

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

PAULO RICARDO BORGMANN SEMBARSKI

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE LUBRIFICAÇÃO NO DESGASTE POR
DESLIZAMENTO DE METAIS**

JARAGUÁ DO SUL, JUNHO DE 2018.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

PAULO RICARDO BORGMANN SEMBARSKI

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE LUBRIFICAÇÃO NO DESGASTE POR
DESLIZAMENTO DE METAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Professor Orientador: Joel Stryhalski, Dr.

JARAGUÁ DO SUL, JUNHO DE 2018.

AGRADECIMENTOS

É necessário agradecer às pessoas, equipes de laboratórios e empresas envolvidas nesse trabalho, os quais com a parceria nas diversas etapas o tornaram possível.

Agradeço primeiramente aos meus familiares, por todo incentivo e amor.

Agradeço ao meu orientador Joel Stryhalski, Dr., por toda paciência dedicação. Aos professores Gil M. P. Chagas, Jean Senise Pimenta, Aline Moraes e Salezio Francisco Momm, pelo aprendizado e incentivo na realização deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório Gustavo, Marcelo e Robson pelo auxílio. A todos os bolsistas e estagiários dos laboratórios de ensaio de materiais, pela ajuda e dedicação.

Ao IFSC – Câmpus Jaraguá do Sul – Rau pela disponibilização dos equipamentos e laboratórios. A empresa Saito Engenharia e Tecnologia de Lubrificação pela doação do Condicionador de Metais Alfa-x, em especial ao Sr. Antônio T. Saito pela atenção e paciência.

Aos professores e a todos que contribuíram para a minha formação. Muito obrigado!

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do campus Rau, do IFSC

Sembarski, Paulo Ricardo Borgmann
INFLUÊNCIA DO TIPO DE LUBRIFICAÇÃO NO DESGASTE POR
DESLIZAMENTO DE METAIS/ Paulo Ricardo Borgmann
Sembarski; orientação de Joel Stryhalski.
Jaraguá do Sul, SC, 2018.
76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto
Federal de Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul – Rau.
Tecnologia em Fabricação Mecânica. Inclui Referências.

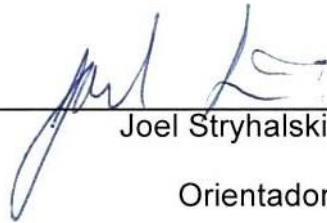
1. Ensaio de desgaste pino sobre disco. 2. Tribologia.
3. Desgaste. 4. Modelo de Archard I. Stryhalski, Joel.
- II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Título

PAULO RICARDO BORGMANN SEMBARSKI

INFLUÊNCIA DO TIPO DE LUBRIFICAÇÃO NO DESGASTE POR
DESLIZAMENTO DE METAIS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em tecnólogo em
Fabricação Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

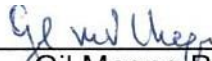
Jaraguá do Sul, 02 de julho de 2018.



Joel Stryhalski, Dr.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina Campus Jaraguá do Sul — Rau



Gil Magno Portal Chagas, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina Campus Jaraguá do Sul — Rau



Jean Senise Pimenta, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina Campus Jaraguá do Sul — Rau

“É preciso correr muito para ficar no mesmo lugar. Se você quer chegar a outro lugar, corra duas vezes mais” (Lewis Carroll).

RESUMO

Este trabalho é um estudo comparativo do desgaste por deslizamento de metais submetidos ao ensaio de deslizamento lubrificado e lubrificado com adição de condicionador de metais. O ensaio foi realizado em um tribômetro tipo pino sobre disco, utilizando esferas de aço SAE 52100 e discos de aço SAE 4320. Duas condições de estudo foram avaliadas: lubrificada com óleo SAE 5W30 e lubrificada com óleo SAE 5W30 com o condicionador de metais. Ambos os casos foram avaliados com cargas de 10 N e 20 N, comprimento de deslizamento de 1000 metros, a lubrificação foi aplicada com o auxílio de um conta-gotas. O condicionador de metais usado foi o Alfa-x da empresa Saito Tecnologia. A força tangencial de atrito e o desgaste foram comparados entre os materiais dos discos e das esferas sob diferentes condições, além dos cálculos do volume de material retirado.

Palavras chave: Ensaio de desgaste pino sobre disco; Tribologia; Desgaste; Modelo de Archard.

ABSTRACT

This work is a comparative study of the sliding wear of metals submitted to the lubricated and lubricated slip test with addition of metals conditioner. The assay was performed in a pin-on-disk type tribometer, using SAE 52100 steel balls and SAE 4320 steel discs. Two study conditions were evaluated: lubricated with SAE 5W30 oil and lubricated with SAE 5W30 oil with the metals conditioner. Both cases was be evaluated with loads of 10 N and 20 N, length of slip of 1000 meters, the lubrication was be applied with the aid of a dropper. The metals conditioner used was Alfa-x from Saito Technology Industries. The coefficient of friction and the wear were compared between the discs materials and of the balls under different conditions, in addition to the calculations of the volume of material removed.

Keywords: Pin-on-disk wear test; Tribology; Wear; Archard Model.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	OBJETIVOS	9
2.1.	Objetivo geral	9
2.2.	Objetivos específicos	9
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1.	Tribologia	10
3.1.1.	Atrito	10
3.1.2.	Desgaste	12
3.1.2.1.	Adesão	14
3.1.2.2.	Abrasão	14
3.1.2.3.	Fadiga superficial	15
3.1.3.	Processos de avaliação de desgaste	15
3.1.4.	Acabamento superficial	21
3.1.5.	Lubrificação	24
3.1.6.	regimes de lubrificação	25
3.1.7.	lubrificantes	27
3.1.8.	Propriedades dos lubrificantes	30
3.1.9.	Aditivos de lubrificante	33
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1.	Materiais	40
4.1.1.	Condicionador de metais alfa-x	40
4.1.2.	Lubrificante sae 5w30	41
4.1.3.	Aço sae 4320	41
4.1.4.	Aço SAE 52100	42
4.2.	Métodos	42
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49

5.1. rugosidade.....	49
5.2. força tangencial de atrito	51
5.2.1. Força tangencial de atrito baseado na carga.....	52
5.2.2. Força tangencial de atrito baseado na lubrificação.....	55
5.3. desgaste	58
5.3.1. Desgaste dos discos.....	61
5.3.2. Desgaste dos pinos	62
5.3.3. Desgaste em função do atrito.....	64
5.3.4. Coeficiente adimensional de desgaste	65
6. CONCLUSÕES	68
6.1. Sobre o efeito da adição do condicionador de metais.	68
6.2. Sobre o efeito da variação da carga.	69
6.3. Sobre os efeitos na geração de detritos.	70
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
8. REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICE A – FORÇA TANGENCIAL DE ATRITO	75

1. INTRODUÇÃO

A fricção, lubrificação e desgaste (FLD) afeta muitos aspectos da vida diária, desde o desgaste dos dentes de uma engrenagem até o projeto de alta velocidade para um ônibus espacial.

Quase todos encontramos um problema de FLD em nosso dia a dia, a solução para o problema é simples e óbvia - desmontar, limpar e lubrificar uma dobradiça de porta, por exemplo. Às vezes, no entanto, o problema é difícil de solucionar e as condições de contato no sistema são difíceis de caracterizar.

Abordagens para a resolução de problemas no campo multidisciplinar da tribologia (isto é, a ciência e tecnologia da FLD) frequentemente apresentam uma ampla gama de opções e podem incluir campos tão diversos como projeto mecânico, lubrificação, mecânica de contato, dinâmica de fluidos, química de superfície, física de estado sólido e ciência e engenharia de materiais.

A tribologia tem um papel fundamental nos processos industriais, além de evitar desgaste prematuro de componentes de máquinas,

Segundo Stout e Davis (1986) foi estimado que 10% do consumo de petróleo nos Estados Unidos é usado simplesmente para superar o atrito.

Atrito e desgaste acompanham qualquer contato deslizante, é fato que o desgaste não pode ser totalmente evitado. Na tecnologia de máquinas, o desgaste é uma razão igualmente importante de danos de materiais como fratura, fadiga e corrosão (ZMITROWICZ, 2006). O desgaste gera uma perda progressiva de desempenho e eficiência do equipamento ou componente, além de aumentar o consumo de óleos lubrificantes. Recuperar estes componentes ou então prepará-los de forma que suportem as condições de trabalho é o objetivo de vários estudos envolvendo atrito e desgaste.

Vários estudos tribológicos apontam que uma das condições que mais interfere na geração de atrito e conseqüentemente de desgaste é o regime de lubrificação em que os corpos estão submetidos. Segundo Rovani (2014), efeitos da adição do lubrificante são visíveis quando comparados a ensaios a seco, assim como a manutenção da estabilidade do atrito em função do tempo.

Partindo deste pressuposto, um estudo envolvendo atrito e desgaste de materiais é relevante e tem correlação a fabricação mecânica, o que justifica este trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento tribológico no ensaio pino sobre disco do aço SAE 4320 lubrificado e lubrificado com adição de condicionador de metais utilizando esfera de aço SAE 52100 com diâmetro de 6 mm e com cargas de 10 e 20 N.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medir a força tangencial de atrito para diferentes lubrificações;
- Medir a força tangencial de atrito para diferentes cargas;
- Comparar os coeficientes de atrito nos diferentes regimes de lubrificação e de carga;
- Visualizar o perfil de desgaste por meio de microscopia confocal;
- Estimar o volume de material removido nas diferentes condições;
- Verificar a efetividade do condicionador de metais.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Tribologia

A palavra tribologia é derivada da palavra grega *tribos* que significa fricção, então a tradução literal seria “a ciência da fricção”. O seu equivalente em inglês é “*friction and wear or lubrication science*”, que significa a ciência do atrito e do desgaste ou da lubrificação (BHUSHAN, 2013, p.1), mais precisamente, segundo Carrilho (2006, p.2), a tribologia pertence à gama da ciência que diz respeito à interação do contato estabelecida entre um par de superfícies em movimento relativo.

Para melhor entendimento da ciência de desgaste, alguns conceitos relevantes são elencados a seguir.

3.1.1. Atrito

A palavra fricção vem do verbo latino “*fricare*”, que significa esfregar. Já a força conhecida como atrito ou fricção, pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo deslizando sobre outro (BLAU, 2009, p.1), Os corpos em questão podem ser um gás e um sólido (atrito aerodinâmico), um líquido e um sólido (atrito líquido); dois corpos sólidos (atrito sólido); ou o atrito pode ser devido a processos internos de dissipação de energia dentro de um único corpo (atrito interno) (SAMMARRAI, 2015, p.1).

A palavra atrito é usada para descrever a perda gradual de energia cinética em muitas situações em que corpos ou substâncias se movem em relação um ao outro. Por exemplo, atrito interno amortece vibrações de sólidos, atrito viscoso retarda o movimento interno de líquidos, e atrito sólido é aquele entre dois corpos sólidos que se movem um em relação ao outro.

Estamos preocupados aqui apenas com o atrito sólido, que pode ser definido como a resistência ao movimento de um corpo sólido sobre o outro. O movimento pode ser deslizante ou rolante; os termos utilizados são atrito de deslizamento e atrito de rolamento, respectivamente. A discussão que se segue lida com o atrito de deslizamento.

O atrito por deslizamento ocorre quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra com uma carga no contato, existente em mancais de deslizamento, dentes de engrenagem, guias lineares e fusos rosca. O uso de lubrificação tem forte influência neste tipo de atrito.

O uso de rolagem, diferentemente do deslizamento, como meio de obter baixos coeficientes de atrito, encontra sua maior aplicação nas rodas e nos rolamentos de esferas e de roletes. Sabe-se que os lubrificantes têm pouca influência no atrito de rolamento (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.38).

Durante o tempo de deslizamento entre duas superfícies, o atrito pode ser dividido em duas faixas, um período inicial geralmente chamado de *running-in* em que a taxa de desgaste segundo Bhushan (2013, p.341) pode ser maior ou menor que o do regime permanente, este, que se segue após o período inicial até a falha da interface.

O atrito pode ser gerado por diversos eventos microscópicos específicos físicos, químicos ou relacionados a materiais, estes são chamados de mecanismos básicos de atrito (CARRILHO, 2006, p.3) que dependem exclusivamente da natureza das superfícies, dos materiais, do meio ambiente, das condições de aplicação e de certas características do aparelho, tais como vibrações e fixação dos componentes (ASM INTERNATIONAL, 1992, p.20).

O atrito tem um papel importante em um número significativo de nossas atividades diárias e na maioria dos processos industriais. Ele ajuda a pôr um corpo em movimento, mudar de direção e, posteriormente, a parar. Sem atrito, não conseguiríamos nos mover prontamente, arrastar os objetos ou executar uma infinidade de outras tarefas diárias comuns. Sem atrito, a maioria das juntas rosçadas não teriam aperto, laminadoras não conseguiriam operar, e a soldagem por atrito não existiria (SAMARRAIE, 2015, p.1).

Infelizmente para a indústria mecânica, o atrito também tem um lado danoso, pois na operação de máquinas, o atrito é responsável pela dissipação e perda de muita energia. Foi estimado, segundo Stout e Davis (1986, p.20), que 10% do consumo de petróleo nos Estados Unidos é usado simplesmente para superar o atrito.

A energia perdida por atrito é uma entrada de energia que deve ser fornecida continuamente para manter o movimento deslizante. Essa energia é dissipada no sistema principalmente como calor, que pode ter que ser removido por resfriamento para evitar danos e pode limitar as condições em que o maquinário poderia operar.

