

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 pertencem ao sistema de ancoragem de plataformas flutuantes. Essas plataformas são responsáveis pela exploração e extração de petróleo. Para tal, será realizada uma análise numérica das tensões nos hotspots dos elos 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 flexão fora do plano. De acordo com a 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 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 se dão devido as condições de operações que acontecem dentro da plataforma, 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 utilizado no cenário petrolífero. 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° e 60°, aplicando cargas oscilando entre 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 Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga (FPSO). Os navios FPSO utilizam amarras de três quilômetros de comprimento, onde são responsáveis pela a fixação e estabilização das plataformas, pois as mesmas estão a sujeitas a fenômenos naturais impostos pelo oceano (Liu et al., 2014).

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 metros 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 profundidade superior a 2000 metros, assim essa combinação tem como intuito de diminuir o peso de todo o sistema (Liu et al., 2014). Com a combinação desses materiais as amarras ficam com mais de três quilômetros de extensão e são constituídas por materiais de alta resistência mecânica.

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 mecânica, essas correntes estão sujeitas a uma exigência operacional bem alta, devido as condições dinâmicas, como cargas ambientais (vento, maré e ondas) e operacionais (translado e elevação do petróleo). 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, 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 à 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, por motivo das condições dinâmicas e operacionais, 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) ou dentro do plano principal (IPB). 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 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 responsáveis por propagar trincas no elo, com isso a vida útil do elo é reduzida drasticamente. Segundo Kim et al. (2019) e Qiao et al. (2021), as correntes foram fabricadas para ter uma vida operacional de mais de vinte anos, mas há registros de falhas prematuras nas amarras.

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 mecânica. 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 Tabela 1. Devido as explorações acontecerem em áreas remotas, esse material atende as demandas operacionais que as amarras estão sujeitas (Neves, 2020). O aço *offshore* grau R4, deve cumprir as exigências mecânicas definidas pela norma IACS W22, 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

2.1. Propriedades monotônicas

As características monotônicas do aço de grau R4 é obtida através de um ensaio de tração até a ruptura do corpo de prova. O ensaio é realizado em uma máquina servo-hidráulica MTS 810 com capacidades de carga ± 100 kN. O corpo de prova é fabricado com as propriedades do Aço Grau R4, propriedades definidas na Tabela 1. Após o ensaio de tração, as propriedades monotônicas do aço *offshore* Grau R4 se encontra na Tabela 2. Toda a calibração e caracterização do material foi realizada por Neves (Neves, 2020).

Tabela 2: Propriedades monotônicas aço *offshore* grau R4 (Neves, 2020).

Propriedades monotônicas	Valores
Módulo de Elasticidade E	207,4 GPa
Coefficiente de Poisson ν	0,3
Tensão de escoamento inicial σ_y	836,6 MPa
Tensão última de engenharia σ_u	888,7 MPa
Tensão de ruptura de engenharia σ_r	475 MPa
Alongamento percentual AL	24,2 %
Redução de área RA	0,693

2.2. Propriedades cíclicas

Para caracterização das propriedades cíclicas foi utilizada uma formulação que compõem uma relação de Ramberg-Osgood (1943). As propriedades monotônicas definidas anteriormente é o ponto de partida para a definição das características cíclicas, devido a formulação utilizar parâmetros monotônicos do aço. A curva de endurecimento cinemático do aço foi definida através da lei de Armstrong-Frederick (1966) juntamente com a formulação de Ramberg-Osgood (1943). Todos os parâmetros encontrados depois das formulações se encontram na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades cíclicas aço *offshore* grau R4 (Neves, 2020).

