes tendões em uma das armaduras. Nota-se também que as tensões nas armaduras já ultrapassaram o limite de escoamento, por isso, a instabilidade pode ser classificada também como plástica.

Figura 7-118 - Amostra com rasgo de 50 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

Para este caso, os gráficos da Figura 7-119 mostram as reações de apoio de cada uma das camadas que compõem o tubo flexível. Por este gráfico, é possível notar um comportamento que se torna recorrente na medida em que o rasgo é aumentado. A armadura externa acaba suportando mais carga do que a interna. Um aspecto interessante é o de que, apesar de receber a maior parte do carregamento, a armadura externa sofre instabilidade depois da interna. Aparentemente, o rasgo na fita de alta resistência permite que a armadura externa mantenha o equilíbrio estável por mais tempo, desequilibrando a distribuição de carga.

Figura 7-119 - Amostra com rasgo de 100 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

O gráfico da Figura 7-120 mostra a reação de apoio axial da estrutura como um todo. Nota-se que a simulação se sustenta por pouco tempo depois que a curva atinge o patamar. Os pontos marcados no gráfico representam os instantes em que cada uma das camadas inicia o escoamento. O ponto marcado 1 mostra o escoamento da fita de alta resistência, o ponto 2 marca o escoamento de ambas as armaduras de tração e o ponto número 3 marca o escoamento da capa polimérica externa.

Figura 7-120 - Amostra com rasgo de 100 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

A partir da análise dos casos anteriores, fica patente a influência do rasgo da fita de Kevlar® na resposta compressiva do sistema. A partir do caso RK5, busca-se levar o problema até o limite, ou seja, até que a fita de alta resistência esteja completamente comprometida. O novo caso conta com um rasgo consideravelmente maior, de 200 milímetros de largura. A grande dimensão do rasgo faz com que o campo de tensões fique mais bem delineado. As maiores tensões, todavia, ainda estão concentradas nos cantos, como pode ser visto na Figura 7-121.

Figura 7-121 - Amostra com rasgo de 200 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa

A compressão aplicada causa a esperada expansão radial homogênea dos tendões. Pode-se observar não mais do que 5% do diâmetro do tubo em deslocamento. Todavia, este deslocamento não assumiu um padrão repetitivo, observado nos outros casos. Desta vez, ocorreu um deslocamento radial mais localizado, na altura da metade do comprimento do tubo. As tensões nos tendões das armaduras passaram do limite de escoamento do material. As regiões de concentração podem ser vistas na Figura 7-122.

Figura 7-122 - Amostra com rasgo de 200 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

Uma vez ultrapassada a carga crítica, o equilíbrio instável é prontamente substituído por uma nova configuração de equilíbrio. Desta vez, o modo de instabilidade é nitidamente radial. Tanto a armadura de tração interna quanto a armadura externa apresentam um grande e súbito deslocamento radial. No instante imediatamente subsequente à instabilidade, é possível ver que o comprimento do tubo afetado pela instabilidade tem a dimensão característica do rasgo feito na fita de alta resistência. A Figura 7-123 mostra o resultado de instabilidade na região central do tubo para a armadura de tração interna. A armadura externa apresentou uma resposta semelhante.

Figura 7-123 - Amostra com rasgo de 200 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

Os gráficos da Figura 7-124 mostram a reação de apoio para cada uma das camadas do tubo flexível. O mesmo padrão de comportamento é observado para as armaduras de tração. Nota-se uma resistência maior vinda da armadura externa durante toda a simulação. Entretanto, é a armadura interna que perde rigidez de forma mais contundente. A fita de alta resistência e a capa polimérica externa continuam tendo uma participação marginal na reação compressiva quando comparadas as armaduras.

Figura 7-124 - Amostra com rasgo de 200 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Analisando a reação da estrutura como um todo, é possível observar a típica curva de instabilidade. É evidente que a queda de rigidez não é tão brusca como em outros casos e este é um efeito digno de nota do rasgo na fita de alta resistência. É importante notar também a significativa queda da carga crítica da estrutura, que foi de cerca de 700 kN para quase 350 kN. Este aspecto será comentado na seção final deste capítulo com mais detalhes.

Os pontos marcados no gráfico indicam o início do escoamento para cada uma das camadas. O número 1 marca o escoamento da fita de alta resistência, sempre a primeira camada a plastificar. O número 2 marca o escoamento da armadura externa e o número 3 representa o escoamento simultâneo da capa polimérica externa e da armadura de tração interna.

Figura 7-125 - Amostra com rasgo de 200 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

O caso RK6 conta com um rasgo de 400 milímetros. Tal dimensão já é muito superior à dimensão característica do modelo (o diâmetro externo de cerca de 230 milímetros). Todavia, é de interesse deste experimento encontrar os limites superiores da resposta compressiva do tubo. A fita de alta resistência é a primeira camada a apresentar tensões acima do limite de escoamento. Na Figura 7-126 é possível ver essas altas tensões nos cantos do rasgo.

Figura 7-126 - Amostra com rasgo de 400 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa

As armaduras de tração, por sua vez, iniciam o deslocamento radial uniforme observado também nos casos anteriores. O escoamento não tarda a ocorrer para estas camadas também. O campo de tensões equivalentes começa relativamente homogêneo, com um padrão helicoidal. Todavia, quando as tensões aumentam, o padrão é substituído por uma concentração de tensões na região central do modelo. Nesta mesma região, forma-se uma saliência onde os deslocamentos radiais são ligeiramente maiores do que no restante do modelo. Isso fica evidente ao observar a Figura 7-127.