3.1.2. Desgaste

Parte da energia mencionada anteriormente é dissipada em vários processos de deformação, o que resulta em desgaste das superfícies deslizantes e sua eventual degradação até o ponto em que a substituição de componentes inteiros se torna necessária. O desgaste das superfícies deslizantes acrescenta outro componente muito grande à importância econômica do atrito, porque sem atrito no deslizamento, as superfícies não se desgastariam (STOUT E DAVIS, 1986, p.32).

Atrito e desgaste dependem tanto das condições de deslizamento (pressão normal e velocidade de deslizamento) como das propriedades dos materiais em questão. O desgaste é resultado na maioria das vezes, da ação mecânica, (oxidação, corrosão e outros processos químicos são exceções desta regra), portanto, o processo de desgaste depende, antes de mais nada, do processo de atrito (ZMITROWICZ, 2006, p.233).

Tudo o que o homem fabrica, desgasta, geralmente como resultado do atrito entre sólidos (ZMITROWICZ, 2006, p.219).

O desgaste é a perda progressiva ou remoção de material de uma ou ambas as superfícies em contato como resultado do movimento relativo entre eles (KUMAR; 2014, p.1). Para dimensionar o desgaste gerado, várias equações foram desenvolvidas ao longo dos anos.

As primeiras equações de desgaste foram desenvolvidas por Holm em 1946, estabelecendo uma relação para o volume do material removido pelo desgaste na distância de deslizamento com a área de contato real (ZMITROWICZ, 2006, p.233).

Mais tarde, em 1950 Archard formulou a equação de desgaste de forma, onde o volume do material removido é diretamente proporcional à distância de deslizamento, à pressão normal e ao coeficiente de desgaste adimensional, e inversamente proporcional à dureza da superfície que está sendo desgastada, ou seja, a superfície do material mais macio (TREVISAN, 2013, p.29).

$$K = (H * V)/(P * L) \quad (\text{mm}^3/\text{N.m}) \quad (1)$$

Sendo:

k: coeficiente de desgaste;

H: dureza;

P: carga aplicada (N);

V: perda de volume (mm³);

L: distância percorrida (m).

O coeficiente de desgaste adimensional “k” da lei de Archard pode ser definido de várias maneiras, uma interpretação simples é considerar “k” como uma medida da eficiência do material removido para a quantidade de trabalho realizada. (ZMITROWICZ, 2006, p.233).

A ideia inicial de Holm (1946) foi atribuir uma natureza probabilística ao fenômeno do desgaste para fazer associação com as observações experimentais. Definiu-se, então, um parâmetro “k” adimensional (o coeficiente de desgaste) que expressaria a probabilidade do encontro de dois átomos resultar em remoção de material (HOLM, 1946, apud TREVISAN, 2013, p.28).

Do ponto de vista mecânico, o desgaste também é tido como uma diminuição da qualidade das superfícies de deslizamento, nebulização da superfície, geração de arranhões e sulcos, etc (ZMITROWICZ, 2006, p.234).

Muitos dos fenômenos de desgaste já foram reconhecidos, tal como abrasivo, adesivo, fadiga, erosão, oxidação, corrosão, a seguir são explicados de forma simples os fundamentos dos tipos de desgaste mais comuns na indústria metal mecânica (ZMITROWICZ, 2006, p.222).

3.1.2.1. Adesão

Quando dois materiais diferentes (ou mesmo idênticos) são colocados em uma interface com contato de estado sólido, a ligação da superfície de um sólido ao de outro resulta na formação de ligações adesivas (BHUSHAN, 2013, p.157).

. Segundo o dicionário *Collegiate Random House* (1973, apud Blau, 2009, p.132), define adesão como: “Física, a força molecular da atração na área de contato entre dois corpos diferentes, que age para mantê-los juntos”.

Adesão é mais claramente demonstrada em sistemas deslizantes quando, por exemplo, um eixo se adere a um rolamento. (ASM INTERNATIONAL, 1992, p.228).

Já o desgaste adesivo ocorre durante a ação combinada da adesão entre as asperezas e do movimento de deslizamento de duas superfícies em contato, gerando uma deformação plástica severa nas asperezas. Posteriormente ocorre um desprendimento de fragmentos de material da superfície mais macia, que são aderidos e transferidos para a superfície mais dura até serem convertidos em resíduos de desgaste. A transferência de material é o fenômeno que distingue o desgaste adesivo dos outros mecanismos de desgaste (RABINOWICZ, 1965, p.125).

3.1.2.2. Abrasão

O desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície dura ou partículas duras geram uma série de sulcos em uma superfície mais macia. As partículas de desgaste geradas por mecanismos adesivos ou corrosivos são muitas vezes duras e atuam como partículas abrasivas, desgastando as superfícies de contato à medida que se movem (STACHOWIAK E BATCHELOR; 2001, p.501).

Abrasão é frequentemente dividida em baixa pressão, alta pressão e entalhamento. Abrasão em baixa pressão ocorre quando o abrasivo permanece relativamente intacto, por exemplo ao lixarmos madeira com lixa. Abrasão de alta pressão ocorre quando as partículas abrasivas também são destruídas, como exemplo, em um moinho onde tanto o rebolo quanto o minério são degradados. No processo de abrasão por entalhamento, um abrasivo relativamente grande corta um material que não será completamente encruado pelo processo, de exemplo rochas esmagadas em um moedor (ASM INTERNATIONAL 1992, p.1455).

Graças à abrasão, um lápis, um giz de cera ou um pedaço de giz branco são úteis na vida cotidiana. Uma borracha remove as partículas de carbono do lápis que foram transferidas para o papel pelo mecanismo de desgaste abrasivo (RABINOWICZ, 1995, p.52).

3.1.2.3. Fadiga superficial

O termo desgaste por fadiga surgiu de observações das partículas de desgaste geradas em contatos por deslizamento ou por rolamento, mostrando a sua formação a partir de trincas. A natureza das trincas são as altas tensões cíclicas nos contatos de asperezas que produzem níveis elevados de deformação nas regiões superficiais e subsuperficiais (STACHOWIAK E BATCHELOR; 2001, p.621).

Segundo Rovani (2014, p.35), fadiga é a formação e a propagação de trincas na superfície devido a tensões cíclicas;

3.1.3. Processos de avaliação de desgaste

O desgaste abrasivo e a fadiga por contato são os mais importantes do ponto de vista tecnológico. Foi estimado que o desgaste total dos componentes da máquina pode ser identificado em 80 a 90% como abrasão e em 8% como desgaste por fadiga, contribuições de outros tipos de desgaste são pequenos (ZMITROWICZ, 2006, p.4).

A quantidade de desgaste em qualquer sistema, em geral, depende do número de fatores do sistema, como a carga aplicada, características da máquina, velocidade de deslizamento, distância de deslizamento, o ambiente e as propriedades do material.

Foram desenvolvidos diversos métodos para reproduzir de forma rápida os resultados do atrito e do desgaste em diversos materiais. Podem ser citados o ensaio pino sobre disco, ensaio pino sobre plano, ensaio quatro esferas, ensaio arruelas de pressão, entre outros.

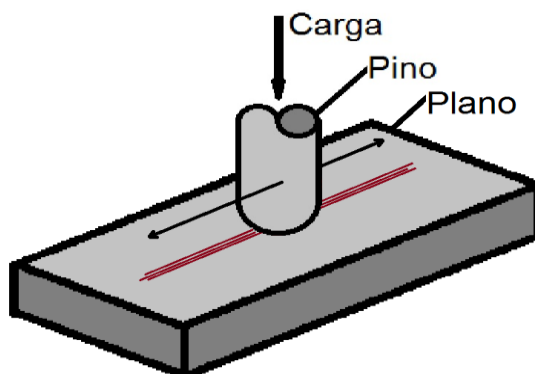
Todos os ensaios de atrito são executados em tribômetros. O *Oxford English Dictionary* (1989, apud BLAU, 2009, p. 43) definiu um tribômetro como um instrumento para estimar o atrito de deslizamento.

Bhushan (2013), revisou vários aparelhos de ensaio de atrito e desgaste que foram utilizados em várias aplicações tribológicas. A seguir, serão citados os ensaios mais utilizados.

Ensaio pino sobre plano

No ensaio pino sobre plano, um plano se move em relação a um pino estacionário ou em movimento alternativo, conforme representado na figura 1. Em alguns casos, o plano é estacionário e o pino se movimenta. O pino pode ser uma esfera, um cilindro com ponta hemisférica ou um cilindro de extremidade plana. Usando uma pequena amplitude de oscilação em alta frequência, experimentos de desgaste por atrito podem ser conduzidos.

Figura 1 - Ensaio pino sobre plano

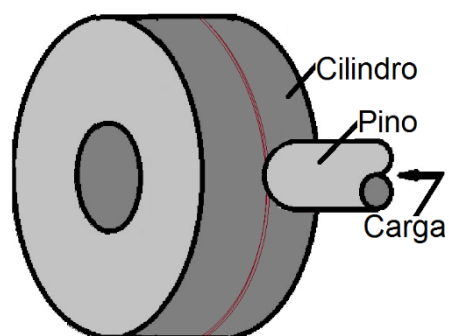


Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Bhushan (2013).

Ensaio de pino sobre cilindro

O aparelho de pino sobre cilindro é semelhante ao aparelho de pino sobre disco, exceto pelo fato de que o carregamento do pino é perpendicular ao eixo de rotação ou oscilação, conforme figura 2. O pino pode ser plano ou hemisféricamente inclinado.

Figura 2 - Ensaio pino sobre cilindro

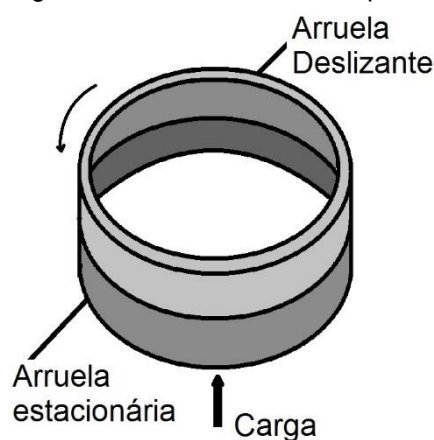


Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Bhushan (2013).

Ensaio de arruelas de pressão

No ensaio de arruelas de pressão, a superfície plana de uma arruela (disco ou cilindro) gira ou oscila na superfície plana de uma arruela estacionária, ver figura 3. Os corpos de prova estão com as faces voltadas contra si pois a carga é aplicada paralelamente ao eixo de rotação. As arruelas podem ser sólidas ou anelares. Essa configuração é mais comum para testar materiais para aplicações de baixa tensão, como mancais de rolamento e vedações.

Figura 3 - Ensaio arruelas de pressão

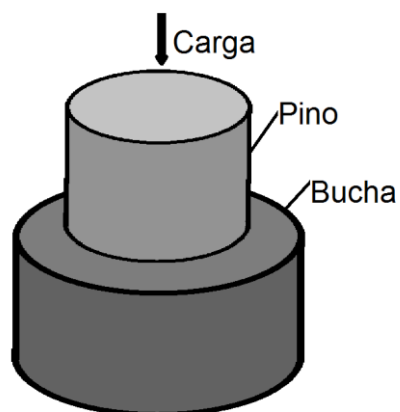


Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Bhushan (2013).

Ensaio pino sobre bucha

No ensaio pino sobre bucha, a força axial necessária para pressionar um pino de tamanho grande em uma bucha é medida, de acordo com a figura 4. A força normal atua na direção radial e tende a expandir a bucha; essa força radial pode ser calculada a partir das propriedades do material, da interferência e da mudança no diâmetro externo da bucha.

Figura 4 - Ensaio pino sobre bucha



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Bhushan (2013).

Ensaio de planos retangulares sobre cilindro rotativo

Nos ensaios de planos retangulares sobre cilindro rotativo, dois planos retangulares são carregados perpendicularmente ao eixo de rotação ou oscilação do disco, conforme mostra a figura 5.

Figura 5 - Ensaio de planos retangulares sobre cilindro rotativo

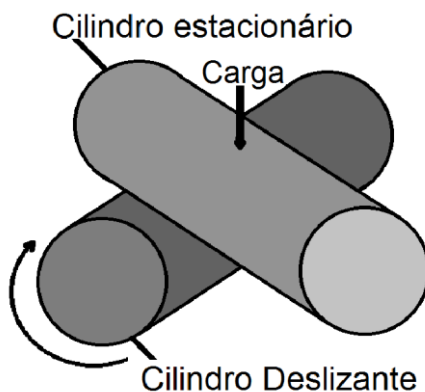


Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Bhushan (2013).

Ensaio de cilindros cruzados

O ensaio de cilindros cruzados consiste em um cilindro oco (resfriado a água) ou sólido como a amostra de desgaste estacionária e um cilindro sólido como a amostra de desgaste deslizante ou oscilante que opera a 90° em relação à amostra estacionária, de acordo com a figura 6.

Figura 6 - Ensaio de cilindros cruzados

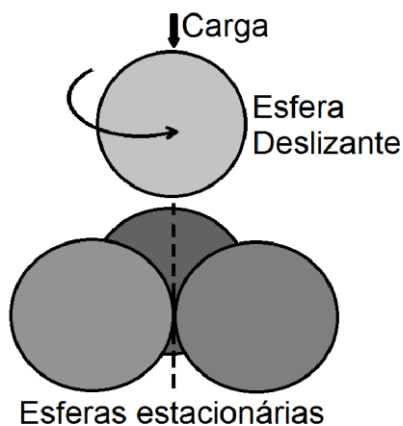


Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Bhushan (2013).

Ensaio de quatro esferas

O ensaio de quatro esferas, também chamado de ensaio de quatro esferas da Shell, consiste de quatro esferas na configuração de um tetraedro equilátero, conforme a figura 7. A esfera superior gira e desliza sobre as três esferas inferiores, que são mantidas em uma posição fixa.

