

JÚLIA MELNIC CORRÊA

ANÁLISE DE FADIGA NA CABEÇA DO POÇO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do diploma de Engenharia de Petróleo.

SANTOS

2022

JÚLIA MELNIC CORRÊA

ANÁLISE DE FADIGA NA CABEÇA DO POÇO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do diploma de Engenharia de Petróleo.

Área de concentração: Engenharia
de Petróleo

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo
Carrion

SANTOS

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Corrêa, Júlia

Análise de fadiga na cabeça do poço / J. Corrêa -- São Paulo, 2022.
38 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Rainflow Counting 2.Fadiga 3.Cabeça de poço 4.Palmgren-Miner
5.Revestimento I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me sustentar em todo esse tempo com esperança.

Agradeço aos meus pais pelo apoio, pelo suporte em todo tempo e pela educação, permitindo que eu pudesse ter condições de cursar essa graduação. Agradeço ainda ao meu pai por ser um grande exemplo para mim de crescimento na vida, garra e resiliência.

Agradeço ao meu marido por ser o meu maior incentivador e parceiro desde o início da graduação.

Agradeço a todos os professores que tive ao longo da vida que contribuíram de diferentes formas para o conhecimento que tenho hoje. Em especial, agradeço aos que tive ao longo da graduação por tanto aprendizado e por tanta dedicação e flexibilidade para que pudéssemos continuar a distância ao longo da pandemia em 2020 e 2021.

Agradeço em particular ao meu professor orientador por me instruir e me ensinar ao longo deste trabalho e pela disposição.

Além disso, agradeço meus colegas de graduação que tanto me orientaram nos estudos, me ensinaram, compartilharam momentos comigo e aos meus veteranos por terem sido exemplos para mim! E agradeço também aos amigos que oraram por mim e me ajudaram em tantos momentos.

RESUMO

Por meio do algoritmo de Rainflow Counting, da teoria de Palmgren-Miner e da curva de Goodman, este trabalho buscou simular os esforços dos carregamentos aplicados em componentes da cabeça do poço visando prever o comportamento de tais esforços, que são de amplitudes variáveis e não cílicos. Foram levantados os pontos críticos do sistema de cabeça de poço e os fatores que podem intensificar a tendência à fadiga. Além disso, foram simulados dois carregamentos para as mesmas condições e constatou-se que quanto maior a tensão aplicada, maiores as tensões alternadas, maior a quantidade de picos que geram fadiga e menor o tempo de vida até que ocorra a fadiga. Tudo isso ocorre de forma não linear. O estudo partiu de dados reais, mas visa uma simulação.

Palavras-chave: *Rainflow Counting, fadiga, cabeça de poço, Palmgren-Miner, revestimento.*

ABSTRACT

Using the Rainflow Counting algorithm, the Palmgren-Miner theory and the Goodman curve, this work sought to simulate the loads applied to wellhead components in order to predict the behavior of such efforts, which have variable amplitudes and do not cyclical. The critical points of the wellhead system and the factors that can intensify the tendency to fatigue were raised. In addition, two loads were simulated for the same conditions and it was found that the greater the applied stress, the greater the alternating stresses, the greater the number of peaks that generate fatigue and the shorter the lifetime until fatigue occurs. All of this occurs non-linearly. The study started from real data, but aims at a simulation.

Keywords: Rainflow Counting, fatigue, wellhead, Palmgren-Miner, casing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de cabeça de poço submarino	11
Figura 2 – Tensão de fadiga em função do número de ciclos.....	15
Figura 3 – Visão ampliada de uma região entalhada.	17
Figura 4 – Subsidência como reflexo da compactação.....	18
Figura 5 – Fluxograma da transferência de tensões.	22
Figura 6 - Valores de tensão e tempo utilizados.	28
Figura 7 - Ilustração dos ciclos 2 e 3 de acordo com a Tabela 3.	30
Figura 8 - Ilustração dos ciclos 2 e 3 após aplicação do método de <i>Rainflow Counting</i>	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de tempo e tensão utilizados.	27
Tabela 2 – Valores assumidos para algumas constantes.	29
Tabela 3 - Resultado da aplicação do método de <i>Rainflow Counting</i> e da equação do critério de <i>Goodman</i>	29
Tabela 4 – Frações de vida consumidos obtidos por <i>Palmgren-Miner</i> com Sn^*10	31
Tabela 5 - Frações de vida consumidos obtidos por <i>Palmgren-Miner</i> com Sn^*24	32
Tabela 6 – Vida consumida quando Sn^*10	32
Tabela 7 - Vida consumida quando Sn^*24	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO.....	9
2.1	Objetivo geral	9
2.2	Objetivos específicos	9
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1	Estruturas da cabeça de poço	10
3.2	O fenômeno da fadiga.....	14
3.3	Falhas por fadiga.....	16
3.4	Fatores que influenciam as tensões na cabeça de poço.....	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1	Determinação de esforços na cabeça de poço	21
4.2	A regra de <i>Palmgren-Miner</i>	23
4.3	A teoria de <i>Rainflow Counting</i>	24
4.4	O método dos Elementos Finitos	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6	CONCLUSÃO.....	34
6.1	Contribuições do trabalho.....	34
6.2	Trabalhos futuros.....	34
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
	ANEXO A – ARTIGO SÍNTESE.....	40

1 INTRODUÇÃO

Com a tendência de aumento da produção de petróleo, diante da impossibilidade de simular com efetividade as diversas condições particulares de um reservatório e ter um conhecimento amplo e comprovado sobre a formação rochosa que envolve um reservatório de petróleo, tem sido cada vez mais estudado nos últimos anos a fadiga em cabeça de poço.

Recentemente, a indústria de óleo e gás atentou-se aos movimentos dinâmicos que ocorrem nas estruturas da cabeça de poço durante as operações de exploração e produção (E&P). Grande parte desses movimentos é oriundo não apenas das operações da perfuração, mas também da movimentação da plataforma, das correntezas oceânicas e ondas *swell*, que são ondas grandes e periódicas, formadas a partir de tempestades em alto mar, e até pelas diferenças de pressão e temperatura.

Em julho de 2020 a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) publicou um alerta de segurança com relação a um incidente em exploração e produção de óleo e gás. Um poço do pré-sal da Bacia de Santos teve sua fundação danificada com potencial de falhas de integridade e impossibilidade de instalação do *blowout preventer* (BOP) para abandono. Entre as causas desse caso foram citadas a movimentação vertical da fundação da cabeça de poço, a falha de conexão entre os alojadores de alta e de baixa pressão e o ciclo de fadiga na fundação do poço (ANP, 2020).

Alguns estudos, como o de Aronsen et al. (2018), sugerem que um ponto crítico para a ocorrência de fadiga em cabeça de poço é nos alojadores, e de acordo com Wang et al. (2022) um local a ser estudado se encontra na solda feita entre o alojador de alta pressão e o revestimento.

Embora a análise de fadiga seja vital, métodos tradicionais podem não ser precisos o suficiente e nesse local pode haver risco de falha operacional, havendo a possibilidade de acidentes. Vale ressaltar que a indústria de equipamentos de óleo e gás trabalha com alta tecnologia e já realiza uma série de inspeções e testes ao longo de cada uma das etapas da produção desses equipamentos para evitar que essas falhas ocorram.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Na indústria de óleo e gás *offshore*, o movimento da plataforma, ondas e correnteza, por mais atenuados que sejam, transmitem esforços até a cabeça do poço. Além disso, há potenciais intensificadores desses esforços como a diferença de pressão e temperatura, as propriedades do solo e a forma como foi feita e cimentação do poço.

Neste trabalho, a partir das teorias clássicas do estudo de fadiga, pretende-se simular os esforços e prever a vida dos componentes da cabeça do poço.

2.2 Objetivos específicos

Na análise de fadiga em cabeça de poço, como os carregamentos aplicados são de amplitudes variáveis e não cíclicos, são necessárias técnicas que possam ser aplicadas na teoria corrente sobre fadiga. Neste trabalho, são utilizadas as seguintes técnicas:

- Algoritmo de *Rainflow Counting* de contagem de ciclos parciais;
- O critério de *Goodman* modificado, como equação para a componente alternada de tensão;
- Teoria de *Palmgren-Miner* para fadiga que trata do dano acumulado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

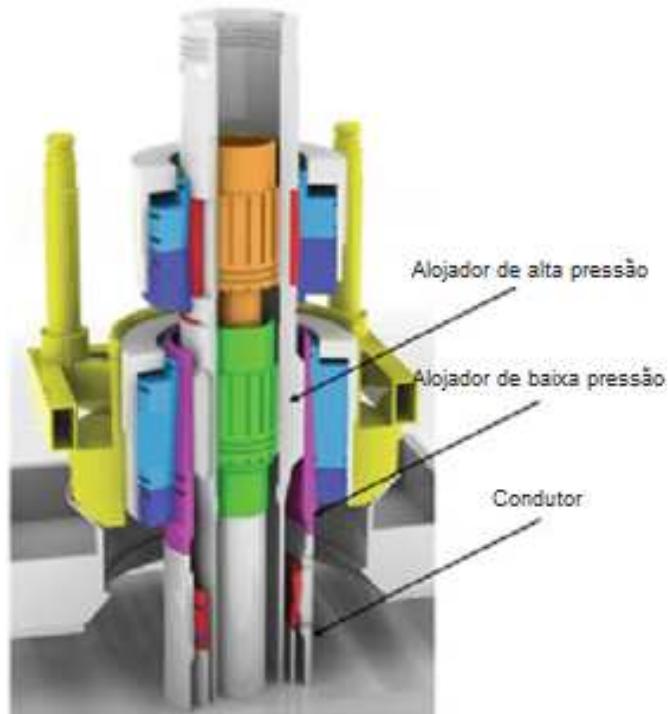
3.1 Estruturas da cabeça de poço

O sistema de cabeça de poço submarino deve fornecer: orientação para a conexão do BOP e da árvore de natal; suporte e conexão para a árvore de natal e para o BOP; capacidade de carga de todos os sistemas acoplados; alinhamento e verticalidade de todo o sistema; e ter a menor sensibilidade possível às condições em que será instalado, segundo o trabalho de DASH et al. (2017) que estuda um método de dinâmica dos solos.

