

DETERMINAÇÃO DA VIDA A FADIGA DE CORRENTES METÁLICAS ATRAVÉS DO DANO INCREMENTAL SOB CARREGAMENTO ALEATÓRIO

LUCAS DE OLIVEIRA BARROS, LUCIVAL MALCHER

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Darcy
Ribeiro, Brasília – DF

Autor correspondente: lucasbarros1211@gmail.com

Apresentado na semana oficial da Engenharia e da Agronomia
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
4 a 6 de outubro de 2022

RESUMO: Este estudo aborda a aplicação do método dos elementos finitos, através do *software* comercial ABAQUS, para o estudo e análise de elos de correntes que são responsáveis pelo sistema de atracação das unidades FPSO (Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga) e a realização de uma análise numérica das tensões nos pontos críticos. Grandes carregamentos geram uma força de atrito entre os elos fazendo-o que se comportem como um engaste. O motivo desse aumento dos carregamentos se dá devido as condições de operações que as plataformas se encontram e fenômenos da natureza como correntes marítimas e ventos contribuindo para as solicitações nas amarras. Os sistemas de amarras dos navios-plataforma FPSO foram fabricados para ter uma durabilidade de mais de vinte anos, mas foram detectadas falhas nas amarras em menos de dois anos de operação. Na modelagem foi definido como o material das correntes o aço offshore pertencente ao grau R4, capaz de suportar altas cargas. As equações desenvolvidas descrevem o comportamento das solicitações em todo o conjunto amarra-*fairlead*. A modelagem do conjunto amarra-*fairlead* foi feita no *software* ABAQUS. A simulação será feita considerando o ângulo de trabalho das amarras igual a 17°, sendo aplicadas cargas variando entre 200 e 400 ton.

PALAVRAS-CHAVE: *amarra-fairlead*, pontos críticos, aço grau R4, correntes de amarração.

DETERMINATION OF LIFE THE FATIGUE OF METAL CHAINS THROUGH INCREMENTAL DAMAGE UNDER LOAD RANDOM

ABSTRACT: This study addresses the application of the finite element method, through the commercial *software* ABAQUS, for the study and analysis of chain links that are responsible for the mooring system of FPSO units (Floating Production, Storage and Offloading) and the realization of a numerical analysis of stresses at critical points. Large loads generate a frictional force between the links causing them to behave like a crimp. The reason for this increase in loads is due to the operating conditions that the platforms are in and natural phenomena such as sea currents and winds contributing to the requests on the moorings. The mooring systems of the FPSO platform ships were manufactured to have a durability of more than twenty years, but failures in the moorings were detected in less than two years of operation. In the modeling, the material of the currents was defined as offshore steel belonging to the R4 grade, capable of withstanding high loads. The equations developed describe the behavior of requests across the mooring-*fairlead* set. The modeling of the mooring-*fairlead* set will be done in the ABAQUS *software*. The simulation will be carried out considering the working angle of the ropes equal to 17°, with loads varying between 200 and 400 ton being applied.

KEYWORDS: mooring-*fairlead*, hotspots, steel grade R4, mooring chains.

INTRODUÇÃO

Com aumento da exploração de petróleo, novas tecnologias de ancoragem das plataformas são continuamente desenvolvidas. Grande parte da exploração de petróleo ocorre em plataformas suspensas

no mar, com isso há uma grande demanda por soluções que permitam a exploração e extração. Esses sistemas de ancoragem, são utilizados em navios FPSO (Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga). Essas unidades de exploração utilizam amarras com uma grande extensão de comprimento, tais amarras são responsáveis pela a fixação e estabilização dessas unidades de exploração contra agitações naturais, como vento e maré.

As linhas de ancoragem no seu trecho inicial são formadas por uma sequência de elos de aço. As amarras saem das plataformas flutuantes através de um dispositivo de guia do tipo *fairlead*, e assim forma um sistema denominado amarra-*fairlead*. O funcionamento das guias *fairlead*, pode ser classificado como uma polia que direciona as correntes de aços até um sistema de travamento, os sistemas de travamento é feito através de mordentes (Silva, 2016).

Segundo Canut et al. (2019), as correntes para a ancoragem são fabricadas com material de alta resistência que atende uma exigência operacional bem alta, podendo chegar a mais de 900 toneladas. Esse material que é empregado na indústria petrolífera é classificado de material offshore grau R, esse material pode se diversificar entre os graus offshore R3 a R5.