Propriedades cíclicas	Valores
Coefficiente de resistência cíclica K'	1730,2 MPa
Expoente de encruamento cíclico n'	0,1185
Módulo de endurecimento cinemático H^K	52151,5 MPa
Coefficiente de endurecimento cinemático b	181,3
Tensão de escoamento cíclico de engenharia σ_y	720,3 MPa

2.3. Análises analítica e numérica

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 (Carga mínima de ruptura). 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, caso não haja ruptura de nenhum dos elos, 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. Na Figura 1 a) demonstra o conjunto amarra-*fairlead* quando submetido ao carregamento mínimo, assim, a influência dos ângulos para o cálculo das tensões será do ângulo de operação (θ) e travamento (θ'). Com a transição para o carregamento máximo (Figura 1 b)), tem-se a influência do ângulo de rotação do *fairlead* (α), tal ângulo aparece com a transição do carregamento mínimo para o máximo.

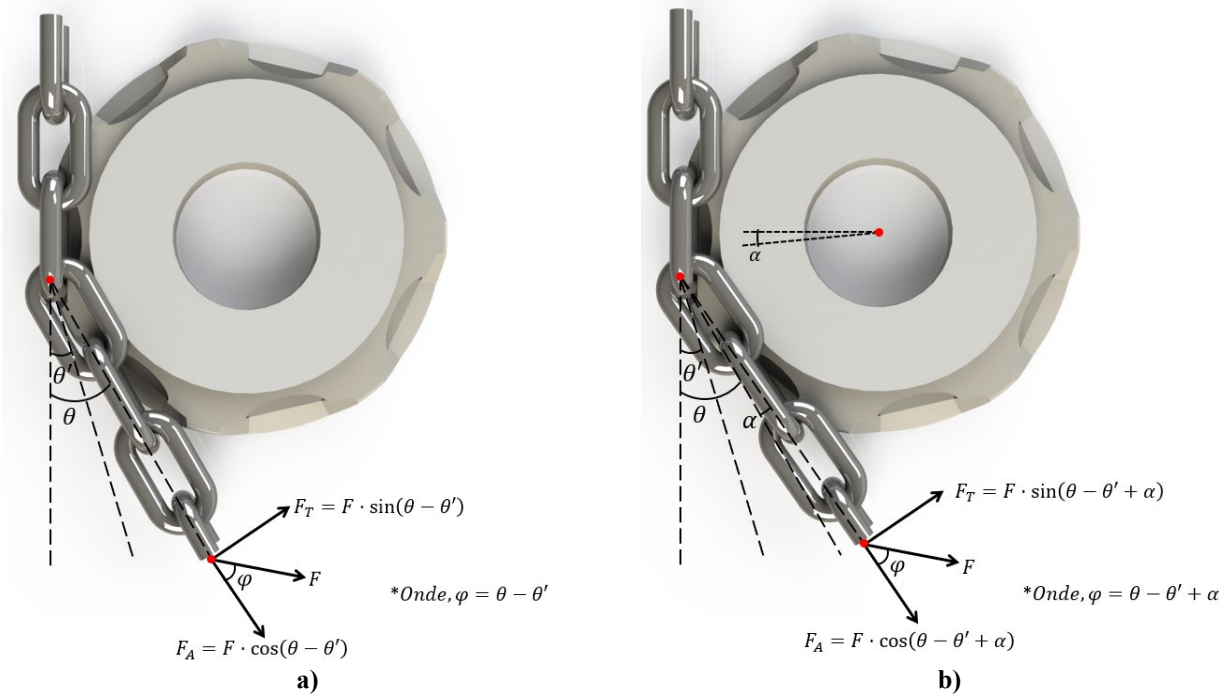


Figura 1. Diagrama de esforços livres no conjunto amarra-fairlead. a) Aplicação da carga mínima ($\theta - \theta'$). b) Aplicação da carga máxima ($\theta - \theta' + \alpha$).

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. 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 de interesse, são os elos suscetíveis a flexão fora do plano, pois possuem maior probabilidade de falha prematura. Na Figura 2 a), destacados de vermelho, temos a representação dos mesmos, onde são intitulados como elos "C" e "E". A parte interna dos elos é definida como a parte que está em contato 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 a) temos o conjunto amarra-fairlead montado, com os respectivos componentes.