A cabeça de poço submarina é formada por equipamentos que são inseridos em sequência, do de maior diâmetro para o de menor diâmetro. Cada vez que ocorre a instalação de um equipamento no poço, uma broca de menor calibre desce para perfurá-lo, e assim aumenta sua profundidade para que seja instalado o próximo equipamento.

A Figura 1 ilustra um sistema de cabeça de poço, com destaque para os alojadores de baixa e alta pressão e o revestimento condutor, que é assentado até uma determinada profundidade dentro do poço.

Figura 1 – Sistema de cabeça de poço submarino



Fonte: Adaptado de Khalifeh e Saasen (2020).

Sobre a estrutura da cabeça do poço pode-se considerar, em geral, que a perfuração se inicia com o assentamento do revestimento condutor seguido da conexão do alojador de baixa pressão. Em seguida, perfura-se novamente, assenta-se o revestimento de superfície e coloca-se o alojador de alta pressão. Na sequência, desce-se o suspensor de revestimento (*casing hanger*) de primeira posição e, então, o de segunda posição. Por fim, perfuram-se as fases intermediárias e de produção.

Esta última pode ter um diâmetro mais de sete vezes menor do que o revestimento condutor, assentado no início da perfuração (ROCHA; AZEVEDO, 2019). O alojador de alta pressão é o mais externo e recebe o *blowout preventer* (BOP) na etapa de perfuração e, depois, para a etapa de completação recebe a árvore de natal. Os alojadores e suspensores são descidos até a cabeça do poço com o auxílio de uma coluna de trabalho constituída de tubos de perfuração e outras ferramentas específicas.

Essa grande diferença de tamanho entre o primeiro e o último revestimento se deve às elevadas pressões radiais na formação rochosa que é perfurada. Para dar

sustentação ao poço durante a produção, mesmo com tamanha pressão, é feita a cimentação entre cada revestimento descido e a formação correspondente à fase do poço.

No alojador de baixa pressão se apoia o revestimento de superfície e ele não sofre tanta pressão do fluido interno ao poço quanto o alojador de alta pressão – seu objetivo é dar sustentação ao poço, isolando-o da formação rochosa mais superficial, ou seja, de formações com pressões menores – por isso a nomeação ‘baixa’. Já o alojador de alta pressão tem um comprimento maior, mas um diâmetro menor. Por dentro do alojador de alta pressão, é colocado o *casing hanger* de primeira posição, ou suspensor de coluna de produção, a depender do projeto do poço. Então, o *casing hanger* de segunda posição é colocado.

Para se ter uma ideia das dimensões, um exemplo possível seria um alojador de alta e de baixa pressão com as respectivas medidas, de 18 e 36 polegadas. Nesses esses parâmetros, uma combinação possível de *casing hanger* seria de 13 e 9 polegadas, considerando o *casing hanger* de primeira e de segunda posição, respectivamente (BOURGOYNE et al., 1991).

No *casing hanger* é inserido um anel de carga, que tem por objetivo dar sustentação ao poço. Além disso, o anel de travamento é encaixado entre o alojador de alta e o alojador de baixa pressão. Um outro componente importante é a bucha de desgaste, que é utilizada para garantir a vedação do alojador, protegendo-o do atrito com a broca (BOURGOYNE et al., 1991).

É interessante ressaltar que, dependendo da formação rochosa do solo marinho, é utilizado o alojador de alta com o *crossover*, podendo haver uma redução, por exemplo, da dimensão do equipamento de 18 para 13 polegadas. Com isso, a quantidade de componentes que constitui a cabeça de poço submarina é reduzida, economizando assim o tempo para descer e instalar os equipamentos, além do alto custo de aluguel da sonda e da própria economia com uma menor quantidade de equipamentos utilizados (BOURGOYNE et al., 1991).

Logo acima da cabeça de poço é colocado o *blowout preventer* (BOP), o qual previne que pressões elevadas gerem vazamento ou explosão, e é mantido ao longo da fase de perfuração. Ao final dessa etapa, retira-se o BOP e coloca-se o tampão suíço que faz a vedação da cabeça do poço até que seja perfurado para que tenha início a de produção.

Algumas partes da estrutura da cabeça de poço e revestimento possuem maior concentração de tensão e por isso necessitam de atenção especial:

- locais de mudança de espessura;
- soldas nos alojadores, de alta e de baixa pressão;
- soldas no revestimento condutor e na superfície do revestimento;
- encaixe entre os alojadores de baixa e alta pressão;
- conexões mecânicas, e soldas associadas, ao longo das colunas de revestimento;
- alterações geométricas por dentro dos alojadores da cabeça de poço ou colunas de revestimento, como ranhuras de perfil para acoplamento ao conector da cabeça de poço ou ferramentas de passagem, roscas, entre outros;
- revestimento e soldagens perto do topo da cimentação.

Como a solda do *crossover* no alojador de alta pressão é um dos pontos críticos com relação aos esforços geradores de fadiga é relevante mencionar algumas inspeções feitas ao longo do processo de fabricação para garantir que as etapas sejam bem feitas:

- a inspeção por partículas magnéticas - é feita em materiais ferromagnéticos para detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais, e em alguns casos pode ser feito, imediatamente, um lixamento nos pontos de necessidade identificados (ANDREUCCI, 2014a);
- a inspeção por ultrassom - a qual detecta, localiza e dimensiona descontinuidades internas ou superficiais, utilizam-se cabeçotes com diferentes ângulos visando reduzir o grau de incerteza na utilização dos equipamentos (ANDREUCCI, 2014b);
- alívio de tensões por tratamento térmico - que busca reduzir as tensões residuais da peça por meio do recozimento subcrítico após processo de soldagem ou usinagem e tem como um dos objetivos aumentar a resistência à fadiga (MAXITRATE, 2022);
- inspeção visual - que fornece dados quantitativos e qualitativos, utilizando instrumentos simples e técnicas fundamentadas em ótica geométrica e propriedades ondulatórias da luz (ROQUE, 2020);

- inspeção por líquido penetrante - a qual permite assegurar a confiabilidade do produto que é suscetível a ação da capilaridade, que depende da propriedade da tensão superficial do fluido, e revelará ou não uma descontinuidade na superfície (ROQUE, 2020).

3.2 O fenômeno da fadiga

De acordo com Da Rosa (2002, p.223)

A fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenhamos deformações plásticas também variáveis com o tempo.

Com relação as falhas em componentes de máquinas, Norton (2013) afirma que estas ocorrem a partir de cargas que variam no tempo e em níveis de tensão inferiores a tensão de escoamento - observação feita por volta do ano 1800 e cada vez mais estudada desde então.

O mecanismo de falha por fadiga se inicia com uma trinca de pequeno tamanho que gera deformações cíclicas em torno das regiões de maior concentração de tensão. O local de início dessa trinca ocorre no entalhe, onde a geometria da peça colabora para haver um aumento na tensão local. Por isso, a importância de haver a menor concentração de tensões possível em peças dinamicamente carregadas, isto é, peças nas quais magnitude, posição e direção do carregamento podem variar ao longo do tempo e a estrutura responde com variação de deslocamento, aceleração e velocidade.

Vale fazer algumas observações sobre as etapas da falha por fadiga já que as trincas podem progredir lentamente ou falhar repentinamente:

1. é iniciado com a nucleação da trinca, a partir de um escoamento de tensão localizada;
2. ocorre propagação da trinca, com a tensão de tração e carregamento cíclico;

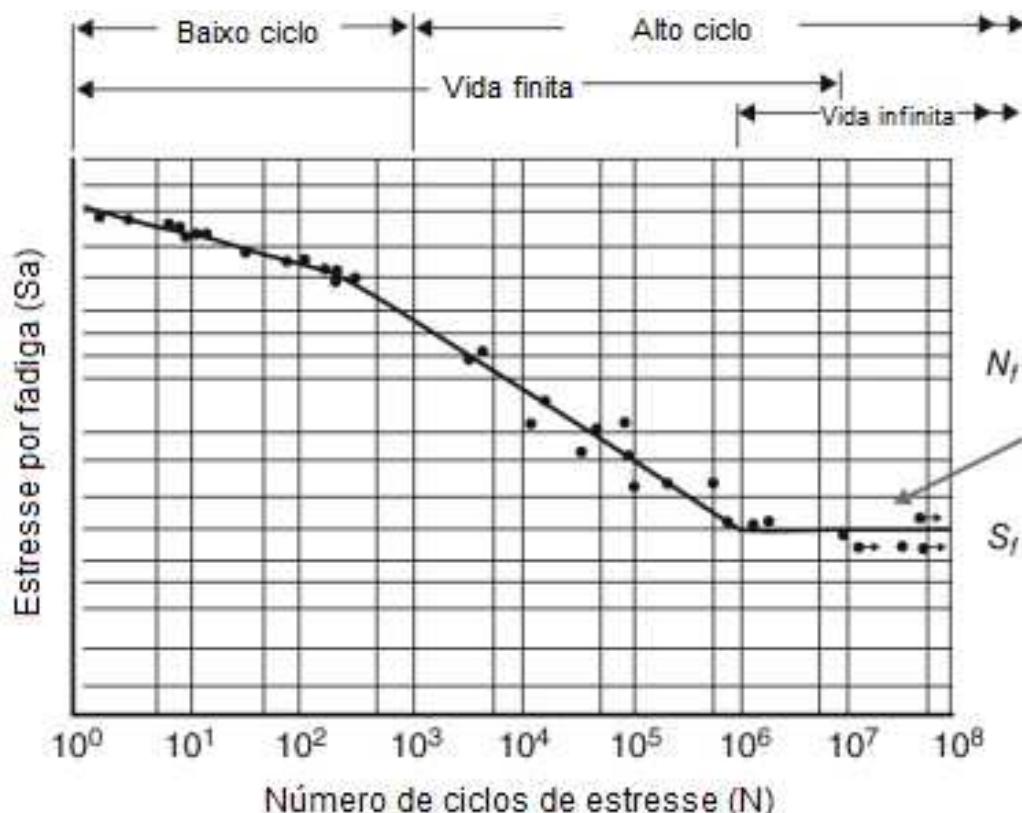
3. por fim, ocorre a fratura, com o fator de intensidade de tensão aumentando de acordo com o aumento da trinca (NORTON, 2013).