Figura 7 - Ensaio das quatro esferas

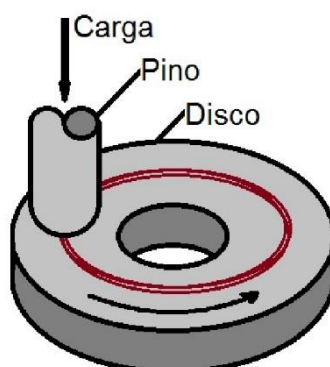


Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Bhushan (2013).

Ensaio de pino sobre disco

No ensaio de pino sobre disco, o pino é mantido estacionário enquanto o disco gira, figura 8. O pino pode ser uma esfera, um cilindro com ponta hemisférica, um cilindro de ponta plana ou até mesmo um paralelepípedo retangular. Este método de ensaio é provavelmente o mais utilizado durante o desenvolvimento de materiais para aplicações tribológicas.

Figura 8 - Ensaio pino sobre disco



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Bhushan (2013).

A *American Society for Testing Materials* (Sociedade Americana para Testes de Materiais) publicou em 2000, a norma ASTM G99.

Esta é responsável por padronizar o método de ensaio pino sobre disco, assim como sua preparação antes da realização do ensaio, nomeada *Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus* (método de teste padrão para ensaio de desgaste com um aparelho pino sobre disco) e este será o ensaio utilizado neste trabalho.

3.1.4. ACABAMENTO SUPERFICIAL

Com o objetivo de padronização, a ASTM G99 recomenda alguns fatores que influenciam de forma expressiva nos resultados de atrito e desgaste, como a geometria dos corpos de prova e seu acabamento superficial, assim como recomenda apresentar os dados referentes ao ambiente de execução dos ensaios, tipo de carga utilizada, velocidade e distância de deslizamento, e o tipo de lubrificação empregado.

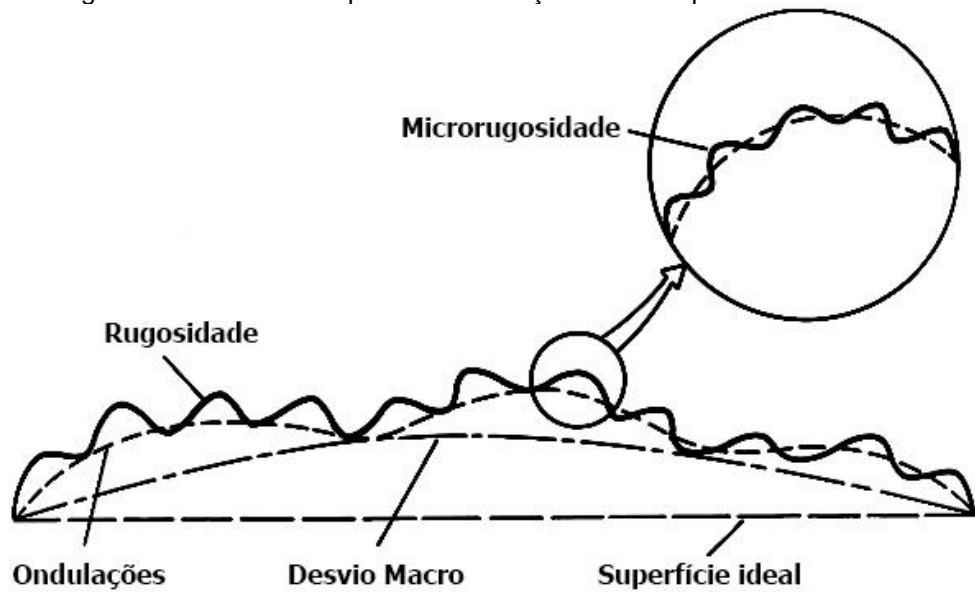
Com o objetivo de identificar a trilha de desgaste gerada, a norma recomenda um acabamento superficial de no máximo 0,8 μm .

O atrito é causado por forças entre os dois corpos em contato, agindo em sua interface. Essas forças são determinadas por dois fatores além da carga; as propriedades do material de contato e a área de contato. As forças de atrito são em geral, não diretamente previsíveis pois ambos os fatores dependem muito das condições particulares. Por exemplo, as propriedades podem ser significativamente diferentes do esperado a partir de valores em massa, porque o material da superfície é deformado, contém segregações, é coberto por uma camada de óxido e assim por diante. Além disso, a área real de contato é geralmente muito menor do que a área aparente dos corpos porque as superfícies reais não são lisas em escala atômica (ASM INTERNATIONAL 1992, p.16).

A forma geométrica de qualquer superfície é determinada pelo processo de acabamento usado para produzi-la. Haverá variações de comprimentos de onda que vão desde dimensões atômicas até o comprimento do componente. Geralmente, isso resulta do processo de acabamento e da máquina utilizada. Podem haver picos e vales adicionais causados por micro eventos localizados, como deformação irregular de corpos terceiros, fratura local ou corrosão. Mesmo depois de uma superfície ser cuidadosamente polida, ainda será áspera em escala atômica (ASM INTERNATIONAL 1992, p.16).

A textura da superfície é o desvio repetitivo ou aleatório da superfície ideal que forma a topografia tridimensional da superfície. A textura da superfície inclui: rugosidade (nano e micro rugosidade), ondulação (macro rugosidade), desvio de forma (desvio macro) e falhas (ASM INTERNATIONAL, 1992, p.16). A Figura 9 é uma exibição da textura da superfície com uma disposição unidirecional.

Figura 9 - Desvios de superfície em relação a uma superfície sólida ideal

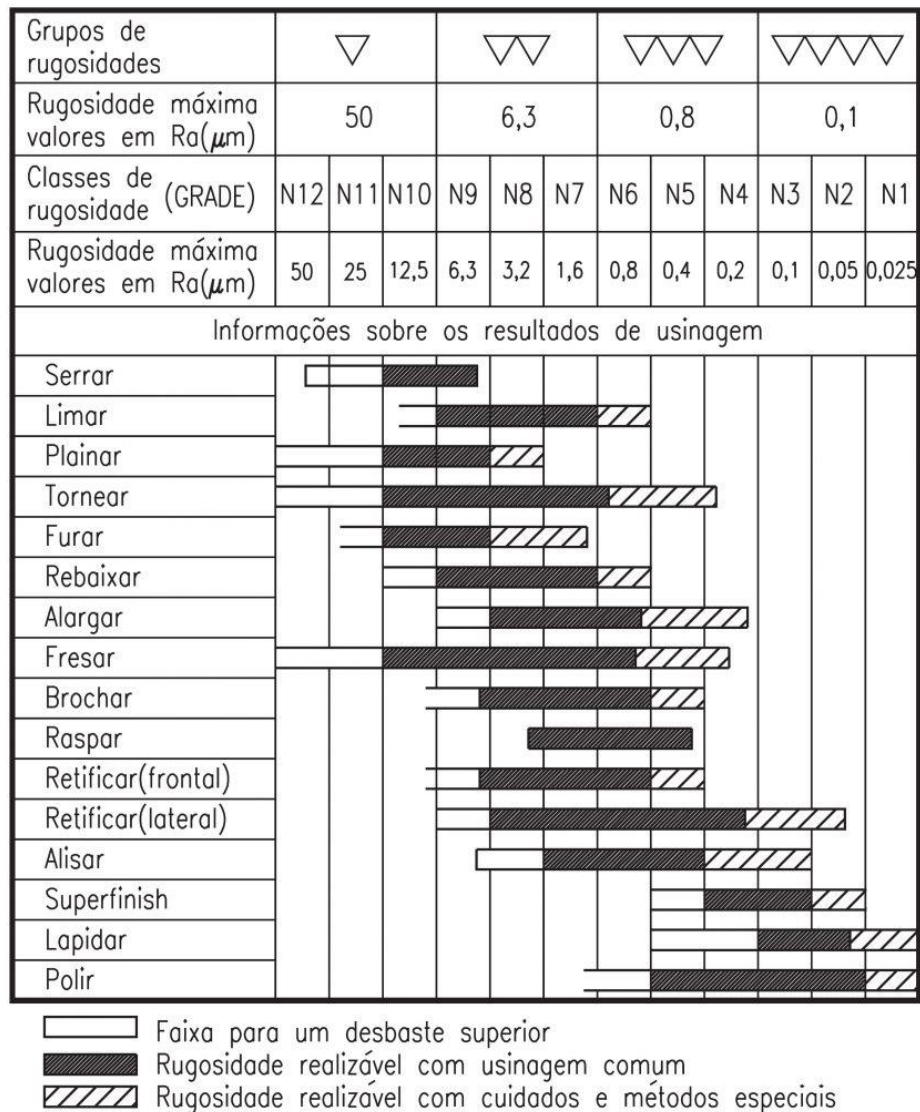


Fonte: Elaborado pelo autor, com base em ASM international (1992).

Nano e micro rugosidade são formadas por flutuações na superfície de comprimentos de ondas curtas, caracterizadas por colinas (máximas locais) e vales (mínimas locais) de amplitudes variadas. (ZMITROWICZ, 2006, p.8).

A figura 10 apresenta os valores de rugosidade comumente obtidos a partir dos principais processos de usinagem convencional, é possível perceber que, para obter-se o acabamento superficial exigido pela norma de forma satisfatória são necessários processos como *superfinishing*, lapidação ou polimento.

Figura 10 - Rugosidade para diferentes processos de usinagem



Fonte: Apostila Telecurso 2000, Módulos Especiais – Mecânica (2000).

Processos como fresamento, brochamento, raspagem, retificação e alisamento também podem vir a atingir os valores exigidos pela norma, porém, tais resultados não são garantidos mesmo em procedimentos acurados.

3.1.5. LUBRIFICAÇÃO

A tribologia é a ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação, esta última vem sendo empregada amplamente na indústria mecânica devido a seus efeitos benéficos para a redução do atrito e do desgaste em componentes de máquina.

Quando duas superfícies estão em contato uma contra a outra, a carga é carregada por vários picos, ou asperezas, na superfície. Durante o deslizamento, a força tangencial total necessária para cortar essas junções de asperezas geralmente é alta, causando atrito elevado, desgaste e danos superficiais. Para reduzir a força de atrito e assim permitir um deslizamento mais fácil, um lubrificante é deliberadamente introduzido para separar as asperezas total ou parcialmente (ASM INTERNATIONAL, 1992, p.142).

A princípio, qualquer fluido pode funcionar como lubrificante, ao menos, teoricamente. Além disso, alguns sólidos podem atuar como redutores de atrito, ou seja, lubrificar (Carreteiro, 2006).

Os lubrificantes podem ser encontrados nos três estados da matéria, como exemplo, podemos encontrar a grafita como lubrificante sólido, óleos e graxas como lubrificantes líquidos e gás halogenado (freon) como lubrificante gasoso.

O uso de lubrificantes líquidos ou gasosos é conhecido como lubrificação com película fluida, que pode ser dividida em diferentes regimes de lubrificação dependendo da espessura da camada de lubrificante. A função primária dos lubrificantes líquidos é controlar o atrito, o desgaste e o dano da superfície durante a vida prevista de um sistema que contém componentes da máquina, como engrenagens e rolamentos. As funções secundárias dos lubrificantes são para prevenir corrosão, para remoção de calor, sujeira e resíduos de desgaste. Os lubrificantes também podem transferir força ou energia, como ocorre em sistemas hidráulicos. (ASM INTERNATIONAL, 1992, p.125).

3.1.6. REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Vários estudos tribológicos apontam que uma das condições que mais interfere na geração de atrito e conseqüentemente de desgaste é o regime de lubrificação em que os corpos estão submetidos. Segundo Rovani (2014, p.169), os efeitos da adição do lubrificante são visíveis quando comparados a ensaios a seco, assim como a manutenção da estabilidade do atrito em função do tempo, a seguir são citados os regimes de lubrificação mais comuns.

Película espessa

A lubrificação em película espessa refere-se à separação total das asperezas por uma película de lubrificante, muitas vezes maior que o tamanho das moléculas do lubrificante (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.144).

Se os membros deslizantes estiverem totalmente separados por um filme de lubrificante (óleo, água, gás, etc.), a força tangencial de atrito do sistema é essencialmente a força tangencial de atrito do fluido (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.21).

Película fina

Se parte da carga é transportada pela pressão do fluido e o resto é suportado por contato com asperezas separadas por uma película lubrificante molecularmente fina, o termo lubrificação de película fina ou, muitas vezes, lubrificação mista são utilizados (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.21).

Lubrificação limítrofe

Na forma mais severa de lubrificação em película fina, toda a carga é transportada pelas asperezas lubrificadas por filmes superficiais de líquidos, gases ou sólidos molecularmente finos; esta condição é conhecida como lubrificação limítrofe (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.21).

Durante esta condição as superfícies estão parcialmente em contato e a força tangencial de atrito do sistema é uma função das propriedades combinadas do fluido e das superfícies (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.21).

3.1.7. LUBRIFICANTES

A tecnologia moderna impõe severas exigências aos lubrificantes, de modo que a seleção e formulação de misturas adequadas de hidrocarbonetos para fins de lubrificação é um processo muito qualificado e complexo. A maioria dos óleos naturais contém substâncias que podem prejudicar suas propriedades de lubrificação, mas também contém compostos essenciais para o processo de lubrificação. Lubrificantes feitos a partir de óleos naturais ou minerais são parcialmente refinados e parcialmente impuros. O equilíbrio entre impureza e pureza é crítico para a estabilidade à oxidação do óleo e varia dependendo da aplicação do lubrificante (STAKOVIK, 1993, p.59).