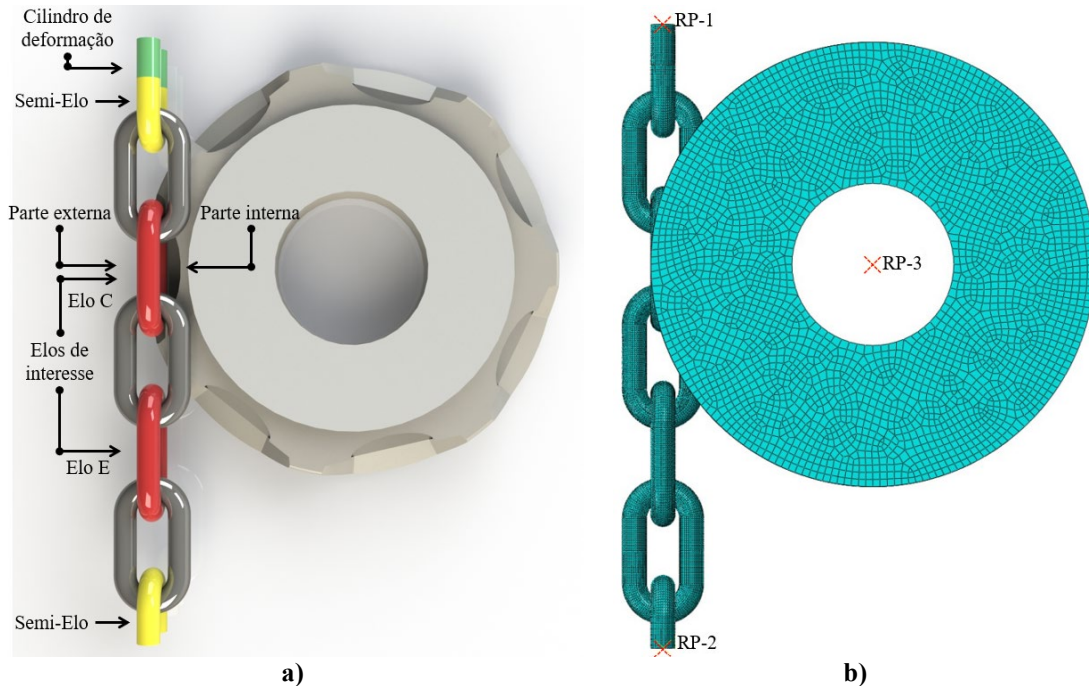


Figura 2. a) Conjunto amarra-fairlead b) Discretização conjunto amarra-fairlead.

Os *Steps* são intervalos de tempo onde é adicionado, carregamentos e as condições de contorno, entre outros. A princípio foram definidos oito *Steps* para a simulação. Sendo que dois são definidos como uma análise estática e o restante como análise dinâmica implícita.

Os *Steps* são definidos como CP, S-CP, CT1-1-1, CT2-1, CT1-2, C2-2, CT1-3 e CT2-3. O CP e S-CP são os *Steps* estáticos, onde no primeiro é aplicado a carga de prova e no segundo é retirada. A carga de prova equivale a 75% da MBL, ou seja, corresponde o valor de 900 ton. Os *Steps* de CT1-1-1 até o CT2-3 são definidos como dinâmicos, onde temos a variação de carga. Como definido anteriormente o carregamento mínimo e máximo corresponde 1/6 e 1/3 da MBL, ou seja, o carregamento varia entre 200 e 400 ton.

Para a aplicação do carregamento e das condições de contorno foram utilizados três “*references points*” (RP-1, RP-2 e RP-3), como demonstrado na Figura 2 b). As condições contorno são restrições impostas na modelagem de forma que define o comportamento que os componentes estão submetidos.