Serão mencionados a seguir três modelos de falha por fadiga e algumas particularidades de cada um deles.

O modelo tensão-número de ciclos, *stress-number of cycles (S-N)*, em inglês, é o modelo mais utilizado para análise de fadiga em cabeça de poço, baseado em ciclos de tensão de amplitude constante, fadiga de alto ciclo e a hipótese de acúmulo de dano linear.

O modelo foi desenvolvido por Wöhler, em 1850, e é um método clássico para análise de fadiga em metais. Esse modelo considera fadiga de alto ciclo (FAC) e vida infinita. Esse método é baseado na curva S-N, ou curva de Wöhler, e expressa a relação entre o nível de tensão e o número de ciclos, N, que deve ser atingido para que haja falha, que pode ser uma fissura ou algum tipo de dano a estrutura. A curva S-N é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Tensão de fadiga em função do número de ciclos.



Fonte: Adaptado de Militky e Ibrahim (2009).

O eixo horizontal do gráfico corresponde ao número de ciclos até que ocorra a fadiga em determinada tensão. Já o eixo vertical logarítmico indica a força de fadiga.

É considerado de vida infinita o material que suporta um número de ciclos de tensão maior do que um milhão (JUVINALL; MARSHEK, 2017). Na prática não existe uma peça, de determinado material, que resista a tensão por número infinito de ciclos, mas considera-se que um milhão de ciclos seja um número tão grande que a vida útil exista por tempo indeterminado.

Outros modelos de falha por fadiga, não tão utilizados, são: o de deformação-número de ciclos (ϵ -N), que assume regime de fadiga de baixo ciclo e vida infinita ; e o modelo da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE), o qual considera regime de fadiga de baixo ciclo e vida finita.

Um conceito importante para este trabalho é o de limite de fadiga, que consiste em um valor de tensão a partir do qual há falha por fadiga e abaixo dele não. Nesse caso pode haver continuidade dos ciclos de forma indefinida. Para aplicações em processo que exija menos do que um milhão de ciclos define-se resistência a fadiga.

As irregularidades de uma estrutura - como uma fissura, um furo ou um chanfro – são concentradoras de tensões. Em material dúctil, o carregamento estático reduz as tensões pelo escoamento localizado, já o carregamento cíclico causa falhas por fadiga, pois há um comportamento frágil da estrutura.

O conceito de fator de concentração de tensão, uma propriedade que possibilita a definição de um grau de concentração de tensão em um entalhe, é definido pela relação entre a tensão no limite ao redor do entalhe e a tensão na seção mais distante do entalhe. A determinação do fator de concentração de tensão tem sido feita, cada vez mais, por meio de análises computacionais, devido a versatilidade e eficiência em relação aos métodos experimentais.

3.3 Falhas por fadiga

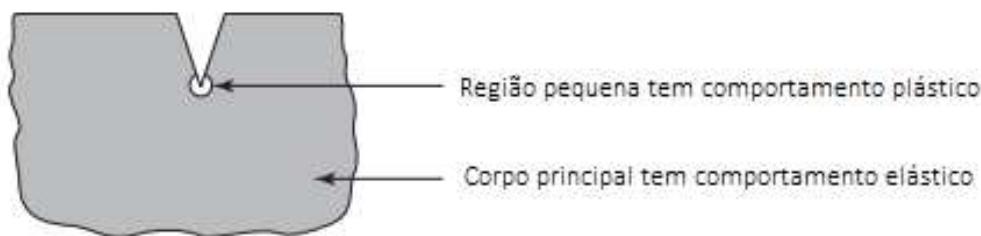
Falhas por fadiga começam com rachaduras microscópicas, de falhas em materiais ou preexistentes, em áreas críticas com grande tensão local. A seguir apresentam-se alguns fundamentos importantes para melhor compreensão dos padrões do comportamento de fadiga (JUVINAL; MARSHEK, 2000):

- A falha por fadiga é resultado de deformação plástica repetida;

- Falhas por fadiga tipicamente ocorrem após milhares ou milhões de ciclos de carregamento que muitas vezes existe apenas a nível microscópico;
- O escoamento plástico altamente localizado pode ser o início de uma falha por fadiga, por isso todos os locais potencialmente vulneráveis são pontos de atenção;
- Se o escoamento local for suficientemente pequeno, o material pode se fortalecer por deformação, fazendo com que o escoamento cesse;
- A trinca de fadiga inicial geralmente resulta em um aumento na concentração de tensão local.

A Figura 3 apresenta uma abertura triangular que adentra o corpo, um exemplo de região concentradora de tensão. A região da figura, que apresenta uma fragilidade devida a sua geometria, tem indicação de comportamento plástico, ou seja, quando submetida a tensões elevadas sofre deformação permanente. Já a região do corpo como um todo, quando submetida a tensão sofre deformação elástica, isto é, retorna a sua forma inicial após a remoção do carregamento.

Figura 3 – Visão ampliada de uma região entalhada.



Fonte: Adaptado de Juvinal e Marshek (2000, p.288).

3.4 Fatores que influenciam as tensões na cabeça de poço

São apresentados nesta seção alguns fatores relacionados a causa dos esforços na cabeça de poço, como a influência do solo, devido sua movimentação.

De acordo com o estudo de Ruschel et al. (2021), de análise de fadiga em cabeça de poço, feito a partir do efeito das correntezas do mar e ondas *swell* utilizando o Método de Dimensão Univariada - Univariate Dimension Reduction Method (UDRM) em inglês - que considera uma variável por vez para fazer uma estimativa simples, o número de simulações numéricas necessárias para avaliação

de fadiga completa, considerando todas as possíveis combinações de correntezas e direções de incidência de *swell* nesses casos práticos, foi inferior a mil.

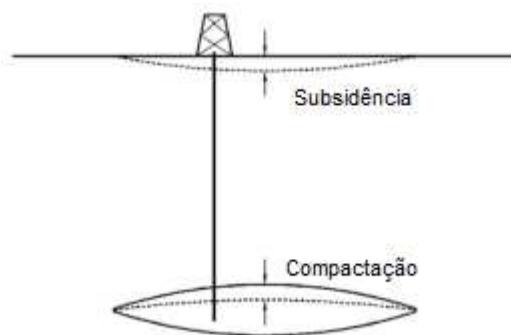
Destaca-se que, ao longo da perfuração do poço, deve-se dar atenção a operação de cimentação. A falha na cimentação pode causar a invasão de fluidos de formações permeáveis para dentro do poço, constituindo-se em um influxo ou *kick*.

A tese de Reinås (2012) sugere um método para controlar o nível de déficit de cimento na construção do poço para que as soldas de extensão do revestimento da superfície da cabeça do poço suportem uma quantidade menor de danos durante o carregamento dinâmico.

No processo de subsidênciaria, de acordo com Cabral et. al (2006), ocorre um rebaixamento da superfície terrestre em determinada localidade, como consequência de alterações nas camadas subterrâneas. Este movimento é notado, muitas vezes, por meio de deformações e falhas.

Quando há a retirada de fluidos em excesso, reduz-se a pressão de fluido entre os grãos, e por vezes, ainda que lentamente, ocorre a compactação do reservatório, afetando o meio ambiente, estruturas geológicas do campo e inclusive os equipamentos instalados, como a cabeça de poço. Esse caso, onde ocorre subsidênciaria como consequência da compactação, é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Subsidênciaria como reflexo da compactação.



Fonte: Adaptado de Fjær et al. (2008).

Então, no caso de ocorrência de subsidênciaria há uma alteração significativa dos esforços na cabeça de poço, da profundidade em que se encontra em relação ao reservatório e a própria sustentação que a cabeça de poço deveria proporcionar para toda a tubulação é comprometida.

Outro fator externo que deve ser considerado no dimensionamento das estruturas mais superficiais, como a cabeça de poço, o BOP e posteriormente a árvore de natal, e principalmente os *risers*, é a ação de ondas e correntes oceânicas, pois precisam suportar os carregamentos hidrodinâmicos inerentes ao local.

A movimentação causada pelas ondas nos equipamentos é um fator importante também a ser estudado. Em sua grande maioria, são geradas pela ação do vento na superfície da água, mas no caso do *swell*, são formadas em zonas de geração de tempestades, por isso ondas são ondas grandes e periódicas.

De acordo com Ferreira (2020), em alguns casos, a velocidade de correntes marítimas pode até causar efeitos indesejados como o desprendimento de vórtices – *vortex shedding*, em inglês, que é um fluxo oscilante que gera zonas alternadas de baixa pressão. Levando em consideração o número de Reynolds e o tipo de regime, pode-se afirmar que o *vortex shedding* torna o regime tão turbulento e irregular que não é possível determinar um padrão para o fluxo sob essas condições e isso implica em tensões mais elevadas e instáveis nos equipamentos instalados para exploração e produção de óleo e gás.

Além desses, muitos outros fatores são causadores ou intensificadores de esforços na cabeça de poço, como a grande diferença de temperatura entre o fundo do mar e o reservatório, o nível de pressão a qual está submetido o reservatório - que geralmente é bem elevado, e a diferença de pressão pela qual o fluido produzido atravessa desde o reservatório até os separadores na plataforma, as propriedades do solo perfurado, o nível de cimentação do poço, a movimentação da plataforma flutuante no mar que gera uma tensão nos *risers* e a própria movimentação destes, além da tensão gerada durante a etapa de perfuração.

A temperatura e a pressão de formação dos fluidos de reservatório são de extrema importância para determinar a classificação do óleo contido. Um óleo denso como o *black oil*, por exemplo, pode ter se formado a temperatura de até 400°C e 35 MPa, aproximadamente. Já o gás seco pode ocorrer em temperaturas e pressões próximas a -100 °C e 0 MPa (MCCAIN, 1999).

Um projeto de cabeça de poço deve considerar ainda o diâmetro do poço, as configurações da estrutura como geometria e capacidade máxima de carga, além das propriedades do material constituinte. Ainda assim, mesmo considerando tantos fatores no dimensionamento do projeto, há considerável incerteza com relação ao

nível de fadiga suportado pela cabeça de poço, em função das muitas variáveis ambientais relacionadas (EVANS; MCGRAIL, 2011).