E ainda de acordo Neves (2020), no processo de fabricação dos elos, existe uma influência de uma carga de prova, onde tem participação no processo de controle de qualidade de fabricação de tais elos. Durante o processo de fabricação é aplicado uma carga de 75% da MBL (Carga Mínima de Ruptura). Tal processo de fabricação ajudar a elevar a vida à fadiga por tração-tração, porém por consequência gera deformações plásticas que aumenta a região de contato entre os elos, aumentando a força de atrito e contribuindo ainda mais no comportamento de engaste no contato entre os elos.

Conforme relatado por Vargas & Jean (2005), o comportamento de engaste entre os elos é acentuado durante as operações de exploração nas plataformas FPSO. As amarras sofrem altas solicitações, essas solicitações aumenta a força de atrito entre os elos, esse contato que é gerado e similar a um engaste, ou seja os elos são travados impedindo a movimentação. Com isso além das forças axiais e das forças transversais que estão presentes nas amarras e com o travamento dos elos, tem a incidência de esforços de flexão. A flexão é gerada devido as contribuições de forças transversais e do travamento dos elos, com isso gera uma flexão fora do plano principal (Flexão fora do plano - OPB).

De maneira geral, o processo de fabricação dos elos das correntes é um dos processos mais importantes das amarras, sendo assim um estudo com simulações numéricas tem-se uma grande relevância. As correntes foram fabricadas para ter uma duração de mais de 20 anos, mas frequentemente vem acontecendo falhas prematuras (Kim et al., 2019) e (Qiao et al., 2021). Com isso, uma análise numérica utilizando o *software* comercial ABAQUS dos pontos críticos das tensões é uma maneira de identificar os pontos prováveis de ruptura das amarras. O desenvolvimento de equações tem como intuito mapear os pontos críticos das amarras.

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema de atracação plataformas FPSO são compostas por vários conjuntos de amarra-*fairlead*, quando as plataformas estão em operação esse conjunto suportam cargas de cerca de 400 toneladas. Para suportar essas cargas, a amarras são compostas por materiais de alta resistência, como aço *offshore* grau R4, esse material atende aos requisitos para operação das plataformas. Os aços offshore possuem diversas características para serem classificados como grau *offshore* R4. Este tipo de material possui uma composição química muito específica, o que garante que as propriedades atendam às demandas de operação e exploração em áreas remotas (Neves, 2020). Esse aço possui uma composição bastante específica devido ser um aço de alta resistência (Tabela 1).

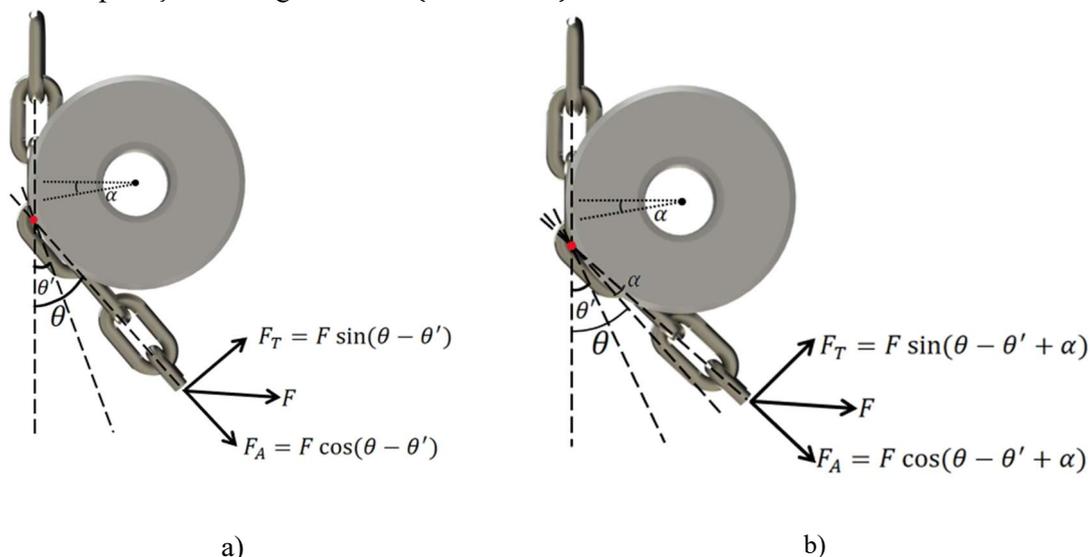
Tabela 1. Propriedades do aço *offshore* grau R4 (Neves, 2020).

