

AValiação Numérica do Colapso de Dutos Flexíveis por Pressão Externa

Victor Pinheiro Pupo Nogueira¹ (COPPE/UFRJ), Theodoro Antoun Netto² (COPPE/UFRJ)

¹Engenharia Naval e Oceânica COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia 21945-970, RJ, victor@lts.coppe.ufrj.br

²Engenharia Naval e Oceânica COPPE/UFRJ Centro de Tecnologia 21945-970, RJ, tanetto@lts.coppe.ufrj.br

A expansão da produção petrolífera brasileira segue a tendência de exploração em águas cada vez mais profundas. Isto implica na necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias capazes de garantir a produção em condições mais severas de carregamento ou a adaptação da tecnologia atual ao novo desafio. A Bacia de Campos produz óleo e gás predominantemente através de dutos flexíveis, que consistem em complexas estruturas cilíndricas concêntricas de material polimérico e metálico (aço). O objetivo é conjugar boas propriedades de resistência aos esforços incidentes em dutos submarinos, característica que os dutos rígidos não possuem. As camadas metálicas são projetadas para prover resistência estrutural do duto aos carregamentos de pressão interna, externa e tração (respectivamente camada zeta, carcaça interna e armaduras de tração). As camadas poliméricas destinam-se à estanqueidade e à diminuição dos efeitos de atrito. A análise estrutural de dutos flexíveis exige, portanto, uma abordagem complexa que se reflete na dificuldade em se elaborar modelos numéricos eficientes para a análise de tensões e determinação dos seus vários modos de falha. Uma ameaça à segurança operacional de dutos flexíveis é a instabilidade estrutural (colapso) de suas camadas metálicas. A natureza deste fenômeno é catastrófica, uma vez que se caracteriza pela acentuada redução de rigidez das camadas quando submetidas a carregamentos excessivos. Como conseqüências, elevadas deformações podem provocar a falha dos materiais que compõem as camadas e comprometer a estanqueidade do duto. O presente trabalho dedica-se ao estudo através de modelos numéricos, baseados em elementos finitos, do colapso de dutos flexíveis gerado por carregamentos de pressão externa. Dutos intactos e com moissas oriundas de problemas ocorridos durante a instalação ou impacto de objetos serão avaliados através de estudos de casos práticos.

Dutos flexíveis, Instabilidade Estrutural, Elementos Finitos

1. INTRODUÇÃO

Um problema de relevância em dutos flexíveis é a prevenção de falha devido à instabilidade estrutural. Este fenômeno caracteriza-se pela queda abrupta de rigidez quando o carregamento sobre alguma das camadas metálicas atinge determinado limite. A partir deste ponto a estrutura entra no chamado colapso estrutural, em que grandes deformações são geradas e o risco de falha torna-se eminente.

No projeto de dutos flexíveis, a instabilidade mecânica das camadas metálicas é fator determinante de projeto uma vez que a sua ocorrência gera riscos à produção e ao meio ambiente. Durante a vida útil de um duto flexível, vários fatores de natureza operacional ou casual podem provocar danos mecânicos em sua estrutura na forma de moissas. Estes danos mecânicos locais podem gerar deformações na estrutura das camadas metálicas que, por sua vez, podem influenciar a pressão de colapso do duto. A passagem do duto flexível pelo tracionador (também chamado de Caterpillar), por exemplo, durante o procedimento de instalação, pode gerar pré-deformações em sua estrutura na forma de moissas devido aos esforços compressivos gerados pelas lagartas.

Sabe-se que, em dutos rígidos, estes danos reduzem consideravelmente a resistência ao colapso, entretanto não se podem afirmar os efeitos destes tipos de danos na resistência operacional dos dutos flexíveis.

O presente trabalho objetiva o estudo do efeito de diferentes níveis de pré-deformação em dutos flexíveis, considerando seu comportamento estrutural sob por pressão externa. Para tanto, utiliza-se o método de elementos finitos baseado na analogia entre cascas e grelhas de TIMOSHENKO e WOINOWSKY-KRIEGER, conforme SOUSA (2005), para a modelagem da carcaça intertravada e da camada zeta de um duto flexível.

2. REVISÕES TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

2.1. Instabilidade Estrutural

A flexão gerada em vigas simples sob carregamento compressivo constitui o exemplo mais conhecido de instabilidade estrutural. O gradual aumento do carregamento compressivo gera o encurtamento da estrutura até que se alcance um limite em que ocorre uma redução brusca na rigidez à compressão e a instabilidade manifesta-se na flambagem da viga.

TIMOSHENKO (1941) analiticamente demonstra a existência de um carregamento compressivo crítico para vigas ideais no regime elástico, que é indicado no gráfico da Figura 1 a. Neste ponto, a incrementação da carga gera contínuo aumento de rigidez. Energeticamente, isto significa que o sistema passa a “procurar” uma nova configuração equilíbrio estável (linha tracejada).

Considerando o comportamento não-linear do material e eventuais imperfeições geométricas, a resposta da viga pós-colapso altera-se de tal forma que a partir de um determinado limite a estrutura perde significativamente a sua rigidez, conforme ilustrado na Figura 1b. De acordo com TIMOSHENKO (1941), este novo limite constitui o carregamento crítico real de uma viga simples sob compressão