Considerando um sistema de cabeça de poço submetido a todas essas variáveis mencionadas, dependendo da magnitude do carregamento e das configurações da cabeça de poço pode ser iniciada uma fissura ou então o aumento de uma pré-existente. Caso essa fissura aumente e se torne uma trinca, considera-se a ocorrência de fadiga.

A tendência é que essas fissuras ocorram em pontos críticos da estrutura, ou seja, em regiões de alteração da geometria ou da composição do material. A ocorrência de uma falha pode ocasionar a perda de contenção de pressão levando a uma rápida propagação da tensão máxima, gerando possível perda de integridade da estrutura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste presente trabalho foi realizado um estudo dos conceitos relacionados a fadiga e a estrutura de uma cabeça de poço para aplicar os métodos de *Rainflow Counting* e *Palmgren-Miner* em um carregamento desenvolvido no trabalho de AUAD (2022), transformando em carregamento uniforme.

4.1 Determinação de esforços na cabeça de poço

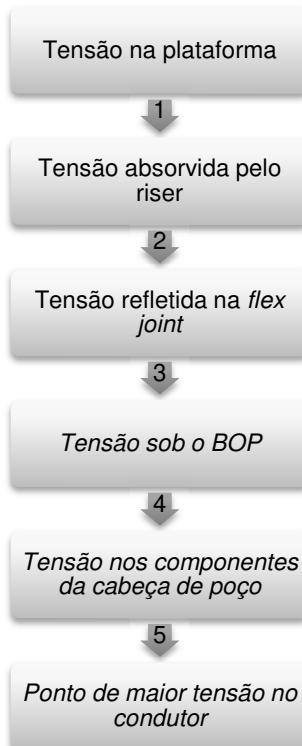
É importante destacar o processo utilizado para determinar os esforços na cabeça de poço.

De acordo com AUAD (2022), que foi o ponto de partida deste trabalho, o esforço gerado pelo deslocamento da plataforma, que pode ser simulado no software *OrcaFlex*, é absorvido pelo *riser* e refletido na junta flexível, sobre o BOP. A partir da norma ISO 13628-7, do ano de 2005, calculam-se os esforços embaixo do BOP, que é o local de contato com a cabeça de poço.

Com os valores de força e momento na cabeça de poço é feita uma simulação pelo Método de Elementos Finitos no software *Ansys* a fim de encontrar o componente do revestimento no qual se localiza o ponto de maior tensão. Para isso, os esforços na cabeça de poço são transferidos para todos os seus componentes e, assim, o ponto no qual houve a maior reflexão da tensão foi no condutor, aproximadamente seis metros abaixo do solo marinho.

A Figura 5 representa um fluxograma da transferência de tensões desde a plataforma até o condutor na cabeça de poço.

Figura 5 – Fluxograma da transferência de tensões.



Fonte: Própria autora (2022).

Carregamentos de diferentes tipos (lateral, de flexão e axial) se combinam no sistema de cabeça de poço e são potenciais causadores de falha por fadiga neste sistema. Para estimar o momento de flexão na cabeça de poço e a força horizontal resultante que atua na junta flexível utiliza-se a ISO 13628-7, a qual define equações para refletir as tensões de cima do BOP para baixo dele.

Já para a força cisalhante resultante que atua também na junta flexível é feita uma análise do carregamento no *riser* com as seguintes considerações: mar calmo, ondas de até três metros de altura e período de dez segundos, de acordo com o AUAD (2022).

Para estudar o comportamento do conjunto de BOP ou árvore de natal e cabeça de poço, pode-se usar o modelo numérico de curvas p-y que simula a resposta da resistência do solo, considerando que a parte desses equipamentos que fica exposta e envolvida por água no fundo do mar, se comporta como uma estaca carregada lateralmente.

Para as curvas p-y, considera-se ‘p’, como a pressão do solo por unidade de comprimento da estaca, e ‘y’, como a deflexão da estaca. Nesse contexto, utilizam-se molas não lineares que variam com a profundidade e com o tipo de solo para

representação do solo. Na atualidade, o método dos elementos finitos é muito utilizado em abordagens que envolvem a reação do subleito ou método p-y (INNOVATIVE GEOTECHNICS, 2022).

Vale comentar que as curvas p-y são geradas por testes de carga lateral em estacas de teste instrumentadas, em escala real, mas na ausência disso, utiliza-se de formulações empíricas da literatura, que consideram diferentes tipos de solo.

4.2 A regra de *Palmgren-Miner*

Quando o carregamento apresenta amplitude constante e todas as faixas de tensão são inferiores ao limite de fadiga considera-se que não ocorre dano por fadiga. No entanto, para carregamento de amplitude variável, qualquer faixa de tensão que exceda o limite de fadiga de amplitude constante deve considerar as faixas de tensão no espectro. Para isso, há a Regra de *Palmgren-Miner*, na qual o componente deve resistir a uma condição em que as cargas de trabalho possuem amplitude variável (ZHAO; WILKINSON; HANCOCK, 2005).

Essa regra é conhecida também como regra de dano cumulativo linear e foi proposta por *Palmgren*, na Suécia, em 1924, e de forma independente, por *Miner*, em 1945 (JUVINAL; MARSHEK, 2000).

Os autores definiram o conceito para o caso em que uma peça é carregada cicличamente acima de seu limite de fadiga causando uma falha em 10^5 ciclos, cada ciclo do carregamento consome uma fração de 10^5 . Se outro ciclo de tensão for imposto, equivalendo a uma vida de 10^4 ciclos, cada parte consome uma fração de 10^4 da vida da peça, e assim por diante. No momento em que a vida é totalmente consumida ocorre a falha por fadiga (NORTON, 2013).

Ou seja, o dano sofrido por uma peça, pela ação de determinada amplitude de um carregamento cíclico, é diretamente proporcional ao número de ciclos em que a amplitude de tensão atuou.

As Equações (1) e (2) representam a regra de *Palmgren-Miner*:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = 1$$

$$\sum_{j=1}^{j=k} \frac{n_j}{N_j} = 1$$

Onde n_1, n_2, \dots, n_k representam o número de ciclos em um nível de tensão específico, acima do limite de fadiga, e N_1, N_2, \dots, N_k representam a vida em ciclos em determinados níveis de tensão, conforme mostra a curva S-N.

No caso em que há acúmulo de dano, a falha por fadiga ocorre quando $n_i = N_i$ e o dano máximo ocorre quando a expressão do somatório resulta em um.

A teoria de *Palmgren-Miner* é muito utilizada como base, por não haver outra alternativa tão simplificada. Outras teorias existentes possuem limitação na aplicação, são mais trabalhosas e não possuem dados comprovados da melhor teoria.

4.3 A teoria de *Rainflow Counting*

A técnica de ciclo *Rainflow Counting*, introduzida em 1968 por Matsuishi e Endo, foi o primeiro método reconhecido para ciclos de carregamentos fechados (LEE; TJHUNG, 2012). É utilizado para identificar ciclos em históricos de carregamentos complexos.

A técnica de contagem de três pontos considera três pontos consecutivos de pico ou vale de uma repetição de um histórico de carregamento. Em um carregamento periódico, seu histórico deve ser reorganizado para que o gráfico possua apenas picos e vales, e se inicie com o ponto de maior magnitude absoluta, seja ele um pico ou um vale. A partir disso, é feita a verificação a cada três pontos consecutivos até que seja definido um circuito fechado, então os dois primeiros pontos são desprezados e os pontos seguintes são ligados, e isso é feito repetidamente até que acabem os dados (LEE; TJHUNG, 2012).

Para realizar uma análise de fadiga é necessário destrinchar o ciclo de carregamento, considerando o valor médio e a amplitude. A partir da previsão de vida até a fadiga e dos testes de simulação a técnica de *Rainflow Counting* possibilita o armazenamento de medições de forma adequada por meio da reconstrução de uma sequência diferente, mas que possui os mesmos ciclos da sequência primária (AMZALLAG et al., 1994).

4.4 O método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos consiste em subdividir a região de um problema em partes menores, denominadas elementos finitos, por meio de um número discreto de pontos nodais, que fazem as conexões entre os elementos, definindo um comportamento com incógnitas a partir dos pontos nodais do elemento.

Um sistema total de equações é obtido e a solução permite conhecer os valores nos pontos nodais, o que é ainda mais importante quando se necessita estudar o deslocamento de nós com a aplicação de carregamento (MARINHO; VAZ; PIMENTEL, 2022).

O método funciona de forma que quanto maior o número de subdivisões da estrutura, maior o nível de detalhe da análise e maior a precisão nos resultados, e por meio de softwares computacionais, como o *Ansys*, é possível ter uma precisão ainda maior na análise de estruturas complexas e avaliar situações de tensão, deformação, resistência, rigidez, fadiga e comportamento (térmico, acústico e dinâmico), segundo Mirlsenna (2006).

Em um sistema contínuo podemos considerar que há inúmeras subdivisões possíveis para uma estrutura, mas quando o sistema é discretizado, isto é, dividido em um número fixo de seções a partir de algum critério, é possível analisar esse sistema formado por número finito de partes.

A equação de equilíbrio para esse sistema pode ser representada por:

$$\{F\} = [K] \cdot \{X\}$$

Na qual $\{F\}$ representa o vetor de carregamento das forças que atuam nos nós, $[K]$ representa a matriz de rigidez pela relação entre forças e deslocamentos nodais, e $\{X\}$ representa a vetor de deslocamentos nodais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para desenvolver o estudo foram utilizados valores de tensão simulados a partir de parâmetros da movimentação da plataforma no mar, porém foi utilizado para o presente estudo apenas um trecho de 90 segundos, onde as tensões eram mais elevadas, já que o estudo pretendia simular as situações mais críticas do problema para ocorrência de fadiga.

As tensões geradas a partir da movimentação da plataforma no mar ao longo da etapa de perfuração se propagam para o *riser* e geram uma tensão sobre o BOP, que por sua vez transmite à cabeça de poço. Foram manipulados alguns dados de AUAD (2022), utilizando um fator multiplicativo a fim de construir um novo estudo e o resultado é apresentado na Tabela 1.