Figura 7-127 - Amostra com rasgo de 400 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

Uma vez ultrapassada a carga crítica, os tendões da armadura sofrem um súbito deslocamento radial. A magnitude deste deslocamento é pequena em um primeiro momento, não excedendo 10% do diâmetro externo da amostra. Todavia, na medida em que a simulação prossegue, este deslocamento aumenta, chegando a 25% no final da simulação. Este deslocamento excessivo pode ser visto na Figura 7-128. É possível relatar também que as tensões ao longo do comprimento do tubo tiveram seus valores reduzidos e a tensão máxima fica concentrada na região central.

Figura 7-128 - Amostra com rasgo de 400 mm, pouco depois de apresentar instabilidade (armadura interna). Tensão de Von Mises em MPa

O gráfico da Figura 7-129 tem grande utilidade na determinação da eficiência das camadas trabalhando em conjunto. Através dele, pode se observar que a armadura externa é dominante no que diz respeito à reação compressiva do modelo. O valor da reação axial da armadura externa é maior do que a interna durante quase toda a simulação. É interessante notar também que a queda de rigidez é mais brusca na armadura de tração interna. Isso mostra o quanto a fita de alta resistência é importante para a coesão do sistema, visto que, no modelo com a fita intacta ou com um dano pequeno, as duas armaduras de tração trabalhavam de forma mais coesa.

Esta simulação, em particular, foi interrompida em um momento muito posterior ao das outras. Neste caso, é possível fazer alguns comentários quanto ao comportamento pós-crítico do sistema. Sendo assim, a primeira observação pertinente é a de que a armadura externa apresenta certa resistência axial, mesmo após a instabilidade. A armadura interna, por sua vez fica comprometida de tal forma que a resposta compressiva fica igual à da capa polimérica.

Figura 7-129 - Amostra com rasgo de 400 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

O gráfico da Figura 7-130, de forma complementar ao anterior, apresenta a resposta do sistema como um todo. A resultante axial de forças global apresenta um comportamento mais patológico de instabilidade, uma vez que há uma carga crítica e subsequente perda de rigidez bem definidas. Os pontos marcados indicam o início do escoamento para cada uma das camadas.

A primeira camada a ceder é a fita de alta resistência (ponto 1). Nos primeiros instantes da simulação, ela já apresenta plastificação. Como dito anteriormente, este efeito está relacionado à presença de um rasgo, o qual ocasiona concentrações de tensão. Em seguida, a capa polimérica e a armadura de tração externa iniciam o seu escoamento de forma simultânea, no ponto marcado 2. No instante que segue, pode ser observado o início da plastificação da armadura de tração interna. É importante ressaltar que, dada a proximidade destes pontos, pode-se considerar quase simultâneos estes escoamentos.

Figura 7-130 - Amostra com rasgo de 400 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

De 400 para 1000 milímetros, a dimensão do rasgo foi mais do que aumentada. Em termos práticos, um dano desta magnitude dificilmente seria feito em ensaios experimentais. Para fins deste estudo, todavia, se torna interessante estudar o caso limite para o rasgo na fita. A Figura 7-131 mostra a dimensão do rasgo quando comparado ao comprimento total da amostra e o estado de tensões no momento do início da plastificação. Neste caso, nota-se a concentração de tensões nas extremidades do rasgo.

Figura 7-131 - Amostra com rasgo de 1000 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa

A compressão aplicada em uma das extremidades faz com que as tensões se intensifiquem nas duas camadas de armadura. As maiores tensões (em ambas as armaduras) acabam surgindo na região central da amostra, mais especificamente, abaixo do rasgo na fita de alta resistência. O campo de tensões na armadura externa pode ser visto na Figura 7-132. Nota-se que a escala indica altas tensões acima do limite de escoamento, isto leva a armadura externa a ser a primeira das armaduras a sofrer plastificação.

Figura 7-132 - Amostra com rasgo de 1000 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Após atingir a carga máxima, os tendões das armaduras de tração iniciam um deslocamento de forma a obter uma nova configuração de equilíbrio. Um aspecto notável deste caso é o fato de este deslocamento ser consideravelmente mais lento e gradual do que os casos anteriores. A Figura 7-133 mostra os primeiros instantes deste processo, onde se nota uma diferença sutil para a configuração em equilíbrio estável. A Figura 7-134 mostra o final, já com uma aparência mais característica de uma instabilidade radial. Apesar de a armadura externa estar representada pelas figuras, a armadura interna apresentou um comportamento semelhante. Para evitar excesso de repetição, as figuras referentes à armadura interna serão omitidas.

um período considerável da simulação e está relacionado ao deslocamento gradual dos tendões, citado anteriormente.

Figura 7-135 - Amostra com rasgo de 1000 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

Na Figura 7-136, é possível verificar a reação de apoio resultante de todas as camadas do tubo. Um aspecto notável desta curva é o início. Conforme comentado anteriormente, os primeiros instantes do modelo apresentam um alto grau de não linearidade que resulta em uma solicitação anormal na capa polimérica. Entretanto, a partir de 0,5% de deformação axial imposta, a curva apresenta um trecho praticamente linear. Se fosse necessário calcular a rigidez do sistema, certamente teria de ser neste trecho em particular.

