



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL

AVALIAÇÃO DE DESGASTE MECÂNICO EM  
AGULHAS DE LINGUETA APLICADAS EM TEAR  
CIRCULAR

JÔNATA SILVA DO NASCIMENTO ANDRADE  
NATAL - RN, 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL

# AVALIAÇÃO DE DESGASTE MECÂNICO EM AGULHAS DE LINGUETA APLICADAS EM TEAR CIRCULAR

Jônata Silva do Nascimento Andrade

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil (PPGET) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA TÊXTIL**, orientado pelo Prof. Dr. Marcos Silva de Aquino.

NATAL - RN  
2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Andrade, Jonata Silva do Nascimento.

Avaliação de desgaste mecânico em agulhas de lingueta aplicadas em tear circular / Jonata Silva do Nascimento Andrade. - 2022.

52f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Têxtil, Natal, 2022.

Orientador: Dr. Marcos Silva de Aquino.

Coorientador: Dr. José Ivan de Medeiros.

1. Tribologia - Dissertação. 2. Desgaste - Dissertação. 3. Agulhas - Dissertação. 4. Malharia - Dissertação. I. Aquino, Marcos Silva de. II. Medeiros, José Ivan de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 677

# AVALIAÇÃO DE DESGASTE MECÂNICO EM AGULHAS DE LINGUETA APLICADAS EM TEAR CIRCULAR

JÔNATA SILVA DO NASCIMENTO ANDRADE

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Têxtil (PPGET) da Universidade Federal do Rio Grande  
do Norte

## Banca Examinadora da Dissertação

Prof. Dr. Marcos Silva de Aquino \_\_\_\_\_

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof. Dr. José Ivan de Medeiros \_\_\_\_\_

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Prof. Dr. Moisés Vieira de Melo \_\_\_\_\_

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Externo ao Programa

Prof. Dr. Alexandre José Sousa Ferreira \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Santa Catarina - Avaliador Externo à Instituição

NATAL, 18 de abril de 2022.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar ao Alfa e Ômega, por permitir que tudo acontecesse no Seu tempo.

À minha esposa, Ádalla Maria, por todo o incentivo diário, pela paciência com meus momentos ausentes e pelos conselhos aos fins de noite. Agradeço por todo o cuidado e amor dedicado a mim todos os dias.

Aos meus pais e à minha família inteira, que sempre me fizeram crer que eu poderia seguir em frente com meus sonhos, que sempre acreditaram em mim e sempre respeitaram minhas decisões.

Ao meu orientador, professor Marcos Silva de Aquino, por todas as dicas, ensinamentos e por toda a orientação dada durante a elaboração deste trabalho, e principalmente por ser, além de orientador, um amigo que se preocupou não somente com a realização do trabalho, mas se preocupou comigo como pessoa.

Ao meu co-orientador, professor Ivan Medeiros, por todos os ensinamentos dados sobre a área têxtil e por conselhos valiosos principalmente no início deste trabalho, que foram importantes para que eu tivesse um norte para dar seguimento ao trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Têxtil que foi onde pude adquirir algum conhecimento na área, não só através das disciplinas da pós-graduação, mas também na convivência com todos os professores.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais (DeMAT), na pessoa de Carla Laize Costa pela paciência e dedicação em analisar minhas amostras e mandar o mais rápido possível os resultados.

Ao professor Alexandre, que generosamente participou da banca de qualificação e me deu muitas orientações valiosas.

Ao professor Moisés Vieira Melo, pelas sugestões para este trabalho e pela participação na banca.

ANDRADE, J. S. N. **Avaliação De Desgaste Mecânico Em Agulhas De Lingueta Aplicadas Em Tear Circular**. 2022. 52 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022.

## Resumo

Estruturas têxteis de malha são largamente utilizadas pela humanidade, e são produzidas em máquinas dotadas de um sistema de deslizamento mecânico. As agulhas se encaixam em ranhuras (sulcos finos) e deslizam sobre elas em um movimento alternativo, de forma que seja possível a formação de laçadas. Esse sistema provoca naturalmente atrito e desgaste nas agulhas e nas ranhuras, que traz a necessidade de troca dessas peças com o tempo de uso. Este trabalho consiste em uma avaliação de desgaste em agulhas de lingueta, visando contribuir para uma melhor compreensão do mecanismo de desgaste que acontece neste sistema. Para analisar o desgaste no pé da agulha, foi feita uma adaptação mecânica em uma máquina de simulação de desgaste em tecidos, de forma que fosse formado um par tribológico entre o pé da agulha e um excêntrico, de mesmo modelo utilizado em teares circulares. Para analisar o desgaste no corpo da agulha foi utilizado um tear circular de pequeno diâmetro, com agulhas colocadas em ranhuras aleatórias, analisando-se o desgaste oriundo do contato entre o par tribológico agulha e ranhura. Para ambos os casos, foram separadas agulhas, que foram submetidas aos seguintes ensaios: 15.000, 30.000, 45.000 e 60.000 ciclos a seco, com lubrificação de óleo Silvertex 32B (para teares) e com lubrificação de óleo Silvertex 32B + condicionador de metais, com velocidade única de 260 ciclos por minuto. A temperatura foi monitorada através de um termopar fixado próximo à região de atrito. As amostras foram analisadas por imagem de microscópio digital portátil, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS). Como resultados foi possível verificar os pontos da agulha mais susceptíveis ao desgaste. Verificou-se que folgas internas na ranhura influenciam nas regiões de desgaste do corpo da agulha e que deformidades na ranhura influenciam na intensidade de desgaste do pé da agulha. A temperatura teve um aumento mais acentuado nos ciclos sem lubrificação, a presença de

lubrificante atenuou esse aumento, bem como a presença do condicionador de metais atenuou levemente o desgaste.

Palavras-chave: Tribologia, Desgaste, Agulhas, Malharia.

ANDRADE, J. S. N. **Evaluation of Mechanical Wear in Circular Knit Machine Latch Needles**. 2022. 52 p. Master's Dissertation in Textile Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022.

## **Abstract**

Knitted textile structures are widely used by mankind, and they are produced on machines with a mechanical sliding system. The needles fit into trick wall (thin grooves) and slide over them in an alternating motion so that loops can be formed. This system naturally causes friction and wear on the needles and trick wall, which makes it necessary to replace these parts over time. This research consists of an evaluation of wear on latch needles, in order to contribute to a better understanding of the wear mechanism that occurs in this system. In order to analyze the abrasion on the needle butt, a mechanical adaptation was made in a machine that simulates abrasion on fabrics, so that a tribological pair was formed between the needle butt and a cam, of the same model used in circular knitting machines. To analyze the abrasion on the needle stem, a small diameter circular knitting machine was used, with needles placed in random trick walls, analyzing the abrasion from the contact between the tribological pair needle stem and trick wall. For both cases, needles were separated and subjected to the following tests: 15,000, 30,000, 45,000, and 60,000 dry cycles, with Silvertex 32B oil lubrication (for circular knitting machines) and with Silvertex 32B oil lubrication + metal conditioner, at a single speed of 260 cycles per minute. The temperature was monitored with a thermocouple fixed near to the friction zone. The samples were analyzed by portable digital microscope image, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). As a result, it was possible to verify the points of the needle most susceptible to abrasion. It was found that internal clearances in the trick wall influence the wear regions of the needle stem and that deformities in the trick wall influence the wear intensity of the needle butt. The temperature increment is higher in cycles without lubrication. So the lubricant attenuate the temperature increase and the metal conditioner act as abrasion reducer.



Keywords: Tribology, Abrasion, Needle, Knitting

## Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura de Tecido Plano e da Malha .....	5
Figura 2 - Movimento da agulha durante a formação da laçada. ....	6
Figura 3 - Partes de uma agulha .....	7
Figura 4 - Platina .....	8
Figura 5 - Excêntricos .....	8
Figura 6 - Ranhuras .....	9
Figura 7 - Tipos de desgaste.....	11
Figura 8 - Ensaio disco de Borracha com Areia .....	12
Figura 9 - Área Real de Contato.....	13
Figura 10 - Modelo Comercial de Tribômetro .....	14
Figura 11 - Esquema de Ensaio no Tribômetro.....	15
Figura 12 - Exemplo de Gráfico de Coeficiente de Atrito .....	15
Figura 13 - Curva de Stribeck.....	17
Figura 14 - Equipamento Utilizado Para o Ensaio no Pé da Agulha .....	19
Figura 15 - Acessórios Utilizados no Equipamento .....	20
Figura 16 - Equipamento com Acessórios.....	21
Figura 17 - Fluidos Lubrificantes Utilizados.....	22
Figura 18 - Tear Utilizado Para os Ensaios do Par Tribológico: “pé+excêntrico” .....	24
Figura 19 - Microscópio Digital Portátil Utilizado .....	25
Figura 20 - MEV e EDS.....	26
Figura 21 - Imagem Ampliada do Pé da Agulha Nova e Desgastada .....	27
Figura 22 - Imagens MEV do Pé da Agulha .....	28
Figura 23 - Variação de Temperatura Nos Ensaios a Seco .....	28
Figura 24 - EDS de Amostras do Pé das Agulhas em Diferentes Situações.....	29
Figura 25 - EDS do Excêntrico Antes e Depois dos Ensaios .....	29

Figura 26 - Deformação na Ranhura.....	30
Figura 27 - Imagem de Regiões do Corpo da Agulha Nova e Desgastada.....	31
Figura 28 - Imagens MEV do Corpo da Agulha.....	32
Figura 29 - Aumento da Temperatura Nos Diferentes Regimes de Lubrificação .....	32
Figura 30 - EDS de Amostras do Corpo das Agulhas em Diferentes Situações .....	33
Figura 31 – Esquema de Folga Interna da Ranhura .....	36

## **Sumário**

<b>1 Introdução</b> .....	1
1.1 Justificativa .....	2
1.2 Objetivos .....	2
<b>2 Revisão Teórica</b> .....	4
2.1 Os Têxteis .....	4
2.2 Uma visão geral sobre malharia.....	5
2.3 Tribologia .....	9
<b>3 Materiais e Métodos</b> .....	19
3.1 par tribológico: pé/excêntrico .....	19
3.2 Par tribológico: corpo/ranhura.....	22
3.3 Análise do desgaste.....	25
<b>4 Resultados e Discussões</b> .....	27
<b>5 Conclusões</b> .....	37
<b>6 Sugestões Para Trabalhos Futuros</b> .....	38
<b>7 Referências</b> .....	39

## 1 Introdução

Estruturas têxteis de malha são largamente utilizadas pela humanidade. Sua maciez, elasticidade e bom caimento garantem o conforto para quem utiliza. Além de sua aplicação no vestuário, essas estruturas podem ser aplicadas em diversas outras áreas, como na medicina e no fortalecimento de compósitos, por exemplo. Pode-se afirmar que, independentemente do país em que vive, as malhas sempre estão inseridas na vida das pessoas. Por causa disso, a indústria têxtil está presente em diversas partes do mundo (GANZER et al., 2015).

Para que sejam produzidas, as estruturas de malha contam com os mais diferentes tipos de maquinário, de diferentes tamanhos e tecnologias. Porém, todos esses equipamentos têm algo em comum: fabricação da malha através de um sistema de deslizamento mecânico, onde agulhas se encaixam em ranhuras (rasgos finos) e deslizam sobre elas em um movimento alternativo, de forma que seja possível a formação de laçadas (SPENCER, 2001).

Esse sistema de deslizamento provoca naturalmente um desgaste nas agulhas, que traz a necessidade de troca dessas peças com o tempo de uso. O desgaste das agulhas em geral leva a quebra da mesma, o que causa a parada da máquina para substituição. Por outro lado, muitas vezes a máquina pode funcionar com a agulha defeituosa e gerar falhas no tecido de malha, gerando prejuízos (grozbeckert.com, 2021).

O aumento na vida útil de peças submetidas a movimentos deslizantes é muito válido e buscado principalmente com o uso de bons lubrificantes. Na malharia não é diferente, ainda assim, o desgaste existe e o custo decorrente dele precisa ser incluído nas contas das empresas. Existem no mercado substâncias químicas capazes de diminuir o desgaste em sistemas mecânicos metálicos, são substâncias redutoras de atrito que agem na superfície dos metais (WYPYCH, 2014). Essas substâncias geralmente conseguem melhorar o desempenho atingido pelos lubrificantes comuns (MOURA, 2014).

Apesar de o desgaste estar diretamente relacionado ao processo de fabricação, há dificuldade de encontrar na literatura informações relacionadas ao comportamento e durabilidade das agulhas. Para reduzir os efeitos negativos do

desgaste, faz-se necessário conhecer os mecanismos que levam até ele, dessa forma, propõe-se neste trabalho a realização de uma avaliação de desgaste mecânico em agulhas, de forma que seja possível alcançar uma maior compreensão do desgaste e testar diferentes formas para sua redução, inclusive com um produto redutor de atrito.

