

DETERMINAÇÃO DA VIDA À FADIGA DE CORRENTES OFFSHORE SOB CARREGAMENTO COM AMPLITUDE CONSTANTE

Lucas de Oliveira Barros¹

Lucival Malcher²

^{1,2} Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF

¹lucasbarros1211@gmail.com, ²malcher@unb.br

Resumo: Este estudo aborda a aplicação do método de elementos finitos, através do software comercial ABAQUS, para estudo e análise dos elos de corrente, tais elos pertencem ao sistema de ancoragem de navios FPSO (Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga), e a realização de análise numérica das tensões nos hotspots para obter equações que descrevem o comportamento das amarras. Desta forma, foi levado em consideração a flexão cíclica que ocorre fora do plano principal dos elos, denominada como OPB (Flexão fora do plano). De acordo com a API (American Petroleum Institute), o dimensionamento dos elos que compõe os sistemas de ancoragem, consideram apenas cargas normais, não levando em consideração a flexão fora do plano. Devido os grandes carregamentos presentes nos sistemas de ancoragem, temos a elevação da força de atrito resultante no contato entre os elos, fazendo-o que os elos tenham um comportamento de engaste. O comportamento de engaste entre os elos, geram forças transversais que contribuem para a flexão fora do plano. Os carregamentos elevados se dão devido as condições de operações que acontecem dentro da plataforma FPSO, como o manuseio, transporte e armazenamento do petróleo e fenômenos naturais como correntes marítimas e ventos, essas condições contribui para as solicitações nas amarras. Esses sistemas de ancoragem foram dimensionados para ter uma durabilidade de mais de vinte anos, mas foram identificadas falhas prematuras em menos de dois anos de operação. Para a modelagem de todo o conjunto das amarras no ABAQUS, foi considerado como o material das correntes o aço offshore pertencente ao grau R4, tal material tem a capacidade de suportar carregamentos elevados. O conjunto a ser simulado no ABAQUS possui cinco elos, dois semi-elos e coroa fairlead, que é responsável por guiar os elos, tal conjunto é denominado como amarra-fairlead. A modelagem passou por simulações considerando o ângulo de enrolamento de 17°, aplicando cargas oscilando ente 200 e 400 ton. Com as simulações é possível validar os hotspots nos elos de interesse e identificar a influência do ângulo de enrolamento das amarras. Após a validação é possível obter equações de forma analítica, que descreve o comportamento das solicitações em todo o conjunto amarra-fairlead. Assim, foram desenvolvidas equações para as contribuições de carga axial e momento fletor. Por fim, foi calculada a vida à fadiga dos elos, utilizando o critério de fadiga SWT e considerando um carregamento com amplitude constante.

Palavras-chave: Amarra-fairlead; pontos críticos; aço grau R4; correntes de amarração; SWT.

1. INTRODUÇÃO

Com um aumento considerável da exploração e extração de petróleo nos últimos anos, surgiu várias demandas de novas tecnologias que contribuíssem para as operações de exploração e extração. E devido grande parte da exploração acontecer em plataformas suspensas no mar, surgiu demandas de tecnologias de sistemas de ancoragem para essas plataformas. Segundo Mamiya et al. (2019), a captação de petróleo se dá por dutos que ficam no fundo do mar, devido esses dutos não possuir uma certa resistência para restringir a movimentação de toda plataforma, foi fundamental desenvolver um sistema de ancoragem. Tais dispositivos de ancoragem são aplicados em navios plataforma FPSO (Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga). Os navios FPSO utilizam amarras com grandes comprimentos, onde são responsáveis pela a fixação e estabilização das plataformas no oceano, pois as plataformas estão a sujeitas a intempéries da natureza como o vento, maré e ondas.

Segundo Hansen (2021), essas unidades flutuantes FPSO podem ser definidas como um navio-plataforma. Essas unidades são utilizadas na exploração de poços de petróleo que podem ser localizadas a mais 2000 m de profundidade. As plataformas flutuantes tem a capacidade de produzir, processar, transferir o petróleo encontrado. Devido a descoberta de petróleo em águas com profundidade superior a 2000 metros, plataformas flutuantes ganharam bastante importância no cenário brasileiro da produção de petróleo.

Esses sistemas de ancoragem são constituídos por cabos com materiais diversos, geralmente com trechos com polímeros e correntes (amaras). A combinação desses materiais se dá devido à grande profundidade, com intuito de diminuir o peso de todo o sistema (Liu et al., 2014). O material offshore que é utilizado nas amarras é combinado com outros materiais com o objetivo de diminuir o peso. Com a combinação desses materiais as amarras ficam com mais de três quilômetros de extensão e são constituídas por materiais de alta resistência.

Segundo Silva (2016), no trecho inicial, as linhas de ancoragem são compostas por uma sequência de elos de aço. As amarras vêm do interior das plataformas FPSO, passam por um dispositivo de guia, denominado como *fairlead*. A junção das correntes com o *fairlead* gera um sistema denominado amarra-*fairlead*. O *fairlead* tem a função de direcionar as correntes para um dispositivo de travamento. O sistema *fairlead* tem uma coroa onde permite uma certa rotação dos elos das correntes em relação aos elos vizinhos, sendo assim, é possível ter uma variação nos ângulos das amarras e isso permite um certo ajuste das correntes, pois as plataformas estão sujeitas a intempéries devido a agitação da maré.