Os pontos enumerados na curva representam o instante em que cada uma das camadas iniciou o escoamento. O ponto 1 representa a fita de alta resistência, o ponto 2 marca o escoamento da capa polimérica e os pontos 3 e 4 marcam o escoamento das armaduras de tração externa e interna, respectivamente.

Figura 7-136 - Amostra com rasgo de 1000 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

Com um rasgo de 2000 mm, o caso RK8 praticamente remove a fita de alta resistência. A Figura 7-137 mostra o tamanho do rasgo, quando comparado com o comprimento da amostra. Apesar da grande diferença de dimensão, o efeito concentrador de tensão permanece nas extremidades. Nota-se que o rasgo iniciou a abertura logo que a compressão começou, todavia, diferentemente dos casos anteriores, o escoamento demorou um pouco mais para ocorrer, com quase 1% de deslocamento imposto.

Figura 7-137 - Amostra com rasgo de 2000 mm. Ocorrência do escoamento da fita de alta resistência, logo no início da compressão. Tensão de Von Mises em MPa

A capa polimérica, por sua vez, também apresentou tensões altas na região imediatamente acima do rasgo. Este comportamento também pôde ser observado nos casos anteriores. As armaduras sofreram uma pequena expansão radial, como de costume. O campo de tensões nas armaduras começou uniforme. Na medida em que a compressão avançava, valores mais altos foram surgindo nas imediações da região abaixo das extremidades dos rasgos. A Figura 7-138 mostra as tensões concentradas nesta região.

Figura 7-138 - Amostra com rasgo de 2000 mm, pouco antes de apresentar instabilidade (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

Logo depois de atingir a carga crítica, os tendões da armadura externa iniciaram um deslocamento lateral. Este deslocamento não foi repentino como em casos anteriores, mas gradual. Este comportamento vai se refletir na curva de reação de apoio para esta camada (Figura 7-140). A armadura de tração interna, por sua vez, atinge a sua carga limite somente no final da simulação (muito depois da armadura externa). A queda de rigidez observada na armadura de tração interna, por outro lado, já é mais característica do fenômeno da instabilidade. A Figura 7-139 mostra a armadura de tração externa no final da simulação

Esta diferença de resposta das duas armaduras é um dos aspectos mais interessantes deste caso. Isso porque é uma forte evidência da importância da fita de alta resistência para garantir a coesão entre as camadas. No final desta seção, será feita uma discussão englobando todos os casos desta série de análises, no qual será traçado um panorama mais global, com uma comparação quantitativa de todos os casos.

Figura 7-139 - Amostra com rasgo de 2000 mm, no final da simulação (armadura externa). Tensão de Von Mises em MPa

As curvas de força de reação para cada camada do modelo (Figura 7-140) são um reflexo do comportamento observado nos tendões. Nota-se claramente que uma das armaduras de tração responde a mais carga axial do que a outra. No caso, a armadura externa apresenta uma resposta maior do que a interna até pouco antes da simulação ser interrompida. A queda gradual de rigidez também pode ser vista, logo após o pico de força para a armadura externa.

Os detalhes mais notáveis deste caso estão no início e no final da simulação. No início, nota-se que as duas armaduras de tração não respondem ao carregamento aplicado. Isto se deve, provavelmente, ao fechamento de contatos e pequenos ajustes de ângulo de assentamento das duas armaduras. Este é um efeito não linear de grande importância para este modelo e faz com que a capa polimérica seja a camada mais solicitada no início da simulação. No final, pode se notar ainda que uma queda na resposta da armadura de tração externa gera uma sobrecarga na interna, fazendo com que a última sofra uma instabilidade.

Figura 7-140 - Amostra com rasgo de 2000 mm. Força de reação em cada camada versus deslocamento axial imposto

A resposta global do sistema pode ser vista na Figura 7-141. Nota-se que até 1% de deformação imposta, o sistema ainda se ajusta ao carregamento imposto. Contatos são fechados até que, a partir do ponto 1, a rigidez efetiva pode ser vista. O primeiro ponto marca o início do escoamento da fita de alta resistência, o segundo ponto marca o escoamento da capa polimérica e os pontos 3 e 4 marcam o início do escoamento para a armadura externa e interna respectivamente.

Nota-se que os escoamentos das armaduras estão bem espaçados entre si. Mais uma evidência de que as camadas (em especial, as armaduras) não estão trabalhando de forma coesa. A primeira armadura a iniciar o escoamento é a externa. Isto era de se esperar, visto que ela é a camada mais solicitada. A última camada a iniciar seu escoamento é a armadura de tração interna (devido a uma sobrecarga súbita).

Figura 7-141 - Amostra com rasgo de 2000 mm. Força de reação no conjunto versus deslocamento axial imposto

7.5.3 Comparação dos Resultados

A partir da análise individual dos casos, é possível observar a mudança de comportamento do modelo como um todo conforme o rasgo é aumentado. É possível também observar os resultados através da ótica da camada individual. Apesar disso, uma análise mais racional pode ser feita confrontando os resultados de cada uma das oito análises feitas entre si.

O primeiro parâmetro de comparação escolhido é a carga crítica. A Tabela 7-13 possibilita a análise da evolução da carga crítica do sistema, da primeira deformação de escoamento, a deformação axial imposta no momento em que ocorre a instabilidade e o modo de flambagem em si. Pela simples observação da tabela, já é possível detectar que a carga crítica sofre uma queda quando se aumenta o dano na fita de alta resistência.