## **1.1 Justificativa**

Avaliações de desgaste em pares tribológicos são de suma importância para entender causas de desgaste e como amenizá-las, diminuindo perdas de material/peças e economizando energia. Assim como o atrito está presente em praticamente todas as áreas, os estudos sobre ele também estão. Engenharia (MELO, 2012), agricultura (WERNER, 2013) e até a biologia (WANG, 2021), são exemplos de áreas que realizam estudos para compreender as influências do atrito e do desgaste. Em grande parte dos casos, isso é feito através de ensaios em pares tribológicos.

Diante da grande importância do ramo de malharia para a indústria têxtil (e para outros mercados), dos problemas causados por desgaste de agulhas e, além disso, da escassez de trabalhos anteriores nos quais tenham sido feitas análises de pares tribológicos com agulhas, justifica-se relevância de pôr em prática as ideias propostas neste trabalho.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

Realizar avaliação de desgaste em agulhas de malharia, de modo que seja possível compreender melhor os efeitos do atrito entre: as ranhuras do cilindro do tear e o corpo as agulhas e entre os excêntricos da máquina e o pé da agulha.

### **1.2.2 Específicos**

- Compreender os principais pontos em que a agulha mais se desgasta;
- Estabelecer relação entre os tipos de desgaste e os defeitos no tecido de malha;

- Propor medidas para redução de desgaste, a partir da análise dos resultados.

## 2 Revisão Teórica

### 2.1 Os Têxteis

Na área têxtil existe um extenso fluxo, que vai desde a matéria prima (de origem natural ou sintética) e vai até a produção das estruturas. De acordo com Long (2006), os têxteis podem ser divididos em três níveis hierárquicos, de acordo com a respectiva escala associada: fibras em escala microscópica, fios em escala mesoscópica e tecidos na escala macroscópica.

Tudo começa pelas fibras que são as menores e mais básicas estruturas dos têxteis. Essas fibras podem ser definidas como matéria-prima têxtil, caracterizadas pela grande proporção de comprimento em relação à espessura (LONG, 2006). Podem ser encontradas na natureza (como o algodão por exemplo) ou podem ser produzidas em laboratório (poliéster, por exemplo).

Quando as fibras são tratadas e reorganizadas (podendo ser torcidas ou não), elas se transformam em fios. Estes têm diâmetro bem maior que as fibras, são mais resistentes e podem ser classificados quanto à forma de torção, à matéria prima ou à sua densidade linear. A tabela 1 mostra as principais unidades de densidade linear para os fios.

Tabela 1 – Principais unidades de densidade linear de fios

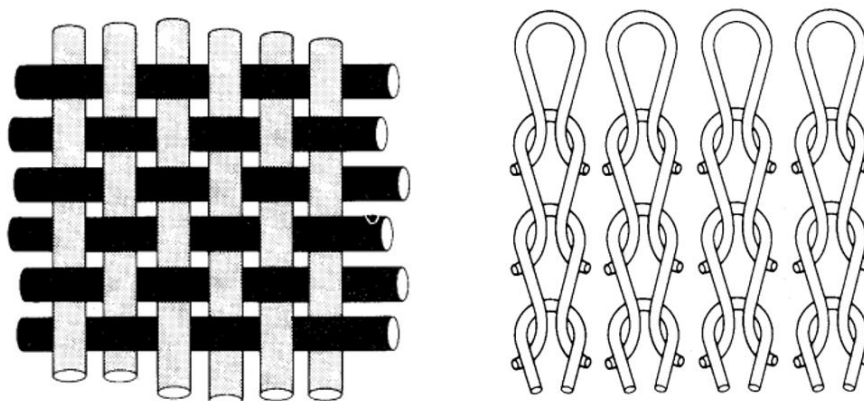
<b>Unidade</b>	<b>Definição</b>
Tex (SI)	1 tex = 1g/1000m
Denier	1 den = 1g/9000m
Número métrico	1 Nm = 1000m/1000g

Fonte: Adaptado de Long, 2006

Finalmente, com os fios podemos fabricar as estruturas têxteis bidimensionais ou tridimensionais: os tecidos. Eles podem ser classificados de acordo com a forma que os fios são arranjados. Tecidos planos tem um entrelaçamento de fios cruzados, enquanto malhas tem os fios organizados em forma de laçadas (Figura 1)



Figura 1 – Estrutura de Tecido Plano (à esquerda) e de Malha (à direita)



Fonte: Adaptado de: Spencer, 2001

## 2.2 Uma visão geral sobre malharia

Muito antes do advento da indústria e do desenvolvimento tecnológico que temos hoje, as estruturas de malha já existiam. Isso porque as malhas surgiram a partir do tricô. Este é muito antigo, acredita-se que ele já era utilizado há mais de 1000 anos antes de Cristo (BERTOLUCI, 2018).

A partir do termo “tricô” podemos descrever a técnica de construção de estruturas têxteis que são formadas por fios contínuos. Essa estrutura consiste em colunas de laçadas entrelaçadas verticalmente. A malha que utilizamos hoje é uma evolução do tricô, já que possui uma estrutura semelhante.

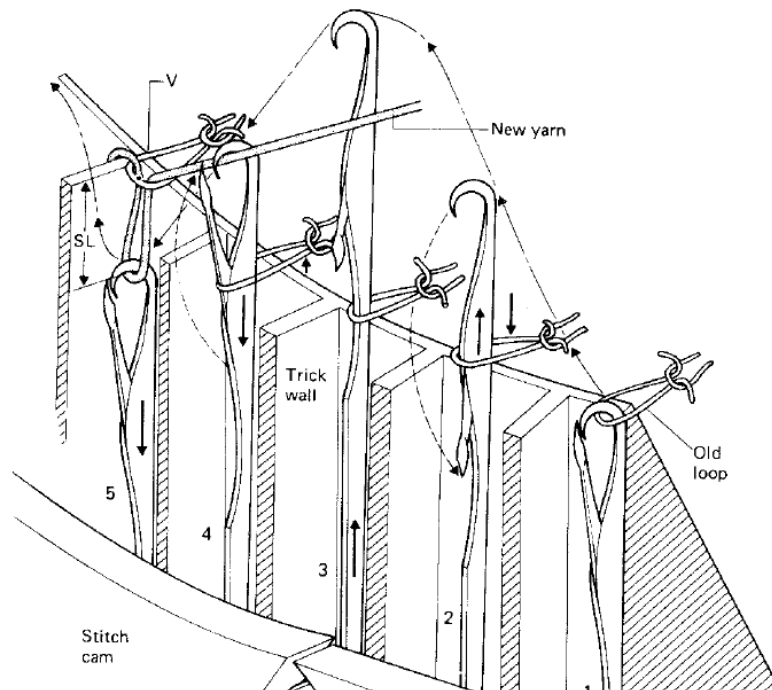
Ainda na Figura 1 pode-se observar que o fio que forma a malha está acomodado em forma de laçadas. Essas laçadas formam colunas e carreiras. Cada grupo de laçadas posicionadas uma abaixo da outra formam uma coluna, enquanto que cada grupo de laçadas posicionadas lado a lado formam uma carreira.

Em outras palavras, uma carreira é uma linha horizontal de laçadas produzidas por agulhas adjacentes durante um ciclo da máquina. Já uma coluna é uma linha vertical de laçadas entrelaçadas por uma mesma agulha em sucessivos ciclos da máquina (SPENCER, 2001).

Para que o fio possa ser colocado em formato de laçadas, é necessário que ele passe pela máquina de malharia. A malha é formada pelas agulhas, que tem um formato curvado na parte superior (cabeça) e uma lingueta (Figura 3). Essas agulhas estão instaladas na máquina e trabalham em um sistema mecânico de deslizamento “sobe e desce”.

A Figura 2 demonstra basicamente como funciona esse movimento. As agulhas são alinhadas lado a lado, onde cada uma delas é responsável pela formação de uma coluna. A agulha sobe para pegar o fio, que passa por dentro da cabeça da agulha (gancho). Em seguida, a agulha desce e puxa o fio para baixo, formando uma nova laçada. Quando a agulha desce, a lingueta se fecha, permitindo que a laçada anterior passe por fora do gancho vá para a parte de trás da agulha (BERTOLUCI, 2018).

Figura 2 – Movimento da agulha durante a formação da laçada.



Fonte: Spencer, 2001

Os teares que fabricam malhas podem ser classificados em dois tipos: retilíneos e circulares. Como o próprio nome sugere, nos teares retilíneos as agulhas trabalham sobre uma placa plana e o fio é alimentado de forma alternativa (vai e vem).

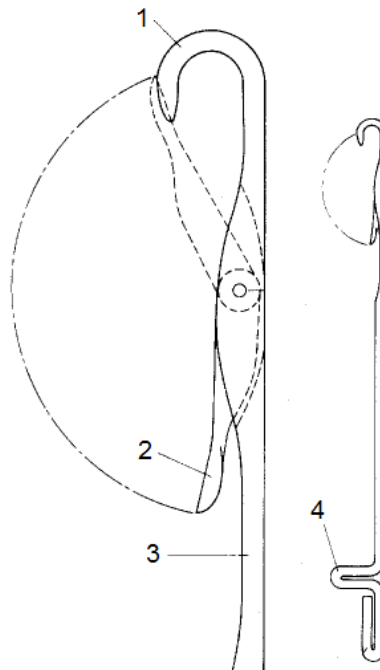
Nos teares circulares, as agulhas trabalham em um cilindro. Os teares retilíneos conseguem produzir malhas mais pesadas e espessas, enquanto os circulares podem produzir malhas mais leves e finas. A máquina possui muitas peças, porém, a formação da malha depende principalmente dos seguintes elementos:

### - Agulhas

As agulhas de malharia são as grandes responsáveis por pegar o fio e colocá-lo em formato de laçadas, formando a malha. Ela é composta de 4 partes principais:

- Cabeça (1): É a parte superior da agulha. Possui formato de gancho e serve exatamente para pegar o fio.
- Lingueta (2): Trabalha juntamente com a cabeça em um movimento de abre-fecha. Quando aberta permite que o fio entre no gancho e quando fechada permite que a laçada anterior passe para trás.
- Corpo (3): Liga o pé da agulha à cabeça.
- Pé (4): Parte inferior da agulha. Se encaixa nos cames, permitindo que a agulha se movimente de cima para baixo formando laçadas.

Figura 3 – Partes de uma agulha.



### - Platinas

São o segundo elemento mais importante para a formação das laçadas. A platina é uma chapa metálica fina que possui um formato específico. Trabalha em movimento perpendicular em relação ao movimento da agulha. Ela serve para auxiliar a agulha na formação da laçada, mantendo uma pressão extra no fio, evitando que a laçada antiga mude de posição, entre outras funções, que dependem do seu formato e da máquina em que ela está instalada.

Figura 4 – Platina.



Fonte: Groz-Beckert, 2020

### Cames

Os cames são dispositivos que convertem o movimento rotativo do cilindro em movimento alternativo nas agulhas. Ele possui um rasgo, onde o pé da agulha se encaixa e desliza. O perfil desse rasgo determina que movimento a agulha fará, ou seja, determina qual será o ponto da malha.

Figura 5 – Excêntricos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

### Ranhuras:

São rasgos finos e retos que ficam no cilindro da máquina. É nas ranhuras que as agulhas ficam alojadas e fazem o seu movimento de subida e descida através de deslizamento.

Figura 6 – Ranhuras



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

## **2.3 Tribologia**

A tribologia é a ciência que estuda o atrito e o desgaste entre superfícies de contato que estão em movimento relativo entre si (MEDEIROS, 2010). Essa ciência é muito importante, uma vez que estuda fenômenos que podem trazer uma redução de atrito e de desgaste, além da economia de energia.

Por outro lado, não é apenas no objetivo de se reduzir atrito que faz estudos tribológicos. Não é possível fazer uma generalização quanto ao benefício ou malefício do atrito, tudo vai depender das características de cada situação. Encontramos atrito em todo tipo de contato entre duas superfícies, desde o contato entre articulações ósseas (onde o baixo atrito é necessário) até o freio de um automóvel (onde o atrito

deve ser elevado). Assim percebe-se a grande presença dos fenômenos tribológicos em nosso dia a dia, bem como a importância de estudá-los.

De acordo com Aquino (2012), quando há contato entre dois corpos, ocorre o par tribológico, que é influenciado por suas superfícies. Os fatores que influenciam no coeficiente de atrito são a pressão de contato, a velocidade relativa entre os corpos e as variáveis inerentes a cada material.

### 2.3.1 Desgaste

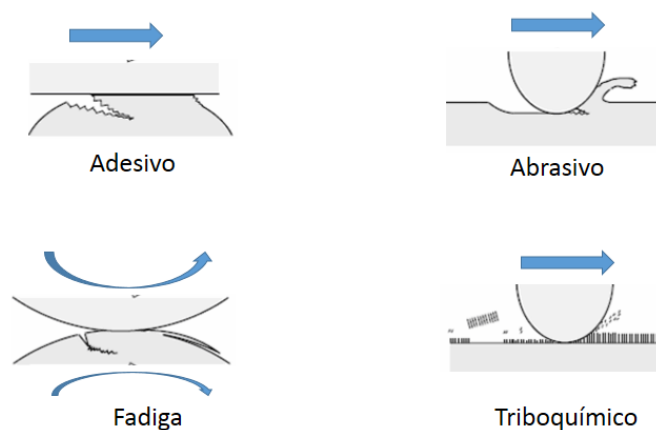
A interação entre superfícies naturalmente provoca remoção de material em ambas, ou em apenas uma delas, de acordo com as propriedades mecânicas do material de cada uma. A esse processo natural de perda damos o nome de desgaste.