Os processos de lubrificação podem assumir diferentes formas, dependendo da geometria grosseira dos corpos em contato, da rugosidade e textura das superfícies de deslizamento, da carga de contato, da pressão e temperatura, das velocidades de laminação e deslizamento, das condições ambientais, físicas e químicas, propriedades do lubrificante, a composição do material e as propriedades da camada próxima da superfície (ASM INTERNATIONAL, 1992, p.123).

Segundo Stakoviak (1993), os principais tipos de lubrificantes são os de base mineral, de base sintética, graxas e emulsões aquosas.

Graxas

As graxas não são simplesmente óleos lubrificantes muito viscosos. Mas são na verdade misturas de óleos lubrificantes e espessantes. Estes são dispersos em óleos lubrificantes para produzir uma estrutura coloidal estável ou gel. Assim, uma graxa consiste em óleo restrito por fibras espessas minúsculas (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.219).

A graxa na forma de gordura bovina foi usada já em 1400 A.C. para reduzir o atrito do eixo em carruagens. A consistência semissólida da gordura permitiu que permanecesse no local por mais tempo que líquidos, como óleo vegetal. Sebo bovino foi usado até 1859, quando o coronel Drake perfurou seu primeiro poço de petróleo. Desde então, a maioria dos lubrificantes tem sido baseada em óleo de petróleo (ASM INTERNATIONAL, 1992, p.219).

Lubrificantes minerais

Os óleos minerais são os lubrificantes mais utilizados. Eles são fabricados a partir de petróleo bruto e existem vantagens e desvantagens da aplicação de óleo mineral para lubrificar máquinas específicas, e estas devem ser cuidadosamente consideradas ao selecionar um lubrificante e projetar um sistema de lubrificação. O custo dos óleos minerais é baixo e, mesmo com o rápido desenvolvimento de óleos sintéticos, lubrificantes sólidos e polímeros resistentes ao desgaste, seu uso continuado em muitas indústrias parece certo (STAKOVIK, 1993, p.61).

Quimicamente, esses óleos são compostos de um grande número de grupos parafínicos, naftênicos e aromáticos, combinados em muitas moléculas distintas. Também estão presentes vestígios de moléculas contendo enxofre, oxigênio ou azoto. Em uma base elementar, a composição dos óleos de petróleo é: carbono, 83 a 87%; hidrogênio, 11 a 14%; e um restante composto principalmente de enxofre, nitrogênio e oxigênio (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.243).

Apesar de muitas características positivas, como disponibilidade e custo relativamente baixo, os óleos minerais também apresentam vários defeitos sérios, como oxidação e perda de viscosidade em altas temperaturas, combustão ou explosão na presença de agentes oxidantes fortes e solidificação a baixas temperaturas (STAKOVIK, 1993, p.61).

Lubrificantes sintéticos

Os fluidos de hidrocarbonetos sintéticos são fabricados a partir de precursores químicos, em vez dos materiais à base de petróleo que constituem óleos minerais. Considerando que existe um grande número de moléculas em óleos minerais, o número e tipo de hidrocarbonetos sintéticos são estritamente controlados pelo processo de fabricação envolvido. A capacidade de escolher componentes permite a produção de um fluido de petróleo com propriedades ótimas para lubrificação (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.244).

Uma tendência para o uso de lubrificantes sintéticos começou no período de 1920 a 1945. Surgiu a necessidade por várias razões, um dos motivos foi a crescente escassez de oferta de petróleo em países como Alemanha, França e Japão. Outro motivo foi a demanda por lubrificantes para novas máquinas que exigiam operabilidade em faixas de temperatura maiores do que as que poderiam ser satisfeitas pelo petróleo (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.244).

Estes lubrificantes eram caros e inicialmente não obtiveram aceitação geral. O uso de óleos sintéticos aumentou gradualmente, especialmente em aplicações mais especializadas para as quais os óleos minerais eram inadequados (STAKOVIK, 1993, p.67).

Um dos primeiros exemplos foi o lubrificante líquido para o motor a jato e as graxas sintéticas de baixa e alta temperatura que são usadas pela indústria e pelos militares (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.244).

Nos últimos anos, a demanda mais forte tem sido para lubrificantes de alto desempenho, especialmente para aplicações na indústria de aviação com motores de turbina a gás de alto desempenho. Isso levou ao desenvolvimento de lubrificantes sintéticos para suportar altas temperaturas sem se decompor e, ao mesmo tempo, reduzir o risco de incêndio (STAKOVIK, 1993, p.67).

Os principais tipos de bases lubrificantes sintéticas segundo Stakoviak (1993) são:

- a) Ésteres;
- b) Hidrocarboneto sintético (SHC) ou polialfaolefina (PAO);
- a) Poliglicóis;
- b) Silicones;
- c) Clorofluorcarboneto;
- d) Benzeno alquilado;
- e) Ésteres de fosfato;
- f) Éteres polifenílicos;

3.1.8. PROPRIEDADES DOS LUBRIFICANTES

Idealmente, para evitar atrito e desgaste, as superfícies em movimento relativo deveriam ser separadas por um filme lubrificante em todos os momentos. O filme ideal seria aquele que tem baixa resistência ao cisalhamento entre as camadas moleculares paralelas à superfície (e, portanto, baixo atrito), mas que ao mesmo tempo tem fortes ligações com o sólido e assim impede que os sólidos opostos entrem em contato íntimo um com o outro (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.21).

A amostra de uma determinada fabricação dificilmente apresenta resultados iguais aos da análise típica (média das medidas de uma determinada característica), situando-se, entretanto, dentro de uma faixa de tolerância aceitável. Ao conjunto de faixas de tolerância e limites de enquadramento de cada fabricação dá-se o nome de especificação. Convém mencionar que as especificações não são garantia de bom desempenho do lubrificante, pois somente a aplicação demonstra a performance (CARRETEIRO, 2006).

A seguir estão descritas as propriedades de lubrificantes mais comuns.

Viscosidade

Viscosidade, o grau em que um fluido resiste ao fluxo, é a propriedade mais importante de um lubrificante (ASM INTERNATIONAL, 1993), determina o valor de sua resistência ao cisalhamento. A viscosidade é devida, primariamente, à interação entre as moléculas do fluido (CARRETEIRO, 2006).

A viscosidade relaciona-se diretamente com a capacidade do lubrificante de separar superfícies e geralmente se correlacionam com outras características de desempenho (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.305).

Popularmente, a viscosidade é o “corpo” do lubrificante. Um óleo viscoso ou de grande viscosidade é “grosso” e flui com dificuldade. Um óleo de pouca viscosidade é “fino” e escorre facilmente. Podemos, pois, dizer que a viscosidade de um óleo é inversamente proporcional a sua fluidez. Outras definições para viscosidade de um óleo seriam a sua resistência a fluir, o seu atrito interno ou a sua resistência ao escoamento (CARRETEIRO, 2006).

A viscosidade é expressa como sendo dinâmica (absoluta) ou cinemática. Este último, medido pela ASTM D 445, é comumente utilizado por fornecedores e usuários de lubrificantes. A viscosidade cinemática é a viscosidade dinâmica dividida pela densidade (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.130).

Podemos dizer que a viscosidade é numericamente expressa pela força aplicada a uma superfície, a fim de cisalhar uma película do fluido de espessura unitária, a uma velocidade relativa também unitária (CARRETEIRO, 2006).

A tabela 1 apresenta os lubrificantes mais comuns em três diferentes classificações: ISO; AGMA e SAE.

Tabela 1 - Classificação quanto a viscosidade

Classificação ISO (mm ² / s)	Classificação AGMA	Classificação SAE	
		Óleo de motor	Óleo de transmissão
22	***	5W	***
32	***	10W	75W
46	1	15W	***
68	2	5W-30, 20-20W	80W
100	3	10W-40, 30	85W
150	4	20W-50, 40	80W-90
220	5	50	90
320	6	60	***
460	7	***	140
680	8	***	***
1000	8A	***	250

Fonte: Elaborada pelo autor, baseada em ASM Internacional (1993).

Ponto de fluidez

O ponto de fluidez é a temperatura mais baixa na qual um combustível ou um óleo escoam sob condições definidas (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.183).

Para determinar o ponto de fluidez, o óleo é primeiramente aquecido para garantir a solução de todos os ingredientes e a eliminação de qualquer influência do tratamento térmico anterior. É então resfriado a uma taxa específica e, com decréscimos de 3 ° C, o recipiente é inclinado para verificar qualquer movimento. A temperatura 3 ° C acima do ponto em que o óleo para de se movimentar é registrada como ponto de fluidez (STAKOVIAK, 1993, p.41).

Em geral, o ponto de fluidez é indicativo da quantidade de cera (parafinas de cadeia linear) em um óleo. Em baixas temperaturas, a cera tende a se separar como cristais com uma estrutura tipo treliça. Esses cristais podem capturar uma quantidade substancial de óleo por meio de associação, inibir o fluxo de óleo e, por fim, impedir a lubrificação adequada do equipamento (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.183). Este é um ponto crítico, pois a operação bem-sucedida de uma máquina depende do fornecimento contínuo de óleo para as partes móveis (STAKOVIAK, 1993, p.41).

Os fornecedores de óleo base removem a maior parte da cera durante a refinação de petróleo. No entanto, a desparafinação completa dos óleos de base não é prática devido às limitações do processo, à economia e à presença desejável de cera, que oferece um caráter de alto índice de viscosidade (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.183).

Ponto de inflamação e ponto de combustão

O ponto de inflamação do lubrificante é a temperatura a que o vapor se inflama. Para determinar o ponto de inflamação, o óleo é aquecido a uma pressão normal até uma temperatura suficientemente alta para produzir vapor suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar. Este é o ponto de inflamação (STAKOVIAK, 1993, p.42).

O ponto de combustão de um óleo é a temperatura na qual vapor suficiente é produzido para sustentar a queima após a ignição. Em geral, o ponto de inflamação e o ponto de combustão dos óleos aumentam com o aumento do peso molecular. Para um óleo lubrificante típico, o ponto de inflamação é de cerca de 210 ° C, enquanto o ponto de combustão é de cerca de 230 ° C (STAKOVIAK, 1993, p.42).

Acidez e alcalinidade

A acidez e a alcalinidade indicam a extensão da oxidação de um lubrificante e sua capacidade de neutralizar ácidos de fontes externas, como gases de combustão (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.133).

O número de acidez total (TAN) de um lubrificante é a quantidade em miligramas de hidróxido de potássio (KOH) por grama de óleo (mg KOH/g) necessária para neutralizar os compostos ácidos presentes no lubrificante (STAKOVIK, 1993, p.49).

O número de base total (TBN) se refere a alcalinidade nas mesmas unidades (mg HC1/g), o que equivale à quantidade de ácido clorídrico (HC1) necessária para a neutralização dos alcalinos (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.133).

Assim, o TAN é uma medida de matéria ácida remanescente no óleo e o TBN é a medida de matéria alcalina remanescente no óleo (STAKOVIK, 1993, p.49).

Em geral, a TBN aplica-se apenas ao óleo fornecido com aditivos alcalinos para suprimir a formação de ácido à base de enxofre na presença de combustíveis de baixa qualidade, como lubrificantes para motores a diesel. Assim, a TBN é uma medida negativa da acidez do óleo e um valor mínimo deve ser mantido. Por outro lado, o número TAN se aplica à maioria dos óleos, uma vez que são normalmente fracamente ácidos (STAKOVIK, 1993, p.49).

3.1.9. ADITIVOS DE LUBRIFICANTE

Dois ou mais aditivos em um óleo são compatíveis se não reagirem entre si e se suas propriedades individuais forem benéficas para o funcionamento do sistema. Geralmente, considera-se que os aditivos são compatíveis se não fornecerem evidências visíveis de reação conjunta, como uma mudança de cor ou cheiro. Isto também se refere à compatibilidade de dois ou mais lubrificantes acabados (STAKOVIK, 1993, p.50).

Dispersantes

Dispersantes são aditivos que são usados para suspender produtos de oxidação resinosa insolúvel em óleo e contaminantes particulados no óleo a granel. Ao fazer isso, eles minimizam a formação de lodo, desgaste abrasivo relacionado a partículas, aumento de viscosidade e formação de depósitos relacionados à oxidação (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.166).

Uma molécula dispersante contém hidrocarboneto oleofílico e um grupo funcional polar. O grupo polar, geralmente à base de oxigênio ou nitrogênio, liga-se aos produtos de oxidação e às partículas de lodo, enquanto o hidrocarboneto oleofílico mantém as partículas suspensas em óleo. O radical hidrocarboneto é oligomérico ou polimérico, e é geralmente de natureza alifática. Contém 70 a 200 ou mais átomos de carbono para assegurar uma boa solubilidade em óleo, sendo o polibutenilalquilo o grupo hidrocarbonado mais utilizado (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.166).

Em alguns dispersantes, a parte de hidrocarboneto é derivada de um polímero de elevado peso molecular, tal como copolímero de olefina, poliacrilato ou polímero de éster de estireno (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.166).

Detergentes

Os detergentes executam funções semelhantes às dos dispersantes. Além disso, os detergentes neutralizam a combustão ácida e os produtos de oxidação e, portanto, controlam a ferrugem, a corrosão e o acúmulo de resinas no motor (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.168).

Detergentes são sais metálicos de ácidos orgânicos. A quantidade de metal pode igualar ou exceder a quantidade estequiométrica necessária para a completa neutralização da função ácido. Quando o metal está presente numa quantidade estequiométrica, os detergentes são referidos como neutros; quando há excesso de metal, eles são referidos como básicos ou superestimados (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.168).

