

ANÁLISE ESTRUTURAL DE ENRIJECEDORES À FLEXÃO, AUXILIADA POR ELEMENTOS FINITOS

Bruno Pereira Lima, b.p.lima@usp.br¹
Edison Gonçalves, edison@usp.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Poli-USP, Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 – Butantã-SP, Brasil.

Resumo: O presente trabalho trata da análise estrutural estática dos enrijecedores à flexão. Eles consistem em componentes estruturais auxiliares utilizados em linhas flexíveis em suas conexões com unidades flutuantes em sistemas de produção de petróleo offshore. A configuração destes acessórios deve conferir à instalação uma variação gradual da rigidez à flexão próximo ao ponto de fixação da linha flexível à unidade flutuante, diminuir sua curvatura e suavizar o campo de tensões, evitando assim que a linha ultrapasse a curvatura máxima estabelecida em projeto. Além disso, deve garantir vida útil à fadiga igual ou maior que nas outras partes do sistema. O entendimento da resposta mecânica tem se tornando cada vez mais importante devido a crescente utilização de enrijecedores e as falhas observadas em alguns destes dispositivos. Assim, desenvolve-se neste trabalho modelos pelo método dos elementos finitos com diferentes níveis de hierarquia que representam o sistema linha flexível-enrijecedor para uma melhor percepção do comportamento mecânico dos enrijecedores.

Palavras-chave: enrijecedores à flexão, método dos elementos finitos, engenharia submarina.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria do petróleo é um dos setores que mais emprega alta tecnologia em seus sistemas de produção. E o Brasil não está obstando deste crescimento da tecnologia petrolífera. A produção de petróleo no Brasil tem aumentado desde a fundação da Petrobras - empresa estatal criada em 1953 pelo governo brasileiro para controlar a produção, o refino e a distribuição do petróleo no país, (SOUZA, 2008). Desde então existem diversos avanços entre os 2.700 barris por dia, em 1953, e os 2.500.000 barris por dia no primeiro semestre de 2015.

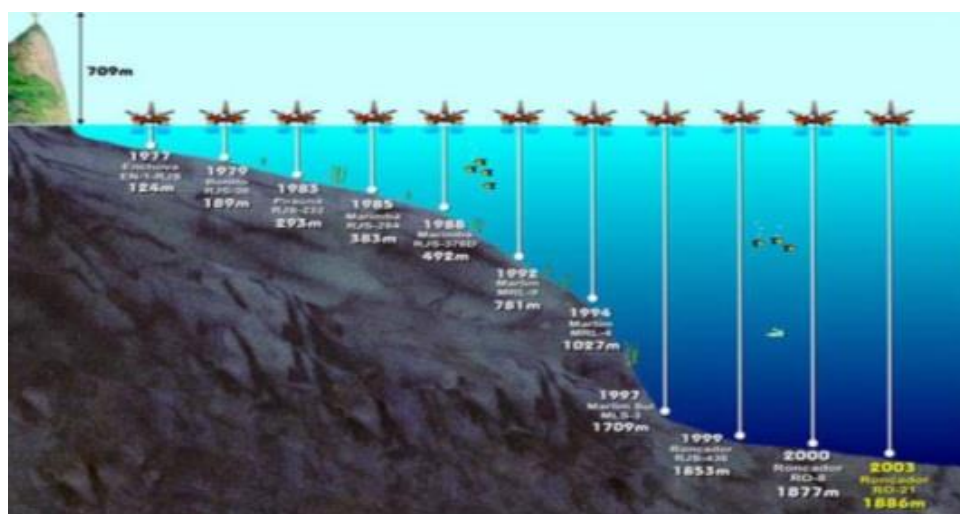


Figura 1. Recordes obtidos pela Petrobras em lâmina d'água.
(SOUZA, 2008)

A Em fato o Brasil ocupa uma posição de destaque mundial em extração de petróleo, especialmente em águas profundas. Em engenharia offshore utiliza-se o termo "águas profundas" para lâminas d'água maiores que 400m e

"ultraprofundas", para aquelas maiores que 1000m. O termo "hiperprofundas" é às vezes encontrado na literatura para lâminas d'água superiores a 2000m. A Fig. 1 demonstra os avanços da Petrobras na extração de petróleo em águas de grande profundidade.

Com tudo a partir de 400m o uso de estruturas fixas, apoiadas no leito do oceano, não é viável ou mesmo possível e o uso de sistemas flutuantes, tais como plataformas, navios-tanque, unidades de produção e armazenamento, bóias, etc., torna-se indispensável para atividades petrolíferas. Para grandes lâminas d'água, sistemas de tubos flexíveis apresentam várias vantagens para uso com sistemas flutuantes, em comparação com tubos rígidos: relativa facilidade de instalação, menores cargas de tração, boa acomodação ao leito do oceano e também ao movimento das unidades flutuantes.