Um sistema tribológico com desgaste normalmente é constituído de um corpo sólido, um contra-corpo ou material base e um elemento intermediário, que pode ser lubrificante, ou mesmo sujidades que possam existir entre os dois corpos (DUTRA, 2005).

O desgaste é um dos principais focos do estudo da tribologia. De acordo com a norma DIN 50320 (apud DUTRA, 2005), existem quatro tipos principais de desgaste (Figura 7):

- Desgaste adesivo (ou por deslizamento): Ocorre quando há um movimento relativo de deslizamento entre as superfícies. A carga aplicada nesse tipo de desgaste causa deformação plástica no local;
- Desgaste por fadiga: Há formação de trincas causadas por carregamentos alternados, ou seja, pelo alto número de repetições de movimento;
- Desgaste abrasivo: Ocorre a remoção de material da superfície. Acontece devido a dureza e o formato da superfície do corpo. Esse tipo de desgaste é o que mais está presente na indústria (EYRE, 1976).
- Desgaste triboquímico (corrosivo): Duas superfícies sólidas reagem com o meio (líquido ou gasoso), essa reação forma uma camada intermediária que é removida com o contato das superfícies.

Figura 7 – Tipos de desgaste.



Fonte: Adaptado de Kato, 2001 apud Vieira et al., 2014

Diversos mecanismos podem ser responsáveis pelo acontecimento do desgaste, que também pode ser influenciado pelas mudanças cinemáticas das superfícies no momento do contato. Peterson (1980 apud Radi, 2017), define como possíveis movimentos: oscilação, deslizamento, rolamento, impacto e erosão, que podem classificar o processo de desgaste. Esse processo também pode ser classificado quanto ao elemento interfacial, subdividindo-se em desgaste de 2 corpos ou desgaste de 3 corpos (quando há partículas sólidas entre as duas superfícies).

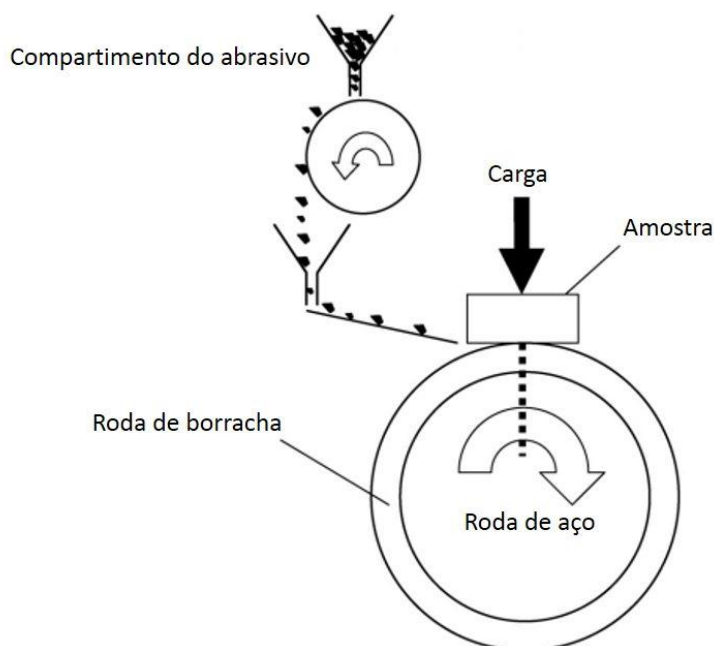
Werner (2013) afirma que os ensaios de desgaste geralmente estão relacionados a fenômenos específicos de desgaste, com agentes externos, e muitas vezes do próprio ambiente. Ou ainda podem ser mais direcionados aos fenômenos que ocorrem em dispositivos como um todo, como por exemplo os testes de durabilidade de um equipamento. O autor lista como principais tipos de ensaio:

- Ensaio de disco de borracha com areia:

Um disco de borracha gira sobre a superfície que se deseja analisar, e essa superfície é exposta a um material arenoso. Esse teste é normatizado pela ASTM G65.

O ensaio de disco de borracha pode ser empregado para analisar o comportamento à abrasão de vários materiais. Sendo assim, é possível verificar de forma quantitativa a resistência à abrasão dos mesmos. (NAHVI et. al., 2009).

Figura 8 – Ensaio disco de Borracha com Areia



Fonte: Adaptado de Nahvi et. al, 2009

- Ensaio de Erosão de Partículas Sólidas

Consiste no direcionamento de partículas sólidas contra uma superfície em análise, utilizando-se de jatos de ar comprimido. Esse teste é encontrado na literatura como ASTM G76, e simula uma superfície que é constantemente atacada por areia e vento. O desgaste é medido de acordo com a perda de massa após o teste.

- Ensaio de Erosão por Cavitação

Determina a resistência de materiais ao desgaste causado por bolhas de líquidos a alta pressão em sistemas hidráulicos, e é normatizado como ASTM G32.

- Ensaio de desgaste de quatro esferas

Consegue determinar as propriedades dos lubrificantes em superfícies que deslizam entre si, através da norma ASTM D4172.

- Ensaio de desgaste bloco disco

Esse teste é normatizado pela ASTM G77. Com esta técnica é possível determinar o desgaste que ocorre quando há deslizamento de contatos lineares,



podendo-se utilizar qualquer tipo de material e com boa possibilidade de modificar as variáveis do teste.

- Ensaio pino sobre disco

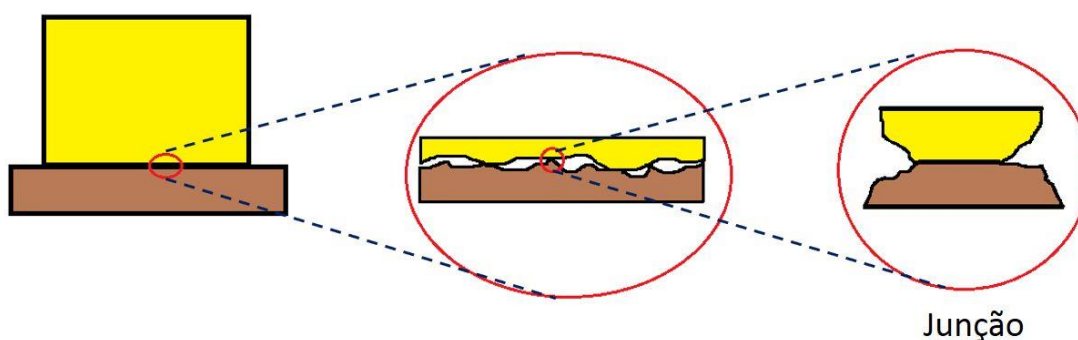
Determina o desgaste em áreas de contato reduzidas. O teste consiste em rotacionar um disco ou um pino, onde ambos estão em contato entre si. Dessa forma existe um desgaste circular no disco causado pelo pino. A norma que procedimenta o teste é a ASTM G99.

### 2.3.2 Rugosidade

Toda superfície de um sólido, por mais uniforme e lisa que possa parecer estar, possui uma grande quantidade de distorções e defeitos que se estendem por toda ela. Segundo Stachowiak e Batchelor (1996, apud SANTANA, 2009), essas irregularidades, que muitas vezes são perceptíveis apenas em escala microscópica, apresentam grande influência no atrito e no desgaste.

Santana (2009) descreve que, de acordo com a norma DIN 4760, os desvios superficiais são apresentados em uma escala de primeira a sexta ordem. Apesar de terem características diferentes, eles se sobrepõem entre si, formando o perfil da rugosidade da superfície.

Figura 9 – Área Real de Contato.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Se duas superfícies planas são colocadas juntas, a olho nu aparentemente em toda a superfície há contato. Entretanto, devido a rugosidade, se ampliarmos a imagem o que realmente se pode observar é que apenas alguns pontos estão em

contato, são as junções (FIGURA 9). A soma da área de todos esses pontos é denominada de área real de contato (PERSSON, 2000). Esta área sofre alterações à medida que acontece o atrito, visto que a superfície muda, e as junções geralmente tornam-se mais numerosas.

### 2.3.3 Tribômetros

Segundo Neis (2019), os tribômetros que estão no mercado podem ser classificados em rotativos e alterativos. Estes equipamentos servem para fazer ensaios de tribologia com o material que está sendo utilizado como corpo de prova. Os procedimentos realizados por esses equipamentos são regidos por normas (ASTM G99, 2010 e ASTM G133, por exemplo) que determinam como deverá ser feito o ensaio.

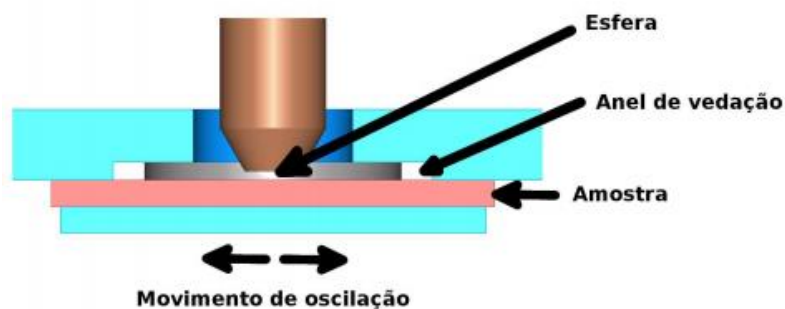
No mercado atual existem modelos de tribômetros bastante tecnológicos. A empresa TTP Indústria Mecânica LTDA, por exemplo, disponibiliza seu catálogo no site oficial da marca ([ttp.ind.br](http://ttp.ind.br)). Pode-se observar que alguns modelos os tribômetros já têm sistemas avançados com algoritmos que analisam cada teste e geram interpretações.

Figura 10 – Modelo Comercial de Tribômetro



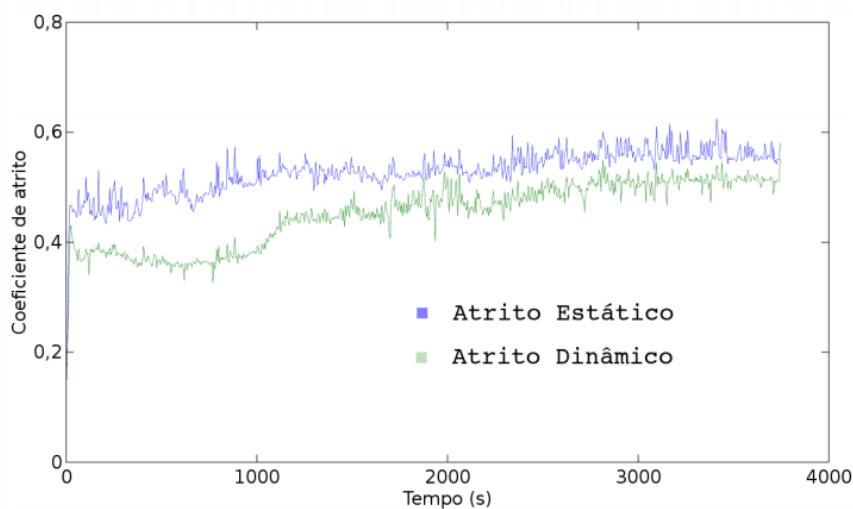
Fonte: [ttp.ind.br](http://ttp.ind.br) 2021

Figura 11 – Esquema de Ensaio no Tribômetro



Fonte: ttp.ind.br, 2021

Figura 12 – Exemplo de Gráfico de Coeficiente de Atrito



Fonte: ttp.ind.br, 2021

Muitos pesquisadores já realizaram estudos na área da tribologia. Neis (2012), por exemplo, desenvolveu um equipamento e uma metodologia de ensaio para análises tribológicas em freios automotivos. O autor conseguiu desenvolver um produto eficiente, com uma incerteza de apenas 2,9%.

Medeiros (2010) realizou um estudo tribológico de laboratório para analisar o desgaste em tubos de transporte de petróleo. O autor conseguiu determinar qual o tipo de desgaste sofrido nos dutos e analisou diversos outros parâmetros.

### 2.3.4 Lubrificação

Descobriu-se desde os tempos antigos a necessidade de lubrificar para reduzir o atrito. Desde então a aplicação de lubrificantes tornou-se essencial e difundida em diversas áreas. De acordo com Macedo (2017), lubrificação é a aplicação de um filme entre duas superfícies para suavizar e facilitar o movimento relativo entre elas. A substância que compõe esse filme é denominada lubrificante.