Os detergentes são descritos quimicamente em termos de seu conteúdo de sabão, o grau de excesso e o número total de base (TBN), que é expresso como mg KOH / g de aditivo. O teor de sabão refere-se à quantidade de sal neutro e reflete a capacidade de limpeza ou detergência. O grau de excesso descreve a proporção de equivalentes de base metálica para equivalentes de substrato ácido. O TBN do detergente indica sua capacidade neutralizadora de ácido (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.168).

Os detergentes, como dispersantes, contêm um grupo polar de superfície ativa e um radical de hidrocarboneto oleofílico com um número apropriado de átomos de carbono para garantir uma boa solubilidade do óleo. Os sulfonatos metálicos, fenatos, carboxilatos, salicilatos e fosfonatos são exemplos comuns dos grupos polares que estão presentes nas moléculas detergentes (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.168).

Modificadores de atrito

Os modificadores de atrito são moléculas de cadeia longa com um grupo final polar e uma cadeia de hidrocarbonetos não polares. O grupo terminal polar adsorve-se fisicamente na superfície do metal, enquanto a cadeia de hidrocarbonetos aumenta a força do filme lubrificante através de associação (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.175).

Os aditivos antirruído, que são funcionalmente semelhantes aos modificadores de atrito, são usados para reduzir ruídos mecânicos censuráveis (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.176).

No caso das famílias de ácidos graxos e alcóis graxos, as propriedades de modificação do atrito são uma função do comprimento e natureza da cadeia de hidrocarbonetos e da natureza do grupo funcional. Materiais de cadeia longa e linear são melhores modificadores de atrito do que materiais de cadeia curta e ramificada. Derivados de ácidos graxos são os modificadores de atrito mais comumente usados (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.176).

Elementos antidesgaste e de extrema pressão (EP)

Ambos os aditivos antidesgaste e EP fornecem proteção por um mecanismo similar, exceto que os aditivos EP normalmente exigem temperaturas de ativação e condições de carga mais altas do que os aditivos antidesgaste. Em termos simples, os aditivos antidesgaste funcionam sob condições brandas e aditivos EP, sob condições severas.

A severidade das condições é determinada pelo "fator de carga" experimentado pelo aditivo e pela temperatura na qual o aditivo funciona. Carga pesada requer agentes EP e carga leve requer agentes antidesgaste. Assim, é importante considerar tanto a carga quanto as temperaturas que o equipamento provavelmente experimentará antes de selecionar agentes antidesgaste e EP (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.171).

Os aditivos antidesgaste e EP funcionam por decomposição térmica e pela formação de produtos que reagem com a superfície do metal para formar uma camada protetora sólida. Este filme de metal sólido preenche as asperezas da superfície, reduzindo o atrito e impedindo a adesão e o desgaste das superfícies (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.171).

Os sais de zinco do ácido ditiofosfórico são os agentes antidesgaste mais utilizados. Além de fornecer proteção antidesgaste, os dialquil ditiofosfatos de zinco atuam como inibidores de oxidação e corrosão. Eles são usados principalmente em óleos para motores a gasolina e diesel e em lubrificantes industriais (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.171).

Inibidores de oxidação e corrosão

Todos os lubrificantes modernos, em virtude de serem à base de hidrocarbonetos, são suscetíveis à oxidação. Cada tipo de óleo base (mineral ou sintético) tem um limiar estável, além do qual estabilizadores ou inibidores de oxidação são necessários para retardar a oxidação (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.175).

Óleos básicos adequadamente refinados contêm alguns inibidores naturais à base de enxofre e nitrogênio. Sob condições moderadas, esses inibidores são suficientes para proteger os lubrificantes contra a oxidação. No entanto, os usos mais modernos exigem inibidores suplementares para proteger os lubrificantes sob condições cada vez mais hostis (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.175).

Os inibidores de ferrugem e corrosão fornecem uma barreira entre a superfície do metal e esses elementos nocivos. Esses inibidores são de dois tipos: aqueles que neutralizam os ácidos e aqueles que formam filmes de proteção. Os formadores de película fixam-se fortemente à superfície do metal e formam uma película protetora impenetrável.

A formação do filme pode ocorrer através de adsorção física ou reação química, o primeiro mecanismo envolve a formação de camadas protetoras densamente compactadas de natureza um tanto transitória e o segundo, um filme protetor mais permanente resultante de uma reação química entre o inibidor e a superfície do metal (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.180).

Moléculas orgânicas de cadeia longa, como alcanolaminas e amidas de ácidos graxos saturados e insaturados, são exemplos de adsorventes físicos. Ácido fosfórico, ácido ditiofosfórico e derivados do ácido succínico são exemplos de formadores de filmes químicos (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.181).

Modificadores de viscosidade

A principal função de um melhorador de viscosidade é minimizar as variações de viscosidade com a temperatura (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.185).

Modificadores de viscosidade são normalmente adicionados a um óleo de baixa viscosidade para melhorar suas características de lubrificação de alta temperatura (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.185).

Estes são polímeros orgânicos que minimizam a alteração da viscosidade com uma mudança de temperatura. Isto representa um meio prático pelo qual a faixa operacional de óleos minerais é estendida a altas temperaturas sem afetar adversamente sua fluidez a baixa temperatura (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.185).

Em baixas temperaturas, as moléculas de polímero ocupam um pequeno volume (volume hidrodinâmico) e, portanto, têm uma associação mínima com o óleo, o efeito é pouco ou nenhum aumento de viscosidade. No entanto, a situação é revertida em altas temperaturas porque as cadeias poliméricas se estendem ou se expandem como consequência da adição de energia térmica. Isso aumenta a associação do polímero com o óleo devido a um aumento na área de superfície. O resultado é um aumento efetivo da viscosidade (ASM INTERNATIONAL, 1993, p.185).

Condicionador de metais

Atualmente, os fabricantes de aditivos e lubrificantes, desenvolveram uma nova classe de produto redutor de atrito, conhecido como condicionador sintético de metais, as marcas mais conhecidas são Militec, Molykote e Alfa-x.

Resultante de uma combinação de produtos, sua formulação incorpora componentes de extrema pressão, polaridade (ligações intermoleculares), nanotecnologia, antioxidantes e anticorrosivos.

O condicionador de metais não pode ser classificado como aditivo de lubrificante, pois não altera as características do lubrificante base, o produto migra totalmente para as superfícies dos metais, saindo do lubrificante, que usa como veículo. A sua finalidade principal é reduzir o atrito entre as peças, e conseqüentemente diminuir o desgaste dos componentes, aumentando sua durabilidade.

Promovem ligações intermoleculares ditas secundárias ou de van der Waals, para fortalecer a camada de lubrificante na superfície do componente mecânico. Nos líquidos e sólidos, existem forças atrativas que impedem que as partículas se difundam por todo o recipiente, essas forças são denominadas forças (ou interações) intermoleculares ou de Van der Waals (EDITORA SM LTDA, 2014, p.37).

As forças de ligações secundárias surgem de dipolos atômicos ou moleculares (BONI E BRANDINI, 2007, p.146). O tipo mais forte de ligação secundária, a ligação de hidrogênio, é um caso especial de ligação dipolo permanente. Ela ocorre entre moléculas nas quais o hidrogênio está ligado covalentemente ao flúor (como no HF), ao oxigênio (como na H₂O) e ao nitrogênio (como no NH₃). Para cada ligação o único elétron do hidrogênio é compartilhado com o outro átomo. Assim, a extremidade da ligação contendo o hidrogênio consiste essencialmente em um próton isolado, carregado positivamente, e que não está neutralizado por qualquer elétron. Essa extremidade carregada da molécula, altamente positiva, é capaz de exercer uma grande força de atração sobre a extremidade negativa de uma molécula adjacente. Essencialmente, este próton isolado forma uma ponte entre dois átomos carregados negativamente. A magnitude da ligação de hidrogênio é geralmente maior do que aquela para outros tipos de ligações secundárias (CALLISTER, 2002, p.16).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. Condicionador de metais alfa-x

Alfa-x, é um condicionador de metais, que sob a ação de temperatura, fixa-se na superfície dos metais e cria uma barreira de proteção resistente ao atrito. Pode ser utilizado em qualquer componente de máquina ou equipamentos, industriais ou móveis, lubrificados por óleo ou graxa (SAITO TECNOLOGIA E ENGENHARIA DE LUBRIFICAÇÃO, 2014).

Sua composição é:

- a) Destilado de petróleo leve;
- b) Glicerídeos;
- c) 3,5-bis (1,1-dimetiletil) -4-hidroxibenzenopropanoílo;
- d) óleo de coco;
- e) Solução de óleos sintéticos e hidrogenados;
- f) Ácido alquenídico;
- g) Pacote de aditivos compostos de enxofre, fosforo e sulfonato de cálcio;
- h) nano partículas de prata.

Suas propriedades físicas e químicas são:

- a) Aspecto: líquido límpido translúcido;
- b) Cor: amarelado;
- c) Odor: característico;
- d) Densidade (20°C): 1,130 kg/m³ (± 0,010);
- e) Viscosidade cSt à 40°C: 70,94 cSt (61,2 / 74,8);
- f) Ponto de Ebulição: >200;
- g) Ponto de Congelamento: -20°C;
- h) Solubilidade: Insolúvel em água e solúvel em solventes;
- i) Ponto de Fulgor: 142°C (± 0,010);
- j) Densidade de Vapor: Ar = 1 > 1;
- k) Pressão de Vapor: em mm.de Hg > 0,1;
- l) Ph: 7;

4.1.2. Lubrificante SAE 5W30

Óleo lubrificante sintético multiviscoso para uso em amplas faixas de temperatura. Recomendado para os modernos motores de elevado desempenho a gasolina, etanol, flex e GNV (injeção eletrônica, multiválvulas e turbo alimentados) (Petróleo Brasileiro S.A.).

Suas principais características são:

- a) Viscosidade: 9,3 a < 12,5 cSt a 100°C;
- b) Densidade relativa: 0,85 (água 4°C = 1) a 20°C;
- c) Ponto de fulgor: 226°C.

4.1.3. Aço SAE 4320

O aço 4320 é um aço para beneficiamento ligado ao cromo, níquel e molibdênio e com baixo teor de carbono para facilitar a soldagem. O baixo teor de carbono permite o uso de cementação para elevar a resistência ao desgaste. Possui temperabilidade média com combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura.

É utilizado em componentes para sistemas mecânicos onde se necessita uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções.

Por seu menor teor de carbono as durezas são menores se comparadas a dos aços com 0.40%. Suas principais aplicações são; eixos, engrenagens, capas de rolamento, engrenagens planetárias, pinhões, colunas, coroas, mangas e cilindros (GGD METALS SA, 2016 p. 27). Possui densidade de 0,00785 g/mm³.

A tabela 2 apresenta a composição química do aço SAE 4320 fornecida pelo fabricante MKraft aços.

Tabela 2 - Composição química do aço SAE 4320

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cu	Mo	Cr	Al	Ti
0.190	0.630	0.023	0.025	0.220	1.670	0.160	0.240	0.550	0.027	0.003

Fonte: Fornecida pelo fabricante (2016).

4.1.4. Aço SAE 52100

O aço 52100 é um aço de elevado teor de carbono, ligado ao cromo, utilizado para beneficiamento quando se pretende atingir elevada dureza após a têmpera, entre 62 – 66 HRC. É um aço temperável em óleo. É utilizado em componentes em geral nas indústrias de fabricação de rolamentos (GGD METALS SA, 2016 p. 27). Possui densidade de 0,00781 g/mm³.

A tabela 3 apresenta a composição química do aço 52100 fornecida pelo fabricante GGD Metals SA.

Tabela 3 - Composição química do aço SAE 52100

C	Si	Mn	Cr
0,98 – 1,10	0,15 – 0,35	0,25 – 0,45	1,30 – 1,60

Fonte: Fornecida pelo fabricante (2016).

4.2. Métodos

Para avaliação do comportamento tribológico dos metais foram realizados ensaios de deslizamento na configuração pino sobre disco seguindo a norma ASTM G99, o equipamento utilizado será um tribômetro fabricado e calibrado no IFSC apresentado na figura 11, disponível no laboratório de Ensaio de Materiais do campus Jaraguá do Sul – Rau, conectado ao software de aquisição de dados RS232 data Logger.

Figura 11 - Tribômetro do IFSC



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Como pino foram utilizadas esferas de aço SAE 52100 com diâmetro de 6,0 mm, como discos foram utilizados corpos de prova de aço SAE 4320 com 38,1 mm de diâmetro e 12,0 mm de espessura, ambos apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Amostra do pino à esquerda e amostra do disco à direita



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

As amostras foram obtidas de uma barra de 50,8 mm de diâmetro, foram cortadas em formato de disco e torneadas no torno marca Nardini modelo Mascote até obter-se diâmetro de 38,1 mm e espessura de 12,0 mm.

Posteriormente as amostras foram lixadas com as lixas de granulometria 50, 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 e finalmente polidas em feltro com suspensão de alumina 1 μ m para obter-se o acabamento superficial recomendado pela norma ASTM G99. Este se fez necessário para um reconhecimento efetivo da trilha de desgaste e para manter a rugosidade abaixo da máxima permitida para ensaios tipo pino sobre disco de 0,8 Ra, segundo a norma supracitada.

Para reduzir o volume de material utilizado, optou-se pela realização dos ensaios de deslizamento nas duas superfícies planas de cada disco, para tal, ambas receberam devido acabamento superficial.

Para a verificação da rugosidade, foram realizadas 8 amostragens do material para cada disco, utilizando o rugosímetro Rugosurf20 da marca TESA com cut off de 4mm.