Material	C	Mn	P	S	Si	Cu	Al	Ti	Cr	Ni
Grau R4	0,21	1,04	0,012	0,01	0,25	0,18	0,02	0,0018	1,12	0,53

Analisando o conjunto amarra-*fairlead* de forma analítica é possível investigar os pontos críticos através de equações que consigam descrever o comportamento das amarras. Na Figura 1 temos as solicitações no conjunto amarra-*fairlead*, assim é possível definir as componentes de forças axial e transversal. Com as componentes é possível calcular as tensões devido a cada uma das contribuições (Mamiya et al., 2019). O ângulo θ é definido como o ângulo de operação do *fairlead*. De acordo com a empresa AmClyde, uma das fabricantes do modelo amarra-*fairlead*, o ângulo de operação varia entre os

valores de 17° e 60. O ângulo α é o ângulo de rotação do *fairlead*, é uma função da carga aplicada. Ou seja, quanto maior a carga aplicada, maior vai ser esse ângulo. O ângulo θ' é definido como ângulo de travamento dos elos, ângulo responsável pela aparição da flexão fora do plano. O travamento se dá à medida que a carga mínima é aplicada, assim vamos ter um ângulo de travamento (θ'), tal ângulo está entre 0 e θ .

Figura 1. Conjunto amarra-*fairlead* com aplicação da carga mínima ($\theta - \theta'$) b) Conjunto amarra-*fairlead* com aplicação da carga máxima ($\theta - \theta' + \alpha$)



Com a equação (1) e (2) obtidas através da análise de solicitações nos elos, é possível definir as equações das cargas mínima e máxima. Onde é levado em consideração para a contribuição axial que a área é igual $A = \pi d^2/4$ e a inércia como $I = \pi d^4/64$. O " L_0 " é definido como o comprimento do travamento do elo até o ponto de aplicação da carga. O " d " é definido como o diâmetro da corrente.

$$\sigma_{\min} = \sigma_A + \sigma_M = \frac{2F_{\min} \cos(\theta - \theta')}{\pi d^2} + \frac{16F_{\min} L_0 \sin(\theta - \theta')}{\pi d^3} \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_A + \sigma_M = \frac{2F_{\max} \cos(\theta - \theta' + \alpha)}{\pi d^2} + \frac{16F_{\max} L_0 \sin(\theta - \theta' + \alpha)}{\pi d^3} \quad (2)$$

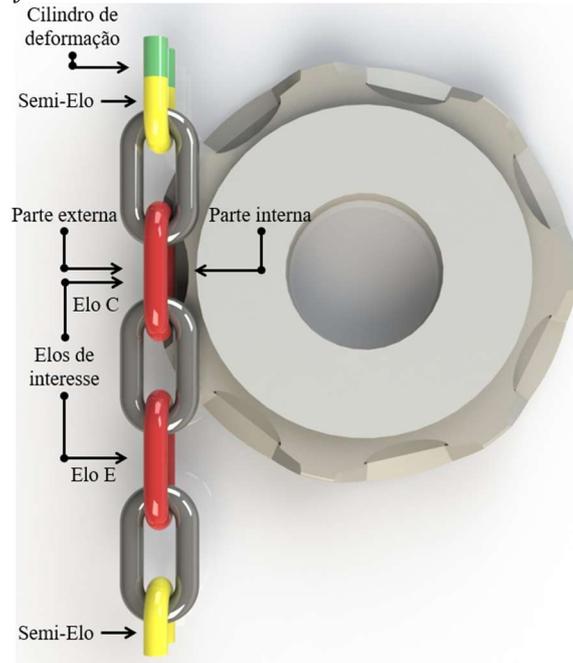
Em relação aos carregamentos das amarras, na sua fabricação as correntes passam por testes de controle de qualidade. Para ser caracterizado como material *offshore* as amarras tem que obedecer a algumas normas e são estabelecidos dois parâmetros fundamentais. Primeiro, é a MBL (*Minimum Break Load*), essa carga é definida através de ensaios laboratoriais onde é aplicada uma carga monotônica até a quebra, onde a carga que é suportada até a ruptura é definida como MBL. Outro parâmetro é a carga de prova, que é definida como um percentual da MBL. Segundo a norma essa carga de prova pode variar entre 50% e 75% da MBL (Canut et al., 2019). Com a aplicação dessa carga de prova, se a corrente não quebrar a corrente está pronta para as operações reais. A MBL é cerca de 1200 ton e a carga de prova é cerca de 900 ton. Para os carregamentos mínimos e máximos será levado em consideração 1/6 e 1/3 MBL, ou seja, a carga mínima será 200 ton e a máxima será 400 ton.