Para este estudo foram utilizadas seis condições de contorno. Essas configurações são aplicadas ao longo dos *Steps* e são definidas como BC-1, BC-2, BC-3, BC-4, BC-5 e BC-6. As condições são definidas a seguir.

- BC-1 – Condição do tipo *Displacement/Rotation*, aplicadas nas faces do cilindro de deformação. Restrição dos deslocamentos e rotações nas direções X, Y e Z. Condição de contorno aplicadas nos *Steps* CP e S-CP.
- BC-2 – Condição do tipo *Displacement/Rotation* aplicadas no “RP-2”, deslocamento apenas na direção “Y”, deslocamentos na direção X e Z e rotações nas direções X, Y e Z restringidas. Condição de contorno aplicadas nos *Steps* CP e S-CP.
- BC-3 – Condição do tipo *Displacement/Rotation*, aplicadas no “RP-3”. Para os *Steps* estáticos, restrição dos deslocamentos e rotações nas direções X, Y e Z. Para os *Steps* dinâmicos restrição dos deslocamentos direções X, Y e Z e das rotações nas direções X e Y.
- BC-4 – Condição do tipo *Displacement/Rotation* aplicadas no “RP-1”. Restrição dos deslocamentos e rotações nas direções X, Y e Z. Condição de contorno aplicadas nos *Steps* dinâmicos.
- BC-5 – Condição do tipo *Displacement/Rotation*, aplicadas nas faces do cilindro de deformação. Restrição dos deslocamentos nas direções X e Z e rotações nas direções X, Y e Z. Condição de contorno aplicadas nos *Steps* dinâmicos.
- BC-6 – Condição do tipo *Symmetry/Antisymmetry/Encastre* aplicadas no “RP-2”, restrição de deslocamento na direção Z e rotações nas direções X e Y. Condição de contorno aplicadas nos *Steps* dinâmicos.

Para cada componente do conjunto, a malha de elementos finitos foi modelada de uma forma. O *fairlead* está discretizado com elementos finitos quadrilaterais e triangulares, ambos elementos lineares e com integração reduzida. O cilindro de deformação, sólidos independentes, semi-elos e elos estão discretizados com elementos finitos hexaédricos lineares com integração reduzida. Na Figura 2 b), é demonstrado a discretização de todo o conjunto. Quantidade total de nós é de 209739 e de elementos é 178617.

Com os componentes modelados e com a montagem feita, foi aplicado condições de contato entre as peças. O tipo de contato aplicado foi superfície-a-superfície e a formulação de deslizamento considerada, foi do tipo grandes deslocamentos e o método de discretização é do tipo superfície-a-superfície. As propriedades de contato considerada foi do tipo normal e tangencial. Para o contato normal, foi empregado “*Hard*” - *Contact* para a pressão de ativação e para o método de imposição de contato, foi considerado como “*Default*” (Formulação Lagrangeana). Já para o contato tangencial, a formulação de atrito foi do tipo “*Penalty*” e o coeficiente de atrito adotado foi de 0,7 (Mamiya et al., 2019). Para toda a análise numérica foi utilizado o *software* ABAQUS® versão 2017.

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 4 temos os valores calculado de forma analítica. Os valores exibidos são referentes as tensões dos elos de interesse, elos “C” e “E”. Para essa análise 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 4: 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

Da Figura 3 até a Figura 6 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 Figura 3 b) a distribuição de tensão na parte externa e na Figura 3 c) os valores das tensões numéricas, encontradas após a simulação.