O processo de limpeza das amostras antes e depois do ensaio de deslizamento foi realizada por imersão em acetona por 10 minutos e seca por dois minutos com jatos de ar quente seguidas de dois minutos com jatos de ar em temperatura ambiente.

O ambiente de realização dos ensaios promove uma grande variação nos resultados dos ensaios tribológicos, portanto, se faz necessário o controle da temperatura das amostras assim como o meio de realização dos ensaios.

A temperatura ambiente foi controlada em aproximadamente 25 °C e a umidade relativa do ar mantida próxima a 50%. Para o monitoramento das mesmas, foi utilizado o baro-termo-higrômetro da marca Oregon Scientific modelo BTHR918N.

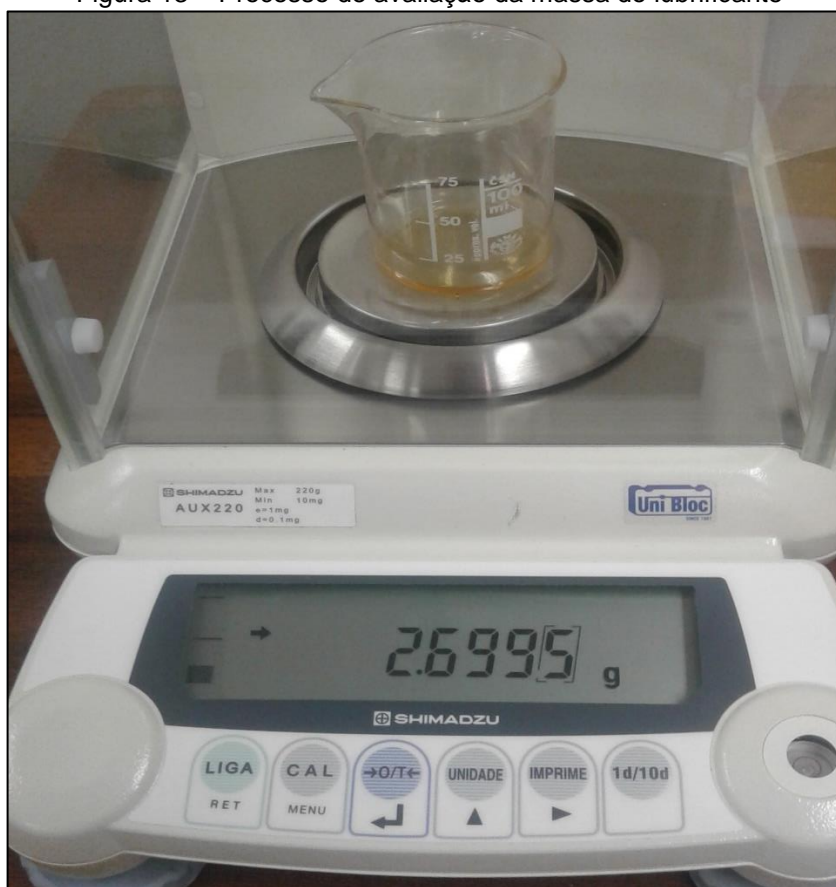
Foram realizadas quatro condições do ensaio pino sobre disco, variando apenas o regime de lubrificação e a carga, para cada condição foram realizadas cinco réplicas em função das dispersões normalmente verificadas em ensaios tribológicos.

A primeira e a segunda condição de ensaio foram realizadas com aplicação do lubrificante SAE 5W30. A terceira e a quarta etapa foram realizadas lubrificadas com uma solução do lubrificante SAE 5W30 tratada com condicionador de metais Alfa X na proporção de 3% da massa, essas duas condições serão realizadas com cargas de 10 e 20 N respectivamente.

A aplicação da carga será realizada em forma de peso-morto. A velocidade dos ensaios será de 0,1 m/s e a distância percorrida pela esfera sobre o disco será de 1000 m.

A lubrificação foi realizada com o uso de um conta gotas depositando 0,13485 g (5 gotas) de lubrificante ao início de cada ensaio. Foi utilizada a balança de precisão Shimadzu modelo Aux220 com precisão de 0,0001 g para a avaliação da massa do lubrificante, conforme apresentado na figura 13.

Figura 13 – Processo de avaliação da massa do lubrificante



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Para o cálculo de desgaste adimensional, se fez necessária a dureza Brinell do material mais macio, no caso deste, a dureza do aço SAE 4320, para tal, foram realizados ensaios de dureza Rockwell B, utilizando uma carga de 100 kgf durante 15 segundos e convertidos em dureza Brinell segundo a norma SAE J 417.

Foram realizadas cinco avaliações de dureza para cada material, calculando a média aritmética com desvio padrão para que os ensaios sejam estatisticamente válidos.

Para se obter a variação de massa dos discos, foi utilizado o método de pesagem das amostras, antes e após o ensaio de deslizamento, empregou-se a balança de precisão Shimadzu modelo Aux220 com precisão de 0,0001 g, convertendo variação de massa em variação de volume através da densidade de cada material, mediante o uso da equação (2), de acordo com a norma supracitada.

$$D = m/v \quad (\text{g/mm}^3) \quad (2)$$

Sendo:

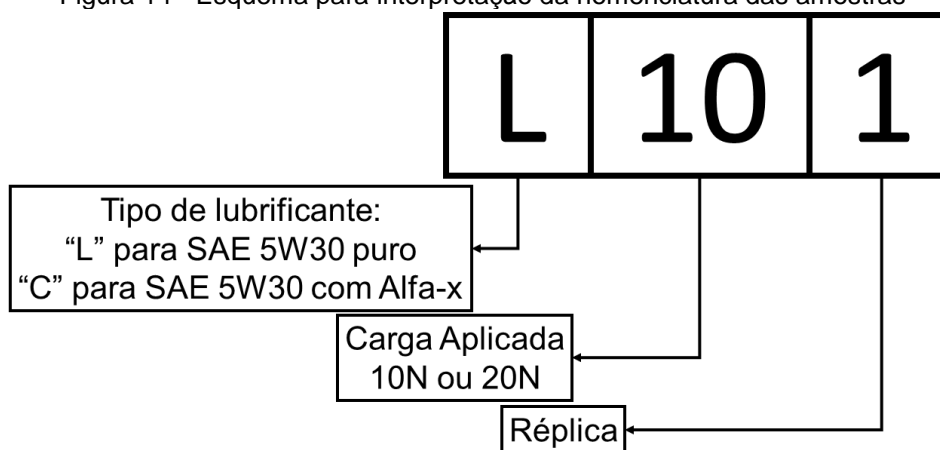
D: Densidade do material.

m: Massa da amostra.

v: Volume da amostra.

Para facilitar a visualização dos processos executados em cada amostra, estas foram nomeadas de acordo com os parâmetros adotados para cada uma delas. A Figura 14 apresenta um esquema para interpretação dos nomes de cada amostra.

Figura 14 - Esquema para interpretação da nomenclatura das amostras



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Quando o valor referente à réplica for igual a zero, interpreta-se como a média aritmética dos ensaios da categoria, das réplicas um a cinco. A tabela 4 apresenta os parâmetros variantes em cada ensaio.

Tabela 4 - parâmetros do ensaio de deslizamento

Amostra	Lubrificação	Carga
L100	SAE 5W30 puro	10 N
L200	SAE 5W30 puro	20 N
C100	Solução de SAE 5W30 com Alfa-x a 3% da massa	10 N
C200	Solução de SAE 5W30 com Alfa-x a 3% da massa	20 N

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

A Tabela 5 apresenta os parâmetros fixos em todos os ensaios realizados.

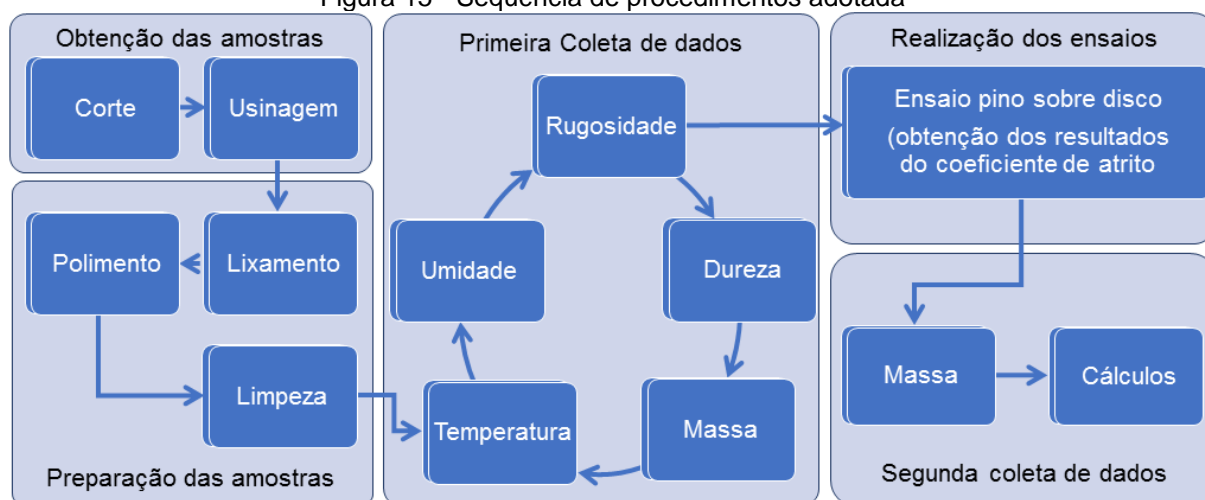
Tabela 5 - parâmetros fixos do ensaio de deslizamento

Distância percorrida	Velocidade de deslizamento	Rotação do disco
1000 m	0,1 m/s	159 RPM

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

A Figura 15 apresenta a sequência de procedimentos adotada para a realização da metodologia, os processos foram divididos em 5 etapas para melhor compreensão.

Figura 15 - Sequência de procedimentos adotada



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

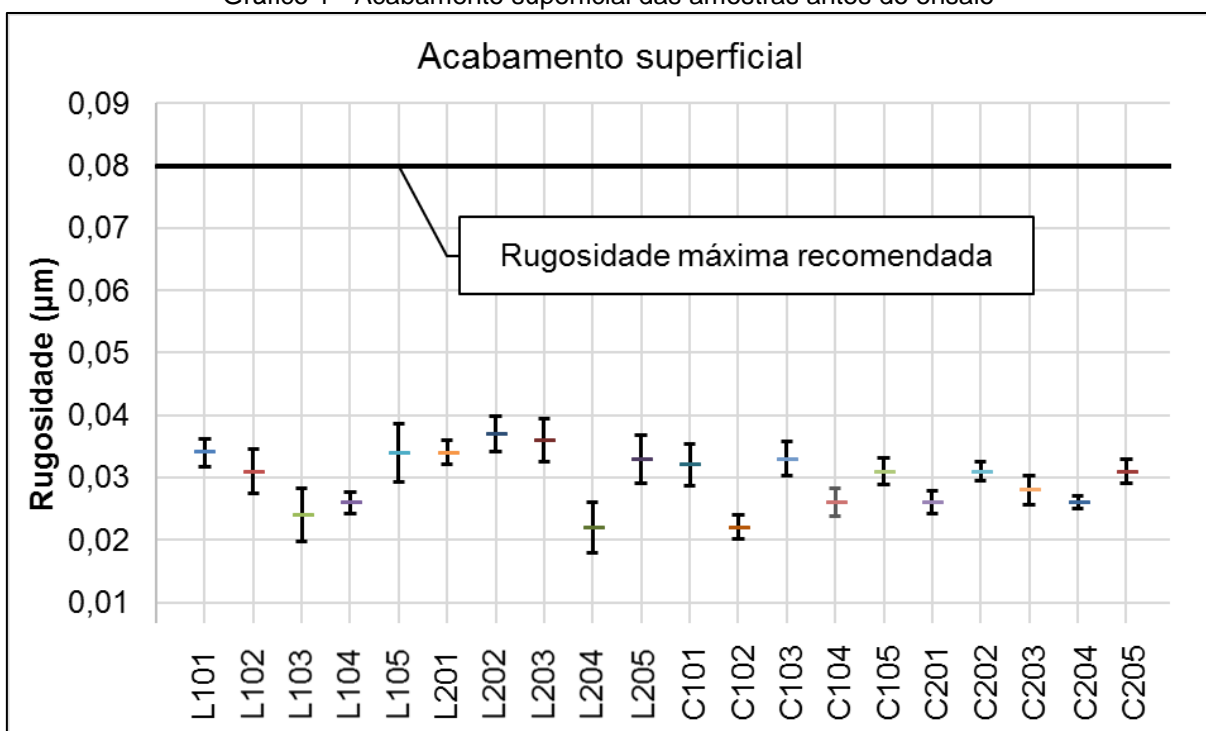
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. RUGOSIDADE

Antes da realização dos ensaios de deslizamento, foram executadas oito tomadas de rugosidade para cada corpo de prova totalizando 160 medidas.

No gráfico 1 são apresentadas das avaliações de rugosidade média (RA) com desvio padrão. É possível perceber que a rugosidade média variou aproximadamente entre 0,02 μm e 0,04 μm , abaixo do valor exigido pela norma de 0,08 μm .

Gráfico 1 - Acabamento superficial das amostras antes do ensaio



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Na tabela 6 são apresentados os dados referentes à umidade, rugosidade e temperatura, obtidos antes da execução de cada ensaio de deslizamento, percebe-se que o valor da umidade relativa do ar variou entre 45% e 50%, assim como a temperatura oscilou na faixa de 20°C a 28°C, os dados completos referentes à rugosidade são apresentados na tabela 7.

