



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**ESTUDO DO ATRITO E DESGASTE EM DIFERENTES  
CONDIÇÕES DE CARGA E LUBRIFICAÇÃO PARA  
UM CONJUNTO PINO-DISCO DE AÇO 1045**

**Autor: Allan Pereira Pacheco  
Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga**

**Brasília, DF  
2021**



**Allan Pereira Pacheco**

**ESTUDO DO ATRITO E DESGASTE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CARGA  
E LUBRIFICAÇÃO PARA UM CONJUNTO PINO-DISCO DE AÇO 1045**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga

**Brasília, DF  
2021**

### **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Pacheco, Allan Pereira

Estudo do atrito e desgaste em diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino-disco de aço 1045 / Allan Pereira Pacheco. Brasília: UnB, 2021. 83 p.: il; 29,5 cm

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília. Faculdade do Gama, Brasília, 2021.  
Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga.

1. Aço 1045. 2. Atrito e Lubrificação. 3. Condicionador de metais

I. Cueva, Edison Gustavo.

II. Estudo do atrito e desgaste em diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino-disco de aço 1045.

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



## **ESTUDO DO ATRITO E DESGASTE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CARGA E LUBRIFICAÇÃO PARA UM CONJUNTO PINO-DISCO DE AÇO 1045**

**Allan Pereira Pacheco**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 16/11/2021 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Maria Del Pilar Hidalgo Falla, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Eng. Hugo Alves Lemos**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e a Nossa Senhora por me guiar e proteger durante toda a minha vida e durante a execução deste trabalho.

Aos meus pais, familiares e amigos que foram meus maiores apoiadores e incentivadores durante todas as etapas da minha graduação.

Aos professores e funcionários da UnB que colaboraram na minha graduação e tornaram a jornada mais agradável.

Ao meu orientador Prof. Cueva pela paciência, orientação e conselhos durante o desenvolvimento deste TCC.

## RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade estudar o desgaste do aço 1045 quando atritado contra si mesmo em um sistema disco pino em diferentes condições de carga e lubrificação a fim de compará-los e compreender as variações e diferentes formas de desgaste. Para tal objetivo as superfícies dos pinos e discos foram preparadas com lixas de granulometria 400 e 3000, respectivamente. Os discos ainda foram polidos posteriormente. Os ensaios para a elaboração do trabalho foram realizados em uma bancada de ensaios de desgaste equipadas com sensores que mediram a força de atrito e a temperatura do disco e tiveram duração de 20 minutos. As cargas utilizadas nos ensaios foram 5N, 10N e 25N. As condições de ensaio foram a seco, lubrificado com óleo 5w40, lubrificado com óleo 5w40 e Militec-1, lubrificado com óleo 5w40 e Militec-1 após tratamento térmico superficial. As saídas de interesse foram a força de atrito e a temperatura medidas durante o ensaio, além da massa perdida e o dano superficial decorrente do teste. Concluiu-se que os testes a seco são extremamente danosos ao sistema, apresentando elevadas forças de atrito, temperatura e massa perdida se comparado aos ensaios lubrificados. Observou-se também que o condicionador de metais não apresentou resultados satisfatórios de redução de atrito, contribuindo, inclusive, para uma piora nos valores referentes ao valor de massa perdida, a degradação da superfície do corpo de prova e a dissipação de calor do sistema.

**Palavras-chave:** Aço 1045, Atrito, Condicionador de metais, Desgaste, Lubrificação,

## ABSTRACT

The present final paper aims to study the wear of 1045 steel when rubbed against itself in a pin disc system under different load and lubrication conditions in order to compare them and understand the variations and different forms of wear. For this purpose, the surfaces of the pins and discs were prepared with 400 and 3000 sandpaper, respectively. Discs were polished yet. The tests for the elaboration of the paper were carried out on a wear test bench equipped with sensors that measured the friction force and temperature of the disc and lasted 20 minutes. The loads used in the tests were 5N, 10N and 25N. The test conditions were dry, lubricated with 5w40 oil, lubricated with 5w40 and Militec-1 oil, lubricated with 5w40 and Militec-1 oil after surface heat treatment. The outputs of interest were friction force and temperature measured during the test and the lost mass and surface damage resulting from the test. It was concluded that the dry tests are extremely harmful to the system, presenting high friction forces, temperature and lost mass when compared to the lubricated tests. It was also observed that the metal conditioner did not show satisfactory results in reducing friction, contributing even to a worsening in the values related to the lost mass value, the degradation of the surface of the specimen and the heat dissipation of the system.

**Keywords:** 1045 Steel, Friction, Metal Conditioner, Wear, Lubrication,

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação das ligas Metálicas (CALLISTER, 2020) .....	14
Figura 2 - Esquemático dos modos de desgastes (RADI et al, 2007) .....	17
Figura 3 - Gráfico Carga e Velocidade de deslizamento x Desgaste (HUTCINGS, 1992). Adaptado.....	18
Figura 4 - Micrografia mostrando a subsuperfície após severo desgaste (HUTCHINGS, 1992).....	19
Figura 5 - Exemplo de um diagrama de transição IRG para contato não conforme entre componentes de aço (HUTCHINGS, 1992). Adaptado .....	20
Figura 6 - Esquemático da separação de duas superfícies pelo fluido (STACHOWIAK, 2005). Adaptado.....	22
Figura 7 - Diferença do contato para diferentes regimes de lubrificação (BAYER, 1994) .....	23
Figura 8 - Variação da Viscosidade de óleos minerais em função da Temperatura (STACHOWIAK, 2005). .....	25
Figura 9 - Força de atrito F necessária para vencer o atrito e provocar o deslizamento (HUTCHINGS, 1992) .....	27
Figura 10 - Geometrias utilizadas em testes de desgaste por deslizamento. A e B: arranjos simétricos; C, D, E e F: arranjos assimétricos (HUTCHINGS, 1992) .....	28
Figura 11 – Geometria do contato – a) contato conforme; b) contato não conforme (BALDO, 2019).....	29
Figura 12 – Mudança da configuração do contato das superfícies (MARU,2003) .....	30
Figura 13 - Conjunto Disco e Pino .....	31
Figura 14 - Lubrificante e Condicionador de Metais .....	31
Figura 15 – Demonstrativo do tribômetro .....	32
Figura 16 – Demonstrativo do sistema de lubrificação .....	33
Figura 17 - Preparação dos discos e pinos para o teste com Militec após tratamento térmico	34
Figura 18 - Demonstrativo das medidas usadas para cálculo do volume perdido.....	35
Figura 19 - Comparativo da massa perdida nos testes de 5N .....	38
Figura 20 - Curva da Pressão de contato para o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga 5N .....	40
Figura 21 - Variação de atrito e temperatura teste seco - 5N .....	41
Figura 22 - Disco após ensaio a seco - 5N .....	42
Figura 23 - Pino após ensaio a seco - 5N .....	42
Figura 24 - Variação de atrito e temperatura teste 5w40 - 5N .....	43
Figura 25 - Disco após ensaio 5w40 - 5N .....	44
Figura 26 - Pino após ensaio 5w40 - 5N .....	44
Figura 27 - Variação de atrito e temperatura teste Militec - 5N.....	45
Figura 28 - Disco após ensaio com Militec - 5N.....	46
Figura 29 - Pino após ensaio com Militec - 5N.....	47
Figura 30 - Variação de atrito e temperatura teste Militec tratado termicamente - 5N.....	48
Figura 31 - Disco após ensaio com Militec tratado termicamente - 5N.....	49
Figura 32 - Pino após ensaio com Militec e tratado termicamente - 5N .....	49
Figura 33 - Comparativo dos testes com carga 5N.....	50
Figura 34 - Comparativo da massa perdida nos testes de 10N.....	52
Figura 35 - Curva da Pressão de contato para o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga 10N .....	53
Figura 36 - Variação de atrito e temperatura teste seco - 10N .....	54



Figura 37 – Disco e Pino após ensaio a seco – 10N .....	54
Figura 38 - Variação de atrito e temperatura teste 5w40 - 10N .....	55
Figura 39 - Disco após ensaio com óleo 5w40 - 10N.....	56
Figura 40 - Pino após ensaio com óleo 5w40 - 10N.....	56
Figura 41 - Variação de atrito e temperatura teste Militec - 10N.....	57
Figura 42 - Disco após ensaio com óleo 5w40 e Militec - 10N .....	58
Figura 43 - Pino após ensaio com óleo 5w40 e Militec - 10N .....	58
Figura 44 - Variação de atrito e temperatura teste Militec tratado termicamente - 10N.....	59
Figura 45 - Disco após ensaio com óleo 5w40 e Militec tratado termicamente - 10N .....	60
Figura 46 - Pino após ensaio com óleo 5w40 e Militec tratado termicamente - 10N .....	60
Figura 47 - Comparativo dos testes com carga 10N.....	61
Figura 48 - Comparativo da massa perdida nos testes de 25N.....	62
Figura 49 - Curva da Pressão de contato para o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga 25N .....	64
Figura 50 - Variação de atrito e temperatura teste seco - 25N .....	65
Figura 51 – Disco e pino após ensaio a seco - 25N.....	65
Figura 52 - Variação de atrito e temperatura teste 5w40 - 25N .....	66
Figura 53 - Disco após ensaio com óleo 5w40 - 25N.....	67
Figura 54 - Pino após ensaio com óleo 5w40 - 25N.....	67
Figura 55 - Variação de atrito e temperatura teste Militec - 25N.....	68
Figura 56 - Disco após ensaio Militec - 25N.....	69
Figura 57 - Pino após ensaio Militec - 25N.....	69
Figura 58 - Variação de atrito e temperatura teste Militec tratado termicamente - 25N.....	70
Figura 59 - Disco após ensaio com óleo e Militec tratado termicamente - 25N .....	71
Figura 60 - Pino após ensaio com óleo e Militec tratado termicamente - 25N .....	71
Figura 61 - Comparativo dos testes com carga 25N.....	72
Figura 62 - Comparativo da Massa Perdida para Testes Lubrificados.....	74
Figura 63 - Comparativo da Massa Perdida para Testes Secos.....	74
Figura 64 - Comparativo do coeficiente de atrito ensaio à seco.....	75
Figura 65 - Comparativo do coeficiente de atrito ensaio lubrificados com óleo 5w40.....	76
Figura 66 - Comparativo do coeficiente de atrito ensaio lubrificados com óleo 5w40 e Militec-1 .....	76
Figura 67 - Comparativo do coeficiente de atrito ensaio lubrificados com óleo 5w40, Militec-1 e tratado termicamente.....	77
Figura 68 - Comparativo dos testes com carga 5N.....	78
Figura 69 - Comparativo dos testes com carga 10N.....	78
Figura 70 - Comparativo dos testes com carga 25N.....	79

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1. AÇOS.....	14
2.1.1. Aço 1045 .....	15
2.2. TRIBOLOGIA.....	15
2.2.1. Desgaste.....	16
2.2.2. Lubrificantes.....	20
2.2.3. Atrito.....	27
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
3.1. MATERIAIS .....	30
3.2. METODOLOGIA .....	31
3.2.1. Tribômetro.....	31
3.2.2. Ensaios.....	32
3.2.3. Cálculo da Massa Perdida.....	34
3.2.4. Determinação Da Pressão de Contato – Regime de Lubrificação.....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>37</b>
4.1. TESTES - 5N.....	37
4.1.1. Teste 5N – Desgaste e Pressão de Contato.....	37
4.1.2. Teste 5N a Seco .....	40
4.1.3. Teste 5N Lubrificado com óleo 5W40 .....	42
4.1.4. Teste 5N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 .....	45
4.1.5. Teste 5N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 + Tratamento Térmico 47	47
4.1.6. Comparativo do coeficiente de atrito para os Testes com carga 5N .....	49
4.2. TESTES - 10N.....	51
4.2.1. Teste 10N – Desgaste e Pressão de Contato.....	51
4.2.2. Teste 10N a Seco .....	53
4.2.3. Teste 10N Lubrificado com óleo 5W40 .....	55
4.2.4. Teste 10N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 .....	57
4.2.5. Teste 10N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 + Tratamento Térmico 58	58
4.2.6. Comparativo do coeficiente de atrito para os Testes com carga 10N .....	61
4.3. TESTES - 25N.....	62
4.3.1. Teste 25N - Massa Perdida.....	62
4.3.2. Teste 25N a Seco .....	64
4.3.3. Teste 25N Lubrificado com óleo 5W40 .....	66
4.3.4. Teste 25N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 .....	67
4.3.5. Teste 25N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 + Tratamento Térmico 69	69
4.3.6. Comparativo do coeficiente de atrito para os Testes com carga 25N .....	71
<b>5 COMENTÁRIOS FINAIS .....</b>	<b>73</b>
5.1. Desgaste – Perda de Massa.....	73
5.2. Coeficiente de atrito de Atrito .....	75
5.3. Temperatura de Ensaio .....	77
5.4. Dano superficial.....	79
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>7 TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo JOST (1990), a Tribologia é definida como “a *ciência e a tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e dos assuntos e as práticas relacionados a ela.*” A Tribologia embasa e permite a compreensão de vários outros fenômenos importantes em projetos de engenharia, tais como o atrito, o desgaste e a lubrificação (HUTCHINGS, 1992).

Neste sentido, podem ser encontradas diversas definições para o desgaste. Assim, ele pode ser compreendido como um dano superficial causado pelo movimento relativo em relação a outra superfície, não sendo limitado à perda de material, embora esta forma seja uma das maneiras de desgaste. O atrito, por sua vez, é caracterizado pela força contrária ao movimento relativo entre dois corpos deslizantes e que ocorre na interface deles. E, por fim, a lubrificação é a técnica utilizada para a diminuição do desgaste ou do atrito, ou ambos (BAYER, 2004).

Os aços carbono são uns dos materiais mais utilizados em projetos de engenharia por apresentarem um amplo conjunto de propriedades mecânicas e de resistência ao desgaste, associado a um preço relativamente baixo. Um desses aços é o aço SAE 1045 que, caracteriza-se por ser um aço com médio teor de carbono e apresentar uma dureza maior que os aços de baixo carbono, além de serem suscetíveis aos tratamentos térmicos. Características que permitem sua utilização em condições que exijam elevada resistência mecânica, resistência à abrasão e boa tenacidade. Exemplos de sua utilização são em rodas e trilhos de trens, virabrequins e engrenagens, entre outros (CALLISTER, 2020).

O correto desenvolvimento de um projeto mecânico, envolve, além de outros fatores, a escolha dos materiais mais adequados e a previsão ou não de uso de algum tipo de lubrificante. Conhecer os tipos de lubrificantes e/ou de lubrificação faz-se necessário na hora de escolher o lubrificante mais adequado, com base na viscosidade e suas propriedades e o correto regime de lubrificação, seja hidrodinâmica, elastohidrodinâmica, limítrofe ou de filme sólido (SHIGLEY, 2005).

O uso de aditivos para lubrificantes vem sendo impulsionado, a cada dia, devido ao aumento das especificações técnicas de máquinas e equipamentos, com o intuito de prolongar a vida útil e diminuir o consumo de lubrificantes. Os aditivos são compostos químicos que tem a função melhorar o desempenho dos óleos

lubrificantes, atribuindo novas propriedades ou para melhorar as já existentes (Cidade, 2016).

A análise tribológica é essencial para a manutenção de equipamentos e redução de custos e desperdícios. Ao citar PERSSON (1993) e BHUSHAN (2001), BORTOLETO (2015) afirma que, na década de 1990, cerca de 200 bilhões de dólares eram gastos por ano nos Estados Unidos por desconhecimento de aspectos tribológicos. Comenta ainda que, cerca de 1/3 dos recursos energéticos do mundo são gastos com processos para superar o atrito.

Neste contexto, este trabalho foi elaborado com o objetivo de estudar e compreender o comportamento em desgaste do aço 1045, por meio de ensaio de desgaste do tipo pino – disco (ambos de aço 1045), atritando entre si, em diferentes condições de carga e lubrificação. A ideia motivadora surgiu a partir de outros trabalhos, igualmente desenvolvidos no âmbito da Universidade de Brasília e, que estudaram o desgaste de aços inoxidáveis 304, atritando entre si. (CLEMENTE, 2017 e LEMOS, 2019).

## **1.1 OBJETIVO**

O presente trabalho tem por finalidade estudar o desgaste do aço 1045 quando atritado contra si mesmo em um sistema disco pino em diferentes condições de carga e lubrificação a fim de compará-los e compreender as variações e diferentes formas de desgaste.

### **1.1.1 Objetivo Específico**

O trabalho apresentará os resultados do desgaste do sistema pino sobre disco quando submetidos aos ensaios de desgaste em condições de carga de 5N, 10N e 25N e com seguintes condições de lubrificação:

- ensaio a seco (ausência de lubrificante);
- ensaio lubrificado com óleo SAE 5W40;
- ensaio lubrificado com óleo SAE 5W40 + adição do aditivo Millitec-1; e
- ensaio lubrificado com óleo SAE 5W40 + adição do aditivo Millitec-1, após tratamento térmico superficial.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho apresenta-se dividido em 5 capítulos

- Capítulo 2: Parte do trabalho dedicada a pesquisa bibliográfica e referenciamento teórico.
- Capítulo 3: Será dedicado para a apresentação da metodologia e desenvolvimento dos ensaios.
- Capítulo 4: Apresentação e discussão dos resultados obtidos
- Capítulo 5: Apresentação da conclusão do trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. AÇOS

As ligas metálicas são composições entre alguns elementos em que pelo menos um deles é um metal e que a depender da sua aplicabilidade possui certas características e propriedades mais acentuadas que outras. Elas são subdivididas, de acordo com o principal constituinte, em ligas ferrosas e não ferrosas, como é mostrado na figura 1. As primeiras, possuem o ferro como seu principal elemento de liga, são vastamente utilizadas devido a sua enorme variedade de propriedades mecânicas, sua facilidade de fabricação, e seu custo de produção. Já as ligas não ferrosas são usadas em substituição as ligas ferrosas quando estas possuem alguma característica limitante como massa específica relativamente elevada, condutividade elétrica baixa ou suscetibilidade à corrosão (CALLISTER, 2020).

Aços com médio teor de carbono são aqueles que apresentam em sua composição uma concentração entre 0,25% e 0,6% de carbono. Isso proporciona aos metais deste grupo a possibilidade do tratamento térmico além da mistura com outros elementos de liga, proporcionando diferentes condições de propriedades mecânicas (CALLISTER, 2020).

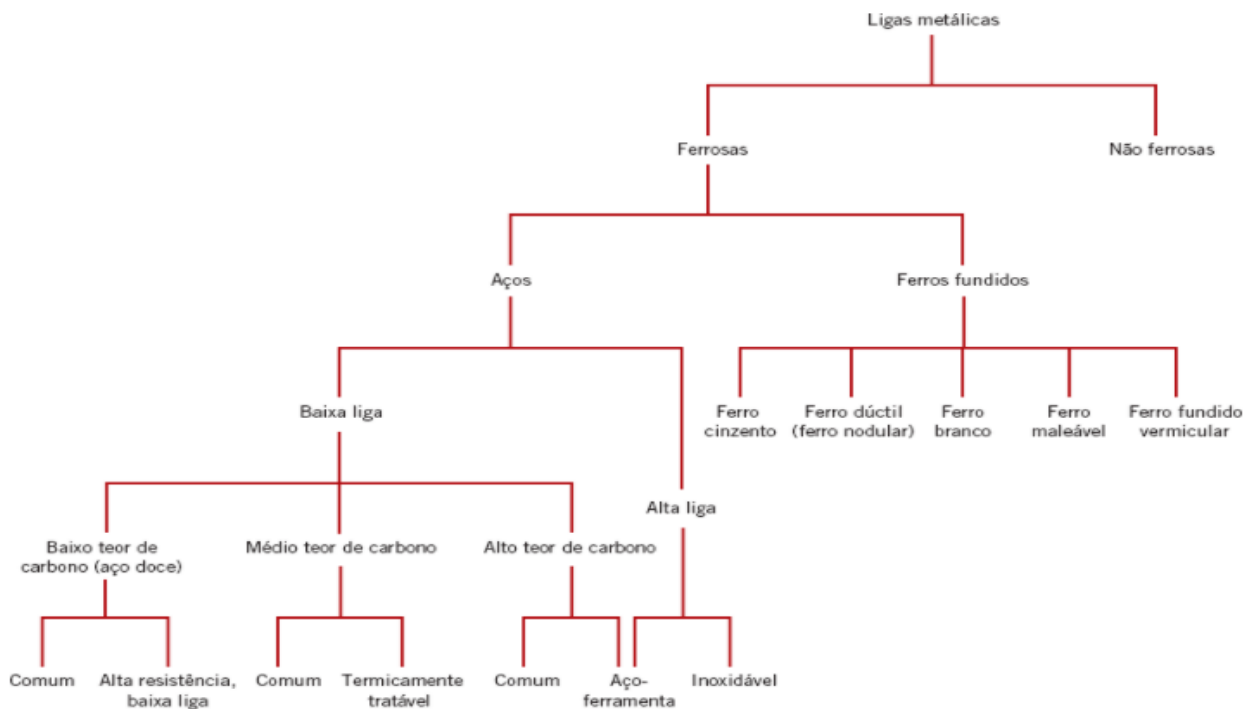


Figura 1 - Classificação das ligas Metálicas (CALLISTER, 2020)

### 2.1.1. Aço 1045

Segundo CALLISTER (2020), o aço 1045 é classificado como um aço de médio teor de carbono. Possui uma resistência mecânica superior aos aços convencionais, por este motivo, é amplamente utilizado na fabricação de eixos e engrenagens, peças para a indústria mecânica em geral, implementos agrícolas e rodoviários, hastes para cilindros hidráulicos, entre outros. A sua composição química é de Carbono (0,43% - 0,50%), Silício (0,15% - 0,35%), Magnésio (0,30% - 0,60%), Fósforo (0,03% máx) e Enxofre (0,05% máx.) e suas principais propriedades mecânicas são:

- Resistência mecânica: entre 570 e 700 Mpa;
- Dureza Brinell: entre 170 e 210 HB;
- Resistência à Tração: 585 Mpa;
- Módulo de Elasticidade: 190 até 210 GPa;
- Coeficiente de Poisson: entre 0,27 e 0,3;

A definição dos valores referentes as propriedades mecânicas dos materiais são obtidas por meio de experimentos laboratoriais e são informações de interesse para diversos usuários. Sendo as propriedades mecânicas mais importantes as de rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade (CALLISTER,2020).

## 2.2 TRIBOLOGIA

O estudo da Tribologia surgiu com a necessidade do entendimento das interações de atrito, desgaste, lubrificação e outros fenômenos que ocorrem entre superfícies que estão em contato. Tal área de atuação foi definida, segundo JOST (1990), como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados”. Neste contexto, a disciplina tem uma atenção especial ao estudo do desgaste, da lubrificação e dos mecanismos de atrito.

A definição do termo desgaste pode ser diversa dependendo do contexto em que ela será utilizada. Entretanto, para fins de engenharia, o termo desgaste pode ser definido de forma simples e adequada como um dano progressivo a superfície do objeto que foi submetido a um movimento relativo a outra superfície (BAYER, 2004).

O desgaste e o atrito são termos que se encontram associados. Este último, pode ser definido como a força superficial contrária ao movimento relativo entre dois corpos. Neste sentido, ela é tangencial à interface e possui direção contrária ou oposta ao movimento (BAYER, 2004).

Outros dois conceitos importantes para o entendimento da tribologia e que estão correlacionados entre si são o da lubrificação e do lubrificante. Segundo BAYER (2004), a lubrificação é toda técnica que objetiva a diminuição do atrito, do desgaste ou de ambos entre duas peças contactantes. Já o lubrificante é o material utilizado para atingir algum destes objetivos.

### **2.2.1. Desgaste**

Os mecanismos de desgastes são diversos e variados. BAYER (2004) cita algumas maneiras de analisar superfícies desgastadas que incluem:

- Aparência da trilha: Relacionado com a comparação entre uma situação de desgaste com outras e remete a termos como polido, riscado, arrancado.
- Mecanismos físicos de remoção do material: Classifica o desgaste conforme o mecanismo com que o material é removido. Remete a termos como adesão, abrasão, delaminação.
- Condições que envolvem a situação de desgaste: Engloba as condições macroscópicas nas quais o desgaste ocorre. Tais como desgaste a seco, lubrificado, deslizante, com rolamento, com gradiente de temperatura.

O deslizamento de superfícies atritando entre si pode gerar o desgaste de 4 maneiras distintas. São o desgaste Abrasivo, o desgaste Adesivo, o desgaste Corrosivo e a Fadiga (BHUSHAN, 2001).

#### **2.2.1.1. Tipos de Desgaste**

Convencionalmente são aceitas quatro formas de desgaste, sendo o Desgaste Adesivo, Desgaste Abrasivo, Desgaste por Fadiga e o Desgaste Corrosivo. Uma representação esquemática de cada tipo é mostrada na figura 2.



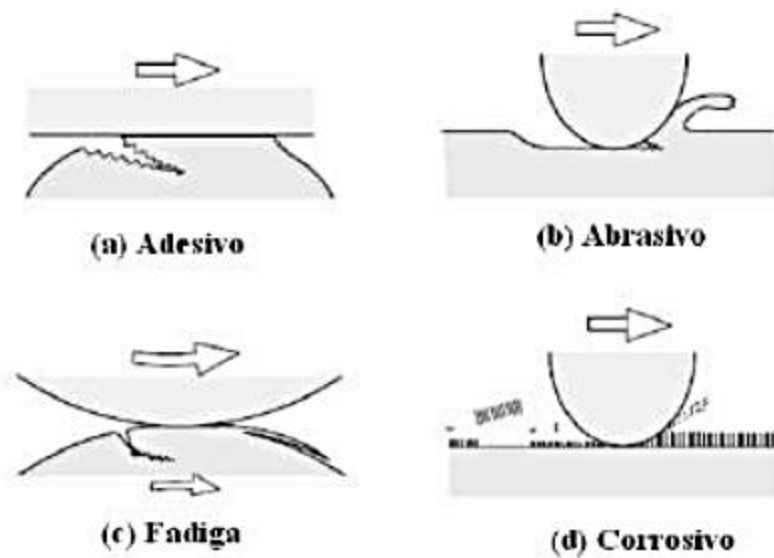


Figura 2 - Esquemático dos modos de desgastes (RADI et al, 2007)

- **Desgaste Adesivo:** É aquele no qual ocorre uma ligação adesiva entre as superfícies suficientemente forte para impedir o deslizamento. Nessas situações, devido a adesão, podem ocorrer deformações plásticas e surgimento de trincas, além do conseqüente arrancamento de material da superfície (perda de material) (KATO,2001).
- **Desgaste por Fadiga:** É caracterizado pela exposição cíclica e repetida às cargas. Tal situação pode ocasionar a perda do material por ação mecânica, embora não ocorram grandes perdas de material neste tipo de desgaste. (RIBEIRO, 2004).
- **Desgaste Abrasivo:** Está diretamente relacionado com a perda do material como conseqüência da ação de partículas duras (abrasivos) presentes entre as duas superfícies deslizantes. Desta forma, óxidos, impurezas, materiais duros ou encruados podem ser agentes abrasivos neste tipo de desgaste. (KATO,2001)
- **Desgaste Corrosivo:** É ocasionado por reações químicas e/ou eletroquímicas. As reações produzem uma intercamada na superfície do material que é

posteriormente removida. É também chamado de desgaste triboquímico. (KATO,2001)

### 2.2.1.2. Desgaste não lubrificado de metais

Os mecanismos de desgaste, em condições não lubrificadas, podem ser modificados ao se alterar determinadas condições, como por exemplo: carga normal, velocidade de deslizamento e até tempo de deslizamento. Tensões mecânicas, temperatura e fenômenos oxidativos também exercem influência no desgaste; e estes estão inter-relacionados com a carga normal e a velocidade de deslizamento. Tal constatação pode ser observada na figura 3 que relaciona os danos mecânicos, a temperatura e o processo de condução de calor para fora da superfície com o incremento da velocidade e/ou da carga normal (HUTCHINGS, 1992).