Os lubrificantes são muito utilizados para evitar o desgaste de equipamentos, já que eles conseguem reduzir significativamente o atrito entre superfícies. Sua origem pode ser vegetal, animal, mineral ou sintética. Segundo Matos (2011), a lubrificação tem como principais funções:

- Redução do desgaste das peças;
- Resfriamento;
- Proteção contra corrosão;
- Limpeza.

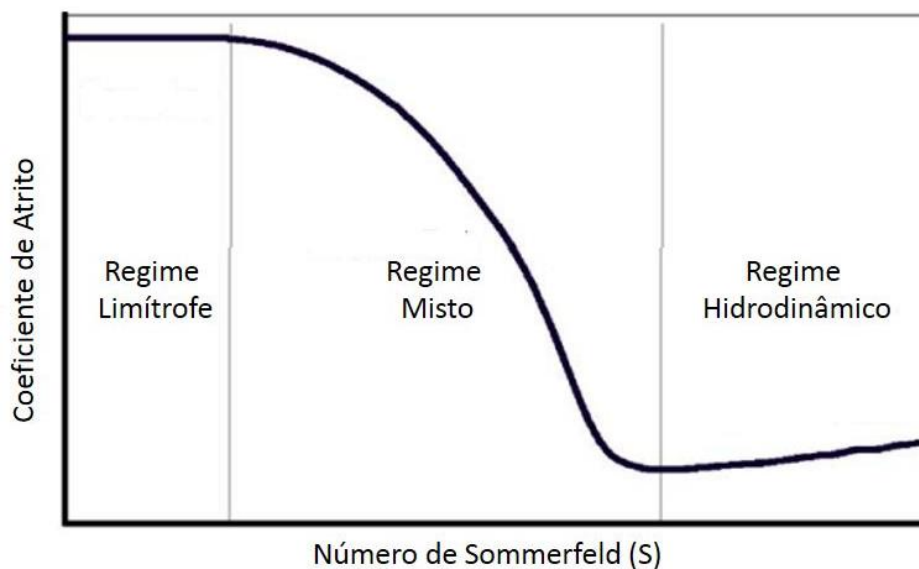
Para que uma lubrificação seja eficiente, ela precisa estar caracterizada dentro da faixa ideal, ou seja, reduzindo o máximo possível o atrito. Para entender isso, faz-se necessária a análise da curva de *Stribeck* (FIGURA 13).

Nesta curva percebemos que o coeficiente de atrito é alto na ausência de lubrificação, e vai caindo à medida que se adiciona o lubrificante. Porém, quando a quantidade do lubrificante é demasiada, o filme de lubrificação torna-se espesso demais, e gera uma resistência ao movimento, aumentando assim o atrito do par tribológico.

Praticamente qualquer sistema mecânico em que haja movimento relativo, como motores, engrenagens, turbinas ou mancais de deslizamento, têm a necessidade do uso de lubrificantes. Para determinar qual o melhor lubrificante para uma aplicação qualquer, uma das principais propriedades a serem analisadas é a

viscosidade, que pode ser definida como a dificuldade que o fluido tem para escorrer ou ainda como a resistência do fluido ao cisalhamento.

Figura 13 – Curva de Stribeck



Adaptado de Lu, 2006

Existem três classificações para determinação da viscosidade dos lubrificantes comercializados no mercado. Para óleos lubrificantes industriais, utiliza-se a classificação ISO, enquanto para lubrificantes automotivos utiliza-se as classificações SAE (MATOS, 2011).

A qualidade da lubrificação também será influenciada pela velocidade do par tribológico, além da viscosidade do lubrificante. Pressão de trabalho e temperatura também influenciam na viscosidade. Todos esses fatores devem ser observados ao definir o tipo de lubrificante e a espessura do filme, de acordo com a aplicação do sistema (HENRIQUES, 2021).

### 2.3.5 Redutores de atrito

Além do uso de lubrificantes, existe no mercado substâncias redutoras de atrito que podem trabalhar juntamente com os lubrificantes, agindo geralmente em superfícies metálicas.

De acordo com Wypych (2014), o bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) é uma substância de origem mineral muito versátil. Pode ser utilizado em diversas aplicações, como por exemplo no uso como catalisador de tratamento de combustíveis, catodo para baterias de lítio e também como lubrificante sólido.

Quando utilizado na lubrificação, o bissulfeto de molibdênio é um ótimo substituto para óleos e graxas quando estes não podem ser utilizados (pelas condições do uso ou quando há contaminações por exemplo). Locais muito quentes, muito frios ou até mesmo na indústria aeroespacial utiliza-se essa substância.

Devido sua estrutura molecular, o  $\text{MoS}_2$  forma filmes lubrificantes de forma bastante fácil, penetrando em locais de difícil acesso e melhorando os efeitos do desgaste. Geralmente é utilizado na forma de pó ou de graxa.

Moura (2014) descreve em seu trabalho o uso de  $\text{MoS}_2$  em um procedimento de usinagem de titânio. O autor experimentou adicionar lubrificantes sólidos (incluindo  $\text{MoS}_2$ ) no fluido de corte em uma proporção de 20%. Como resultado, conseguiu-se aumentar em 53% a vida útil da ferramenta de corte.

Também existe no mercado um produto mais novo, cuja proposta é aderir na superfície do metal e reduzir o desgaste. Trata-se dos condicionadores de metais. O mais famoso é o Militec-1. Quadros (2016) relata ter feito um estudo da energia consumida por rolamentos e as perdas por causa do atrito. Nas suas análises ele utilizou o Militec para tentar reduzir o atrito.

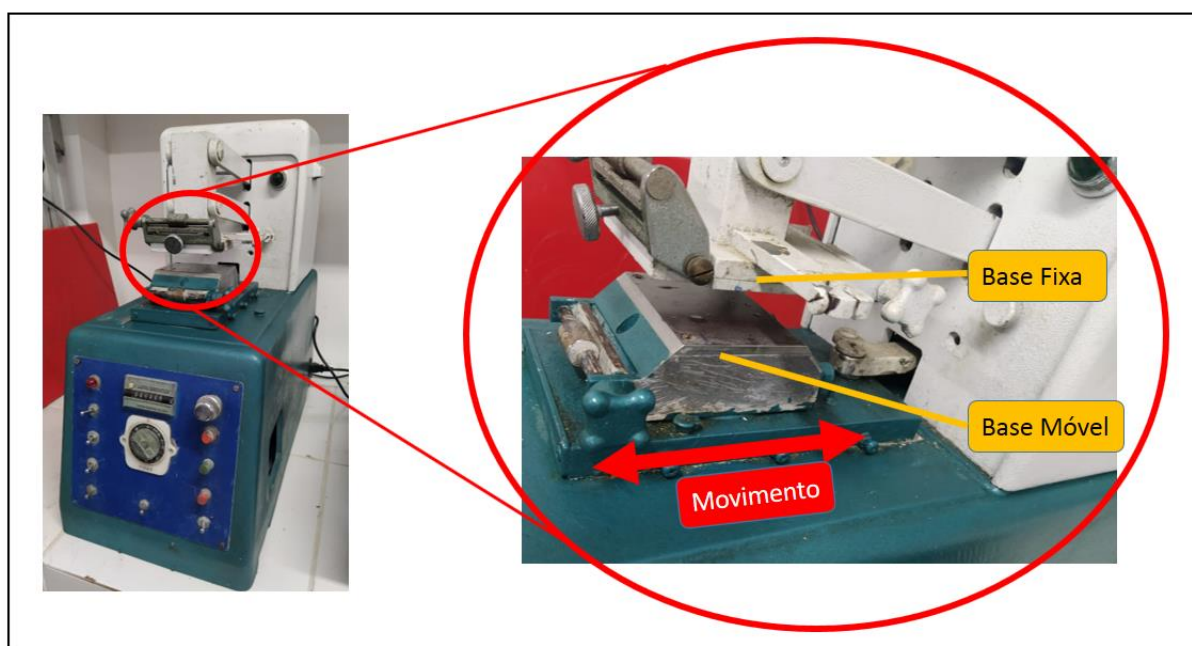
### 3 Materiais e Métodos

Os métodos descritos a seguir são simulações tribológicas para análise de duas regiões da agulha: pé e corpo.

#### 3.1 Avaliação do desgaste no pé da agulha (par tribológico: pé/excêntrico)

Para realização dessa análise, fez-se uma adaptação em um equipamento de fricção de tecidos (FIGURA 14), a fim de que ele pudesse comportar uma agulha de lingueta e um excêntrico. A agulha escolhida para os ensaios foi da marca Groz-Beckert, modelo Vo-LS 141.41 G007. Em suas características originais, o equipamento possui uma base fixa para tecido e uma base móvel, fazendo movimentos alternativos de “vai e vem”. A velocidade é constante de 130 ciclos por minuto, considerando 1 ciclo como um movimento de ida e um movimento de retorno, que condiz com uma volta do motor.

Figura 14 – Equipamento Utilizado Para o Ensaio no Pé da Agulha

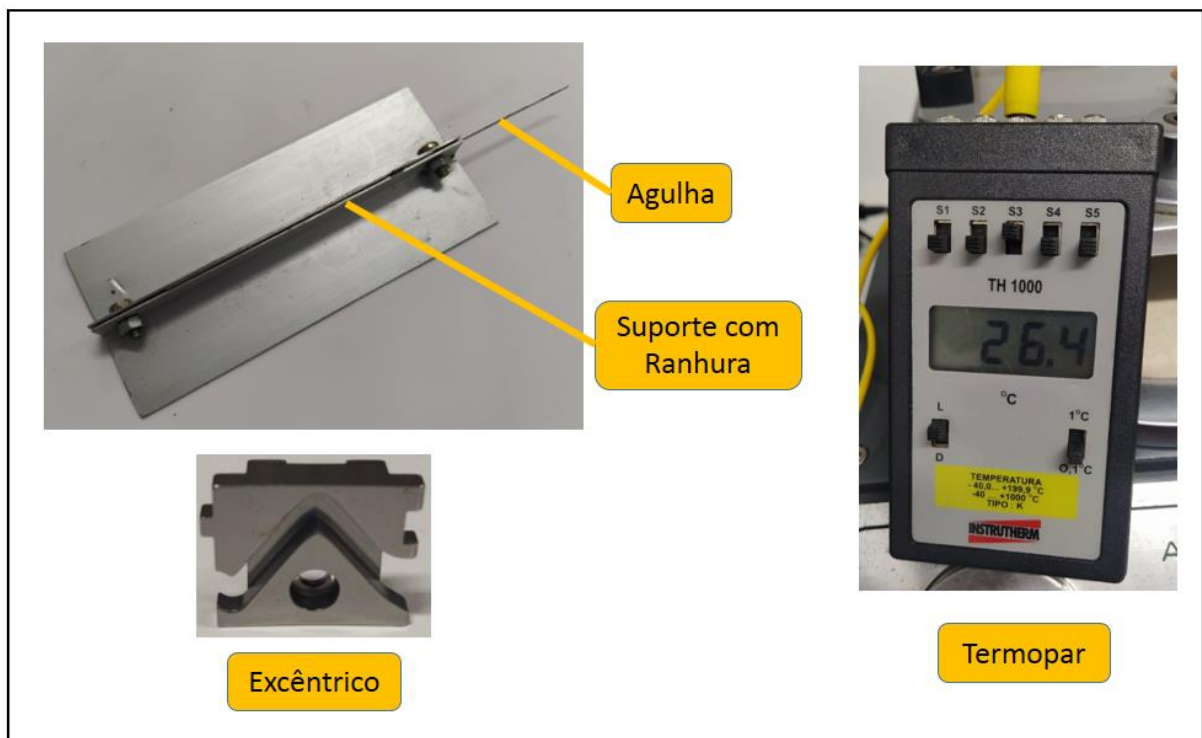


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Elaborou-se então um pequeno suporte para agulha (FIGURA 15), de modo que ela estivesse acomodada como em um tear, no qual a mesma fica encaixada em uma ranhura, como visto na revisão bibliográfica. Fixou-se esse suporte na base

móvel do equipamento. Para fazer o par tribológico, fixou-se na base fixa um excêntrico de tear circular original. Próximo à região de atrito, colocou-se um sensor de temperatura (termopar) para monitoração desta variável durante o ensaio. O termopar utilizado possui a capacidade de medir a temperatura com a precisão de apenas uma casa decimal.