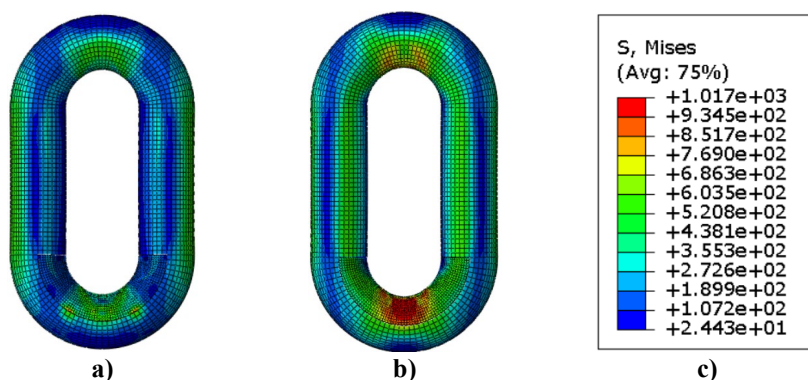


Figura 3. Tensões no elo “C” com a aplicação da carga mínima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista interna. b) Vista externa. c) Tensões na carga mínima.

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 Figura 4 b) na parte externa do elo e na Figura 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.

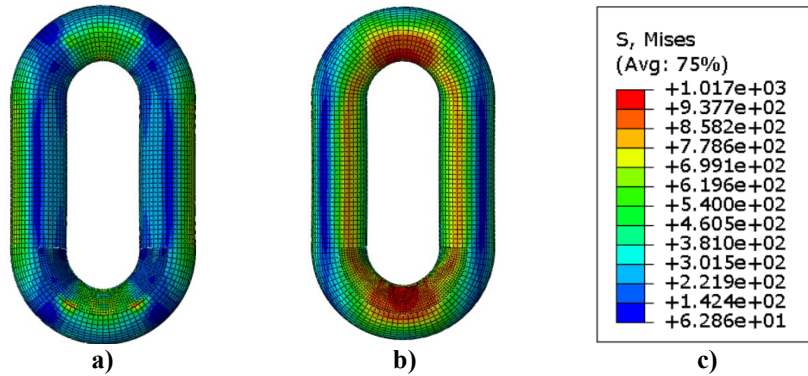


Figura 4. Tensões no elo “C” com a aplicação da carga máxima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista interna. b) Vista externa. c) Tensões na carga máxima.

Na Figura 5 e Figura 6 são exibidos os resultados após a simulação do elo “E”. A Figura 5 e Figura 6, 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.

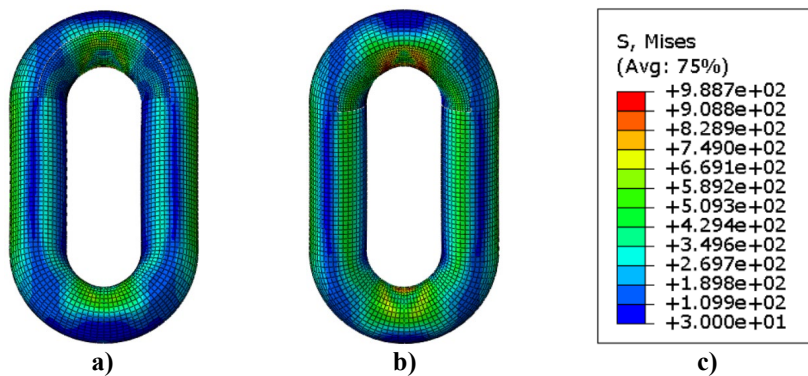


Figura 5. Tensões no elo “E” com a aplicação da carga mínima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista interna. b) Vista externa. c) Tensões na carga mínima.

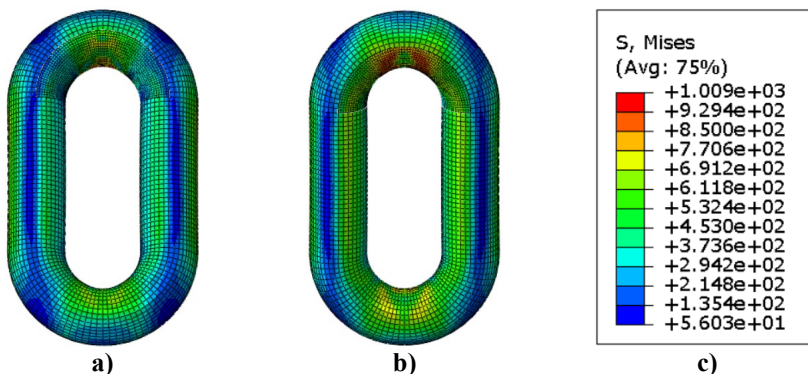


Figura 6. Tensões no elo “E” com a aplicação da carga máxima, ($\theta = 17^\circ$). a) Vista interna. b) Vista externa. c) Tensões na carga máxima.