Tabela 7-13 - Comparação de resultados

Caso	Carga Crítica (kN)	Primeira Deformação de Escoamento (%)	Deformação Axial Imposta no Momento da Instabilidade (%)	Modo de Instabilidade
RK1	710,02	0,79	2,84	Lateral
RK2	606,22	0,47	2,05	Misto
RK3	440,47	0,32	1,10	Misto
RK4	394,25	0,16	1,10	Lateral
RK5	339,33	0,16	1,10	Radial
RK6	307,01	0,16	1,42	Radial
RK7	256,77	0,47	2,21	Lateral
RK8	241,69	0,95	5,82	Radial

A queda da carga crítica também pode ser vista no gráfico da Figura 7-142. Nele é possível constatar que a carga crítica não apenas sofre uma queda, mas também que tal queda ocorre de forma exponencial. A disposição dos pontos no gráfico permite o ajuste de uma função exponencial (linha preta contínua). A curva ajustada indica uma clara tendência da carga crítica de convergir para um determinado valor (algo em torno de 200 kN) para o caso de um dano infinito na fita.

Figura 7-142 - Efeito do rasgo na carga crítica

Uma resposta como esta é intuitiva e condizente com a ideia de que a fita de alta resistência é um componente crucial na mitigação da instabilidade de armadura de tração. Os

outros parâmetros da mesma tabela, por outro lado, não apresentam uma variação tão previsível. A primeira deformação de escoamento, por exemplo, começa com um valor relativamente alto (0,79%), chega a um valor mínimo (0,16%) e volta a subir, até atingir um valor superior ao inicial. Algo semelhante pode ser observado da deformação axial imposta no momento da instabilidade. Este efeito será mais bem detalhado após a discussão da Tabela 7-14 dos seus gráficos relacionados, na Figura 7-143.

O modo de instabilidade, por sua vez, foi um parâmetro difícil de avaliar. Baseado apenas no aspecto visual do modelo no instante logo após a instabilidade e na configuração final do sistema, os modos foram classificados como: lateral, radial ou misto. De certa forma, a listagem dos modos na última coluna da Tabela 7-13 não mostra um padrão de resposta no modo. O que se pode afirmar, todavia, é que no momento da instabilidade, os arames iniciaram um deslocamento lateral e após certo tempo, este deslocamento viria a se tornar radial para alguns dos casos. Fato bastante peculiar, visto que o rasgo na fita de alta resistência deveria induzir o modo radial.

Tabela 7-14 – Resultados de escoamento para as diferentes camadas

Caso	Rasgo (mm)	Armadura Interna (%)	Armadura Externa (%)	Fita de Alta Resistência (%)	Capa Polimérica (%)
RK1	0	2,52	2,52	0,79	2,36
RK2	20	2,05	2,05	0,47	2,05
RK3	50	0,95	0,95	0,32	0,95
RK4	100	0,63	0,63	0,16	0,79
RK5	200	0,63	0,47	0,16	0,63
RK6	400	0,95	0,79	0,16	0,79
RK7	1000	3,15	1,58	0,47	1,26
RK8	2000	5,83	3,47	0,95	2,21

Outros parâmetros importantes para esta análise são o escoamento das diversas camadas e o momento em que ocorre para cada uma. Para isso, foi feito um pós-processamento individual de cada camada. Neste contexto, foi anotado o instante em que surgiu uma tensão superior ao escoamento na camada em questão. Este instante foi representado pela quantidade de deslocamento controlado aplicado. A Tabela 7-14 mostra justamente estes resultados.

Neste caso, pode se notar que todas as variáveis apresentam um comportamento análogo, semelhante ao observado na primeira deformação de escoamento, na Tabela 7-13.

No início, todas as quatro camadas analisadas apresentam um valor de deformação de escoamento mediano. Na medida em que se aumenta o rasgo na fita, esta deformação vai reduzindo. Fisicamente, isso significa que o aumento do dano na fita faz com que as camadas iniciem o escoamento mais cedo. Este padrão é observado até o ponto em que o rasgo atinge 200 milímetros de largura.

De 400 milímetros em diante, o aumento do rasgo faz com que o escoamento das camadas apresente uma tendência contrária. A partir deste ponto, o escoamento é retardado e passa a ocorrer mais para o final da simulação em casos extremos como o do rasgo de 2000 milímetros. O gráfico da Figura 7-143 mostra este comportamento de uma forma mais visual.

Figura 7-143 - Gráficos de comparação para o escoamento das camadas

É interessante notar que o ponto de mínimo mostrado nas curvas da Figura 7-143 ocorre na região da abscissa 200 milímetros. Não é de se estranhar que este valor corresponde à dimensão característica do diâmetro do modelo (cerca de 230 milímetros). Sendo assim, pode se assumir que um rasgo cuja dimensão está próxima ao do diâmetro do tubo é aquele que mais antecipa o escoamento das camadas. As armaduras de tração, particularmente, sofrem a alteração mais drástica nos seus instantes de plastificação.

Ainda com relação ao gráfico da Figura 7-143, outros padrões de comportamento podem ser avaliados. Nota-se que, com rasgos pequenos, as camadas do tubo sofrem

escoamento em instantes próximos, quando não ocorre simultaneamente. Isso pode ser visto observando as curvas das armaduras externa e interna. Em um primeiro momento, as duas armaduras e a capa polimérica iniciam o seu escoamento ao mesmo tempo. Quando o rasgo aumenta, este passa a ocorrer em instantes diferentes para cada uma das camadas.