Figura 15 – Acessórios Utilizados no Equipamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

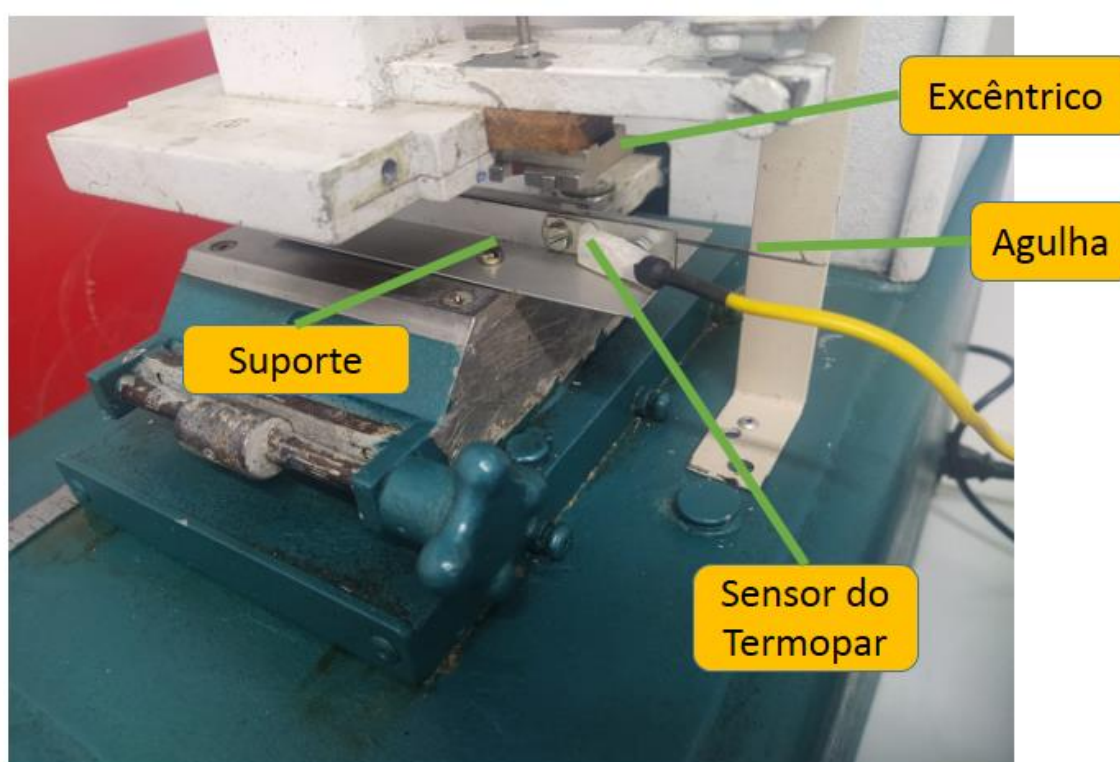
Considerou-se que um ciclo do equipamento equivale a dois ciclos para agulha, isso porque no movimento de ida da base móvel, a agulha sobe e desce (1 ciclo completo) e no movimento de retorno da base móvel, a agulha sobe e desce mais uma vez (outro ciclo completo). Submeteu-se agulhas aos seguintes ensaios:

- 15.000 ciclos a seco;
- 30.000 ciclos a seco;
- 45.000 ciclos a seco;
- 60.000 ciclos a seco;
- 15.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b;



- 30.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b;
- 45.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b;
- 60.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b;
- 15.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b e condicionador de metais;
- 30.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b e condicionador de metais;
- 45.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b e condicionador de metais;
- 60.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b e condicionador de metais.

Figura 16 – Equipamento com Acessórios



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A Figura 16 mostra o equipamento de fricção com todos os acessórios de adaptação montados. Observa-se que a agulha está limitada pelo suporte (ranhura) a fazer movimentos apenas no sentido do seu eixo, de acordo com o curso da pista do excêntrico, localizado na base fixa, encaixado no pé da agulha. Para todos os ensaios desse par tribológico, foram reservadas 12 agulhas ao todo (4 para cada regime de lubrificação).

### 3.1.1 Ciclos a seco

Foram reservadas 4 agulhas para esse ensaio, que foram submetidas ao atrito seco. A cada 2.500 ciclos foi observada a temperatura mostrada no termopar.

### 3.1.2 Ciclos com Lubrificação de óleo Silvertex 32b

Outras 4 agulhas foram utilizadas para esse ensaio, sendo elas submetidas ao atrito lubrificado. Foi reservado em um Becker o óleo Silvertex 32b (FIGURA 17). A cada 2.500 ciclos foi observada a temperatura mostrada no termopar. A cada 1.250 ciclos foi adicionado 0,5ml de óleo com auxílio de uma pipeta. O óleo foi inserido na região de contato entre o pé da agulha e o excêntrico.

Figura 17 – Fluidos Lubrificantes Utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

### 3.1.3 Ciclos com Lubrificação de óleo e Condicionador de Metais

As últimas 4 agulhas foram utilizadas para esse ensaio, e submetidas ao atrito lubrificado com óleo e condicionador de metais. Foi reservado em um Becker uma mistura de óleo Silvertex 32b e condicionador de metais da marca Militec a 6% (FIGURA 17). Essa porcentagem de Militec obedeceu a recomendação do fabricante

para aplicação do produto em máquinas industriais (MILITEC, 2022). A cada 2.500 ciclos foi observada a temperatura mostrada no termopar. A cada 1.250 ciclos foi adicionado 0,5ml da mistura com auxílio de uma pipeta, que foi inserida na região de contato entre o pé da agulha e o excêntrico.

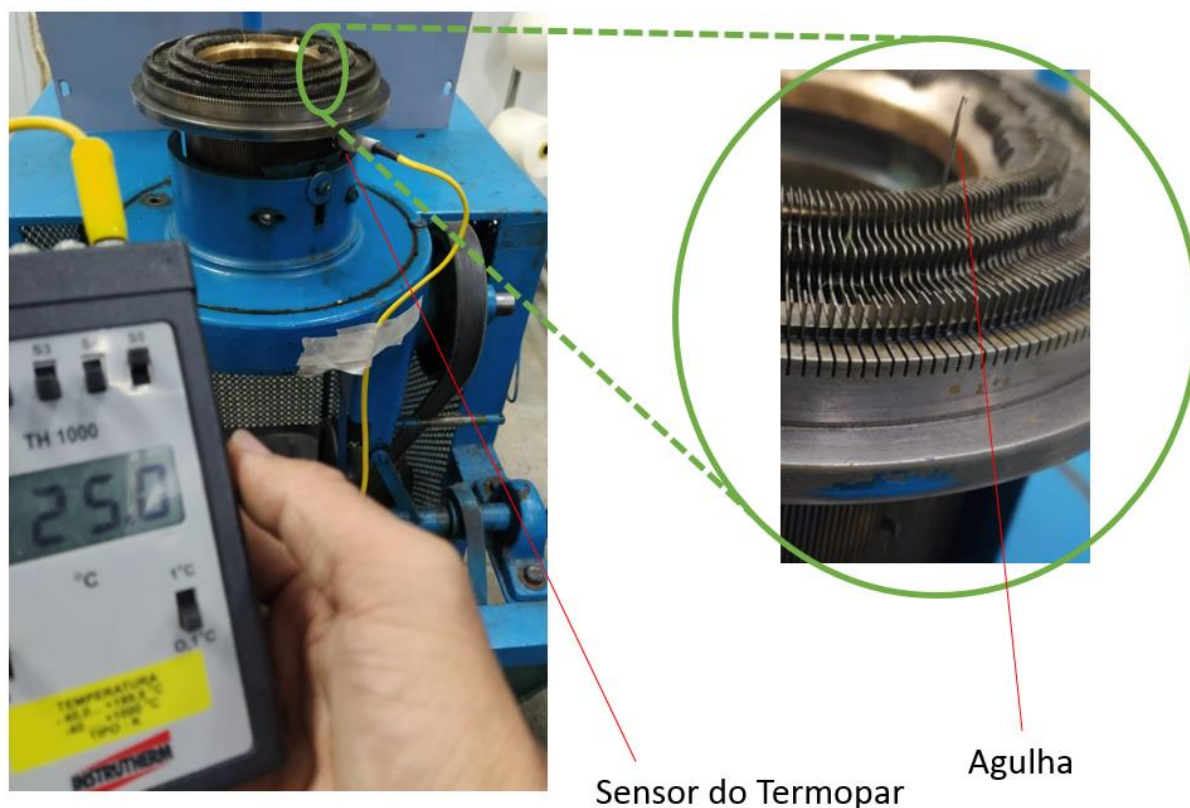
### **3.2 Avaliação do desgaste no corpo de agulha (par tribológico: corpo/ranhura)**

Para realização dessa análise, a agulha escolhida foi da marca Groz-Beckert, modelo 70.34 G0372 (também 12 unidades ao todo). Utilizou-se um tear circular de pequeno diâmetro (FIGURA 18) de 3 polegadas. O tear funciona com velocidade constante de 250 rpm. Como se trata de um equipamento que já foi utilizado para produção de malha, foi feita uma lavagem prévia das ranhuras com desengraxante para remoção dos resíduos de óleo lubrificante e sujidades.

Neste ensaio, considerou-se como par tribológico o corpo da agulha e as paredes da ranhura. Inseriu-se agulhas novas em ranhuras aleatórias e colocou-se a máquina em funcionamento, nas seguintes condições:

- 15.000 ciclos a seco;
- 30.000 ciclos a seco;
- 45.000 ciclos a seco;
- 60.000 ciclos a seco;
- 15.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b;
- 30.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b;
- 45.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b;
- 60.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b;
- 15.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b e condicionador de metais;
- 30.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b e condicionador de metais;
- 45.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b e condicionador de metais;
- 60.000 ciclos com lubrificação de óleo silvertex 32b e condicionador de metais.

Figura 18 – Tear Circular Utilizado Para os Ensaio do Par Tribológico: Pé e Excêntrico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

### 3.2.1 Ciclos a seco

Foram reservadas 4 agulhas para esse ensaio, que foram submetidas ao atrito seco. A cada 2.500 ciclos foi observada a temperatura mostrada no termopar.

### 3.2.2 Ciclos com Lubrificação de óleo Silvertex 32b

Outras 4 agulhas foram utilizadas para esse ensaio, sendo elas submetidas ao atrito lubrificado com óleo. A cada 2.500 ciclos foi observada a temperatura mostrada no termopar. A cada 1.250 ciclos foi adicionado 0,5ml de óleo com auxílio de uma pipeta. O óleo foi inserido na região superior da ranhura, para que se espalhasse por gravidade em toda a região de contato entre o corpo da agulha e a ranhura.

### 3.2.3 Ciclos com Lubrificação de óleo e Condicionador de Metais

As 4 agulhas restantes foram submetidas ao atrito lubrificado com a mistura de óleo e Militec. A cada 2.500 ciclos foi observada a temperatura mostrada no termopar. A cada 1.250 ciclos foi adicionado 0,5ml da mistura com auxílio de uma pipeta. A mistura foi inserida na região superior da ranhura, para que se espalhasse por gravidade em toda a região de contato.

### 3.3 Análise do desgaste

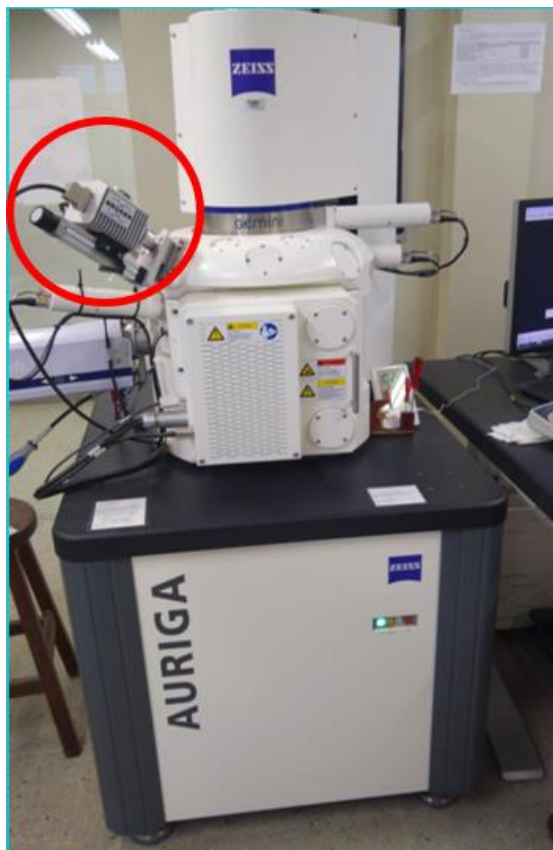
Para auxiliar nas análises, usou-se um microscópio portátil digital, marca Knup, modelo 8012 (FIGURA 19) para verificação visual dos desgastes. Também solicitou-se imagens de MEV/EDS (Microscópio Eletrônico de Varredura / Espectroscopia por Energia Dispersiva) para análise dos elementos presentes nas amostras e possível transferência de material através do desgaste.

Figura 19 – Microscópio Digital Portátil Utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Figura 20 – MEV e EDS



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A Figura 20 mostra o equipamento (Localizado no Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN) utilizado para obtenção das imagens de MEV (marca Carl Zeiss, modelo Auriga) e de EDS (marca Bruker, modelo Nano X flash 430H), circulado em vermelho, acoplado na parte superior do MEV.



## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo, discorrer-se-á sobre o que foi obtido como resultados.

### 4.1 Par Tribológico Pé da agulha e Excêntrico

Verificou-se o estado da agulha nova, sem nenhum ciclo de desgaste, para servir como referência em comparação com as demais.