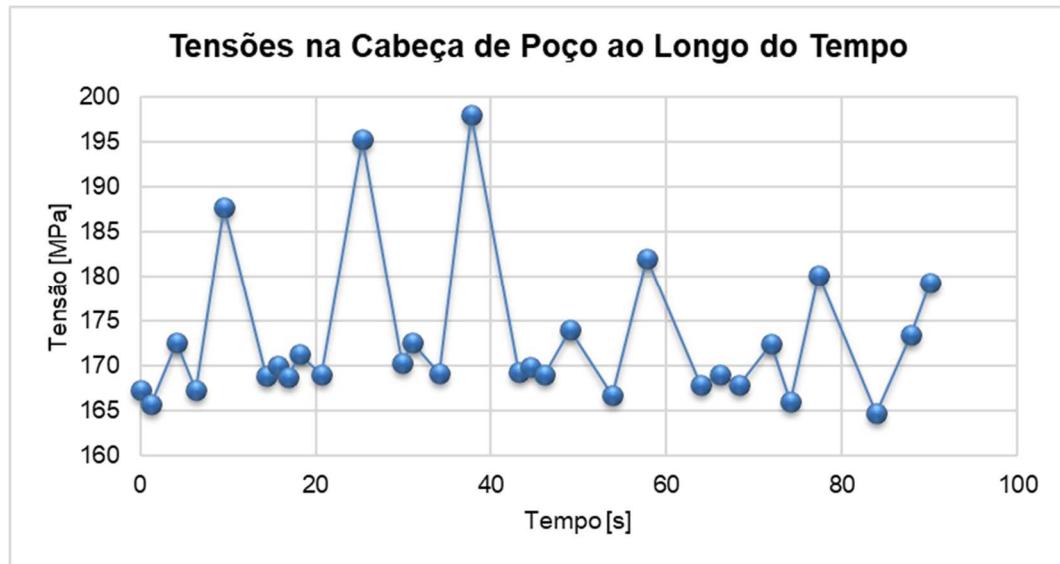
Tabela 1 - Valores de tempo e tensão utilizados.

Tempo [s]	Tensão [MPa]
0	167,3
1,2	165,7
4,2	172,6
6,3	167,3
9,6	187,8
14,3	168,9
15,7	170,1
16,8	168,8
18,1	171,4
20,6	169,0
25,3	195,3
29,9	170,3
31	172,6
34,1	169,1
37,8	198,0
43,2	169,3
44,5	169,9
46	169,0
49	174,0
53,8	166,8
57,7	182,1
63,9	167,9
66,1	169,0
68,3	167,9
72	172,5
74,1	166,1
77,4	180,2
83,9	164,8
87,9	173,5
90	179,3

Fonte: AUAD (2022).

A Figura 6 representa essa tensão absorvida pela cabeça de poço – considerando que esta tenha três metros de altura a partir do solo marinho.

Figura 6 - Valores de tensão e tempo utilizados.



Fonte: AUAD (2022).

É notável que o carregamento dado é não uniforme, já que os ciclos não obedecem ao critério de simetria e não possuem variações constantes de tensão, mas têm diferentes valores da componente média de tensão. Por meio do método de *Rainflow Counting* obteve-se um carregamento alternado simétrico com componente média igual a zero e equivalente em amplitude ao carregamento anterior.

No caso do ciclo 2, da Tabela 3, com a aplicação do *Rainflow Counting* obtém-se uma componente alternada valendo 0,8 MPa, enquanto no ciclo 3 a componente alternada considerada é de 2,6.

Para obter a resistência a fadiga correspondente a um determinado número de ciclos utilizou-se o critério de Goodman modificada da seguinte forma:

$$\sigma_a = S_n \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right) \Rightarrow S_n = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right)}$$

Onde n pode assumir vida finita ou infinita, S_{ut} representa o limite de ruptura à tração, σ_m equivale a média da tensão dos dois primeiros pontos do ciclo, σ_a corresponde a diferença entre a tensão em um dos dois primeiros pontos e S_n equivale a componente alternada da tensão.

Para resolver os problemas deste trabalho foram consideradas as constantes da Tabela 2, que são características do material da cabeça de poço, o qual é constituído majoritariamente por aço inoxidável.

Tabela 2 – Valores assumidos para algumas constantes.

Constante	Valor
S _{ut} [MPa]	520,0
S _m [MPa]	468,0
S _e [MPa]	109,2

Fonte: AUAD (2022).

O limite de fadiga (S_e) equivale ao nível de tensão abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, mesmo que por tempo indefinido. Enquanto S_m corresponde ao nível de resistência do material – o limite de fadiga para um milhão de ciclos submetido a tensão – e foi aproximado para 90% do valor de resistência a tração (S_{ut}).

O método de *Rainflow Counting* foi aplicado e encontram-se na Tabela 3 os ciclos extraídos.

Tabela 3 - Resultado da aplicação do método de *Rainflow Counting* e da equação do critério de *Goodman*.

Ciclo	Ciclos extraídos [MPa]								
	De	Para	Faixa	σ_m	σ_a	Sn	$Sn \cdot 10$	$Sn \cdot 24$	
1	173,5	179,3	5,8	176,4	2,9	4,4	44,1	105,9	
2	167,3	165,7	1,6	166,5	0,8	1,2	11,8	28,4	
3	172,6	167,3	5,3	169,9	2,6	3,9	39,3	94,4	
4	180,2	164,8	15,3	172,5	7,7	11,5	114,8	275,5	
5	174,0	166,8	7,2	170,4	3,6	5,3	53,3	127,8	
6	172,6	169,1	3,5	170,9	1,7	2,6	25,8	61,8	
7	195,3	170,3	25,0	182,8	12,5	19,3	193,1	463,5	
8	172,5	166,1	6,5	169,3	3,2	4,8	48,1	115,4	
9	171,4	169,0	2,4	170,2	1,2	1,8	17,6	42,2	
10	170,1	168,8	1,3	169,4	0,6	0,9	9,5	22,7	
11	187,8	168,9	18,9	178,3	9,5	14,4	143,9	345,4	
12	169,9	169,0	0,8	169,4	0,4	0,6	6,3	15,1	
13	169,3	182,1	12,8	175,7	6,4	9,6	96,3	231,1	
14	167,9	169,0	1,1	168,5	0,6	0,8	8,2	19,7	

Fonte: Própria autora (2022).

Nas últimas duas colunas da Tabela 3 temos os valores da componente alternada da tensão multiplicados por 10 e por 24, respectivamente. Isso foi feito para que se tornasse possível o estudo do número de ciclos até a fadiga, de forma que houvesse alguns valores superiores ao limite de fadiga e inferiores ao nível de resistência do material em mil ciclos.

Se os valores iniciais da componente alternada de tensão não tivessem sido multiplicados por um fator inferior a 9, não haveriam nem três ciclos para simular a ocorrência de fadiga. Por isso, a componente alternada de tensão foi multiplicada por dez.

A fim de ter uma comparação do nível de tensão em relação ao tempo até a fadiga ocorrer, foi escolhido um fator multiplicativo bem elevado para a componente alternada de tensão, mas que não excedesse o nível de resistência do material em mil ciclos, S_m . O valor escolhido como fator multiplicativo, que não excedia S_m , foi 24.

Vale ressaltar que após todas essas alterações dos valores iniciais, o problema passou a ter um caráter de simulação exclusivamente, sem se aproximar de valores absolutos de uma situação real.

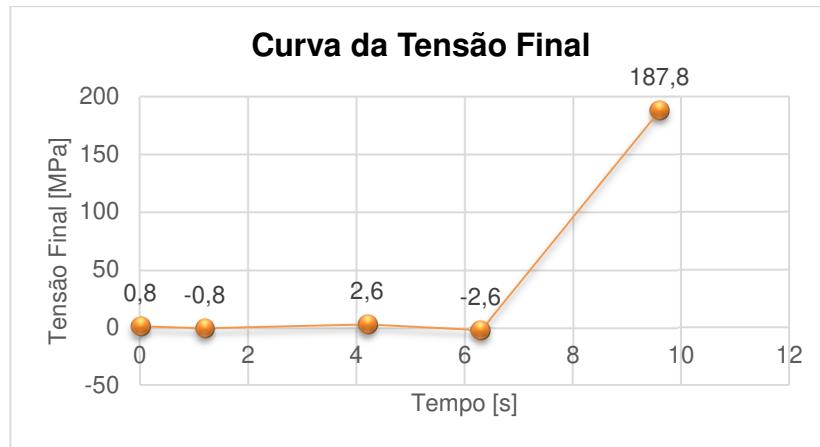
Para melhor ilustrar o método, dois ciclos da Tabela 3 são tomados como exemplo. A Figura 7 apresenta o ciclo antes da aplicação de *Rainflow Counting* e a Figura 8 apresenta o ciclo após a aplicação do método.

Figura 7 - Ilustração dos ciclos 2 e 3 de acordo com a Tabela 3.



Fonte: Própria autora (2022).

Figura 8 - Ilustração dos ciclos 2 e 3 após aplicação do método de *Rainflow Counting*.



Fonte: Própria autora (2022).

Para encontrar o número de ciclos em um determinado nível de tensão até a fadiga foi utilizada a Equação:

$$S_n = a \cdot N^b$$

As constantes a e b são calculadas a partir de S_m e S_e , assim tem-se: $a = 2005,7143$; $b = -0,2107$. Utilizando os valores da coluna $S_n \cdot 10$ da Tabela 3, considerando quatro casas decimais desse número, a partir da Regra de *Palmgren-Miner*, chegou-se ao seguinte resultado, exposto na Tabela 4.

Tabela 4 – Frações de vida consumidos obtidos por *Palmgren-Miner* com $S_n \cdot 10$.

Tensão [MPa]	Qtd. picos	Ciclos	Frações da eq.
114,7811	1	824.487,79	$1,21 \cdot 10^{-6}$
193,1055	1	69.239,58	$1,44 \cdot 10^{-5}$
143,9140	1	280.808,11	$3,56 \cdot 10^{-6}$
Soma total	3		$1,92 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Própria autora (2022).