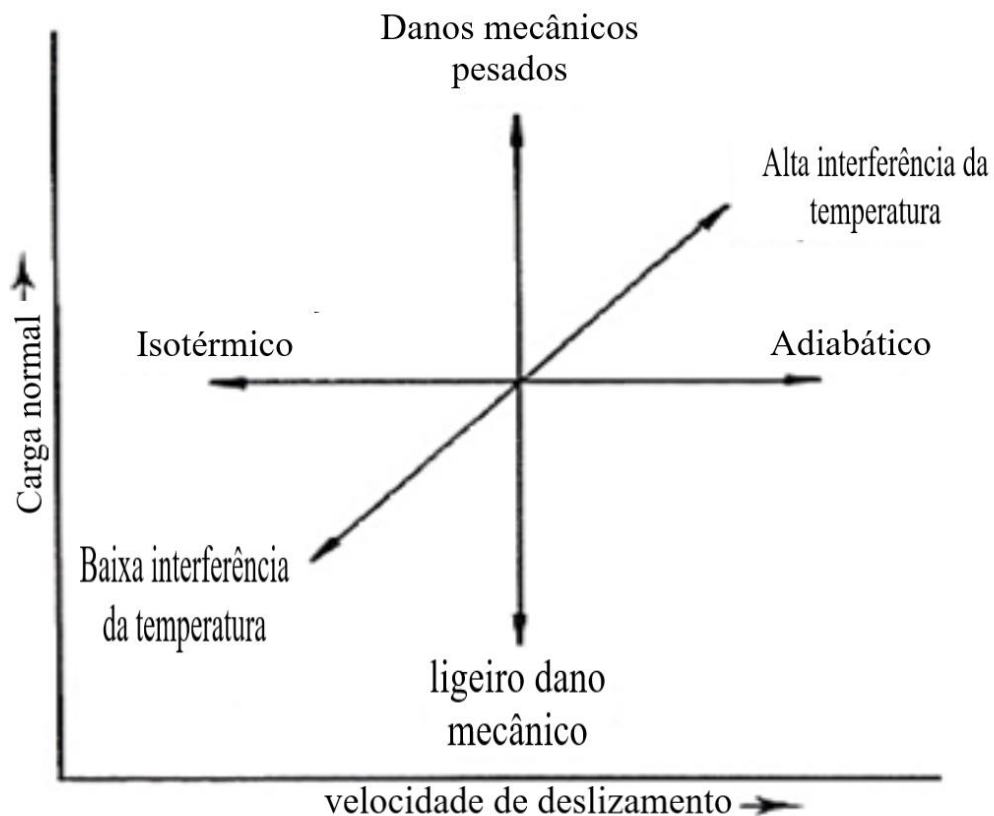


Figura 3 - Gráfico Carga e Velocidade de deslizamento x Desgaste (HUTCHINGS, 1992). Adaptado

Ainda de acordo com HUTCHINGS (1992), o mecanismo de estresse ao qual a superfície é submetida depende da carga normal e a força de cisalhamento que envolve. Neste sentido, a tensão de cisalhamento é dependente da força de atrito

entre as duas superfícies e, a depender deste coeficiente, mudam-se a magnitude e a posição de cisalhamento. Desta forma, para coeficientes de atrito maiores que 0,3 a tensão de cisalhamento fica localizada na superfície do material e as deformações como a micrografia mostrada na figura 4 podem ser acumuladas. Em sistemas onde o coeficiente de atrito não supera o 0,3, a tensão máxima de cisalhamento e o fluxo plástico ficam localizados abaixo da superfície, acumulando pouco deformação plástica.

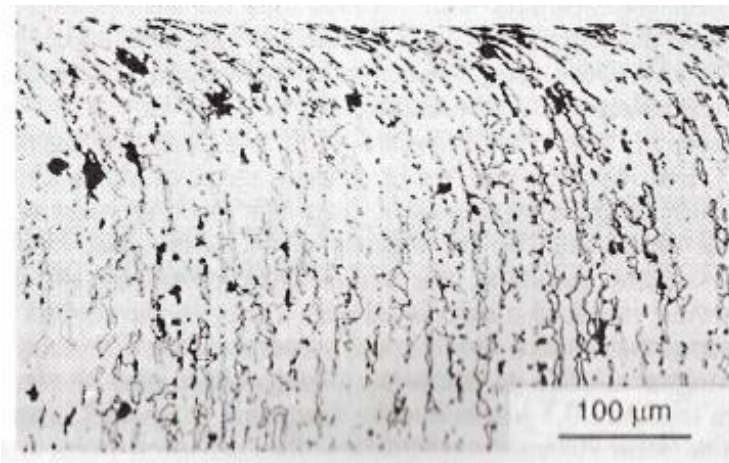


Figura 4 - Micrografia mostrando a subsuperfície após severo desgaste (HUTCHINGS, 1992)

### 2.2.1.3. Desgaste Lubrificado de metais

Nos casos em que o contato ocorre em meio lubrificado, a relação  $\lambda$  determina o regime de lubrificação que será observado. Esta função está relacionada com a espessura do filme lubrificante e com a rugosidade entre as duas superfícies. E assim, para valores de  $\lambda$  maiores que 3, haverá a formação completa do filme lubrificante entre as duas superfícies. Valores de  $\lambda$  entre 1 e 3, revelam contatos entre asperezas em um regime parcialmente elastohidrodinamico de lubrificação. E por fim, valores de  $\lambda$  menores que 1 denotam a necessidade de uma lubrificação limítrofe ou de filme sólido para que o sistema não atinja valores de desgastes próximos dos valores encontrados em um sistema não lubrificado (HUTCHINGS, 1992).

O valor de lambda pode ser encontrado com a seguinte relação

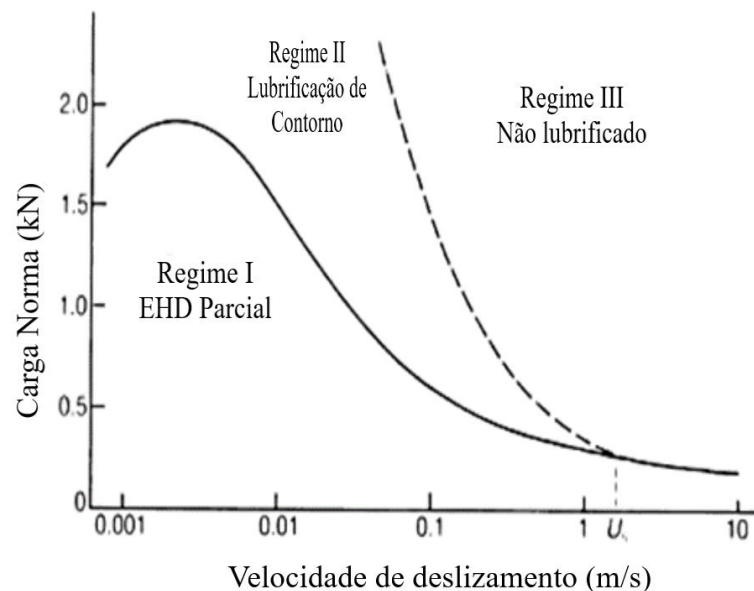
$$\lambda = h_{min}/\sigma$$

Onde:

$h_{min}$  = espessura do filme lubrificante

$\sigma$  = raiz da rugosidade quadrada média das duas superfícies.

Uma outra forma de classificar os regimes de lubrificação no contato metal metal é utilizando o gráfico diagrama de transição IRG, o qual descreve os regimes de lubrificação em regiões do gráfico dependentes da carga normal e da velocidade de deslizamento. Na figura 5, a região correspondente ao regime I demarca uma área com o regime elastohidrodinâmico parcial no qual apresenta coeficientes de atrito entre 0.02 e 0.1 e taxas de desgaste iniciais altas que decaem com o tempo e o decorrer dos deslizamentos. A região II, por sua vez, corresponde a lubrificação de contorno, onde o coeficiente de atrito apresenta valores entre 0,3 e 0,4. Por fim, a região III, devido ao acréscimo da carga e/ou velocidade de deslizamento, apresenta um regime similar aos casos em que não ocorre a lubrificação e o coeficiente de atrito neste caso fica entre 0.4 e 0.5 (HUTCHINGS, 1992).



**Figura 5 - Exemplo de um diagrama de transição IRG para contato não conforme entre componentes de aço (HUTCHINGS, 1992). Adaptado**

### 2.2.2. Lubrificantes

Um lubrificante é qualquer material utilizado entre superfícies móveis e deslizantes entre si com a finalidade de diminuir o atrito, o desgaste e o aquecimento das peças (SHIGLEY, 2005). E embora qualquer substância possa ser considerada um lubrificante, existem restrições físicas e/ou químicas que limitam a eficácia do filme lubrificante e apontam as suas melhores condições de uso. Neste sentido, é possível citar os exemplos de um lubrificante gasoso indicado para casos em que não é possível a aplicação de lubrificantes convencionais líquidos e existe um baixo estresse

de contato. Bem como um lubrificante sólido, em que a sua indicação consiste em situações que envolvam altas temperaturas ou quando é necessário um agente anti-desgaste no contato de peças móveis (STACHOWIAK, 2005).

Em sistemas metálicos atritantes, com a utilização do lubrificante adequado, o coeficiente de atrito pode ser diminuído em cerca de  $1/4$  a  $1/2$ , enquanto o nível de desgaste é reduzido, no mínimo, em uma ordem de magnitude. (BAYER, 1994)

### 2.2.2.1. Viscosidade

Segundo HUTCHINGS (1992), a viscosidade “ $\eta$ ” é a propriedade mais importante a ser considerada em óleos lubrificantes. Ela fornece uma medida da resistência de um fluido a fluir por cisalhamento; e pode ser definida como a tensão de cisalhamento em um plano, dentro do fluido, por unidade de gradiente de velocidade normal a esse plano.

Na figura 6, é possível compreender o conceito de viscosidade imaginando o filme de lubrificante sendo composto por diversas camadas horizontais sobrepostas, na qual a camada em contato com a placa móvel apresenta uma velocidade “ $u$ ” e a camada em contato com a placa fixa apresenta velocidade zero. As camadas intermediárias apresentam uma velocidade dependente da altura “ $h$ ” no eixo “ $y$ ”. Logo,

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

em que  $\mu$  é definida como a viscosidade absoluta ou dinâmica. E a derivada  $du/dy$  define a taxa de cisalhamento ou gradiente de velocidade.

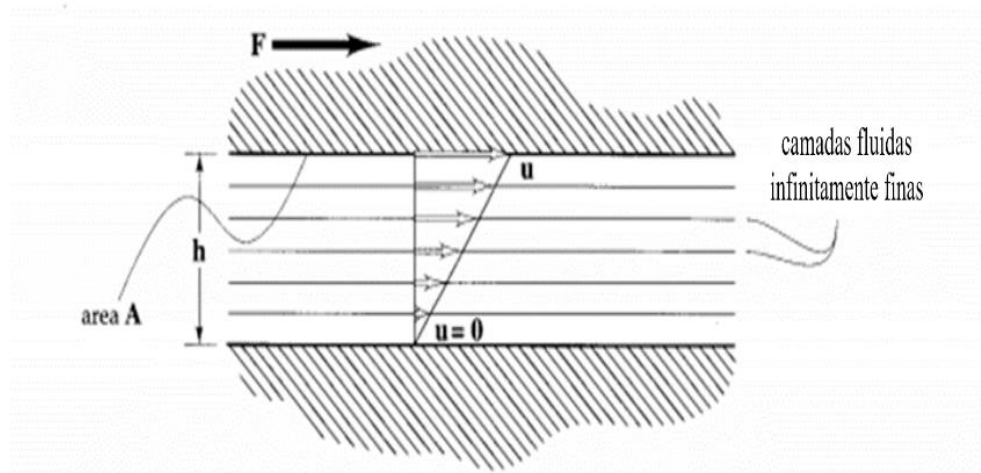


Figura 6 - Esquemático da separação de duas superfícies pelo fluido (STACHOWIAK, 2005). Adaptado

Já a viscosidade cinética é auferida com o auxílio de um Viscosímetro, método este que consiste no tempo gasto para o líquido escorrer pelo aparelho (SHIGLEY, 2005).

A escolha da correta lubrificação e com a correta viscosidade é de fundamental importância para os projetos de engenharia, uma vez que o lubrificante ao apresentar uma viscosidade demasiada baixa ou demasiada alta pode escapar na hora que for submetido a esforços ou não cobrir toda a superfície a qual deva proteger (MARU, 2003). E neste sentido, a altura do filme lubrificante que protege e separa as superfícies deslizantes depende de alguns fatores, entre eles a viscosidade, e pode ser aproximada pela equação seguinte.

$$h \approx (\eta V / W')^m$$

Onde:

$h$ : Espessura mínima do filme[m]

$\eta$ : Viscosidade do fluido [Pa.s]

$V$ : Velocidade relativa[m/s]

$W'$ : Carga normal por unidade de comprimento[N/m]

$m$ : Fator variante entre 0,5 e 1,0, a depender da geometria

A equação mostrada acima é útil para estimar a espessura do filme lubrificante para regiões de contato conforme. Nos casos em que a interface atritante possui uma geometria de contato não conforme deve-se utilizar equações diferentes devido a distribuição de pressão ser desigual no decorrer do teste. BAYER (1994) ilustra as

diferenças de pressão nos regimes de lubrificação Hidrodinâmica e Elastohidrodinâmica para o contato entre duas esferas, sendo possível observar na figura 7.

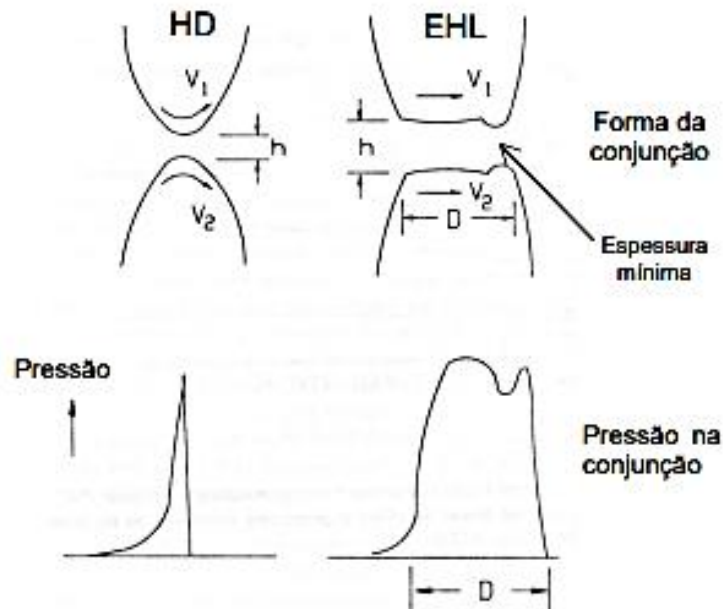


Figura 7 - Diferença do contato para diferentes regimes de lubrificação (BAYER, 1994)

Nos casos em que a lubrificação é elastohidrodinâmica, as pressões de contato podem atingir valores locais de pressão de alguns GPa. Tal pressão é capaz de modificar a viscosidade do lubrificante e deformar elasticamente a superfície, de forma que essas mudanças influenciam na determinação da espessura do filme lubrificante. (HUTCHINGS, 1992).

Desta forma, BAYER (1994) descreveu a equação para o cálculo da altura do fluido lubrificante para os regimes de lubrificação Hidrodinâmica e Elastohidrodinâmica da seguinte forma:

$$h_{HD} = 4,9 \cdot R \cdot (\eta V / W')$$

Onde:

$R$  : Raio de contato[m], sendo calculado por:  $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$

$R_1$  e  $R_2$  são os raios dos corpos de prova.

$$h_{EHL} = 2,65 \cdot \alpha^{0,54} \cdot (\eta V)^{0,7} \cdot R^{0,43} \cdot W'^{-0,13} \cdot E'^{-0,03}$$

Onde:

$\alpha$ : Coeficiente da equação da viscosidade x pressão

$E'$ : Módulo Elástico reduzido do contato de Hertz [Pa], sendo calculado por:

$$1/E' = (1 - \nu_1)^2/E_1 + (1 - \nu_2)^2/E_2$$

$\nu_1$  e  $\nu_2$ : Coeficiente de Poisson dos materiais.

### **2.2.2.1.1. Influência da temperatura na viscosidade**

Entender o funcionamento de operação e principalmente a temperatura operacional de projetos de engenharia é extremamente importante quando existem sistemas lubrificados. STACHOWIAK (2005) alerta que, em alguns casos, a viscosidade de um óleo lubrificante pode cair em até 80% com o acréscimo de 25°C da temperatura do sistema. Neste sentido, a viscosidade de um óleo lubrificante quando for aplicada em uma determinada temperatura pode ser calculada a partir da equação viscosidade-temperatura ou por meio da tabela ASTM(American Society dor Testing Materials) de viscosidade-temperatura.

A viscosidade de um fluido lubrificante é fortemente dependente da sua composição química, mas também sofre a influência da temperatura. Neste sentido, conforme mostrado na figura 8, um lubrificante pode ter a viscosidade mais alta ou mais baixa quando comparado a outro lubrificante a depender da temperatura de trabalho. Esse fenômeno recebe o nome de Índice de Viscosidade e é quantificado pela comparação do comportamento de dois óleos lubrificantes com Índice de Viscosidade conhecidos. (HUTCHINGS, 1992).



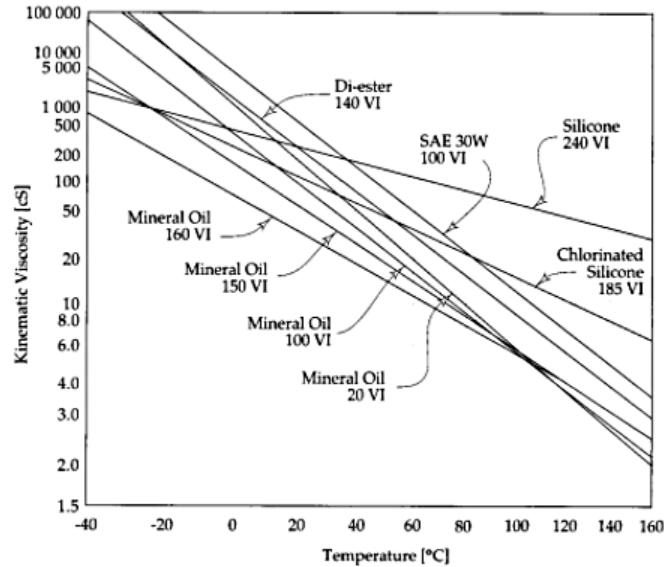


Figura 8 - Variação da Viscosidade de óleos minerais em função da Temperatura (STACHOWIAK, 2005).

### 2.2.2.2. Tipos de Lubrificação

SHIGLEY(2005) cita os tipos de lubrificação existentes e são elas:

- Lubrificação Hidrodinâmica: este tipo de lubrificação ocorre entre superfícies deslizantes onde a velocidade relativa entre elas é suficientemente alta e capaz de criar uma pressão separadora de ambas as superfícies.
- Lubrificação Hidrostática: neste tipo de lubrificação, o filme lubrificante é introduzido entre as superfícies por pressão. É indicado para casos em que a velocidade relativa entre as superfícies de contato é nula ou pequena.
- Lubrificação Elastohidrodinâmica: é o caso em que o contato é não conforme, geralmente em superfícies rolantes como mancais e engrenagens. Nessa situação, o contato se dá na forma pontual ou de linha, o que eleva a pressão normal de contato entre as superfícies.
- Lubrificação de Contorno: este tipo de lubrificação ocorre quando não existe a construção e/ou manutenção de um filme espesso de lubrificante. Nessa situação, - que pode se dar por queda de velocidade relativa entre as superfícies, aumento da carga normal, aumento de temperatura do lubrificante e conseqüente redução da viscosidade entre outros - as superfícies mais pontiagudas das superfícies encontram-se separadas por uma fina camada de lubrificante, em uma espessura de ordem molecular.

- Lubrificação de filme sólido: quando a temperatura de operação do projeto é muito elevada, a lubrificação líquida não apresenta bons resultados, sendo necessário o uso de um filme sólido – normalmente composto por grafite ou dissulfeto de molibdênio.

### **2.2.2.3. Aditivos de lubrificantes e condicionadores de metais**

Existe, atualmente, diversas formas e os mais variados tipos de lubrificantes. Podendo ser sólidos, gasosos, líquidos, vegetal, mineral, sintético, dentre outras classificações. Desta forma, cada um possui qualidades e características que atendem melhor a certas condições.

De forma a realçar estas características e reduzir outras que possam ser indesejadas os aditivos de lubrificantes são compostos químicos que buscam tal objetivo. Assim como os tipos de óleos, são variados os aditivos de lubrificantes.

- Detergentes: possui como principal função a limpeza de resíduos de carbono deixados durante a combustão;
- Antioxidantes: sua principal função é reagir com o oxigênio a fim de evitar a oxidação do metal;
- Anticorrosivos: como sugere o nome, a sua principal função é evitar a corrosão;
- Extrema pressão: possuem indicação específica para contatos submetidos a altas pressões
- Melhorador de índice de viscosidade: busca garantir que o óleo lubrificante mantenha a viscosidade adequada mesmo com o aumento da temperatura.

O Militec-1 é um condicionador de metais que costuma ser adicionado ao óleo lubrificante de motores como forma de reduzir o desgaste e diminuir o atrito entre as suas partes móveis. Entre os benefícios citados por seu fabricante estão melhor acomodação entre anéis de pistão e paredes do cilindro; redução da energia necessária para a partida; redução da oxidação, atrito, corrosão e decomposição térmica; aumento da resistência dos metais e proteção contra os desgastes.

### 2.2.3. Atrito

O atrito, segundo BAYER (2004), pode ser definido como a força de interação que ocorre entre as superfícies de dois corpos e que é contrária ao movimento relativo deles. E a sua magnitude é medida em função das forças tangencial necessária para mover o corpo ( $F$ ) e da força normal ( $W$ ), o esquemático pode ser observado na figura 9. Embora existam outras formulações existentes, essa é a que prenomina e é mais utilizada, sendo originalmente proposta por Leonardo da Vinci, em meados de 1500 (BUDINSKI, 1991).

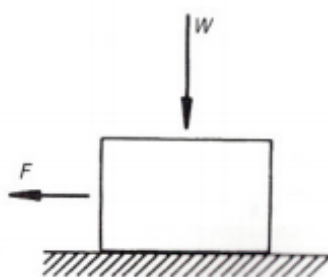


Figura 9 - Força de atrito  $F$  necessária para vencer o atrito e provocar o deslizamento (HUTCHINGS, 1992)

Desta forma, o coeficiente de atrito  $\mu$  pode ser descrito da seguinte forma.

$$\mu = \frac{F}{W}$$

É possível compreender e explicar os conceitos de atrito explicando as seguintes leis:

1. O atrito é proporcional à força normal.
2. A força de atrito é independente da área aparente de contato
3. A força de atrito independe da velocidade de deslizamento das superfícies

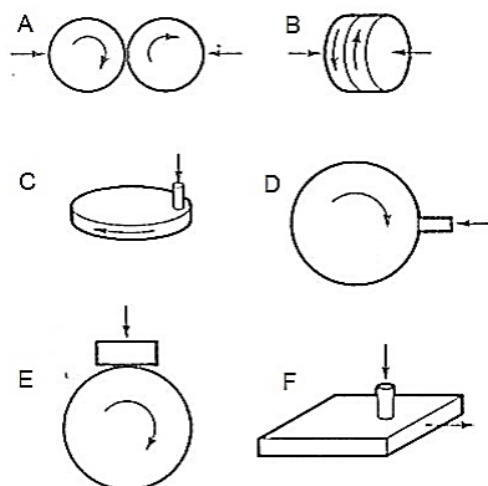
Embora as três leis possuam uma confiabilidade relativa em casos específicos, elas podem fornecer informações úteis em algumas observações empíricas. A primeira lei é a que permite compreender a formulação do coeficiente de atrito  $\mu = F/W$ . Já a terceira lei é revelada por meio de observações que mostram que em muitos casos o coeficiente de atrito estático ( $\mu_s$ ) é maior que o coeficiente de atrito dinâmico ( $\mu_d$ ). E uma vez iniciado o movimento relativo entre as superfícies deslizantes, a

velocidade entre elas é considerada independente para uma grande faixa de valores (HUTCHINGS, 1992).

MARU (2003), ao citar LUDEMA (1988) e LUDEMA (1996), ressalta que, com o avanço das tecnologias, foi possível determinar que o coeficiente de atrito depende de uma série de variáveis operacionais - tais como umidade, temperatura, velocidade – e de lubrificação. Neste sentido, o coeficiente de atrito deve ser tabelado apenas para orientação, uma vez que o atrito não é uma propriedade intrínseca do material ou da combinação deles.

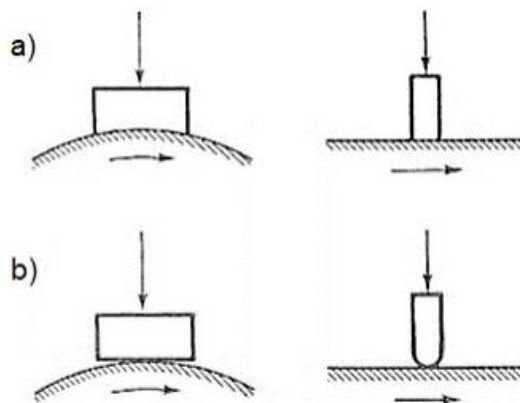
### 2.2.3.1. Influência da superfície de contato no desgaste e no atrito

Com a finalidade de realizar estudos tribológicos são realizados diferentes tipos de testes e com diferentes variáveis de interesse. Desta forma, podem ser alteradas as entradas de carga normal, velocidade de deslizamento, condições de lubrificação e formas de contato para obter diferentes saídas de desgaste e força de atrito. O arranjo das superfícies pode ser classificado como simétricas ou assimétricas. O primeiro arranjo, quando composto pelos mesmos materiais, promove uma taxa igual de desgaste. Enquanto no arranjo assimétrico, na maioria dos casos, gera uma taxa de desgaste diferente entre os corpos. Na figura 10 estão representados os tipos de arranjo simétrico (A e B) e assimétricos (C,D,E e F) (HUTCHINGS, 1992).



**Figura 10 - Geometrias utilizadas em testes de desgaste por deslizamento. A e B: arranjos simétricos; C, D, E e F: arranjos assimétricos (HUTCHINGS, 1992)**

Outra forma de classificação e que altera o atrito e o desgaste é a classificação quanto a geometria do contato. Podendo ser classificado em contato conforme ou não conforme. A figura 11 ilustra a situação do contato conforme (A) e do contato não conforme (B). Uma das diferenças principais entre essas duas formas de geometria é que para o contato conforme a pressão nominal de contato permanece constante durante a realização do teste. Entretanto, no caso de testes com contato não conforme há uma variação considerável da pressão nominal do contato uma vez que com o decorrer do teste a geometria de contato é alterada e conseqüentemente altera-se também a pressão de contato (BALDO, 2019).