Os enrijecedores à flexão ou *bend stiffeners* são utilizados em linhas flexíveis (*risers*) em suas conexões com unidades flutuantes de sistemas de produção de petróleo offshore. Estes acessórios são utilizados para conferir um aumento gradual da rigidez das linhas flexíveis perto do ponto de fixação à unidade flutuante, ocasionando uma diminuição da curvatura e das tensões de flexão aplicada à linha. Estas tensões são as maiores responsáveis por falhas nas linhas que tendem a apresentar uma alta resistência a tração e torção, mas uma baixa resistência a flexão. A Fig. 2 apresenta uma linha flexível fixada numa plataforma de petróleo através de um enrijecedor.

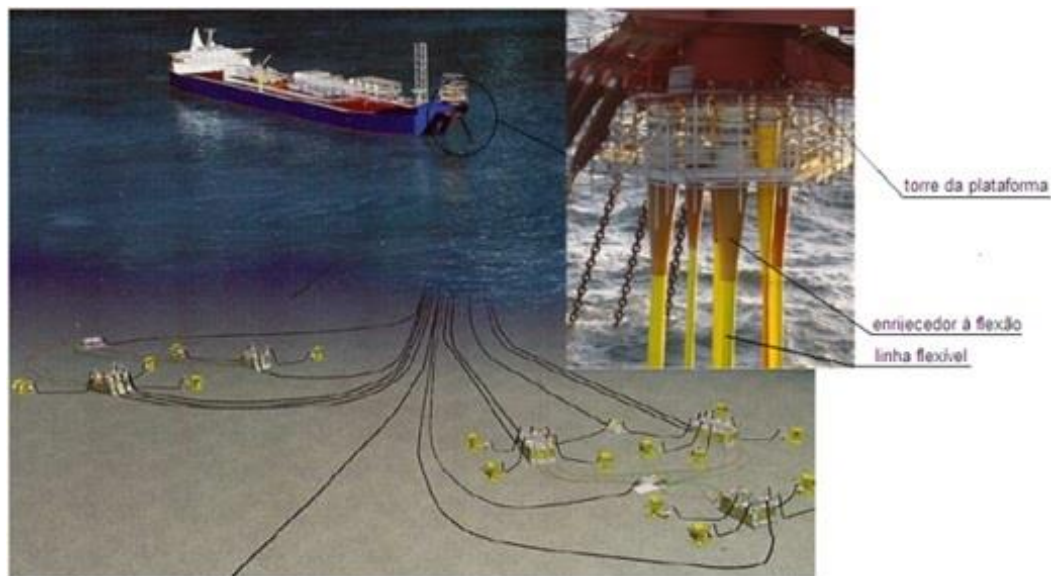


Figura 2. Enrijecedor à flexão acoplado à plataforma.
(CAIRE, 2005)

Estes dispositivos auxiliares são componentes críticos e a sua falha é considerada catastrófica podendo ocasionar numa ruptura da linha, acarretando numa interrupção de produção. Isto gera custos operacionais, atrasos nos cronogramas, paradas na linha de produção, fatos que impedem o cumprimento de metas e ocasionam em grave agressão ao meio ambiente. Esta situação tem despertado bastante preocupação nas empresas petrolíferas, em particular, na Petrobras, principalmente após as falhas registradas na Bacia de Campos, em 1998 e 1999, quando os enrijecedores à flexão da monoboia IMODCO III no campo Marlim, após seis meses de operação, sofreram falha, (POPE; CARDOSO, 1998).

Os enrijecedores são acessórios normalmente fabricados de polímeros e metais. Esta configuração estrutural apresenta para o metal e para o polímero funções distintas, mas ambas fundamentais para o funcionamento pleno do enrijecedor. Os metais geralmente estão incumbidos da função de resistir os carregamentos mais incisivos, já o polímero advém de possuir uma função secundária, porém não menos importante de envolver o metal garantindo-lhe uma proteção, estanqueidade, sustentação das partes metálicas e entre outras funções.

A partir das análises realizadas pretende-se viabilizar melhorias no desenvolvimento de novas geometrias. As propostas de geometrias serão baseadas nos resultados obtidos dos campos de tensões e deformações formados a partir da imposição de cargas aplicadas através do Método de Elementos Finitos (MEF) e também através de rotinas implementadas em códigos no Matlab. Tornando assim o processo de fabricação menos oneroso e mais simplificado, visto que as mudanças nas configurações estruturais garantem as principais melhorias através dos menores custos.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

2.1. Modelagem Por Elementos Finitos

Diversos programas de computador customizados para o projeto iterativo de enrijecedores baseados no modelo de flexão de viga equivalente estão disponíveis, como por exemplo o *Stiffener*, possuem vários recursos, mas um número de influências na resposta é negligenciado. Essas incluem a modelagem do contato entre o tubo flexível e o enrijecedor, as características não-lineares do poliuretano e a distribuição de tensões multi-dimensional no enrijecedor.