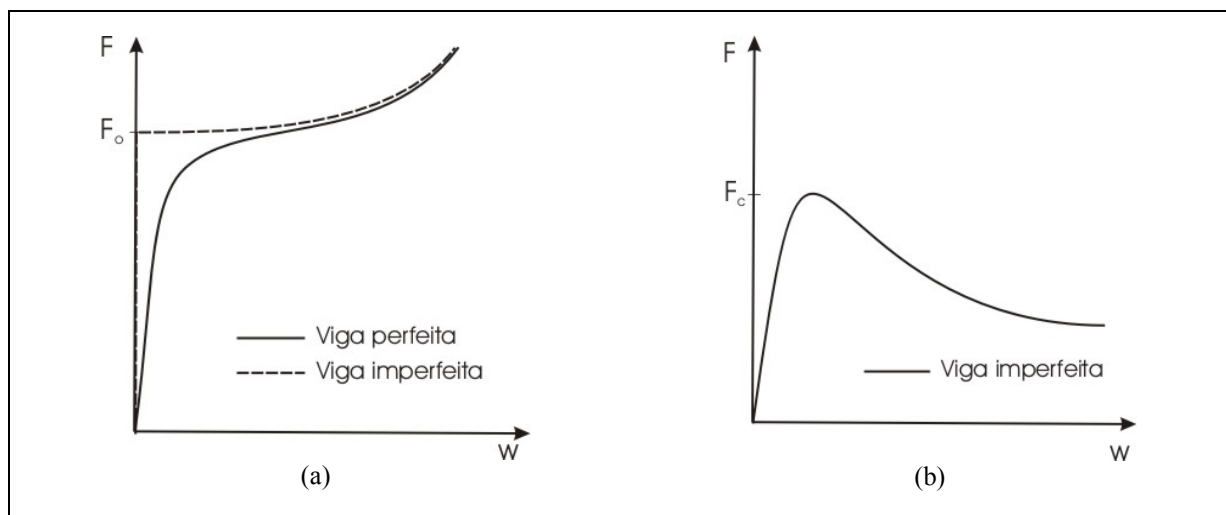


Figura 1. Curvas de força axial versus deslocamento transversal em vigas considerando comportamento linear elástico do material e comportamento não-linear.

No caso de cascas cilíndricas (dutos), a aplicação de pressão externa eventualmente causa instabilidade após um aumento gradual de ovalização inicial da casca cilíndrica. A resistência estrutural é formada pela combinação de tensões de membrana e de flexão que, a partir de determinado carregamento crítico induzem queda da rigidez do duto e colapso. Esse fenômeno é bem descrito por KYRYAKIDES e BABCOCK (1981), conforme ilustrado na Figura 2.

DYAU e KYRIAKIDES (1993) estudaram os mecanismos de colapso característicos de dutos esbeltos. O estudo demonstrou que cascas cilíndricas de determinado comprimento apresentam a instabilidade localizada na região de maior imperfeição inicial, cuja magnitude também exerce influencia na pressão crítica de colapso. Além disso, DYAU e KYRIAKIDES (1993) concluíram que as respostas do colapso entre dutos com ovalização uniforme (deformações axialmente uniformes) e localizada são iguais até a pressão externa atingir o valor crítico, sendo diferenciadas no comportamento pós-colapso.

2.2. Instabilidade Estrutural em Dutos Flexíveis

Atualmente existem duas formas mais conhecidas de instabilidade estrutural em *risers* flexíveis: uma gerada pelo carregamento de compressão axial das armaduras de tração que pode acarretar o *birdcaging* (gaiola de passarinho) ou instabilidade lateral dos arames e outra gerada por pressão externa, sendo este último tema do presente trabalho.

O desafio contido na elaboração de um modelo em elementos finitos representativo de um duto flexível está na representação dos intrincados perfis e geometrias característicos das camadas metálicas da estrutura. SOUZA (2002) demonstrou que a modelagem fidedigna da carcaça intertravada é extremamente onerosa sob o ponto de vista computacional pois os complicados perfis das armaduras metálicas aumentam a quantidade de graus de liberdade do modelo e, consideravelmente, o tempo de análise. Além disso, a quantidade de não-linearidades de contato envolvidas no modelo bem como a diferença entre a rigidez axial e a de flexão trazem sérios problemas de convergência.

SOUZA (2005) estudou o colapso hidrostático de dutos flexíveis a partir de modelo representativo em elementos finitos próprio baseado em elementos de CASCA galgados na teoria de TIMOSHENKO e WOINOWSKY-KRIEGER que estabelece uma analogia entre cascas ortotrópicas e grelhas. Foram obtidos resultados significativos no que diz respeito à resposta estrutural do duto até a determinação da carga crítica e na contribuição das não linearidades geométrica, física e de contato através de correlação numérico-experimental.

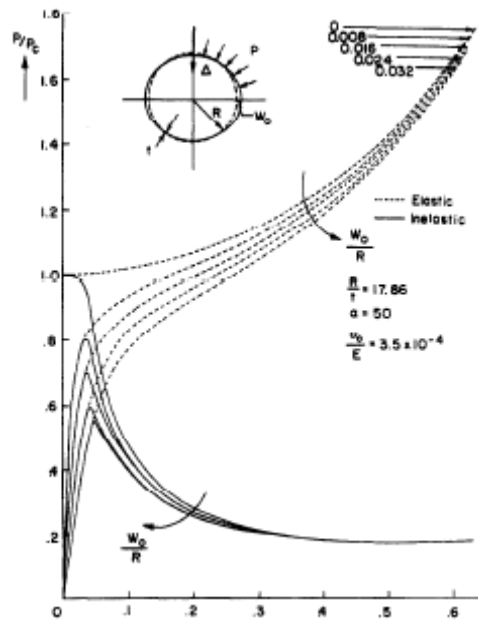


Figura 2. Pressão versus ovalização de um anel com diferentes níveis de imperfeição (ovalização) inicial- Casos elástico e elasto-plástico (KYRIAKIDES e BABCOCK,1981).

Até o presente momento, entretanto, não se foi executado um estudo que relacione os efeitos de imperfeições iniciais ou pré-deformações na resistência de dutos flexíveis ao colapso por pressão externa bem como o comportamento pós-colapso da estrutura.

3. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Com o intuito de se verificar numericamente a influencia de diferentes níveis de imperfeições (ovalização) em dutos flexíveis na pressão de colapso, foram realizadas análises em elementos finitos através de modelo representativo elaborado por SOUSA (2005) com o programa ANSYS. As análises foram divididas em duas etapas.

A primeira etapa do trabalho consistiu em uma verificação de malha no intuito de se determinar a configuração do modelo que fornece a resposta mais aceitável para a pressão de colapso.