**Figura 11 – Geometria do contato – a) contato conforme; b) contato não conforme (BALDO, 2019)**

MARU (2003), ao citar BAYER (1994), descreve diversos fatores, características e propriedades que influenciam o desgaste. Desta forma, cita-se características geométricas, físicas e químicas além das propriedades mecânicas das superfícies atritantes.

- Características geométricas: Forma geral dos corpos e distribuição das asperezas
- Características físicas: Encruamento, difusão e parâmetros de rede
- Características químicas: composição e polaridade da superfície
- Propriedades mecânicas: Módulo elástico, dureza e parâmetros de fadiga.

MARU (2003) comenta ainda sobre a influência da temperatura, uma vez que, na superfície, há um calor gerado pelo atrito, e que pode alterar as propriedades mecânicas do material localizado próximo à superfície. Outra forma que o incremento

da temperatura modifica o mecanismo de desgaste é que ela pode favorecer características de deformação plásticas do material.

Ainda MARU (2003), sobre as características geométricas é importante acrescentar o fato de que as geometrias de contato vão sendo alteradas conforme o avanço do desgaste. Neste sentido, um contato inicialmente não conforme pode tornar-se conforme durante o processo abrasivo do desgaste. A figura 12 ilustra algumas situações possíveis para contato esfera-plano. Na situação A, apenas a esfera se desgasta; na situação B, apenas o plano se desgasta; na situação C, ambos se desgastam.

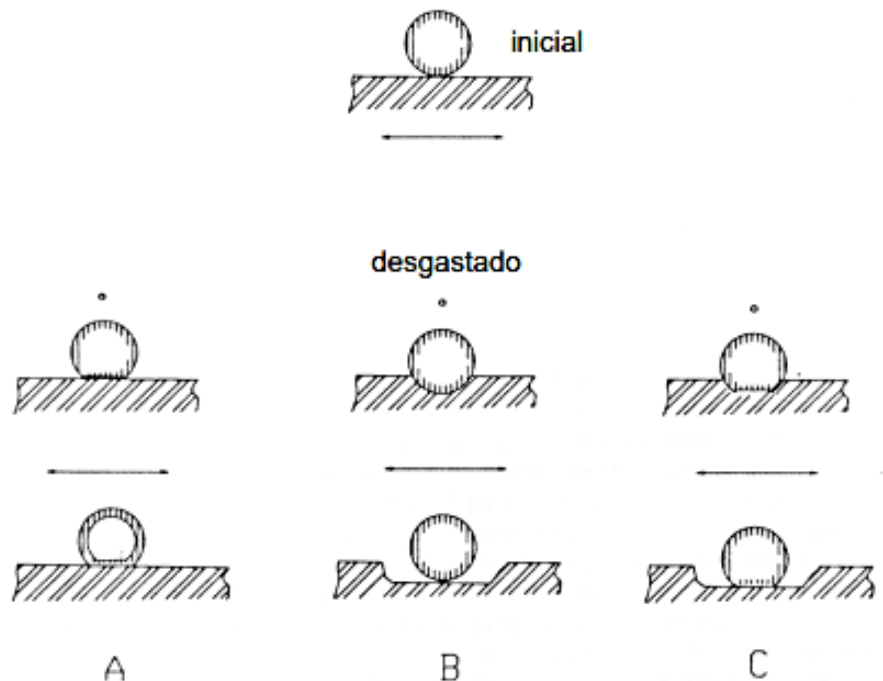


Figura 12 – Mudança da configuração do contato das superfícies (MARU,2003)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A apresentação e descrição dos materiais, métodos e procedimentos utilizados na elaboração deste trabalho encontra-se neste capítulo.

#### 3.1 MATERIAIS

Na realização dos ensaios foram utilizados conjuntos de pino e disco confeccionados em aço 1045. Os pinos foram feitos com 19 mm de diâmetro por 20 mm de comprimento, e os discos com 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura.



**Figura 13 - Conjunto Disco e Pino**

Para os ensaios lubrificados, utilizou-se o óleo sintético Selenia 5w40 – **API SN** da marca Petronas. Para os ensaios lubrificados com óleo e condicionador de metais foram utilizadas soluções de óleo sintético Selenia 5w40 da marca Petronas e o condicionador de metais da marca Militec-1.



**Figura 14 - Lubrificante e Condicionador de Metais**

## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1. Tribômetro

Os ensaios para a elaboração do trabalho foram realizados em uma bancada de ensaios de desgaste (Tribômetro – Clemente 2017) equipada com sensores que permitem a coleta de informações, em tempo real, da temperatura do pino de teste e da força de atrito. A instrumentação da bancada contou com o auxílio de uma célula de carga de 5Kg, que registra a força de atrito e um termopar para medir a temperatura

do pino. Os dados foram coletados com um Arduino conectado ao computador. O tribômetro conta também, com um motor de indução elétrico de 1/2cv da marca WEG em cujo eixo giratório foi acoplado o disco do teste. Esta bancada esta apresentada, física e esquematicamente na figura 15.

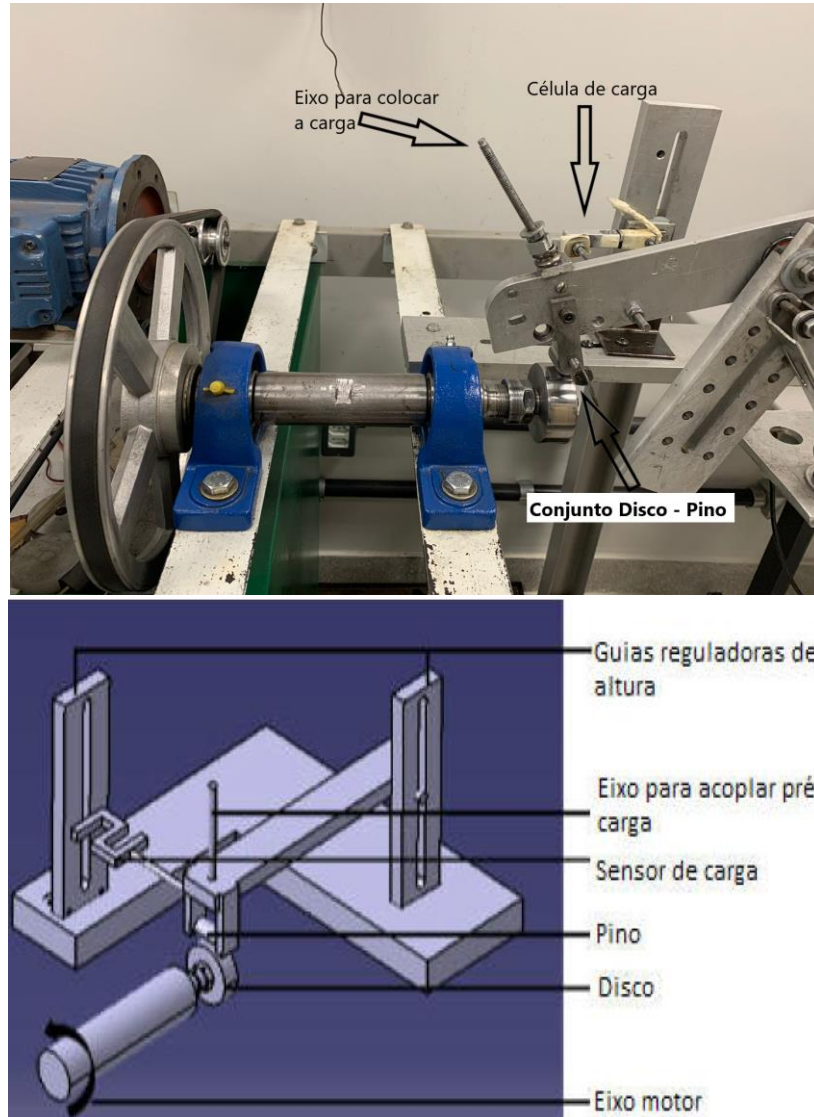


Figura 15 – Demonstrativo do tribômetro

### 3.2.2. Ensaios

*Preparação dos Corpos-de-Prova:* Antes dos ensaios, as superfícies dos discos e dos pinos foram preparadas da seguinte maneira: os discos foram lixados até a lixa de granulometria 3000 e, posteriormente, polidos com massa de polir automotiva nº1. Já os pinos receberam lixamento até a lixa de granulometria 400.



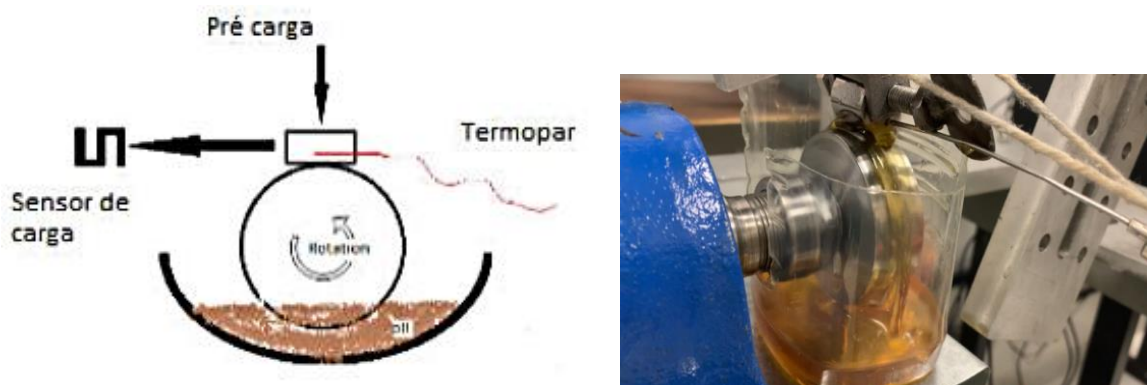
Antes de cada ensaio, e após a preparação superficial dos corpos de prova, foram feitas análises superficiais com o auxílio de um microscópio, com o intuito de garantir a padronização entre as condições iniciais de cada teste.

*Condições de Ensaio de Desgaste:* Os testes foram realizados nas seguintes condições:

- A seco
- Lubrificado com óleo 5w40
- Lubrificado com óleo 5w40 + Milltec-1
- Lubrificado com óleo 5w40 + Milltec-1, após tratamento térmico superficial

O arranjo experimental utilizado na realização dos ensaios de desgaste é mostrado esquematicamente na figura 15.

Para os ensaios lubrificados foi utilizado um reservatório de óleo localizado abaixo do disco. A rotação do disco conduz, por arrastre, o lubrificante para a região de contato entre o disco e o pino, o esquemático do arranjo experimental utilizado na realização dos ensaios lubrificados é mostrado na figura 16.

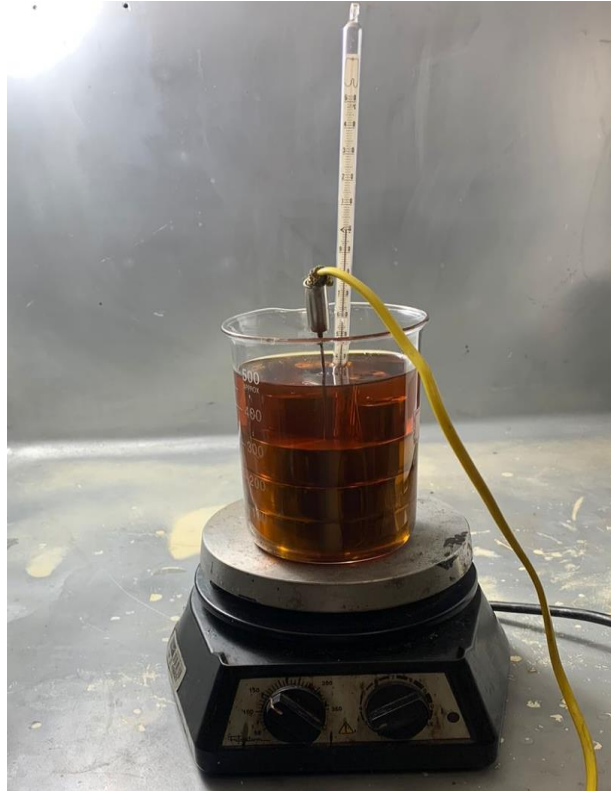


**Figura 16 – Demonstrativo do sistema de lubrificação**

Nos ensaios lubrificados com aditivo Millitec-1, a proporção da mistura seguiu a recomendação do fabricante de 40ml de aditivo para cada litro de óleo. As soluções foram sempre preparadas imediatamente antes da realização dos ensaios.

Nos ensaios lubrificados, após tratamento térmico superficial, a preparação das superfícies foi feita da seguinte maneira: o conjunto disco e pino foram mergulhados numa mistura óleo + Millitec-1 e, depois, aquecidos até 100°C por 60 min. O objetivo

deste tratamento foi simular a temperatura de funcionamento de um motor automotivo e verificar se a presença do aditivo Millitec-1 promove a formação (criação) de uma camada que, adsorvida à superfície dos componentes, permita modificar as condições de atrito durante os ensaios de desgaste.



**Figura 17 - Preparação dos discos e pinos para o teste com Millitec após tratamento térmico**

Para cada condição de ensaio de desgaste foram utilizadas cargas normais de 5N, 10N e 25N. Ao todo foram realizados 12 ensaios de desgaste, mais seus respectivos contra testes. A velocidade de rotação do disco foi mantida constante em: 400 rpm ou velocidade tangencial de 1,25 m/s.

Cada teste de desgaste foi realizado nas 4 condições analisadas (incluídos os contra testes) e cada teste teve uma duração total de 20 minutos.

### **3.2.3. Cálculo da Massa Perdida**

Nos ensaios a seco, o desgaste dos pinos foi determinado por meio da variação de sua massa, após cada ensaio. Para isto, foram medidas as massas de cada pino, antes e depois cada teste, e no final feita a comparação. Esta atividade foi realizada com o auxílio da balança de precisão da marca OHAUS modelo AR2140. As medições

foram sempre precedidas de uma limpeza com ar comprimido para retirar partículas e/ou impurezas que poderiam alterar os registros.

Para os ensaios lubrificados, a metodologia adotada para medir o desgaste dos pinos foi diferente. Nestes casos, as marcas de desgaste foram significativamente menores às observadas nos ensaios a seco e apresentavam um formato semelhante à metade de um elipsoide. O cálculo do desgaste foi feito de forma geométrica, com base no volume de material perdido durante os ensaios. Utilizando a seguinte equação:

$$V = \frac{r * R * h}{3}$$

O esquemático ilustrado na figura 18 representa as medidas utilizadas para o cálculo do volume perdido. Para calcular a massa perdida (em gramas) foi considerado o valor de 7,87 g/cm<sup>3</sup> de densidade para o aço 1045.

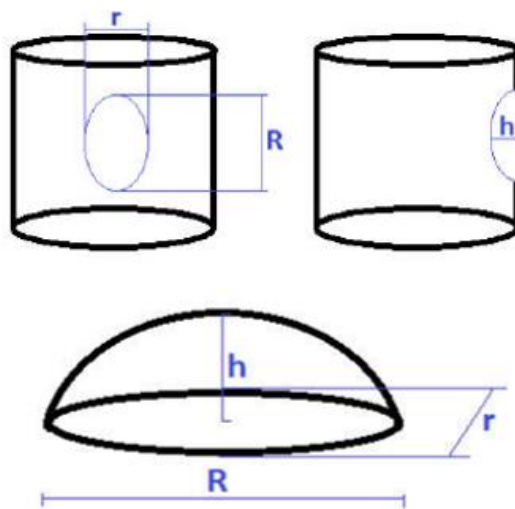


Figura 18 - Demonstrativo das medidas usadas para cálculo do volume perdido

### 3.2.4. Determinação Da Pressão de Contato – Regime de Lubrificação

A determinação do regime de lubrificação foi determinada pelo cálculo da pressão de contato entre o disco e o pino. Uma vez determinada a área de contato entre o disco e o pino pela marca deixada no pino no final do ensaio é possível achar a pressão final de contato pela seguinte fórmula.

$$P = \frac{F}{A}$$

Onde:

P: pressão de contato [Pa]

F: Força normal [N]

A: Área de contato [ $m^2$ ]

Para estimar o momento da mudança entre os regimes de lubrificação Elastohidrodinâmico para o Hidrodinâmico foram realizadas sucessivas divisões do tempo final e da área final de contato até chegar ao início do teste. Essa metodologia foi utilizada para estimar o momento em que a pressão de contato fica abaixo de 50MPa e passa para o regime Hidrodinâmico de lubrificação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção destina-se à apresentação dos resultados e encontra-se subdividida por cargas de ensaio, 5N, 10N e 25N, sendo apresentados os valores médios dos testes e contra testes realizados.

### 4.1 TESTES - 5N

#### 4.1.1. Teste 5N – Desgaste e Pressão de Contato

Na tabela 1 são apresentados os valores de desgaste (perda de massa) medidos e calculados, após os ensaios realizado com a carga normal de 5 N e em função do tipo de ensaio realizado.

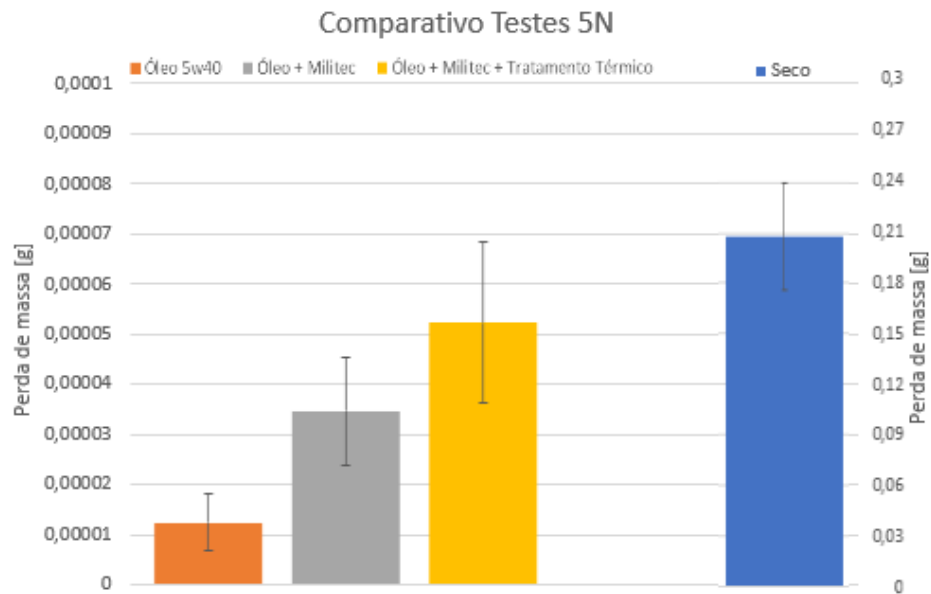
Tabela 1 – Comparativo massa perdida para os ensaios com 5N

Tipo de ensaio	Massa Perdida [ $10^{-5}$ g]
Seco	20.000 ± 3.000
Óleo 5w40	1,2 ± 0,5
Óleo 5w40 e militec-1	3,5 ± 1,0
Óleo 5w40 e militec-1 + Tratamento Térmico	5,0 ± 1,5

Fonte: autor

Nas figuras 19 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as massas perdidas nos ensaios com 5N de carga. Na figura 19, nota-se que, o melhor resultado de prevenção ao desgaste ocorreu com o ensaio lubrificado somente com óleo 5w40. O Militec-1 mostrou-se ineficiente na diminuição do desgaste e o tratamento térmico realizado com a solução de óleo 5w40 e Militec-1 foi ainda mais prejudicial neste aspecto.

Os valores de massa perdida para o ensaio a seco são muito maiores que para os ensaios lubrificados, chegando a ser até 20.000 vezes maior. Mostrando a eficiência da lubrificação na diminuição do desgaste.



**Figura 19 - Comparativo da massa perdida nos testes de 5N**

Com o objetivo de melhor compreender os ensaios e os fenômenos ocorridos durante o desgaste é importante identificar qual o regime de lubrificação que ocorre no sistema e quando ocorre a transição do regime Elastohidrodinâmico para o regime Hidrodinâmico.

A literatura afirma que para contatos não conformes o regime de lubrificação é o Elastohidrodinâmico, sendo este o regime de lubrificação do sistema no início do teste.

A tabela 2 mostra a estimativa da pressão para os ensaios lubrificados com óleo 5w40 e carga 5N, assim é possível identificar o momento aproximado em que a pressão fica abaixo de 50MPa e o regime torna-se hidrodinâmico.

A alteração entre os sistemas acontece pois no decorrer do ensaio e com o desgaste aumenta-se a área de contato entre o disco e o pino, desta forma diminui a pressão de contato e o regime passa a ser o hidrodinâmico.

Tabela 2. – Estimativa da Pressão de contato para testes lubrificados com óleo 5w40 e carga 5N.

Tempo [s]	Área de contato [ $mm^2$ ]	Pressão [MPa]
0	0,0007	7300
1	0,0015	3500
2,5	0,003	2000
5	0,006	1000
10	0,01	500
20	0,02	250
50	0,04	100
75	0,09	50
150	0,18	30
300	0,35	15
600	0,7	7,5
1200	1,4	3,5

Fonte:Autor

Assim, com o auxílio da tabela 2 e o gráfico mostrado na figura 20, é possível dizer que o regime de lubrificação que rege o sistema deixa de ser elastohidrodinâmico para tornar-se hidrodinâmico antes dos primeiros 75 segundos de ensaio, sendo este o momento em que a pressão de contato entre as superfícies fica abaixo de 50MPa.

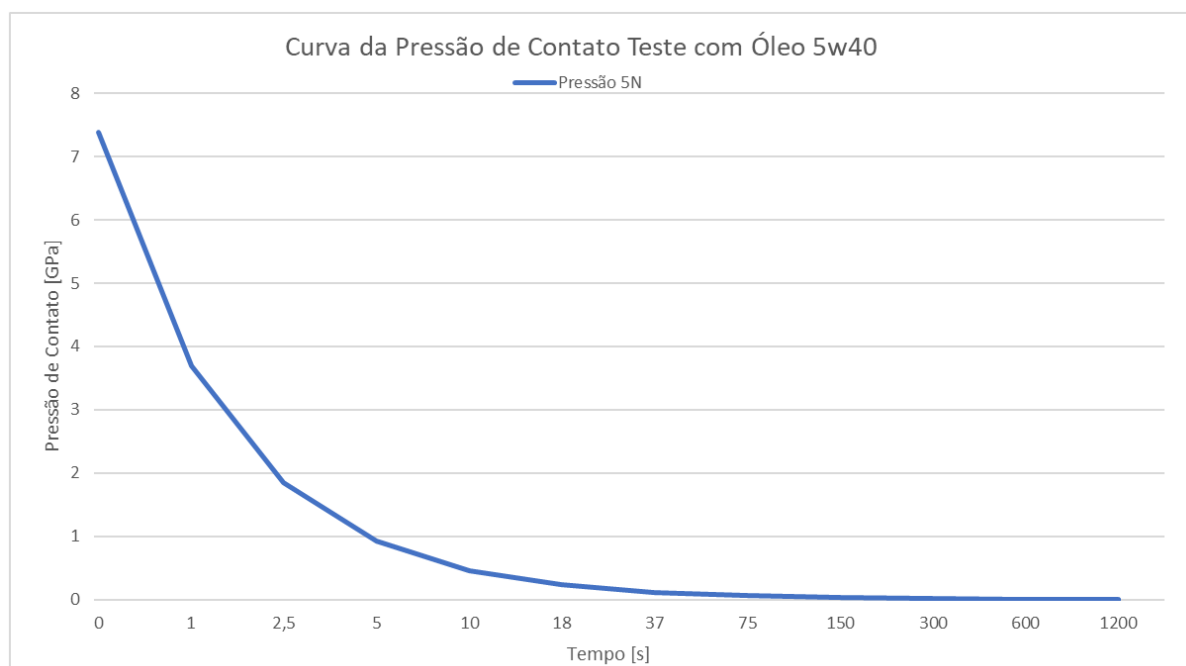


Figura 20 - Curva da Pressão de contato para o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga 5N

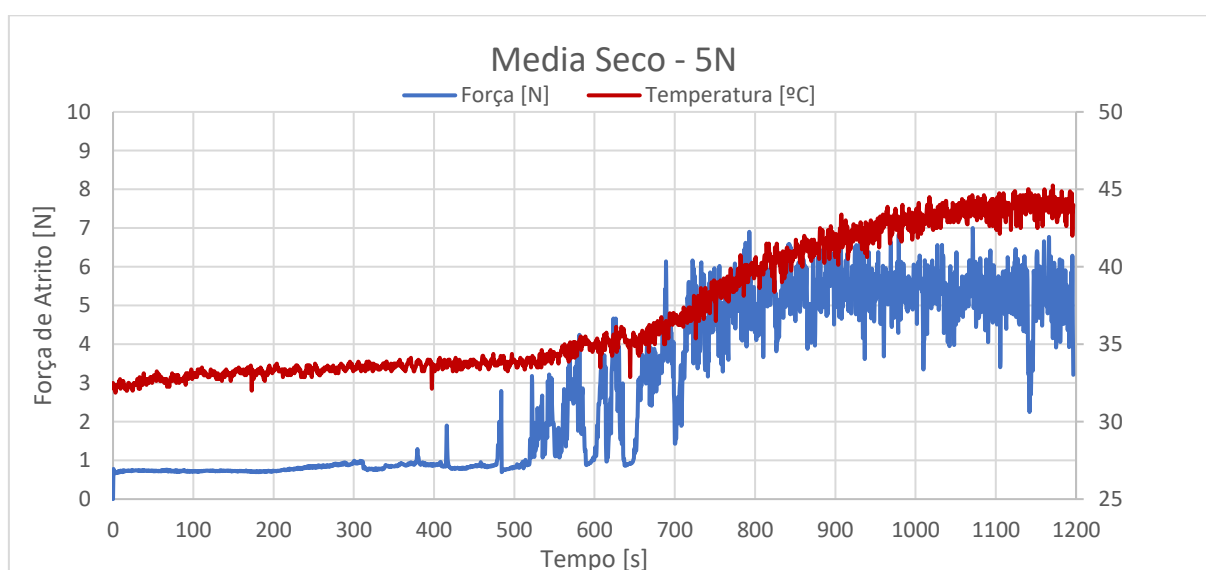
#### 4.1.2. Teste 5N a Seco

*Força de atrito:* Ao observar o gráfico representativo do ensaio a seco com carga de 5N, mostrado na figura 21 percebe-se uma região inicial de baixa força de atrito e baixo acréscimo de temperatura, seguido por uma grande oscilação na força de atrito e uma consequente estabilização na faixa de 5N, sugerindo que durante o ensaio ocorreu uma transição no regime de desgaste, passando-se de uma região de desgaste moderado para uma região de desgaste severo. Acredita-se que, por se tratar de um aço 1045, considerado de médio teor de carbono e com uma resistência à oxidação relativamente baixa (quando comparada com aços de alto teor de carbono ou de aços ligados); na etapa inicial do ensaio (até os primeiros 500 s) que corresponde ao período de *running*, de acomodação ou de amaciamento das superfícies, o atrito e o desgaste ocorridos tenham sido controlados pela camada de óxido presente nas superfícies dos discos e dos pinos; embora tenham sido tomados os cuidados necessários para evitar a oxidação dos corpos-de-prova. A camada de óxido em um momento inicial funciona como uma espécie de lubrificante sólido e que evita o contato direto metal-metal. Com o decorrer do ensaio, a camada de óxido (frágil) vai sendo destruída e partículas de óxido irão sendo removidas da região do contato na forma de “debris”. A remoção da camada de óxido promoverá o contato metal-metal e, com isto, o desenvolvimento de mecanismos de desgaste por



deslizamento clássicos (adesão, deformação plástica e fadiga). Por outro lado, algumas partículas de óxido removidas, poderiam ficar, ainda, retidas na interface de contato passando a funcionar como partículas abrasivas que provocariam danos superficiais, todavia mais acentuados.