Figura 21 – Imagem Ampliada do Pé da Agulha Nova e Desgastada

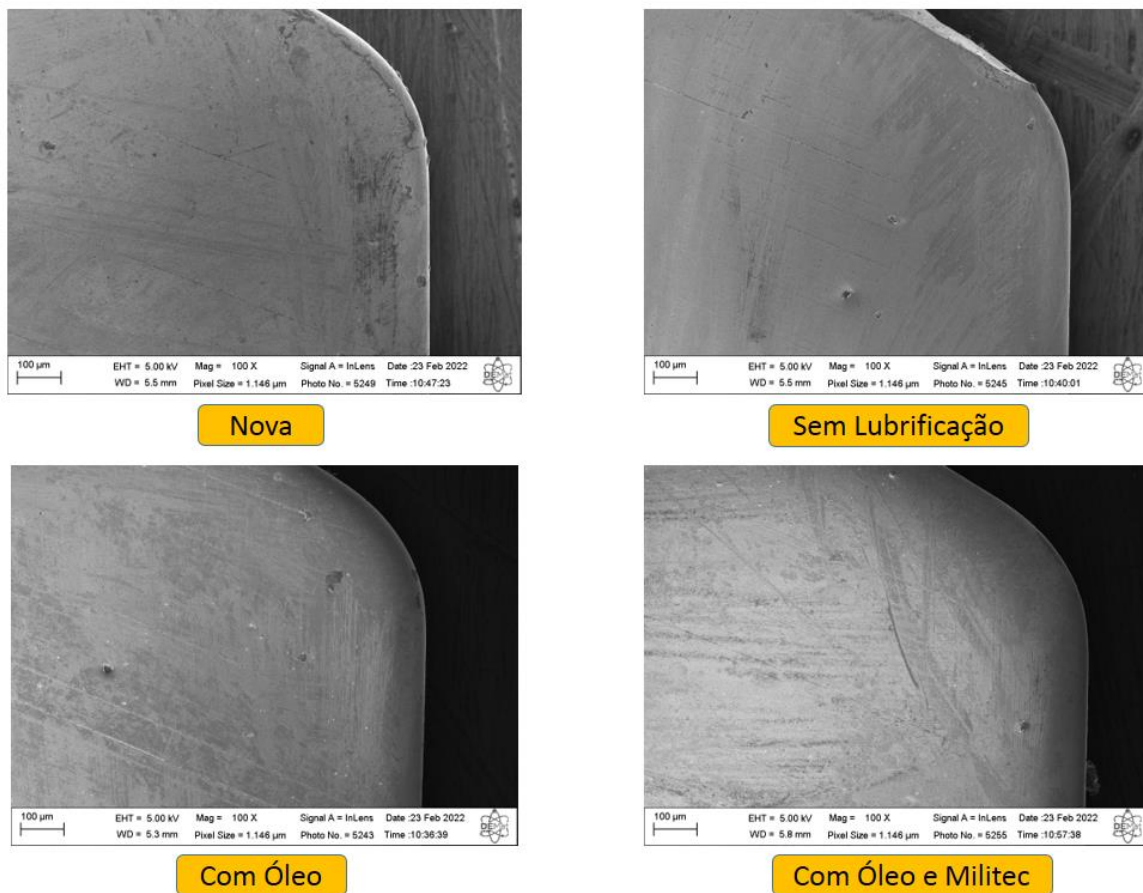


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Ao analisar a imagem do microscópio portátil, pode-se verificar os principais pontos de desgaste das agulhas. Para este par tribológico, as arestas do pé são os pontos mais sujeitos ao desgaste, como pode ser observado na Figura 21. A Figura 22 mostra imagens de MEV com uma comparação do desgaste entre amostras das diferentes situações de cada grupo de ensaios. Para os ensaios sem lubrificação, a temperatura subiu em média 1,3 °C nos primeiros 3.800 ciclos (aproximadamente), estabilizando-se nos ciclos seguintes (FIGURA 23). Para os ensaios lubrificados não houve aumento significativo de temperatura.

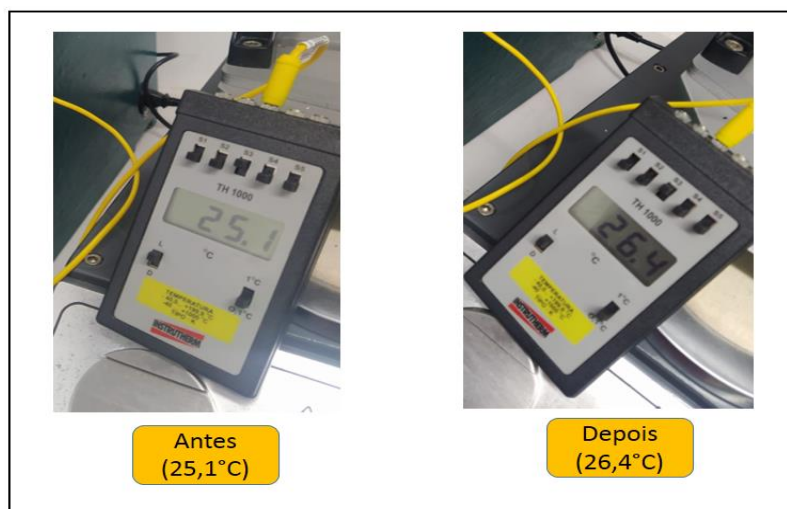
Foi feito o EDS das amostras (FIGURA 24), que mostrou basicamente a presença de ferro tanto na agulha nova quanto nas agulhas ensaiadas. A Figura 25 mostra o EDS do excêntrico, antes e depois dos ensaios, onde pode-se observar, além de ferro, a presença de cromo e vanádio.

Figura 22 – Imagens MEV do Pé da Agulha



Fonte: Lab. de Caract. De Materiais (UFRN), 2022

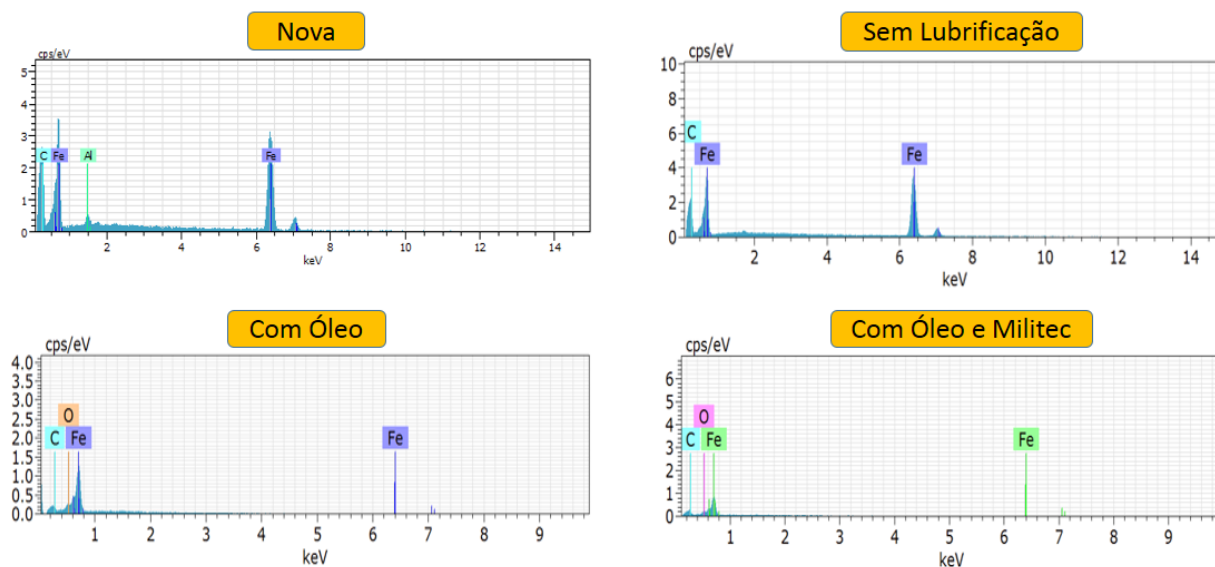
Figura 23 – Variação de Temperatura Nos Ensaios a Seco



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

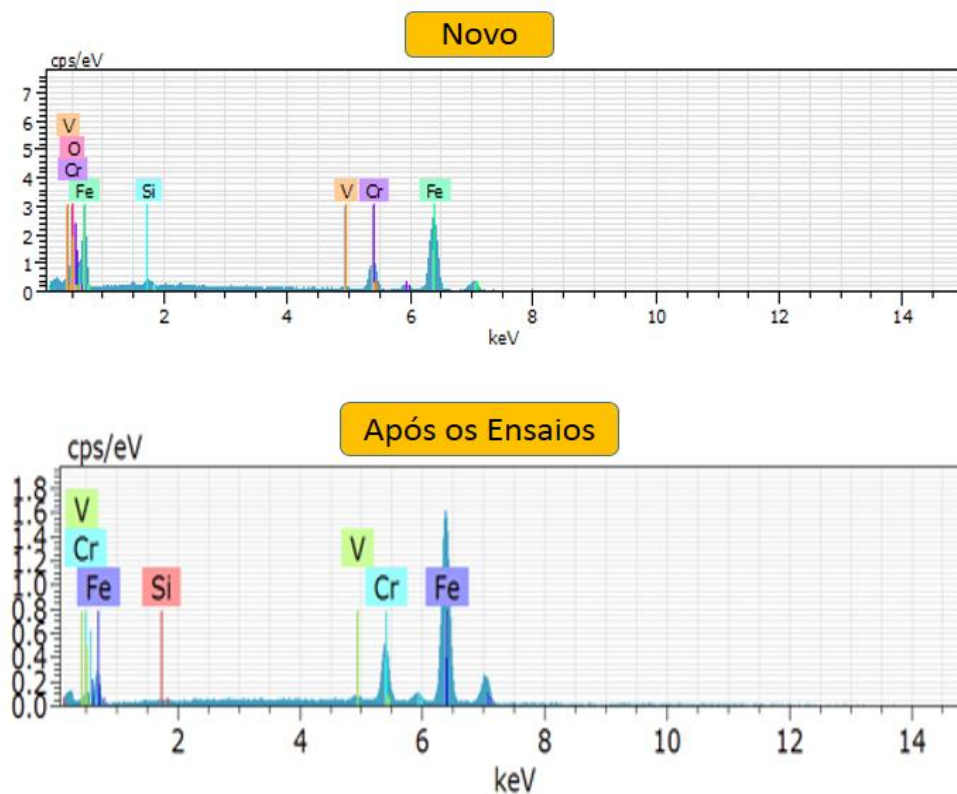


Figura 24 – EDS de Amostras do Pé das Agulhas em Diferentes Situações



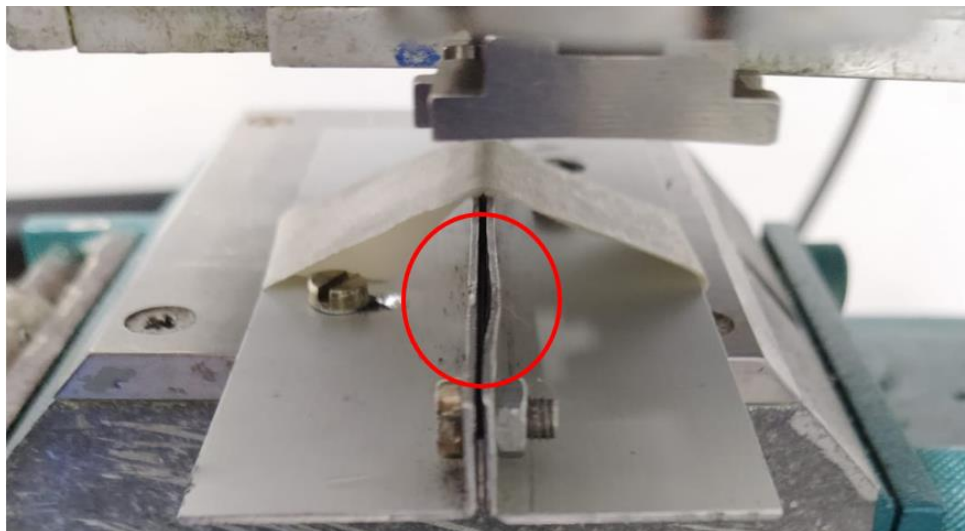
Fonte: Lab. de Caract. De Materiais (UFRN), 2022