Em uma segunda etapa foram realizadas análises de colapso usando a malha escolhida cosiderando imperfeições geométricas sob a forma de mochas com diferentes penetrações.

3.1 O modelo de elementos finitos

De acordo com SOUZA (2002), a resistência ao colapso de um duto flexível é formada pela sobreposição de efeitos entre a carcaça intertravada e a armadura zeta, sendo desprezível a influência das armaduras de tração. Portanto, conforme mostrado na Figura 3, os modelos elaborados para o estudo de colapso levaram em consideração apenas essas duas camadas e a barreira plástica estanque que as separa.

Com o objetivo de simplificar o modelo, foi simulado 1/4 da geometria do duto, baseando-se na simetria geométrica de uma seção e com comprimento correspondente a 1 elemento de 0.095D, modelo equivalente ao que DYAU e KYRIAKIDES (1981) chamaram de modelo em anel, através do qual estudaram o colapso com ovalização uniforme da estrutura.

Seguindo orientação estabelecida no modelo apresentado na Figura 3, as condições de contorno utilizadas corresponderam à simetria em relação ao eixo Z nos nós pertencentes ao plano XY, simetria em relação ao eixo X nos nós pertencentes ao plano YZ e simetria em relação ao eixo Y nos nós pertencentes ao plano XZ.

O modelo baseou-se em elementos de casca de 4 nós, com seis graus de liberdade cada, do tipo SHELL181 para a modelagem de todas as camadas, capazes de comportar não-linearidades geométricas. As propriedades destes elementos foram definidas através da analogia entre grelhas e cascas ortotrópicas de acordo com SOUSA (2005).

O contato entre as camadas é modelado através do elemento CONTA178, capaz de prever contato e deslizamento entre as camadas. Em todas as análises utilizaram-se as propriedades padrões do programa ANSYS para a simulação de contato (o estudo do efeito de não-linearidades de contato é deixado para um trabalho futuro).

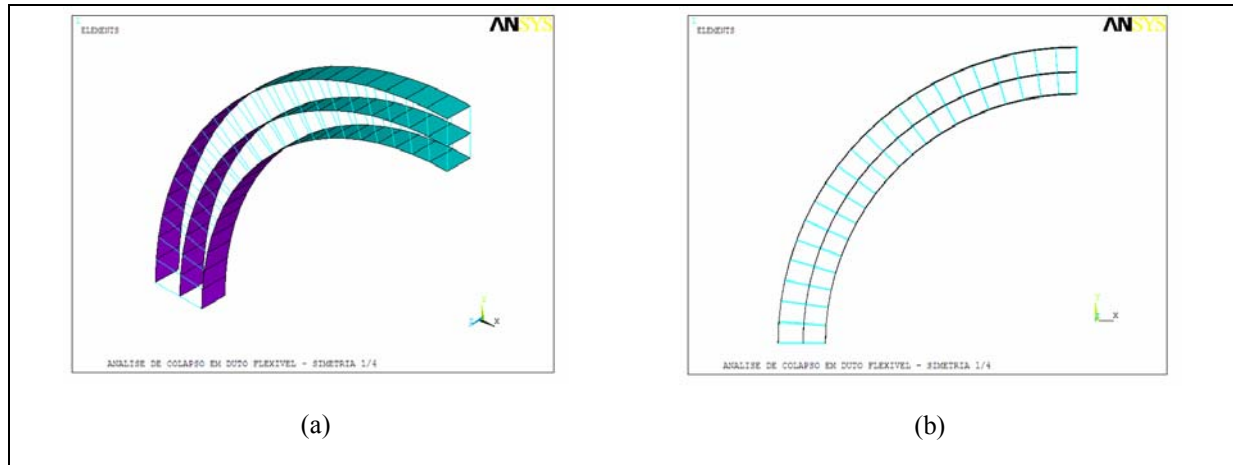


Figura 3. Vistas isométrica (a) e lateral (b) do modelo em Elementos Finitos de malha de seção completa de 88 elementos representando a carcaça intertravada, a barreira plástica estanque e a armadura zeta.

3.1. Aplicação das Mossas

Para serem inseridas imperfeições geométricas ao modelo foi efetuada a penetração de uma superfície esférica rígida na extremidade superior do eixo Y do modelo intacto, conforme ilustrado na Figura 4. Para o modelo em questão, o diâmetro da superfície não interfere no tamanho da mossa nem no nível de pré-deformação aplicada.

É importante observar que a aplicação da mossa neste modelo, na realidade, representa a aplicação de duas mossas ao mesmo tempo e diametralmente opostas. Isto se deve simplesmente ao fato da utilização de simetria de 1/4 da seção. Ainda, considera-se que a ovalização final imposta ao modelo é constante ao longo do comprimento do duto, já que apenas um anel é modelado.

PARK e KYRIAKIDES (1994) demonstraram que o colapso de dutos rígidos pré-deformados com mossas caracteriza-se, assim como no colapso de dutos intactos, pela aproximação gradual de pontos diametralmente opostos com o conseqüente contato na seção de maior ovalização. Nesta situação o duto assume a forma de um “osso” e, este, possui simetria de 1/4 de seção, conforme ilustração da Figura 5. Justifica-se, portanto, a utilização do modelo mais simples para a elaboração do trabalho.