*Temperatura:* A temperatura acompanha, fielmente, a evolução da força de atrito, tendendo a se estabilizar conforme a força de atrito também se estabiliza, em valores próximos de 44°C. Nota-se que no decorrer do ensaio, a temperatura sofre um acréscimo de, aproximadamente, 10°C.



**Figura 21 - Variação de atrito e temperatura teste seco - 5N**

*Análises das Superfícies Desgastadas:* Na figura 22 é apresentada a superfície desgastada do disco e na figura 23 a superfície desgastada do pino, ambas após o ensaio a seco com carga de 5N. Nas imagens é observado um dano superficial generalizado, predominando características típicas de desgaste por deslizamento, com mecanismos de adesão, deformação plástica e transferência de material. Os sulcos mostrados nas imagens evidenciam a atuação de mecanismos abrasivos de desgaste, onde partículas duras formadas pelo encruamento do material que foi transferido, acabariam, momentaneamente, riscando as superfícies. Estes mecanismos, juntamente com os processos adesivos de crescimento e destruição de junções, justificariam as oscilações observadas nos valores da força de atrito

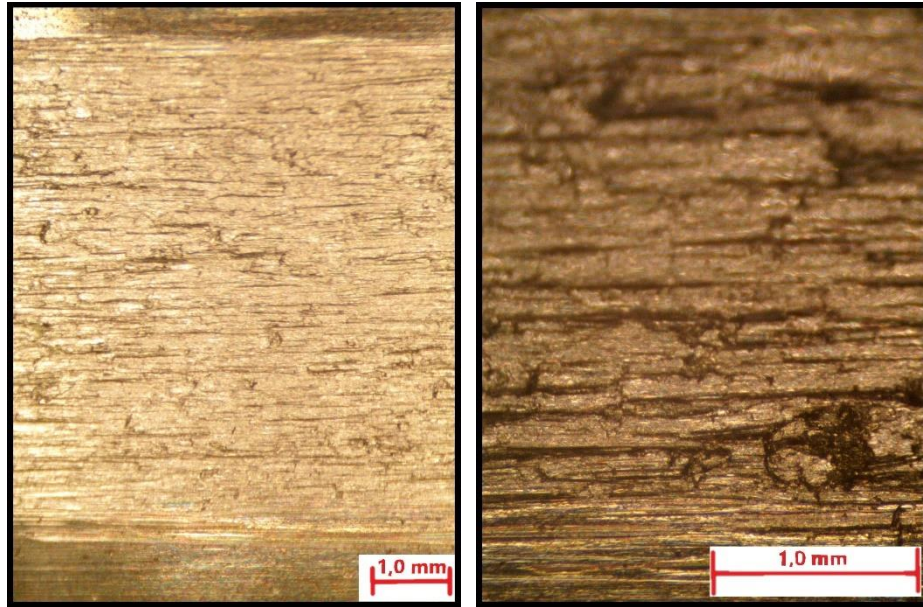


Figura 22 - Disco após ensaio a seco - 5N

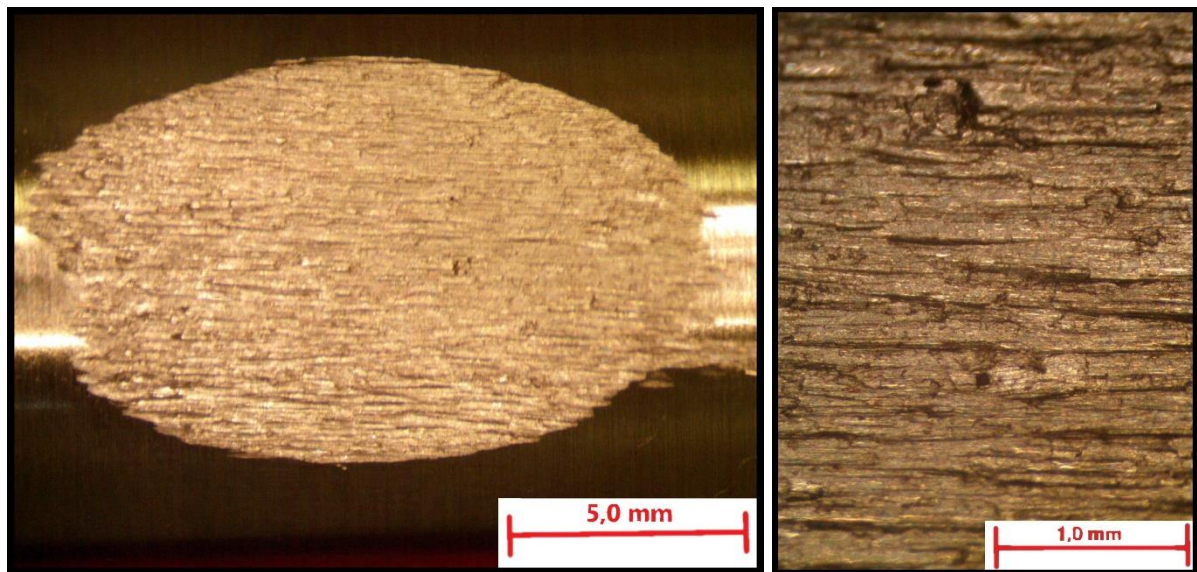


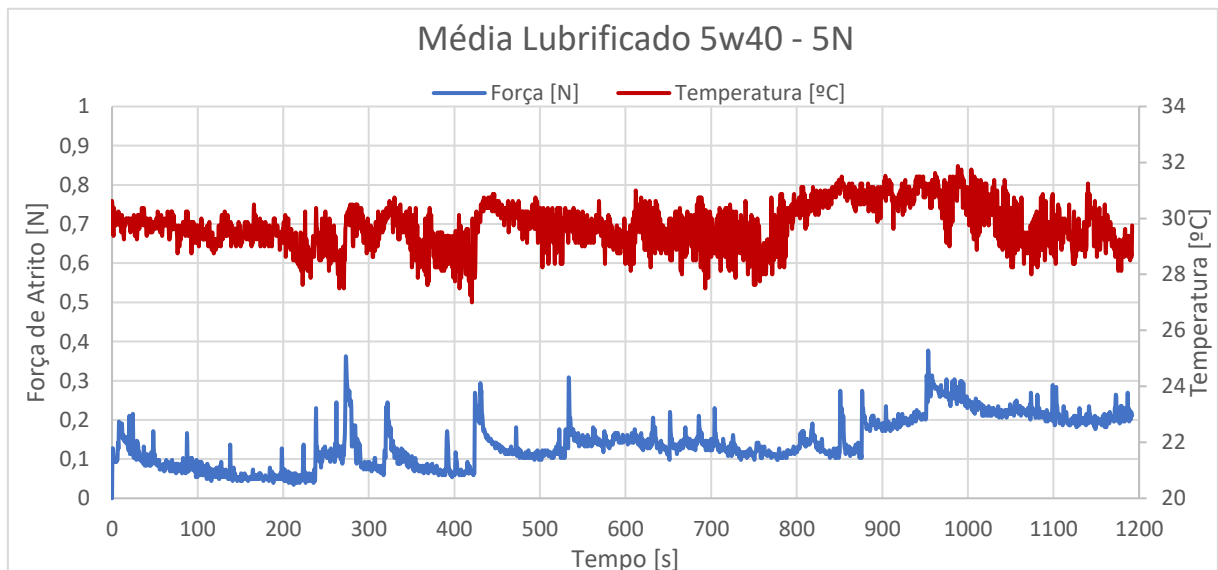
Figura 23 - Pino após ensaio a seco - 5N

#### 4.1.3. Teste 5N Lubrificado com óleo 5W40

*Força de Atrito:* A figura 24 representa a variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio, obtidos durante os testes lubrificados com óleo sintético 5w40. Observa-se que a força de atrito se manteve estável, em termos absolutos, durante a maior parte do tempo, alcançando valores entre 0,1N e 0,2N; e somente após 900 segundos, notou-se um leve aumento (0,25N), justamente, quando a área de contato alcançou seu máximo tamanho. A estabilidade dos valores

medidos sugere que, para estas condições de ensaio, o filme de óleo formado na interface de contato, minimiza a formação de junções entre os materiais e, com isto, os mecanismos de desgaste adesivo seriam, praticamente, eliminados. Contudo, verifica-se também, a presença de vários picos de instabilidade ao longo do teste. Estas instabilidades acontecem de forma aleatória e sua influência, nos valores de atrito, tem também uma duração aleatória.

*Temperatura:* Na figura 24 nota-se também, que a temperatura se manteve, praticamente, estável com o decorrer do ensaio; os resultados sugerem que, nesta condição, o calor gerado durante a interação pino – disco, não é suficiente para provocar uma elevação da temperatura no pino, pois a ação refrigerante do óleo conserva o sistema, praticamente, estabilizado à temperatura ambiente. A estabilidade da força de atrito, ao longo do teste, promoveu também, a estabilidade da temperatura.



**Figura 24 - Variação de atrito e temperatura teste 5w40 - 5N**

*Análises das Superfícies Desgastadas:* Nas figuras 25 e 26 são mostradas imagens das superfícies desgastadas, do disco e do pino, respectivamente. Em ambas as superfícies são observados danos superficiais gerados pelo deslizamento. No disco nota-se a presença de alguns sulcos formados no sentido do deslizamento, especialmente, um deles, bem acentuado que sugere a ação de mecanismos de desgaste abrasivo. Apesar de que um filme lubrificante, que separa as duas superfícies, pode ter sido criado na interface de contato, a característica de contato



não conforme faria com que ocorresse contato metal-metal em algumas ocasiões. Isto promoveria a remoção de partículas que, pelo próprio mecanismo de fratura teriam uma dureza maior que a dureza do material original (aço SAE 1045). Estas partículas duras ficam imersas no óleo e acabam voltando à região de contato pela ação da movimentação e fluxo do óleo durante o ensaio. A ação abrasiva destas partículas duras e o tempo em que elas atuam explicariam os picos de força de atrito antes mencionados. Na superfície do pino, notam-se marcas de deformação plástica espalhadas em toda a superfície, inclusive, nas bordas da elipse de desgaste. As marcas de deformação plástica também são predominantes na trilha de desgaste, onde protuberâncias, alinhadas com a direção do movimento, podem ser vistas, as quais, colaborariam com a formação de sulcos na superfície do disco.

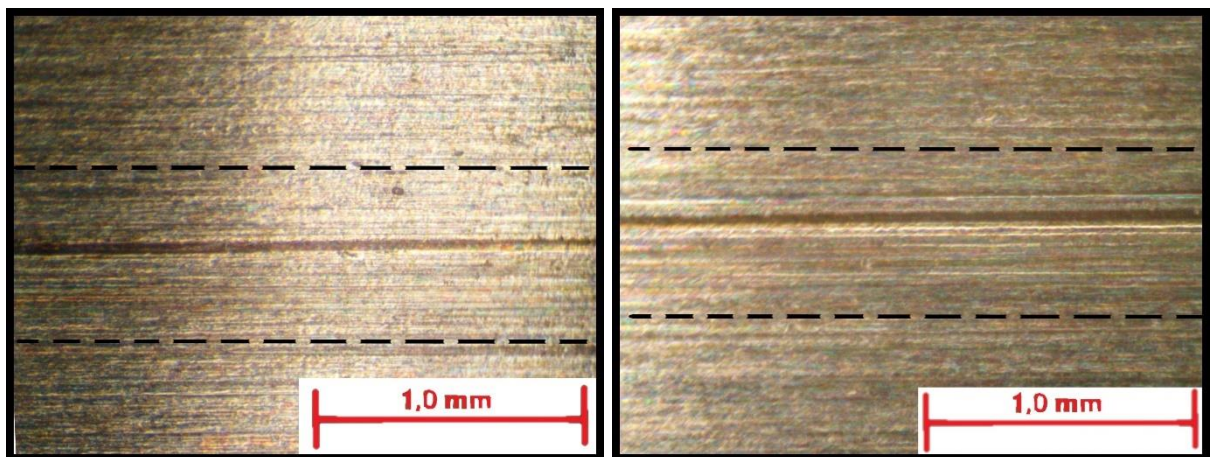


Figura 25 - Disco após ensaio 5w40 - 5N

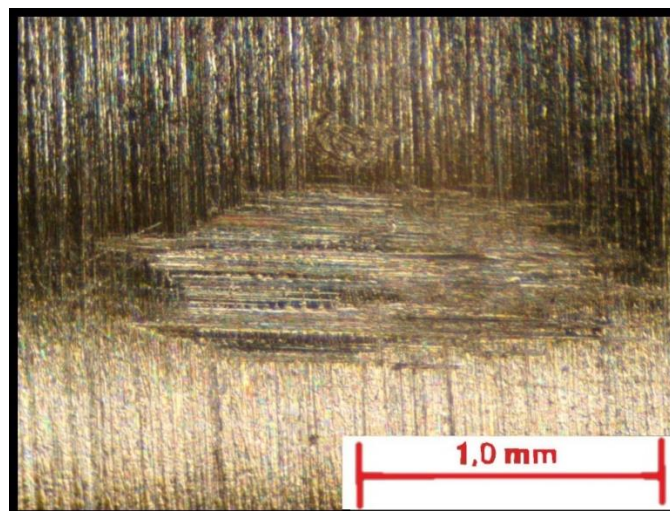


Figura 26 - Pino após ensaio 5w40 - 5N

#### 4.1.4. Teste 5N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1

*Força de Atrito:* No teste realizado com a lubrificação aditivada com o condicionador de metais Militec-1, observou-se, conforme mostrado na figura 27, um comportamento muito estável e constante da força de atrito, estabilizando-se por volta de 0,3N. Picos de medição sugerem contato metal-metal e/ou a atuação abrasiva de *debris* de desgaste. Comparando os valores de força de atrito, medidos neste ensaio, com os obtidos usando apenas óleo 5W40, é possível notar que, o uso de Millitec-1 promoveu um aumento da força de atrito em quase 100%. Passando de, em média 0,15 N (com picos de 0,3 N) com o óleo 5W40 para valores médios de 0,3 N com óleo + Millitec-1. Coincidentemente, neste teste também, foi observada uma variação da força de atrito, quando o ensaio completou 900 s; contudo este se estabilizou novamente, em 0,3 N, até o final do teste.

*Temperatura:* Ao analisar a curva da temperatura para o ensaio, nota-se um constante e gradual aumento da temperatura no decorrer do ensaio. Iniciando o teste na faixa de 32°C e finalizando-o com 35°C. Apesar da força de atrito permanecer, praticamente, constante ao longo do ensaio, a temperatura apresentou um contínuo crescimento; isto sugere que a presença do aditivo Millitec-1 influenciou negativamente nas propriedades de dissipação de calor do óleo 5W40.

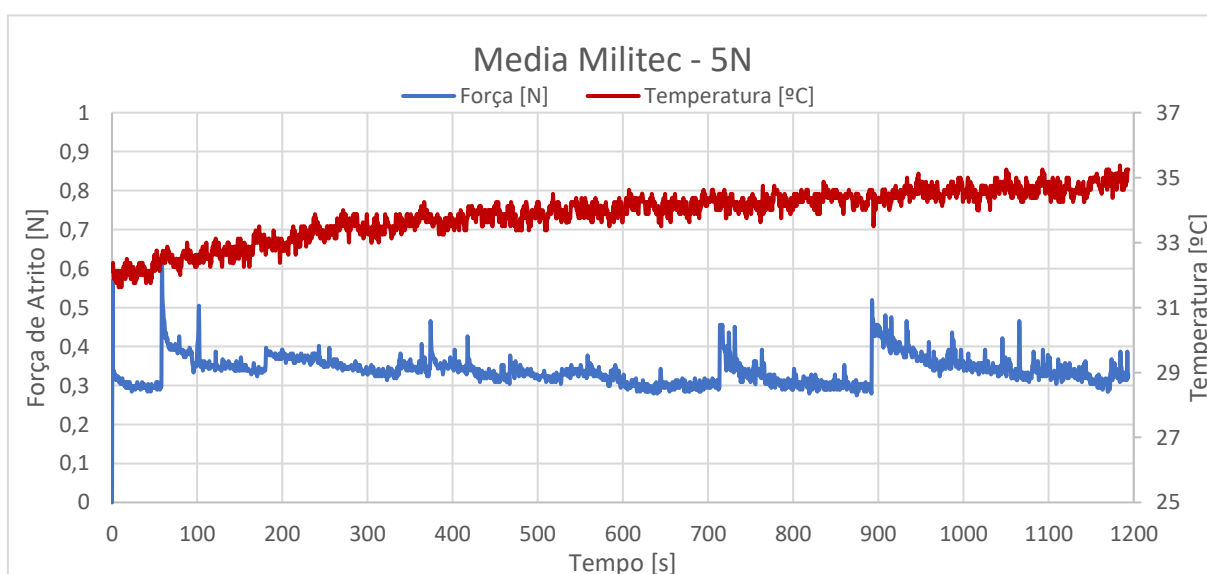
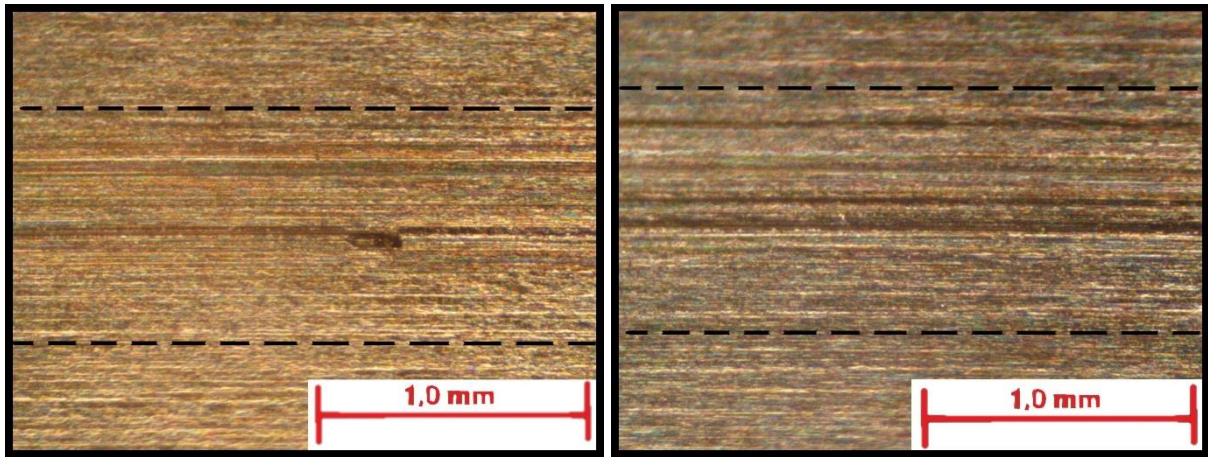


Figura 27 - Variação de atrito e temperatura teste Militec - 5N

*Análises das Superfícies Desgastadas:* As imagens mostradas nas figuras 28 representam as superfícies do disco após a realização do ensaio de 5N lubrificado com óleo e com o condicionador de metais. Nas imagens são observados sulcos, em maior quantidade e profundidade que os achados nos ensaios realizados apenas com óleo. Esta constatação sugere que os mecanismos abrasivos foram mais intensos neste ensaio, o que explicaria também, os maiores valores de força de atrito registrado. Adicionalmente, foram encontradas marcas de material transferido e aderido à superfície, sugerindo também, que junções foram criadas e quebradas durante o deslizamento; o que por sua vez contribuiria para o aumento da força de atrito e da temperatura.



**Figura 28 - Disco após ensaio com Militec - 5N**

Na imagem 29 é mostrada a superfície do pino após o ensaio de 5N lubrificado com óleo e condicionador de metais. É possível observar deformação plástica, principalmente na região de saída do contato entre pino e disco, região à esquerda da imagem. Nota-se também um sulco na região central da marca de desgaste, cujas bordas aparecem em alto relevo (material encruado por deformação plástica da superfície) e que coincidem exatamente com a posição dos acentuados sulcos vistos na superfície do disco. Foram observadas também, locais onde houve transferência de material entre as superfícies, corroborando as evidências notadas nas superfícies dos discos.

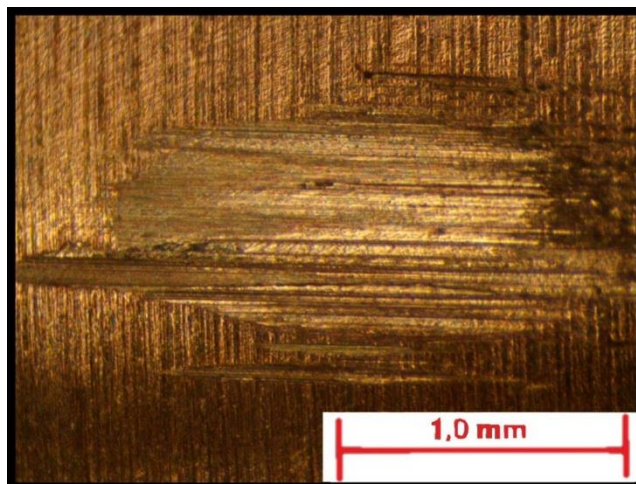


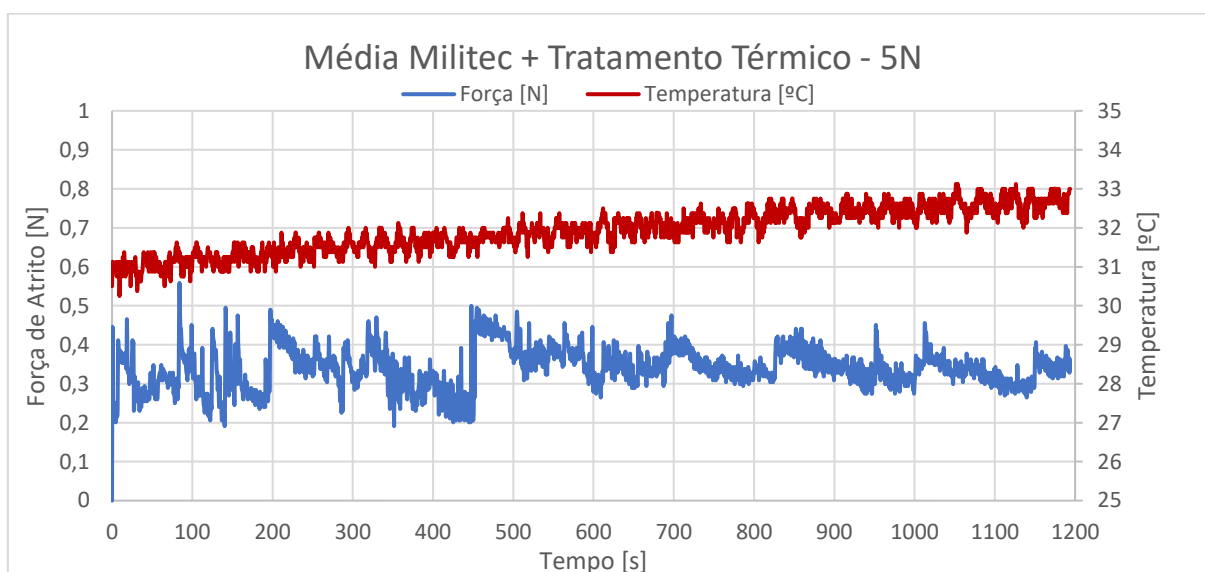
Figura 29 - Pino após ensaio com Militec - 5N

#### 4.1.5. Teste 5N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 + Tratamento Térmico

*Força de Atrito:* No ensaio realizado após o tratamento térmico superficial dos corpos de prova observa-se, no gráfico mostrado na figura 30, uma grande instabilidade dos valores da força de atrito, principalmente nos momentos iniciais de teste. Os valores oscilaram, inicialmente, entre 0,25 N e 0,5 N; e depois de 500s de ensaio, os valores se estabilizaram entre 0,3 N e 0,4 N. Ao comparar com os ensaios anteriores, óleo e óleo + Millitec-1, notou-se que nesta condição, a força de atrito é maior que as registradas nos outros ensaios. Esta constatação sugere que, o tratamento térmico superficial realizado prejudica ainda mais as condições de atrito entre as superfícies.

*Temperatura:* A curva de temperatura apresentou um valor, regularmente, crescente durante toda a realização do ensaio; comportamento semelhante ao observado nos testes com óleo e Millitec-1. A temperatura teve um aumento de, aproximadamente, 3°C ao longo de todo o ensaio.





**Figura 30 - Variação de atrito e temperatura teste Militec tratado termicamente - 5N**

*Análises das Superfícies Desgastadas:* Ao observar a superfície do disco, na imagem 31, é possível notar trilhas de desgaste muito mais marcadas e definidas que aquelas observadas nos ensaios com óleo e óleo + Militec, fato que reforça a ideia de que os mecanismos abrasivos de desgaste são mais severos nesta condição, e que, por sua vez promoveriam forças de atrito também maiores. Em uma das trilhas é possível ver um fragmento de material que, pelo tamanho e formato, sugere que foi removido por mecanismo de corte (caso mais severo de desgaste abrasivo). Observam-se também marcas de deformação plástica nas bordas das trilhas.

Ao analisar a superfície do pino, na figura 32, nota-se que as marcas de desgaste são típicas daquelas observadas em condições de deslizamento, com a presença de deformação plástica generalizada, e concentrada nas bordas das trilhas de desgaste. Estas bordas endurecidas atuam como protuberâncias duras que, durante do deslizamento, riscariam a superfície do disco, como citado anteriormente.