A partir deste ponto foi determinado a realização de análises dos modelos em elementos finitos para diferentes níveis de hierarquia. Modelos de elementos de viga e sólido do segmento tubo flexível-enrijecedor foram desenvolvidos, e a modelagem matemática foi gradativamente aperfeiçoada para uma melhor representação do problema físico. A Fig. 3 apresenta uma breve descrição dos diferentes modelos.

Modelo Numérico-Analítico (SOUZA, 2008)	Viga de Euler-Bernoulli
Modelo de Baixa Hierarquia (<i>Beam</i>)	Viga de Timoshenko
Modelo de Alta Hierarquia (<i>Solid</i>)	- Contato (Enrijecedor/<i>riser</i>) - Inserto (Concentrador de Tensão)

Figura 3. Representação dos modelos hierárquicos.

As análises pelo método dos elementos finitos foram todas desenvolvidas no software ANSYS®, Mechanical APDL para o de baixa hierarquia e Mechanical no de alta, versão 16.0. Uma melhor descrição dos detalhes construtivos de cada um dos modelos será apresentada posteriormente.

2.1.1. geometria e propriedades mecânicas

Para a análise do modelo é necessário o conhecimento das propriedades geométricas do elemento a ser estudado. A Tab. 1 apresenta um conjunto diverso de configurações utilizadas por diferentes autores, apresentados na Fig. 4.

Tabela 1. Geometrias analisadas por alguns autores. Valores no [SI].

Autores	A	B	C	D	E	F	G
Boef e Out	0,660	0,234	0,200	1,700	1,300	3,200	0,180 (*)
Lane et al.	0,575	0,248	0,425 (**)	1,925	3,850	5,775	0,248
Kiepper	0,650	0,180	0,200	1,700	3,800	5,700	0,180
Lemos	0,650	0,180	0,200	1,700	1,300	3,200	0,180
Caire	0,650	0,240	0,200	1,700	1,300	3,200	0,240 (***)
Mbaye	0,650	0,180	0,200	1,700	1,300	3,200	0,180

* Diâmetro interno do tubo flexível $d_i = 0$; 1016m.

** Parte cilíndrica não avaliada analiticamente.

*** Para o estudo das pressões de contato e gaps, Caire utilizou $G = 0$; 210m e 0; 180m, respectivamente.

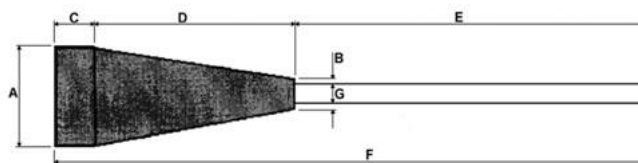


Figura 4. Representação da geometria do enrijecedor. (SOUZA, 2008)

Os dados geométricos utilizados neste trabalho são os mesmos empregados por, (KIEPPER, 2004), a escolha foi baseada no fato que a geometria utilizada por Kiepper é utilizada em vários outros trabalhos, a única grande variação está no valor do comprimento da linha flexível (valor "E" da Tab. 1), e DeRuntz (1969) aponta que quanto maior for o comprimento do riser mais precisos serão os valores nas análises de esforços, ele descreve essa quantidade como sendo um "comprimento suficiente" necessário para o cálculo dos esforços no *bend stiffener*. Portanto a geometria aplicada no trabalho, bem como a natureza do carregamento estão apresentados na Fig. 5. A força F assume os valores de 62,5 kN e 500 kN, e o ângulo ϕL é igual a 45°.

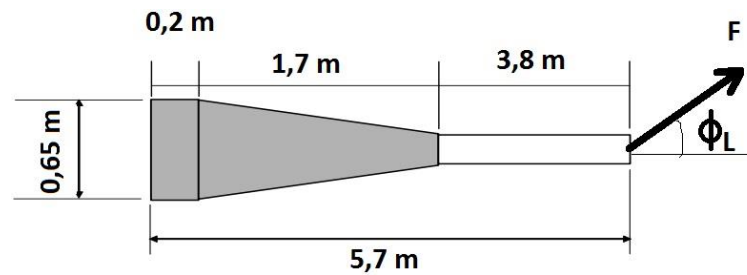


Figura 5. Geometria do enrijecedor e carregamento aplicado.

A determinação das propriedades mecânicas do segmento enrijecedor-riser é uma tarefa árdua, visto que a linha flexível é composta pelos mais diversos materiais dispostos em diferentes níveis de camadas. A Fig. 6 demonstra a composição interna das camadas da linha flexível.



Figura 6: Riser com suas diversas camadas.

Tabela 2. Propriedades utilizadas na modelagem.