Uma possível justificativa para esta resposta está na relação entre a fita de alta resistência e a coesão das camadas. Tal coesão surge devido ao “estrangulamento” que a fita causa nas armaduras, fazendo com que estas permaneçam em contato desde o início da compressão. De certa forma, pode se dizer que a fita de alta resistência aumenta a coesão e regula a distribuição de carga compressiva por camada, contribuindo para uma melhoria da resistência do tubo no critério de falha por instabilidade.

Este resultado é coerente com a observação feita ao final do estudo sobre o coeficiente de atrito. Na outra ocasião, a força de atrito também auxiliava na coesão entre as camadas. Agora o atrito também é a resposta só que, ao invés do coeficiente μ , o parâmetro alterado é a força normal entre as camadas, que é reduzida quando se rasga a fita de alta resistência. Em se tratando de um modelo de Coulomb, o efeito é o mesmo que o da redução do coeficiente de atrito μ .

Para concluir esta seção, a Figura 7-144 mostra o histórico de reação de apoio para todos os casos em uma mesma escala. Desta forma, é possível fazer uma comparação mais objetiva dos resultados. Uma primeira observação é a de que, por mais precoce que tenha sido o encerramento da simulação, ocorreu após o ponto de máximo em todas as curvas. Sendo assim, pode se dizer que a carga máxima é reduzida com o aumento do rasgo (Figura 7-142). Este decréscimo foi significativo, caindo de 700 kN para cerca de 200 kN, com o maior rasgo.

A inclinação do trecho linear de cada uma delas também foi alterada. Nota-se que o rasgo causou uma redução na rigidez dos modelos. Este é um fato notável, visto que a fita de alta resistência possui uma seção de corte mínima quando comparada com a de outras camadas, todavia, ela tem uma contribuição importante na rigidez axial do tubo que não pode ser contabilizada simplesmente pelo cálculo simples do produto entre a sua área e o seu módulo de Young (EA).

Figura 7-144 - Comparação da força de reação versus deformação imposta para todos os modelos

8 Comentários Finais

As diversas camadas do tubo flexível são capazes de suportar os carregamentos mais diversos durante toda a vida útil destes componentes. Um destes carregamentos é a tração. As armaduras de tração são capazes de suportar um montante extraordinário de força, resultante de milhares de metros de tubo suspenso. Por outro lado, em determinados momentos da operação destes tubos, o carregamento pode trocar de sinal e se transformar em compressão. Esta simples troca de sinal muda completamente a natureza do problema e suas eventuais consequências para as camadas do tubo. Uma das implicações da carga compressiva é a instabilidade das armaduras de tração.

Foi mostrado no capítulo da revisão bibliográfica que este não é um tema novo ou desconhecido no meio acadêmico, tão pouco na indústria. Ao longo de pelo menos três décadas, este tema vem sendo estudado por diversos grupos de pesquisa, das mais variadas formas possíveis. O uso de métodos numéricos, tal como o Método dos Elementos Finitos, vem sendo usado desde o início dos anos 2000. Desde então, novos modelos vêm surgindo e seus resultados são cada vez mais precisos, gerando comentários e discussões na busca pela compreensão da mecânica da instabilidade.

Neste contexto, foi apresentada uma possível abordagem para o estudo desta instabilidade, usando o Método dos Elementos Finitos não linear. Esta tese pode ser vista como uma união importante entre o pináculo das ferramentas de análise numérica e o que se conhece como estado da arte no estudo da instabilidade de armaduras de tração. O modelo criado pode ser citado como uma das contribuições deste trabalho. Diferentemente de muitos outros modelos que podem ser vistos em publicações, este é reproduzível. Todos os detalhes importantes e informações pertinentes necessárias para a reprodução deste podem ser encontrados neste trabalho.

8.1 Sobre o Modelo

Seu desenvolvimento foi feito em várias etapas. Os primeiros estudos envolveram geometrias simples como tendões retos em contato com substratos poliméricos (Figura 8-1). As etapas seguintes envolveram a construção de tendões com geometria helicoidal e testes de compressão em estruturas tubulares simples. Este metódico processo tomou o primeiro ano e meio deste projeto e gerou vários modelos que envolviam desde o estudo da plasticidade até o funcionamento das rotinas de ajuste de interferência inicial de contatos.

Figura 8-1 - Primeiro modelo, utilizado no estudo do contato entre vigas e sólidos

No final deste período chegou-se a uma primeira versão apresentável do modelo, que foi batizada de *Outer Ring*. Este foi bem descrito em um capítulo anterior deste trabalho, mas alguns atributos podem ser destacados:

- Núcleo rígido, representado as camadas do anular do tubo flexível;
- Uma centena de tendões de armadura retangulares e helicoidais, capazes de interagir entre si e com as outras camadas através de contatos não lineares;
- Propriedades de material que incluem plasticidade e encruamento para todas as camadas;

- Fita de alta resistência modelada através de elementos de casca isotrópica;
- Capa polimérica externa com material de Polietileno;
- Construção das geometrias totalmente parametrizada;
- Possibilidade se incluir imperfeições iniciais nas camadas mais externas;
- Construção através de macro, em *Python*, o que torna o modelo versátil e compacto (da ordem de centenas de *kilobytes*).

Além dos aspectos apontados anteriormente, os estudos paramétricos geraram questionamentos, que por sua vez levaram a melhorias no modelo. Um exemplo disso é o comprimento da amostra, que foi definido após a verificação da influência das condições de contorno no resultado final.

