



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA TESTES DE
FRICÇÃO FADIGA DE ARAMES

POR

JOSÉ ANTÔNIO PRADO VIANA SANTOS

SÃO CRISTÓVÃO – SERGIPE

DEZEMBRO DE 2023

JOSÉ ANTÔNIO PRADO VIANA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA TESTES DE
FRICÇÃO FADIGA DE ARAMES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Sergipe, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Griza

São Cristóvão – Sergipe

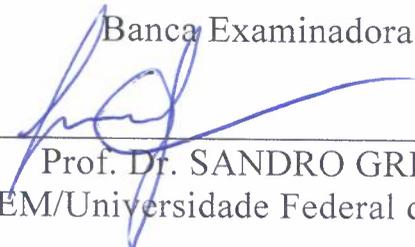
Dezembro de 2023

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA TESTES DE FRICÇÃO FADIGA
DE ARAMES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

APRESENTADO EM DEZEMBRO DE 2023

Banca Examinadora



Prof. Dr. SANDRO GRIZA
DCEM/Universidade Federal de Sergipe



MSc. BRENNO LIMA NASCIMENTO
DCEM/Universidade Federal de Sergipe



Dr. GUSTAVO DÓRIA LIMA
DCEM/Universidade Federal de Sergipe

SÃO CRISTÓVÃO – SERGIPE

DEZEMBRO DE 2023

RESUMO

O fenômeno da fricção fadiga está presente em vários equipamentos da engenharia, uma vez que é comum possuírem componentes que estão em contato sob pressão entre as superfícies e que sofrem pequenos deslizamentos cíclicos. O processo por exemplo acomete os arames da armadura de tração dos umbilicais submarinos. O presente estudo objetiva o desenvolvimento de um dispositivo capaz de promover a fricção fadiga em corpos de prova de arames da armadura de umbilicais submarinos. O arame empregado na confecção do dispositivo foi o mesmo utilizado como corpo de prova, tendo diâmetro de 6 mm, médio teor de carbono, deformado a frio e com camada de zinco depositada sobre a superfície. Para a criação do dispositivo, observou-se o seu modo de solicitação e foi calculada a tensão de flexão correspondente ao esforço, que não pode ser maior que a tensão de escoamento do material para não acumular deformações plásticas no dispositivo. Através da comparação das curvas S-N construídas, constatou-se que o dispositivo não foi efetivo para influenciar na resistência à fadiga do material, salvo no patamar de menor tensão aplicada. Em seguida, através das imagens microscópicas foi constatado que o dano causado pelo dispositivo nos corpos de prova não foi suficiente para ultrapassar a camada de zinco do material. Os resultados indicaram que o dispositivo promoveu um dano leve que não foi o suficiente para promover a diminuição da resistência à fadiga do material na maioria dos patamares de tensão cíclica.

Palavras chaves: Dispositivo, fricção fadiga, armadura de tração, arames, umbilicais

ABSTRACT

The phenomenon of fatigue friction is present in various engineering equipment, since it is common to have components that are in contact under pressure between surfaces and that suffer small cyclic slips. The process, for example, affects the tension armature wires of submarine umbilicals. The present study aims to develop a device capable of promoting fatigue friction in test specimens of submarine umbilical armor wires. The wire used to make the device was the same as that used as a test specimen, with a diameter of 6 mm, medium carbon content, cold deformed and with a zinc layer deposited on the surface. To create the device, its stress mode was observed and the bending stress corresponding to the effort was calculated, which cannot be greater than the yield stress of the material to avoid accumulating plastic deformations in the device. By comparing the constructed S-N curves, it was found that the device was not effective in influencing the fatigue resistance of the material, except at the lowest applied voltage level. Then, through microscopic images, it was found that the damage caused by the device to the test specimens was not enough to overcome the zinc layer of the material. The results indicated that the device caused slight damage that was not enough to promote a decrease in the material's fatigue resistance at most cyclic stress levels.

Keywords: device, friction fatigue, tensile armor, wires, umbilicals

Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo Geral	9
2.2 Objetivos Específicos	9
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
3.1 Umbilicais submarinos	10
3.2 Arames de tração	11
3.3 Tensão de contato	12
3.4 Fadiga	13
3.5 Diagramas de Wohler – curvas S-N	18
3.6 Fadiga por fricção.....	19
3.7 Camada de zinco.....	22
4 METODOLOGIA	24
4.1 Materiais	24
4.2 Métodos	24
4.2.1 Tração	24
4.2.2 Desenvolvimento do dispositivo.....	25
4.2.3 Fadiga.....	27
4.2.4 Técnicas de microscopia	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Tração	30
5.2 Desenvolvimento do dispositivo	30
5.3 Fadiga	31
5.4 Fractografia das amostras	34
5.4.1 Avaliação da superfície do dano	34

5.4.2	Profundidade do dano	37
6	CONCLUSÃO	43
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
8	REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a exploração de petróleo vem acontecendo em ambientes de difícil acesso, quando comparados ao final do século passado. O grande exemplo brasileiro desse fenômeno aconteceu no ano de 2006, com a descoberta de grandes reservas de petróleo na camada de pré-sal, impulsionando o desenvolvimento tecnológico da indústria petrolífera, a dispor no mercado, o produto que ainda é bastante solicitado em larga escala mundial [1]. Diante disso, é necessário otimizar ainda mais os equipamentos presentes nesse sistema de exploração, como o umbilical submarino.

O umbilical submarino tem grande importância na exploração de petróleo porque é essencial no controle de produção, sendo responsável por unir as unidades que estão na superfície, como os navios *floating, production, storage and offloading* (FPSOs) e as plataformas fixas, ao maquinário que está no fundo do mar. Os umbilicais são formados por um conjunto de cabos eletro-hidráulicos, dentre eles temos os cabos de fibra óptica, tubos de aço ou poliméricos e cabos elétricos, que possuem a finalidade de fornecer a comunicação remota dos equipamentos que estão instalados no fundo do oceano. Além dos dispositivos funcionais, que foram mencionados anteriormente, os umbilicais possuem uma armadura de tração composta por arames que fica abaixo da camada de polímero externa e que atua como componente estrutural [2,3].

Quando se fala dos componentes estruturais presentes nos umbilicais, os arames de aço que compõem a armadura de tração são os destaques, tendo em vista que desempenham a função de resistir aos esforços axiais provenientes do processo de produção e das correntes marítimas [4]. Esses arames geralmente são fabricados a partir do processo de trefilação e posteriormente se deposita sobre a sua superfície a camada galvânica, com a finalidade de proteger os arames contra a corrosão [5,6].

Nos umbilicais, os arames são dispostos de forma helicoidal em volta do duto, com angulação entre 20 ° a 60°, são enrolados em volta do duto e podem possuir até quatro camadas [7]. Dessa maneira, os arames além de sofrerem os esforços que já foram mencionados sofrem também o processo de fricção devido a forma que estão organizados.

Os umbilicais sofrem esforços cíclicos, dessa maneira, podem sofrer o fenômeno da fadiga. Os testes de fadiga em todo o umbilical tornam-se custosos devido a grande dificuldade de execução. Para tanto, aconselha-se que antes de realizar ensaios de fadiga em segmentos do umbilical completamente montado, os testes aconteçam em seus vários

componentes, como por exemplo: os arames da armadura de tração individualmente. Dessa maneira, testes de fadiga nos arames acabam se tornando essenciais para qualificar a matéria-prima utilizada no processo de fabricação dos materiais e comprovar a confiabilidade de um dos componentes estruturais mais importante do umbilical submarino [8,9].

O modo como os fios estão organizados nos umbilicais, acrescido dos esforços que ocorrem no sistema, pode ocasionar o fenômeno da fadiga por fricção (fretting fatigue). Conceitualmente, a fadiga por fricção acontece quando ocorre um pequeno movimento cíclico de deslizamento relativo entre as superfícies em contato juntamente com a tensão de contato por atrito entre os membros [10]. Alguns estudos associam o fenômeno da fadiga por fricção com a diminuição da resistência à fadiga do material, como por exemplo o estudo de Rossino [11].

Diante do que foi exposto, o presente estudo tem como finalidade investigar aspectos associados a fadiga por fricção em arames de alta resistência mecânica que são utilizados em umbilicais submarinos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo capaz de produzir nos corpos de provas ensaiados o fenômeno de fricção, para que a partir dessa condição seja estudada a fricção fadiga dos arames testados.

2.2 Objetivos Específicos

Desenvolver o dispositivo que seja eficiente para reproduzir a fricção em corpos de prova submetidos a fadiga em flexão.

Determinar resistência à fadiga dos arames no ensaio de flexão de três pontos, dos corpos de prova livres (sem dispositivo de fricção) e dos corpos de prova ensaiados com o dispositivo de fricção embarcado, comparando as curvas obtidas anteriormente para saber se houve significativa diferença na resistência à fadiga dos materiais estudados.

Avaliar os micromecanismos superficiais dos corpos de provas que foram submetidos a fricção fadiga, com o intuito de conhecer o que o fenômeno causou e verificar a efetividade dos experimentos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Umbilicais submarinos

Os umbilicais submarinos estão sendo cada vez mais utilizados na exploração de petróleo e gás natural, tendo em vista que as reservas situadas em locais de fácil acesso estão escassas. Diante da necessidade da extração em ambientes difíceis, como em águas ultraprofundas, existe a crescente procura por inovação e aperfeiçoamento dos equipamentos e componentes utilizados na exploração; sobretudo para dirimir fatores que podem inviabilizar a produção. Dentre os fatores, pode-se citar a degradação de componentes devido a agressividade do meio, os carregamentos do ambiente marítimo, bem como os esforços dinâmicos e estáticos nos equipamentos que fazem a comunicação e retirada do fluido [12].

Os umbilicais submarinos podem ser conceituados como um conjunto de cabos compósitos contendo elementos funcionais e estruturais, que possui a finalidade de articular os vários componentes presentes no sistema e também, proporcionar que seja possível controlá-los de forma remota [4].

Os tamanhos dos umbilicais submarinos são variados, podendo atingir quilômetros de distância, quando estabelecem comunicação com dispositivos distantes da unidade de produção. Vale salientar que por ser muitas vezes um equipamento instalado nos leitos submarinos, a inspeção ou o reparo são dispendiosos, dessa maneira, é necessário que a segurança nos sistemas envolvendo esses instrumentos sejam elevados [4].

Os elementos que compõem o umbilical podem ser classificados como funcionais e estruturais. Dentre os elementos funcionais, encontram-se: os cabos com a fibra óptica, cabos de energia, mangueiras hidráulicas e um conjunto de tubos de aço, os quais são responsáveis pela injeção de fluidos, transmissão de energia e comunicação entre a plataforma/navio sonda até o leito oceânico [13]. A Figura 1 mostra a região interna do equipamento, a fim de exemplificar e ilustrar o modo como se organiza os elementos presentes nos umbilicais.

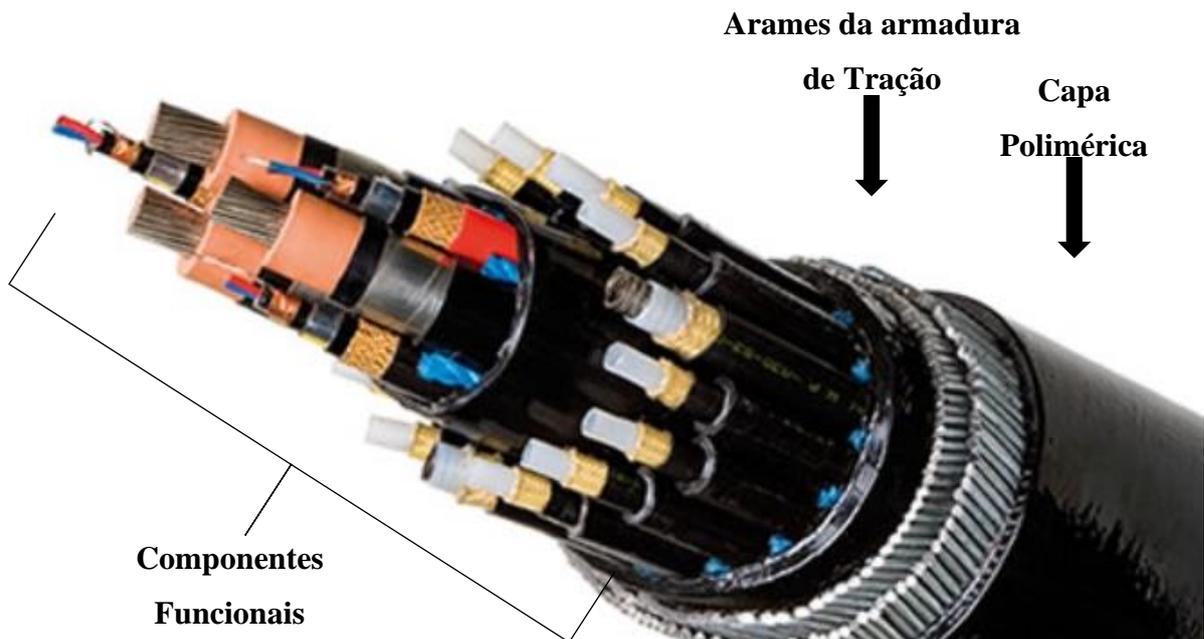


Figura 1: Umbilical submarino contendo seus vários elementos funcionais e estruturais. Adaptado [14].