De acordo com Tabela 4 e com os resultados obtidos através das simulações, Figura 3 a Figura 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 Tabela 4, 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 Tabela 4, 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 Figura 3 a Figura 6, reforça a atuação do momento fora do plano, caso estivessem presentes apenas tensões axiais, as distribuições seriam uniformes.

3.2. Vida à 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 dois ângulos de operação, sendo de 17° e 60°. Para ambos os ângulos, foi considerado, a diferença entre o ângulo de operação e travamento de 3°. O ângulo de rotação do *fairlead* é igual a 1,8343° para o ângulo de operação de 17° e de 1,9386° para o ângulo de operação de 60°, ambos valores obtidos através da simulação numérica.

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, tais coeficientes obtidos através de ensaios laboratoriais (Neves, 2020). 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 figuras a seguir exibe os valores das vidas para os elos de interesse (Figura 7 a) e Figura 7 b)), considerando dois casos de carregamento. Na Figura 7 a) demonstra os resultados das vidas para os elos de interesse, considerando o carregamento mínimo de 200 ton e máximo de 400 ton. Já Figura 7 b) demonstra os resultados das vidas para os elos de interesse, considerando o carregamento mínimo de 200 ton e máximo de 250 ton.

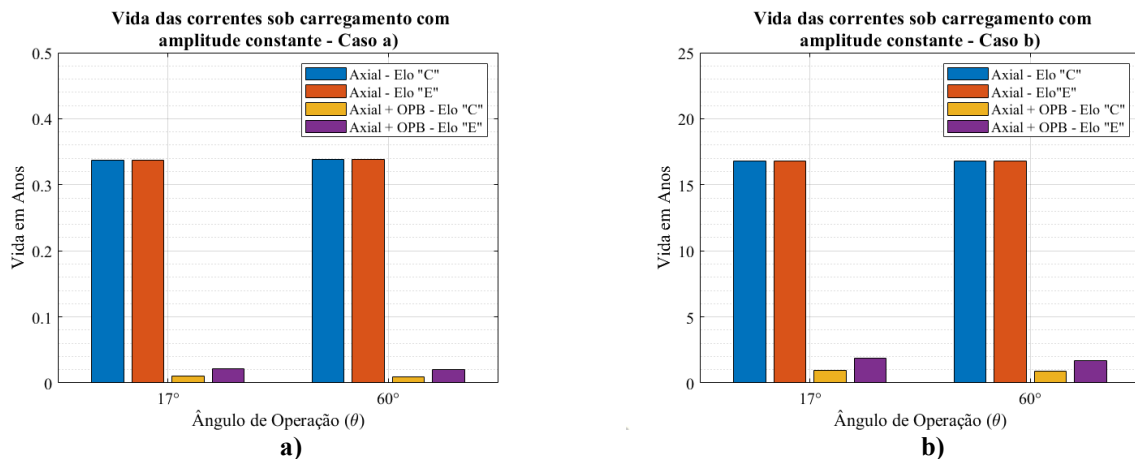


Figura 7. Vida em anos das amarras para carregamento com amplitude constante.

