



25º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore

Rio de Janeiro, 10 a 12 de Novembro de 2014

Título do Trabalho: Análise de tensões em enrijecedores à flexão

**Luciano Valdomiro dos Santos
Edison Gonçalves
Depto Eng. Mecatrônica e Sist. Mecânicos (EPUSP)
Av. Prof. Mello Moraes 2231 – CEP 05508-900, São Paulo-SP
lucianovsantos@yahoo.com.br / edison@usp.br**

Resumo:

Este trabalho apresenta a análise de tensões em enrijecedores à flexão, uma estrutura metal-polímero utilizada pela indústria de óleo e gás, através da utilização de um modelo de análise de falha em estruturas metal-polímero. Inicialmente, apresenta os enrijecedores à flexão. Em seguida, mostra as características do enrijecedor à flexão selecionado para a análise e, por último, apresenta a análise de tensões no enrijecedor à flexão.

1 – Introdução

Os enrijecedores à flexão (*bending stiffeners*) são estruturas compostas por uma parte polimérica, normalmente feita de poliuretano termoplástico poliéter, [LEMOS, 2005], ancorada a uma parte metálica que tem a finalidade de possibilitar a instalação do conjunto no local de utilização. São responsáveis pela transição suave da rigidez entre uma estrutura bastante maleável, linha flexível (*riser* ou *umbilical*), e outra extremamente rígida que é a estrutura de uma plataforma de petróleo (figura 1).

Os enrijecedores à flexão surgiram pela necessidade de evitar raios de curvatura muito reduzidos que podem danificar a estrutura de tubulações flexíveis utilizadas na exploração de petróleo em alto mar (*offshore*). A avaliação correta dos enrijecedores à flexão pode significar a diferença entre uma operação segura de uma linha flexível ou de sua falha, principalmente em se tratando de

unidades de plataformas tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*) ou de maneira mais crítica em monoboias, [LEMOS, 2005]. As monoboias, especialmente em águas profundas, podem levar as linhas flexíveis a situações extremas em que além de sofrerem altos esforços de tração, estão sujeitas a altos esforços de flexão impostos pelos movimentos da monoboia. 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, 1998]. Uma grande quantidade de enrijecedores de mesmo projeto continua em operação em algumas FPSOs causando preocupação quanto a sua vida útil, [CAIRE, 2005]. A análise de falha desses enrijecedores à flexão conduziu à conclusão que o mecanismo de falha preponderante foi iniciado pela fadiga do polímero, [POPE, 1998].

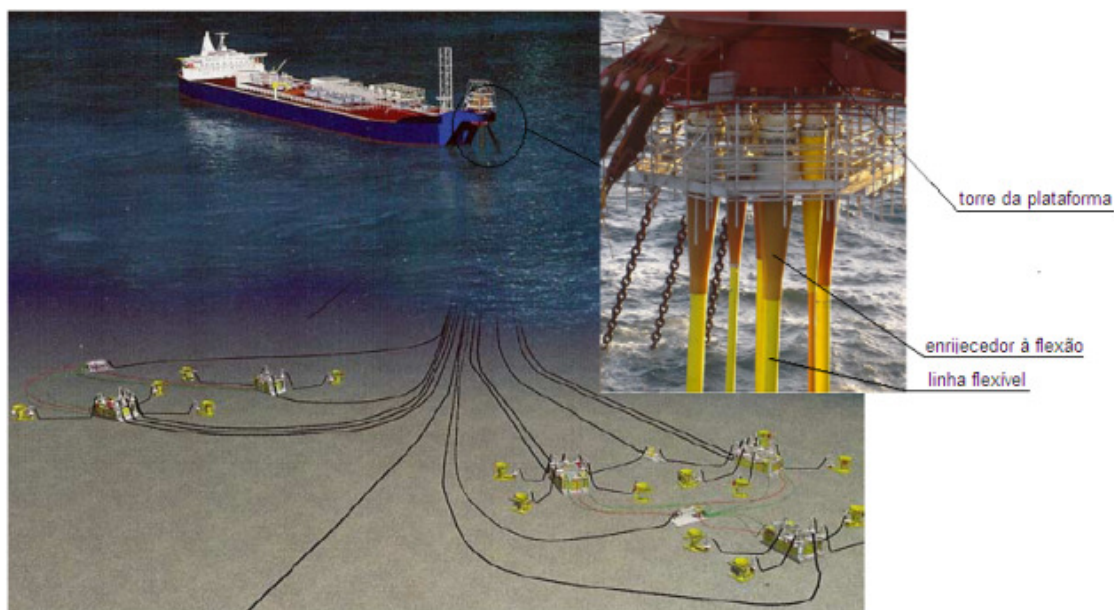


Figura 1 - Enrijecedor à flexão, plataforma tipo FPSO e linhas flexíveis, [CAIRE, 2005].