Tabela 6 – Dados obtidos antes dos ensaios de deslizamento

Amostra	Umidade	Temperatura	Rugosidade média
L101	50%	21,6°C	0,033 ± 0,0022 μm
L102	50%	25,4°C	0,031 ± 0,0035 μm
L103	46%	24,5°C	0,028 ± 0,0042 μm
L104	47%	20,7°C	0,026 ± 0,0018 μm
L105	45%	21,4°C	0,031 ± 0,0047 μm
L201	47%	20,1°C	0,034 ± 0,0020 μm
L202	55%	27,5°C	0,035 ± 0,0028 μm
L203	53%	24,8°C	0,034 ± 0,0035 μm
L204	50%	22,7°C	0,027 ± 0,0041 μm
L205	51%	25,2°C	0,030 ± 0,0039 μm
C101	54%	28,2°C	0,029 ± 0,0034 μm
C102	55%	27,7°C	0,024 ± 0,0019 μm
C103	48%	23,1°C	0,032 ± 0,0027 μm
C104	51%	21,0°C	0,026 ± 0,0023 μm
C105	48%	22,8°C	0,031 ± 0,0021 μm
C201	47%	23,9°C	0,026 ± 0,0018 μm
C202	55%	27,9°C	0,033 ± 0,0016 μm
C203	53%	24,8°C	0,028 ± 0,0024 μm
C204	50%	20,6°C	0,026 ± 0,0011 μm
C205	51%	22,4°C	0,030 ± 0,0019 μm

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

O oxigênio presente no ar é responsável pela formação de camadas e de partículas de óxido, pois com maior saturação de oxigênio podem ser geradas partículas e camadas mais espessas. A temperatura também possui papel fundamental para a geração de óxidos, pois com a elevação da temperatura o processo é acelerado.

Partículas oxidadas e camadas de óxidos interferem diretamente na força tangencial de atrito e no desgaste das superfícies, por este motivo, é necessário manter-se a estabilidade da umidade relativa do ar e da temperatura.

Tabela 7 – Medidas de rugosidade (μm)

	L101	L102	L103	L104	L105	L201	L202	L203	L204	L205
1	0,034	0,031	0,024	0,026	0,034	0,034	0,037	0,036	0,022	0,033
2	0,037	0,034	0,028	0,025	0,031	0,031	0,033	0,032	0,026	0,024
3	0,031	0,032	0,026	0,027	0,030	0,033	0,035	0,037	0,024	0,031
4	0,032	0,035	0,033	0,025	0,035	0,037	0,032	0,031	0,022	0,028
5	0,035	0,028	0,036	0,023	0,036	0,032	0,039	0,029	0,027	0,031
6	0,032	0,024	0,025	0,029	0,032	0,034	0,037	0,036	0,031	0,036
7	0,031	0,033	0,026	0,026	0,025	0,036	0,031	0,032	0,029	0,033
8	0,031	0,031	0,027	0,025	0,023	0,034	0,034	0,039	0,033	0,027
Média	0,033	0,031	0,028	0,026	0,031	0,034	0,035	0,034	0,027	0,030
Desvio Padrão	0,002232	0,003546	0,00419	0,001753	0,004652	0,001959	0,002765	0,003464	0,004062	0,003852
	C101	C102	C103	C104	C105	C201	C202	C203	C204	C205
1	0,032	0,022	0,033	0,026	0,031	0,026	0,031	0,028	0,026	0,031
2	0,028	0,024	0,034	0,028	0,034	0,027	0,033	0,024	0,025	0,029
3	0,024	0,022	0,027	0,025	0,031	0,025	0,033	0,031	0,026	0,027
4	0,03	0,025	0,031	0,031	0,029	0,028	0,034	0,025	0,024	0,032
5	0,027	0,023	0,029	0,024	0,033	0,023	0,035	0,027	0,027	0,029
6	0,034	0,024	0,035	0,025	0,033	0,026	0,032	0,028	0,024	0,03
7	0,025	0,021	0,034	0,026	0,032	0,026	0,03	0,029	0,026	0,033
8	0,029	0,027	0,032	0,025	0,028	0,023	0,032	0,03	0,026	0,029
Média	0,029	0,024	0,032	0,026	0,031	0,026	0,033	0,028	0,026	0,030
Desvio Padrão	0,003378	0,001927	0,002748	0,002252	0,002066	0,001773	0,001604	0,002375	0,001069	0,001927

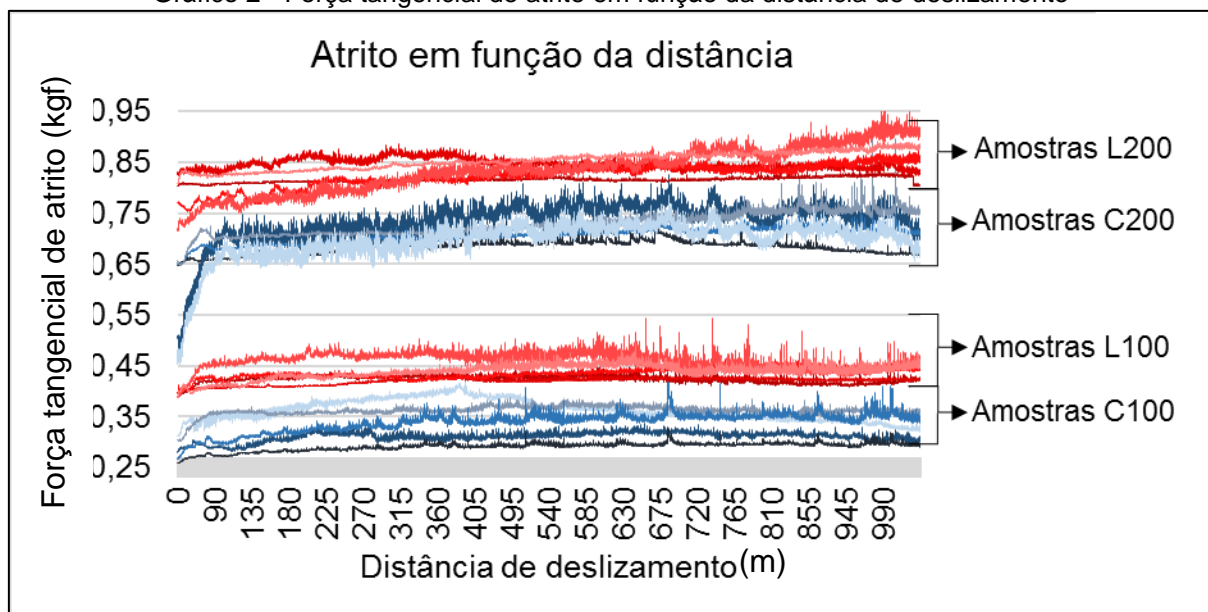
Fonte: Produção do próprio autor (2018).

5.2. FORÇA TANGENCIAL DE ATRITO

A força tangencial de atrito instantâneo foi monitorada durante todo o decorrer do ensaio utilizando-se do sistema de aquisição de dados do próprio tribômetro conectado ao software. Foi gerada uma média de cem mil dados por ensaio, no apêndice C são apresentados individualmente os resultados de cada categoria.

No gráfico 2 são apresentados os valores da força tangencial de atrito para cada variante utilizada, é possível perceber 4 patamares bem definidos, as amostras C100 obtiveram os menores valores para a força tangencial de atrito, seguido das amostras L100, mais acima estão as amostras C200, seguido das amostras L200. à força tangencial de atrito

Gráfico 2 - Força tangencial de atrito em função da distância de deslizamento



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

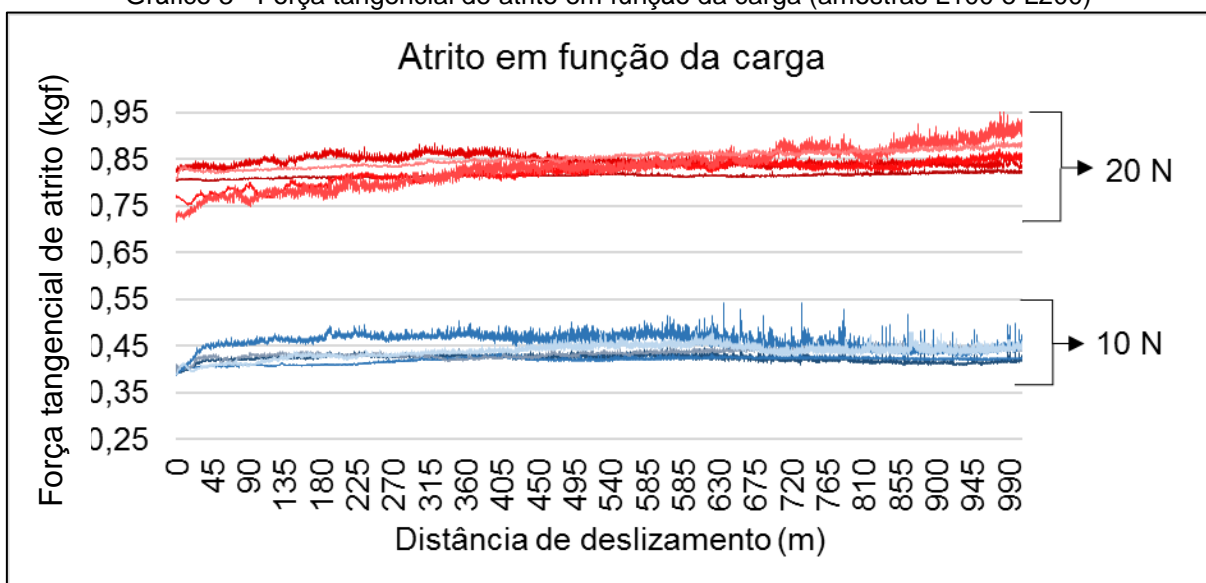
5.2.1. FORÇA TANGENCIAL DE ATRITO baseado na carga

Foram utilizados 2 parâmetros referentes à carga (10 N e 20 N). O gráfico 3 apresenta os resultados da força tangencial de atrito com base no carregamento para as amostras com lubrificação, utilizando o óleo 5W30 puro (L100 e L200).

No gráfico 3 é possível perceber 2 patamares bem definidos, o inferior é referente às amostras L100 e o superior às amostras L200.

O período de *running-in* ocorreu durante aproximadamente 50 metros iniciais para ambos os casos, com um crescimento do valor da força tangencial de atrito até atingir o período de atrito permanente, que se manteve-se estável até o fim do ensaio nas duas categorias.

Gráfico 3 - Força tangencial de atrito em função da carga (amostras L100 e L200)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Ocorreram durante os ensaios a formação de picos no valor da força tangencial de atrito. Durante o deslizamento, as superfícies de desgaste são passíveis da formação de óxidos, na forma de camada ou de partículas localizadas, tais elementos tendem a reduzir a força tangencial de atrito.

Quando tal camada é quebrada ou tais partículas são expulsas da interface, a força tangencial de atrito tende a se elevar repentinamente, gerando os picos apresentados nos ensaios. Além do mais a formação de *debris* pode justificar os picos encontrados no gráfico.

A tabela 8 apresenta uma análise do comportamento da força tangencial de atrito ao longo do período de atrito permanente. Foram desconsiderados os 50 metros iniciais referentes ao período de *running-in*.

Tabela 8 - Análise da força tangencial de atrito relativo à carga (amostras L100 e L200)

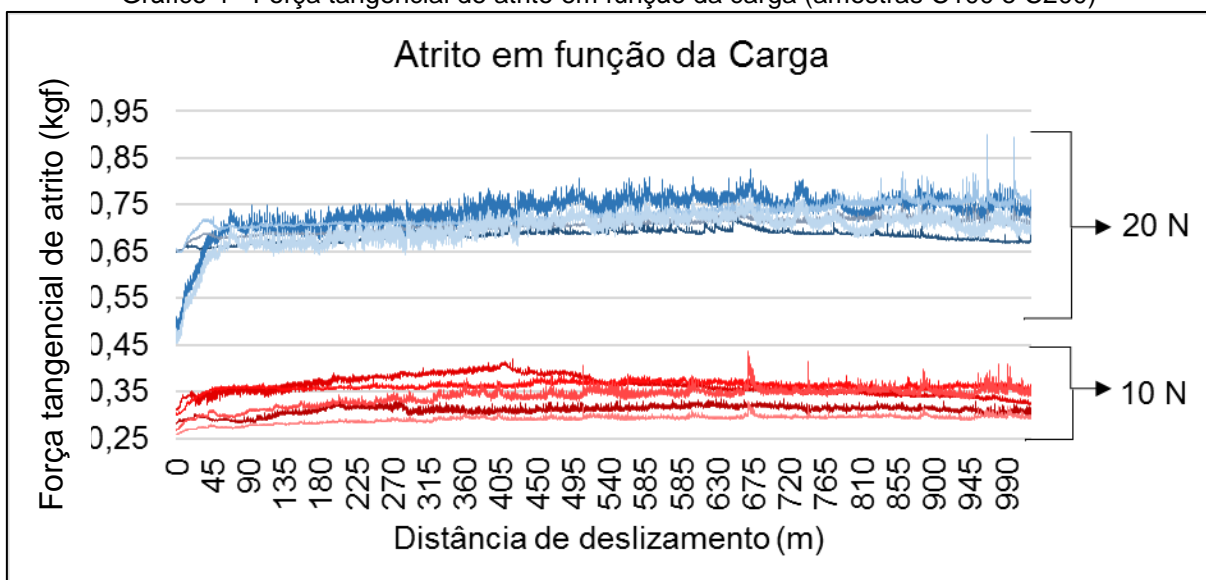
***	L100	L200
Maior força (kgf)	0,5440	0,9858
Menor força (kgf)	0,3869	0,7151
Variação da força (kgf)	0,1571	0,2707
Média e desvio padrão(kgf)	0,4365 ± 0,0172	0,8361 ± 0,0262

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Com a redução da carga em 50%, de 20 N para 10 N, notou-se uma redução da força tangencial de atrito médio em aproximadamente 48%, o que indica uma forte proporcionalidade entre a carga e a força tangencial de atrito. Além disso, percebeu-se maior estabilidade da força tangencial de atrito no decorrer do ensaio para 10 N, tendo em vista que a variação do atrito para as amostras L100 foi de 0,1571 kgf enquanto a variação para as amostrar L200 foi de 0,7151 kgf, além da variação de 0,0101 Kgf no desvio padrão.