Enrijecedor	
Módulo de Young	45 MPa
Coefficiente de Poisson	0,5
Linha Flexível	
Rigidez à flexão	10 kNm ²
Rigidez axial	180 MN
Coefficiente de Poisson	0,3
Módulo de Young*	194 MPa

*Valor utilizado para manter a compatibilidade com a rigidez à flexão.

Deve-se observar que devido à falta de dados, o coeficiente de Poisson da linha foi estimado em $\nu_1 = 0,3$ e o poliuretano do enrijecedor como sendo incompressível, ou seja, $\nu_2 = 0,5$. Como o riser é composto pela combinação de diversos materiais o módulo de elasticidade foi empregado de forma a manter a compatibilidade com a rigidez à flexão, por tanto, a fidelidade com a rigidez axial foi abandonada, essa é uma consideração razoável, visto que a linha flexível possui uma rigidez axial muito alta, então pode ser considerada praticamente inextensível e seus efeitos podem ser desprezados.

Os valores para as propriedades do inserto também foram desconsiderados, pois como pode ser visto na Tab. 2 as propriedades dos metais utilizados em enrijecedores é bem superior aos valores apresentados pelo polímero, assim sendo o inserto foi considerado com um sólido indeformável nas simulações.

2.1.2. modelo de baixa hierarquia

O modelo de baixa hierarquia é composto por 100 elementos de viga, identificados pela documentação do ANSYS como BEAM188. Esse elemento conta com 6 graus de liberdade por nó (translações e rotações nos três eixos), foi considerado em sua formulação linear (para melhor comparação com o código desenvolvido) e é baseado na teoria de Timoshenko, incorporando os efeitos das deformações de cisalhamento, considerando tensão cisalhante constante nas seções, que permanecem planas e sem distorção em sua condição deformada.

Para a seção cilíndrica do equipamento, foram considerados 5 elementos de seção transversal tubular, representando o enrijecedor, sobrepostos a 5 elementos de seção circular, representando a linha flexível. Os nós destes dois grupos de elementos foram compartilhados para levar em conta a conexão entre os corpos. A mesma estratégia foi utilizada na seção cônica do equipamento, em que foram empregados 30 elementos de seção tubular variando na direção axial, representando o enrijecedor, conectados a 30 elementos com a mesma seção circular do trecho anterior, representando a linha flexível. Finalmente, 30 elementos adicionais foram modelados à frente do enrijecedor, para modelar a sequência da linha flexível. A Fig. 7 ilustra o modelo elaborado, em visualização expandida, incluindo a seção transversal em cada elemento de linha.

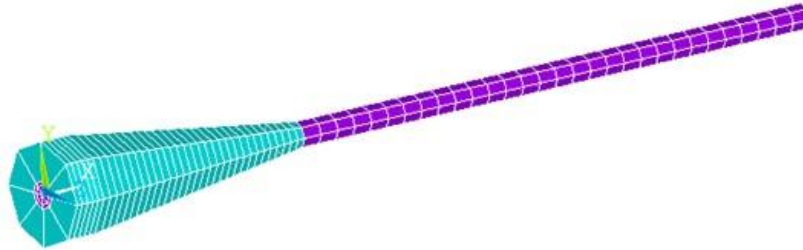


Figura 7. Modelo baixa-hierarquia.

2.1.3. modelo de alta hierarquia

O modelo de alta hierarquia, por sua vez, possui dois tipos de geometria, a primeira é a geometria simples que pode ser vista na Fig. 8 e a segunda que possui uma geometria semelhante ao primeiro modelo, porém agora existe um inserto adicionado, como mostrado na Fig. 9. Ambos foram modelados com elementos sólidos, SOLID186, com as seguintes características: 3 graus de liberdade por nó (translações nas três direções) função quadrática para os deslocamentos e integração reduzida para evitar problemas de *volumetric locking* no material do enrijecedor, dado o elevado coeficiente de Poisson deste componente. Para esses modelos, considerou-se um plano de simetria, condição apropriada tendo em vista a regularidade da geometria e os carregamentos aplicados. Neste caso, a conexão entre enrijecedor e linha flexível foi feita por meio de um contato do tipo *Frictionless*, que impede penetração entre os corpos, mas permite deslizamento na direção tangencial sem impedimento. O contato foi modelado com formulação de penalidade do tipo lagrange aumentado e considerado assimétrico, com a face interna do enrijecedor sendo modelada como *Target* (ou seja, com restrição de penetrações pela formulação citada anteriormente) e a face da linha flexível como *Contact* (sem restrição de penetração).

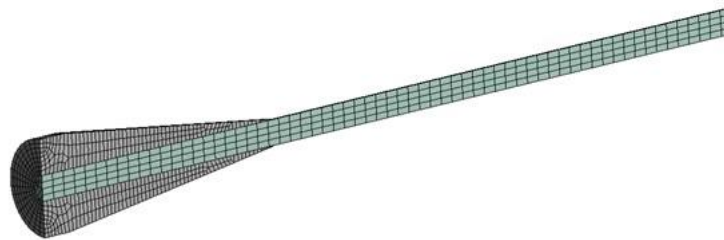


Figura 8. Modelo alta-hierarquia para o enrijecedor de geometria simples.