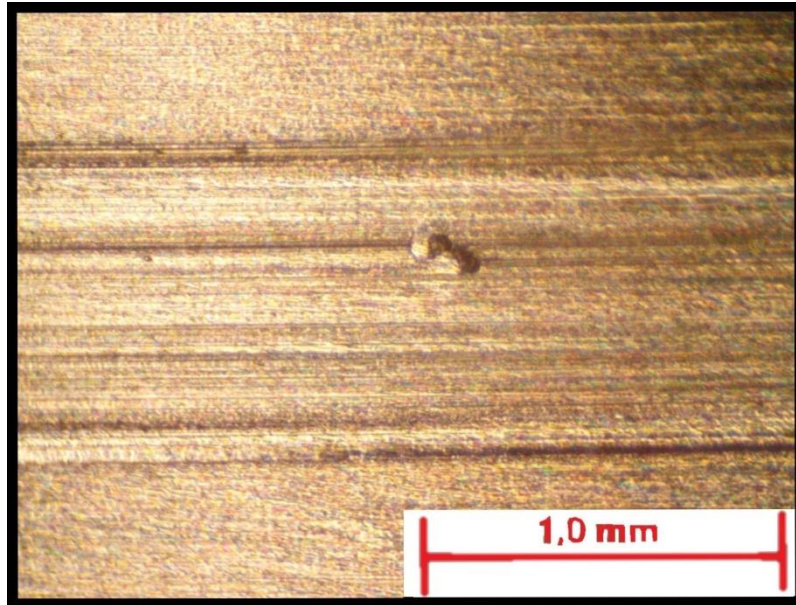


Figura 31 - Disco após ensaio com Militec tratado termicamente - 5N

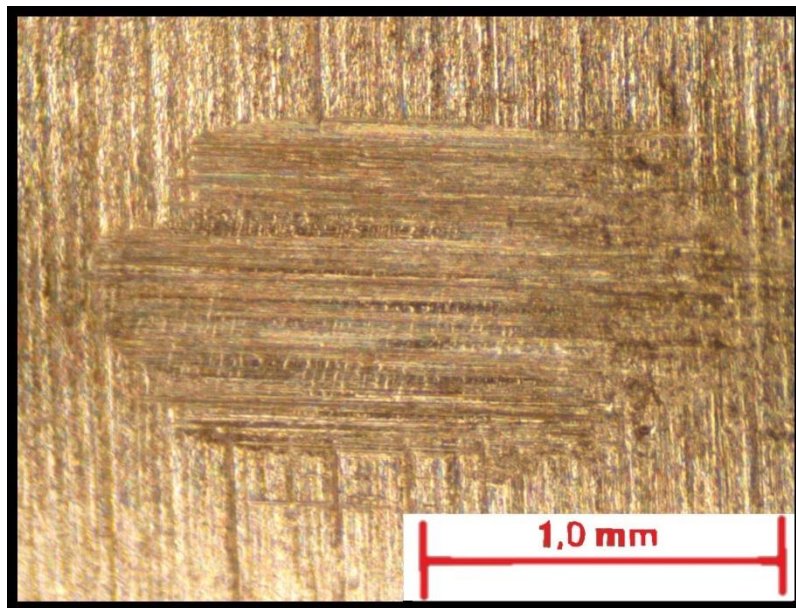
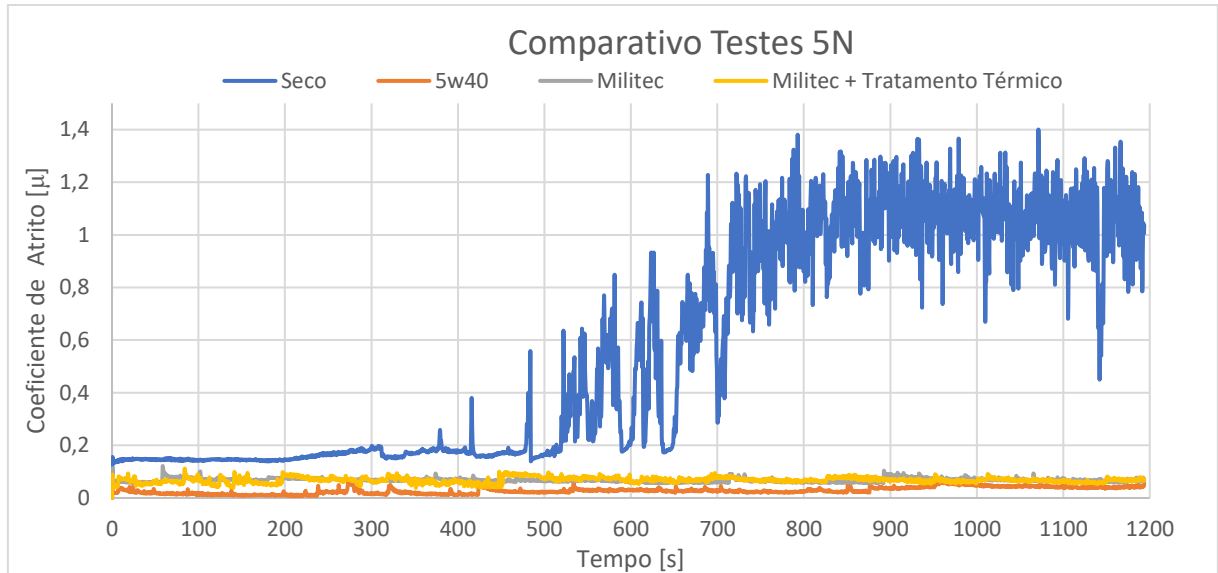


Figura 32 - Pino após ensaio com Militec e tratado termicamente - 5N

#### 4.1.6. Comparativo do coeficiente de atrito para os Testes com carga 5N

Na figura 33, é possível perceber, até o segundo 500, uma certa similitude entre os ensaios com carga de 5N, indicando que uma possível camada de óxido atuou no conjunto de disco e pino no ensaio a seco e funcionou como uma espécie de lubrificante sólido evitando o contato direto metal-metal, resultando em valores de coeficiente de atrito próximos dos ensaios com lubrificação líquida. Após este período,

o coeficiente de atrito no ensaio a seco mostra-se muito superior aos coeficientes dos ensaios lubrificados, demonstrando a importância da correta lubrificação no sistema. Observa-se também que para esta carga, o ensaio apenas com óleo 5w40 foi o que apresentou melhor resultado em relação a diminuição do coeficiente de atrito.



**Figura 33 - Comparativo dos testes com carga 5N**

## 4.2 TESTES - 10N

### 4.2.1. Teste 10N – Desgaste e Pressão de Contato

Na tabela 3 são apresentados os valores de desgaste (perda de massa) medidos e calculados, após os ensaios realizado com a carga normal de 10 N e em função do tipo de ensaio realizado.

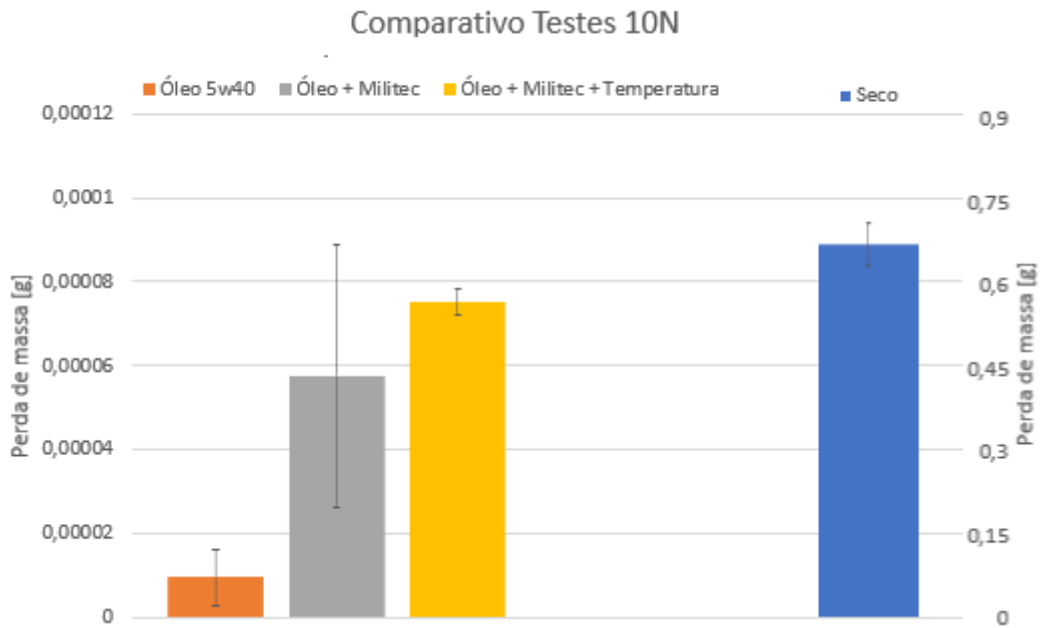
Tabela 3 – Comparativo da massa perdida para os ensaios com 10N

Regime de ensaio	Massa Perdida [ $10^{-5}$ g]
Seco	$65.000 \pm 3.000$
Óleo 5w40	$1,0 \pm 0,5$
Óleo 5w40 e militec-1	$6 \pm 3$
Óleo 5w40 e militec-1 + Tratamento Térmico	$7,5 \pm 0,5$

Fonte: autor

Observa-se, a exemplo do ensaio com carga de 5N, a importância da lubrificação para preservar o desgaste severo nas superfícies ao comparar com o desgaste a seco.

Com o auxílio do gráfico ilustrado na figura 34 observa-se que, novamente, o uso condicionador de metais Militec-1 foi prejudicial à preservação da superfície, apresentando valores superiores de massa perdida se comparado ao ensaio apenas com o óleo 5w40. O ensaio após o tratamento térmico superficial mostrou-se ainda mais danoso.



**Figura 34 - Comparativo da massa perdida nos testes de 10N**

A tabela 4 e o gráfico ilustrado na figura 35 mostram os valores da área e da pressão de contato ao decorrer do teste lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N. A análise desses valores permite compreender e estimar o momento em que ocorre a mudança do regime de lubrificação do ensaio.

**Tabela 4. – Estimativa da Pressão de contato para testes lubrificados com óleo 5w40 e carga 10N.**

Tempo [s]	Área de contato [ $mm^2$ ]	10N [MPa]
0	0,0001	9500
1	0,002	5000
2,5	0,004	2500
5	0,008	1200
10	0,015	600
20	0,03	300
50	0,07	150
75	0,13	75
150	0,25	40
300	0,5	20
600	1,0	10
1200	2,1	5

Fonte: Autor

Ao observar os valores mostrados na tabela, é possível notar que a pressão de contato entre o disco e o pino fica inferior a 50MPa no intervalo de tempo entre 75 e 150 segundos. Desta forma, acredita-se que é neste período em que o regime de lubrificação do sistema passa de Elastohidrodinâmico para Hidrodinâmico.

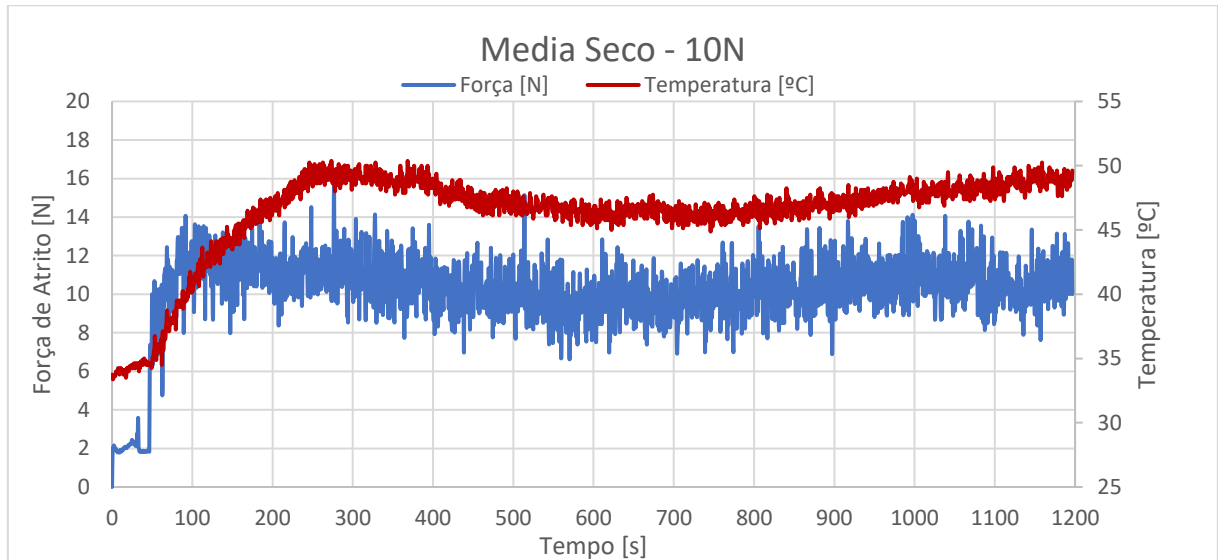


Figura 35 - Curva da Pressão de contato para o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga 10N

#### 4.2.2. Teste 10N a Seco

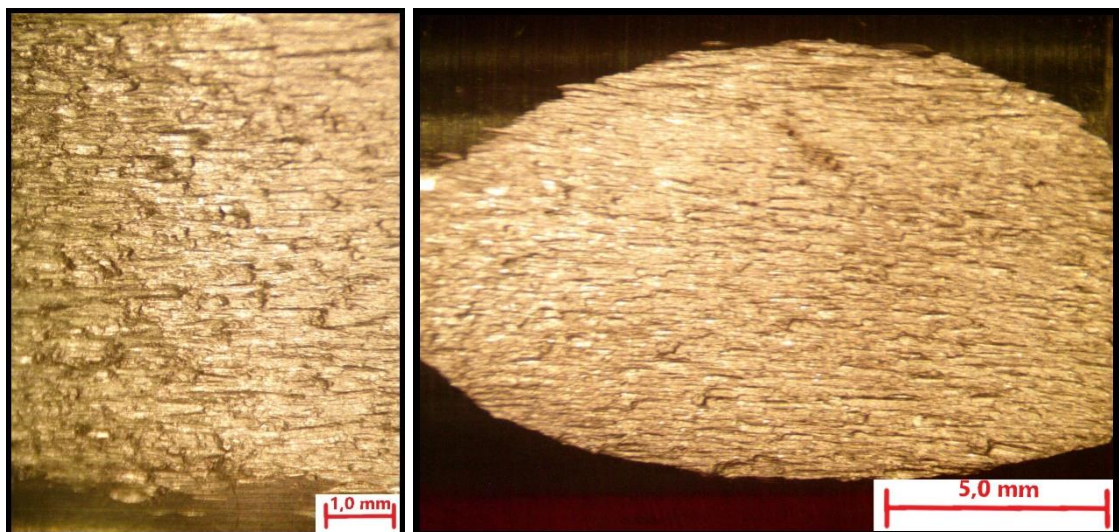
*Força de Atrito:* Ao observar o gráfico que ilustra a curva de força de atrito do ensaio a seco com carga de 10N, mostrado na figura 36, é possível perceber uma região de baixo atrito seguida por um rápido crescimento da força que ocorre após 50s de teste, conhecida como região de *running*. A partir deste ponto, a força de atrito atinge um pico de aproximadamente 14N, para depois se estabilizar, ao longo do ensaio, em valores entre 8N e 12N. A parte inicial da curva assemelha-se com a curva obtida com o teste a seco de 5N. O resultado sugere que a camada de óxido que tem um papel importante nos instantes iniciais dos ensaios a seco.

*Temperatura:* Nota-se, mais uma vez, a relação direta entre a temperatura e o gráfico da força de atrito. Com rápido aumento na região de running e uma posterior estabilização, em valores próximos de 50 °C, até o final do teste.



**Figura 36 - Variação de atrito e temperatura teste seco - 10N**

*Análises das Superfícies Desgastadas:* Na figura 37 que representa o disco e o pino após o ensaio, a seco com 10N de carga normal, percebe-se marcas típicas de desgaste por deslizamento controlado por mecanismos adesivos e de deformação plástica; incluindo sinais onde houve transferência de material entre as superfícies. A superfície do pino, também apresenta as mesmas características de dano superficial visto no disco. No pino fica mais evidente ainda, a deformação plástica ocorrida nos bordos externos da marca de desgaste (da elipse).



**Figura 37 – Disco e Pino após ensaio a seco – 10N**



### 4.2.3. Teste 10N Lubrificado com óleo 5W40

*Força de Atrito:* A variação da força de atrito em função do tempo ensaio é apresentado na figura 38. Nesta figura nota-se que a força de atrito permanece, praticamente, constante durante a realização do ensaio; alcançando um valor médio de aproximadamente 1 N, com algumas oscilações que podem ser interpretados como possíveis falhas de lubrificação e conseqüente contato metal-metal.

*Temperatura:* Os valores de temperatura acompanham perfeitamente o comportamento da força de atrito. Como a força de atrito permanece estável ao longo de todo o ensaio, a temperatura também permanece constante em valores próximos de 31 °C.

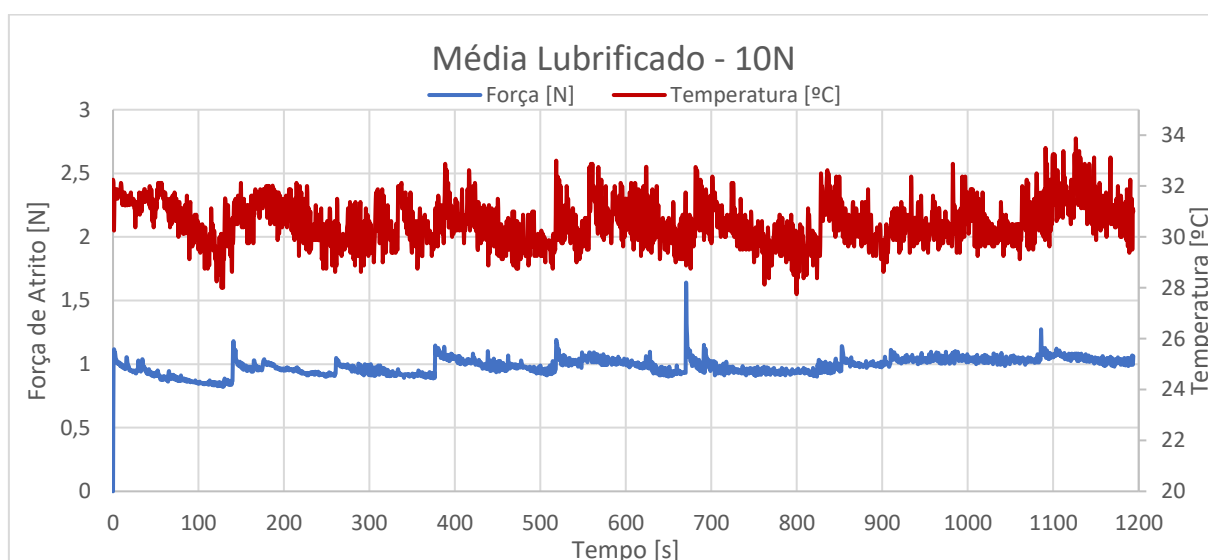
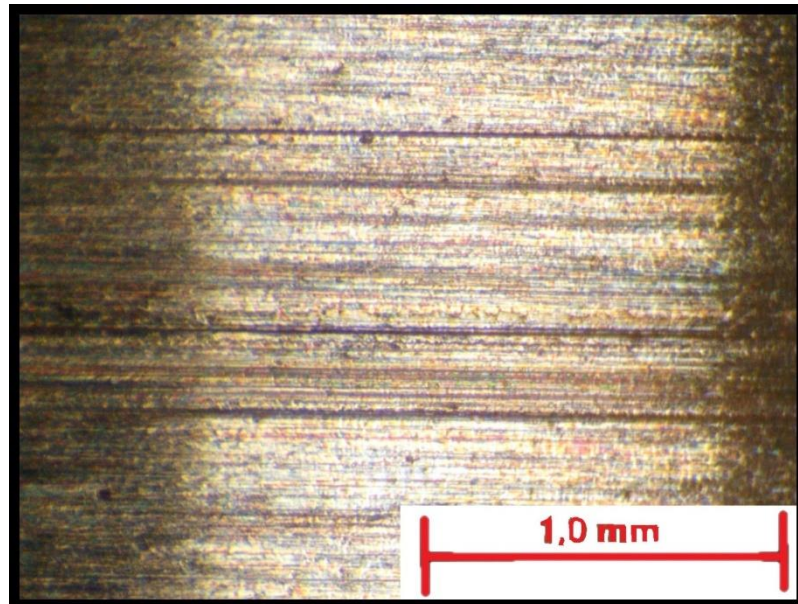


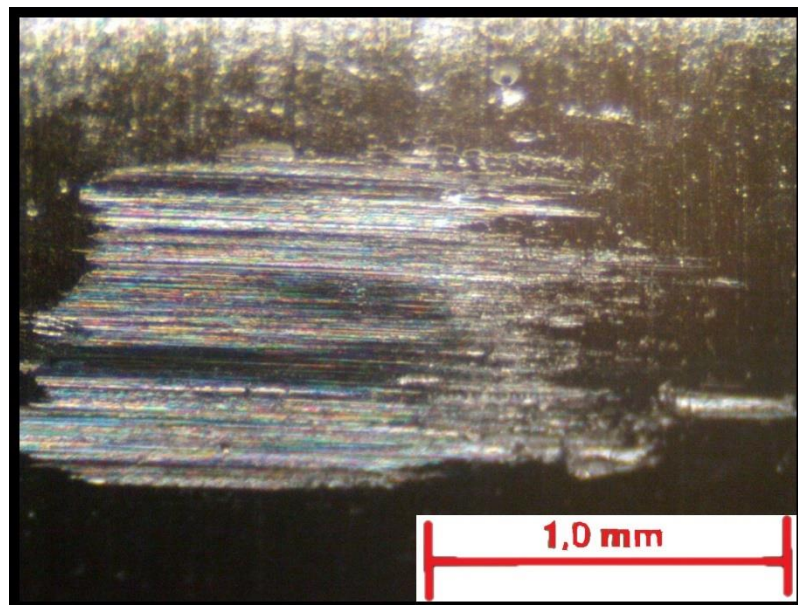
Figura 38 - Variação de atrito e temperatura teste 5w40 - 10N

*Análises das Superfícies Desgastadas:* A imagem mostrada na figura 39 representa a trilha de desgaste sobre o disco e na figura 40, sobre o pino ensaiado com óleo 5w40 - 10N. É possível perceber, na trilha do disco, sulcos com diferentes profundidades, fator indicativo de que algum mecanismo abrasivo atuou nesses regiões, provenientes de protuberâncias duras, criadas pela deformação plástica das superfícies, ou de partículas duras (próprio material desgastado que encruou e tornou-se um abrasivo) que ficaram presas a uma das superfícies ou que entraram e rolaram na interface ocasionalmente. Nas bordas das trilhas de desgaste é possível observar cristas de material deformado que atuariam, justamente, como protuberâncias duras que sulcariam a superfície do contra-corpo. Na imagem que representa o desgaste no

pino também é possível perceber marcas de deformação plástica, como protuberâncias nas bordas dos sulcos e principalmente, na borda de saída do contato. Notam-se também, dois grandes sulcos que coincidem com os sulcos observados na superfície do disco.



**Figura 39 - Disco após ensaio com óleo 5w40 - 10N**



**Figura 40 - Pino após ensaio com óleo 5w40 - 10N**



#### 4.2.4. Teste 10N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1

*Força de Atrito:* Os resultados de força de atrito em função do tempo de ensaio lubrificado com o óleo e o condicionador de metais estão apresentados na figura 41. No gráfico, é possível perceber que a força de atrito se mantém praticamente estável, ao longo de todo o ensaio, alcançando um valor médio de aproximadamente 0,5 N. Quando comparados estes valores com os obtidos a partir do ensaio usando somente óleo 5W40, nota-se que o valor da força de atrito usando o Milltec-1 é metade daquele medido usando apenas óleo. (0,5 N contra 1 N). Evidência que sugeriria que, o uso de Milltec-1 poderia ser uma boa alternativa para diminuir o atrito e, talvez, o desgaste do conjunto.

*Temperatura:* Os valores de temperatura, medidos durante o ensaio, mostram um aumento gradual e contínua no decorrer do teste, e com uma tendência a se estabilizar em valores próximos de 36 °C.

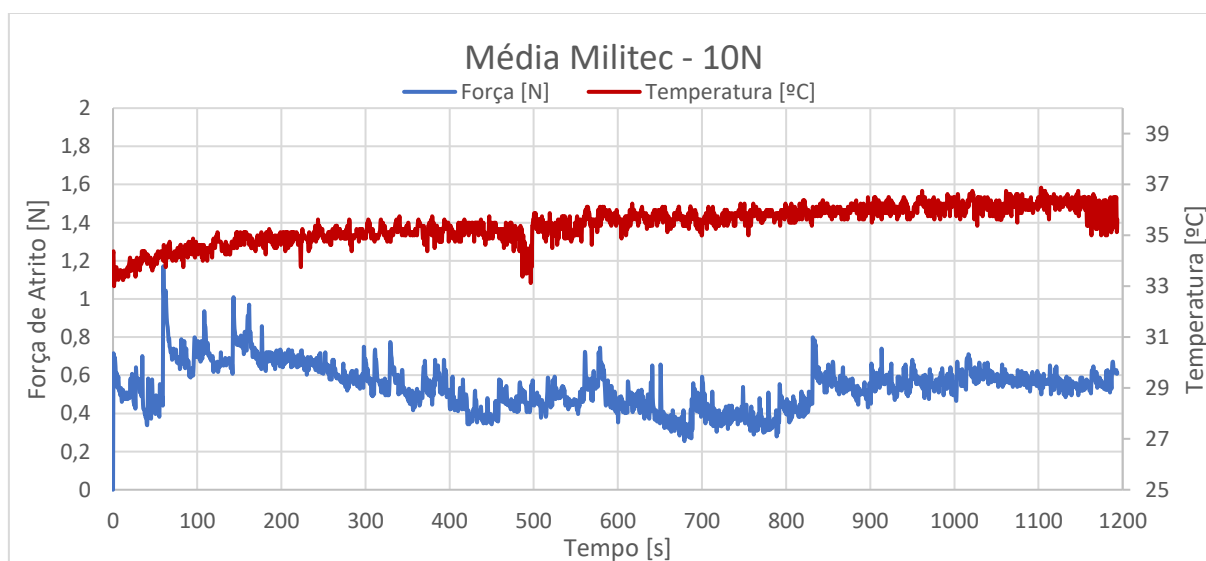


Figura 41 - Variação de atrito e temperatura teste Militec - 10N

*Análises das Superfícies Desgastadas:* A figura 42 mostra as superfícies do disco e a figura 43, do pino, após o ensaio realizado com óleo e Militec. É possível observar uma superfície uniforme, mas com marcas que podem indicar um desgaste abrasivo proveniente de material desgastado ainda presente no sistema. Observa-se também a presença de um sulco mais acentuado no centro da superfície desgastada do pino, sendo característico de desgaste abrasivo. No pino observa-se deformações plásticas na superfície desgastada, principalmente na região de saída do contato com o disco.