As correntes são fabricadas com material de alta resistência, essas correntes estão sujeitas a uma exigência operacional bem alta, pois suportam cargas que podem chegar a mais de 900 toneladas. O material que é aplicado na indústria *offshore* é classificado como material *offshore* grau R, variando os graus de R3 a R5 (Canut et al., 2019). De acordo com Liu et al. (2014), no âmbito petrolífero, devido grande profundidade requer que essas amarras (correntes) sejam combinadas com cabos mais leves, geralmente de material polimérico, devido ao baixo peso se comparados com o material *offshore*. Conforme relato por Neves (2020), normalmente as falhas estruturais ocorrem nas amarras, que se encontram na parte superior dos trechos de ancoragem, exatamente onde há a combinação entre as amarras e os *fairleads*, embora apresente uma alta resistência a falha, a resistência a fadiga que o material falha é relativamente menor.

Para fins de controle de qualidade, a fabricação dos elos passa por testes onde as correntes são submetidas a uma carga de prova. Esse processo consiste em aplicar uma carga tratativa que corresponde cerca de 75% da MBL (Carga mínima de ruptura). Esse processo ajudar a elevar a vida à fadiga por tração-tração, mas em contrapartida gera deformações plásticas nos contatos dos elos, que aumenta consideravelmente a força de atrito, contribuindo para o comportamento de engaste entre os elos (Neves, 2020).

De acordo com Vargas e Jean (2005), durante as operações de exploração e extração de petróleo nas plataformas FPSO, o comportamento de engaste entre elos ficam mais acentuado. Devido as altas solicitações, a força de atrito no contato dos elos aumenta, esse comportamento no contato entre os elos é similar um engaste, gerando um travamento, impossibilitando a movimentação dos elos. Como consequência do travamento dos elos, além os esforços axiais presentes nas amarras, tem a incidência de esforços transversais que contribuem para a flexão dos elos. A flexão é definida como flexão fora do plano principal OPB (Flexão fora do plano) ou dentro do plano principal IPB (Flexão dentro do plano). Segundo Rampi et al. (2016), a flexão dentro do plano principal é menos severa quando comparada com a tensão fora do plano. A solicitação dentro do plano é cerca de sete vezes menor que a solicitação do fora do plano.

Segundo relatado por. Mamiya et al. (2019), a região de contato mais crítica das amarras é o trecho de corrente e a coroa *fairlead*, esse trecho é considerado crítico devido à grande incidência de falhas prematuras, tais falhas se dá devido flexão fora do plano. E ainda de acordo com. Kim et al. (2019), o travamento induzido pelo atrito entre os elos causa flexão fora do plano, assim eleva a tensão de contato entre os elos.

Conforme relatado por. Rampi et al. (2016) e. Melis et al. (2005) a flexão fora do plano se refere a flexão de um elo fora do plano principal. O motivo que essa flexão é causada é devido as solicitações de cargas transversais e pelos momentos que são gerados através das forças de atritos entre os próprios elos. Essas tensões fora do plano são grandes suficientes para propagar trincas no elo, com isso a vida útil do elo é reduzida drasticamente.

De certa forma, as correntes foram fabricadas para ter uma vida operacional de mais de vinte anos, mas há registros de falhas prematuras nas amarras Kim et al. (2019) e Qiao et al. (2021). Sendo assim, um estudo utilizando a análise numérica nos pontos críticos dos elos é uma maneira de identificar possíveis pontos de falha. Uma análise de forma analítica tem como intuito de mapear os esforços que as amarras estão sujeitas. As equações obtidas através da análise analítica levam em consideração parâmetros como o histórico de carregamento, diâmetro dos elos, ângulos de operação, rotação do *fairlead* e de travamento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As plataformas FPSO possuem vários conjuntos de amarra-*fairlead*, quando as plataformas estão em operações de exploração, os esforços no conjunto amarram-*fairlead* são bem elevados. Com isso, para atender essa exigência operacional, o material utilizado nas amarras deve possuir alta resistência. Um dos materiais que atende essa resistência é o aço *offshore* de grau R4, para o cenário de exploração e extração de petróleo esse material atende os requisitos. Esse material possui uma composição química bem específica, conforme mostrado na Tab. 1. Devido as explorações acontecerem em áreas remotas, essas propriedades atende as demandas operacionais que as amarras estão sujeitas (Neves, 2020). O aço *offshore* grau R4, deve cumprir as propriedades mecânicas definidas pela norma IACS W22 definida para operar nas condições impostas pelo oceano.