Para os modelos, foi considerado engastamento na face traseira (de seção transversal de maior diâmetro) e aplicação de dois casos de cargas iguais na direção axial e em uma das cortantes, de magnitudes 44,2 kN e 353,6 kN configurando resultantes de 62,5 kN e 500 kN. Foram ativados os efeitos de grandes deformações, sendo a matriz de rigidez recalculada com o desenvolvimento da simulação para considerar a não-linearidade geométrica. As constantes elásticas aplicadas para enrijecedor e linha flexível foram as seguintes: módulos elásticos de 45 e 194 MPa e coeficientes de Poisson de 0,45 e 0,3, respectivamente sendo que o valor aplicado para a linha flexível, muito inferior ao do aço que a constitui, decorre do fato da seção transversal estar sendo simulada como cheia e não tubular e pela dificuldade de definir as propriedades da linha flexível como dito anteriormente, sendo portanto calculado um módulo elástico equivalente da seção.

Para o enrijecedor de geometria simples foram empregados 19870 nós e 3645 elementos, em sua maioria de formato hexaédricos com alguns elementos em forma degenerada wedge. O enrijecedor com inserto seguiu os mesmos métodos porém com 20322 nós e 3760 elementos.

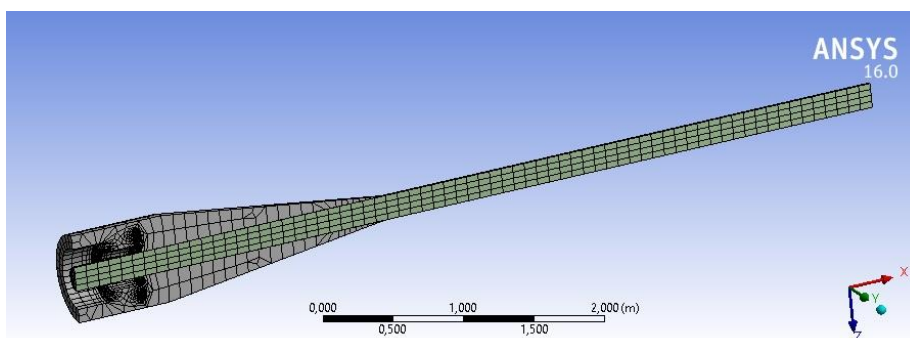


Figura 9. Modelo alta-hierarquia para o enrijecedor com inserto adicionado.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Enrijecedor De Geometria Simples

Três casos são apresentados a seguir, o modelo numérico-analítico desenvolvido por SOUZA (2008), o modelo de baixa e alta hierarquia com geometria simples desenvolvidos.

As Figs. 10 e 11 apresentam respectivamente a linha elástica e a curvatura para uma carga aplicada de 62,5 kN.

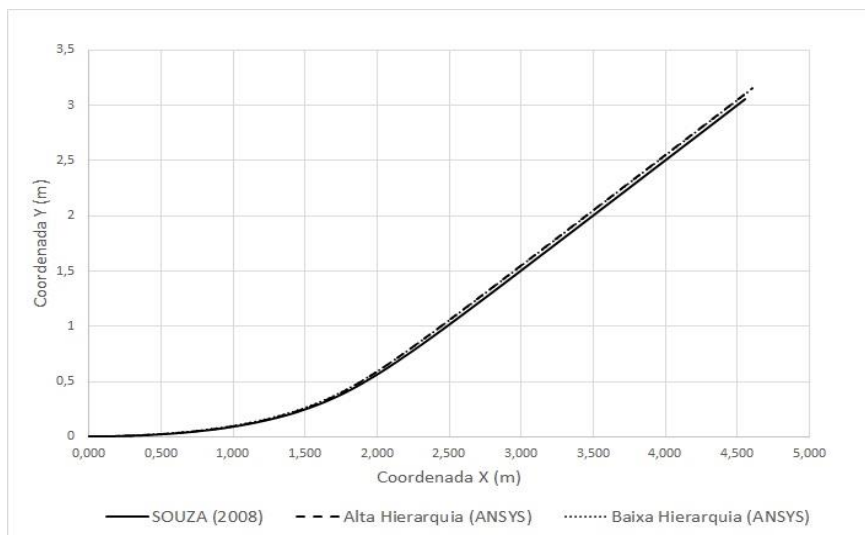


Figura 10. Linha elástica para a carga de 62,5 kN.