O modelo foi construído de forma a ser complexo, como fenômeno que ele representa. A partir dele, novas variações podem ser criadas, de forma a tornar o processo um pouco mais eficiente. As camadas foram construídas de forma a dar a maior liberdade possível para a estrutura e permitem que os tendões busquem a configuração de mínima energia sem qualquer tipo de impedimento.

8.2 Sobre as Análises Paramétricas

Desde a primeira versão do modelo do *Outer Ring*, as análises paramétricas geraram resultados importantes e levaram a discussões sobre a resposta compressiva de tubos flexíveis. Dentre os muitos parâmetros que definem este modelo, apenas alguns foram selecionados como objeto de estudo para este trabalho. Como teste preliminar da primeira versão, foi testada a influência do atrito e da presença da fita de alta resistência no modelo. Os testes do atrito consistiram em uma avaliação binária, com apenas duas variações: atrito nulo

ou atrito não nulo. O mesmo vale para a análise da influência da fita de alta resistência, com duas variações: com fita e sem fita.

Análises paramétricas mais conclusivas necessitavam de uma versão do modelo mais condizente com a realidade. Por isso, foi feita a nova versão do *Outer Ring*, que passou a contar com um número maior de tendões de armadura e um comprimento de amostra maior. A importância da fita de alta resistência foi mostrada na análise paramétrica inicial, por este motivo, a nova versão do modelo passou a contar com uma fita de alta resistência com um modelo de material ortotrópico. As análises com a última versão do modelo contemplam os seguintes parâmetros:

- Comprimento da amostra;
- Coeficiente de atrito;
- Defeito na capa polimérica;
- Defeito na fita de alta resistência.

Cada uma dessas análises paramétricas gerou uma grande quantidade de resultados, os quais foram previamente discutidos neste texto. Esta seção final do trabalho será dedicada a discutir os aspectos mais relevantes de cada uma dessas análises.

Os testes de variação no **comprimento da amostra** mostraram que o comprimento do tubo tem um efeito irrelevante na resposta do modelo. Após uma série de comparações, é possível observar que o comportamento pré-flambagem das amostras é virtualmente idêntico e elas apenas varia no pós-flambagem. Até mesmo as camadas do tubo iniciaram o seu escoamento em instantes muito próximos, nos diferentes testes. Isso significa que nenhuma delas foi mais ou menos solicitada com a variação do comprimento. O único aspecto que efetivamente foi alterado entre uma amostra e outra foi o modo de instabilidade. Todavia, não foi possível observar um padrão que permita relacionar essa mudança com a variação do comprimento. A estrutura também apresentou diferentes modos de instabilidade com a variação do comprimento, mas sem um padrão de repetição. Por outro lado, o modo não altera a carga crítica ou qualquer outra característica pré-flambagem do modelo. Sendo assim, a sua importância não é tão grande.

No caso do **atrito**, o efeito foi mais evidente. A começar pela carga crítica, que aumentou exponencialmente até atingir um valor limite. É notável o fato de que, a partir de certo ponto, um aumento no valor do coeficiente de atrito não acarreta em mudanças na carga crítica e ela se mantém no valor máximo. A solicitação individual de cada camada foi medida pelo seu instante de escoamento, que variou significativamente com coeficiente de atrito 0 até 0,1 e em seguida passou a variar pouco. A assincronia inicial do escoamento das camadas mostra que a ausência do atrito diminuiu a coesão do sistema, fazendo com que o tubo não resista de maneira ótima ao carregamento aplicado. Isso mostra que o atrito entre as camadas é fundamental para a coesão do tubo, fazendo com que este suporte cargas maiores. Quanto ao modo de instabilidade, foi predominantemente lateral. A única alteração ocorreu para o caso com coeficiente 0,25, que resultou em uma instabilidade radial.

O **defeito na capa polimérica** externa foi introduzido através de um rasgo longitudinal. Foram testados rasgos que variavam de 20 a 300 milímetros de comprimento longitudinal e um caso com a capa polimérica intacta, para servir de controle. Através de um gráfico de comparação, foi possível observar um pequeno decréscimo na carga crítica. Este decréscimo também acarretou em um adiantamento do momento da instabilidade para os casos com um defeito mais significativo. Um efeito importante destes rasgos, todavia, foi o fato de o rasgo influenciar a localização da instabilidade. Nos casos em que não há rasgo, o local de ocorrência da instabilidade variava entre a região central do tubo e as extremidades. Quando se coloca um defeito em uma das camadas mais externas, este tem o efeito de induzir a aparição da instabilidade nas suas proximidades. É importante observar que o efeito deste rasgo seria muito mais significativo se o modelo estivesse operando sob pressão. O rasgo representa uma quebra na vedação, fazendo com que a pressão externa não atue sobre as armaduras.

O **rasgo na fita de alta resistência**, por sua vez, tem um efeito mais significativo na resposta compressiva do modelo. Neste caso, o rasgo foi idêntico ao feito na capa polimérica. As dimensões, todavia, foram alteradas para valores entre 20 e 2000 milímetros, incluindo um caso com a fita intacta, para servir de controle. O primeiro efeito observado foi na carga crítica do sistema, que foi reduzida com o aumento do rasgo, convergindo assintoticamente para um valor mínimo. O escoamento das camadas, por sua vez, apresentou a variação mais peculiar. De início, com rasgos pequenos (de 20 a 200 milímetros) foi reportado um adiantamento no escoamento das camadas, em especial as armaduras, passaram a escoar mais prematuramente. A partir de 200 milímetros, todavia, o instante de escoamento das camadas

volta a aumentar, só que passa a ocorrer de forma assíncrona, mostrando que a coesão do sistema fora comprometida.