Os elementos estruturais, conhecidos como armaduras de tração, por sua vez, são compostos por arames de aço carbono e são responsáveis por promover a resistência dos umbilicais aos esforços externos que eles são submetidos [15].

3.2 Arames de tração

De acordo com a literatura, os arames da camada mais externa presente nos umbilicais submarinos são os responsáveis por suportar as grandes cargas de tração e de torção que estão presentes nesses equipamentos. Dessa maneira, as armaduras de tração são feitas por pares de camadas de arames de aço carbono que contêm elevada resistência mecânica. Vale ponderar que eles são montados na forma helicoidal e tem sentidos opostos entre as camadas, com o intuito de amenizar o fenômeno da deformação por torção, que pode ocorrer quando os umbilicais estiverem em operação [16].

Os arames da armadura de tração são colocados em uma faixa de angulação de 20° a 60°. O seu modo de fabricação consiste em enrolar os arames que vêm de bobinas ao redor do duto responsável pela linha de produção. Esse processo é exemplificado pela Figura 2, que mostra como está sendo assentada a armadura de tração após a passagem do núcleo flexível do umbilical [7].



Figura 2: Etapa de enrolamento dos arames da armadura de tração na fabricação do umbilical [7].

O aço é o material dos arames utilizado nessa aplicação. Vale realçar que o aço contendo elevado teor de carbono é usado quando a aplicação necessita de altos valores de resistência mecânica, muitas das vezes utilizados em componentes que irão sofrer elevadas pressões. O aço de médio e baixo teor de carbono são utilizados em ambientes mais agressivos, como na exploração do ambiente marinho, na passagem de óleo e gases [17]. Em função da organização de montagem, a superfície das camadas de arames sobrepostas permanece em constante contato e o movimento relativo entre elas que pode resultar em atrito ou desgaste.

3.3 Tensão de contato

De acordo com Budynas e Nisbett [18], quando dois corpos de superfícies curvas são pressionados um contra o outro, o contato inicialmente pontual ou linear passa a ser um contato de área por causa da deformação dos corpos em contato, mesmo em regime elástico. A partir da ocorrência desse fenômeno, é possível perceber o surgimento de falhas nas superfícies dos materiais, como trincas, cavidades e outras [18].

As tensões de contato podem ser separadas em dois grupos, sendo elas as tensões de contatos esféricos e a tensão de contato cilíndrico. Destaca-se que o estudioso que formulou as equações matemáticas e o desenvolvimento do tema foi Hertz, e por causa disso, muitas vezes o assunto acaba sendo intitulado de tensões hertzianas [18].

Em relação ao contato esférico (Figura 3), objeto do presente estudo, esse tipo de tensão envolve o contato dos arames presentes na armadura de tração dos umbilicais do sistema. A partir da conceituação e da Equação (1), é possível estimar o valor da área de contato, quando se conhece os diâmetros dos dois materiais (d_1 e d_2) e o comprimento (l).

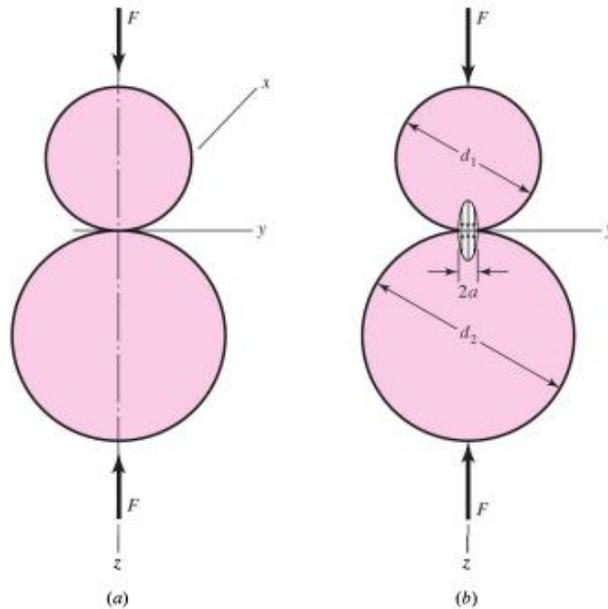


Figura 3 (a) e (b): Exemplificação do contato esférico entre dois componentes [18].

$$a = 3 \sqrt{\frac{3F (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{8 (1/d_1 + 1/d_2)}} \quad (1)$$

Além de determinar a área de contato circular envolvendo dois corpos cilíndricos, é possível ainda obter a pressão máxima através da Equação (2).

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{3F}{2\pi a^2} \quad (2)$$

3.4 Fadiga

Segundo a literatura, atualmente cerca de 90% das falhas dos componentes metálicos são ocasionadas devido à fadiga. Quando as fraturas dessas falhas, há muitos

anos, quando foram vistas pelas primeiras vezes, elas destoavam daquelas observadas comumente pelos estudiosos, pois na maioria dos casos elas aconteciam de forma inesperada em valores de tensão significativamente menor daqueles indicados no limite de escoamento do material [19,20].

Por conta desse elevado número de sucessivas falhas em equipamentos metálicos, que aumentaram com o aumento da quantidade dos componentes mecânicos em operação e com a redução da seção resistente das peças fabricadas para melhorar a eficiência dos sistemas, foi constatado que não seria interessante trabalhar nos novos projetos levando em consideração apenas os componentes estáticos, uma vez que a segurança e a confiabilidade do projeto não estariam condizentes com o que é solicitado na realidade [20].

A fadiga pode ser conceituada como um mecanismo de falha que acontece de forma progressiva quando um material sofre a ação de cargas cíclicas, gerando tensões positivas oscilante ao longo do tempo até sofrer uma ruptura de forma repentina. [21].

De acordo com a literatura, a falha por fadiga apresenta, na maioria das vezes, três estágios, sendo eles denominados de nucleação (início da trinca), propagação e ruptura final. Os três estágios são ilustrados de forma macroscópica, na Figura 4 [22].



Figura 4: Imagem da superfície de fratura de um componente metálico que fraturou devido ao processo de fadiga, evidenciando as três regiões características: nucleação da trinca (A), propagação (B) e ruptura catastrófica (C). Embora muitas vezes seja possível identificar a região de nucleação da fadiga, por causa da deformação de marca radial (marca de catraca, indicada na figura), o local onde ocorre a nucleação em si é geralmente microscópico ou mesmo sub-microscópico, não sendo visível em escala macroscópica. Fonte: Própria, 2023.

Segundo a literatura, muitas trincas por fadiga iniciam na superfície do material. O fenômeno é justificado por causa da facilidade do rompimento das ligações atômicas na superfície do material quando comparado a separação das ligações dos átomos mais internos, e também, pelos contornos de grãos da superfície mostrarem deformação plástica localizada [19]. Além disso, na superfície é possível a atuação do estado plano de tensões que resulta em componentes cisalhantes que são responsáveis pela formação de bandas persistentes de discordâncias em deslocamento.

Segundo Wallauer [7], a iniciação de uma trinca de fadiga, é, em geral, consequência dos escorregamentos cíclicos em bandas de deslizamento. A consequência desses escorregamentos é o surgimento da deformação plástica, ainda que aconteça em escala muito pequena, como, em especial, o movimento das discordâncias dos materiais. As tensões responsáveis por condicionar o surgimento desse fenômeno são as tensões cisalhantes, que do ponto de vista microscópico não apresentam total homogeneidade microestrutural, pois, as orientações cristalográficas dos grãos são heterogêneas, gerando assim diferença entre os planos e promovendo o surgimento de trincas [7].

Na Figura 5, são mostradas as intrusões e extrusões geradas através do escorregamento cíclico bem como a formação dos “degraus”, que alteram a rugosidade superficial e favorecem a iniciação da trinca.

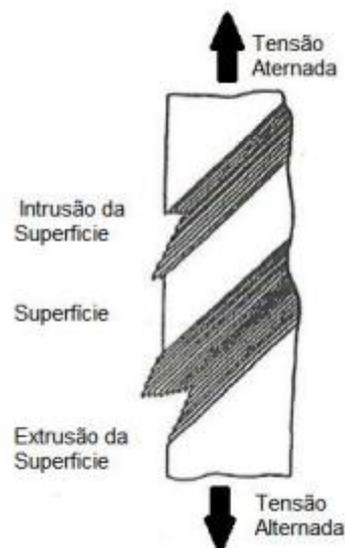


Figura 5: Ilustração do escorregamento das bandas de deslizamento [19].

O início do processo é caracterizado pelo crescimento da microtrinca seguindo a direção de 45° , tendo como agente precursor a tensão normal principal. Destaca-se que

esta etapa é intimamente relacionada a microestrutura do material. O segundo estágio é a fase da propagação da trinca. À medida que o processo vai se desenvolvendo, a trinca muda de sentido, deixando de possuir a direção de 45° e assumindo a direção do plano perpendicular a tensão principal. Vale destacar que nesta etapa é comum observar fenômenos bem característicos, como por exemplo: as estrias de fadiga (não visíveis a olho nu) e marcas de praia (visíveis a olho nu) e etc [23].

Por fim, ocorre a ruptura final do componente. Ela é associada ao crescimento desordenado da trinca, ou seja, a partir do momento em que a trinca ultrapassa o tamanho crítico, ela passa a crescer exponencialmente em poucos ciclos até atingir o fator crítico de intensidade de tensões que promove a fratura final [7].

O ensaio de fadiga é realizado em projetos com a finalidade de estudar a falha estrutural dos elementos por fadiga. Várias normas regem esses ensaios, como por exemplo a ASTM E739, que objetiva mensurar a resistência à fadiga dos materiais metálicos através da aplicação de tensões cíclicas tanto no ensaio axial, de flexão (que foi adotado no presente estudo) e vários outros, bem como a DNV-RP-C203, norma importante para o direcionamento do projeto de umbilicais levando em consideração a fadiga [9,24].

No ensaio de fadiga, algumas métricas e definições são interessantes para melhor compreensão do estudo. Através da Figura 6, é possível observar uma curva senoidal em que há a variação da tensão mecânica em função do tempo.

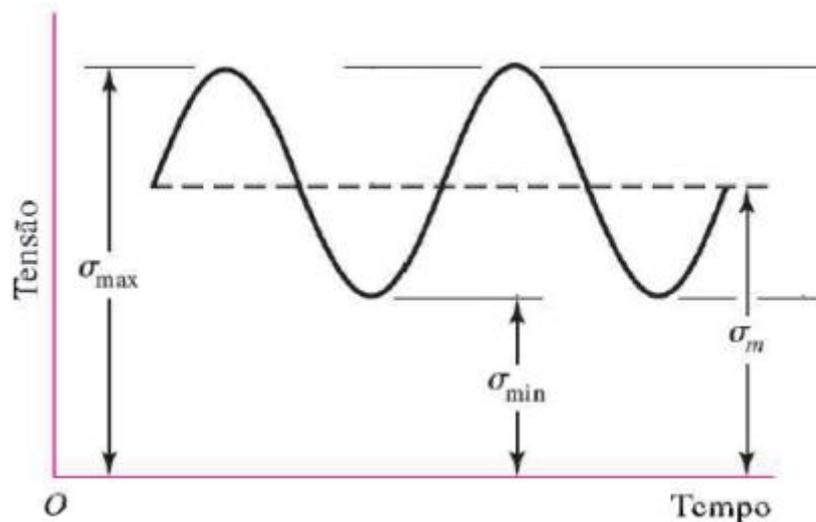


Figura 6: Tensões cíclicas na forma senoidal [20].

A partir da Figura 6 é possível extrair algumas informações, como: tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), tensão mínima (σ_{min}), tensão média (σ_m) (Equação 3) e a tensão alternante (σ_a) (Equação 4).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{min}}}{2} \quad (3)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{min}}}{2} \quad (4)$$

Além dos termos explanados anteriormente, outra métrica relevante para o estudo é, como a razão de carregamento (R) que é definida pela (Equação 5). O valor dessa razão pode ser positivo, negativo ou nulo, ficando sempre no intervalo de -1 a 1.

$$R = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{min}}} \quad (5)$$

O primeiro caso a ser descrito é quando $R=0$, para o qual temos apenas tensões máximas, pois, a mínima é igual a 0, fenômeno denominado de solitação cíclica repetida. Para o caso de $R=-1$, a carga máxima é igual a carga mínima em módulo, mas de sinais contrários, a solitação é chamada de alternante e a tensão média é nula. O caso geral é no intervalo $0 < R < 1$, quando ocorre solitação cíclica flutuante e o carregamento ali aplicado é somente de tração. Essas análises também se aplicam no caso inverso, tanto para solitação cíclica repetida quanto para as infinitas flutuantes, ou seja, as que ocorrem quando há R menor que zero. A Figura 7 retrata alguns exemplos da mudança da razão de carregamento em gráfico tensão por tempo [25].