De forma análoga, foi aplicada a mesma metodologia da Tabela 4 para $S_n \cdot 24$ e chegou-se ao resultado exposto na Tabela 5.

Tabela 5 - Frações de vida consumidos obtidos por *Palmgren-Miner* com Sn*24.

Tensão [MPa]	Qtd. picos	Ciclos	Frações da eq.
275,4746	1	12754,25	$7,84 \cdot 10^{-5}$
127,8103	1	12754,25	$7,84 \cdot 10^{-5}$
463,4533	1	1071,09	$9,34 \cdot 10^{-4}$
115,3903	1	803964,72	$1,24 \cdot 10^{-6}$
345,3936	1	4343,90	$2,30 \cdot 10^{-4}$
231,1362	1	29415,53	$3,40 \cdot 10^{-5}$
Soma total	6		$1,36 \cdot 10^{-3}$

Fonte: Própria autora (2022).

Por fim, são apresentadas as tabelas, 6 e 7, com a fração unitária de vida consumida em cada caso.

Tabela 6 – Vida consumida quando Sn*10.

Quando Sn*10	
Vida	Unidade
4.683.443	s
78.057	min
1.300	horas
54	dias

Fonte: Própria autora (2022).

A Tabela 6 apresenta a fração de vida consumida e a conversão de unidades para dias, resultando em 54 dias para que ocorra a fadiga.

Tabela 7 - Vida consumida quando Sn*24.

Quando Sn*24	
Vida	Unidade
66.377	s
1.106	min
18	horas
1	dias

Fonte: Própria autora (2022).

Da mesma forma que a Tabela 6, a Tabela 7 apresenta a fração de vida consumida e a conversão de unidades para dias. Como resultado tem-se um dia até a fadiga sob as condições consideradas no problema.

Com esses valores obtidos, nota-se que quanto maiores as tensões iniciais do problema ao qual está submetido o sistema de cabeça de poço, maior a componente alternada de tensão, maior o número de picos de fadiga e mais rapidamente a vida é consumida.

Temos no caso em que $Sn^{*}10$, onde três ciclos ultrapassam o limite de fadiga, a vida é consumida em aproximadamente 54 dias. Enquanto no caso de $Sn^{*}24$, seis ciclos ultrapassam o limite de fadiga e são “responsáveis” pela consumação da vida, e a vida é consumida em apenas um dia.

Com esses resultados nota-se que os valores finais não se aproximam de um caso real, pois em casos reais a cabeça de poço deve se sustentar sem falhas por todo o tempo de exploração e produção do poço, o que pode durar mais de 20 anos, por exemplo. Então, se uma cabeça de poço sofresse fadiga em um dia ou em 54 dias, ela poderia perder sua utilidade comprometendo inclusive a utilização do poço.

6 CONCLUSÃO

6.1 Contribuições do trabalho

Diante da realidade dinâmica pelas operações de exploração e produção e pelo ambiente em que ocorrem, este trabalho estudou os esforços que ocorrem na cabeça de poço, a origem deles e seus efeitos, por meio da Teoria de Miner e do Algoritmo de *Rainflow Counting*.

Foram identificados pontos de maior fragilidade e maior tendência a fissuras, mas também foram levantados processos importantes realizados na indústria de óleo e gás para assegurar que os equipamentos sejam entregues em campo com a melhor qualidade possível.

Foi estudado também a ocorrência de falha por fadiga e como ocorre o processo, e ainda foram apresentadas de forma breve algumas teorias importantes para este trabalho: *Palmgren-Miner*, *Rainflow Counting* e Método dos Elementos Finitos. Por último foram levantados fatores que influenciam as tensões na cabeça de poço.

Com os resultados obtidos pode-se constatar que quanto maior a tensão aplicada, maiores as tensões alternadas, e maior a quantidade de picos que gera fadiga, e menor o tempo de vida da peça até que ocorra a fadiga e isso ocorre de forma não linear, pois a medida que multiplicamos por 2,4 a componente alternada da tensão para obter o segundo caso, no qual $S_n \cdot 2^4$, a fração consumida se torna 54 vezes menor para o mesmo tempo.

Essa simulação partiu de dados reais, mas como foi alterada numericamente por um fator multiplicativo passou a ser apenas uma simulação, sem valores de escala real. Ainda assim, foi possível verificar que para tensões maiores, o tempo de vida é menor.

6.2 Trabalhos futuros

Para desenvolvimento de trabalhos futuros, incentiva-se o levantamento de dados para previsão de fadiga em outros equipamentos da cabeça de poço, além da investigação e aplicação de novos parâmetros que possam levar a falha. Esses

parâmetros podem estar relacionados a composição do material, ao meio em que se encontra, regime de funcionamento e eventuais imprevistos, além do desempenho esperado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Inclinação Anormal de Cabeça de Poço. **Incidentes - Alerta de Segurança - ANP/SSM**. Rio de Janeiro, jul. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/incidentes/arquivos-alertas-de-seguranca/alerta-06/alerta-de-seguranca_006_ssm_inclinacao-anormal-de-cabeca-de-poco.pdf. Acesso em: 22 mai. 2022.
- AMZALLAG, C.; GEREY, J.P.; ROBERT, J.L.; BAHUAUD, J. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis. **International Journal of Fatigue**, França, v.16, p. 287-293, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(94\)90343-3](https://doi.org/10.1016/0142-1123(94)90343-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0142112394903433>. Acesso em: 22 mai. 2022.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por Partículas Magnéticas**. São Paulo: Abende, 2014a. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/PM-2014.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2022.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom**. São Paulo: Abende, 2014b. Disponível em: [http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20\(1\).pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20(1).pdf). Acesso em: 23 mai. 2022.
- ARONSEN, K. H.; KUZMICHEV, S.; GRYTØYR, G.; GREGERSEN, K.; KIRKEMO, F.; REINÅS, L.. Analysis Approach for Estimating Wellhead Fatigue. **Proceedings of the ASME 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**, Espanha, v.3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77214>.
- AUAD, I. T. Relatório Técnico Interno, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola Politécnica da USP, 2022.
- BOURGOYNE, A.T. JR.; MILLHEIM, K.K.; CHENEVERT, M.E.; YOUNG, F.S. JR. **Applied Drilling Engineering**. Estados Unidos, v. 2, jan. 1991. ISBN 978-1-55563-001-0.
- CABRAL, J.J.; SANTOS, S.M.; PONTES FILHO, I.D. Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Risco de Subsidiência do Solo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Recife, v.11, 2006. p.147-157. DOI: 10.21168/rbrh.v11n3.p147-157.

- DA ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais**, Florianópolis: Grupo de Análise e Projeto Mecânico, 2002, p.223-276. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5643118/mod_resource/content/1/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf. Acesso em: 23 mai. 2022.
- DASH, S.; ROUHOLAMIN, M.; LOMBARDI, D.; BHATTACHARYA, S. A practical method for construction of p-y curves for liquefiable soils, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 97, 2017, p. 478-481, ISSN 0267-7261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726117302129>. Acesso em: 25 mai. 2022.
- EVANS, J.T.; MCGRAIL, J. **An Evaluation of the Fatigue Performance of Subsea Wellhead Systems and Recommendations for Fatigue Enhancements**. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2011, Houston. DOI: <https://doi.org/10.4043/21400-MS>. Disponível em: <https://2hoffshore.com/wp-content/uploads/2016/02/2011-OTC-An-Evaluation-of-the-Fatigue-Performance-of-Subsea-Wellhead-Systems-and-Recommendations-for-Fatigue-Enhancements.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- FERREIRA, L.S. **Avaliação da influência da amplitude de vibração na frequência natural de um duto rígido**. Niterói: UFF, 2020. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/14823/TCC%20-%20Lucas%20Ferreira%20-%20Vers%C3%A3o%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- FJÆR, E.; HOLT, R.; HORSRUD, P.; RAAEN, A. **Petroleum Related Rock Mechanics**. Elsevier Science, 2008, 2.ed. ISBN: 9780444502605.
- INNOVATIVE GEOTECHNICS. **Single piles and pile groups under general loading - p-y curves for laterally loaded piles**. Disponível em: <https://www.pilegroups.com/p-y-curves>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- ISO 13628-7:2005**, Petroleum and natural gas industries — Design and operation of subsea production systems — Part 7: Completion/workover riser systems, Genebra, nov. 2005, 242 p. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/24210.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.

- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design**. 6. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2017. ISBN: 978-1-118-98768-1(PBK).
- KHALIFEH, M.; SAASEN, A. **General Principles of Well Barriers**. In: INTRODUCTION TO PERMANENT PLUG AND ABANDONMENT OF WELLS. Stavanger, 2020, v. 12, p. 11-69. DOI: 10.1007/978-3-030-39970-2_2.
- LEE, Y.L.; TJHUNG, T. **Rainflow Cycle Counting Techniques**. In: METAL FATIGUE ANALYSIS HANDBOOK, Elsevier, 2020, p. 89–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385204-5.00003-3>.
- MARINHO, I. J. P.; VAZ, L. E.; PIMENTEL, R. L. **Projeto Ótimo de Estruturas Metálicas de Arquibancadas Reutilizáveis Via ANSYS**. Rio de Janeiro, 2022.
- MAXITRATE. **Alívio de Tensões Tratamento Térmico**. São Paulo, 2022. Disponível em: <http://www.maxitrate.com.br/alivio-tensoes-tratamento-termico.html>. Acesso em: 22 mai. 2022.
- MCCAIN, W. D. JR. **The Properties of Petroleum Fluids**. 2nd ed, PennWell Books, Tulsa, 1999. ISBN 0-87814-335-1.
- MILITKY, J.; IBRAHIM, S. **Effect of Textile Processing on Fatigue**. In: FATIGUE FAILURE OF TEXTILE FIBRES, Elsevier, 2009, p. 133–168. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845695729.2.1333>.
- MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é? Como funciona o método?**, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 04 set. 2022.
- NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. São Paulo: Editora Bookman, 2013. ISBN-13: 978-8582600221.
- REINÅS, L. **Wellhead Fatigue Analysis Surface casing cement boundary condition for subsea wellhead fatigue analytical models**, 2012.
- ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. **Projetos de Poços de Petróleo: Geopressões e Assentamento de Colunas de Revestimento**. 3^ªed. Editora Interciênciac, jan. 2019. ISBN 9788571934306.
- ROQUE, J. C. L. **Avaliação do desempenho de técnicas não destrutivas: um estudo de caso na inspeção de juntas soldadas em tubulação de transferência de amônia anidra**. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/34477>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- RUSCHEL, A.; DANTAS, C. M. S.; DE SOUSA, F. J. M.; SIMÃO, M. L.; SAGRILO, L. V. S.; PERCY, J. G.; OLIVEIRA, F. L. **Wellhead fatigue analysis considering the**

effect of wind-sea and swell waves by using Univariate Dimension Reduction Method. 2021. Journal of Petroleum Science and Engineering, 206, 108989. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108989>.