Figura 25 – EDS do Excêntrico Antes e Depois dos Ensaíos



Fonte: Lab. de Caract. De Materiais (UFRN), 2022

Figura 26 – Deformação na Ranhura



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

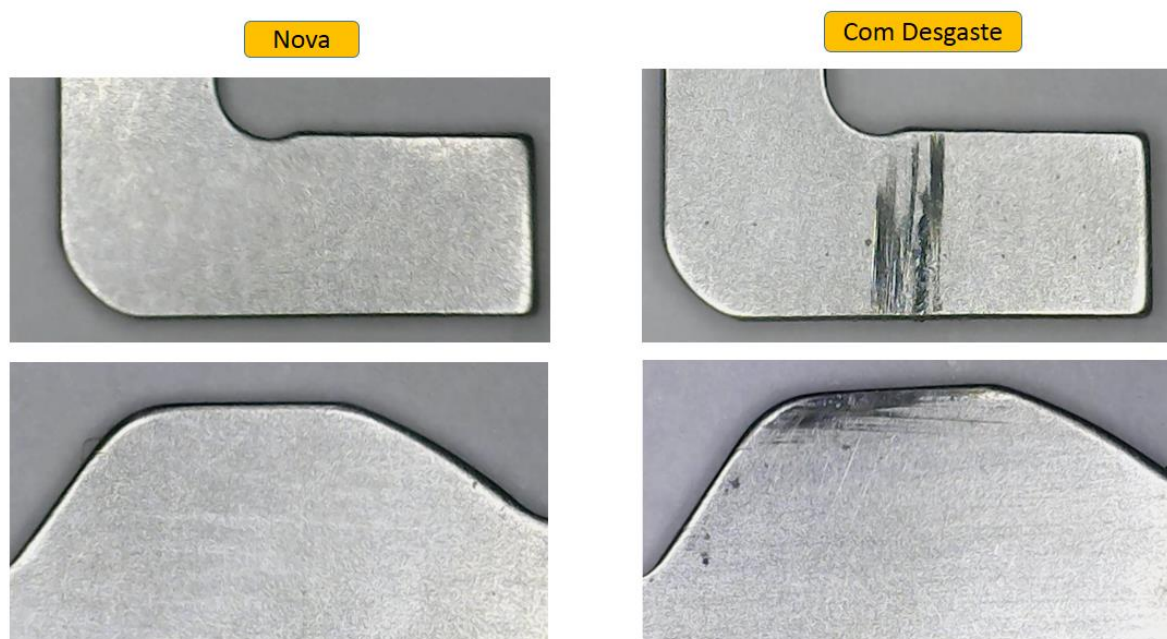
Houve também uma deformação da ranhura durante os ensaios sem lubrificação (FIGURA 26), que causou instabilidade no movimento da agulha, no momento em que pé entrava na pista do excêntrico. Nos ensaios com lubrificação, porém, não houve essa deformação, e a agulha movimentou-se com maior uniformidade.

#### **4.2 Par Tribológico Corpo da Agulha e Ranhura**

Em todos os ensaios, principalmente na ausência de lubrificação, o desgaste apresentou-se seguindo um mesmo padrão: as regiões inferiores da agulha que entraram em contato com a parte frontal da ranhura sofreram mais desgaste. A Figura 27 mostra imagens ampliadas (microscópio portátil) com as regiões de maior desgaste na agulha.

As imagens MEV (FIGURA 28) mostram um desgaste mais acentuado na amostra que sofreu atrito sem lubrificação, e esse desgaste diminui gradativamente na amostra que sofreu desgaste com lubrificação de óleo e com lubrificação de óleo com Militec.

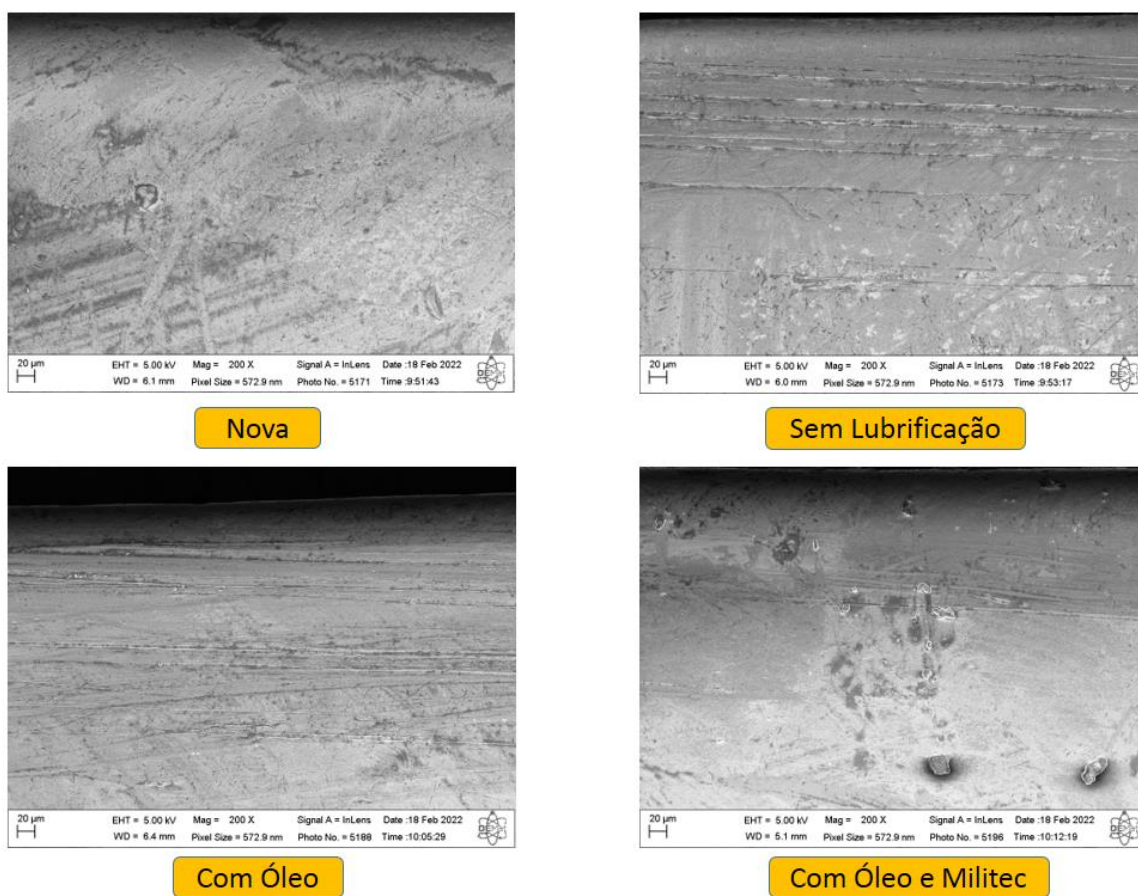
Figura 27 – Imagem Ampliada de Regiões do Corpo da Agulha Nova e Desgastada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

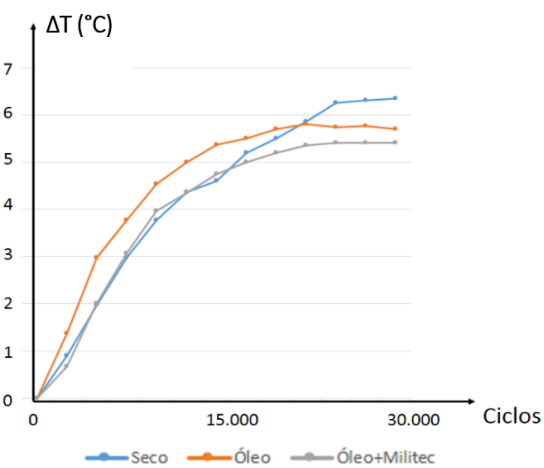
Houve aumento significativo de temperatura durante os ensaios, porém na presença de lubrificação, houve um equilíbrio em certo momento, onde a temperatura estabilizou-se (FIGURA 29), enquanto na ausência de lubrificação a temperatura tendeu a não se estabilizar. Foi feito o EDS das amostras (FIGURA 30), que mostrou basicamente a presença de ferro tanto na agulha nova quanto nas agulhas ensaiadas.

Figura 28 – Imagens MEV do Corpo da Agulha



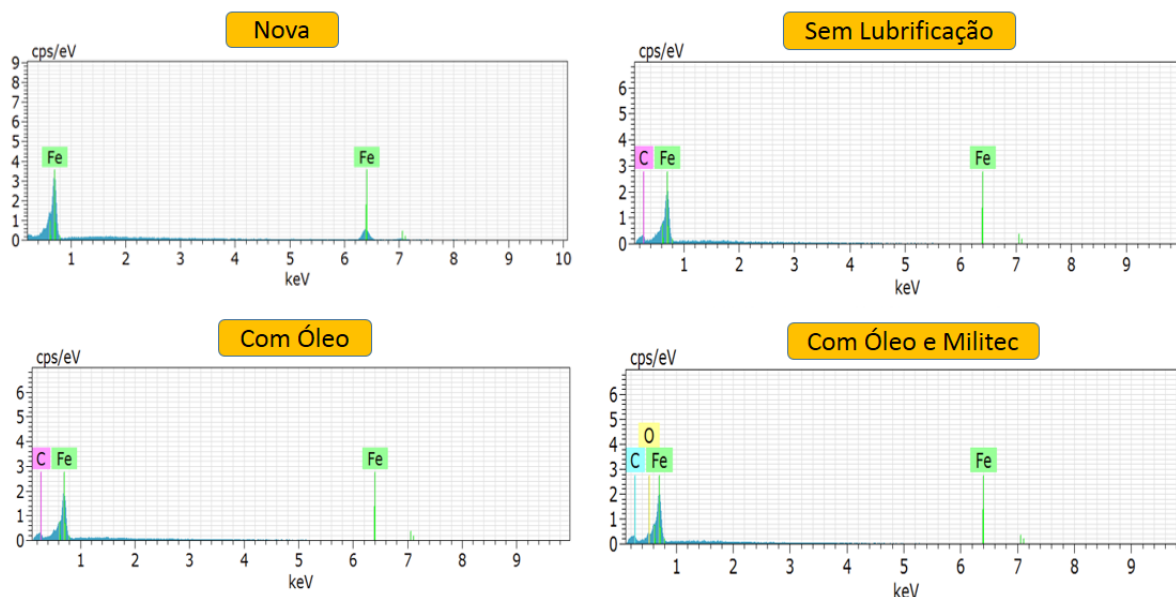
Fonte: Lab. de Caract. De Materiais (UFRN), 2022

Figura 29 – Aumento da Temperatura Nos Diferentes Regimes de Lubrificação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 30 – EDS de Amostras do Corpo das Agulhas em Diferentes Situações



Fonte: Lab. de Caract. De Materiais (UFRN), 2022

### 4.3 Discussão

- Temperatura

Como visto anteriormente, a temperatura foi monitorada por meio de termopar durante os ensaios. É importante ressaltar, antes de qualquer discussão, que a precisão de apenas uma casa decimal deste instrumento pode limitar o uso dos dados obtidos para estudos estatísticos. Esta limitação, porém, não implica negativamente na análise do comportamento da temperatura neste trabalho, cujo objetivo, no que tange à essa variável, é fazer comparações de alteração da mesma em diferentes situações de lubrificação.

Para o par tribológico pé/excêntrico, houve o aumento de 1,3°C ocorrido nos ciclos iniciais de cada ensaio a seco, e esse aumento pode ser atribuído ao atrito causado, já que nos ciclos lubrificados não houve alteração de temperatura.

Para o par tribológico corpo/ranhura, houve um aumento de temperatura em todos os ensaios, porém na ausência de lubrificação, a temperatura não

estabilizou. Já nos ensaios com a presença apenas de óleo, a temperatura estabilizou por volta dos 20.000 ciclos. Na presença de óleo e Militec, a temperatura estabilizou também por volta dos 20.000 ciclos, mas as temperaturas em geral subiram menos.

É provável que a temperatura tenha estabilizado após certo tempo porque atingiu o equilíbrio de transferência de calor com o meio, e a energia térmica que era gerada pelo atrito foi sendo conduzida logo em seguida para o ambiente. Para o ensaio do par tribológico pé/excêntrico, pode-se considerar o valor de 1,3°C como consideravelmente elevado, visto que o ensaio se tratou de apenas uma agulha no suporte, e um tear de grande diâmetro possui geralmente milhares de agulhas.

A estabilização da temperatura mais rápida para os ensaios lubrificados demonstra a importância de uma lubrificação eficiente das agulhas, para redução de atrito e também para auxiliar na troca de calor, já que, na maioria dos casos, fluidos lubrificantes também têm propriedades de arrefecimento, causa provável da estabilização da temperatura nos ensaios deste trabalho.

A eficiência maior na redução de temperatura para os ensaios do par tribológico corpo/ranhura com presença de óleo+Militec sugere uma redução de atrito ainda maior na presença de condicionador de metais junto do óleo lubrificante.

- Par tribológico: Pé/Excêntrico

De forma geral, os resultados mostraram que houve um desgaste pequeno no pé da agulha. Hipoteticamente isso pode acontecer devido à qualidade do material escolhido pelo fabricante. Além disso, verifica-se que ao analisar as características superficiais do excêntrico e do pé da agulha, percebe-se que há um tratamento de superfície para deixá-la menos rugosa, o que contribui para a redução de atrito.