Os estudos conduzidos com estes quatro parâmetros mostraram que a resposta compressiva de um tubo flexível é muito sensível a determinados parâmetros, como defeitos na fita de alta resistência e o coeficiente de atrito. Outros parâmetros, por outro lado, como o comprimento da amostra e o rasgo na capa polimérica não trouxeram alterações significativas para o modelo com as condições de carregamento propostas. O modo de instabilidade é tratado por muitos autores como uma medida de controle em análises paramétricas de instabilidade. Foi uma surpresa, neste trabalho, o fato deste ter se comportado de forma tão imprevisível.

O tempo de duração do doutorado não permitiu o estudo de todas as variáveis que governam o fenômeno e todos os mecanismos associados. Todavia, espera-se que tenha sido dado um passo considerável na compreensão de tais mecanismos que colaboram com um fenômeno tão complexo quanto à instabilidade de tubos flexíveis. Outras variáveis importantes, como por exemplo, a influência da pressão hidrostática, da curvatura e da própria dinâmica do sistema podem ser investigadas em estudos posteriores. Neste âmbito, o presente trabalho pode ser usado como um sólido ponto de partida, um paradigma para novos estudos e novos modelos.

9 Bibliografia

- ALVES FILHO, A. (2010). *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE*. São Paulo: Érica.
- ALVES FILHO, A. (2012). *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE - Análise não-Linear*. São Paulo: Érica.
- American Petroleum Institute. (1999). *Specification for Unbonded Flexible Pipe (API Specification 17J)*. Washington D.C.: Techstreet.
- American Petroleum Institute. (2002). *Recommended Practice for Flexible Pipe (API Recommended 17B)*. Washington D.C.: ILI.
- Bahtui, A., Alfano, G., & Bahai, H. (2009). A Multi-Scale Approach to the Analysis of Ultra Deepwater Unbonded Flexible Risers. *Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- Bahui, A., Bahai, H., & Alfano, G. (2008). A Finite Element Analysis for Unbonded Flexible Risers Under Torsion. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering (JOMAE)*(November).
- BBC. (06 de Julho de 2013). *Piper Alpha: How we survived North Sea disaster*. Acesso em 27 de Dezembro de 2013, disponível em BBC News Scotland: <http://www.bbc.co.uk/news/uk-scotland-22840445>
- Brack, M., Troina, L. B., & Sousa, J. M. (2005). *Flexible Riser Resistance Against Combined Axial Compression, Bending and Torsion in Ultra-Deep Water Depths*. Proceedings of the 24th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

- Braga, M. P., & Kaleff, P. (2004). *Flexible Pipe Sensitivity to Birdcaging and Armor Wire Lateral Buckling*. Proceedings of the 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
- Braun, S. G., Ewins, D. G., & Rao, S. S. (2002). *Encyclopedia of Vibration*. Elsevier.
- Caleyron, F., Guiton, M., Leroy, J. M., Perdrizet, T., Charliac, D., Estrier, P., et al. (2014). A multi-purpose finite element model for flexible risers studies. *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2014)*.
- Carneval, R. O., Marinho, G. M., & Santos, J. M. (Berlin, 2006). Flexible Line Inspection. *Proceedings of the 2006 European Conference on Non-Destructive Testing*.
- Cruz, F. T. (1996). *Análise Estrutural de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. São Paulo: Tese de Mestrado.
- Custodio, A. B., Lemos, C. A., Troina, L. M., & Almeida, M. C. (2007). *Recent Researches on the Instability of Flexible Pipe's Armour*s. Proceedings of The 17th International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Gay Neto, A. (2011). *Estabilidade Estrutural da Configuração Estática de Risers em Catenária*. São Paulo: Tese de Doutorado.
- Gay Neto, A., & Martins, C. A. (2009). A Comparative Buckling Study for the Carcass Layer of Flexible Pipes. *Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- Gay Neto, A., & Martins, C. A. (2011). Flexible Pipes: Influence of the Pressure Layer in the Wet Collapse Resistance. *Proceedings of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- Gay Neto, A., Martins, C. A., Malta, E. R., Godinho, C. F., Barbosa Neto, T. F., & Lima, E. A. (2012). Wet and dry collapse of straight and curved flexible pipes: a 3D FEM

modeling approach. *Proceedings of The 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference*.

Gay Neto, A., Martins, C. A., Pesce, C. P., & Ferreira, T. B. (2009). A Numerical Simulation of Crushing in Flexible Pipes. *Proceedings of the 20th International Congress in Mechanical Engineering*.

Gay Neto, A., Martins, C. A., Pesce, C. P., Meirelles, C. O., Malta, E. R., Barbosa Neto, T. F., et al. (1 de 135 de 2010). Prediction of Burst in Flexible Pipes. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 9 pages.