WANG, Y.; LI, Z.; LUO, W.; WANG, W.; YANG, J.; LI, J.; SUN, H.; WANG, J. **Fatigue life prediction method for subsea wellhead welds based on the nonlinear fatigue accumulation model.** 2022., p. 248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110828>.

ZHAO, X. L.; WILKINSON, T.; HANCOCK, G. **Welded Connections Subjected to Fatigue Loading.** In: COLD-FORMED TUBULAR MEMBERS AND CONNECTIONS, Sydney: Elsevier, 2005, p. 179–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008044101-6/50009-8>.

ANEXO A – ARTIGO SÍNTESE

Universidade de São Paulo

Engenharia de Petróleo – Escola Politécnica

Número: 10823640USP

Data: 22/11/2022



Análise de Fadiga na Cabeça do Poço

Júlia Melnic Corrêa

Orientador: Prof. Ronaldo Carrión

Artigo Sumário referente à disciplina PMI3349 – Trabalho de Conclusão de Curso II
Este artigo foi preparado como requisito para completar o curso de Engenharia de Petróleo na Escola Politécnica da USP. Template versão 2021v01.

Resumo

Por meio do algoritmo de *Rainflow Counting*, da teoria de *Palmgren-Miner* e da curva de *Goodman*, este trabalho buscou simular os esforços dos carregamentos aplicados em componentes da cabeça do poço visando prever o comportamento de tais esforços, que são de amplitudes variáveis e não cíclicos. Foram levantados os pontos críticos do sistema de cabeça de poço e os fatores que podem intensificar a tendência à fadiga. Além disso, foram simulados dois carregamentos para as mesmas condições e constatou-se que quanto maior a tensão aplicada, maiores as tensões alternadas, maior a quantidade de picos que geram fadiga e menor o tempo de vida até que ocorra a fadiga. Tudo isso ocorre de forma não linear. O estudo partiu de dados reais, mas visa uma simulação.

Palavras-chave: *Rainflow Counting*, fadiga, cabeça de poço, *Palmgren-Miner*, revestimento.

Abstract

Using the Rainflow Counting algorithm, the Palmgren-Miner theory and the Goodman curve, this work sought to simulate the loads applied to wellhead components in order to predict the behavior of such efforts, which have variable amplitudes and do not cyclical. The critical points of the wellhead system and the factors that can intensify the tendency to fatigue were raised. In addition, two loads were simulated for the same conditions and it was found that the greater the applied stress, the greater the alternating stresses, the greater the number of peaks that generate fatigue and the shorter the lifetime until fatigue occurs. All of this occurs non-linearly. The study started from real data, but aims at a simulation.

Keywords: Rainflow Counting, fatigue, wellhead, Palmgren-Miner, casing.

Introdução

Com a tendência de aumento da produção de petróleo e diante da impossibilidade de simular com efetividade as diversas condições particulares de um reservatório e ter um conhecimento amplo e comprovado sobre a formação rochosa que envolve um reservatório de petróleo, tem sido cada vez mais estudado nos últimos anos o tema da fadiga em cabeça de poço.

Recentemente, a indústria de óleo e gás atentou-se aos movimentos dinâmicos que ocorrem nas estruturas da cabeça de poço durante as operações de exploração e produção (E&P).

Grande parte desses movimentos é oriundo não apenas das operações da perfuração, mas também da movimentação da plataforma, das correntezas oceânicas e ondas *swell*, que são ondas grandes e periódicas, formadas a partir de tempestades em alto mar, e até pelas diferenças de pressão e temperatura.

Em julho de 2020 a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) publicou um alerta de segurança com relação a um incidente em exploração e produção de óleo e gás. Um poço do pré-sal da Bacia de Santos teve sua fundação danificada com potencial de falhas de integridade e impossibilidade de instalação do *blowout preventer* (BOP) para abandono. Entre as causas desse caso foram citadas a movimentação vertical da fundação da cabeça de poço, a falha de conexão entre os alojadores de alta e de baixa pressão e o ciclo de fadiga na fundação do poço (ANP, 2020).

Embora a análise de fadiga seja vital, métodos tradicionais podem não ser precisos o suficiente e nesse local pode haver risco de falha operacional, havendo a possibilidade de acidentes. Vale ressaltar que a indústria de equipamentos de óleo e gás trabalha com alta tecnologia e já realiza uma série de inspeções e testes ao longo de cada uma das etapas da produção desses equipamentos para evitar que essas falhas ocorram.

Neste trabalho pretende-se prever o comportamento em componentes da cabeça do poço e simular os esforços dos carregamentos aplicados, que são de amplitudes variáveis e não cíclicos. Para isso serão utilizados a Teoria de *Miner* para fadiga que trata do dano acumulado, o critério de Goodman modificado, como equação para a componente alternada de tensão e o Algoritmo de *Rainflow Counting*, de contagem de ciclos parciais.

Metodologia

Para este trabalho foram abordados os alguns métodos. Define-se a regra de *Palmgren-Miner* pelo seguinte: se uma peça é carregada ciclicamente acima de seu limite de fadiga causando uma falha em 10^5 ciclos, cada ciclo do carregamento consome uma fração de 10^5 . Se outro ciclo de tensão for imposto, equivalendo a uma vida de 10^4 ciclos, cada parte consome uma fração de 10^4 da vida da peça, e assim por diante. No momento em que a vida é totalmente consumida ocorre a falha por fadiga (JUVINAL; MARSHEK, 2000). Outro método importante para este estudo é o dos Elementos Finitos, que consiste em subdividir a região de um problema em partes menores, definindo um comportamento com incógnitas a partir dos pontos nodais do elemento.

Já a teoria de *Rainflow Counting* consiste em identificar ciclos em históricos de carregamento complexos. Em um carregamento periódico, seu histórico deve ser reorganizado para que o gráfico possua apenas picos e vales, e se inicie com o ponto de maior magnitude absoluta, seja ele um pico ou um vale. A partir disso, é feita a verificação a cada três pontos consecutivos até que seja definido um circuito fechado, então os dois primeiros pontos são desprezados e os pontos seguintes são ligados, e isso é feito repetidamente até que acabem os dados (LEE; TJHUNG, 2012). Por meio da reconstrução da sequência, mantendo os mesmos ciclos da anterior, esse método permite o armazenamento de medidas.

São apresentados a seguir alguns fatores que influenciam as tensões na cabeça de poço: efeito das correntes oceânicas e ondas; a velocidade das correntes marítimas, falhas na cimentação; deslocamento da plataforma e o esforço refletido no riser, e por consequência no BOP e na cabeça de poço a partir disso (ISO 13628-7:2005); carregamentos dos tipos lateral, de flexão e axial no sistema da cabeça de poço que se comporta como uma estaca pela exposição no fundo do mar; o processo de subsidência do solo marinho que pode ocorrer pela compactação conforme se dá a produção; a grande diferença de temperatura entre o fundo do mar e o reservatório, o nível de pressão a qual está submetido o reservatório - que geralmente é bem elevado, e a diferença de pressão pela qual o fluido produzido atravessa desde o reservatório até os separadores na plataforma, as propriedades do solo perfurado, o nível de

cimentação do poço, a movimentação da plataforma flutuante no mar que gera uma tensão nos risers e a própria movimentação destes, além da tensão gerada durante a etapa de perfuração.

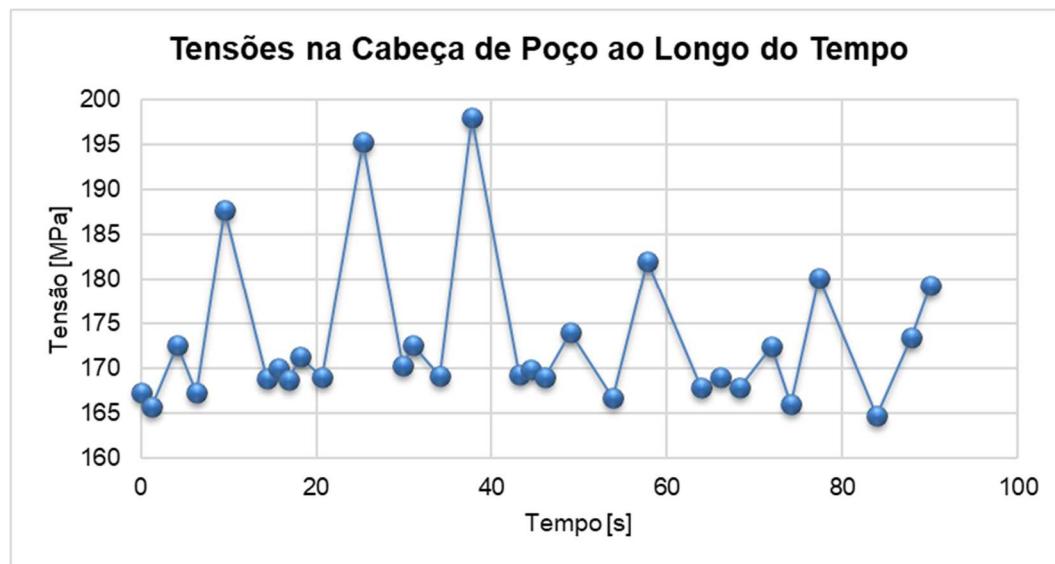
É importante prever as condições onde será instalado o poço para que seja desenvolvido com a forma mais adequada, avaliando as configurações da estrutura como geometria e capacidade máxima de carga, além das propriedades do material constituinte, capaz de suportar os carregamentos hidrodinâmicos inerentes ao local e tantos outros fatores, já citados anteriormente.