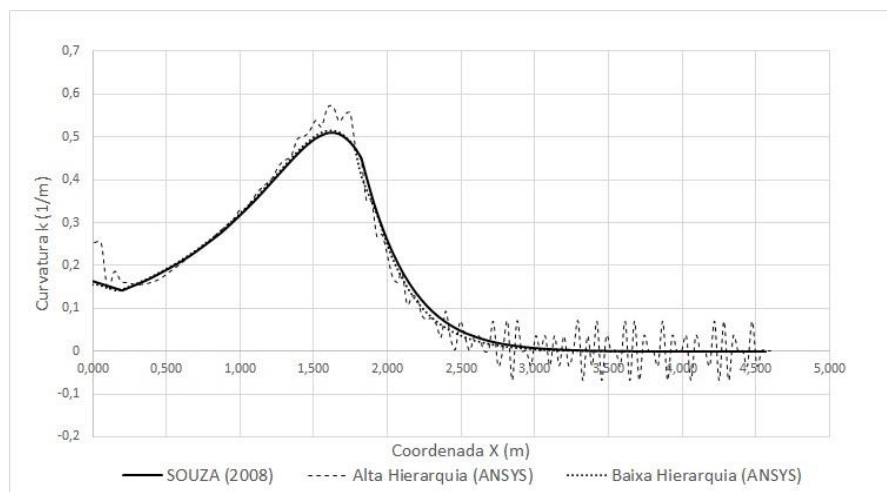


Figura 11. Curvatura para a carga de 62,5 kN.

Novamente uma análise do comportamento do segmento enrijecedor-riser é realizada, as Figs. 12 e 13 apresentam respectivamente a linha elástica e a curvatura, porém agora para o caso de uma carga aplicada de 500 kN.

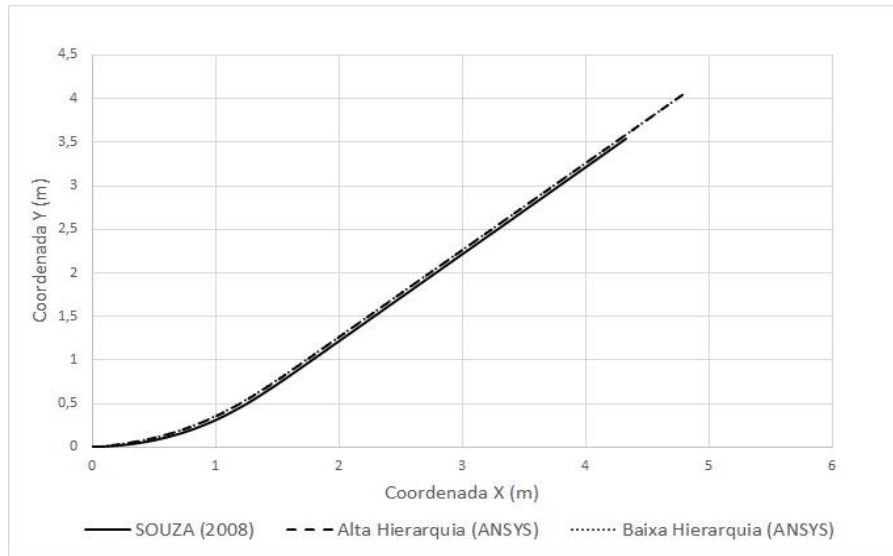


Figura 12. Linha elástica para a carga de 500 kN.

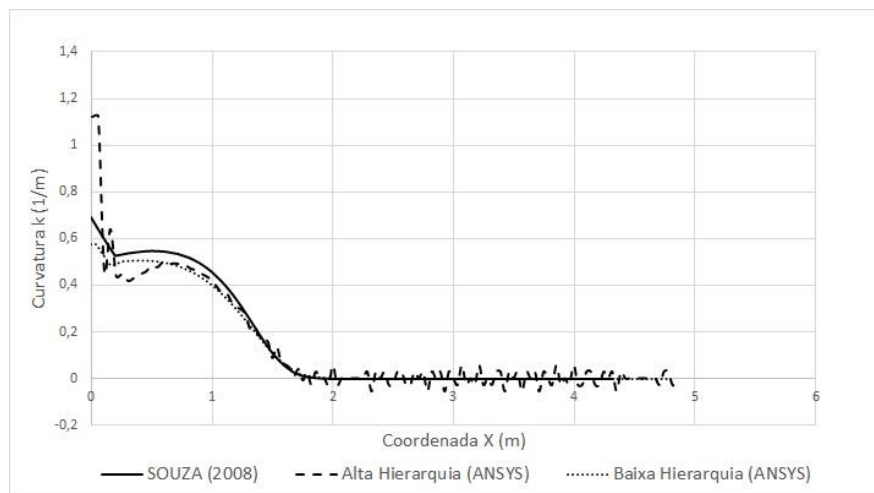


Figura 13. Curvatura para a carga de 500 kN.

As tensões máximas encontradas são apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3. Tensões máximas calculadas.