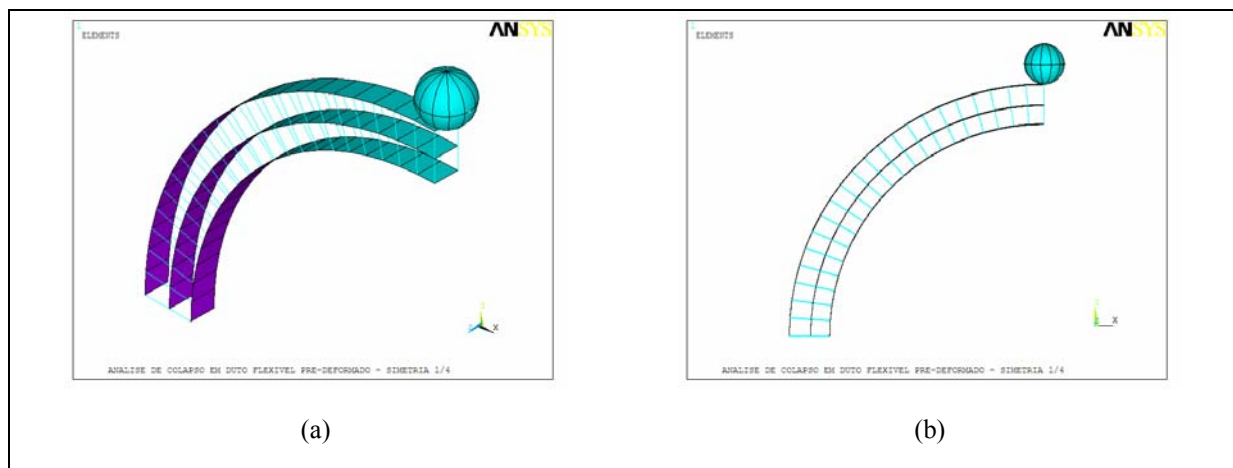


Figura 4. Vistas isométrica (a) e lateral (b) do modelo em Elementos Finitos representando a carcaça intertravada, a barreira plástica estanque e a armadura zeta para a inserção de mossa na estrutura.

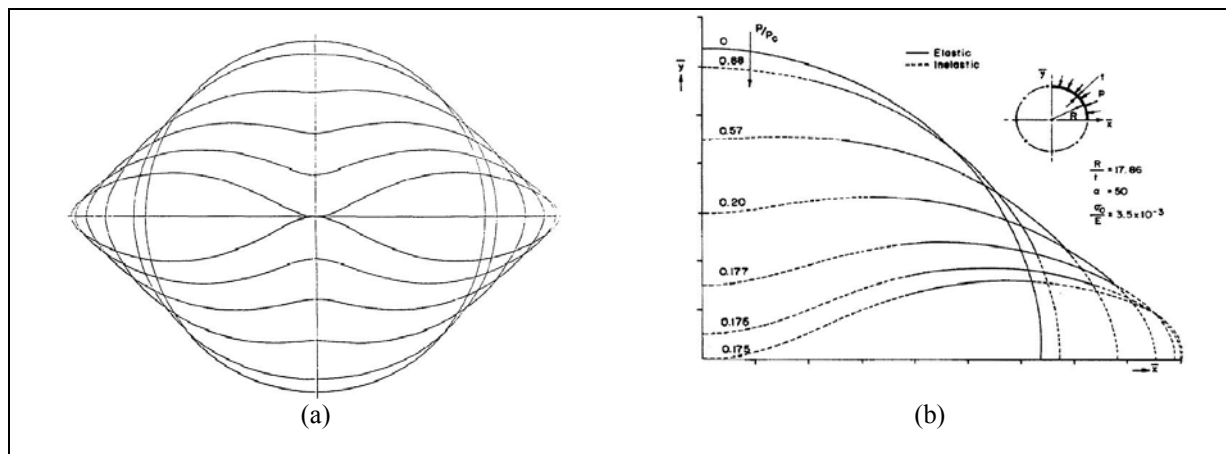


Figura 5. Ilustrações das ovalizações graduais geradas pelo colapso de um duto flexível de material linearmente elástico (a) e não-linear plástico (b). (DYAU e KYRIAKIDES, 1993)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Verificação de Malha

Foram realizadas análises em dutos intactos (com ovalização inicial igual a 0,05%) e com diferentes quantidades de elementos. A Tabela 1, que relaciona a malha (#) com a pressão crítica (P_{cr}) obtida e a variação deste valor relativamente ao resultado obtido na análise de malha anterior. A quantidade de elementos se refere à que teríamos caso a geometria inteira da seção estivesse sendo analisada. Portanto, a quantidade de elementos efetivamente analisada é a quantidade referenciada na Tabela 1 dividida por 4, conforme a Figura 3.

Para a consideração de não-linearidades de material, foi considerada a teoria de fluxo J2 com encruamento isotrópico. As curvas tensão-deformação dos metais foram ajustadas por uma aproximação multi-linear “convertidas” para o caso em análise, relativamente à relação de rigidezes elaborada por SOUSA (2005).

Tabela1. Pressões de colapso puro.

#	P_{cr} (MPa)	ΔP_{cr} (%)
40	32.95320	-
48	32.77505	0.54062
52	32.72780	0.14416
56	32.69070	0.11336
60	32.65080	0.12205
64	32.62385	0.08254
68	32.60390	0.06115
72	32.58535	0.05690
76	32.56960	0.04833
80	32.5549	0.04513
84	32.5458	0.02795
88	32.5374	0.02581
92	32.52655	0.03335

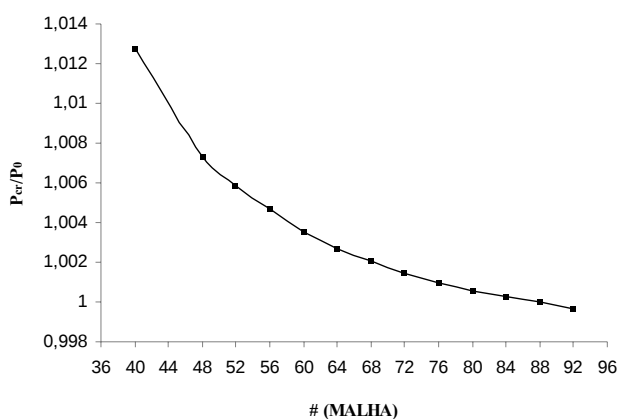


Figura 6. Gráfico indicando a convergência das pressões de colapso com o refino da malha.