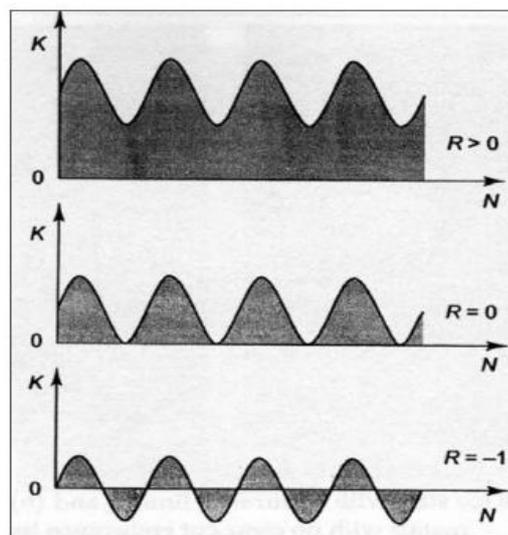


Figura 7: Representação de exemplos de razão de carregamento [25].

3.5 Diagramas de Wohler – curvas S-N

A curva S-N pode ser considerada um modo de observação do comportamento em fadiga do material. Os eixos da curva consistem na tensão pelo número de ciclos. Vale evidenciar que o número de ciclos é inversamente proporcional a tensão alternante que está sendo aplicada no material [26].

Os gráficos, muitas vezes, são divididos em duas regiões: a primeira conceituada como o lugar da resistência à fadiga, definida como sendo o nível de tensão cíclica abaixo do qual espera-se com um determinado intervalo de confiança que o material venha a falhar depois de um determinado número de ciclos, e o limite de fadiga, definido como o nível de tensão cíclica abaixo do qual espera-se que o material não venha a falhar independentemente do número de ciclos. A Figura 8 ilustra a curva S-N contendo os dois conceitos abordados anteriormente [27].

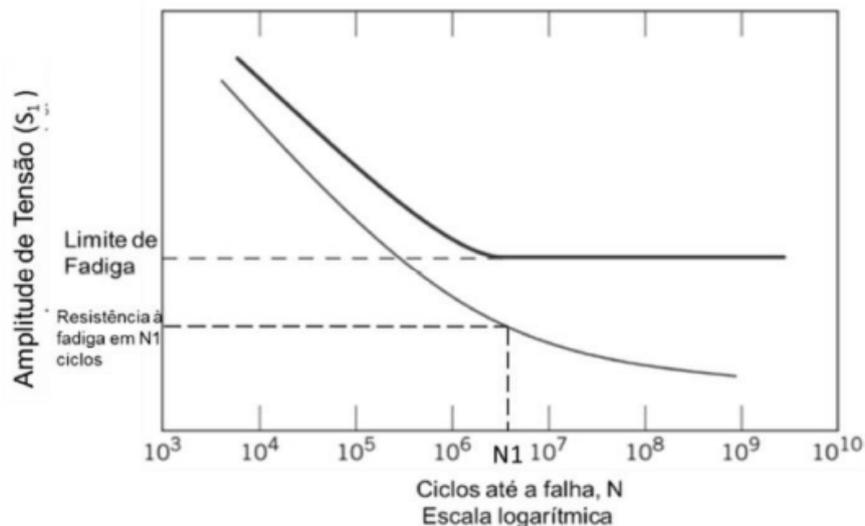


Figura 8: Representação das curvas de Wohler, também conhecidas como curva S-N [18].

Na prática, a distinção entre a resistência à fadiga e o limite de fadiga nem sempre é fácil. O fenômeno descrito anteriormente está intimamente relacionado ao material que está sendo estudado, mais especificamente a sua estrutura cristalina, a qual determina a quantidade de planos preferenciais de escorregamento. Em alguns materiais como os aços e o titânio (CCC, HC), a curva S-N é bem definida e se distingue essas duas métricas com facilidade. No entanto, para ligas de materiais não ferrosos, como alumínio e ligas de cobre (CFC), não é possível atingir o limite de fadiga do material antes de números de

ciclos muito elevados, acima de 10^{10} ciclos, pois a curva decresce constantemente e não assume característica horizontal. Para esta última situação, caracteriza-se o limite de fadiga do material como sendo a resistência à fadiga para um número definido de ciclos, geralmente 10^8 ciclos [18,20].

A Figura 8 acaba exemplificando os casos mencionados anteriormente, sendo que a primeira curva (curva localizada na parte superior do gráfico) retrata a situação dos materiais de fácil observação do “ponto de joelho” e a segunda curva (curva localizada na parte inferior do gráfico) mostra materiais geralmente não ferrosos.

3.6 Fadiga por fricção

Os componentes que são montados nos processos de engenharia, apresentam o contato entre as superfícies e eventualmente sofrem vibrações ou micromovimentos relativos. A engenharia disponibiliza muitos conjuntos desse tipo, como por exemplos: as engrenagens, rolamentos, eixos e mancais, parafusos. Vale salientar que na atualidade, os estudos dos componentes que são solicitados diariamente com essa aplicação específica já levam em consideração a mecânica do contato. No entanto, é importante evoluir ainda mais no tema para mitigar as falhas em serviço [28].

De acordo com Rossino et al [11], a fadiga por *fretting* (ou fricção fadiga) pode ser conceituada como aquela em que acontece pequenos deslizamentos cíclicos entre duas superfícies que estão em contato sob pressão, propiciando a nucleação de trincas. A formação das trincas acontece devido a ação dos carregamentos cíclicos aplicados no sistema, que podem evoluir até sua propagação e a fratura do componente [11].

O estudo sobre o assunto evoluiu ao longo do tempo, sendo que no ano de 1911, foi definido o termo *fretting* por Eden et al [28]. À medida que o tempo foi passando, em 1941, Warlow – Davis [28] descobriu que dispositivos submetidos a fricção e depois solicitados com esforços cíclicos, tinham sua resistência à fadiga diminuída entre 13 e 17%. Outro estudioso que observou a redução de até 80% na resistência à fadiga do material foi McDowell [28], comparando corpos de prova submetidos a fadiga convencional com a fricção fadiga. Foi comprovado no ano de 1973, por Bramhall [28], que o tamanho do contato influenciava na vida em fadiga do material [28].

A Figura 9 exemplifica o que foi apresentado anteriormente, em que o autor comparou a curva de resistência a fadiga de fios de alumínio 6201 com outras curvas do mesmo material, só que submetido ao processo de fricção fadiga [29].

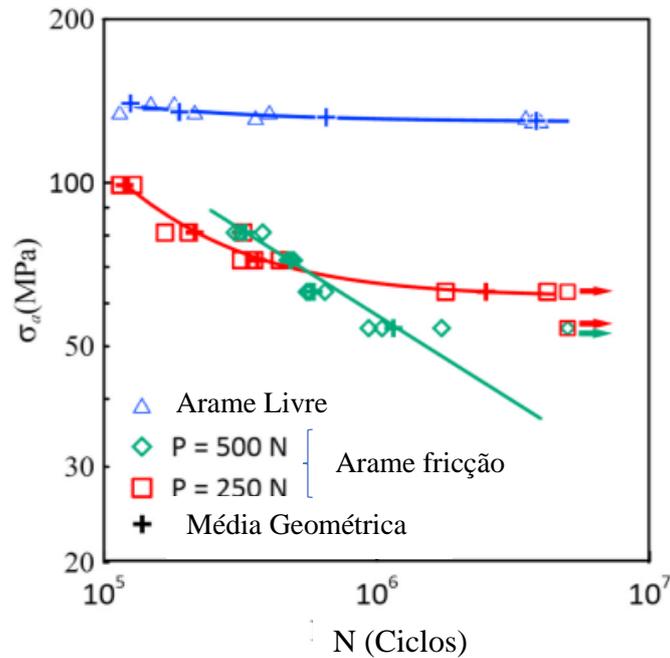


Figura 9: Curvas de resistência à fadiga do arame de alumínio 6201 livre (sem fricção) e com fricção para diferentes cargas de contato (500N e 250N). Adaptado [29].

O fenômeno da fricção fadiga ocorre de forma simultânea no material, sendo que por conta disso, pode ser descrita a (Equação 6). Na equação, percebe-se que o resultado final, evidenciado pelo grau de degradação (D), é proveniente do somatório da carga axial (F_{La}), normal e tangencial ($FF_{Fm, Ft}$), a influência do desgaste (W) e o fator sinérgico entre fricção, fadiga e desgaste ($S_{F, FF, W}$) [30].

$$D = F_{La} + FF_{Fm, Ft} + S_{F, FF, W} + W \quad (6)$$

A título de exemplificação, a diferença de fricção, fadiga e fadiga por fricção, é mostrada na Figura 10. De acordo com a interpretação da imagem, na fadiga por fricção, há a soma envolvendo as tensões globais oriundas da tensão (σ), e as tensões locais inseridas pela força normal (N), que geralmente é constante, e pela força tangencial (Q), muitas vezes variável [30].

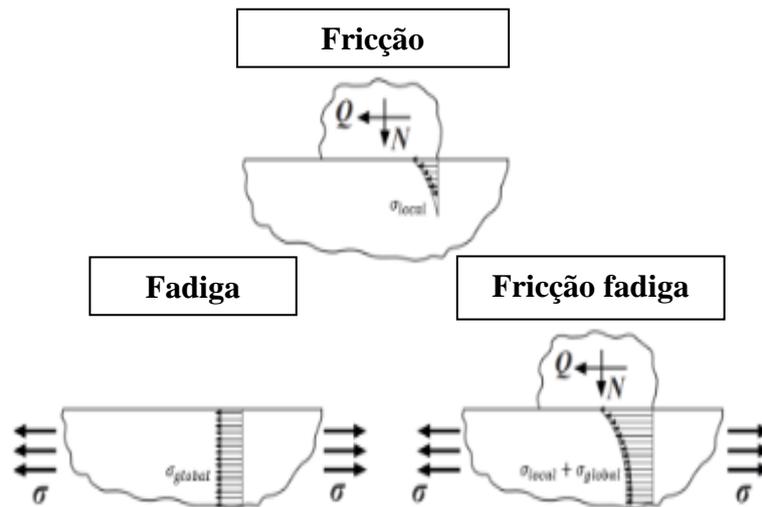


Figura 10: Representação das diferenças entre fadiga, fricção e fricção fadiga. Adaptado [30].

Entrando na especificidade da fricção fadiga, tem-se que as tensões cisalhantes surgem da força tangencial. Na maioria das vezes, as tensões cisalhantes são menores que o limite para o carregamento total, o que implica dizer que há neste fenômeno um desenvolvimento de um regime de escorregamento parcial [31].

No processo de fricção, existe a alteração do regime de escoamento grosseiro, para o regime de escoamento parcial [32]. Na Figura 11, são mostradas as duas zonas presentes no regime de escoamento parcial, sendo elas: zona de escorregamento e zona de adesão.

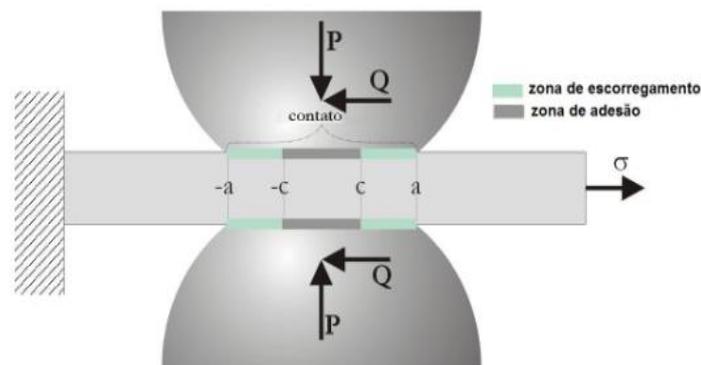


Figura 11: Representação das duas zonas presentes no regime de deslizamento parcial [31].

A fricção cíclica pode formar um dano inicial na superfície que está em contato e favorecerá a nucleação da trinca na superfície do componente mais susceptível. Além

disso, mesmo que o dano não seja suficiente para promover a nucleação, como em materiais mais dúcteis, a deformação do material mais susceptível na zona de contato sob pressão poderá ser heterogênea, ou seja, pode haver gradiente de deformação do material, determinado pela zona de adesão e pelos diferentes graus de deslizamento que podem ser assumidos na zona de deslizamento. Em função disso, o gradiente de deformação determina que uma porção do material vai deformar (ou se deslocar) mais que outra porção. Para que isso aconteça é necessário que haja tensões cisalhantes que propiciarão então a nucleação da trinca.

3.7 Camada de zinco

A camada de zinco tem como principal finalidade a proteção do aço contra o fenômeno da corrosão e pode ser aplicada por diferentes processos: imersão a quente, eletrolgalvanização e aspersão térmica. O processo de galvanização por imersão a quente é o mais utilizado e consiste em imergir o substrato no banho de zinco fundido na faixa de temperatura entre 440° e 550° [33].

Antes da deposição do zinco algumas etapas são cruciais para o material aderir ao substrato, sendo elas: a limpeza dos arames, fluxagem, zincagem e passivação. A primeira etapa divide-se em duas, sendo a desengraxe (as peças são mergulhadas em desengraxante de solução alcalina com o intuito de remover substâncias orgânicas, como o óleo) e a decapagem (remoção de óxidos no material através da utilização de ácidos) [34].