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

As amarras passam por alguns testes de controle de qualidade durante a sua fabricação. Assim, para ser definido como um material *offshore*, tem que seguir algumas diretrizes, e para isso são definidos dois parâmetros fundamentais. O primeiro parâmetro é a MBL (*Minimum Break Load*). A MBL é definida através de testes laboratoriais, onde temos um

conjunto de elos que são submetidos a uma carga de tração, onde a carga é aplicada até quebra das correntes. O valor da carga que ocasiona a quebra da corrente é definido como MBL. Segundo parâmetro é a carga de prova, a carga de prova é definida como um percentual da MBL. De acordo com a norma, essa carga de prova tem uma variação entre 50 e 75% da MBL (Canut et al., 2019). Como um teste de controle de qualidade, a carga de prova é aplicada nas correntes, se correntes não sofrer a ruptura, elas estão prontas para ser utilizadas em operações de trabalho. A MBL foi definida como 1200 ton, a carga de prova será cerca de 75% da MBL, ou seja, 900 ton. Os carregamentos oscilatórios, é definido como uma fração da MBL. Para o carregamento mínimo será de 1/6 da MBL e para o máximo 1/3 da MBL, em termos de toneladas, 200 ton para o carregamento mínimo e 400 ton para o máximo.

Fazendo uma análise analítica do conjunto amarra-*fairlead* é possível identificar os esforços que estão presentes em todo conjunto. Na Figura 1 temos a demonstração dos esforços presentes no conjunto, com isso é possível definir os esforços que são compostos pelas contribuições de força axial e transversal. Segundo Mamiya et al. (2019) com essas componentes de forças axial e transversal é possível calcular as tensões que estão diretamente relacionadas com cada contribuição. O ângulo de operação ou de enrolamento é definido como θ e de acordo com a empresa AmClyde, umas das fabricantes de sistemas de ancoragem, a faixa de operação do ângulo de operação está entre os valores de 17 e 60°. Já o ângulo α é definido como o ângulo de rotação do *fairlead*, à medida que temos a transição de carregamento mínimo, para o carregamento máximo, esse ângulo sofre alteração. O ângulo θ' é definido como o ângulo de travamento, tal ângulo indica quando se inicia o travamento, o travamento dos elos está diretamente relacionado com a flexão fora do plano. O travamento dos elos se dá quando temos a aplicação da carga mínima.

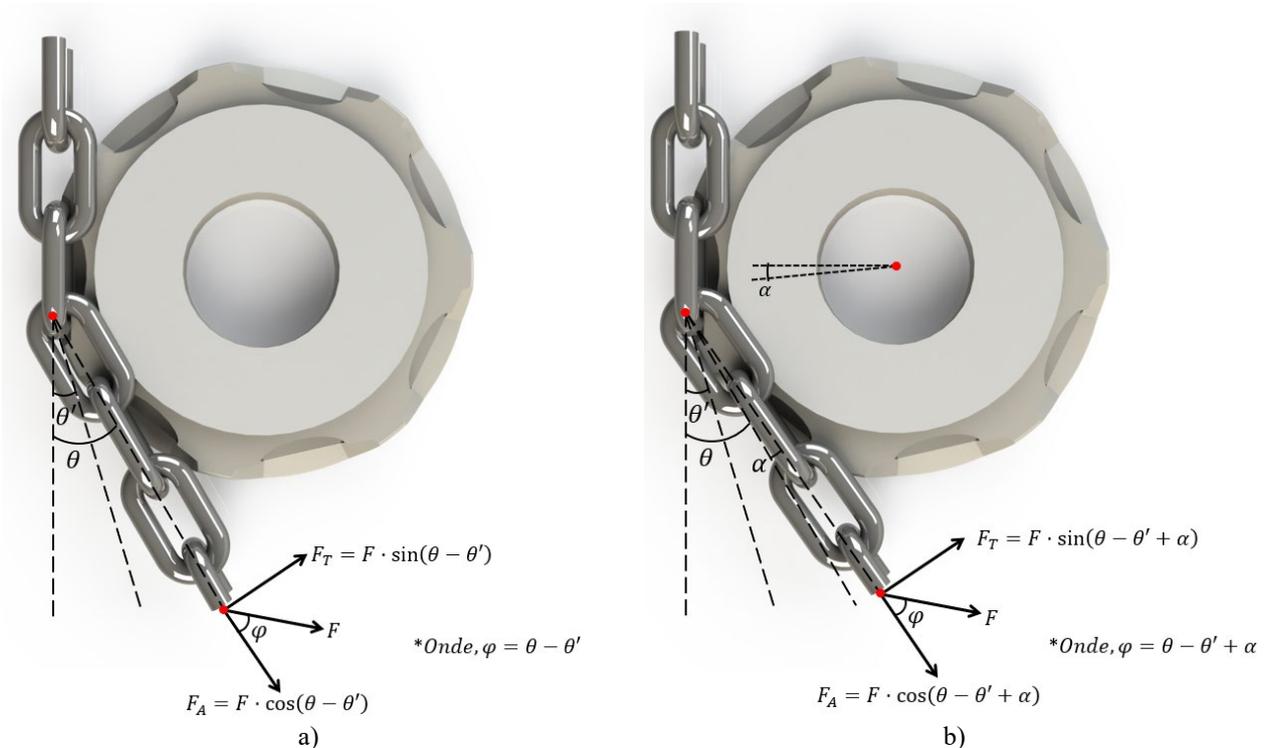


Figura 1: Diagrama de esforços livres no conjunto amarra-*fairlead*. a) Aplicação da carga mínima ($\theta - \theta'$). b) Aplicação da carga máxima ($\theta - \theta' + \alpha$).