Observa-se conforme o refinamento da malha que a diferença dos resultados gradualmente se reduz. Adotou-se o valor de 0.05% de diferença como satisfatório para a escolha da malha. Entretanto, levando-se em consideração a relativa rapidez das análises e a necessidade de se ter malhas refinadas o bastante para prever satisfatoriamente a pressão de colapso. Escolheu-se a malha 88 para a próxima etapa do trabalho e, portanto, o valor de 32.53 MPa como referência para o colapso do duto intacto.

Na Figura 7 é apresentada a curva completa da análise do duto intacto obtida para a malha 88 e o perfil do anel pós-colapso. Para a adimensionalização da tensão foi considerada a pressão de colapso obtida na verificação de malha e para a adimensionalização do deslocamento foi considerado o raio interno médio do modelo, de 52,8mm.

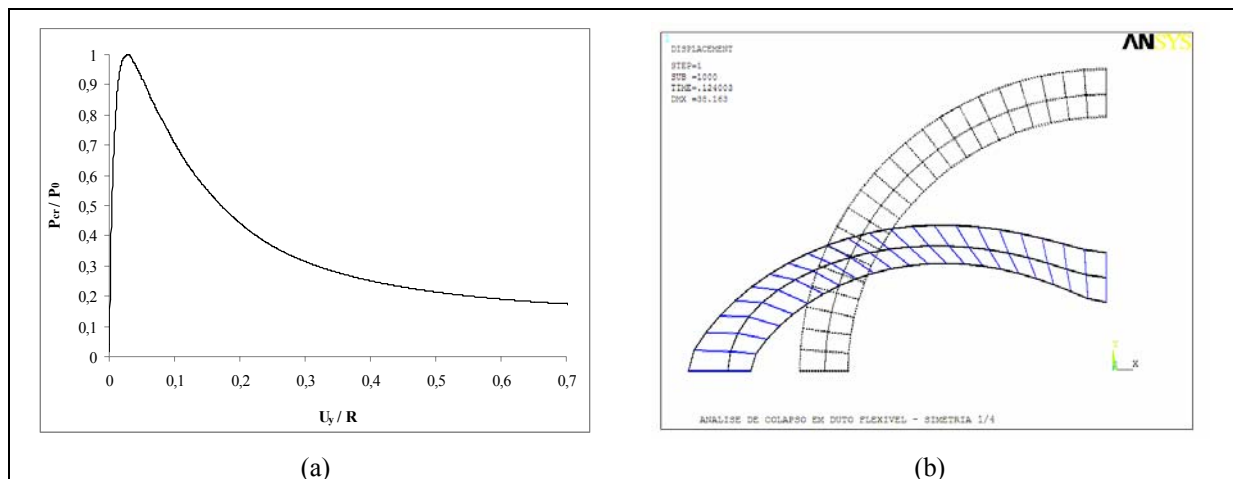


Figura 7. Gráfico de colapso adimensionalizado para a malha de 88 elementos (a) e perfil de colapso no último passo de carga, multiplicado por dois, em comparação com o perfil original, pontilhado (b).

Através da Figura 7b percebe-se nos nós contidos no plano XZ uma leve tendência de separação da armadura zeta. Isto significa que a restrição imposta pelas camadas superiores, que não são modeladas, pode exercer influencia no colapso da armadura zeta. Chama-se a atenção para o fato que as únicas camadas mais externas à zeta são as armaduras de tração ou as barreiras plásticas. Como, sob o ponto de vista de projeto, as camadas plásticas não exercem função estrutural, a influência das armaduras de tração ao comportamento do duto ao colapso por pressão externa deve ser eventualmente consideradas. Este estudo é reservado para um próximo trabalho.

4.1.2 Análise da Influência de Não-Linearidade Material

Em todas as análises realizadas até o momento foram consideradas não linearidades físicas relativas aos materiais metálicos modelados. Para a carcaça intertravada e para a armadura zeta foram consideradas as curvas tensão-deformação relativas aos materiais AISI304 e FI15, ilustradas na Figura 8.

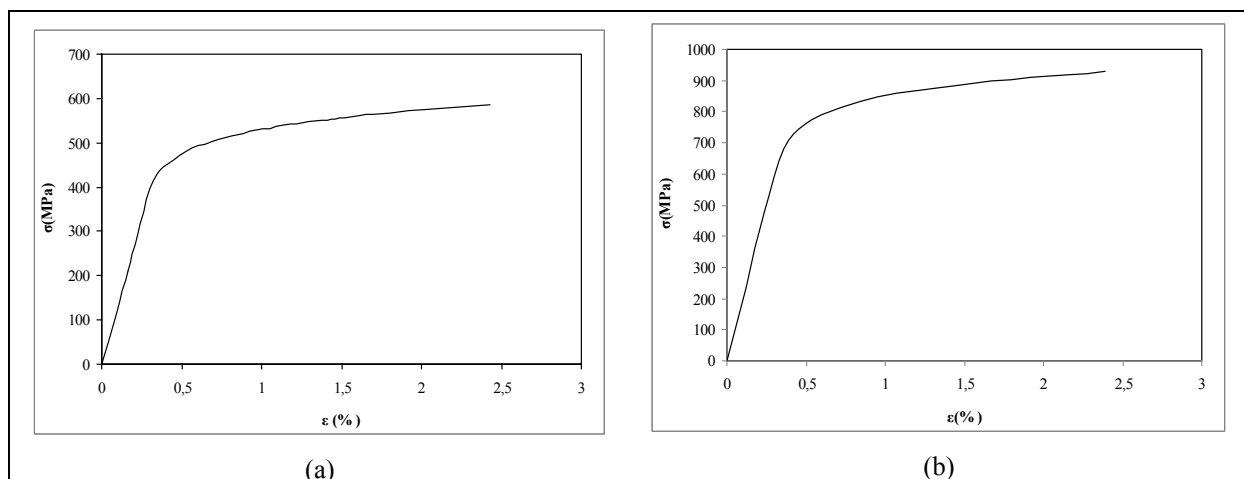


Figura 8. Curvas tensão-deformação dos materiais AISI304, da carcaça intertravada, (a) e FI15, da armadura zeta

(b).