Hanken, E., Hollingsworth, E. R., & Fagerland, L. S. (2010). In-Place FE Modeling of Umbonded Flexible Pipelines Capturing Pressure Stiffening and Decoupled Axial/Nonlinear Bending Stiffness. *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

Kable Intelligence Limited. (2013 a). *Evonik Industries - Polyamide 12 and PEEK for oil & gas applications*. Acesso em 26 de December de 2013, disponível em Offshore Technology.com: <http://www.offshore-technology.com/contractors/lubricants/evonik-industries-polymers-energy/evonik-industries-polymers-energy1.html>

Kable Intelligence Limited. (2013 b). *Marlim Sul, Brazil*. Acesso em 28 de Dezembro de 2013, disponível em Offshore Technology.com: <http://www.offshore-technology.com/projects/marlim/marlim1.html>

Le Corre, V., & Probyn, I. (2009). Validation of a 3-Dimensional Finite Element Analysis Model of a Deep Water Steel Tube Umbilical in Combined Tension and Cyclic Bending. *Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

Leroy, J. M., Perdrizet, T., Le Corre, V., & Estrier, P. (2010). Stress Assessment in Armour Layers of Flexible Risers. *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

- Malta, E. R., Gonçalves, S. H., Gay Neto, A., & Martins, C. A. (2013). Finite Element Modeling of Flexible Pipes During Launching Procedure. *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- Malta, E. R., Martins, C. A., Gay Neto, A., & Toni, F. G. (2012). An Investigation About the Collapse Shape of Flexible pipes. *Proceedings of The 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference*.
- Merino, H. E., Sousa, J. R., Magluta, C., & Roitman, N. (2009). On the Coupled Extensional-Torsional Response of Flexible Pipes. *Proceeding of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- Merino, H. E., Sousa, J. R., Magluta, C., & Roitman, N. (2010). Numerical and Experimental Study of a Flexible Pipe Under Torsion. *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- Novitsky, A., & Sertã, S. (2002). *Flexible Pipes in Brazilian Ultra-Deepwater Fields - A Proven Solution*. New Orleans: Proceedings of the 14th Deep Offshore Technology.
- Østergaard, N. H., Lyckegaard, A., & Andreasen, J. H. (2012). On modelling of lateral buckling failure in flexible pipe tensile armour layers. *Journal of Marine Structures*, pp. 64-81.
- Perdizet, T., Leroy, J. M., Barbin, N., Le-Corre, V., Charliac, D., & Estrier, P. (2011). *Stresses in armour layers of flexible pipes: comparison of Abaqus models*. 2011 SIMULIA Customer Conference.
- Petróleo Brasileiro S.A. - CENPES. (2008). *Technical Specification - I-ET-3010.00-1500-960-PPC-006*. Rio de Janeiro: CENPES.
- Picksley, J. W., Kavanagh, K., Garnham, S., & Turner, D. (Houston, Texas, U.S.A. de 2002). Managing the Integrity of Flexible Pipe Field Systems: Industry Guidelines and their Application. *Proceedings of the 2002 Offshore Technology Conference*.

- Rizzo, N. A. (2010). *Análise da Instabilidade de Armaduras de Dutos Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. Rio de Janeiro: Tese de Mestrado.
- Sævik, S., & Ji, G. (2014). Differential equation for evaluating transverse buckling behavior of tensile armour wires. *Proceeding of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2014)*.
- Serta, O., Fumis, R., Connaire, A., Smith, J., Tanaka, R., Barbosa, T., et al. (2012). *Predictions of Armour Wire Buckling for a Flexible Pipe Under Compression, Bending and External Pressure Loading*. Proceedings of the 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- SIMULIA. (2011). ABAQUS 6.11. *CAE Users Manual*.
- Sousa, J. R. (2005). *Análise Local de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado.
- Sousa, J. R., Campello, G. C., Bueno, A. B., Vardaro, E., Ellwanger, G., & Strohaecker, T. R. (2011). On the Structural Response of a Flexible Pipe With Damaged Tensile Armor Wires. *Proceedings of the ASME 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2011)*.
- Sousa, J. R., Pinho, A. N., Ellwanger, G. B., & Lima, E. C. (2009). Numerical Analysis of a Flexible Pipe With Damaged Tensile Armor. *Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- Tan, Z., Loper, C., Sheldrake, T., & Karabelas, G. (2006). *Behavior of Tensile Wires in Unbonded Flexible Pipe Under Compression and Design Optimization for Prevention*. Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
- Timoshenko, S., & Goodier, J. N. (1951). *Theory of Elasticity*. Palo Alto, CA: MacGraw-Hill Book Company Inc.

- Troina, L. M., Mourelle, M. M., Brack, M., Sousa, J. R., & Siqueira, M. Q. (2002). *A Strategy for Flexible Risers Analysis Focused on Compressive Failure Mode*. Deep Offshore Technology (DOT 2002).
- UOL. (07 de Março de 2013). *Conheça a História da Petrobras*. Acesso em 26 de Dezembro de 2013, disponível em UOL Notícias: http://ec.i.uol.com.br/economia/2013/03/07/2006-p-50-albacora-autossuficiencia-petrobras-1362690685285_956x500.jpg
- Vaz, M. A., & Rizzo, N. S. (Julho de 2011). A Finite Element Model for Flexible Pipe Armor Wire Instability. *Journal of Marine Structures*, pp. 275-291.
- Zhu, D., Mobasher, B., & Rajan, S. D. (2011). Dynamic Tensile Testing of Kevlar 49 Fabrics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(03).
- Zhu, L., Tan, Z., Nogueira, V. P., Liu, J., & Clevelario, J. (2015). Prediction and qualification of radial birdcage and lateral buckling of flexible pipes in deepwater applications. *Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2015)*.