2 – Características do enrijecedor à flexão selecionado

O enrijecedor à flexão selecionado para a análise de tensões proposta foi o estudado inicialmente por BOEF e OUT [1990]. Este é do tipo tradicional, utilizado em aplicações dinâmicas, composto por uma parte polimérica ancorada a um inserto metálico, montado diretamente sobre o conector de topo da linha flexível que está apoiado diretamente no convés da plataforma de petróleo (figura 2). A figura 3 mostra todas as medidas relevantes deste enrijecedor à flexão (arbitraram-se medidas para o inserto metálico).

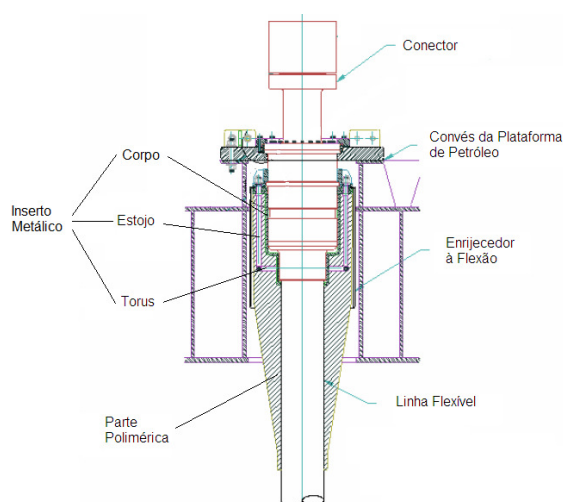


Figura 2 - Enrijecedor à flexão montado à plataforma, [CLEVELARIO].

A parte polimérica deste enrijecedor à flexão é feita de poliuretano termoplástico poliéter. O inserto metálico é fundamentalmente composto por um corpo metálico escalonado soldado em aço estrutural USI SAC 350, revestido com níquel com interdifusão, com rugosidade média superficial de $3,2 \mu\text{m}$ e por um anel toroidal em Inconel 625 soldado a estojos também em Inconel 625, ambos com rugosidade média superficial de $0,8 \mu\text{m}$, os quais se encontram perpendicularmente dispostos, de modo axial, em relação ao citado anel toroidal e ao flange do corpo metálico (figura 4). Esta configuração acaba conformando uma espécie de gaiola que contorna o perímetro circular da linha flexível. Desta forma, quando a parte polimérica do enrijecedor à flexão é submetida às flexões externas, o inserto mantém ancorada a base do enrijecedor à flexão. A configuração tipo gaiola é ideal para a garantia da ancoragem da parte polimérica.

A tabela 1 mostra as propriedades relevantes de cada material utilizado na construção do enrijecedor à flexão selecionado. Nota-se que o custo do Inconel 625 é vinte e cinco vezes maior do que o do aço estrutural USI SAC 350.

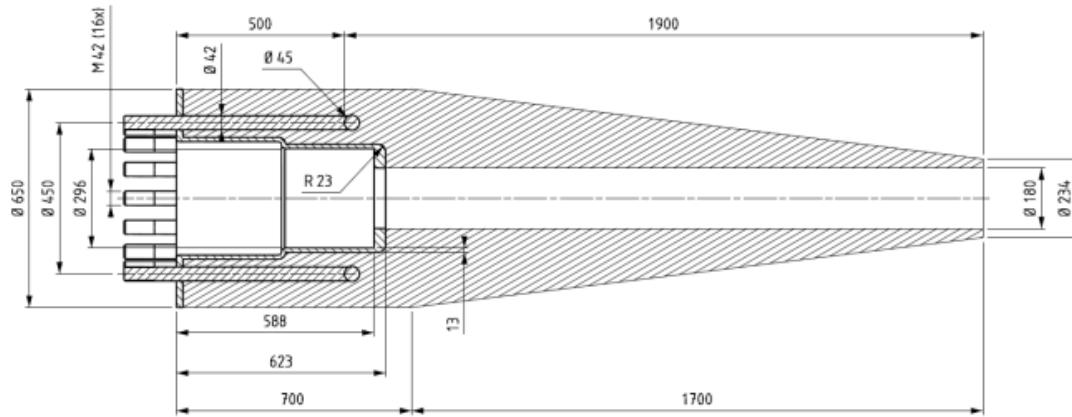


Figura 3 - Enrijecedor à flexão de BOEF e OUT modificado.