Para a alimentação do modelo, estas curvas foram modificadas de forma equivalente à efetuada por SOUSA (2005), apenas, entretanto, corrigindo a curva para as tensões de membrana, considerando que até o ponto de colapso da estrutura a contribuição das tensões de flexão são desprezíveis. O comportamento pós-colapso caracteriza-se pela considerável contribuição de tensões de flexão em associação à tensões de membrana, por isso os resultados apresentados não podem ser considerados como tendo boa representatividade em relação ao comportamento real, pós-colapso.

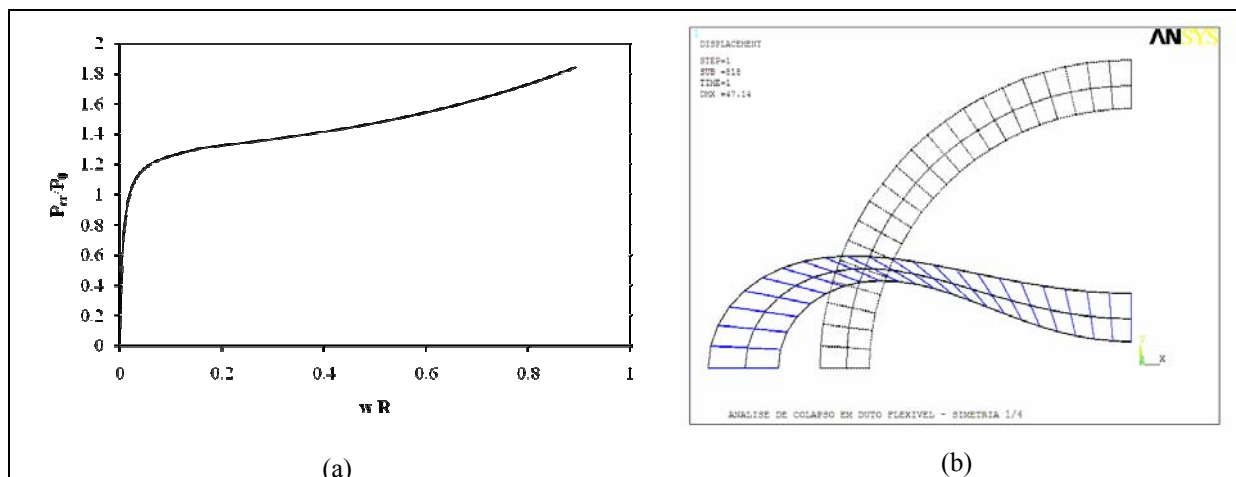


Figura 9. Curva de colapso obtida considerando os materiais metálicos como lineares elásticos (a) e o perfil de colapso obtido ao final da análise (b).

4.2. Análise do Colapso de Dutos Pré-Deformados

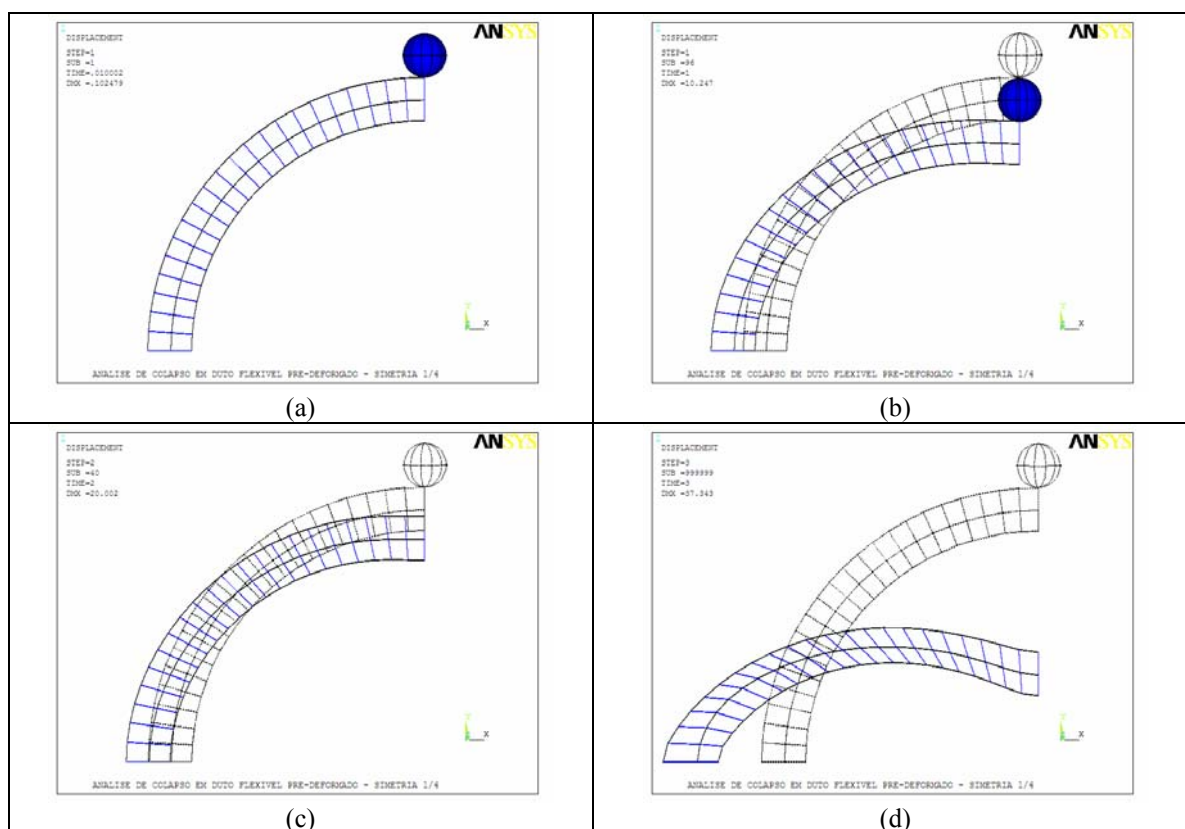


Figura 10. Ilustração da geometria inicial do modelo de colapso (a) e das geometrias do modelo ao final dos passos de carga 1 (b), 2 (c) e 3 (d).