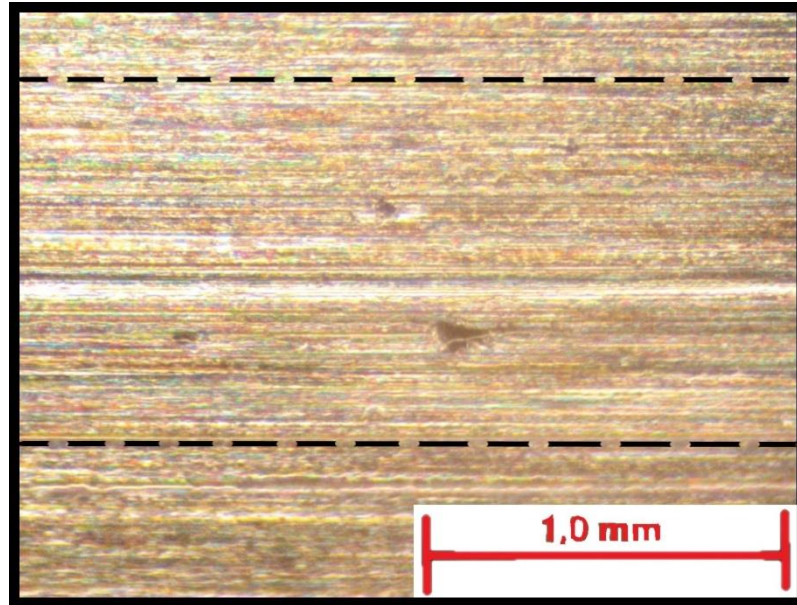


Figura 42 - Disco após ensaio com óleo 5w40 e Militec - 10N

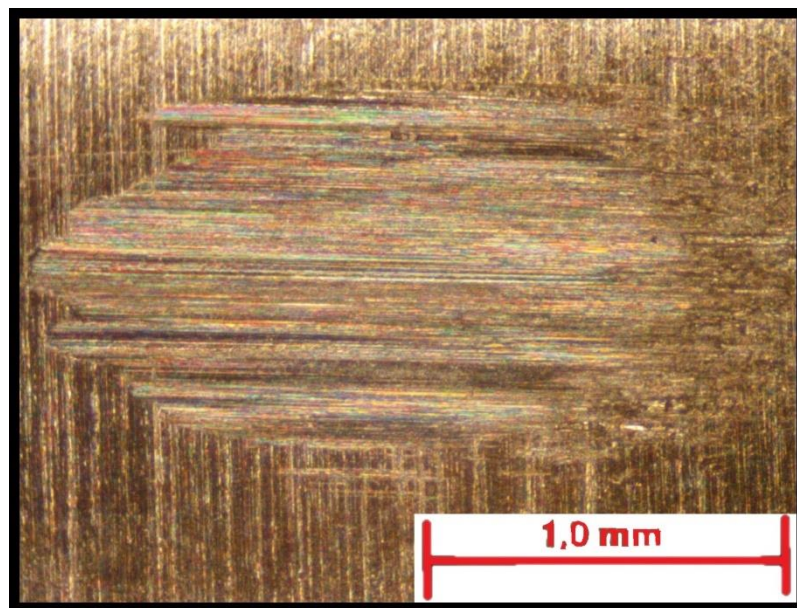


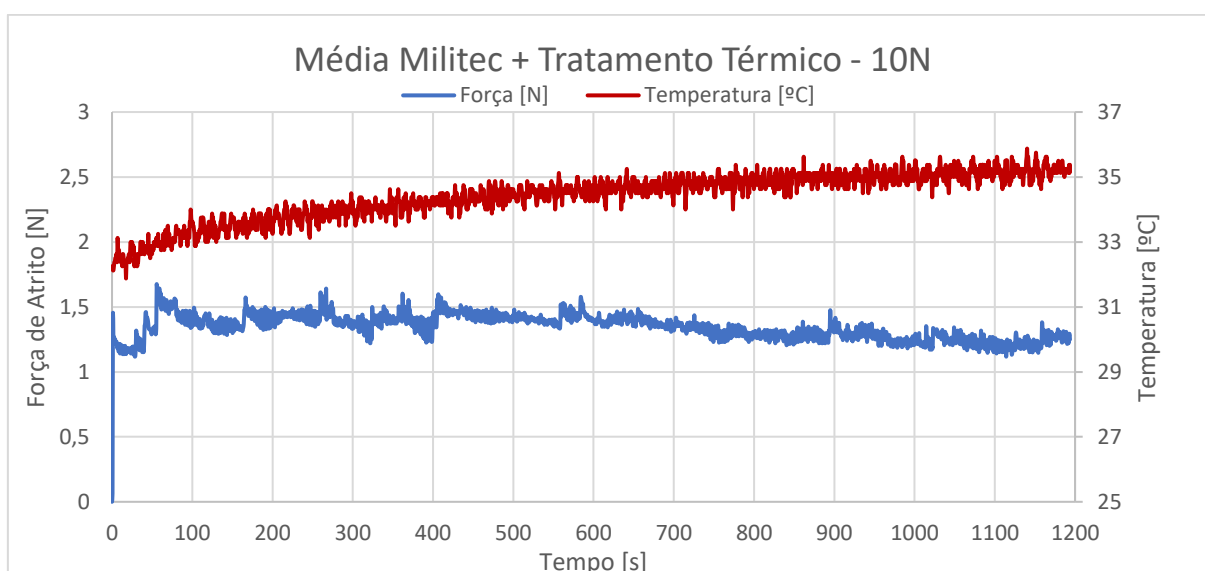
Figura 43 - Pino após ensaio com óleo 5w40 e Militec - 10N

#### 4.2.5. Teste 10N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 + Tratamento Térmico

*Força de Atrito:* Os resultados e força de atrito registrados, apresentados na figura 44, mostram duas tendências bem marcadas. Na primeira metade do teste, até 600 s de ensaio, a força de atrito se mantém estável em valores próximos de 1,5 N. A partir dali, na segunda metade, nota-se uma tendência de queda gradativa dos valores, até que no final do ensaio atinge-se um valor de, aproximadamente, 1,25 N.

Ainda sobre a força de atrito, observa-se uma região inicial - até os 50 s - de menor atrito, que corresponde ao período de *running* do sistema. Os picos de valores observados podem ser indicativos de falha no filme lubrificante e consequente contato metal-metal, ou da ação de uma partícula de desgaste que devido ao fluxo de lubrificante pode ter voltado à região de contato, atuando como uma partícula abrasiva. Comparando estes resultados com os já observados com a mistura óleo + Millitec-1, nota-se que o tratamento térmico praticamente triplicou os valores de força de atrito, passando de 0,5 N para 1,5 N respectivamente. Esta evidência indica que, o uso de Millitec-1, em temperaturas semelhantes às de funcionamento de um motor automotivo, promove a elevação da força de atrito entre as partes e, conseqüentemente, pode também provocar a elevação da temperatura do sistema tribológico e da taxa de desgaste do conjunto.

*Temperatura:* Na curva da temperatura, observa-se um gradual aumento da mesma, com uma tendência a se estabilizar em valores próximos de 35°C. No decorrer o do ensaio, houve uma variação de, aproximadamente, 4°C. Estes resultados são muito parecidos aos obtidos com a mistura óleo + Millitec-1, por tanto, apesar de ter ocorrido um aumento da força de atrito, isto não contribuiu para a elevação da temperatura durante o ensaio.

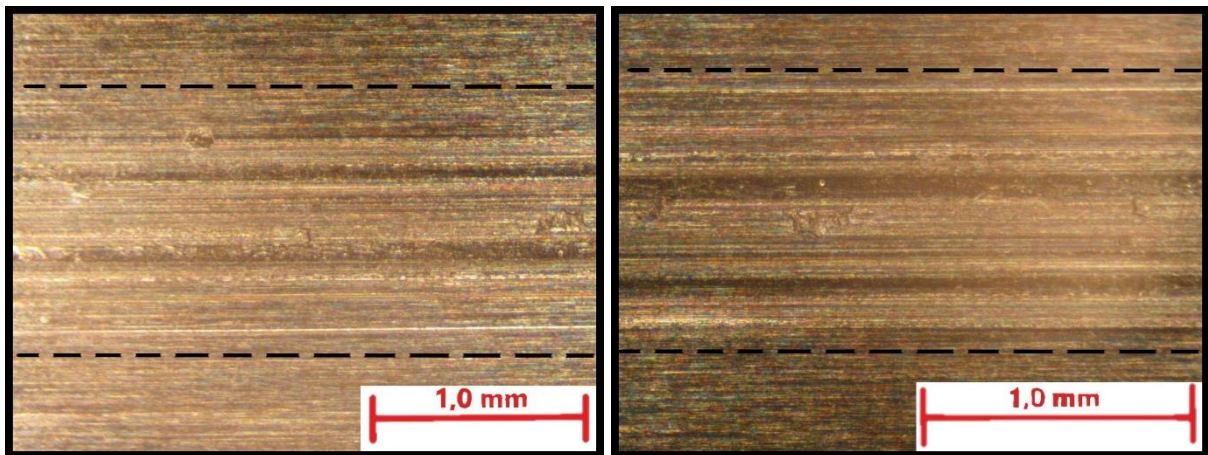


**Figura 44 - Variação de atrito e temperatura teste Militec tratado termicamente - 10N**

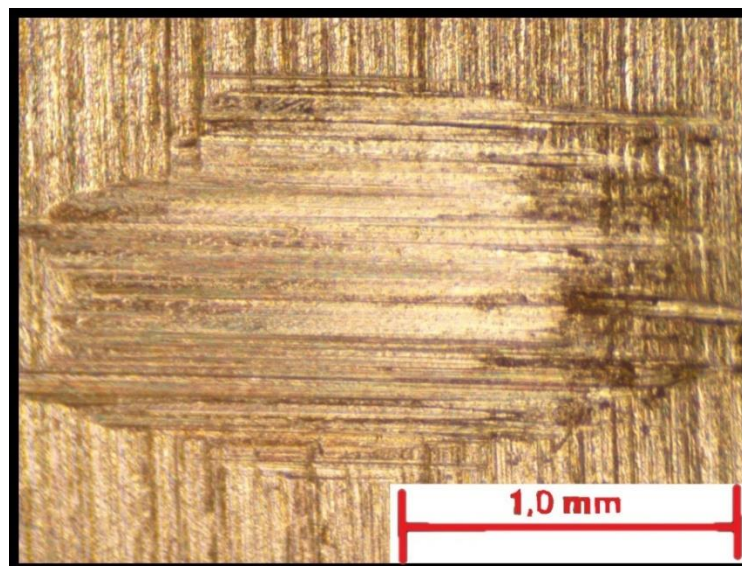
*Análises das Superfícies Desgastadas:* Nas superfícies desgastadas do disco, mostrada na figura 45, e do pino, mostrada na figura 46, são observadas marcas de dano superficial, com remoção de material, diferentes daquelas vistas nos outros



ensaios de desgaste. A superfície parece ter uma rugosidade elevada, ter sofrido deformação plástica, e apresentar uma aparência craquelada, com sinais de remoção de material por mecanismos de fratura frágil. O tratamento térmico criou, nas superfícies dos discos e pinos, uma espécie de revestimento semelhante a uma camada de óxido, que durante o processo de esfregamento entre as superfícies, quebra-se por fragilidade e cujos detritos são expulsos, da região de contato ou são reconduzidos a ela pelo fluxo de óleo circundante. A remoção dessa camada frágil e a consequente interação das partículas removidas, promoveu um dano superficial mais acentuado, quando comparado com as superfícies antes analisadas. Ao avaliar a superfície do pino observa-se, principalmente, na região de saída do contato, deformações plásticas; e marcas de adesão também podem ser encontradas.



**Figura 45 - Disco após ensaio com óleo 5w40 e Militec tratado termicamente - 10N**



**Figura 46 - Pino após ensaio com óleo 5w40 e Militec tratado termicamente - 10N**

#### 4.2.6. Comparativo do coeficiente de atrito para os Testes com carga 10N

Para os testes realizados com carga de 10N percebe-se, no ensaio a seco, a atuação da camada de óxido diminuindo o atrito e agindo como lubrificante sólido por um breve período, no qual os valores do coeficiente de atrito foram também próximos dos valores com lubrificação líquida.

Nota-se também que a preparação térmica apresentou um resultado negativo na diminuição do coeficiente de atrito. Desta forma, os testes com óleo 5w40 e solução de óleo 5w40 com Militec apresentaram resultados mais satisfatórios na diminuição do atrito

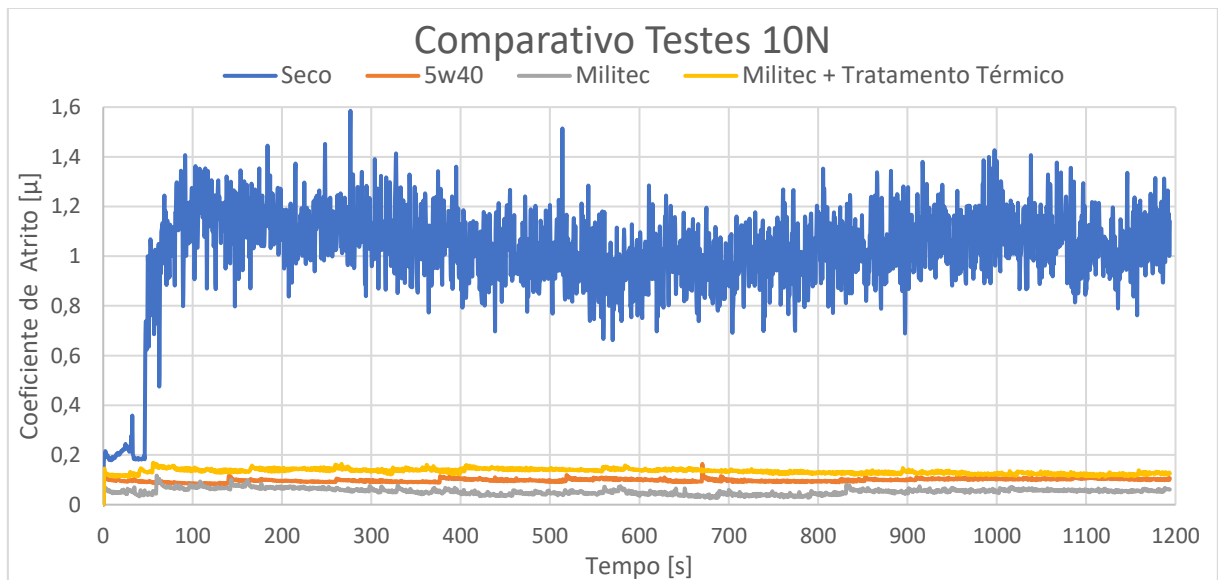


Figura 47 - Comparativo dos testes com carga 10N

### 4.3 TESTES - 25N

#### 4.3.1. Teste 25N - Massa Perdida

Na tabela 5 são apresentados os valores de desgaste (perda de massa) medidos e calculados, após os ensaios realizado com a carga normal de 25 N e em função do tipo de ensaio realizado.

Regime de ensaio	Massa Perdida [ $10^{-5}$ g]
Seco	$120.000 \pm 10.000$
Óleo 5w40	$2 \pm 0,1$
Óleo 5w40 + militec-1	$6,5 \pm 0,5$
Óleo 5w40 + militec-1 + Tratamento Térmico	$5 \pm 0,1$

Fonte: Autor

Para os ensaios com 25N de carga e, contrariando os testes realizados 5N e 10N, a lubrificação mais prejudicial do ponto de vista de massa perdida foi a lubrificação com óleo e Militec-1. Após o tratamento térmico, obteve-se uma melhora nos resultados. E, novamente, o ensaio apenas com óleo 5w40 foi o que melhor protegeu a superfície contra o desgaste.

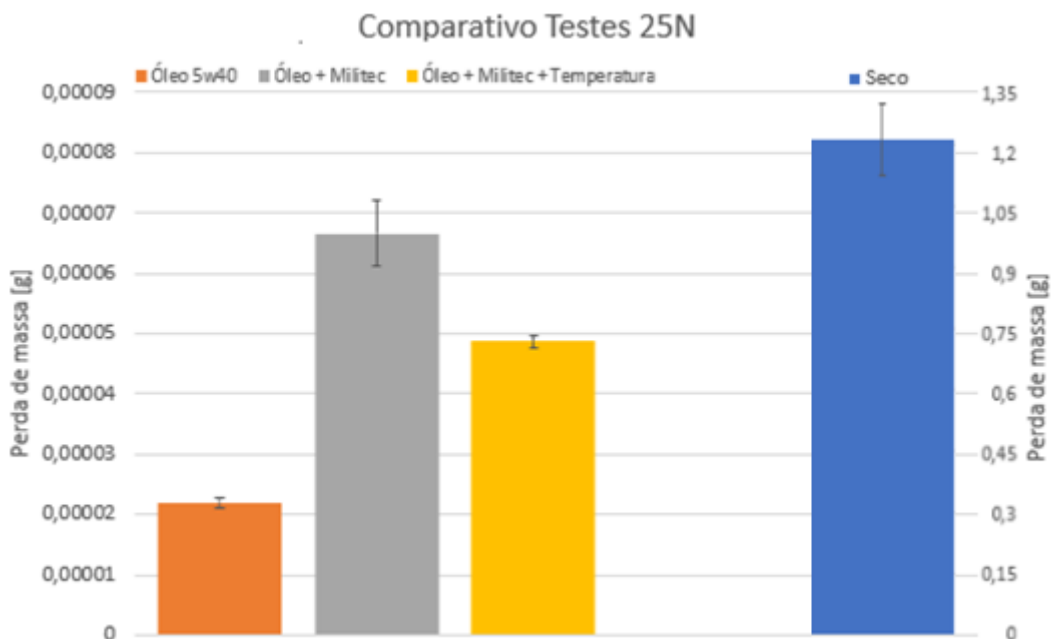


Figura 48 - Comparativo da massa perdida nos testes de 25N

A tabela 6 e o gráfico mostrado na figura 49 mostram os valores da área e da pressão de contato para o ensaio realizado com carga de 25N e lubrificado com óleo 5w40. Com o auxílio da tabela, é possível identificar que o momento em que a pressão de contato entre as superfícies torna-se menor que 50MPa e o regime de lubrificação passa do elastohidrodinâmico para o hidrodinâmico ocorre entre os segundos 150 e 300.

Tabela 6. – Estimativa da Pressão de contato para testes lubrificadas com óleo 5w40 e carga 25N.

Tempo [s]	Área de contato [ $mm^2$ ]	25N [MPa]
0	0,001	21000
1	0,002	10500
2,5	0,005	5200
5	0,01	2500
10	0,02	1300
20	0,04	650
50	0,08	300
75	0,16	150
150	0,31	80
300	0,62	40
600	1,24	20
1200	2,48	10

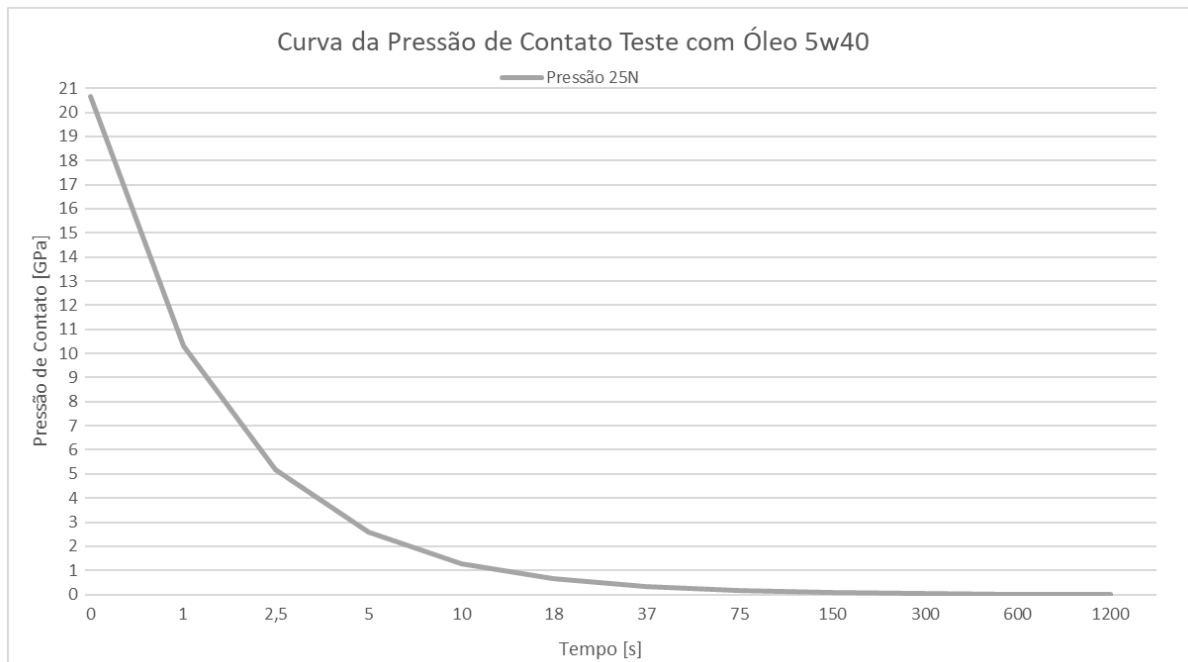


Figura 49 - Curva da Pressão de contato para o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga 25N

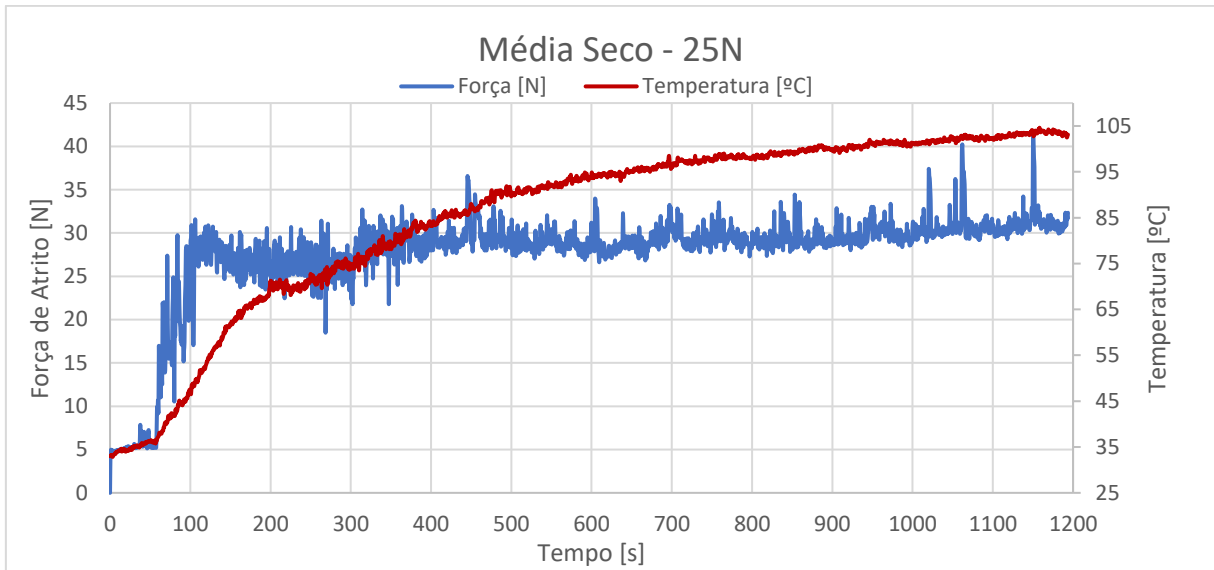
#### 4.3.2. Teste 25N a Seco

O ensaio mais severo realizado neste trabalho foi o teste não lubrificado com carga de 25N. Como o esperado, em valores absolutos, foi o ensaio que apresentou o maior volume de material perdido, maior força de atrito e atingiu as maiores temperaturas de ensaio. O gráfico com as informações sobre a força de atrito e a temperatura para o ensaio a seco com 25N podem ser observados na figura 50.

*Força de Atrito:* A exemplo dos demais ensaios de desgaste a seco, no início do teste, na região de *running*, a força de atrito é controlada pela camada de óxido, que funciona como um lubrificante sólido até o segundo 50. A partir disso, o sistema passa a sofrer um regime de desgaste severo, atingindo sua estabilidade em valores próximos de 30 N.

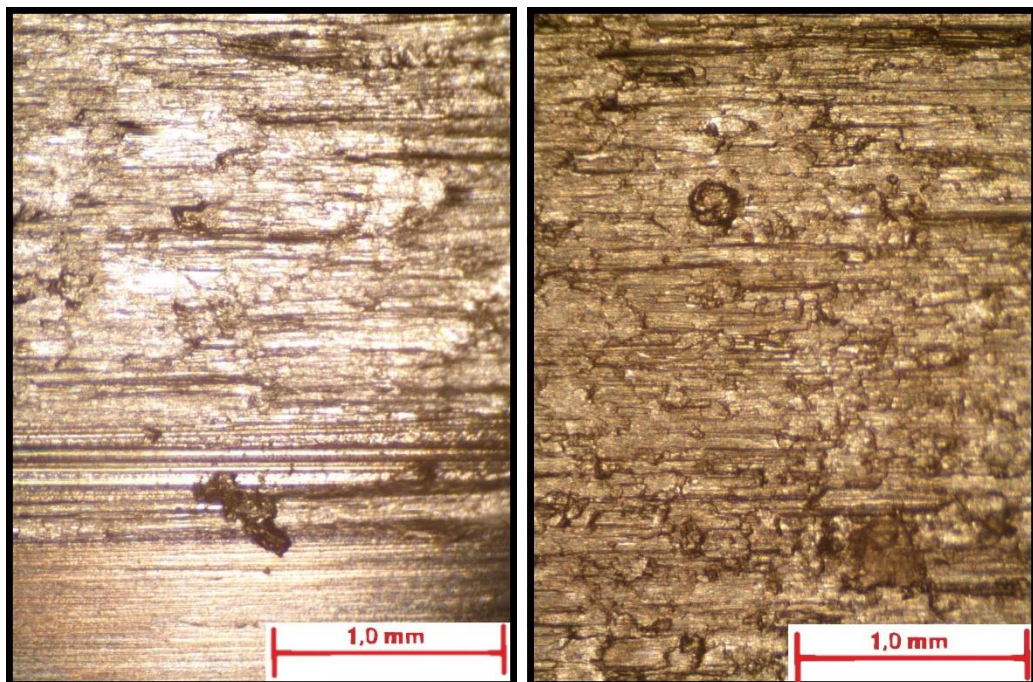
*Temperatura:* A temperatura aumenta rapidamente na região de *running* e depois tende a se estabilizar, no decorrer do ensaio, até alcançar valores próximos de 105 °C.





**Figura 50 - Variação de atrito e temperatura teste seco - 25N**

*Análises das Superfícies Desgastadas:* As superfícies desgastadas do disco e do pino podem ser observadas na figura 51 (disco à esquerda, pino à direita) e apresentam um severo dano superficial com características típicas de mecanismos de desgaste adesivo. Nota-se uma superfície bastante rugosa e com marcas de desgaste adesivo e deformação plástica. A presença de material transferido e desgastado também pode ser observada



**Figura 51 – Disco e pino após ensaio a seco - 25N**

### 4.3.3. Teste 25N Lubrificado com óleo 5W40

*Força de atrito:* No ensaio lubrificado com óleo e carga de 25N observou-se que, após o período de *running*, a força de atrito tende a se estabilizar, em valores próximos de 2,25 N, até o final do ensaio, como mostrado na figura 52. Os picos de força de atrito, observados na figura, podem ser explicados em função dos *debris* que foram removidos e que, pela dinâmica do teste, voltam à região de contato provocando um maior travamento entre as superfícies e, também, efeitos abrasivos. Uma vez que estes detritos são expulsos do contato, a força de atrito volta ao patamar de estabilização.

*Temperatura:* A temperatura apresenta um comportamento uniformemente crescente ao longo do ensaio. Começando nos 31 °C, da temperatura ambiente e terminando com um valor próximo de 37 °C.

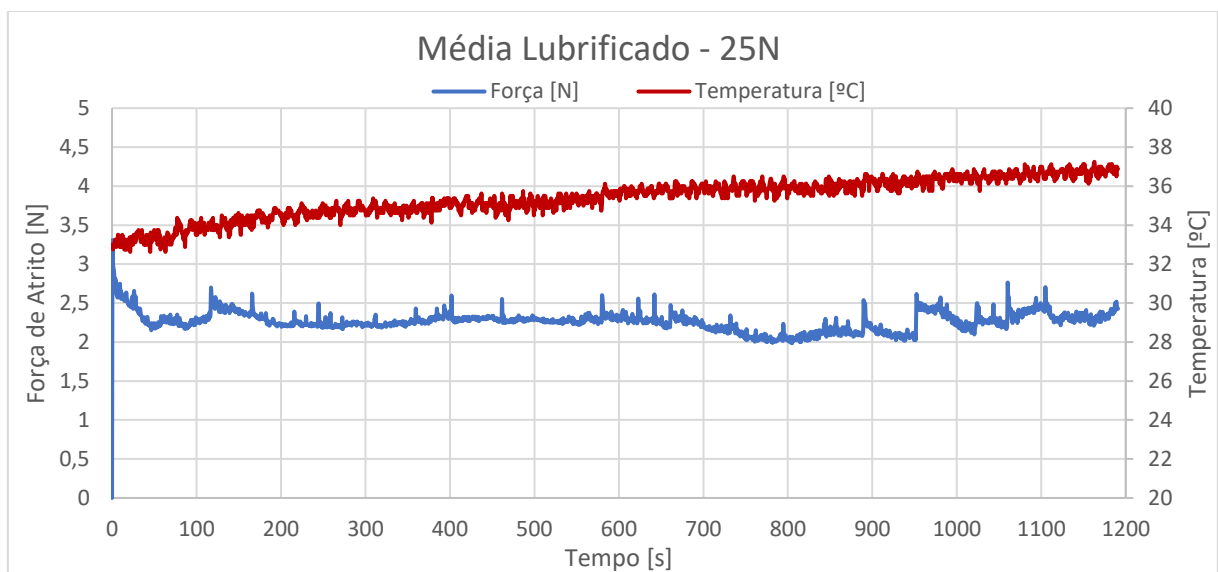


Figura 52 - Variação de atrito e temperatura teste 5w40 - 25N

*Análises das Superfícies Desgastadas:* Ao observar as superfícies de contato após a realização do ensaio, nota-se a presença de alguns sulcos tanto no disco quanto no pino. Na superfície do disco não é possível observar com clareza mecanismos de deformação plástica severa ou desgaste adesivo. Nota-se, no centro da trilha uma protuberância, formada por mecanismos de deformação plástica, e ao lado dela sulcos bem definidos, desenvolvidos pela ação de esfregamento com o pino. Ao se analisar o pino, percebe-se que sua superfície desgastada apresenta marcas

com formato invertido as observadas no disco, onde as protuberâncias presentes no pino coincidem com os sulcos observados na superfície do disco.