Através da análise dos esforços presentes no conjunto amarra-*fairlead*, é possível definir equações para o carregamento mínimo e máximo. As equações são escritas com duas parcelas, uma parcela da tensão é devido a contribuição da força axial (σ_A) e outra devido a contribuição da flexão fora do plano (σ_M). A equação Eq. (1) descreve as solicitações no carregamento mínimo e a Eq. (2) descreve para o carregamento máximo.

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

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

A área da seção transversal do elo é definida como, $A = \pi d^2/4$ e a inércia como, $I = \pi d^4/64$. A área está relacionado a contribuição da tensão devido ao carregamento axial e a inércia devido a flexão fora do plano. O " L_0 " é a distância do

travamento dos elos até o ponto de aplicação da carga. C_a e C_{OPB} são constantes que estão relacionadas a geometria do elo, sendo a C_a está relacionado com a tensão axial e C_{OPB} com a flexão fora do plano.

Para a realização da simulação no ABAQUS, foi utilizada uma simplificação do conjunto amarra-*fairlead*. Os elementos que compõe o conjunto, são, cinco elos, dois semi-elos, dois cilindros de deformação e a coroa *fairlead*. Levando em consideração esses elementos é capaz de abranger toda a área de estudo do conjunto amarra-*fairlead* (Mamiya et al., 2019).

Neste trabalho o diâmetro dos elos de 120 mm foi adotado. Os elos são dimensionados de acordo com orientações normativas, o comprimento e a largura do elo, são calculadas através do diâmetro. Como a análise das tensões será apenas nos elos, a coroa *fairlead* foi modelada como um corpo rígido. De certa forma temos uma redução do tempo computacional da simulação, pois não há análise do campo de tensões e deformações no *fairlead*. Os cilindros de deformação são responsáveis por simular toda a rigidez dos elos que estão presentes dentro da plataforma FPSO. Os elos denominados como elos de interesse são os elos que são suscetíveis a flexão fora de plano, pois são os elos que tem a maior probabilidade de falha prematura. Na figura abaixo os elos de interesse são os elos “C” e “E”, destacados de vermelho. A parte interna dos elos é definida como a parte que está em conato diretamente com o *fairlead*, notoriamente a parte externa é a parte que não tem contato com o *fairlead*. A definição das partes internas e externas são importantes devido a distribuição de tensões serem diferentes. Na Figura 2 temos o conjunto amarra-*fairlead* montado, com os respectivos componentes.

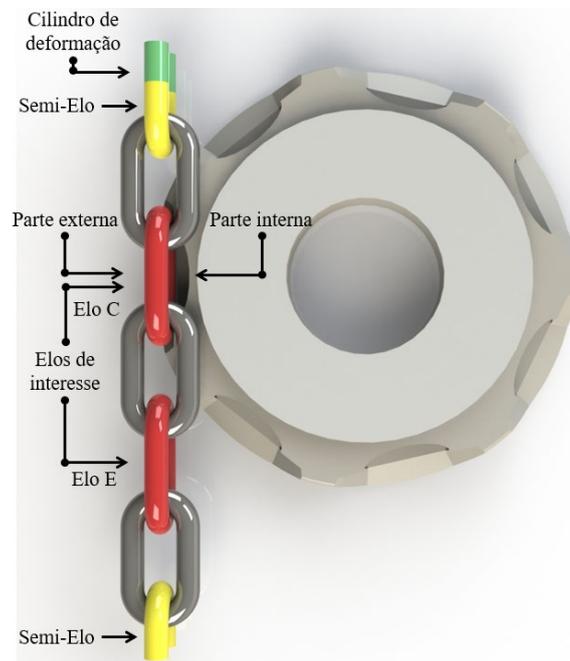


Figura 2: Conjunto amarra-*fairlead*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das tensões nos elos de interesse

Os carregamentos mínimos e máximos, são compostos pelas contribuições da tensão axial e de momento fora do plano. Na Tabela 2 temos os valores calculado de forma analítica. Os valores exibidos são referentes as tensões dos elos de interesse, elos “C” e “E”. Para o cálculo foi considerado o ângulo de operação igual a 17° ($\theta = 17^\circ$). Além disso, foi considerado três ângulos de travamentos, primeira consideração que o ângulo de travamento é igual ao ângulo de operação ($\theta = \theta'$), segunda consideração, ângulo de travamento igual a zero ($\theta' = 0$), terceira consideração, o ângulo de travamento é cerca de 14° , sendo assim, a diferença entre o ângulo de operação e de travamento tem o valor de 3° ($\theta - \theta' \cong 3$).