Mantendo-se, portanto, as configurações até agora utilizadas e retirando as curvas de material, mantendo os módulos de elasticidade determinados pela analogia entre grelhas e cascas ortotrópicas e considerando os materiais elástico-lineares, obtém-se o gráfico da Figura 9a.

Nesta etapa do trabalho utilizaram-se os modelos detalhados na seção 3.1 onde um elemento esférico de superfície rígida é utilizado para inserir mossas na estrutura modelada, tendo a penetração (δ) como referência para o nível de ovalização induzido.

As análises foram realizadas com três passos de carga, com o primeiro responsável pela aplicação da mossa, o segundo pelo descarregamento e caracterizado pela contabilização do relaxamento elástico das camadas metálicas e o terceiro consistindo na aplicação da pressão externa com indução do colapso. Para comparação das pressões de colapso, foram realizadas análises com dutos apresentando mossas de 0.019R a 0.191R de redução do raio. A sequência ilustrada na Figura 10 exibe os últimos passos de carga relativos a cada etapa para melhor compreensão da metodologia.

Como referência para as curvas de colapso, foram considerados os deslocamentos obtidos nos nós superiores de cada modelo onde a mossa é aplicada (contidos no plano YZ, que contém o eixo de maior redução de raio) pertencente à carcaça interna.

Para a adimensionalização dos deslocamentos obtidos para os gráficos de colapso que serão exibidos deve-se levar em consideração o recuo, $(\delta_f - \delta_i)/R$, do nó superior da carcaça intertravada devido a recuperação elástica pois este estabelece a ovalização inicial para o colapso. A Tabela 2 exibe os valores obtidos em relação ao nível de pré-deformação imposto, onde se apresenta a ovalização inicial, δ_f/R , (após o relaxamento elástico) e o recuo obtido. Atenta-se que, conforme esperado, o recuo é tanto maior quanto maior a penetração da mossa.

Tabela 2. Recuo devido ao relaxamento elástico.

δ_f/R	δ_i/R	$(\delta_f - \delta_i)/R$
0.0189	0.0188	0.0001
0.0284	0.0273	0.0011
0.0379	0.0341	0.0038
0.0568	0.0429	0.0139
0.0758	0.0487	0.0270
0.0947	0.0525	0.0422
0.1136	0.0551	0.0586
0.1326	0.0569	0.0756
0.1515	0.0584	0.0931
0.1705	0.0596	0.1108
0.1894	0.0607	0.1287

Os resultados das análises são apresentados na Tabela 3, que além da pressão de colapso dos dutos pré-deformados obtidas, exibe a diferença percentual dos valores com a pressão obtida na análise de colapso puro da malha 88.

Tabela 3. Pressões de colapso com mossa.

δ_i/R	P_{cr} (MPa)	ΔP_{cr} (%)
0.0188	32.508	99.913
0.0273	32.2	98.966
0.0341	31.0485	95.427
0.0429	27.1985	83.594
0.0487	23.919	73.514
0.0525	21.315	65.511
0.0551	19.208	59.035
0.0569	17.479	53.721
0.0584	16.0265	49.257
0.0596	14.784	45.438
0.0607	13.7	42.104

Assim como foi obtido por PARK e KYRIAKIDES (1994), a pressão de colapso é diminuída a medida que a penetração da mossa aumenta. Neste fenômeno estão inseridos dois efeitos relativos à presença da mossa: não-linearidades geométricas e não linearidades físicas. A contribuição da primeira é manifestada aumento da ovalização inicial e da segunda no crescente nível de pré-deformações induzidas pela pré-deformação.

O estudo do efeito separado da não-linearidade geométrica no colapso é reservado para estudos posteriores. A influência da não-linearidade física (ou material) foi analisada apenas para o colapso do duto intacto (ou puro) na seção 4.1.2 e um estudo aprofundado sobre a influência deste fator nas pressões de colapso dos dutos com pré-deformações é reservado para a continuidade deste trabalho.

Uma das preocupações para efeitos comparativos é a permanência da fase linear das curvas de colapso. Como as curvas de material estão “calibradas” para as tensões de membrana, as tensões desenvolvidas na região

pós-colapso das análises contabilizam tensões de flexão que não correspondem à realidade. Desta forma, para que haja confiabilidade nas pressões de colapso deve ser identificado comportamento linear inicial na curva de colapso, o que significa que há o desenvolvimento inicial predominante de tensões de membrana.

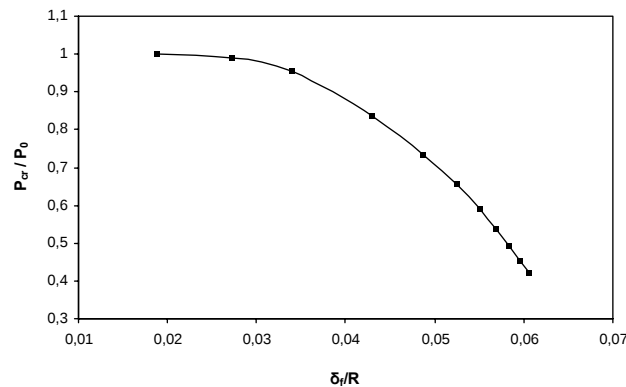


Figura 11. Gráfico indicando a variação das pressões de colapso com a penetração final da mocha.

A Figura 12 apresenta as curvas adimensionalizadas obtidas para as mochas com 0.0188R, 0.0429R, 0.0525R, 0.0584R e 0.0607R de penetração e se pode perceber que independente da mocha as regiões lineares diminuem a abrangência de deslocamentos, mas são previstas.