Após a limpeza da superfície na etapa anterior, o aço volta a reagir facilmente com o oxigênio e aliado a isso o zinco também se oxida facilmente a temperatura do processo de galvanização. A adesão entre o zinco e o substrato não vai ser boa caso esteja ocorrendo dessa maneira, diante disso surge a etapa de fluxagem, que é o mergulho dos arames em uma solução de cloretos, formando uma película que permanecerá no substrato até a entrada no banho de zinco. O processo de zincagem é o momento em que acontece a junção do zinco aquecido no substrato. A última etapa consiste na passivação, consiste no mergulho do substrato já com o zinco na solução de ácido crômico, que tem como finalidade retardar a formação do carbonato básico de zinco, mantendo um brilho de recém zincado [33].

A Figura 12 mostra a camada de zinco depois da deposição sobre a superfície do aço, evidenciando a diversas camadas com microestruturas diferentes, sendo que apenas uma é caracterizada pela presença de zinco puro.

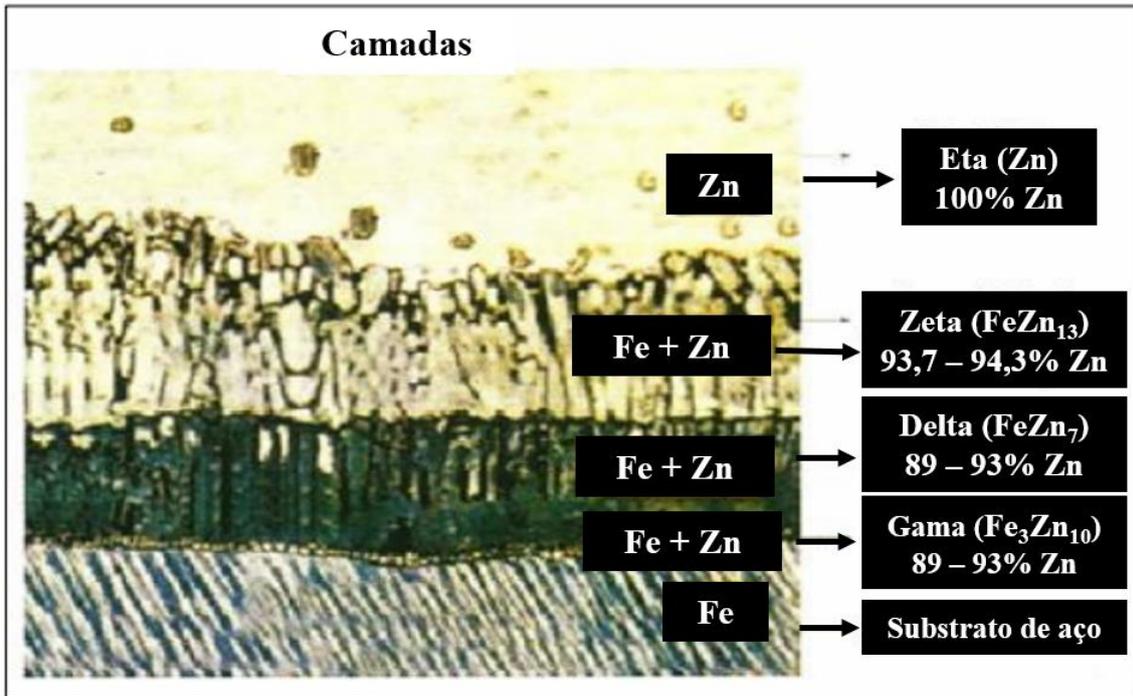


Figura 12: Representação da camada de zinco contendo suas diversas subcamadas.
Adaptado [35].

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização do estudo consistiram em arames de aço de médio teor de carbono obtidos a partir do processo de trefilação, contendo como especificações: 6 mm de diâmetro, comprimento de 400 mm e camada de zinco depositada sobre a superfície pelo processo de imersão a quente. A Figura 13, retrata o arame, objeto do estudo utilizado como corpo de prova e também para a confecção do dispositivo de fricção fadiga.



Figura 13: Imagem representativa do arame utilizado como objeto de estudo. Fonte: Própria, 2023.

4.2 Métodos

4.2.1 Tração

O ensaio de tração seguiu as diretrizes da norma ASTM E8/E8M [36]. Através do teste foi possível determinar a tensão de escoamento dos arames, parâmetro que foi utilizado para definição dos patamares de tensão máxima cíclica nos testes de fadiga, bem como a resistência à tração.

Este ensaio foi conduzido em cinco corpos de prova contendo 380 mm de comprimento total, 250 mm de região útil e velocidade de teste de 3,75 mm/min, sendo realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos Instron modelo 3385H. A Figura 14 mostra o arame no maquinário antes da realização do ensaio.

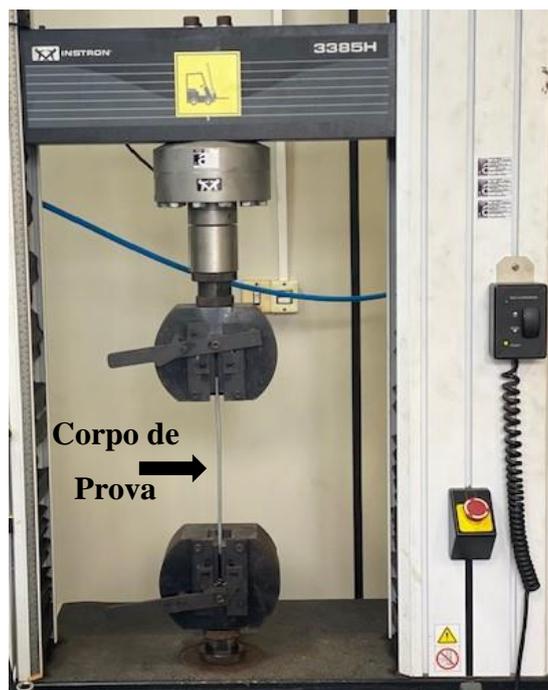


Figura 14: Corpo de prova antes da realização do ensaio de tração. Fonte: Própria, 2023.

4.2.2 Desenvolvimento do dispositivo de fricção fadiga

Para confecção do dispositivo de fricção fadiga, além dos arames utilizados na construção dele, foram utilizados dois anéis de aço superduplex para a fixação das extremidades do dispositivo. Esses anéis possuíam diâmetro interno de 12,5mm, espessura da parede de 1,5mm e altura de 10mm.

Após a determinação da tensão de escoamento dos arames, foi realizada a preparação do dispositivo que serviu de base para acomodação do corpo de prova no ensaio de fricção fadiga. Vale salientar que o apetrecho desenvolvido continha apenas um par de segmentos dos mesmos arames com comprimento de 200 mm e para sua fixação foram utilizados dois anéis de aço superduplex. Cada anel foi colocado em cada uma das extremidades do par de segmentos como apresentado na Figura 15.

O desenvolvimento do dispositivo que promova a fricção não é uma etapa simples. Os estudos de Lima [37] e Macedo [38] mostraram um dispositivo construído com duas chapas presas por dois parafusos de aperto nas extremidades e dois blocos de contato no centro. Para o estudo de Lima [37], o dispositivo em questão conseguiu promover o regime de deslizamento misto, mas não foi suficiente para reduzir significativamente a vida em fadiga do componente. No estudo de Macedo [38] foi possível concluir que o

dispositivo promoveu o estudo da fricção fadiga aplicando o conceito de força elástica [37,38].



Figura 15: Dispositivo de fricção fadiga desenvolvido para acoplamento dos corpos de prova no ensaio de fadiga. Fonte: Fonte: Própria, 2023.

O corpo de prova foi colocado entre os dois arames presentes no dispositivo perpendicularmente ao eixo desses arames, a partir da separação elástica deles no centro do dispositivo. Os arames utilizados na confecção do dispositivo foram os mesmos utilizados nos corpos de prova, uma vez que buscou-se reproduzir o contato que acontece na prática entre as camadas de arames dos umbilicais.

A escolha de alguns parâmetros do dispositivo está relacionada ao entendimento de como será a sua solicitação no momento da utilização nos ensaios de flexão, bem como o valor da força máxima, que define a tensão máxima de flexão. A Figura 16 mostra a situação de uma viga bi engastada, que é a condição que mais se aproxima de como o dispositivo ficou acoplado no corpo de prova e foi adotada para encontrar a formulação matemática que melhor se adequa a este estudo.

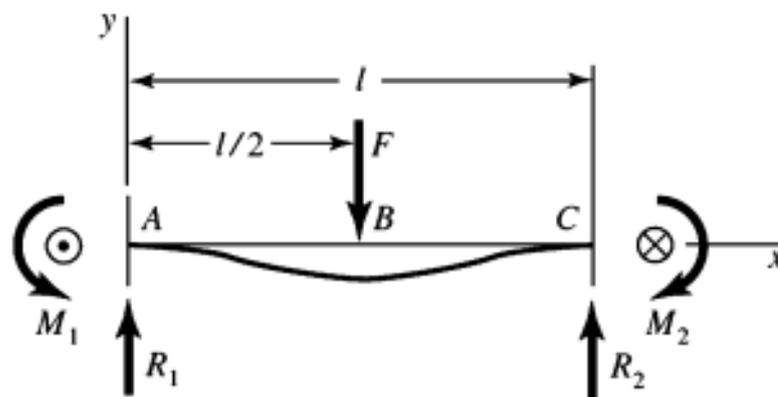


Figura 16: Representação gráfica dos apoios fixos (engastados), sendo aplicado uma força central [18].

De acordo com Budynas e Nisbett [18], a determinação da força máxima no caso contendo apoios fixos na extremidade (engastes) e uma carga central segue a Equação (4), que foi adotada neste trabalho.

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{-192 * E * I * y_{m\acute{a}x}}{l^3} \quad (4)$$

Em que E é o m3dulo de elasticidade do material, I é o momento de in3rcia, $y_{m\acute{a}x}$ é a flecha m3xima (no presente estudo foi considerado o raio do arame) e por fim, o l é o comprimento total do dispositivo. Ap3s a obtenç3o da forç3 m3xima, foi poss3vel determinar o valor de tens3o de flex3o do apetrecho a partir da (Equaç3o 5), quando ele estiver sendo utilizado na fadiga por flex3o.

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad (5)$$

Sendo que M é o momento fletor, I é o momento de in3rcia e c é o raio do arame utilizado no dispositivo. Segundo Budynas e Nisbett [18], o momento gerado nas extremidades s3o iguais, seguindo a f3rmula matem3tica exemplificada na Equaç3o (6).

$$M = \frac{F * L}{8} \quad (6)$$

Ap3s o conhecimento dos assuntos anteriores, seguiu a preparaç3o dos arames que foram submetidos ao teste de fadiga.

4.2.3 Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados na m3quina servo-hidr3ulica MTS Bionix 370.02 com c3lula de carga de 15 kN, seguindo as diretrizes da norma ASTM E739 [24].

O ensaio de fadiga realizado neste estudo foi o de flex3o por tr3s pontos (Figura 17), sendo a dist3ncia do v3o de 40mm. A frequ3ncia utilizada nos testes foi de 30 Hz, a raz3o de carregamento R (a divis3o da tens3o m3nima e a m3xima aplicada) foi de 0,1, ou seja, 10% e o controle estabelecido para a m3quina foi o da carga. Foram ensaiados 28 corpos de prova (cps), com comprimento de 60mm, sendo que 14 cps foram conduzidos ao ensaio de fadiga por flex3o de tr3s pontos e os demais foram submetidos às mesmas condiç3es de teste, mas com o dispositivo de fricç3o acoplado ao teste, ou seja, ensaio de fricç3o fadiga.

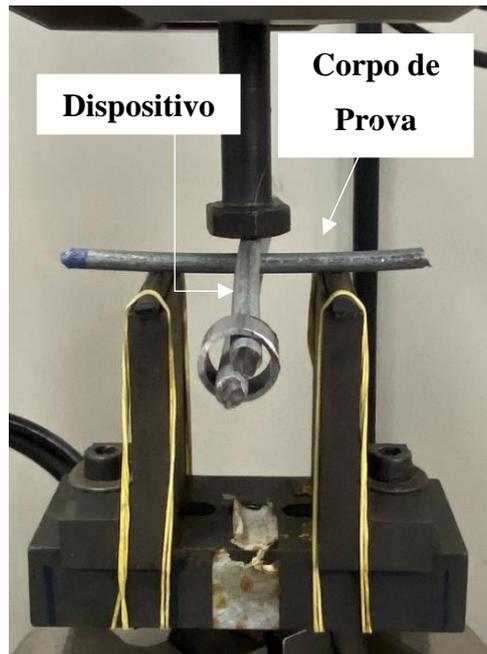


Figura 17: Conjunto do corpo de prova mais o dispositivo antes do início do teste de fricção fadiga. Fonte: Própria, 2023.

Vale destacar que os corpos de prova foram ensaiados até a ruptura, os que não vieram a romper, foram considerados para estimativa de vida infinita, e o ensaio foi finalizado quando o teste atingiu dois milhões de ciclos. Outra informação crucial a respeito do que foi realizado no teste são as tensões aplicadas: o primeiro patamar testado foi de 90% e o último patamar foi de 52% da tensão de resistência à tração. Os demais patamares analisados se restringiram a valores de tensão entre esses dois patamares.