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

$\theta = 17^\circ$		Carga Mínima			Carga Máxima		
$\alpha = 1,8343$		σ_A	σ_M	σ_{min}	σ_A	σ_M	σ_{max}
Elo C	$\theta' = \theta$	260,00	0	260,00	519,73	215,93	735,66
	$\theta' = 0$	248,64	986,17	1234,81	492,16	2177,82	2669,97
	$\theta - \theta' \cong 3^\circ$	259,64	176,53	436,17	518,15	568,51	1086,66
Elo E	$\theta' = \theta$	260,00	0	260,00	519,73	154,24	673,97

	$\theta' = 0$	248,64	704,40	953,04	492,16	1555,58	2047,74
	$\theta - \theta' \cong 3^\circ$	259,64	126,09	385,74	518,15	406,08	924,23

Nas figuras a seguir estão demonstrados os resultados após a simulação no ABAQUS. As figuras expressam os resultados dos elos de interesse do conjunto amarra-*fairlead*. Para a simulação foi utilizado o ângulo de operação no valor de 17° . Na Figura 3 expressa as tensões no elo “C”, com a aplicação do carregamento mínimo. Onde na Figura 3 a) temos a distribuição de tensão na parte interna do elo, na Fig. 3 b) a distribuição de tensão na parte externa e na Fig. 3 c) os valores das tensões numéricas, encontradas após a simulação.

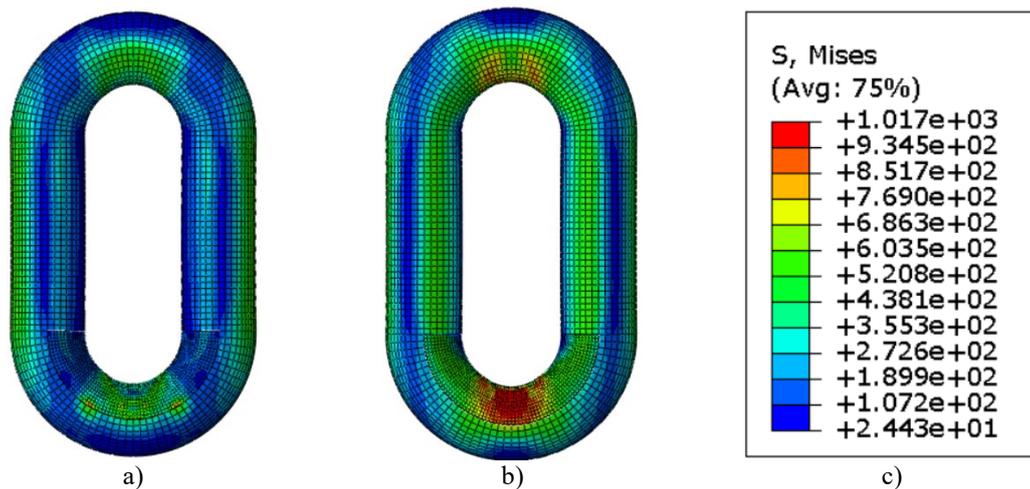


Figura 3: Tensões no elo “C” com a aplicação da carga mínima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista interna. b) Vista externa. c) Tensões na carga mínima.

Na Figura 4 temos resultados com a aplicação do carregamento máximo. Onde a Figura 4 a) representa a distribuição de tensão na parte interna do elo, na Fig. 4 b) na parte externa do elo e na Fig. 4 c) os valores das tensões numéricas. É possível observar que a distribuição de tensão na parte externa do elo é bem mais acentuada se comparada com a distribuição da parte interna. Um dos fatores que contribuem para essa distribuição não uniforme é a tensão devido a carga transversal, que gera o efeito OPB.

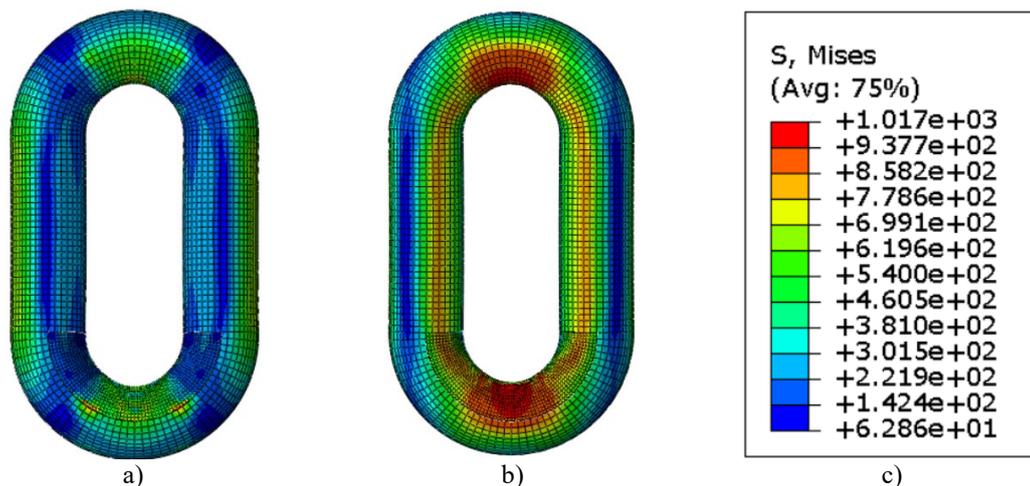


Figura 4: Tensões no elo “C” com a aplicação da carga máxima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista interna. b) Vista externa. c) Tensões na carga máxima.