Modelo	62,5 kN	500 kN
SANTOS (2008)	3,34 MPa	10,18 MPa
Baixa Hierarquia	3,38 MPa	8,40 MPa
Alta Hierarquia	3,70 MPa	9,34 MPa

3.2. Inserto Adicionado

Para cada configuração de geometria da peça pode ocorrer um acentuado incremento no nível de tensões. São os chamados concentradores de tensão, e o inserto assume esse papel de concentrador de tensão. A Fig. 14 exemplifica o caso da distribuição de tensões em seções críticas. O caso de uma placa com um furo circular, indicando a distribuição de tensões na seção que passa pelo centro do furo, a figura mostra a distribuição de tensões na parte mais estreita da transição, onde ocorrem as maiores tensões.

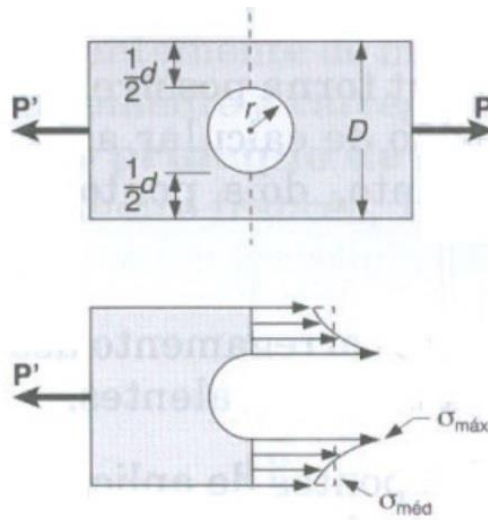


Figura 14. Placa com furo.
(BEER, 2009)

Para o cálculo analítico dos concentradores de tensão podemos usar a relação:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{med}} \quad (1)$$

Entre a tensão máxima e a tensão média calculada na seção crítica (mais estreita) de descontinuidade. Essa relação é chamada coeficiente de concentração de tensão para a descontinuidade em estudo. Os coeficientes de concentração de tensão podem ser expressos em termos de relações entre os parâmetros geométricos envolvidos. Os resultados obtidos são colocados em forma de tabelas ou gráficos como os da Fig. 15. Assim, para a determinação da tensão máxima atuante nas proximidades de um ponto de descontinuidade, deve-se determinar a tensão média na seção crítica (razão entre a força aplicada e a área da seção) e multiplicar o resultado obtido pelo coeficiente de concentração de tensão K_t apropriado. Este procedimento é válido para valores de tensão máxima que não ultrapassem o limite de proporcionalidade do material, pois os valores de K_t marcados na Fig. 15 foram obtidos adotando-se uma relação linear entre tensões e deformações específicas.

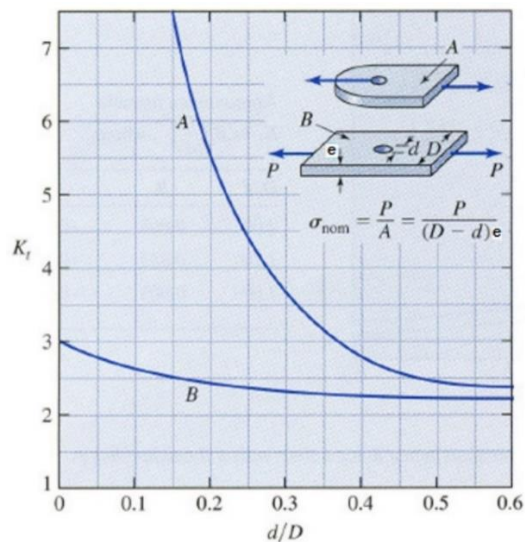


Figura 15. Coeficiente de concentração de tensão K_t A - para uma barra chata carregada por um pino passando pelo furo transversal; B - para uma barra chata com um furo transversal sob tração axial.
(BEER, 2009)

DEMANZE (2005), apresenta três pontos críticos os quais seriam os mais dispostos às falhas. A Fig. 16 apresenta os pontos críticos levantados por Demanze. Observando os pontos críticos podemos dizer que o torus funciona como um concentrador de tensão. Utilizando a Fig. 15 chega-se a:

$$K_t \cong 4 \quad (2)$$

A área da ponta do corpo do inserto (*sleeve*) também funciona como um concentrador de tensão. Utilizando a Fig. 15 chega-se a:

$$K_t \cong 5 \quad (3)$$

Assim, partindo que:

$$\sigma_{med} = Ekr \quad (4)$$

Onde:

E= módulo de elasticidade,

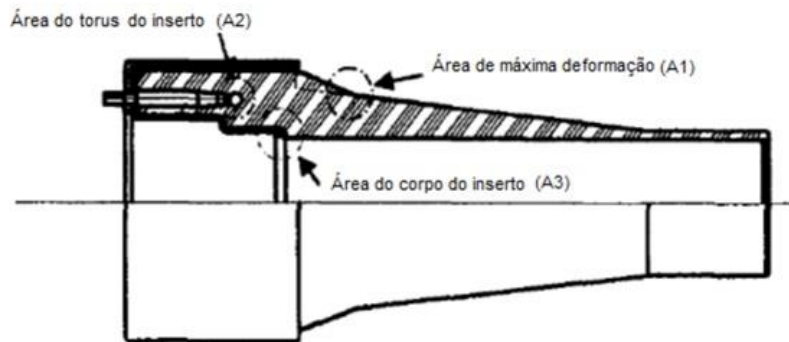
k= curvatura da linha elástica,

r= raio do enrijecedor à flexão.