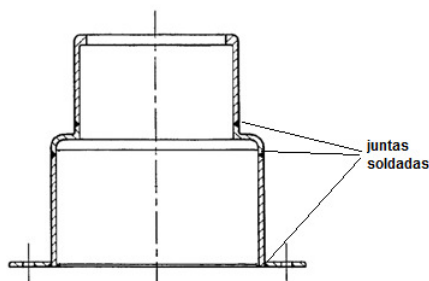
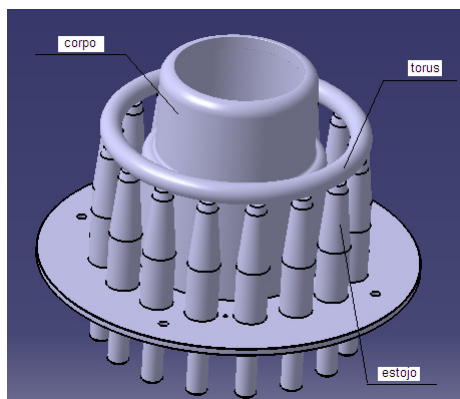


Figura 4 - Inserto metálico.

A fabricação deste enrijecedor é uma tarefa complexa e exigente. Essencialmente a operação envolve a construção de uma ferramenta molde. Um tubo central é posicionado dentro de uma casca externa formando assim uma cavidade da forma do componente requerido. O inserto é colocado na base da unidade selando a parte inferior da ferramenta, conforme mostrado na figura 5. O corpo metálico do inserto é revestido com uma cola apropriada. O anel toroidal e os estojos do inserto metálico, juntamente com as superfícies internas da ferramenta, são tratados com um agente desmoldante antes da montagem. Antes do enchimento o molde é aquecido a uma temperatura apropriada. O

poliuretano então é introduzido através de um orifício de enchimento normalmente localizado na parte inferior do molde. O líquido sobe, deslocando ar da cavidade através de um orifício, que é geralmente localizado no ponto mais alto da montagem. Quando a operação de enchimento é completada, a cura inicial do material toma lugar com a reação e solidificação do poliuretano. O componente solidificado é então desmoldado e sujeito a inspeção detalhada antes de ser aprovado. Este processo de fabricação tem como objetivo garantir uma perfeita adesão entre o poliuretano e o corpo do inserto, bem como um deslizamento entre o poliuretano e o torus do inserto.

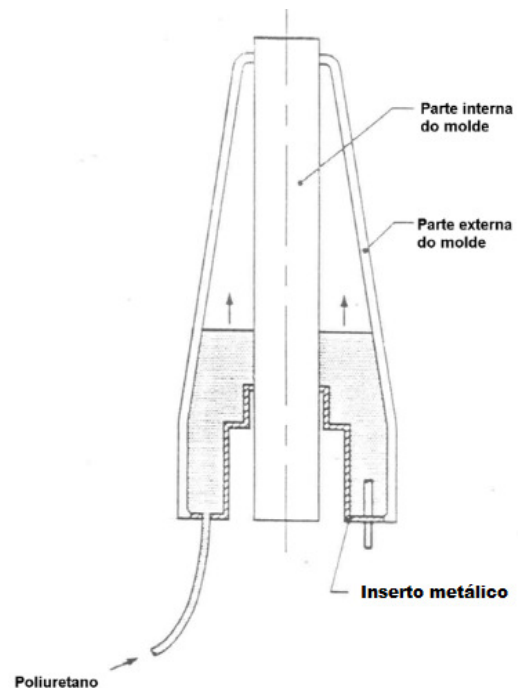


Figura 5 – Molde para enrijecedor à flexão, [KIEPPER, 2004].

Tabela 1 - Propriedades dos materiais presentes no enrijecedor à flexão selecionado.