Na Figura 5 e Figura 6 são exibidos os resultados após a simulação do elo “E”. As figuras, assim como as anteriores demonstram os resultados na parte interna e externa do elo e os valores das tensões numéricas obtidas após a simulação no ABAQUS.

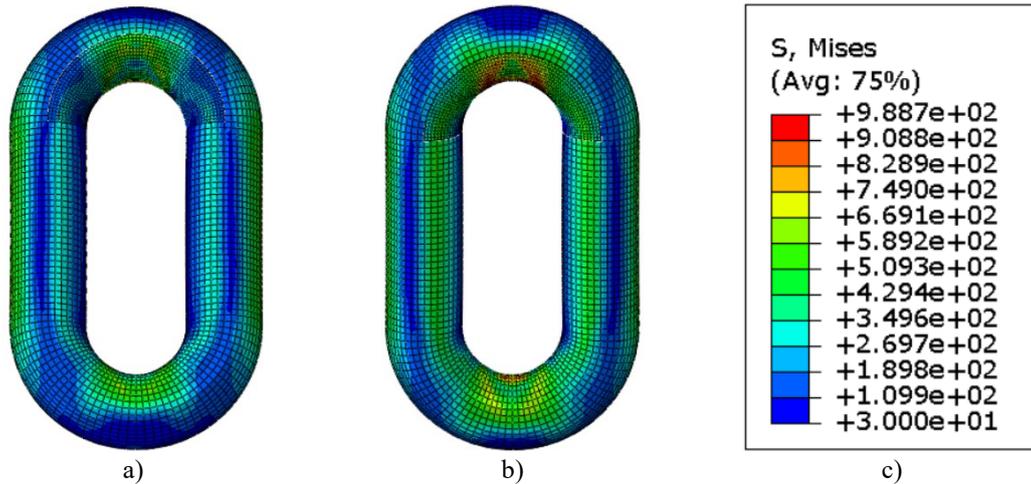


Figura 5: Tensões no elo “E” com a aplicação da carga mínima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista interna. b) Vista externa. c) Tensões na carga mínima.

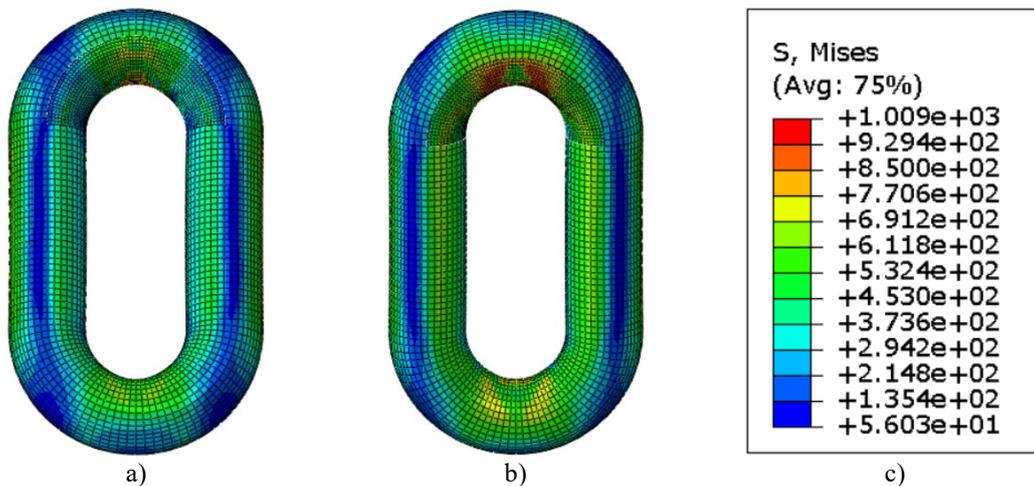


Figura 6: Tensões no elo “E” com a aplicação da carga máxima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista interna. b) Vista externa. c) Tensões na carga máxima.

3.2 Vida a fadiga dos elos de interesse, sob carregamento com amplitude constante

Para determinar a vida a fadiga dos elos de interesse foi proposto dois tipos de carregamentos com amplitude constante. Primeiro, assumiu um carregamento mais severo, considerando os extremos das cargas, sendo que para carga mínima, é assumido 200 ton e para a máxima 400 ton. Segundo, um carregamento mais suave, sendo que a carga mínima é de 200 ton e a máxima de 250 ton. Para ambos os casos foram calculadas a vida considerando o efeito apenas do carregamento axial e o efeito do carregamento axial somado com a flexão fora do plano.

Com as equações (1) (2) é possível calcular as tensões mínimas e máximas. Para os cálculos foi levado em consideração que a do ângulo de operação igual a 17° ($\theta = 17^\circ$), ângulo de travamento é igual a 14° ($\theta' = 14^\circ$), sendo assim a diferença entre o ângulo de operação e travamento será de 3° , como utilizado anteriormente na Tab. 2. E o ângulo de rotação do *fairlead* igual da Tab. 2 ($\alpha = 1,8343^\circ$).