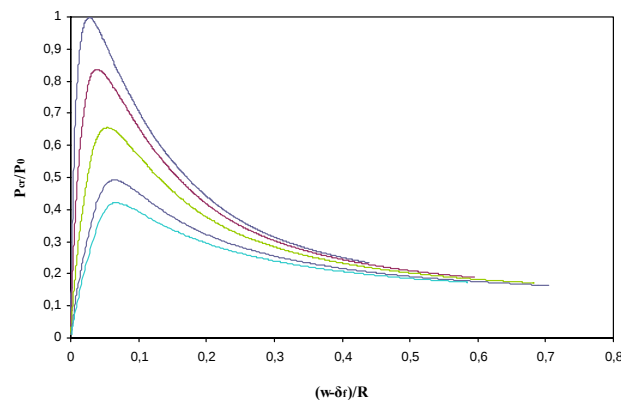


Figura 12. Curvas de colapso em dutos flexíveis pré-deformados: 0.0188R (azul escuro), 0.0429R (vinho), 0.0525R (verde), 0.0584R (roxo) e 0.0607R (azul claro).

5. CONCLUSÃO

Assim como os efeitos de imperfeições geométricas iniciais do tipo mocha em dutos rígidos, os dutos flexíveis têm sua resistência ao colapso diminuída. Esta redução é proporcional à penetração da mocha, entretanto essa relação não é linear, possivelmente pela combinação de não-linearidades físicas e geométricas induzidas pelas mochas.

Os três pontos de menor ovalização inicial, relativos às mochas de 0.0188R, 0.0273R e 0.0341R, apresentam redução do colapso muito pequeno entre elas. Com o aumento da penetração da mocha, e o aumento da ovalização, verificam-se as maiores reduções entre os valores de 0.0341R e 0.0429R. Em relação ao colapso puro, pode-se perceber uma relação não linear da redução da pressão de colapso relativa à penetração, Figura 12. Para aproximadamente 6% de penetração obteve-se apenas 42% de resistência remanescente ao colapso.

As análises também indicam que quanto maior a penetração da mocha menor a extensão do regime linear de resposta ao colapso do duto e a rigidez do duto nesta fase também é reduzida. Esta evidência pode ser comprovada comparando-se as terceiras colunas das Tabelas 2 e 3 e comparando as curvas de colapso do duto com 1mm de penetração (azul escura) e 10mm de penetração (azul clara).

Algumas limitações ao estudo foram reportadas ao longo do texto. O prosseguimento do trabalho consistirá na elaboração de uma metodologia capaz de contabilizar as tensões de flexão no comportamento pós-colapso do modelo e na avaliação de não-linearidades de contato na pressão de colapso.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho gostariam de emitir sinceros agradecimentos ao professor José Renato Mendes de Sousa pela preciosa ajuda na utilização do modelo de elementos finitos apresentado. O trabalho realizado por V.P.P. Nogueira foi parcialmente financiado por de bolsa de mestrado fornecida pela ANP através do PRH-03 e o trabalho realizado por T.A. Netto pelo CNPQ através de bolsa de produtividade em pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- CUSTÓDIO, A.B. **Modelo Analítico Para a Avaliação de Instabilidade nas Armaduras de Dutos Flexíveis**. Out. 2005. 167 pgs. Tese (Doutorado em Engenharia). Orientador: Vaz, M.A. Dept. de Engenharia Naval e Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005
- DYAU, S.; KYRIAKIDES, S. On the Localization of Collapse in Cylindrical Shells Under external Pressure. **International Journal of Solid Structures**. Great Britain: Pergamon Press Ltd., v.30, n. 4, p.463-482, 1993.
- KYRIAKIDES, S.; BABCOCK, C. D. Large Deflection Collapse Analysis of an Inelastic Inextensional Ring Under External Pressure. **International Journal of Solid Structures**. Great Britain: Pergamon Press Ltd., v.17, n. 10, p.981-993, 1981.
- PARK, T. D.; KYRIAKIDES, S. On the Collapse of Dented Cylinders Under External Pressure. **International Journal of Mechanical Sciences**. Great Britain: Elsevier Science Ltd, v. 38, n. 5, p. 557-578, 1996.
- SOUSA, J.R.M. **Análise Local de Linhas Flexíveis Pelo Método de Elementos Finitos**. Jun. 2005. 746 pgs. Tese (Doutorado em Engenharia). Orientadores: Ellanweger, G.B. e Lima, E.C.P. Dept. de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- SOUZA, A.P.F. **Colapso de Dutos Flexíveis sob Pressão Externa**. Mar. 2002. 286 pgs. Tese (Doutorado em Engenharia). Orientador: Estefen, S.F. Dept. de Engenharia Naval e Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- TIMOSHENKO, S. P. **Strength of Materials**. 2nd ed. New York: D Van Nostrand Company Inc, 1941.

NUMERICAL EVALUATION OF THE COLLAPSE OF DENTED FLEXIBLE PIPES UNDER EXTERNAL PRESSURE

The Oil and Gas Industry grows and tends to explore in deeper waters. This requires de development of new technologies capable to guarantee the production in severe loading conditions or the adaptation of the technologies already established. The Campos Basin produces crude oil and gas mainly by flexible risers that consist in complex cylindrical concentric structures of metallic (steel) or polymeric materials. The objective is associate good axial and flexural rigidity, property inexistent in rigid risers. The metallic layers are designed to give structural resistance to the pipe against external pressure, internal pressure and traction (respectively internal carcass, zeta layers and traction armours). Polymeric layers are designed to prevent friction between metallic layers and provide sealing to the fluids. The structural analysis of flexible pipes requires a complex approach mainly because of the difficulties involved in building a representative numerical model and the determination of its failure modes. Structural instability of the metallic layers of a flexible pipe is a serious problem that involves operational and environmental risks. The nature of this phenomenon is catastrophic due to the big rigidity loss caused by excessive loadings. Deformations induced may cause material failure. This work presents numerical models based on the finite element method to study the external critical collapse pressure of flexible risers. Intact pipes and pipes presenting pre-deformations typically generated on installation procedures are evaluated and compared in order to define their influence on the critical pressure.

Flexible pipes, Structural instability, Finite Element

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.