A partir dos dados obtidos no ensaio, foram construídas curvas S-N para os corpos de prova livre e os corpos de prova com o dispositivo. A linha de projeto para essas curvas foi adotada com o deslocamento à esquerda da curva média dessa distribuição a uma distância correspondente ao produto entre um fator e o desvio padrão da resistência à fadiga.

4.2.4 Técnicas de microscopia

Após a realização do ensaio de tração, a superfície de fratura dos arames foram registradas imagens utilizando o equipamento estereomicroscópio (Zeiss Stemi 2000C).

As imagens obtidas através do microscópio eletrônico de varredura foram feitas no equipamento Vega LMS Tescan, com o intuito de observar o comportamento do dano de fricção, após o ensaio de fadiga. Antes do registro das imagens, foi necessário realizar

o corte do corpo de prova para melhor acomodação da peça no equipamento, tendo a amostra comprimento aproximado de 15 mm. Além do corte, realizou-se a limpeza da amostra com álcool isopropílico na tentativa de eliminar qualquer impureza que porventura viesse atrapalhar a boa resolução das imagens. Para cada patamar de tensão foi escolhido um corpo de prova do arame ensaiado com o dispositivo e dessa forma foram feitos os registros para diferentes ampliações no equipamento.

Além das imagens obtidas nos equipamentos descritos anteriormente, ocorreu a obtenção de imagens no microscópio óptico (Zeiss Axio Scope A1) com a finalidade de mensurar a profundidade do dano causado pelo dispositivo de fricção. Antes de colocar as amostras no microscópio óptico, algumas etapas foram realizadas para preparação das amostras. A primeira etapa consistiu no corte longitudinal dos corpos de prova, a fim de evidenciar apenas a região a ser estudada. Portanto, o segmento de arame foi estabelecido contendo a zona de dano do ensaio de fricção fadiga. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao processo de embutimento, utilizando uma embutidora da Arotec modelo PRE-30Mi. A posição do dano centrado na geratriz lateral do segmento a ser embutido foi importante, a fim de garantir que no lixamento fosse possível controlar a redução através de paquímetro e expor o dano em verdadeira grandeza. O lixamento foi feito nas granulometrias de: 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 Mesh.

O polimento foi realizado na politriz Arotec Aroprol-s. O agente polidor foi a pasta de diamante de 1 μ m. O intuito dessa etapa é erradicar as marcas presentes do lixamento e por fim, as amostras foram atacadas com reativo nital 2% (98ml de álcool + 2ml de HNO₃) para destacar as regiões presentes na amostra (camada de zinco e substrato) e assim serem feitas as imagens.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Tração

Os resultados do ensaio de tração nos arames forneceram os valores para a tensão de escoamento foi de 1052 MPa (desvio padrão de ± 10 MPa) e resistência à tração de 1407 MPa (desvio padrão de $\pm 7,5$ MPa) sendo característicos de ligas que possuem elevada dureza [5].

Na Figura 18 é mostrado de forma representativa a superfície de fratura de um dos corpos de prova após a realização do ensaio de tração, comprovando o seu aspecto dúctil. Na imagem é possível perceber três regiões características: a região mais ao centro caracterizada pelo aspecto mais fibroso, a zona radial e por fim, a zona de cisalhamento com a percepção da estrição localizada.

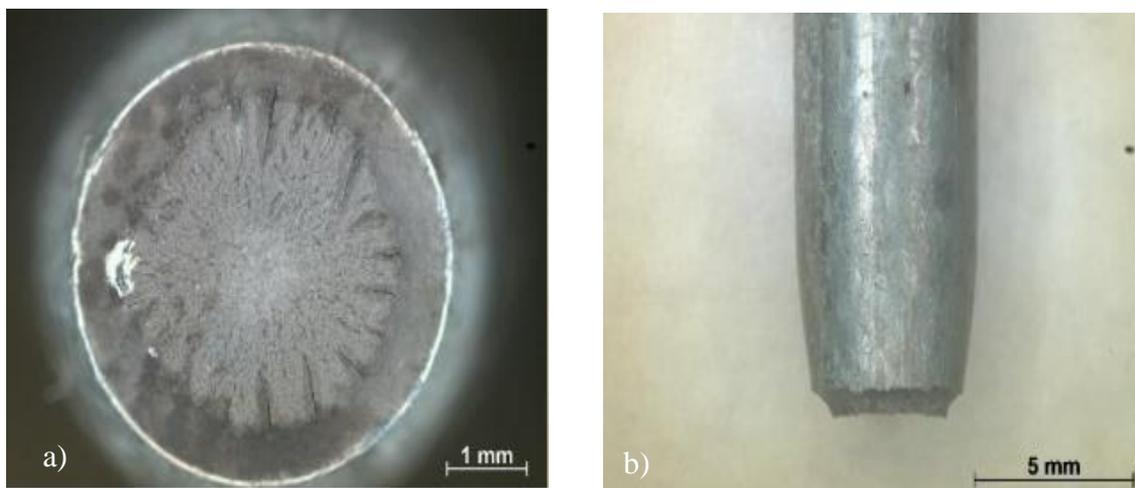


Figura 18: Superfície de fratura do arame após o ensaio de tração, sendo que a imagem da esquerda evidencia o topo da fratura e a da direita o lado da fratura do corpo de prova, respectivamente. Fonte: Própria, 2023

5.2 Desenvolvimento do dispositivo de fricção fadiga

A escolha e desenvolvimento do dispositivo seguiu alguns requisitos básicos para dar prosseguimento nos testes de fadiga. O primeiro ponto a ser questionado seria observar se o corpo de prova acoplado ao dispositivo estaria sofrendo o autêntico contato em três pontos, pois a existência de mais pontos de contatos não iria promover o que foi pensado para o estudo.

Outro ponto a ser observado é em relação as condições estruturais do material escolhido para o dispositivo, que no presente estudo foi o mesmo arame utilizado como

corpo de prova. Diante disso, foi necessário entender as principais solicitações do apetrecho no teste, resultando em valores de força máxima de 833 N e tensão de flexão de 1041 MPa. Vale salientar que para chegar nos resultados mencionados anteriormente, foram utilizadas as Equações 4 e 5.

O intuito da descoberta da força máxima e posteriormente da tensão de flexão que está sendo aplicada no arame é para que ele não ultrapasse o limite de escoamento do material. Para isso, a principal métrica em questão foi o comprimento do dispositivo, pois as outras variáveis seriam mais difíceis de serem alteradas.

Como pôde ser percebido no presente estudo, a tensão aplicada no dispositivo (1041 MPa) foi menor que a tensão de escoamento do material (1052 MPa). Isto comprova que no momento da aplicação da tensão no dispositivo não houve a ultrapassagem da tensão de escoamento, concluindo que ele não sofreu deformação plástica. Contudo, para trabalhos futuros é importante pré-definir um certo coeficiente de segurança, uma vez que valores tão próximos podem eventualmente determinar alguma deformação, mesmo que pequena e localizada. Isto é mais importante ainda se considerarmos que o dispositivo será utilizado muitas vezes, pois assim as pequenas deformações poderão ir se acumulando.

5.3 Fadiga

Com a finalidade de confirmar a influência do dispositivo no comportamento em fadiga do material, ou seja, o efeito de fricção fadiga, foram construídas duas curvas S-N, seguindo as diretrizes previstas nas normas ASTM E739 [24] e ISO 12107 [39], sendo que uma foi do grupo de corpos de prova submetidos à fadiga e outra do grupo com o dispositivo montado, em fricção fadiga, conforme pode ser visualizado na Figura 19 [24,39].

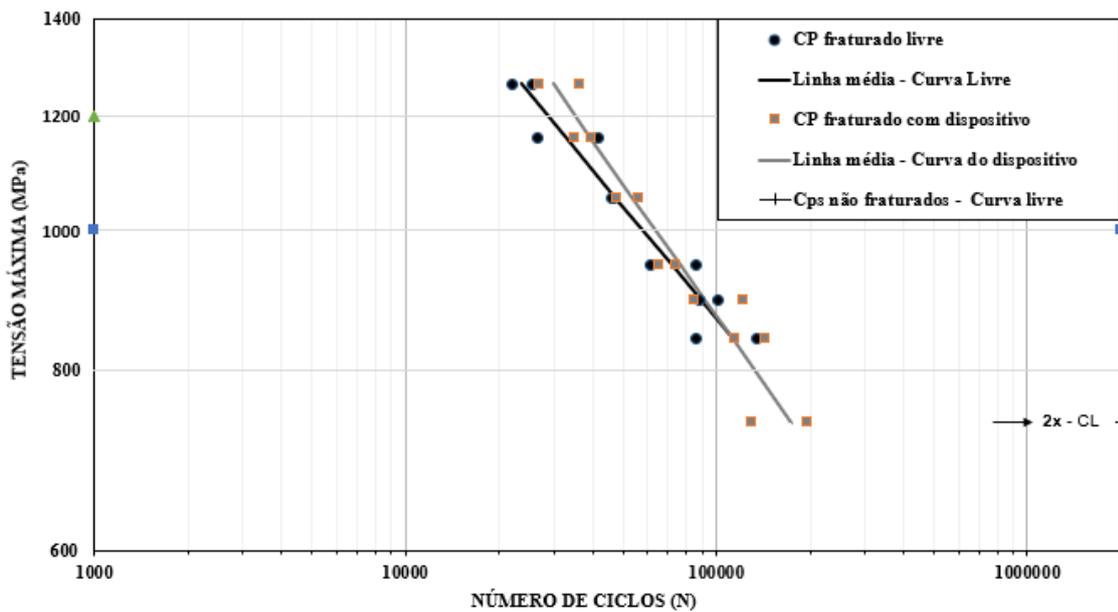


Figura 19: Curvas S-N de fadiga e fricção fadiga no ensaio de flexão a três pontos.
 Fonte: Própria, 2023

O gráfico acima tem por finalidade exemplificar e comparar a resistência à fadiga e resistência a fricção fadiga do arame. Vale destacar que a tensão máxima e mínima aplicada no teste correspondeu a respectivamente 1262 MPa e 736 MPa, valores de tensão que estão acima e abaixo da tensão de escoamento 1052 MPa do material. Através da análise do gráfico acima, foi possível constatar que não houve diferença significativa na resistência à fadiga e resistência à fricção fadiga em nenhum dos níveis de tensão, uma vez que as curvas desses grupos estão bem próximas. No entanto, o dispositivo tende a aumentar a resistência à fadiga do arame em relação ao livre. De acordo com Peng et al. [40], o tempo de vida em fricção fadiga diminui drasticamente com o aumento da tensão, porém, após atingir um ponto de crítico de tensão de flexão, o tempo de vida na fricção fadiga apresenta uma tendência totalmente oposta, o que corrobora para o que foi abordado anteriormente.

O segundo ponto a ser observado é que nos outros patamares, excluindo para a tensão de 736 MPa, não houve a interferência do dispositivo, pois não há diferença significativa entre os dois grupos. Por fim, constata-se na tensão de 736 MPa que estes CPs não estão plotados na curva alcançando um total de 2.000.000 de ciclos, enquanto que os corpos de prova acoplados ao dispositivo não atingiram essa quantidade de ciclos. Os corpos de prova contendo o dispositivo a essa tensão possivelmente vieram a romper

devido a ação combinada da tensão de flexão cíclica somada a tensão do contato local, favorecendo a iniciação e propagação de microfissuras [40]. Outra hipótese levantada é que com tensões mais elevadas o dispositivo sofre maior deformação e com isso a sua região inferior sofre um deslocamento e não promove o fenômeno da fricção efetiva. Para tensões menores, que no presente estudo foi a de menor valor, a deformação sofrida pelo dispositivo é menor e a região inferior do dispositivo não sofreu o deslocamento e foi capaz de promover fricção fadiga de forma efetiva.

Através da análise estatística pelo método ANOVA, constatou-se que na maioria dos patamares não houve diferença na resistência à fadiga dos materiais, pois o valor de F encontrado na análise foi menor que o do F crítico e o valor – P foi maior que 5%, valor adotado como o referencial na análise. Esse fenômeno não foi observado na tensão de 736 MPa, provavelmente porque a tensão de contato do dispositivo acabou influenciando no teste.

Tabela 1 – Resultado da análise estatística ANOVA comparando os patamares da resistência à fadiga dos corpos de prova.

Porcentagem da tensão máxima	F	F Crítico	Valor – P
90%	2,57	18,51	0,25
82%	0,18	18,51	0,71
75%	1,82	18,51	0,31
67%	0,10	18,51	0,78
64%	0,19	18,51	0,70
60%	0,42	18,51	0,58
52%	3052	18,51	0,0003

5.4 Fractografia das amostras

5.4.1 Avaliação da superfície do dano

A fim de observar e caracterizar o dano causado pelo dispositivo no ensaio, imagens da zona de contato superior foram feitas, que é onde há compressão na flexão do corpo de prova. A parte da região de fratura final também foi evidenciada, como pode ser visualizado nas Figuras 20 e 21.