Para calcular o número de ciclos (N_f) foi utilizado o critério de vida à fadiga SWT. Com a equação (3) é possível determinar o número de ciclos. Onde σ_a é a amplitude de tensão e σ'_f e b' representa o coeficiente e o expoente de resistência a fadiga do material *offshore* grau R4. A partir do número de ciclos é possível determinar o tempo de vida utilizando uma frequência de 0,1 Hz a cada ciclo. De acordo com Mamiya et al. (2019), essa frequência está associada ao panorama da indústria *offshore*.

$$N_f = \left(\frac{\sqrt{\sigma_a \cdot \sigma_{máx}}}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b'}} \quad (3)$$

Nas tabelas a seguir exibe os valores das vidas para os elos de interesse, considerando o carregamento mínimo de 200 ton e máximo de 400 ton. Na Tabela 3 os resultados apresentados leva em consideração apenas o efeito do carregamento axial e na Tab. 4 leva em consideração o carregamento axial juntamente com o efeito OPB.

Tabela 3: Vida das amarras sob carregamento com amplitude constante, sem o efeito do OPB.

Axial							
Elo #	Carreg.	N_f	Segundos	Horas	Dia	Meses	Anos
Elo C	200~400	1,05E+06	1,05E+07	2,91E+03	1,21E+02	4,0476	0,3373
Elo E	200~400	1,05E+06	1,05E+07	2,91E+03	1,21E+02	4,0476	0,3373

Tabela 4: Vida das amarras sob carregamento com amplitude constante, com o efeito do OPB.

Axial + OPB							
Elo #	Carreg.	N_f	Segundos	Horas	Dia	Meses	Anos
Elo C	200~400	3,14E+04	3,14E+05	8,72E+01	3,63	0,1211	0,0101
Elo E	200~400	6,58E+04	6,58E+05	1,83E+02	7,62	0,2539	0,0212

Por fim, a Tabela 5 e Tabela 6 leva em consideração um carregamento mais suave, o onde o carregamento mínimo é de 200 ton e o máximo de 250 ton. Na Tabela 5 os resultados apresentados leva em consideração apenas o efeito do carregamento axial e na Tab. 6 leva em consideração o carregamento axial juntamente com o efeito OPB.

Tabela 5: Vida das amarras sob carregamento com amplitude constante, sem o efeito do OPB.

Axial							
Elo #	Carreg.	N_f	Segundos	Horas	Dia	Meses	Anos
Elo C	200~250	5,34E+07	5,34E+08	1,48E+05	6,18E+03	206,0950	17,1746
Elo E	200~250	5,34E+07	5,34E+08	1,48E+05	6,18E+03	206,0950	17,1746

Tabela 6: Vida das amarras sob carregamento com amplitude constante, com o efeito do OPB.

Axial + OPB							
Elo #	Carreg.	N_f	Segundos	Horas	Dia	Meses	Anos
Elo C	200~250	6,75E+05	6,75E+06	1,88E+03	7,82E+01	2,6060	0,2172
Elo E	200~250	1,56E+06	1,56E+07	4,34E+03	1,81E+02	6,0334	0,5028

4. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos após a simulação e os cálculos feitos através das equações é possível analisar o comportamento das correntes do conjunto amarra-*fairlead*. Conforme relatado anteriormente, os sistemas de ancoragem apresentavam falhas prematuras em pouco tempo de operação, e um dos fatores predominantes para a falha é a flexão fora do plano (OPB). De acordo com Tab. 2 e com os resultados obtidos através das simulações, Fig.3 a Fig. 6, é possível notar que o ângulo de travamento não pode ser igual a zero e nem igual ao ângulo de operação. O ângulo de travamento é cerca de 14° conforme adotado na Tab. 2, pois temos os resultados da carga máxima de forma analítica e numérica semelhantes. De certa forma, o ângulo de travamento é uma variável de grande importância, pois ela indica o início do travamento dos elos, gerando a flexão fora do plano, contribuindo para a falha prematura. A consideração do ângulo de travamento igual o ângulo de operação, as tensões encontradas na Tab. 2, tem apenas contribuição do carregamento axial. Já considerando o ângulo de travamento igual a zero, é notório que a contribuição de tensão, devido o carregamento transversal aumenta consideravelmente, concluindo assim que, quanto menor o ângulo de travamento, maior as tensões fora do plano. As distribuições de tensões não uniformes das Fig.3 a Fig. 6, reforça a atuação do momento fora do plano, caso estivessem presentes apenas tensões axiais, as distribuições seriam uniformes.