Parte do enrijecedor à flexão	Corpo do inserto	Estojos/torus do inserto	Segmento cônico
Característica	USI SAC 350	Inconel 625 recozido	Poliuretano termoplástico poliéter
Carbono [%]	Máx. 0,25	Máx. 0,10	
Manganês [%]	Máx. 1,5	Máx. 0,50	
Enxofre [%]	Máx. 0,02	Máx. 0,015	
Fósforo [%]	0,01 a 0,06	Máx. 0,015	
Silício [%]	0,5 a 1,50	Máx. 0,50	
Cromo [%]	Máx. 0,60	20 a 23	
Molibdênio [%]		8 a 10	
Níquel [%]		Mín. 58	
Ferro [%]		Máx. 5,0	
Nióbio [%]		3,15 a 4,15	
Cobre [%]	0,05 a 0,4		
Módulo de elasticidade [GPa]	190 a 210	208	0,045
Coefficiente de Poisson	0,27 a 0,30	0,28	
Limite de resistência à tração [MPa]	500 a 650	827 a 1034	42
Tensão de escoamento [MPa]	Mín. 350	415 a 655	
Alongamento [%]	Mín. 16	30 a 60	325
Resistência ao impacto média [J]		66 (29°C) / 57 (-79°C)	
Resistência à fadiga [MPa]	10 ⁴ ciclos		
	4x10 ⁴ ciclos		
	10 ⁵ ciclos		
	4x10 ⁵ ciclos		
	10 ⁶ ciclos	655	
	4x10 ⁶ ciclos		
	10 ⁷ ciclos	630	
	10 ⁸ ciclos	621	
Custo [R\$/kg]	8,00	200,00	

3 – Análise de tensões

O enrijecedor à flexão selecionado será analisado utilizando o modelo para análise de falha de estruturas metal-polímero proposto por SANTOS [2014]. A análise de tensões do enrijecedor à flexão considera que a principal falha desta estrutura metal-polímero é a ruptura da parte polimérica devido à fadiga. Os principais pontos de falha considerados são os mostrados na figura 6. Considera também que o projeto da parte polimérica não tem tolerância ao dano já que, conforme é estabelecido na norma API 17J Apêndice B [2008], não é permitido qualquer vazio na estrutura polimérica. Nota-se que as três regiões críticas estão localizadas na parte polimérica do enrijecedor. Devido a isso, não será feita a análise da parte metálica do enrijecedor à flexão (considera-se o inserto metálico como um corpo rígido).

A primeira análise a ser efetuada é referente à possibilidade de ocorrência de

escoamento da parte polimérica. Da resistência dos materiais, a tensão normal presente em cada ponto do enrijecedor pode ser obtido utilizando a seguinte equação:

$$\sigma = \frac{M}{I} r \quad (1)$$

O momento fletor pode ser obtido utilizando a seguinte equação:

$$M = EIk_r \quad (2)$$

Logo:

$$\sigma = \frac{EIk_r}{I} r \quad (3)$$

ou:

$$\sigma = Ek_r r \quad (4)$$

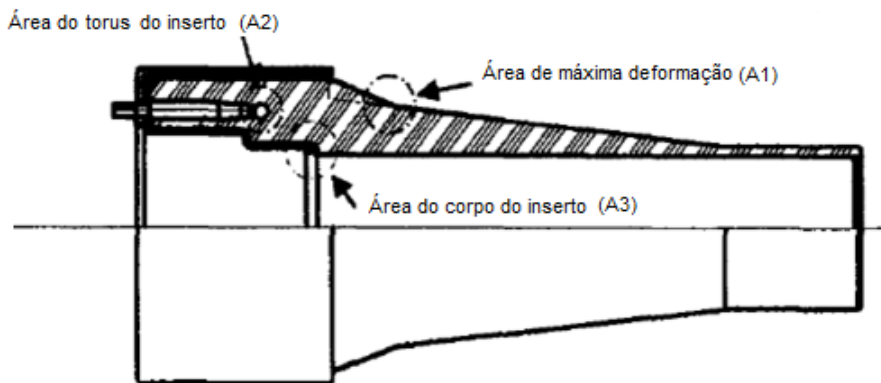


Figura 6 - Áreas mais críticas para ocorrência de falha por fadiga [DEMANZE, 2005].

Logo, para o cálculo das tensões nos pontos críticos se faz necessário inicialmente o cálculo das curvaturas ao longo do enrijecedor. Considerando o enrijecedor à flexão submetido a uma carga de teste de 250 kN com ângulo de 45°, a rigidez do poliuretano e a do tubo flexível e utilizando o programa para cálculo de curvatura escrito por SOUZA [2008], chega-se à distribuição de curvatura em cada ponto do enrijecedor apresentada na figura 7.