Foi utilizada uma simplificação para a montagem de todo o conjunto amarra-*fairlead* no *software* ABAQUS. A montagem consiste nos seguintes elementos, *fairlead*, cinco elos, dois semi-elos e dois cilindros de deformação. Segundo Mamiya et al., (2019), a consideração apenas desses elementos é suficiente para englobar toda área de estudo do conjunto amarra-*fairlead*. A Figura 2 representa todo o conjunto amarra-*fairlead* montado no ABAQUS.

Os elos possuem dimensões pré-definidas de acordo com as orientações normativas, sendo que todas dimensões são dependentes do diâmetro dos elos. Para a simulação o valor do diâmetro a ser adotado será de 120 mm. O *fairlead* foi modelado como um corpo rígido devido a análise ser feita apenas

nas correntes. Modelando o *fairlead* de forma rígida temos uma redução do custo computacional, pois não temos análise do campo de tensões e deformações do *fairlead*. Os semi-elos são responsáveis pelo início e fim de todo o conjunto de correntes. Em uma extremidade é aplicada as condições de contorno e na outra o carregamento. Os cilindros de deformação são acoplados no semi-elo na parte superior do conjunto. Os cilindros de deformação simulam toda a rigidez de todos os elos anteriores ao *fairlead*, elos nos quais se encontram dentro da plataforma FPSO. Os elos de interesse são denominados como elos “C” e “E”, pois são os elos mais solicitados de todo o conjunto amarra-*fairlead*. Esses elos estão sujeitos a flexão fora plano, tal solicitação contribui significativamente para a falha prematura. A parte interna do elo é definida como a porção que está em contato com a face do *fairlead*, conforme a Figura 2.

Figura 2. Conjunto amarra-*fairlead*.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 temos os valores da tensão axial, tensão de momento fora do plano e tensões máximas e mínimas. As tensões foram calculadas para os elos de interesse, os elos “C” e “E”, conforme mostra a Figura 2. A tabela demonstra os valores encontrados com o ângulo de operação (θ) no valor de 17° . A primeira hipótese para o cálculo das tensões foi que o ângulo de travamento é igual ao valor do ângulo de operação ($\theta = \theta'$), ou seja, o travamento dos elos acontecerá após a aplicação da carga mínima. A segunda hipótese é levada em conta o ângulo de operação igual a zero ($\theta = 0$), isto é, o travamento dos elos acontece no início da aplicação da carga mínima.

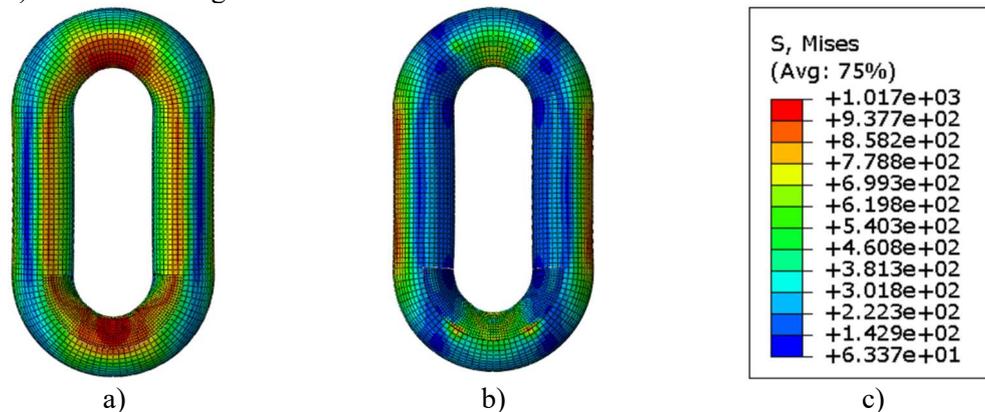
Tabela 2: Cargas mínimas e máximas, utilizando o ângulo de operação de 17° .