Para o primeiro caso, temos o carregamento mais severo, dentre os dois que foram propostos para a análise. Com os resultados da Figura 7 a) é possível observar que, considerando um carregamento uma amplitude constante de 200 ton, as amarras apresentam falhas em menos de um ano de operação. Apesar de ter falhas em menos de um ano de operação, tanto para sem e com o efeito OPB, é notório que o efeito OPB reduz a vida da amarra. E a variação dos ângulos de operação para esse carregamento não teve grande influência nos resultados das vidas, pois os resultados são semelhantes apesar da variação dos ângulos.

Para o segundo caso, temos o carregamento com amplitude constante de 50 ton. Com os resultados da Figura 7 b) é possível observar que, quando as amarras são submetidas apenas ao carregamento sem o efeito OPB, possuem vidas próximas a 17 anos de operação, isso para ambos os elos de interesse e ângulos de operação analisados. Levando em conta o efeito OPB, temos reduções das vidas, comprovando assim, como o efeito de OPB influencia em falhas prematuras. Outro ponto observado, é que o elo "C", sob carregamento considerando o efeito de OPB, possuem uma vida ligeiramente menor, quando comparado com o elo "E". Assim, como na análise anterior a variação dos ângulos de operação não teve grande influência nos resultados das vidas, pois os resultados são semelhantes.

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.

A análise de vida foi com carregamento sob amplitude constante. Assim, foram propostos dois casos de carregamentos para amplitude constante. Conforme expectável, à medida que a amplitude de carregamento aumentava, a vida diminuía. Outro fator que contribuem para uma vida menor, é o efeito OPB, efeito desconsiderado pela norma API.

Os resultados observados para o carregamento com amplitude constante, demonstra que o efeito OPB reduz a vida dos elos, isso para os dois casos de carregamentos analisados. Quando submetido ao carregamento mais severo dos dois casos (200 a 400 ton), a previsão de vida à fadiga é de menos de um ano de operação, com e sem o efeito OPB. Os resultados também mostraram, que o elo “C” sofre mais com o efeito OPB, quando comparado com o elo “E”.

Os resultados das vidas obtidos com os ângulos de operação analisados são bem próximos. Assim, como sugestão para trabalhos futuros, orienta definir o momento de travamento do elo (θ'), assim é possível refinar a análise da flexão fora do plano e consequente a análise das vidas.

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>
- Frederick, C. O., & Armstrong, P. J. (1966). A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. *Materials at High Temperatures*, 24(1), 1–26.
- 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>
- Ramberg, W., & Osgood, W. R. (1943). Description of stress-strain curves by three parameters. *Technical Report N° 092 - National Advisory Committee for Aeronautics*.
- Rampi, L., Francois, M., Gerthoffert, A., Bignonnet, A., & Vargas, P. (2016, June). 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

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

Abstract. *This study approaches the application of the finite element method, through commercial software ABAQUS, for the study and analysis of chain links, such belong to the anchoring system of floating platforms. These platforms are responsible for oil exploration and extraction. To this end, a numerical analysis of the stresses in the link hotspots will be performed to obtain equations that describe the behavior of the moorings. Thus, the cyclic flexion that occurs outside the main plane of the links, called flexion outside the plane, was taken into account. According to the American Petroleum Institute, the sizing of the links that make up the anchoring systems, consider only normal loads, not taking into account the bending out of the plane. Due to the loads present in the anchoring systems, we have the elevation of the resulting friction force in the contact between the links, making it the links have a choking behavior. The crimping behavior between the links, generate transverse forces that contribute to the bending outside the plane. The loadings are due to the conditions of operations that take place within the 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 in the moorings. These anchoring systems were sized to have a durability of more than 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, the offshore steel belonging to grade R4, such material used in the oil scenario, was considered as the material of the chains. The set to be simulated in ABAQUS has five links, two semi-links and fairlead crown, which is responsible for guiding the links, such a set is termed as tie-fairlead. The modeling went through simulations considering the winding angle of 17° and 60°, 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 analytically, which describes the behavior of requests throughout the tie-fairlead set. Thus, equations were developed for the contributions of axial load and fletor moment. Finally, the fatigue 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.