Caso esses fatores não sejam bem dimensionados pode se iniciar uma fissura na estrutura da cabeça de poço, ou então o aumento de uma pré-existente, e caso aumente e se torne uma trinca, considera-se a ocorrência de fadiga. Essas fissuras devem ocorrer em pontos críticos da estrutura, ou seja, em regiões de alteração da geometria ou da composição do material.

Resultados

Para desenvolver o estudo foram utilizados valores de tensão do trabalho de AUAD (2022) simulados a partir de parâmetros reais da movimentação da plataforma no mar. Essa movimentação se propaga para o *riser* e gera uma tensão sobre o BOP, que por sua vez transmite à cabeça de poço. Essa tensão exercida sobre a cabeça de poço, considerando que esta tenha três metros de altura a partir do solo marinho, é representada pela Figura 1.

Figura 1 - Valores de tensão e tempo utilizados.



Sobre o carregamento dado na Figura 1 pode-se afirmar que é não uniforme, já que os ciclos não obedecem ao critério de simetria e não possuem variações constantes de tensão, mas têm diferentes valores da componente média de tensão. Por meio do método de *Rainflow Counting* obteve-se um carregamento alternado simétrico com componente média igual a zero e equivalente em amplitude ao carregamento anterior.

Para obter a resistência a fadiga correspondente a um determinado número de ciclos utilizou-se a curva de *Goodman* modificada da seguinte forma:

$$\sigma_a = S_n \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right) \Rightarrow S_n = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right)} \quad (1)$$

Onde n pode assumir vida finita ou infinita, S_{ut} representa o limite de ruptura a tração, σ_m equivale a média da tensão dos dois primeiros pontos do ciclo, σ_a corresponde a diferença entre a tensão em um dos dois primeiros pontos e S_n equivale a componente alternada da tensão.

Para resolver os problemas deste trabalho foram consideradas as constantes da Tabela 1.

Tabela 1 - Valores assumidos para algumas constantes

Constante	Valor
S_{ut} [MPa]	520,0
S_m [MPa]	468,0
S_e [MPa]	109,2

O limite de fadiga (S_e) equivale ao nível de tensão abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, mesmo que por tempo indefinido. Enquanto S_m corresponde ao nível de resistência do material – o limite de fadiga para um milhão de ciclos submetido a tensão – e foi aproximado para 90% do valor de resistência a tração (S_{ut}).

O método de *Rainflow Counting* foi aplicado e encontram-se na Tabela 2 os ciclos extraídos.

Tabela 2 - Resultado da aplicação do método de Rainflow Counting e da equação da curva de Goodman.

Ciclo	Ciclos extraídos [MPa]								
	De	Para	Faixa	σ_m	σ_a	S_n	$S_n \cdot 10$	$S_n \cdot 24$	
1	173,5	179,3	5,8	176,4	2,9	4,4	44,1	105,9	
2	167,3	165,7	1,6	166,5	0,8	1,2	11,8	28,4	
3	172,6	167,3	5,3	169,9	2,6	3,9	39,3	94,4	
4	180,2	164,8	15,3	172,5	7,7	11,5	114,8	275,5	
5	174,0	166,8	7,2	170,4	3,6	5,3	53,3	127,8	
6	172,6	169,1	3,5	170,9	1,7	2,6	25,8	61,8	
7	195,3	170,3	25,0	182,8	12,5	19,3	193,1	463,5	
8	172,5	166,1	6,5	169,3	3,2	4,8	48,1	115,4	
9	171,4	169,0	2,4	170,2	1,2	1,8	17,6	42,2	
10	170,1	168,8	1,3	169,4	0,6	0,9	9,5	22,7	
11	187,8	168,9	18,9	178,3	9,5	14,4	143,9	345,4	
12	169,9	169,0	0,8	169,4	0,4	0,6	6,3	15,1	
13	169,3	182,1	12,8	175,7	6,4	9,6	96,3	231,1	
14	167,9	169,0	1,1	168,5	0,6	0,8	8,2	19,7	

Nas últimas duas colunas da Tabela 2 temos os valores da componente alternada da tensão multiplicados por 10 e por 24, respectivamente. Isso foi feito para que se tornasse possível o estudo do número de ciclos até a fadiga, de forma que houvesse alguns valores superiores ao limite de fadiga para um milhão de ciclos e inferiores ao limite de resistência a tração.

Se os valores da componente alternada fossem multiplicados por um fator inferior a 9, não haveriam nem três ciclos para simular; por outro lado, foi escolhido um outro fator multiplicativo bem elevado para a componente alternada de tensão, mas que não excedesse o nível de resistência do material em mil ciclos, S_m . Em função dessas alterações de grandeza numérica o problema passou a ter um caráter de simulação exclusivamente, sem se aproximar de valores absolutos de uma situação real.

Para encontrar o número de ciclos em um determinado nível de tensão até a fadiga foi utilizada a Equação 2:

$$S_n = a \cdot N^b \quad (2)$$

As constantes a e b são calculadas a partir de S_m e S_e , assim tem-se: $a = 2005,7143$; $b = -0,2107$. Utilizando os valores da coluna $Sn^{*}10$ da Tabela 2, considerando quatro casas decimais desse número, a partir da Regra de *Palmgren-Miner*, chegou-se ao seguinte resultado, exposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Frações de vida consumidos obtidos por *Palmgren-Miner* com $Sn^{*}10$.

Tensão [MPa]	Qtd. picos	Ciclos	Frações da eq.
114,7811	1	824.487,79	$1,21 \cdot 10^{-6}$
193,1055	1	69.239,58	$1,44 \cdot 10^{-5}$
143,9140	1	280.808,11	$3,56 \cdot 10^{-6}$
Soma total	3		$1,92 \cdot 10^{-5}$

De forma análoga, foi aplicada a mesma metodologia para $Sn^{*}24$ da Tabela 3 e chegou-se ao resultado exposto na Tabela 4.

Tabela 4 - Frações de vida consumidos obtidos por *Palmgren-Miner* com $Sn^{*}24$.

Tensão [MPa]	Qtd. picos	Ciclos	Frações da eq.
275,4746	1	12754,25	$7,84 \cdot 10^{-5}$
127,8103	1	12754,25	$7,84 \cdot 10^{-5}$
463,4533	1	1071,09	$9,34 \cdot 10^{-4}$
115,3903	1	803964,72	$1,24 \cdot 10^{-6}$
345,3936	1	4343,90	$2,30 \cdot 10^{-4}$
231,1362	1	29415,53	$3,40 \cdot 10^{-5}$
Soma total	6		$1,36 \cdot 10^{-3}$

Por fim, são apresentadas na Tabela 5 o tempo para a vida ser consumida em cada caso.

Tabela 5 – Vida consumida nos dois casos.

Quando $Sn^{*}10$		Quando $Sn^{*}24$	
Vida	Unidade	Vida	Unidade
4.683.443	s	66.377	s
78.057	min	1.106	min
1.300	horas	18	horas
54	dias	1	dias

No caso em que $Sn^{*}10$ o resultado é de 54 dias para que ocorra a fadiga, já quando $Sn^{*}24$ tem-se um dia até a fadiga. Nota-se, a partir disso, que quanto maiores as tensões iniciais do problema ao qual está submetido o sistema de cabeça de poço, maior a componente alternada de tensão, maior o número de picos de fadiga e mais rapidamente a vida é consumida. Como em casos reais a cabeça de poço deve se sustentar sem falhas por todo o tempo de exploração e produção do poço, esse problema passa a ter um caráter exclusivamente de simulação.

Conclusão

Diante da realidade dinâmica pelas operações de exploração e produção e pelo ambiente em que ocorrem, este trabalho estudou os esforços que ocorrem na cabeça de poço, a origem deles e seus efeitos, por meio da Teoria de *Miner* e do Algoritmo de *Rainflow Counting*.

Foram apresentadas de forma breve algumas teorias importantes para este trabalho: *Palmgren-Miner*, *Rainflow Counting* e Método dos Elementos Finitos. Por último foram levantados fatores que influenciam as tensões na cabeça de poço.

A simulação feita partiu de dados reais, no entanto, por um fator multiplicativo passou a não ter valores de grandeza real. Mesmo assim pode-se constatar que quanto maior a tensão aplicada, maiores as tensões alternadas, e maior a quantidade de picos que gerem fadiga, e menor o tempo de vida da peça até que ocorra a fadiga e isso ocorre de forma não linear, pois a medida que multiplicamos por 2,4 a componente alternada da tensão para obter o segundo caso, no qual $S_n \times 24$, a fração consumida se torna 54 vezes menor para o mesmo tempo.

Sugere-se o estudo, em trabalhos futuros, de outros fatores e equipamentos que compõem o sistema de produção e possivelmente prever a fadiga.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Inclinação Anormal de Cabeça de Poço. **Incidentes - Alerta de Segurança - ANP/SSM**. Rio de Janeiro, jul. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/incidentes/arquivos-alertas-de-seguranca/alerta-06/alerta-de-seguranca_006_ssm_inclinacao-anormal-de-cabeca-de-poco.pdf. Acesso em: 22 mai. 2022.
- AUAD, Isabella Tomasella. Relatório Técnico Interno, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola Politécnica da USP, 2022.
- ISO 13628-7:2005**, Petroleum and natural gas industries — Design and operation of subsea production systems — Part 7: Completion/workover riser systems, Genebra, nov. 2005, 242 p. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/24210.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design**. 6. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2017. ISBN: 978-1-118-98768-1(PBK).
- LEE, Y.L.; TJHUNG, T. **Rainflow Cycle Counting Techniques**. In: METAL FATIGUE ANALYSIS HANDBOOK, Elsevier, 2020, p. 89–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385204-5.00003-3>.
- ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais**, Florianópolis: Grupo de Análise e Projeto Mecânico, 2002, p.223-276. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5643118/mod_resource/content/1/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf. Acesso em: 23 mai. 2022.