Podemos concluir que:

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_{med} \quad (5)$$

A Fig. 16 mostra os pontos críticos de falha.



**Figura 16. Áreas mais críticas para ocorrência de falhas.
(DEMANZE, 2005)**

Portanto os valores para as tensões para os casos de 62,5 e 500 kN para os pontos críticos de falha equivalem aos resultados apresentados nas Tabs. 4 e 5.

Tabela 4. Tensões para os pontos críticos para a carga de 62,5 kN.

Modelos	A1	A2	A3
SOUZA (2008)	3,34 MPa	12,35 MPa	9,13 MPa
Baixa Hierarquia	3,38 MPa	12,49 MPa	9,24 MPa
Alta Hierarquia com Inserto	2,87 MPa	9,26 MPa	6,76 MPa

Tabela 5. Tensões para os pontos críticos para a carga de 500 kN.

Modelos	A1	A2	A3
SOUZA (2008)	10,18 MPa	37,64 MPa	27,85 MPa
Baixa Hierarquia	8,40 MPa	31,06 MPa	22,98 MPa
Alta Hierarquia com Inserto	8,34 MPa	28,23 MPa	20,60 MPa

4. CONCLUSÃO

Os resultados demonstram uma excelente correlação para o estudo do caso do enrijecedor com geometria simples, ou seja, uma concordância satisfatória foi encontrada.

Pelas análises também fica claro o aumento das tensões devido à adição do inserto, e estes resultados não podem ser diretamente capturada pelos modelos de baixa hierarquia, somente é possível no modelo de alta hierarquia. O aumento gradativo da hierarquia gera uma melhor compreensão dos resultados.

Para pequenas cargas como as de 62,5 kN os valores utilizados para os concentradores de tensão são conservadores porém com a carga de 500 kN os valores começam a se aproximar do modelo de baixa hierarquia.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Souza, J. R. Análise Estrutural de Enrijecedores a Flexão de Geometria Complexa Utilizados em Operações Offshore. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2008.
- Pope, A. M.; CARDOSO, L. G. C.; SANTOS, J. M. Análise de Falha do Enrijecedor do Riser Flexível da Monoboia IMODCO III. Comunicação técnica interna Petrobras No 127/08; CENPES/SUSEP/DIPILOT/SEMEC. Outubro de 1998.
- Kiepper, B.O. Análise Estrutural Estática, Via Elementos Finitos do Segmento Tubo Flexível-Enrijecedor. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- Deruntz, J. A. Jr. End effect bending stresses in cables. Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, p.750-756. December, 1969. Presented at The American Society of Mechanical Engineers Winter Annual Meeting. Los Angeles, 1969.
- Beer, F. P. et al. Mechanics of Materials. 5th ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 2009
- Caire, M. Análise de Enrijecedores à Flexão. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- Demanze, F. et al. Fatigue Life Analysis of Polyurethane Bending Stiffeners. Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE 2005-67506, Halkidiki, Greece, Junho de 2005.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho”.

STRUCTURAL ANALYSIS OF BEND STIFFENERS SUPPORTED BY FINITE ELEMENTS

Bruno Pereira Lima, b.p.lima@usp.br¹

Edison Gonçalves, edison@usp.br¹

¹Depart of Mechatronics and Mechanical Systems Engineering, Polytechnical School - USP, Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 – Butantã-SP, Brazil.

Abstract. *The present work deals with the static structural analysis of bend stiffeners. It consists of auxiliary structural components used in flexible lines in their connections with floating units in offshore oil production systems. The configuration of these fittings should give the installation a gradual variation of the bending stiffness close to the point of attachment of the flexible line to the floating unit, decrease its curvature and smooth the tensile field, thus avoiding that the line exceeds the maximum curvature established in design. In addition, fatigue life must be guaranteed to be equal to or greater than in other parts of the system. The understanding of the mechanical response has become increasingly important due to the increasing use of stiffeners and the failures observed in some of these devices. Thus, this work develops models by finite element method with different levels of hierarchy that represent the flexible-stiffener line system for a better perception of the mechanical behavior of the stiffeners.*

Keywords: bend stiffeners, finite element method, subsea engineering.