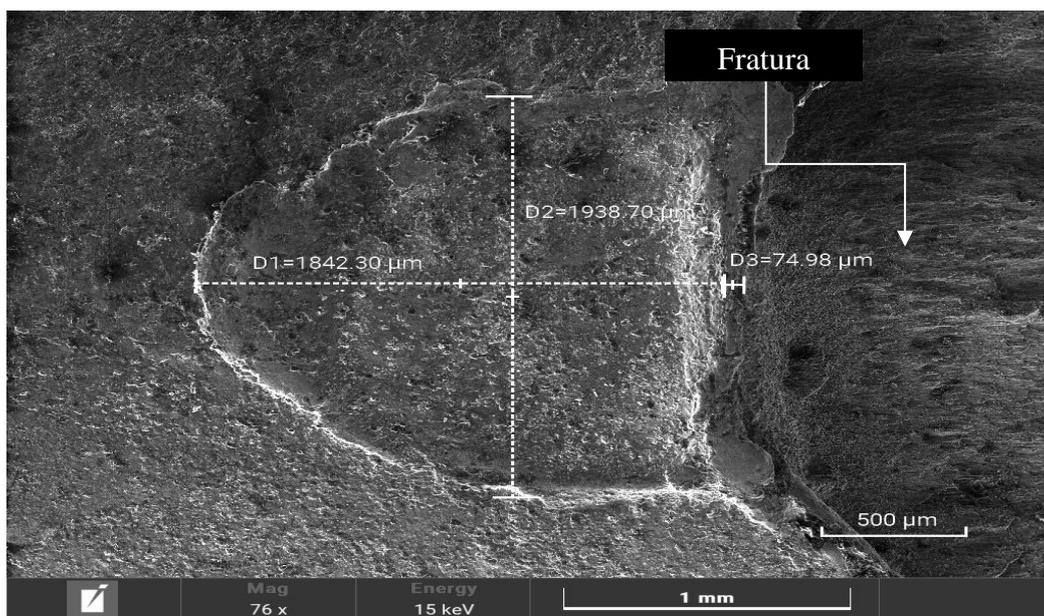


Figura 20: Fractografia do dano com a menor tensão aplicada, 52% da tensão máxima.
Fonte: Própria, 2023.

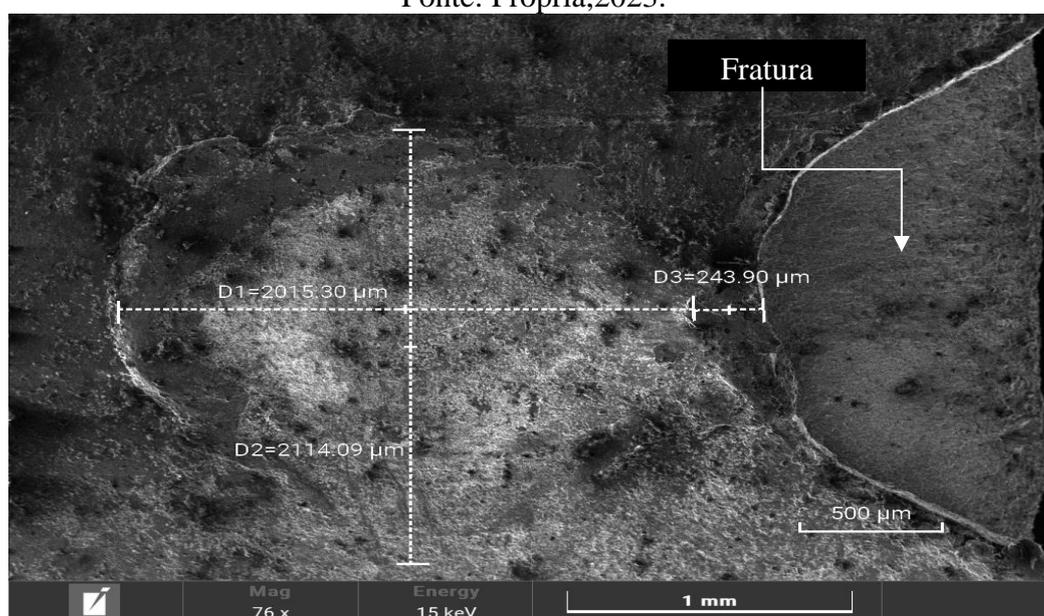


Figura 21: Fractografia do dano com a menor tensão aplicada, 90% da tensão máxima.
Fonte: Própria, 2023

A imagem da superfície do corpo de prova depois do ensaio realizado teve como objetivo quantificar o dano, ou seja, determinar o seu tamanho e a forma, além disso, verificar a distância do dano até a fratura no corpo de prova. Vale salientar que não foi possível observar ou até mesmo constatar nenhuma proporcionalidade entre o aumento da tensão com o aumento do tamanho do dano e também a correlação direta entre a tensão aplicada e a distância do dano até a fratura. Isso pode ter acontecido porque a tensão de contato aplicada em todos os corpos de prova foi a mesma. A Tabela 2 retrata as variáveis quantitativas descritas anteriormente sem nenhuma proporcionalidade.

Tabela 2 – Resultados das medidas do comprimento do dano e da distância do dano até o local da fratura.

Percentual da tensão máxima	Comprimento do dano (μm)	Distância do dano a fratura (μm)
52%	1842	75
60%	2033	*
64%	1902	273
67%	2277	230
75%	2262	802
82%	2749	277
90%	2114	244

Não foi possível observar a distância do dano a fratura para o 60% do percentual de tensão máxima Além da obtenção de informações quantitativas, foi possível observar a superfície do dano causado pelo dispositivo no ensaio fadiga por flexão em três pontos. A Figura 22 mostra a superfície do dano.

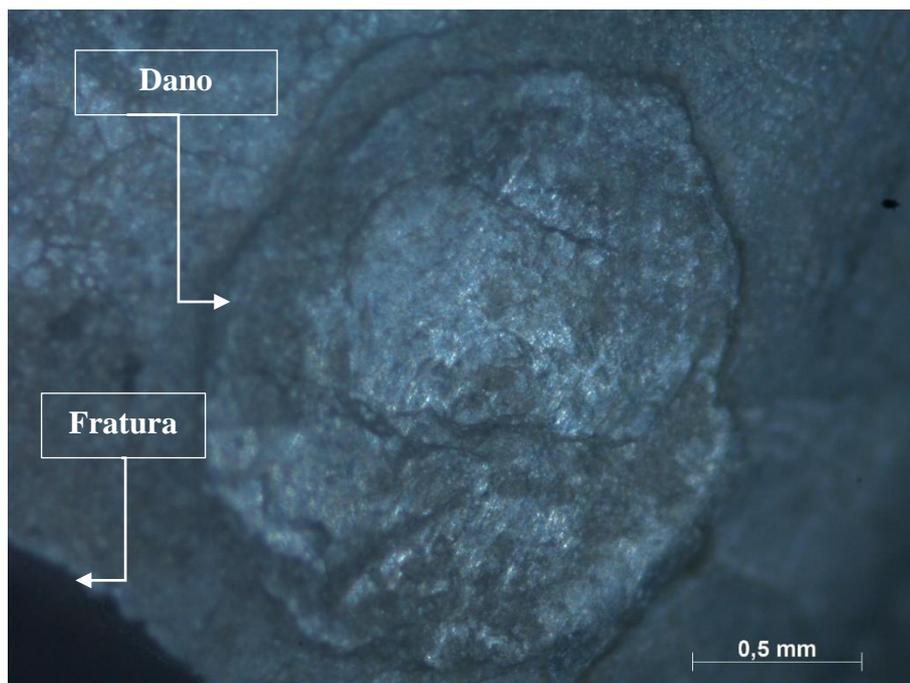


Figura 22: Fractografia do corpo de prova, mostrando o contato promovido pelo dispositivo. Fonte: Própria,2023

A Figura 22 representa a superfície do dano na região inferior do corpo de prova, que é o local submetido ao esforço de tração onde aconteceu a nucleação das trincas. A imagem acima retrata que o dispositivo promoveu o deslocamento da camada de zinco para as extremidades.

De acordo com a literatura, possuem três diferentes regimes quando se trata do fenômeno de fricção fadiga, sendo elas: regime de deslizamento parcial, o regime de atrito misto e o regime de deslizamento [40]. O regime de deslizamento parcial, é conceituado por promover um dano leve e a forma desse dano ser um anel assimétrico, com o acúmulo de óxidos na extremidade do dano provenientes do atrito da fricção [40]. Levando em consideração as informações mencionadas anteriormente, é possível constatar que o dano provocado pelo dispositivo nos corpos de prova foi leve, estando, portanto, dentro do regime de deslizamento parcial. Vale destacar que no presente estudo não foi possível observar o acúmulo de óxidos próximo a extremidade do dano, fato esse que será sugerido ser investigado em trabalhos futuros.

5.4.2 Profundidade do dano

A Figura 23 evidencia a região superior (local de esforços compressivos) e inferior (região de esforços de tração) do corpo de prova no ensaio de fadiga.

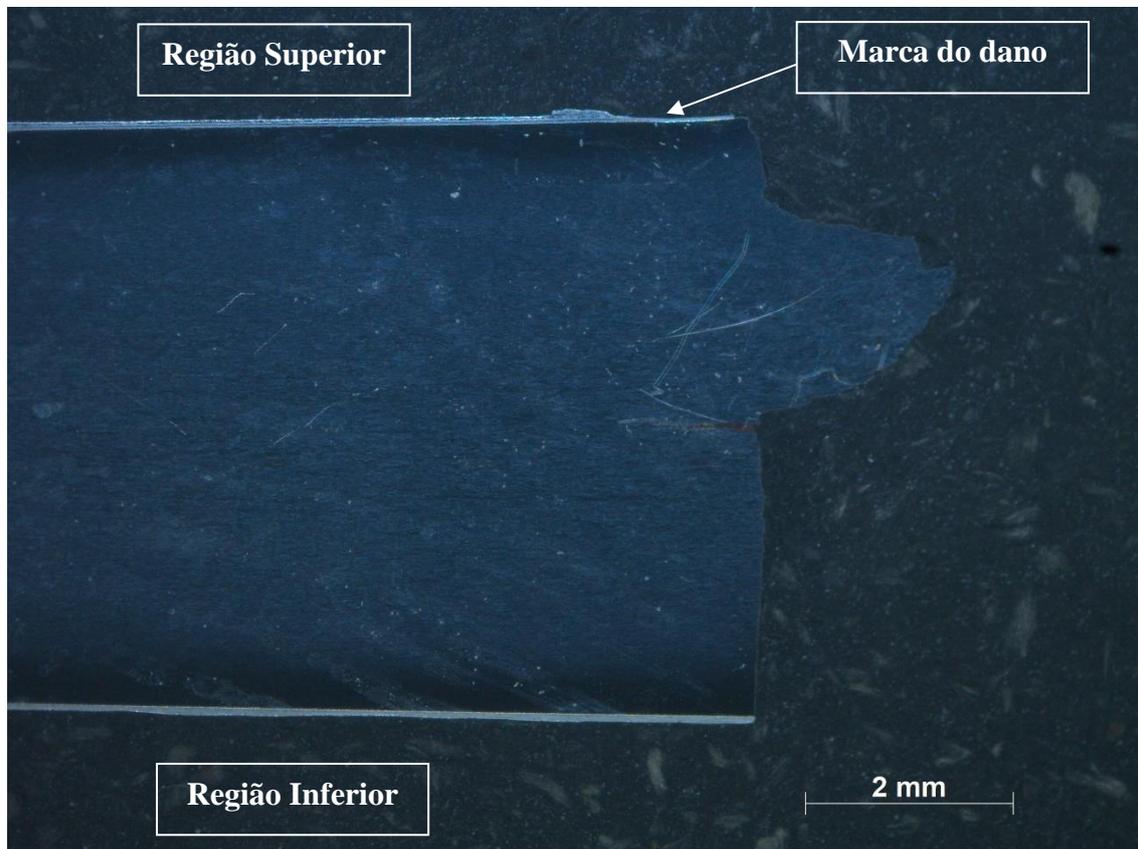


Figura 23: Fractografia do corpo de prova, mostrando as duas regiões de contato promovido pelo dispositivo. Fonte: Própria, 2023.

A camada de zinco depositada sobre os arames apresenta duas subcamadas, sendo elas: a subcamada mais externa, contendo apenas zinco, e a subcamada intermediária, composta por ligas de ferro e zinco [41]. De acordo com a literatura, há distinção entre as subcamadas, sendo a camada mais externa com característica dúctil, conferindo ao revestimento resistência ao impacto, e a camada intermediária maior dureza, protegendo o revestimento de danos por abrasão [42]. A Figura 24 retrata a camada de zinco em perfeito estado, contendo as duas regiões mencionadas.