Por outro lado, a própria característica do par tribológico nesse caso dificulta a visualização do desgaste. Trata-se de um contato não conforme, ou seja, a superfície de contato entre o pé da agulha e o excêntrico é muito pequena, e por isso esse desgaste também fica concentrado em uma área pequena. Isso também explica o fato de o pé ser a região da agulha mais sujeita a quebras, e isso ocorre, dentre outros fatores, pelo fato de que, com uma área de contato muito pequena, a pressão se eleva (Pressão é o quociente da força dividida pela área de contato). Dessa forma, com a pressão do contato elevada, o pé fica mais vulnerável a travamentos caso haja alguma irregularidade superficial no excêntrico.



Os maiores desgastes para este par tribológico aconteceram na ausência de lubrificação (FIGURA 22), onde pôde-se perceber alguns travamentos do pé da agulha, que causaram danos à ranhura (Figura 26). Com a ranhura danificada, houve instabilidade no movimento da agulha, trazendo desgastes mais acentuados ao pé. Percebe-se então a necessidade de se verificar o estado das ranhuras do tear periodicamente e corrigir possíveis empenos, para estabilizar o movimento da agulha e diminuir a ocorrência de falhas no pé.

Sobre a intensidade de desgaste, é perceptível na Figura 22 a diferença entre os ensaios sem lubrificação e os ensaios lubrificados. Porém, entre os ensaios lubrificados apenas com óleo e com óleo+Militec não há diferença perceptível no nível de desgaste. Pode-se afirmar que, para essas condições, apenas a lubrificação com óleo foi suficiente para evitar o desgaste.

Para verificar melhor o desgaste nos ensaios lubrificados, faz-se necessário modificar um pouco as características do ensaio, como por exemplo o número de ciclos ou o aumento da resistência ao movimento da agulha. Diminuir a distância entre as paredes da ranhura ou incluir um elemento de tensão na extremidade da agulha podem ser alternativas interessantes para trabalhos futuros.

- Par tribológico: Corpo/Ranhura

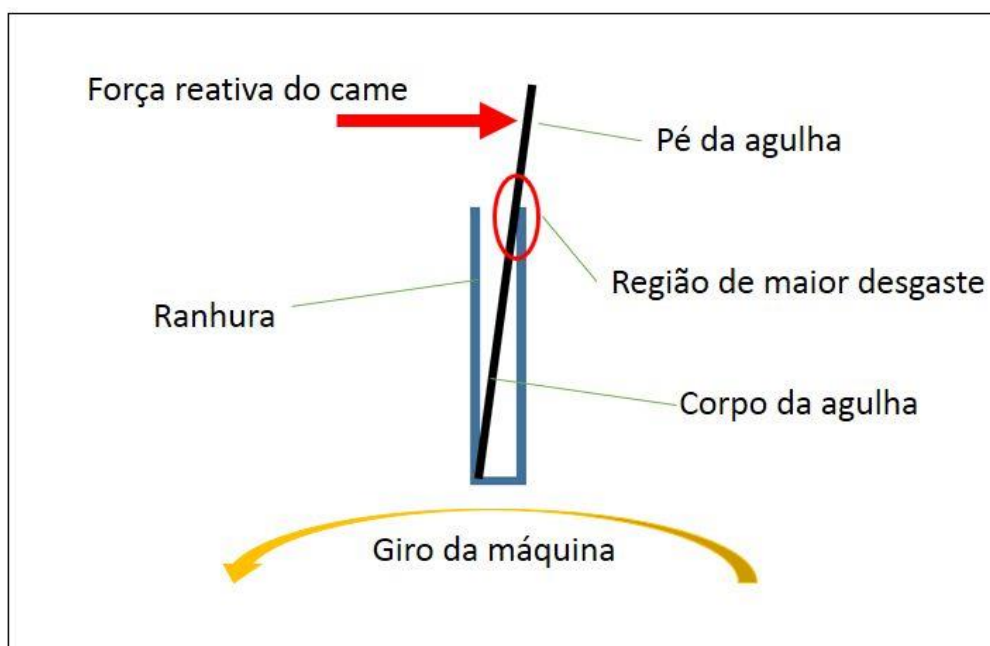
O desgaste no corpo da agulha já é perceptível já nos ensaios com menor número de ciclos (15.000 ciclos), mesmo com presença de lubrificante. Esse maior desgaste já era esperado pelo fato de ser o par tribológico com maior área de contato.

Por outro lado, percebe-se que o desgaste não ocorre por igual em toda a superfície de contato, existem regiões mais desgastadas, outras menos desgastadas e outras ainda que não se percebe o desgaste. Isso é um exemplo macroscópico do conceito de área real de contato (PERSSON, 2000) que afirma que apenas alguns pontos da superfície estão realmente em contato, de acordo com os desníveis superficiais. Isso ocorre também microscopicamente, as áreas mais desgastadas certamente possuem um número de junções bem mais elevado do que as áreas menos desgastadas.

Observa-se também que as áreas mais desgastadas estão concentradas na região frontal do corpo da agulha (FIGURAS 27). Isso ocorre porque, quando o pé da agulha entra em contato com o excêntrico, este exerce uma força de reação no pé, com direção contrária. Essa força de reação é tangencial ao sentido de giro da

máquina, causando assim um pequeno giro da agulha dentro da folga da ranhura, aumentando a pressão de contato na parte frontal do corpo. A Figura 31 mostra uma agulha vista de cima, dentro da ranhura, com proporções dimensionais exageradas para demonstrar esse efeito.

Figura 31 – Esquema de Folga Interna da Ranhura (Vista de Cima)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A Figura 28 mostra que a diferença do nível de desgaste entre as amostras é mais perceptível. Os ensaios sem lubrificação apresentam as amostras com maior desgaste; os ensaios lubrificados apenas com óleo apresentam amostras com desgaste mediano e os ensaios lubrificados com a mistura de óleo e Militec apresentam menor desgaste visual. Dessa forma, pode-se afirmar que a lubrificação agiu de forma inversamente proporcional ao desgaste, e que a adição de Militec ao óleo reduziu ainda mais o desgaste.

O desgaste acentuado em regiões específicas do corpo da agulha pode causar mais folgas e fazer com que a mesma não trabalhe bem ajustada dentro da ranhura. A escolha de agulhas com espessura mais próxima da ranhura ou uma lubrificação eficiente podem ser soluções interessantes para a diminuição desse desgaste.



## 5 Conclusões

A partir dos resultados e discussões apresentados neste trabalho, é possível concluir que:

- Foi possível reproduzir, a partir dos ensaios realizados, os desgastes sofridos pelas agulhas de lingueta em teares circulares. Dessa forma foi possível a realização da avaliação de desgaste nas agulhas, conforme proposto no início deste trabalho;
- Os ensaios realizados permitiram a visualização dos pontos de desgaste das agulhas, sendo possível correlacioná-lo a fatores específicos. No pé da agulha, por exemplo, concluiu-se que o desgaste concentrado em pequenos pontos ocorre devido à característica de contato entre o pé da agulha, como um contato não conforme. Observou-se que essa característica, aliada à lubrificação ineficiente, pode causar travamentos e danos às ranhuras. No corpo da agulha, concluiu-se que a folga existente entre a agulha e a ranhura faz com que o desgaste se concentre na região frontal da agulha, na linha de contato com as extremidades da ranhura;
- As imagens MEV mostraram que as agulhas sofrem desgaste abrasivo em todas as regiões estudadas neste trabalho. Pelas características dos desgastes visualizados, a agulha sofre mais desgaste do que as peças do tear que estão em contato direto com ela, como a ranhura e o excêntrico.
- A presença da lubrificação é indispensável para diminuir o desgaste e importante para controlar o aumento da temperatura na região de atrito. O uso de condicionador de metais reduziu levemente o atrito nos ensaios realizados, seu uso em teares pode aumentar a eficiência da redução de atrito.

## 6 Sugestões Para Trabalhos Futuros

A realização desse trabalho abriu questionamentos que não puderam ser respondidos com a metodologia aqui apresentada. Para estudos futuros, sugere-se:

- Testar a eficiência de outros tipos de lubrificantes, fabricados de diferentes matérias-primas, que tragam benefícios maiores como a redução ainda maior de atrito, ou ainda menos danos ao meio ambiente (no caso de lubrificantes de origem vegetal);
- Adaptar outros pares tribológicos com a agulha que possam avaliar mais diretamente a perda de material, visto que as peças da própria máquina são predominantemente feitas de aço, mesmo material das agulhas. Pares tribológicos feitos a partir de materiais diferentes podem auxiliar no teste de lubrificação, avaliando melhor a transferência de material de um lado para o outro do par tribológico, através da análise de EDS;
- Fazer estudo tribológico na cabeça da agulha, parte fundamental para a qualidade do ponto da malha, e que sofre desgaste a partir do contato com os fios;

## 7 Referências

BERTOLUCI, C. E. **Proposta de método para desenvolvimento de produtos de moda a partir de técnicas manuais e resíduos de malharia circular de algodão.** 95p. Dissertação (Mestrado em Têxtil e Moda) - Curso de Têxtil e Moda - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

DUTRA, L. A. **Resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos branco alto cromo – ensaio abrasivo a três corpos.** 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - PPGEM, UFES. Vitória, ES ,2005.

EYRE, T. S. Wear characteristics of metals. **Tribology International**, v. 9, n. 5, p. 203–212, 1976.

GANZER, P. P. *et al.* Inovação no Setor Têxtil: Estudo em Indústrias de Malharia Retilínea. **Revista Raunp**, v. 7, n. 2, p. 59–78, 2015.

GROZ-BECKERT. **Large diameter circular knitting.** 24 p. Disponível em: [https://www.groz-beckert.com/mm/media/pt/web/pdf/Large\\_diameter\\_circular\\_knitting.pdf](https://www.groz-beckert.com/mm/media/pt/web/pdf/Large_diameter_circular_knitting.pdf). Acesso em 10 dez 2021.

HENRIQUES, Gustavo Moura de Miranda. **Avaliação tribológica de um lubrificante aditivado com nanopartículas de carbono amorfo.** 2021. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

Indústria TTP. **Tribômetros.** 2020. Site comercial da empresa para apresentação de seus produtos. Disponível em: <http://ttp.ind.br/>. Acesso em 14 de agosto de 2020.

Indústria Groz-Beckert. **Circular Knitting.** Site comercial da empresa para apresentação de seus produtos. Disponível em: <https://www.groz-beckert.com/en/products/knitting/rundstrick/>. Acesso em 02 de agosto de 2020.

LONG, A. C. **Design and Manufacture of Textile Composites.** Illustrated ed. Washigton DC, CRC press, 2006.

LU, X.; KHONSARI, M. M.; GELINCK, E. R. M. The Stribeck Curve: Experimental Results and Theoretical Prediction. ASME. *J. Tribol.* 128(4): 789–794, outubro de 2006.

MATOS, Paulo Roberto Rodrigues de. **Utilização de óleos vegetais como bases lubrificantes**. 2011. 100 p. Dissertação (Mestrado em Química)-Universidade de Brasília, Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Química, Brasília - DF, 2011.

MEDEIROS, S. D. DE F. **Análise tribológica de um sistema de acionamento alternativo de pigs para a indústria do petróleo**. 2010. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFRN. Natal-RN, 2010.

MELO, Moisés Vieira de. **Mapa da pilosidade H de fios de algodão em sistemas de fiação de anel/viajante tratados por nitretação à plasma**. 2012. 115f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, UFRN, Natal-RN, 2012.

MILITEC. **Militec Brasil**. Site comercial da empresa para apresentação de seus produtos. Disponível em: [www.militecbrasil.com.br](http://www.militecbrasil.com.br). Acesso em 15 de janeiro de 2022.

MOURA, R. R. **Desempenho Dos Lubrificantes Sólidos Na Usinagem Da Liga Ti. - XVIII COLÓQUIO DE USINAGEM 6Al-4V.** , p. 4–8, Uberlândia ´MG. Outubro de 2014.

NAHVI S.M.; SHIPWAY P.H.; McCARTNEY D.G.; Particle Motion and Modes of Wear in the dry Sand-Rubber Whell Abrasion Test. **Elsevier Science B.V.** v.267, p.2083-2091, 2009.

PERSSON, B. N. J. **Sliding Friction: Physical Principles and Applications**. Springer Science & Business Media, 2000.

QUADROS, D. S. **Análise Da Energia Consumida Em Rolamentos Pelo Atrito - SEFIC 2016**. p. 6783, 2016.

SANTANA, Janaina Silva de. **Avaliação tribológica dos polímeros NBR, PTFE e PTFE gravitado em contato com aço AISI 52100**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SPENCER, D. **Knitting technology**. 2ed, Pergamon Press, New York, 2004.

WERNER, Marcos. **Desenvolvimento de uma bancada de teste de desgaste abrasivo para barras de trilha de colheitadeiras de grão: um comparativo de desempenho em aços SAE 1045 e SAE 1518**. 2013. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013

WANG, Qi, YANG Zhu, and JIANSHE Chen. Development of a Simulated Tongue Substrate for in Vitro Soft “oral” Tribology Study. **Food Hydrocolloids** 120. 2001

WYPYCH, F. Dissulfeto de molibdênio, um material multifuncional e surpreendente: Doze anos depois. **Química Nova**, v. 37, n. 7, p. 1220–1226, 2014.