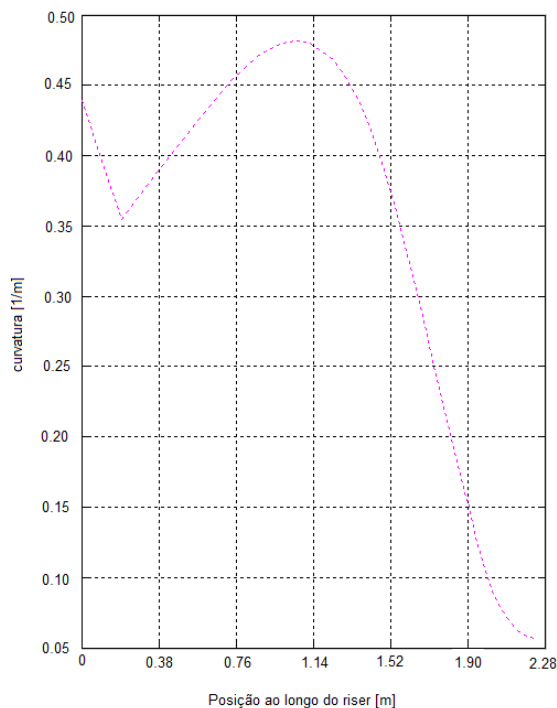


Figura 7 – Curvatura para carregamento P=250 kN com ângulo de 45°

Utilizando a equação 4, calculam-se as tensões nos pontos críticos. A tabela 2 apresenta os resultados.

Tabela 2 - Tensões nos pontos críticos.

Tensão média [MPa]		
A1 – máx. deformação	A2 - torus	A3 – corpo do inserto
5,3	4,9	2,9

O torus funciona como um concentrador de tensão. Utilizando a figura 8a chega-se a:

$$K_t \cong 4$$

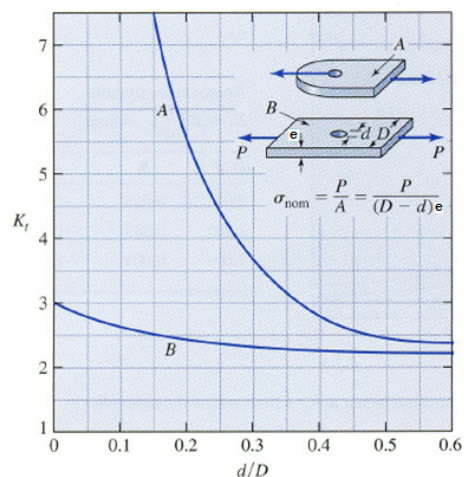


Figura 8 - Coeficiente de concentração de tensão K_t a – para uma barra chata carregada por um pino passando pelo furo transversal; b – para uma barra chata com um furo transversal sob tração axial, [COLLINS, 1993].

A área da ponta do corpo do inserto também funciona como um concentrador de tensão. Utilizando a figura 8a chega-se a:

$$K_t \cong 5$$

A tabela 3 mostra as tensões nos pontos críticos considerando a concentração de tensão.

Tabela 3 – Tensões máximas nos pontos críticos.

Tensão máxima [MPa]		
A1 – máx. deformação	A2 - torus	A3 – corpo do inserto
5,3	19,6	14,5

A tabela 1 não apresenta o limite de escoamento do poliuretano e sim o seu limite de resistência à tração. O mesmo apresenta forte dependência de diversos fatores (temperatura ambiente, taxa de deformação, etc.). Considerando que o escoamento do poliuretano ocorre com a aplicação de aproximadamente 50% da tensão limite de resistência à tração, [SANTOS, 2014], chega-se a um limite de escoamento de 21 MPa. Logo, observando a tabela 3, chega-se a conclusão de que não ocorre escoamento. Não foi considerada a viscoelasticidade do poliuretano já que a análise de tensões apresentada não leva em consideração o comportamento dinâmico do enrijecedor.

4 – Conclusões

A principal conclusão para este trabalho é a geometria do inserto é um fator fundamental para garantir um bom desempenho do enrijecedor à flexão fazendo com que haja uma redução nos níveis de tensões presentes no mesmo.

5 – Referências Bibliográficas

API SPEC 17J Specification for Unbonded Flexible Pipe, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008.

BOEF, W. J. C.; OUT, J. M. M. Analysis of a Flexible Riser Top Connection with Bend Restrictor. Proceedings of the 22nd Offshore Technology Conference, OTC 6436, Houston, Texas, EUA, Maio de 1990.

CAIRE, M. Análise de Enrijecedores à Flexão. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

CLEVELARIO, J. Introduction to Unbonded Flexible Pipe Design and Manufacturing. USP Course on Flexible Pipes.

COLLINS, J.A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1993.

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, Halkidiky, Greece, Junho de 2005.

KIEPPER, B.O. Análise Estrutural Estática, Via Elementos Finitos do Segmento Tubo Flexível-Enrijecedor. 2004. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

LEMONS, C. A. D. Análise de Fadiga em Risers. 2005. 248 f. Tese (Doutorado em Ciências) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

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/DIPLLOT/SEMEC. Outubro de 1998.

SANTOS, L.V. Análise de falha de estruturas metal-polímero: enrijecedores à flexão. 2014. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2014.

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.