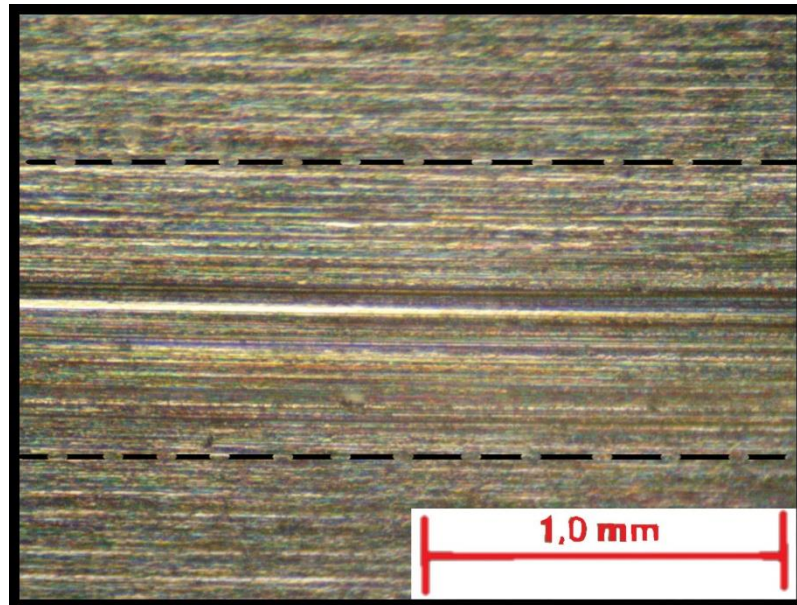


Figura 53 - Disco após ensaio com óleo 5w40 - 25N

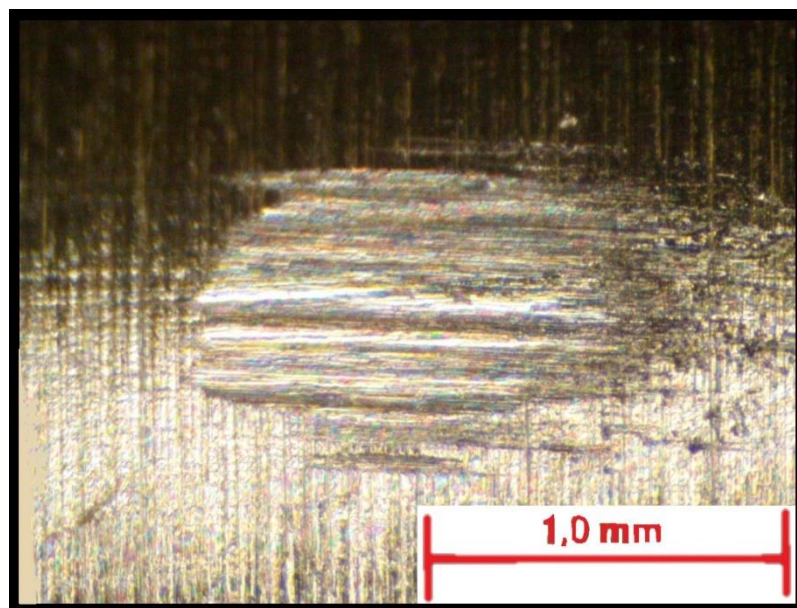


Figura 54 - Pino após ensaio com óleo 5w40 - 25N

#### 4.3.4. Teste 25N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1

*Força de Atrito:* Na figura 55 nota-se que a força de atrito apresenta uma instabilidade ao longo de todo o teste, mas sempre se aproximando de um valor médio de 2 N. Quando comparada com a curva do teste realizado apenas com óleo 5W40,

nota-se que nesta condição, com o uso do aditivo Millites-1, os valores de força de atrito sofreram maior instabilidade; apesar, de em média, ter alcançado um valor um pouco inferior.

*Temperatura:* Quanto a curva da temperatura, esta apresentou um constante e gradual aumento durante toda a realização do ensaio. O uso do aditivo Millitec-1, não interferiu na variação de temperatura durante o ensaio, nota-se que, o formato da curva e os valores foram muito semelhantes àqueles observados no ensaio apenas com óleo; com máxima próxima de 38°C e mínima ambiente de 33°C.

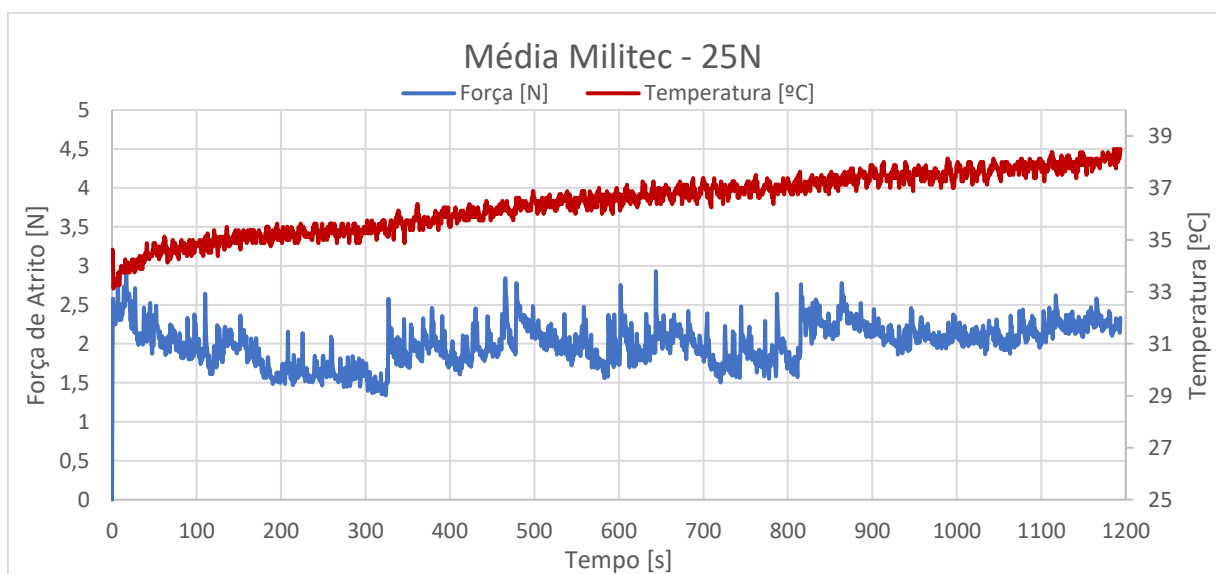


Figura 55 - Variação de atrito e temperatura teste Militec - 25N

*Análises das Superfícies Desgastadas:* Nas figuras 56 e 57 é possível perceber as superfícies desgastadas do disco e pino após a realização do ensaio. No disco, de nota-se um desgaste por deslizamento com marcas de deformação plástica e a presença de um sulco profundo. Nas bordas do sulco mais acentuado, observa-se uma região onde foi formada uma espécie de serrilhado nas paredes, indicando que a deformação plástica sucessiva provocou a formação de trincas no material. No pino, observa-se uma superfície, com dano superficial homogêneo e com marcas de deslizamento. Nas regiões de saída do contato, entre o disco e o pino, como nas regiões laterais, podem ser observadas sinais de deformação plástica. As marcas de



deformação plástica nas laterais coincidem com as marcas de sulcos vistos na superfície do disco

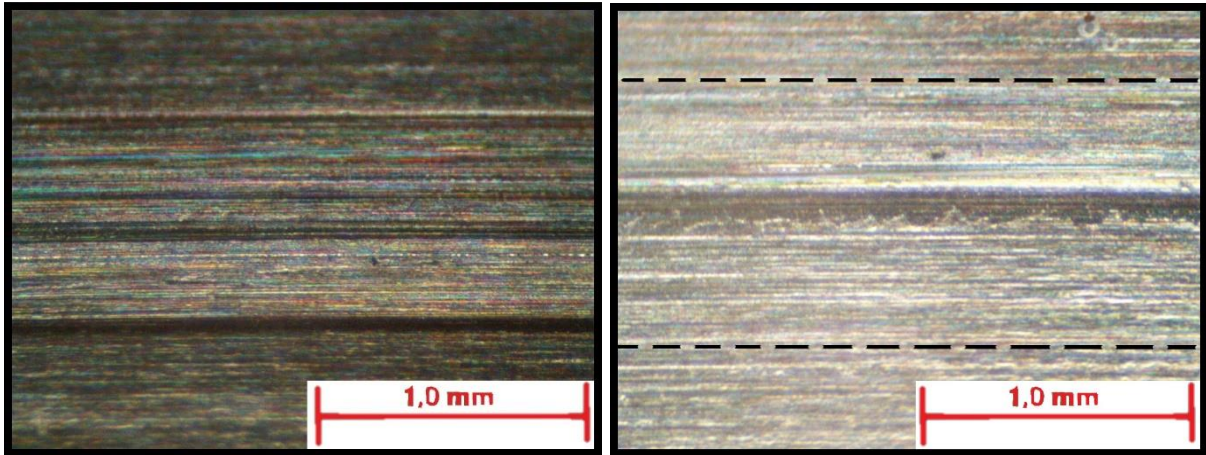


Figura 56 - Disco após ensaio Militec - 25N

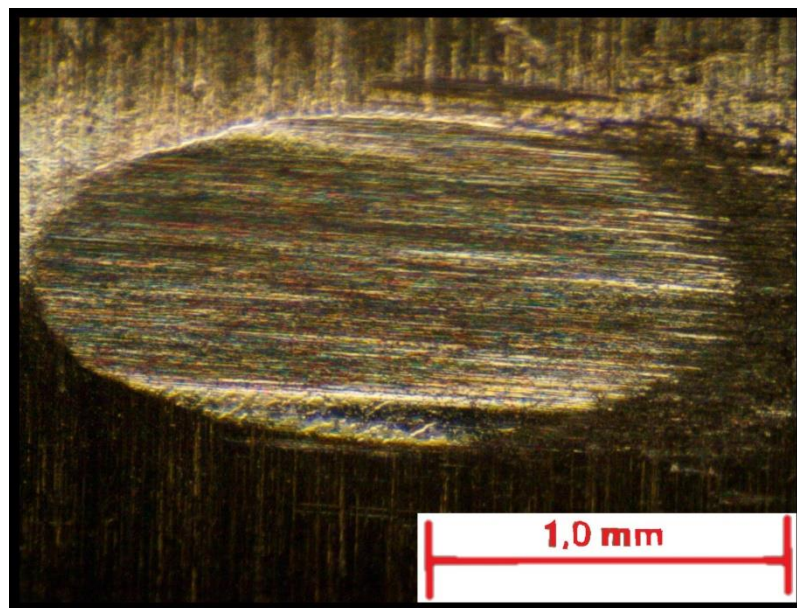


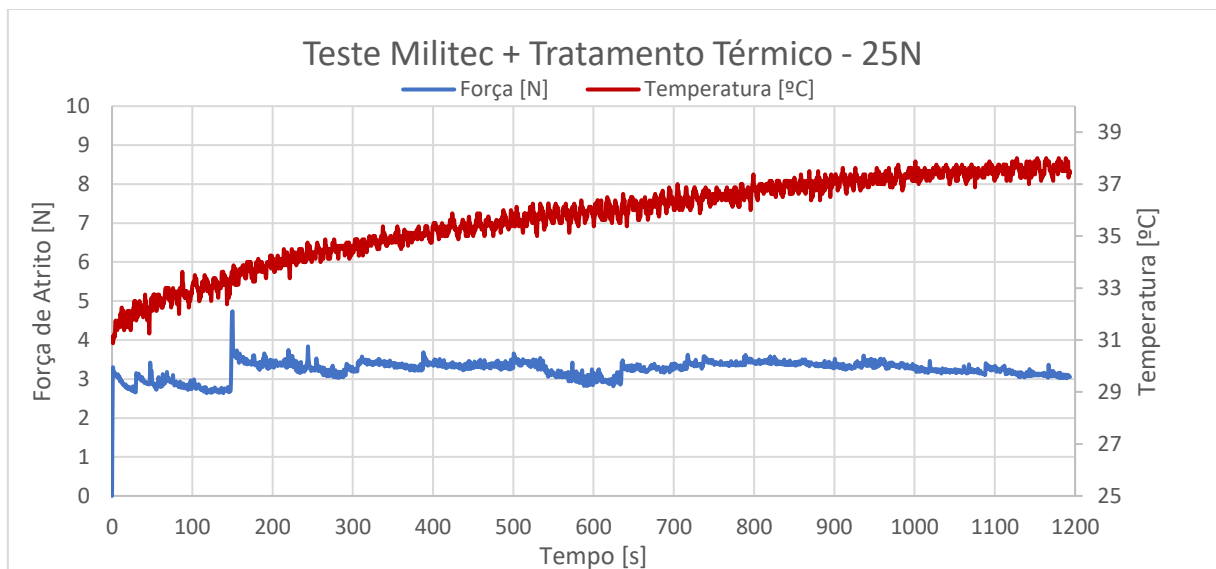
Figura 57 - Pino após ensaio Militec - 25N

#### 4.3.5. Teste 25N Lubrificado com óleo 5W40 + aditivo Militec-1 + Tratamento Térmico

*Força de Atrito:* A força de atrito registrada neste ensaio, alcançou sua estabilização depois de 150 s de teste, como pode ser visto na figura 58. A estabilização, após o *running*, ocorreu em valores próximo de 3,5 N. Estes valores, outra vez, sugerem que o tratamento térmico superficial, realizado visando melhorar as características do deslizamento, contrariamente, levaram a piores resultados. Quando comparados com os valores de força de atrito, obtidos com o ensaio usando

a mistura óleo + Millitec-1, nota-se que após tratamento térmico, houve um aumento de aproximadamente 75% da força de atrito, passando de 2 N para 3,5 N.

*Temperatura:* Na figura 58, nota-se um constante e gradual aumento da temperatura durante toda a realização do ensaio. O formato da curva e os valores foram muito semelhantes àqueles observados no ensaio apenas com óleo e/ou com a mistura com Millitec-1, alcançando-se máximos próximos de 38°C e mínima ambiente de 33°C. O tratamento térmico superficial realizado não influenciou nos resultados de temperatura medidos; apesar de terem sido desenvolvidas maiores forças de atrito no sistema.



**Figura 58 - Variação de atrito e temperatura teste Militec tratado termicamente - 25N**

*Análises das Superfícies Desgastadas:* O ensaio realizado com Militec após tratamento térmico superficial resultou em uma superfície mais danificada quando comparada com os outros ensaios lubrificados e com carga de 25N. No disco, além de maior número de sulcos e mais profundos, é possível notar severa deformação plástica nas bordas da trilha. A superfície do pino também apresenta marcas de severa deformação plástica e alisamento da rugosidade.

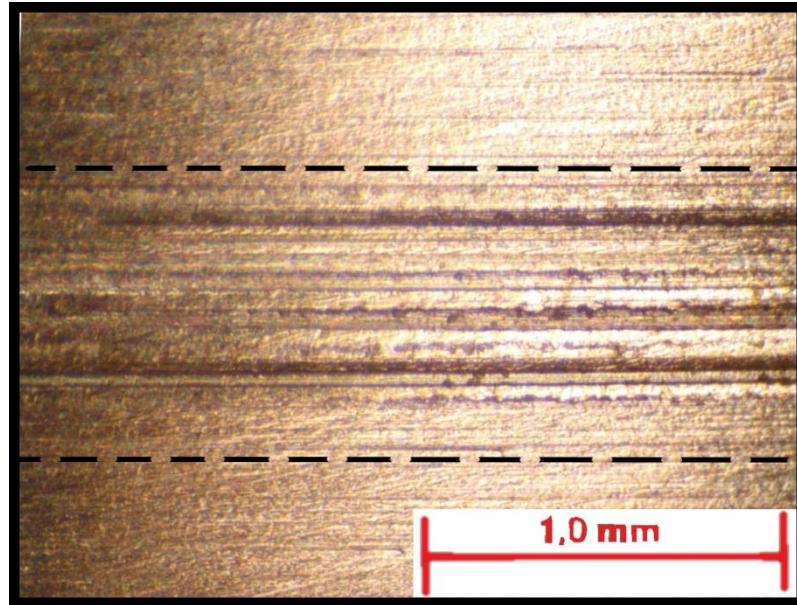


Figura 59 - Disco após ensaio com óleo e Militec tratado termicamente - 25N

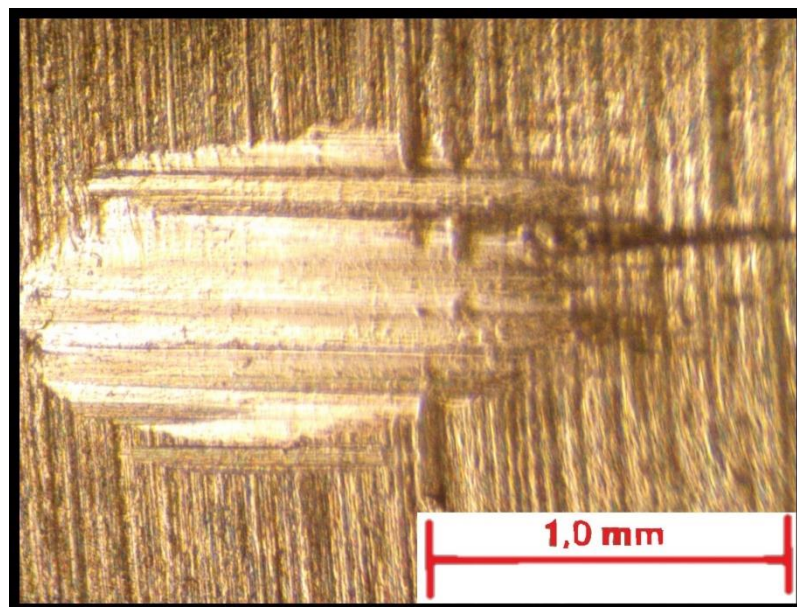
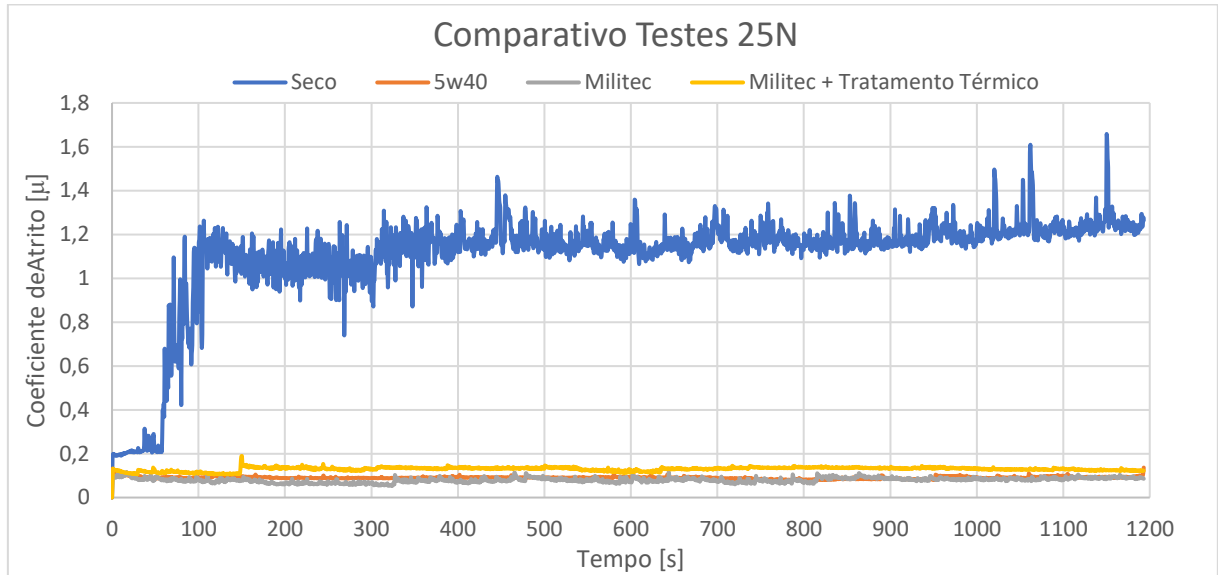


Figura 60 - Pino após ensaio com óleo e Militec tratado termicamente - 25N

#### 4.3.6. Comparativo do coeficiente de atrito para os Testes com carga 25N

A exemplo dos ensaios com as cargas de 5N e 10N, o ensaio a seco inicia-se com uma zona de atrito e desgaste controlados pela camada de óxido presente nas superfícies dos corpos ensaiado. Neste momento, o coeficiente de atrito do ensaio a seco fica próximo ao coeficiente dos ensaios lubrificados. O tratamento térmico superficial realizado com óleo 5w40 e Militec apresentou resultados novamente negativos e o consequente aumento do coeficiente de atrito no ensaio. Os coeficientes

de atrito para o ensaio com óleo e com óleo com Militec-1 apresentaram valores bem similares.



**Figura 61 - Comparativo dos testes com carga 25N**



## 5 COMENTÁRIOS FINAIS

A atual seção do trabalho destina-se a apresentar de forma comparativa os resultados dos ensaios realizados.

### 5.1. Desgaste – Perda de Massa

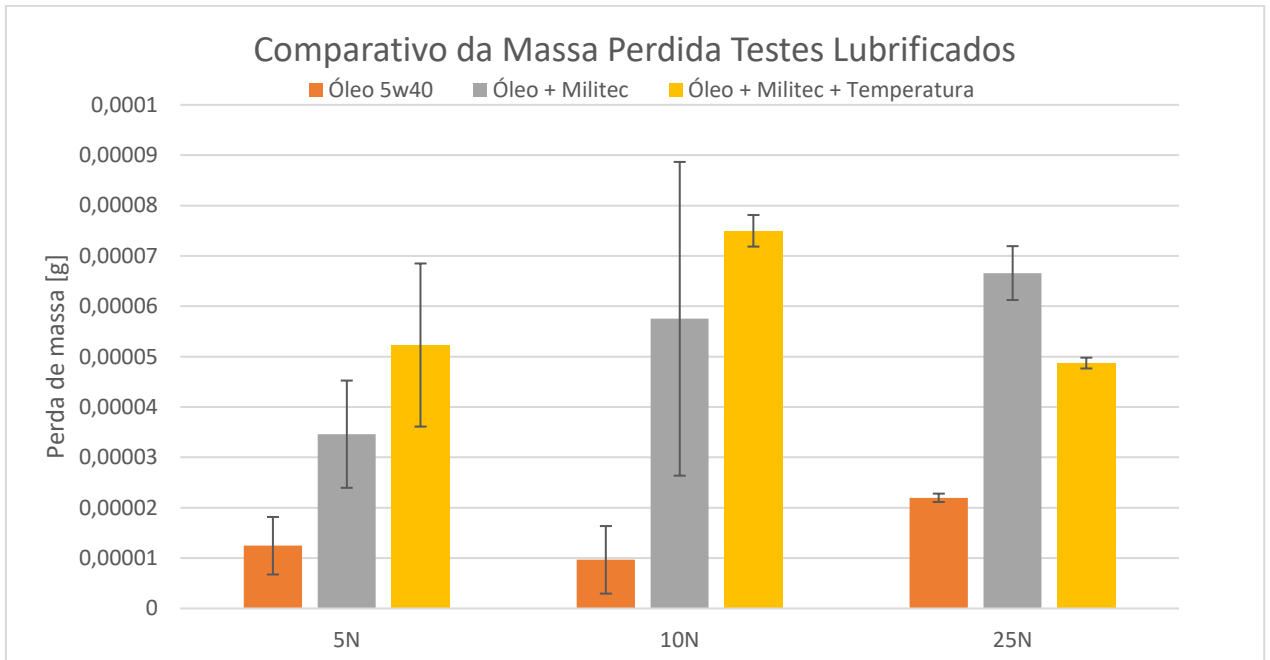
Na tabela 7 são apresentados os valores de desgaste (perda de massa) medidos e calculados e função do tipo de ensaio realizado e da carga aplicada.

Tabela 7. – Propriedades obtidas após processamento.

	Teste 5N [ $10^{-5}$ g]	Teste 10N [ $10^{-5}$ g]	Teste 25N [ $10^{-5}$ g]
Seco	20.000 ± 3.000	65.000 ± 3.000	120.000 ± 10.000
Óleo 5w40	1,2 ± 0,5	1 ± 0,5	2 ± 0,1
Óleo 5w40 e militec-1	3,5 ± 1,0	6 ± 3	6,5 ± 0,5
Óleo 5w40 e militec-1 aquecidos	5,0 ± 1,5	7,5 ± 0,5	5 ± 0,1

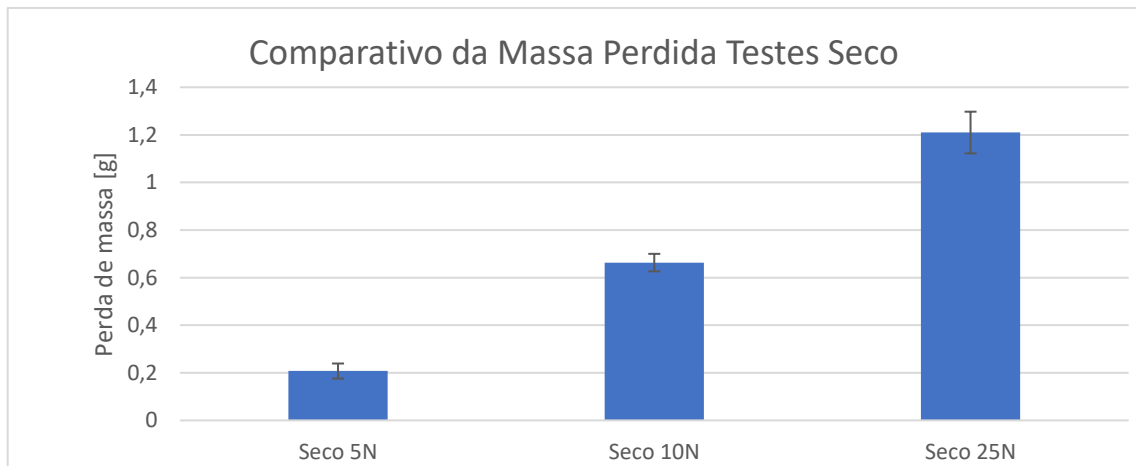
Fonte: autor

Nas figuras 62 e 63 são apresentados, de forma gráfica e comparativa, a massa perdida em cada ensaio. Na figura 62, nota-se que, em geral e dependendo do valor de carga utilizado, o uso do aditivo Millitec-1 provocou um desgaste 3 a 8 vezes maior que o desgaste observado com os ensaios realizados somente com óleo 5W40. Inclusive, verificou-se que o tratamento térmico realizado foi mais prejudicial, ainda, do que a simples adição de aditivo no óleo.