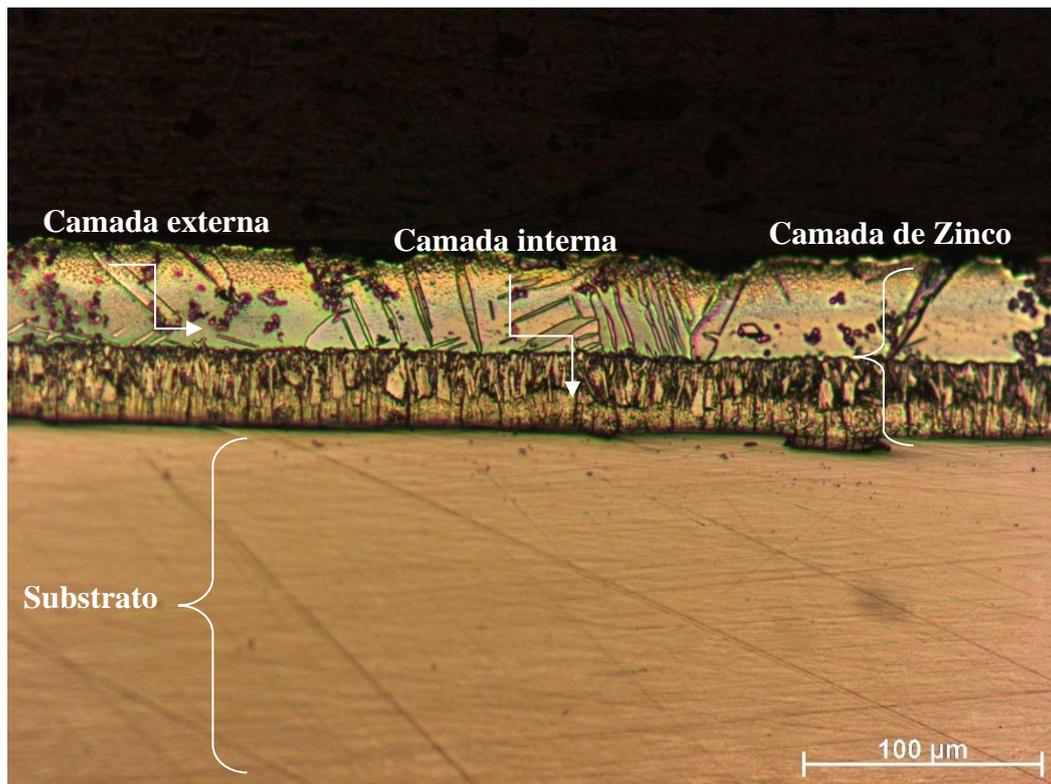


Figura 24: Representação da região superior do corpo de prova, evidenciando toda a camada íntegra de zinco e suas subcamadas. Fonte: Própria, 2023.

Como já foi explicado, dentro do regime de deslizamento parcial, é possível observar duas zonas, (Figura 11), sendo a zona de adesão a mais interna e a de deslizamento a mais externa. Segundo Peng et al. [40] e Garcia et al. [43] a zona de deslizamento é caracterizada por ter a formação de detritos óxidos, fenômeno este que não foi possível ser observado no presente trabalho, pois através das imagens do microscópio óptico foi possível perceber que o dano causado pelo dispositivo não foi suficiente para ultrapassar a camada de zinco (camada cujo objetivo é proteger o corpo de prova contra a corrosão), os detritos ali formados foram provenientes da camada galvânica [40,43]. No entanto, constatou-se que houve o afastamento da subcamada mais externa para as extremidades, devido a ação combinada do contato e o movimento do dispositivo no ensaio. Vale salientar que o foco da discussão anterior foi retratar o dano mais acentuado do corpo de prova, que para o presente estudo foi na região superior, não sendo a região de maior esforço de tensão de tração resultante da flexão em fadiga. A Figura 25 ilustra toda região do dano causado pelo dispositivo, com a camada mais externa sendo deslocada para as extremidades do dano e a camada mais interna acabou não atingida pelo dispositivo.

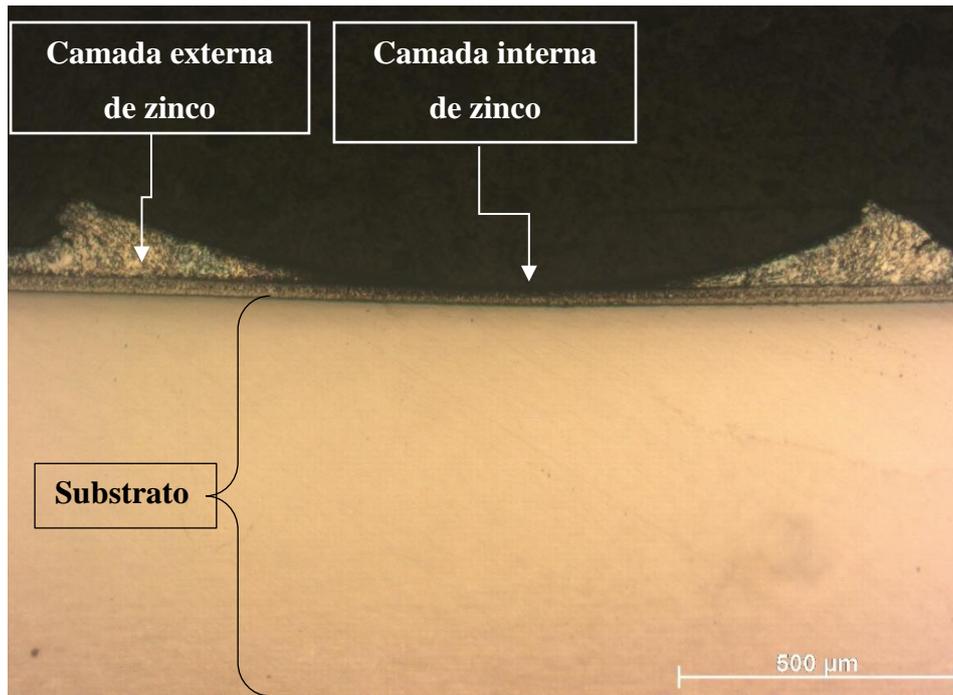


Figura 25: Fractografia da região superior do corpo de prova, evidenciando todo o dano causado pela micromovimentação do dispositivo. Fonte: Própria, 2023.

. A Figura 26 evidencia com mais clareza o deslocamento da camada de zinco para as extremidades, é possível observar com mais clareza as linhas do fluxo de arraste da camada mais externa, na direção oposta ao contato.

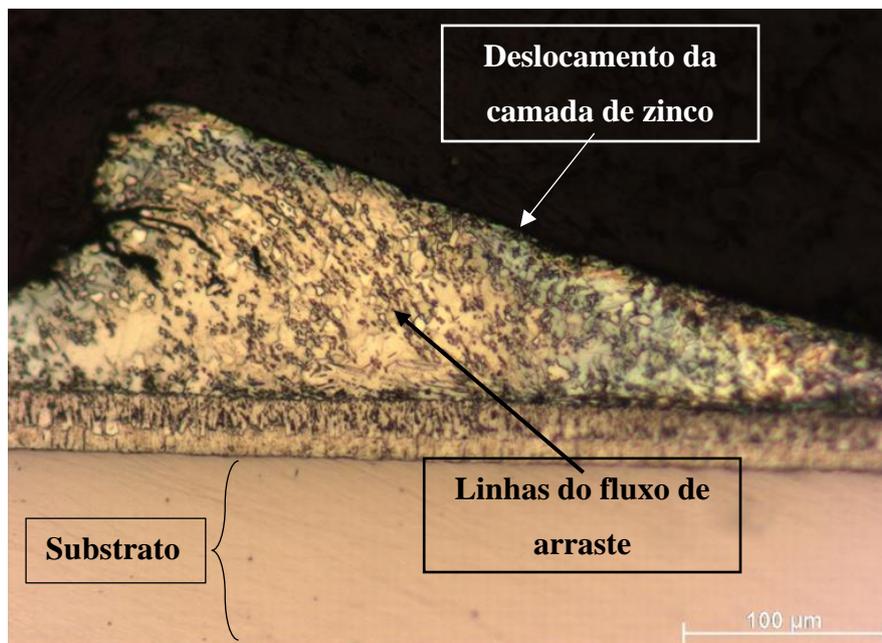


Figura 26: Fractografia da região superior do corpo de prova, evidenciando o acúmulo da subcamada mais externa de zinco provocado pela micromovimentação do dispositivo. Fonte: Própria, 2023.

O lado oposto ao discutido anteriormente é a região que estava sob tração do mesmo corpo de prova, ou seja, tensão de tração resultante da flexão no ensaio de fadiga, favorecendo a nucleação de trincas. Neste lado, em alguns patamares de tensão houve o deslocamento da subcamada mais externa de zinco para as extremidades formando danos evidentes como é observado na Figura 27. Vale salientar que mesmo o dano sendo formado nessa região, ele não ficou tão evidente quanto o da região superior, isso aconteceu porque na região superior além do contato provocado pelo dispositivo, tem a maior proximidade do cutelo central do dispositivo de flexão de 3 pontos, como pode ser observado na Figura 17.

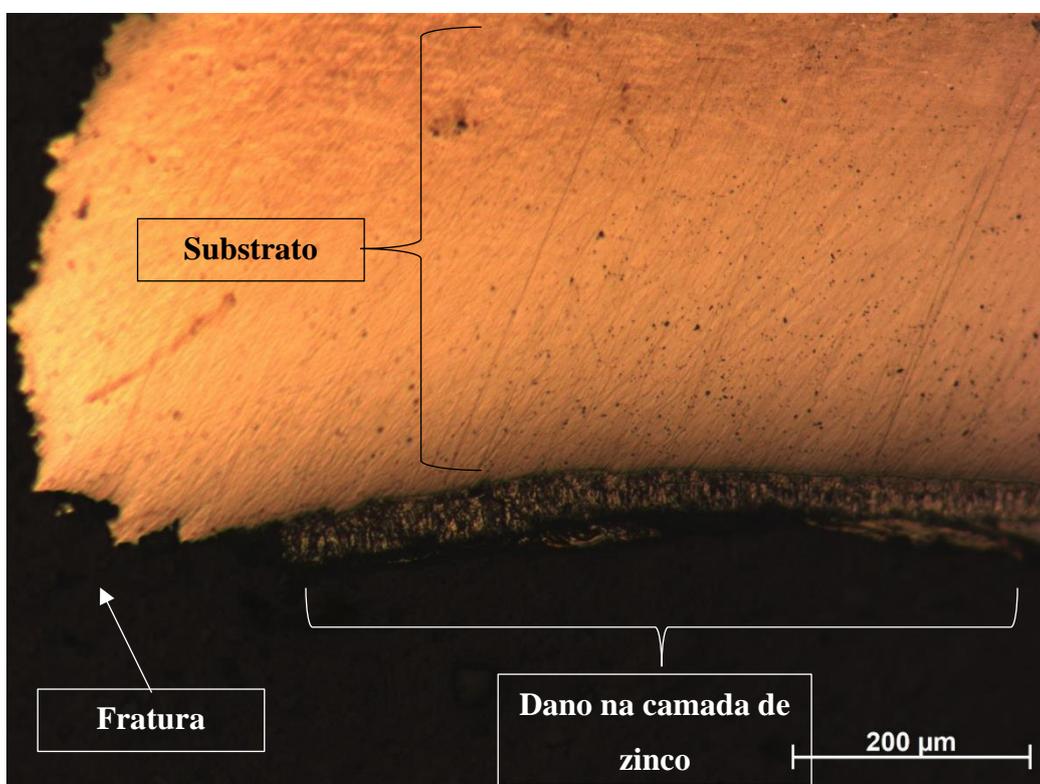


Figura 27: Fractografia da região inferior do corpo de prova, evidenciando o dano provocado pelo dispositivo a 82% da tensão máxima. Fonte: Própria, 2023.

Na região inferior, local de esforços de tração, foi possível observar a presença de trincas secundárias, próximo da região de fratura, como mostra a Figura 28. Como pode ser observado a nucleação seguiu uma direção de aproximadamente 45°, seguindo posteriormente a uma direção paralela a fratura, como será mostrado na Figura 29 com menor ampliação.

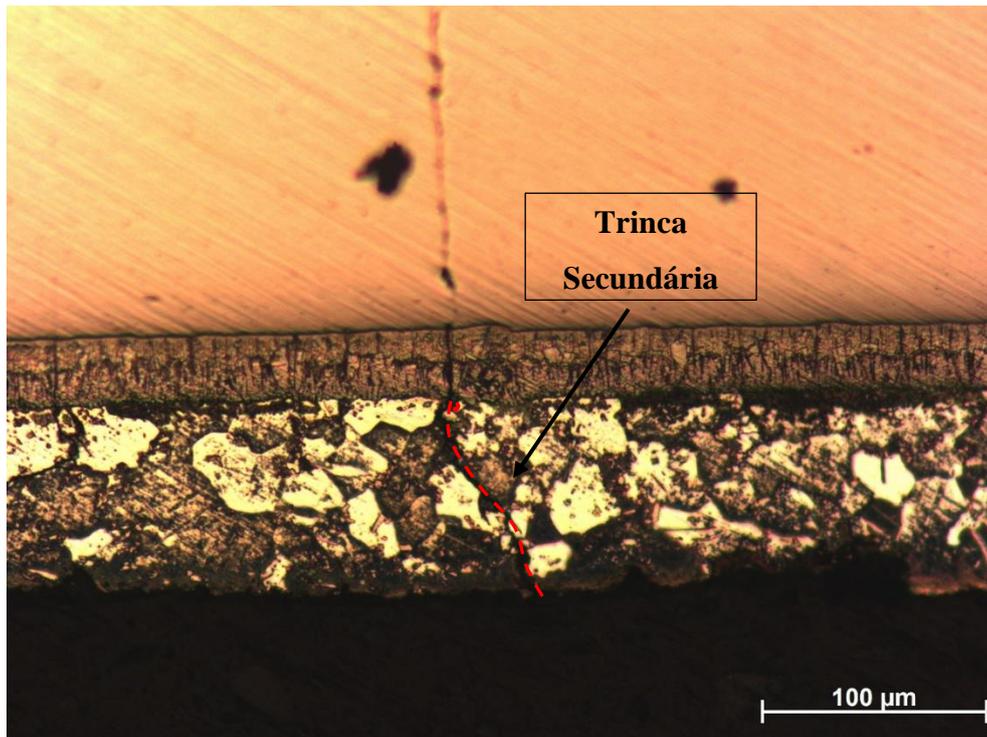


Figura 28: Fractografia da região inferior do corpo de prova, evidenciando a trinca secundária formada próximo a região da fratura 82% da tensão máxima. Fonte: Própria, 2023.