Nas Tabela 3 e Tabela 4 temos as vidas das amarras submetidas a um carregamento severo, onde a carga mínima é de 200 ton e máxima de 400 ton. Com os valores encontrados é possível concluir, que caso as amarras sejam submetidas a um carregamento nessas magnitudes, a durabilidade não ultrapassaria um ano de operação. Isso para as duas análises, sem e com o efeito OPB. Nas Tabela 5 e Tabela 6 temos as vidas das amarras submetidas a um carregamento mais suave. Levando em consideração apenas o carregamento axial, as amarras teriam uma vida de cerca de 17 anos de operação. Já considerando o efeito OPB, a durabilidade das correntes não ultrapassa um ano de operação. Isso nos mostra, que mesmo com um carregamento mais suave, o efeito OPB reduz bastante a vida das correntes.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Canut, F. A., Simões, A. M. P., Reis, L., Freitas, M., Bastos, I. N., Castro, F. C., & Mamiya, E. N. 2019. Monitoring of corrosion-fatigue degradation of grade R4 steel using an electrochemical-mechanical combined approach. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 42(11), 2509–2519. <https://doi.org/10.1111/ffe.13079>
- Hansen, F. A. 2021. *Estudo numérico da integridade de sistemas de amarração de navios-plataforma FPSO* [Projeto de Graduação]. Universidade de Brasília.
- Kim, Y., Kim, M. S., & Park, M. J. 2019. Fatigue analysis on the mooring chain of a spread moored FPSO considering the OPB and IPB. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 178–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.03.004>
- Liu, H., Huang, W., Lian, Y., & Li, L., 2014. An experimental investigation on nonlinear behaviors of synthetic fiber ropes for deepwater moorings under cyclic loading. *Applied Ocean Research*, 45, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.12.003>
- Mamiya, E. N., Castro, F. C. de, Malcher, L., Doca, T. de C. R., Muterlle, P. V., Reis, L. F. G. dos, Freitas, M. J. M. de, Infante, V. I. M. N., & Ribeiro, A. M. R., 2019. *Relatório Técnico FINAL - Durabilidade de componentes de Sistemas de Amarração para uso em águas profundas: experimentação e modelagem DSAm*.
- Melis, C., Jean, P., & Vargas, P., 2005. Out-of-plane bending testing of chain links. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 3, 163–172. <https://doi.org/10.1115/OMAE2005-67353>
- Neves, R. S., 2020. *Uma extensão do modelo de Gurson para análise de fadiga seguindo uma metodologia incremental* Tese de Doutorado. Universidade de Brasília.
- Qiao, D., Li, B., Yan, J., Qin, Y., Liang, H., & Ning, D., 2021. Transient responses evaluation of FPSO with different failure scenarios of mooring lines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 1–34. <https://doi.org/10.3390/jmse9020103>
- Rampi, L., Francois, M., Gerthoffert, A., Bignonnet, A., & Vargas, P., 2016. Chain Out Of Plane Bending (Opb) Fatigue Joint Industry Project (Jip) Fatigue Test Program Results And Methodology. *ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. <https://doi.org/10.1115/OMAE2016-54199>
- Silva, M. Z. e., 2016. *Estudo da influência do desgaste na falha prematura de componentes de linhas de ancoragem* Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.
- Vargas, P., & Jean, P., 2005. FEA of out-of-plane fatigue mechanism of chain links. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 3, 173–182. <https://doi.org/10.1115/OMAE2005-67354>

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

DETERMINATION OF FATIGUE LIFE OF OFFSHORE CHAINS UNDER CONSTANT AMPLITUDE LOADING

Lucas de Oliveira Barros¹

Lucival Malcher²

^{1,2}University of Brasília, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF

¹lucasbarros1211@gmail.com, ²malcher@unb.br

Abstract. *This study approaches the application of the finite element method, through the commercial software ABAQUS, for the study and analysis of chain links, such links belong to the FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading) ship mooring system, and the realization of numerical analysis of the tensions in the hotspots to obtain equations that describe the behavior of the moorings. In this way, the cyclic bending that occurs outside the main plane of the links, called OPB (Out of plane bending) was taken into account. According to the API (American Petroleum Institute), the design of the links that make up the anchoring systems only consider normal loads, not taking into account the out-of-plane bending. Due to the large loads present in the anchoring systems, we have an increase in the friction force resulting from the contact between the links, causing the links to have a crimping behavior. The crimping behavior between the links generates transverse forces that contribute to out-of-plane bending. The high loads are due to the operating conditions that take place inside the FPSO platform, such as the handling, transport and storage of oil and natural phenomena such as sea currents and winds, these conditions contribute to the requests on the moorings. These anchor systems were sized to last for over twenty years, but premature failures were identified in less than two years of operation. For the modeling of the entire set of moorings in ABAQUS, offshore steel belonging to the R4 grade was considered as the material for the currents, as this material has the ability to withstand high loads. The set to be simulated in ABAQUS has five links, two semi-links and a fairlead crown, which is responsible for guiding the links, this set is called a mooring fairlead. The modeling went through simulations considering the winding angle of 17° , applying loads oscillating between 200 and 400 ton. With the simulations it is possible to validate the hotspots in the links of interest and identify the influence of the winding angle of the moorings. After validation, it is possible to obtain equations in an analytical form, which describes the behavior of requests across the mooring-fairlead set. Thus, equations were developed for the contributions of axial load and bending moment. Finally, the fatigue life of the links was calculated, using the SWT fatigue criterion and considering a load with constant amplitude.*

Keywords: *Mooring-fairlead; hotspots; steel grade R4; mooring chains; SWT*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.