**Figura 62 - Comparativo da Massa Perdida para Testes Lubrificados**

O desgaste medido nos ensaios a seco, como mostrado na figura 63, apresenta uma tendência de aumento proporcional a carga utilizada.

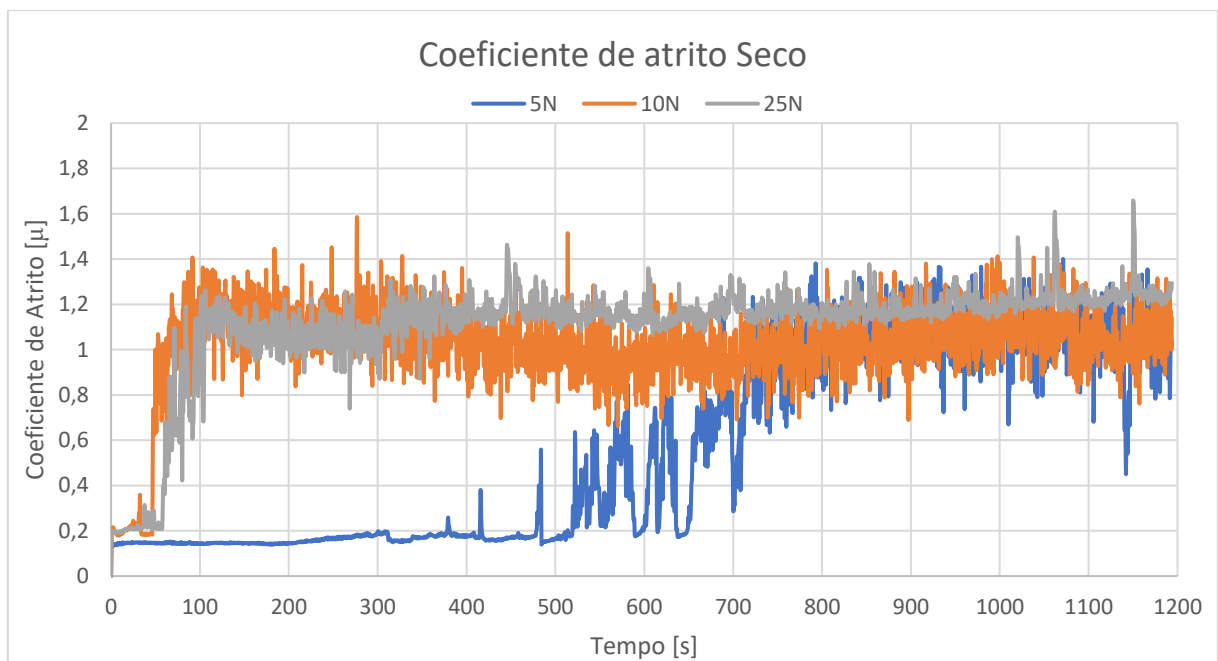


**Figura 63 - Comparativo da Massa Perdida para Testes Secos**

Ao comparar os valores, de perda de massa, obtidos com os ensaios a seco e lubrificados, são nítidos os benefícios que a lubrificação proporciona aos metais submetidos a desgaste. Nota-se que o uso de lubrificantes permite uma diminuição da perda de massa de 5.000 a 25.000 vezes

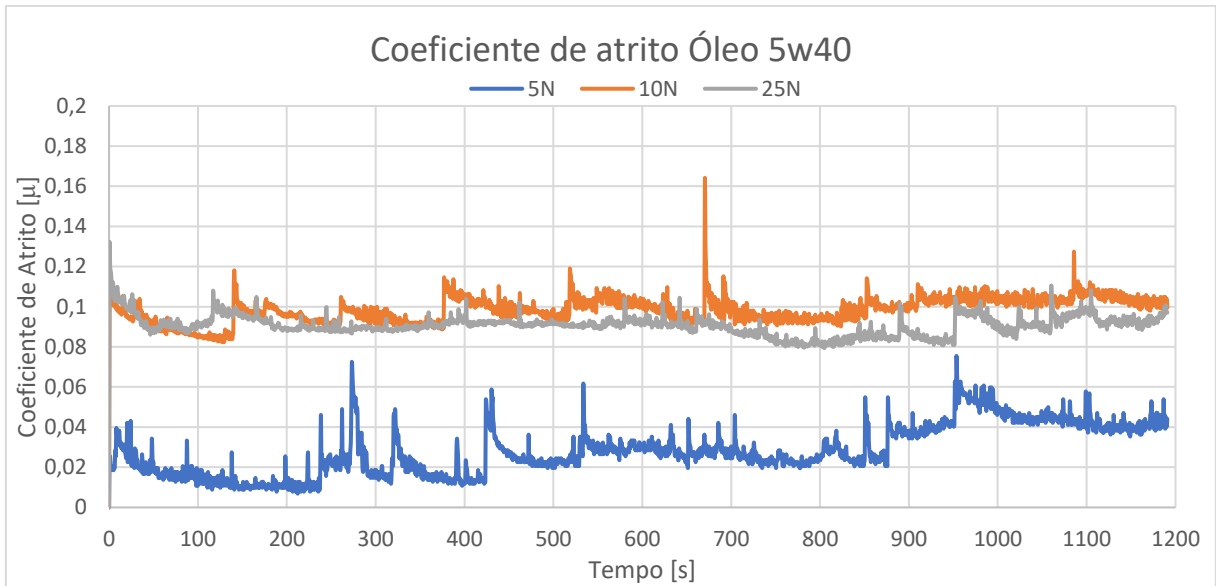
## 5.2. Coeficiente de atrito de Atrito

Ao observar a figura 64 que representa o comparativo do coeficiente de atrito entre as três cargas de teste e sem lubrificação é possível perceber semelhanças entre os ensaios. Nos segundos iniciais, os ensaios são marcados por camadas de óxido que funcionam como lubrificante e reduzem os coeficientes de atrito. Após a quebra da camada oxidativa, é possível observar um regime de transição para o desgaste severo. Nesta região o coeficiente de atrito oscila bastante. Em um terceiro momento, após a transição, ocorre, nos três ensaios, uma estabilização dos valores do coeficiente de atrito entre 0,8 e 1,2.



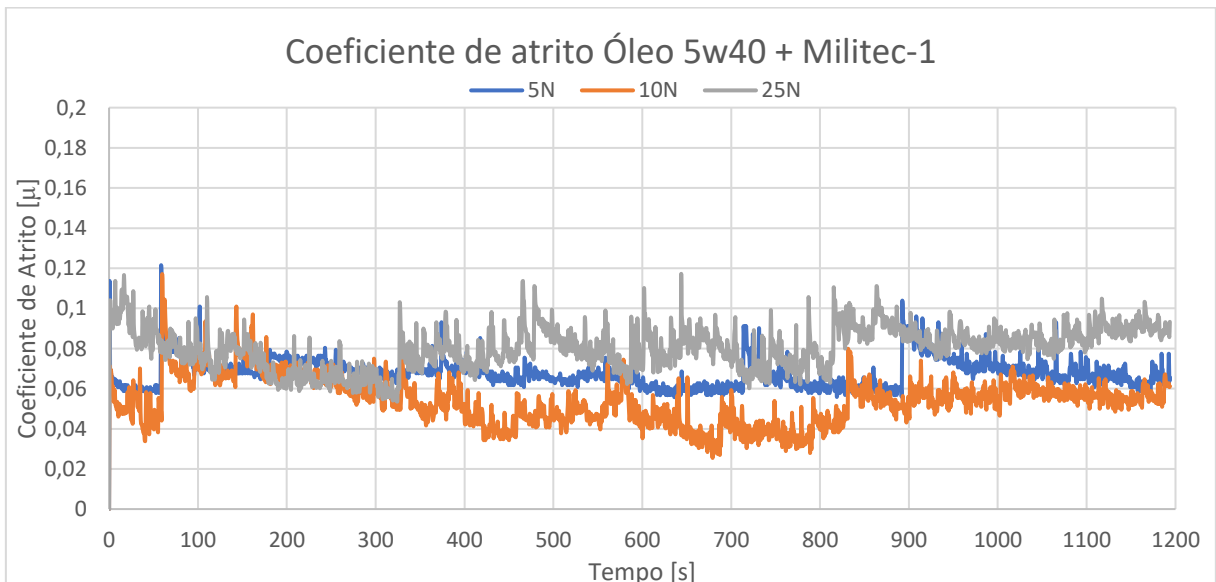
**Figura 64 - Comparativo do coeficiente de atrito ensaio à seco**

Ao analisar a figura 65 que mostra os coeficientes de atrito das três cargas ensaiadas com lubrificação de óleo 5w40 e comparar as curvas, observa-se um coeficiente de atrito bem inferior para o ensaio com 5N, sendo aproximadamente 5x menor que os demais testes. Nota-se também uma baixa variação dos valores nas três curvas.



**Figura 65 - Comparativo do coeficiente de atrito ensaio lubrificado com óleo 5w40**

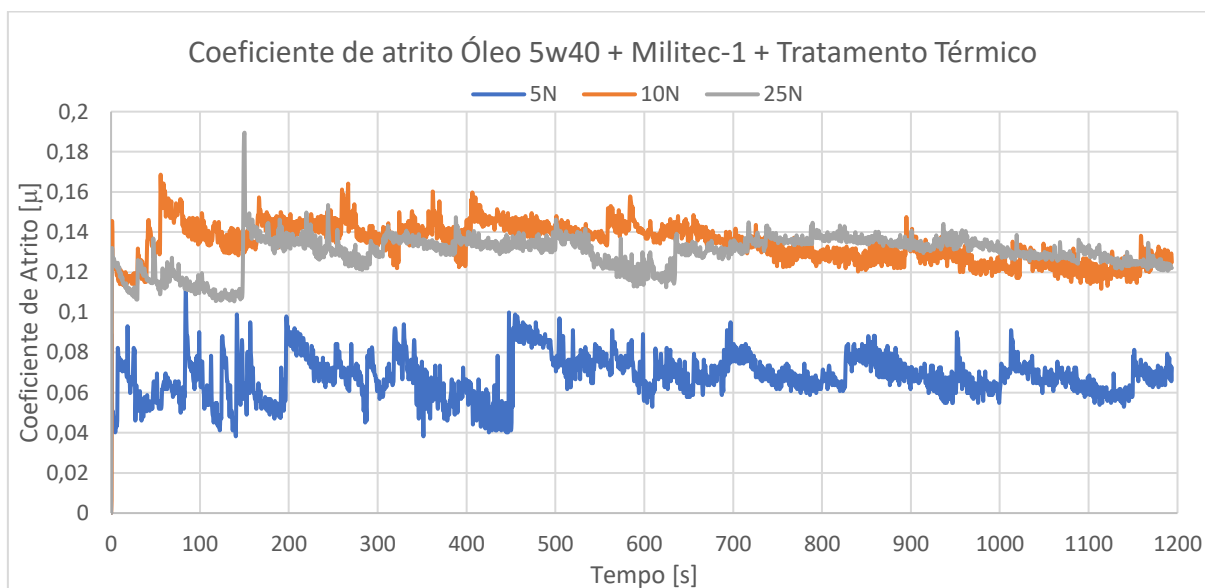
Os dois testes realizados com o condicionador de metais Militec-1, representados nas figuras 66 e 67, apresentaram uma maior oscilação dos valores se comparado aos ensaios realizados apenas com óleo 5w40. A variação do coeficiente de atrito no ensaio com Militec-1 permaneceu no intervalo de 0,04 e 0,1 para as três cargas.



**Figura 66 - Comparativo do coeficiente de atrito ensaio lubrificado com óleo 5w40 e Militec-1**

Observa-se que nas curvas que representam os ensaios com condicionador de metais após o tratamento térmico superficial existe uma região inicial – até o segundo 150, aproximadamente – no qual o atrito é relativamente menor que no restante do

ensaio. Esse fato pode ter relação com alguma reação química que tenha ocorrido na superfície do disco e contribuiu para a diminuição do atrito. A superfície aparentemente craquelada mostrada nas seções anteriores corroboram com a suposição de que alguma reação química tenha ocorrido na superfície dos corpos de prova tratados termicamente com Militec-1.



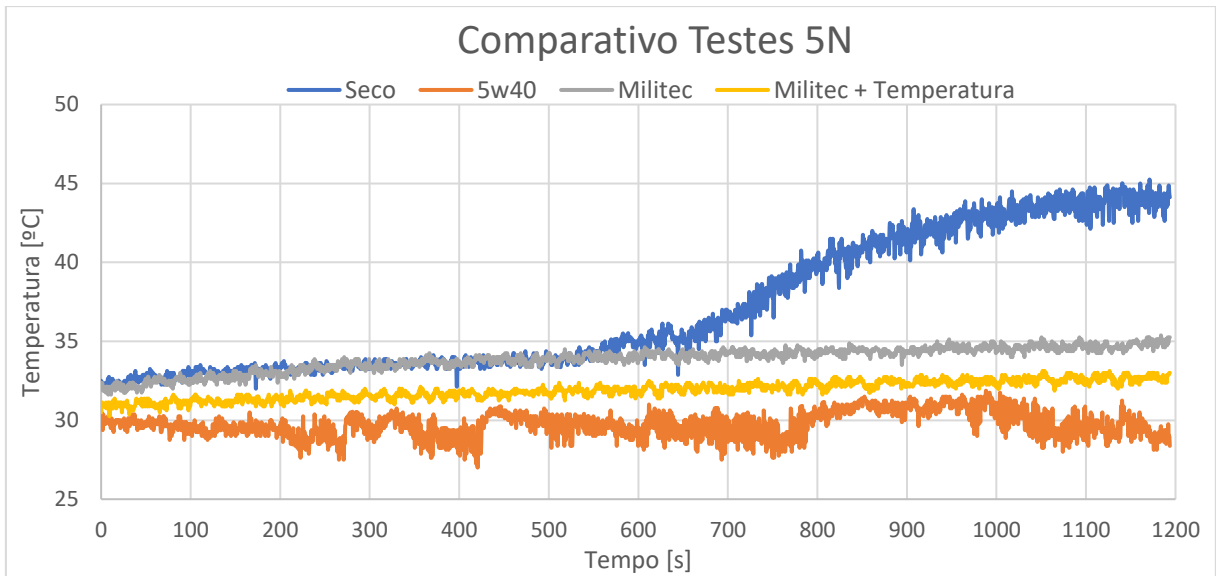
**Figura 67 - Comparativo do coeficiente de atrito ensaio lubrificadas com óleo 5w40, Militec-1 e tratado termicamente**

### 5.3. Temperatura de Ensaio

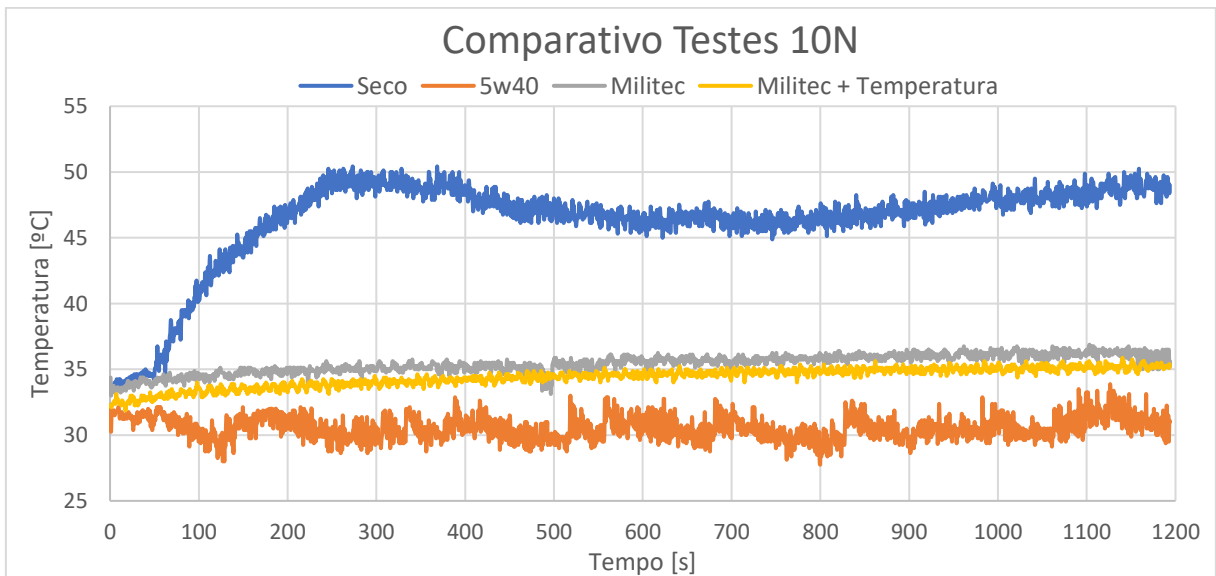
As temperaturas de ensaio apresentaram comportamentos semelhantes para todos os testes. Nos gráficos mostrados nas figuras 68, 69 e 70, é possível observar que as temperaturas dos ensaios a seco apresentam um momento inicial (running), que coincide com o desgaste da camada de óxido, de discreto incremento em seu valor. Logo em seguida, vem um aumento acentuado a partir do início do contato direto metal-metal.

Para os ensaios lubrificadas é possível observar que o condicionador de metais utilizado na realização do trabalho diminuiu a capacidade dissipativa de calor do sistema. Desta forma, o incremento de temperatura durante o ensaio foi maior nos testes que utilizaram o Militec do que nos testes realizados apenas com o óleo sintético 5w40 SN.

O tratamento térmico superficial provoca, em geral, um aumento na temperatura do par submetido a desgaste por deslizamento; sendo que ele é mais nocivo quanto menor for a carga normal utilizada. Nos ensaios com carga normal de 25 N, as temperaturas registradas são, rigorosamente, iguais, independentemente do tipo de lubrificação.



**Figura 68 - Comparativo dos testes com carga 5N**



**Figura 69 - Comparativo dos testes com carga 10N**

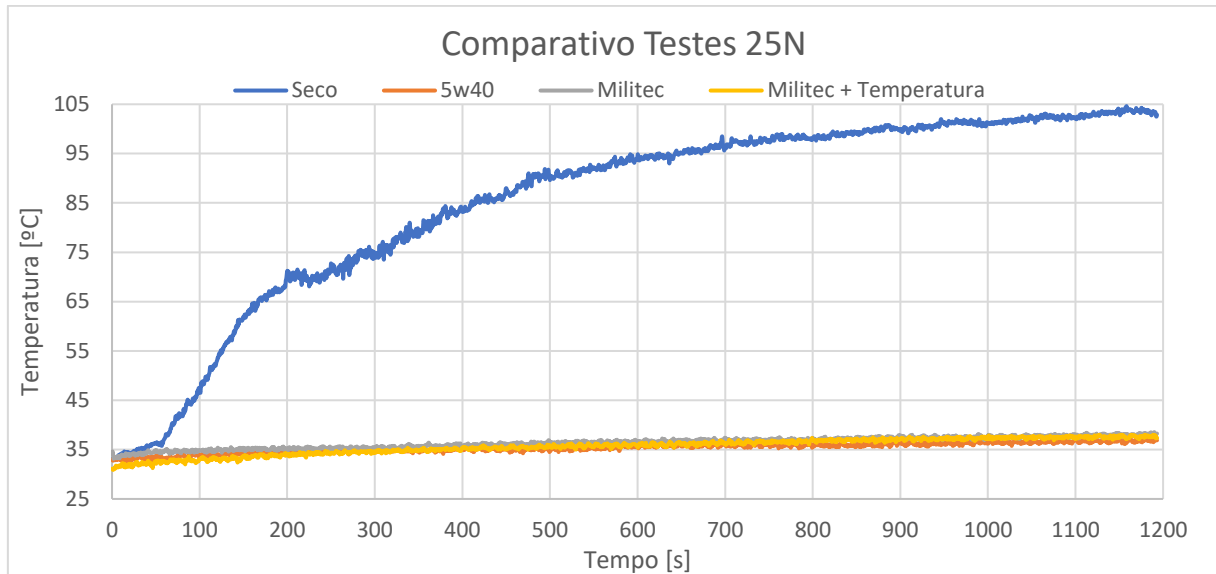


Figura 70 - Comparativo dos testes com carga 25N


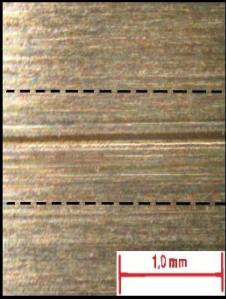
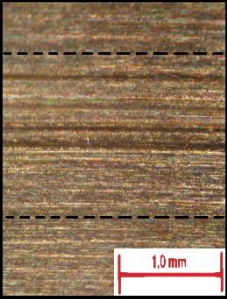
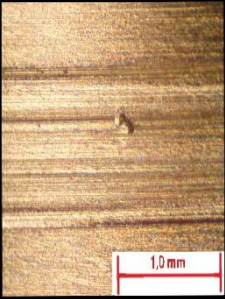
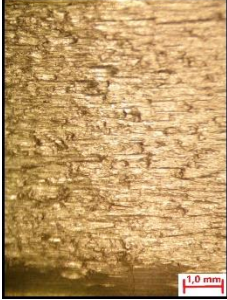
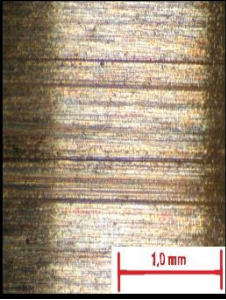
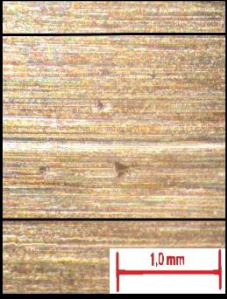
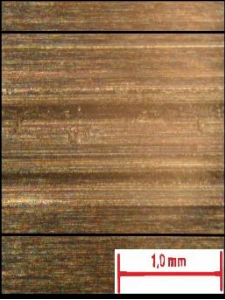
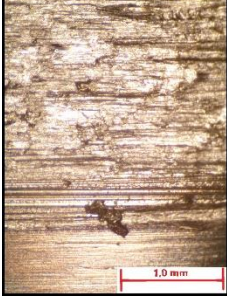
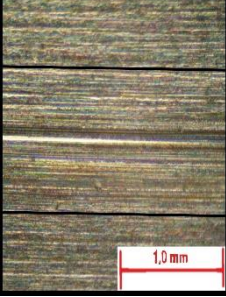
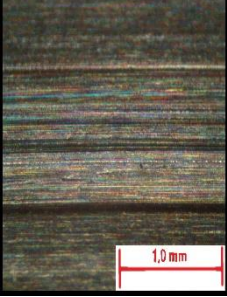
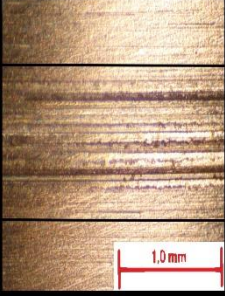
#### 5.4. Dano superficial

A tabela 8 representa a comparação direta das superfícies dos ensaios realizados. É nítida a melhora na condição superficial do disco ao utilizar um lubrificante ao invés de manter o contato a seco. Os desgastes severos apresentados para os testes a seco indicam uma forte degradação superficial e que é acentuada ao elevar as cargas normais de contato.

Observa-se que em todas as superfícies onde foram utilizados o óleo com o Militec e feito o tratamento térmico superficial, o disco apresentou uma trilha com maior número de sulcos, mais profundos e mais largos. Notou-se também que, após o tratamento térmico, a superfície dos discos testados apresentava uma aparência mais craquelada.



Tabela 8 – Comparativo da superfície do disco para todas as condições de ensaios

	Seco	Lubrificado	Militec	Militec e Temperatura
5N				
10N				
25N				

Fonte: Autor

## 6 CONCLUSÕES

Os ensaios realizados e o posterior tratamento dos dados e imagens gerados se mostrou condizente com os trabalhos semelhantes e já produzidos no laboratório tribológico da FGA / UnB. De tal forma que ratificam os ensaios realizados neste trabalho e em trabalhos passados.

Com a realização e análise dos ensaios de desgaste realizados neste trabalho conclui-se que:

- A condição de ensaio a seco é a mais prejudicial para as superfícies do disco e do pino.
- A temperatura de ensaio medida no pino de teste é diretamente afetada com o aumento ou diminuição da força de atrito.
- O condicionador de metais Millitec-1 utilizado, na realização do trabalho, não promoveu a redução da força de atrito durante os ensaios. Para os ensaios, após tratamento térmico superficial, em todas as cargas, os valores de força de atrito foram maiores que os valores encontrados quando a lubrificação foi feita apenas com óleo 5w40.
- Com relação ao desgaste, registrado por meio da massa perdida, verificou-se que, para qualquer condição de carregamento, a condição que menos perdeu material foi quando se usou a lubrificação apenas com o óleo 5w40. O uso do Militec-1 mostrou-se bastante prejudicial neste aspecto.
- A dissipação de calor do sistema foi afetada com o uso do Militec-1, sendo o seu uso prejudicial para o controle do calor gerado.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

- Estudar como age o aditivo quimicamente na superfície e entender as consequências disso para o material
- Estudo da influência da camada oxidativa no desgaste e atrito para aços de médio teor de carbono.
- Estudar como a variação da velocidade tangencial pode influenciar no desgaste
- Estudar a condutividade térmica para determinar o motivo da piora da dissipação do calor durante os ensaios.
- Estudar os detritos depositados no óleo após os ensaios.

## BIBLIOGRAFIA

BALDO, Lucas Ferreira. Estudo sobre Mecânica do Contato no Desgaste por Deslizamento Alternado em um Contato Cilindro Plano. 2019. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

BAYER, R. G. Mechanical Wear Fundamentals and Testing. 2th Edition, Revised and Expanded. Armcel, Dekker, Inc, 2004.

BHUSHAN, B. Fundamentals of tribology and bridging the gap between the macro- and micro/nanoscales. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute. P.964, 2001

BORTOLETO, Eleir Mundim. Comportamento tribo-mecânico e desgaste adesivo de materiais em nanoescala: análises por dinâmica molecular e mecânica do contínuo. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

CALLISTER, W. D. RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais. 10th Edition, LTC Ltda, 2020.

CIDADE, M.J.A. Determinação de metais em óleo lubrificante empregando as técnicas ring oven e micro fluorescência de raio X. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas, São Paulo, 2016.

CLEMENTE, C. M. CUEVA, E. G. Influence of lubricant on sliding wear of AISI 304. Faculdade Gama - FGA, Universidade de Brasília - UnB, 2017.

HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of engineering materials. 1. Edition. Elsevier Limited, 1992.

JOST, H. P. Tribology - origin and future. In: Wear. [S.l.: s.n.], 1990. v. 136, n. 1, p. 1–17.

KATO, K. Adachi, K. “Wear Mechanisms”, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22, 2001.

LEMOS, Hugo Alves. Ensaios em sistemas lubrificados utilizando aço inox 304. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Automotiva) - Universidade de Brasília, [S. l.], 2019.

MARU, Marcia Marie. Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003

PERSSON, B. Theory of friction and boundary lubrication. Physical Review B, American Physical Society, v. 48, n. 24, p. 18140–18158, 1993

RADI et al. “Tribologia, Conceitos e Aplicações”, 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2010.

RIBEIRO, R. Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista - Unesp, 2004.

SHIGLEY, J. E.; Mischke, C. R.; Budynas, R. G.: Projeto de Engenharia Mecânica. 7ª Edição. Bookman. 2005.

STACHOWIAK, G. BATCHELOR, A. W. Engineering Tribology. 3rd Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.