	$\theta = 17^\circ$	Carga mínima			Carga máxima		
		σ_A	σ_M	σ_{min}	σ_A	σ_M	$\sigma_{máx}$
Elo C	$\theta' = \theta$	86,74	0	86,74	173,39	617,45	790,84
	$\theta' = 0$	82,95	2840,34	2923,29	164,20	6268,28	6432,48
Elo E	$\theta' = \theta$	86,74	0	86,74	173,36	506,21	679,57
	$\theta' = 0$	43,37	6009,49	6052,86	81,20	12264,08	12345,28

Na Tabela 2 Figura 3 demonstra resultados após a simulação para o elo de interesse C na carga mínima. Para a simulação foi considerado o ângulo de enrolamento igual a 17° . Na Figura 3 a) expressa a distribuição de tensões na parte externa do elo e Figura 3 Figura 1 b) na parte interna do elo. É notório que a parte externa do elo sofre efeitos de tensão maior quando comparado com a parte interna. Um dos

motivos desse efeito é devido a contribuição da carga transversal, que colabora para a tensão fora do plano.

Figura 3. Tensões no elo “C” com a aplicação da carga máxima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista Frontal. b) Vista posterior. c) Tensões na carga mínima.



CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados na seção anterior é possível observar os valores de tensões e comportamento nos elos no conjunto amarra-*fairlead*. Os sistemas de ancoragem apresentavam falhas prematuras em menos de dois anos de operação, um dos motivos dessas falhas é a flexão fora do plano (OPB). Outro fator observado são as tensões na Tabela 2 e as tensões obtidas nas simulações numéricas, Figura 3. É notável que existe um ângulo de travamento no qual os valores não seja o ângulo de operação e nem zero. O ângulo de travamento é uma variável bem importante, pois ela que indica o momento que se iniciará o travamento do elo, conseqüentemente, sofrer a flexão fora do plano, contribuindo para a falha. Considerando o valor do ângulo de travamento igual ao ângulo de operação, é perceptível que temos apenas tensões devido a contribuição da carga axial. Já considerando o ângulo de travamento igual a zero, é notório que a contribuição devido ao momento fletor tem um grande aumento, assim, quanto menor o ângulo de travamento, maior será a contribuição devido o momento. Outro fator que reforça a atuação da tensão fora do plano, é a distribuição de tensão não uniforme nos elos (Figura 3), pois se apenas tivesse a contribuição da tensão devido a carga axial, as tensões no elo seriam uniformes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília pelo apoio, CAPES e CNPQ.

REFERÊNCIAS

- Canut, F. A., Simões, A. M. P., Reis, L., Freitas, M., Bastos, I. N., Castro, F. C., Mamiya, E. N. Monitoring of corrosion-fatigue degradation of grade R4 steel using an electrochemical-mechanical combined approach. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, v. 42, n. 11, p. 2509–2519, 2019.
- Kim, Y.; Kim, M. S.; Park, M. J. Fatigue analysis on the mooring chain of a spread moored FPSO considering the OPB and IPB. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v. 11, n. 1, p. 178–201, 2019.
- Mamiya, E. N., Castro, F. C., Malcher, L., Doca, T. C. R., Mutterle, P. V., Reis, L. F. G., Freitas, M. J. M., Infante, V. I. M. N., Ribeiro, A. M. R. Relatório Técnico FINAL - Durabilidade de componentes de Sistemas de Amarração para uso em águas profundas: experimentação e modelagem DSAm. UNB, 2019. 110 f. Relatório Técnico.
- Neves, R. S. Uma extensão do modelo de Gurson para análise de fadiga seguindo uma metodologia incremental. UNB, 2020. 138 f. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas).
- Qiao, D., Li, B., Yan, J., Qin, Y., Liang, H., Ning, D. Transient responses evaluation of FPSO with different failure scenarios of mooring lines. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 9, n. 2, p. 1–34, 2021.
- Silva, M. Z. E. Estudo da influência do desgaste na falha prematura de componentes de linhas de ancoragem. UNB, 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas).

Vargas, P.; Jean, P. FEA of out-of-plane fatigue mechanism of chain links. In: Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE, 2005, Halkidiki, Anais... Halkidiki, 2005.