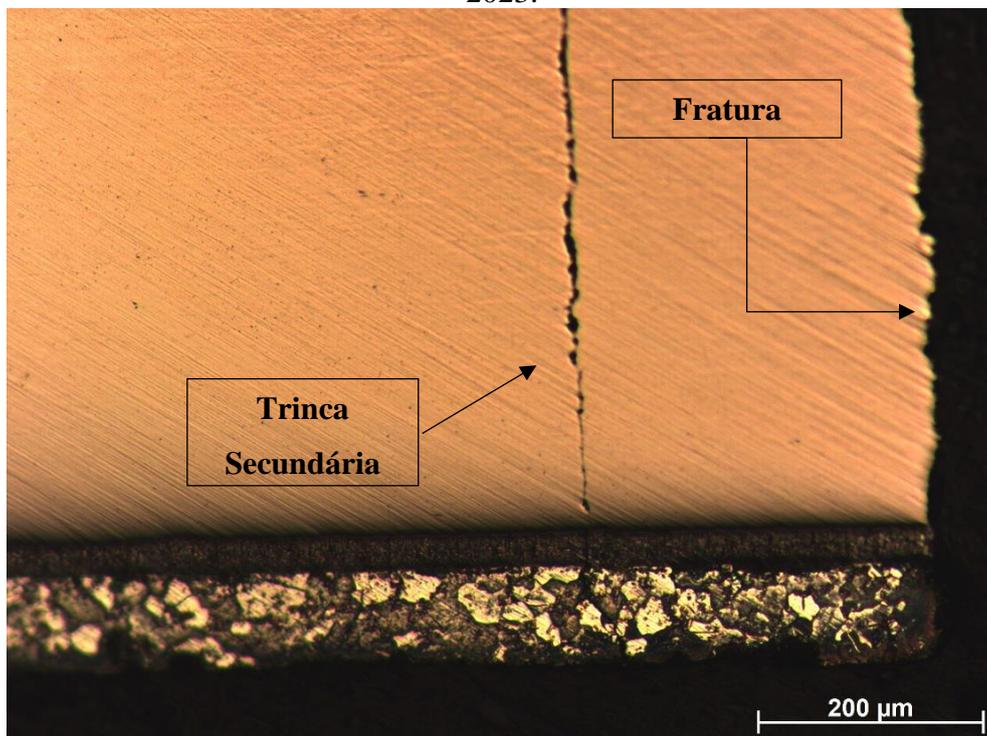


Figura 29: Fractografia da região inferior do corpo de prova, evidenciando a trinca secundária paralela ao plano de fratura do patamar de 82% da tensão máxima. Fonte: Própria, 2023.

Vale salientar que o mecanismo de desgaste do regime de deslizamento parcial de flexão fadiga por atrito seria uma combinação do desgaste abrasivo e do leve desgaste oxidativo [40]. Diante dos fatos abordados anteriormente, no presente estudo não foi possível observar o desgaste oxidativo, apenas o desgaste abrasivo.

6 CONCLUSÃO

O estudo avaliou o dano formado a partir do dispositivo no teste de fadiga por flexão de três pontos chegando nas seguintes conclusões:

- O dispositivo desenvolvido conseguiu implementar no ensaio a autentica flexão de três pontos, não dando margem para que o corpo de prova tocasse em mais de um ponto no próprio apetrecho. Essa evolução foi constatada a partir do estudo da observação dos estudos de Lima [37] e Macedo [38].
- A partir da observação das curvas S-N construídas, não foi possível observar diferença significativa entre a resistência à fadiga e a resistência à fricção fadiga do arame.
- Não houve nenhuma proporcionalidade entre a tensão aplicada no teste com o tamanho do dano causado pelo dispositivo no corpo de prova. O fato similar aconteceu para não proporcionalidade entre a tensão aplicada e a distância da marca até a fratura da amostra ensaiada.
- A profundidade do dano do arame foi pequena, não sendo suficiente para ultrapassar a camada galvânica presente. Isso pode explicar o fato de não haver diferenças entre a resistência à fricção fadiga e resistência à fadiga.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Retirada da camada de zinco presente nos arames, para que o dano causado não se limite a essa superfície e forme com maior facilidade os detritos óxidos que são evidenciados no regime de deslizamento parcial, mais especificamente na zona de escorregamento.
- Aumento da tensão aplicada pelo dispositivo, através da mudança do material de fabricação. É necessário que a tensão de escoamento seja maior, na tentativa de diminuir o comprimento útil dos apoios do dispositivo e com isso aumentar a tensão que será aplicada no corpo de prova. Para o aumento da tensão de escoamento, poderia ser feito um tratamento térmico no material.
- Como melhoria do dispositivo, poderia ser feito um tratamento térmico nos arames do dispositivo a fim de aumentar a sua resistência, mudança dos materiais do dispositivo, com o intuito de serem selecionados materiais com maiores módulos de elasticidade e também, os anéis de fixação serem na forma de 8, pois evita que os arames se desloquem e alterem o centro de simetria nas extremidades.

8 REFERÊNCIAS

- [1] PETROBRAS. Pré-Sal. Petrobras, c.2020. Disponível em:<Pré-sal: mergulhe nessa jornada ultraprofunda|Petrobras>. Acesso em: 2 Outubro 23.
- [2] SWANSON, R. C. “Metal Tube Umbilicals - Deepwater and Dynamic Considerations”. In: Offshore Technology Conference. Texas, May. 1995.
- [3] WAGNER, O. “An Innovating Premium Tubular Solution for Umbilical’s Applications”. In: Offshore Technology Conference. Texas, May. 2014.
- [4] REBOH, Y. Efeito do dano causado por fadiga de baixo ciclo sobre o desempenho a fadiga de alto ciclo em tubos de aço superduplex UNS 32750 aplicados em umbilicais submarinos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, p. 84. 2014.
- [5] CHIAVERINI, V. “Aços Para Arames e Fios”. Aços e Ferros Fundidos. 7 ed; cap 15, São Paulo, 1988
- [6] GENTIL, V. “Corrosão Associada a Solicitações Mecânicas”. Corrosão. 3. ed. cap 15, 1996.
- [7] WALLAUER, Frederico Alberto. MATERIAIS PARA APLICAÇÃO EM ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS - COMPORTAMENTO FRENTE A ENTALHES. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- [8] NASCIMENTO, B. L., 2023, Análise estatística do desempenho em fadiga de arames soldados da armadura de tração de umbilicais submarinos, Dissertação M.Sc. Universidade Federal de Sergipe, 79p
- [9] DNV, Det Norske Veritas, Offshore Standard DNV-RP-C203, 2016, Fatigue Design of Offshore Steel Structures.
- [10] GUO, T., LIU, Z., CORREIA, J., et al., 2019., “Experimental study on fretting-fatigue of bridge cable wires”. International Journal of Fatigue. v. 131, 105321.
- [11] ROSSINO, Luciana Sgarbi. RESISTÊNCIA À FADIGA POR FRETING DA LIGA AA7050-T7451. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v. 6, p. 167-173, mar. 2010

[12] CHAKRABARTI, S.; HALKYARD, J.; CAPANOGLU, C. Historical Development of Offshore Structures. In: CHAKRABARTI, S. Handbook of Offshore Engineering. 1. ed., chapter 9, Oxford, Great Britain, Elsevier, 2005.

[13] CHAVES, Antelmo Santos. EFEITO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA ACUMULADA NO DESEMPENHO À FADIGA DE AÇO SUPER DUPLEX EMPREGADO EM TUBOS UMBILICAIS PARA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO. 2022. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022. (CHAVES, 2022)

[14] MFX DO BRASIL. Quem é a MF. MFX do Brasil, c.2016. Disponível em:<<https://www.mfx.com.br/br/quem-e-a-mfx/>>. Acesso em: 15 out. 2023. il. color.

[15] CORDOVÉS, Digné de La Caridade Suné. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE CABOS UMBILICAIS. 2008. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. (CORDOVÉS, 2008)

[16] BAI, Y.; BAI, Q. Subsea Engineering Handbook. Elsevier, 2010.

[17] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 17B. Recommended Practica for Flexible Pipe. 2002.

[18] BUDYNAS, R. G.; NISBETT, K. Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica. 8^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011

[19] DIETER, G. E. Metalurgia Macânica. Tradução de A. S. Souza. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 2, 564

[20] NORTON, R. L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 4^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

[21] NASCIMENTO, Brenno Lima. APLICAÇÃO DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA DESENVOLVIDA PARA TESTE DE FADIGA EM ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE UMBILICAIS SUBMARINOS. 2020. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

[22] POLÁK, J. *et al.* The role of extrusions and intrusions in fatigue crack initiation. Engineering Fracture Mechanics, [s. l], v. 185, p. 46-60, nov. 2017.

[23] ALVES JÚNIOR, Isaú de Souza. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA NO COMPORTAMENTO À FADIGA DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI – 316. 2023. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023.

[24] ASTM INTERNATIONAL. ASTM E739-10: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data. Pensilvânia. 2015.

[25] SIMÕES, Thiago Mesquita. CURVAS S-N DA CAMADA DE INCONEL 625 DEPOSITADA POR SOLDAGEM EM TUBOS CLADEADOS. 2014. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

[26] SANTOS, Renan Celestino Silva. EFEITO DO TIPO DE CARREGAMENTO APLICADO PARA A DEFORMAÇÃO PLÁSTICA ACUMULADA NO DESEMPENHO EM FADIGA DE TUBOS DE AÇO SUPERDUPLEX UTILIZADOS EM UMBILICAIS SUBMARINOS. 2022. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022.

[27] LOPES, Karina Stefania Souza. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE AÇOS AISI 4140. 2006. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, 2006.

[28] GASPERAZZO, Marcelo Ribeiro. DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE ENSAIO DE FADIGA POR FRETTEMENTO EM FIOS. 2016. 127 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

[29] VELOSO, Luís Augusto Mendes *et al.* Experimental device for fretting fatigue tests in 6201 aluminum alloy wires from overhead conductors. *Wear*, Brasília, v. 460, p. 1-11, nov. 2020.

[30] CHITANU, Corneliu. Fadiga fretting em laminados compósitos de aramida. 2021. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeronáutica, Universidade Beira Interior, Covilhã, 2023

[31] FIGUEIREDO, Allisons Ribeiro. Análise do efeito da tensão média na resistência à fadiga por fretting da liga AL 7050-T7451. 2010. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

[32] WANG, D.; ZHANG, D.; GE, S. et al., 2012, “Effect of displacement amplitude on fretting fatigue behavior of hoisting rope wires in low cycle fatigue”, *Wear*, v. 52, pp. 178-189.

[33] FERNANDES, Lucas Sonogo. REDUÇÃO DO EXCESSO DA CAMADA DE ZINCO EM LINHA DE GALVANIZAÇÃO DE ARAMES. 2018. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

[34] ROSA, Rogério Laydner da. ESTUDO DO PROCESSO DE CROMATIZAÇÃO DE ARAMES GALVANIZADOS E PROPOSTAS DE ALTERNATIVAS PARA RETARDAMENTO DA OCORRÊNCIA PREMATURA DE OXIDAÇÃO BRANCA. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[35] Cardoso, Wandercleiton & Porcino, Brena. (2016). Vantagens do sistema duplex a pintura do aço galvanizado à quente como uma alternativa eficiente para proteção contra corrosão.

[36] ASTM INTERNATIONAL. ASTM E8 / E8M-16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Pensilvânia. 2016.

[37] LIMA, Gustavo Dória. Análise dos danos em arames de armadura de tração e umbilicais submetidos à fadiga por fricção. 2023. 112 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023.

[38] MACEDO, Matheus Duarte. Construção de um dispositivo de fricção fadiga em arames de armadura de tração de umbilicais submarinos. 2023. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023.

[39] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12107: Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data. 2003

[40] PENG, J.F. *et al.* On the damage mechanisms of bending fretting fatigue. Tribology International, [s. l], v. 76, p. 133-141, 2014.

[41] MARDER, A.R. The metallurgy of zinc-coated steel. Progress In Materials Science, [s. l], v. 45, p. 191-271, jun. 2000.

[42] CAMPANHER, Cirano Gewehr. Otimização experimental em processo de galvanização de arames de camada pesada. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[43] GARCIA, Miguel A. *et al.* Experimental device for fretting fatigue tests in 6201 aluminum alloy wires from overhead conductors. Wear, [s. l], v. 460, p. 1-11, 2020.