O gráfico 4 apresenta os valores da força tangencial de atrito com base no carregamento para as amostras lubrificadas com o óleo 5W30, tratada com o condicionador de metais (C100 e C200).

Gráfico 4 - Força tangencial de atrito em função da carga (amostras C100 e C200)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

No gráfico 4 assim como no gráfico 3, é possível perceber dois patamares bem definidos, sendo o superior referente às amostras com carga de 20 N (C200) e o inferior às amostras com carga de 10 N (C100).

Nota-se o período de *running-in* durante os 50 metros iniciais, sendo mais perceptível nas amostras com carga de 20 N. No decorrer do período de atrito permanente há uma estabilidade dos dados, com poucas variações e alguns picos localizados devido a formação de óxidos.

A tabela 9 apresenta uma análise dos valores da força tangencial de atrito das amostras C100 e C200, foram considerados apenas os resultados do período de atrito permanente, ou seja, após aproximadamente os 50 metros iniciais.

Tabela 9 - Análise da força tangencial de atrito relativo à carga (amostras C100 e C200)

***	C100	C200
Maior força (kgf)	0,4368	0,9003
Menor força (kgf)	0,2585	0,4532
Variação da força (kgf)	0,1783	0,4471
Média e desvio padrão(kgf)	0,3341 ± 0,0310	0,7124 ± 0,0274

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Com a redução da carga em 50% houve uma redução na força tangencial de atrito de aproximadamente 53%, reforçando uma possível proporcionalidade da carga com a força tangencial de atrito, além disso, nota-se novamente uma maior estabilidade nos resultados com a carga de 10 N em relação à de 20 N, considerando que as amostras C100 obtiveram uma variação de atrito de 0,1783 kgf enquanto as amostras C200 obtiveram uma variação de 0,4471 kgf, além da variação do desvio padrão em aproximadamente 0,0025 kgf.

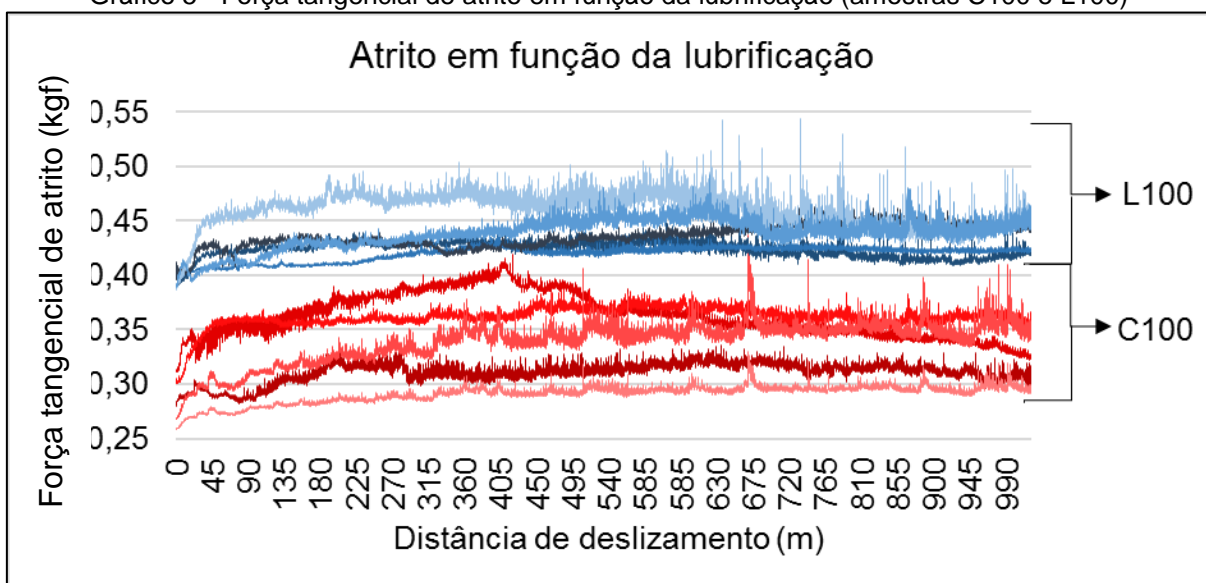
Além do parâmetro carga, o lubrificante também foi variado em duas composições diferentes. Os resultados referentes à lubrificação são apresentados a seguir.

5.2.2. Força tangencial de atrito baseado na lubrificação

A lubrificação possui um papel fundamental na força tangencial de atrito, pois a carga é dividida pelas asperezas da superfície de contato e o próprio lubrificante. Além da presença de inibidores de corrosão e redutores de atrito e de desgaste.

O gráfico 5 apresenta os resultados obtidos da força tangencial de atrito baseado na lubrificação para as amostras com carga de 10 N. Foram formados 2 patamares distintos, sendo o superior referente às amostras com o lubrificante SAE 5W30 puro (L100) e o inferior referente às amostras com o lubrificante SAE 5W30 tratadas com condicionador de metais Alfa-X (C100).

Gráfico 5 - Força tangencial de atrito em função da lubrificação (amostras C100 e L100)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

É possível perceber o período de *running-in* nas duas categorias, do início do ensaio até aproximadamente os 50 primeiros metros.

Após a passagem para o período de atrito permanente, nota-se uma maior estabilidade da força tangencial de atrito, com picos localizados possivelmente provenientes da formação de óxidos.

Na tabela 10 é apresentada uma análise da força tangencial de atrito para as amostras L100 e C100. Foram considerados apenas os dados relativos ao período de atrito permanente, ou seja, após aproximadamente os 50 metros iniciais.

Tabela 10- Análise da força tangencial de atrito relativo à lubrificação (amostras C100 e L100)

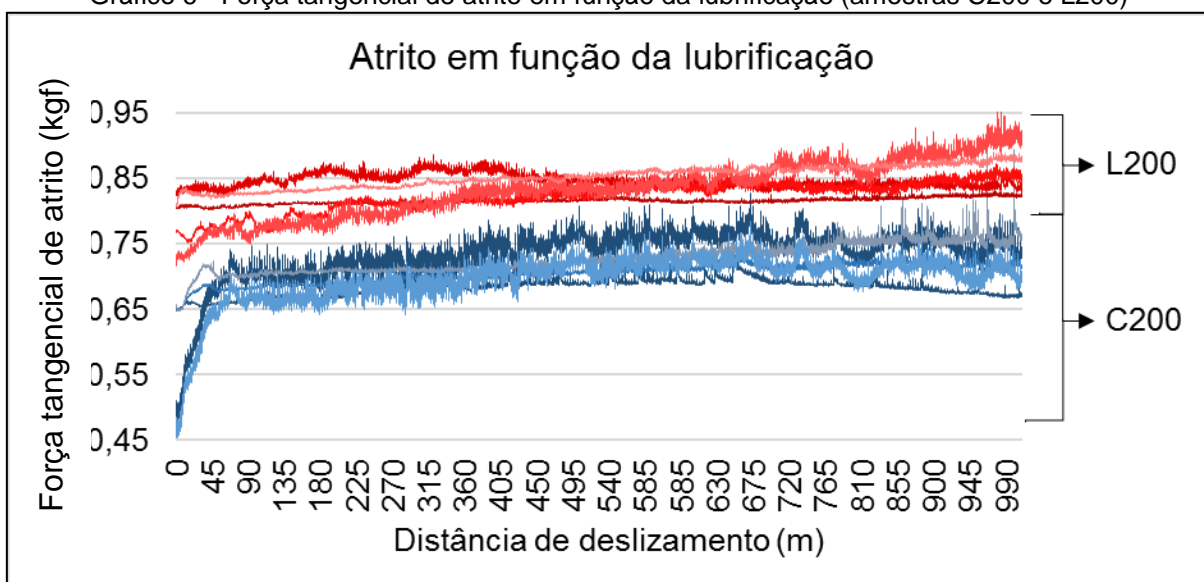
***	C100	L100
Maior força (kgf)	0,4368	0,5440
Menor força (kgf)	0,2585	0,3869
Variação da força (kgf)	0,1783	0,1571
Média e desvio padrão(kgf)	0,3341 ± 0,0310	0,4365 ± 0,0172

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

O valor médio da força tangencial de atrito das amostras tratadas com condicionador de metais (C100) foi aproximadamente 23% menor, com uma variação de atrito um pouco acima e um desvio padrão elevado em comparação aos das amostras com lubrificante 5W30 puro (L100). O que indica um efeito benéfico para a redução do atrito na interface, porém, com certa instabilidade do mesmo.

O gráfico 6 apresenta os resultados da força tangencial de atrito baseado na lubrificação com carga de 20 N. É possível perceber 2 patamares definidos, sendo o superior referente as amostras com lubrificante SAE 5W30 puro e o inferior com lubrificante 5W30 tratadas com condicionador de metais Alfa-x.

Gráfico 6 - Força tangencial de atrito em função da lubrificação (amostras C200 e L200)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

O período *running-in* ocorre aproximadamente até os 50 metros iniciais, sendo mais evidente nas amostras tratadas com condicionador de metais Alfa-x.

A tabela 11 apresenta uma análise da força tangencial de atrito com base na lubrificação com carga de 20 N. Foram considerados apenas os resultados do período de atrito permanente, portanto, os 50 metros iniciais referentes ao período de *running-in* foram removidos da análise.

Tabela 11 - Análise da força tangencial de atrito relativo à lubrificação (amostras C200 e L200)

***	C200	L200
Maior força (kgf)	0,9003	0,9858
Menor força (kgf)	0,4532	0,7151
Variação da força (kgf)	0,4471	0,2707
Média e desvio padrão(kgf)	0,7124 ± 0,0274	0,8361 ± 0,0262

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

A força tangencial de atrito nas amostras com condicionador de metais (C200) é de aproximadamente 15% menor, porém, novamente com uma variação elevado e um desvio padrão acima quando comparado às amostras com lubrificante 5W30 puro (L200), tal resultado indica um efeito benéfico do condicionador de metais para a redução do atrito, no entanto, com certa instabilidade.

5.3. DESGASTE

O desgaste tanto dos discos como das esferas foi obtido através do método de avaliação de massa. Sendo pesadas as amostras antes e depois da execução do ensaio de deslizamento. Em seguida, utilizou-se da equação (2) para converter a variação de massa (Δm) em variação de volume (Δv). A tabela 12 apresenta as medidas de desgaste obtidas nos ensaios de deslizamento. Pode-se perceber que as esferas apresentaram um desgaste reduzido quando comparado ao dos discos.

Tabela 12 – Medidas de desgaste

	DISCO				ESFERA			
	inicial (g)	final (g)	Δm (g)	Δv (mm ³)	inicial (g)	final (g)	Δm (g)	Δv (mm ³)
L101	107,3823	107,3815	0,0008	0,1019	0,8853	0,8846	0,0007	0,0896
L102	107,3815	107,3806	0,0009	0,1146	0,8846	0,8839	0,0007	0,0896
L103	119,3548	119,3539	0,0009	0,1146	0,8855	0,8846	0,0009	0,1152
L104	121,3331	121,3323	0,0008	0,1019	0,8848	0,8841	0,0007	0,0896
L105	119,3539	119,3530	0,0009	0,1146	0,8850	0,8844	0,0006	0,0768
L201	97,6580	97,6561	0,0019	0,2420	0,8847	0,8833	0,0014	0,1793
L202	62,8582	62,8564	0,0018	0,2293	0,8855	0,8843	0,0012	0,1536
L203	119,3541	119,3523	0,0018	0,2293	0,8849	0,8834	0,0015	0,1921
L204	121,3405	121,3388	0,0017	0,2166	0,8851	0,8839	0,0012	0,1536
L205	119,3521	119,3503	0,0018	0,2293	0,8855	0,8841	0,0014	0,1793
C101	97,6487	97,6481	0,0006	0,0784	0,8838	0,8833	0,0005	0,0640
C102	62,8573	62,8566	0,0007	0,0892	0,8855	0,8849	0,0006	0,0768
C103	62,8643	62,8636	0,0007	0,0892	0,8848	0,8842	0,0006	0,0768
C104	118,8398	118,8391	0,0007	0,0892	0,8850	0,8845	0,0005	0,0640
C105	121,3277	121,3270	0,0007	0,0892	0,8850	0,8843	0,0007	0,0896
C201	100,1822	100,1809	0,0013	0,1656	0,8844	0,8833	0,0011	0,1408
C202	100,1770	100,1758	0,0012	0,1529	0,8845	0,8834	0,0011	0,1408
C203	62,8670	62,8656	0,0014	0,1783	0,8850	0,8838	0,0012	0,1536
C204	118,8391	118,8378	0,0013	0,1656	0,8851	0,8841	0,0010	0,1280
C205	101,4676	101,4662	0,0014	0,1783	0,8845	0,8834	0,0011	0,1408

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

A figura 16 apresenta as amostras após a realização dos ensaios de deslizamento, antes e depois da limpeza do lubrificante.

Figura 16 - Amostras após realização do ensaio de deslizamento

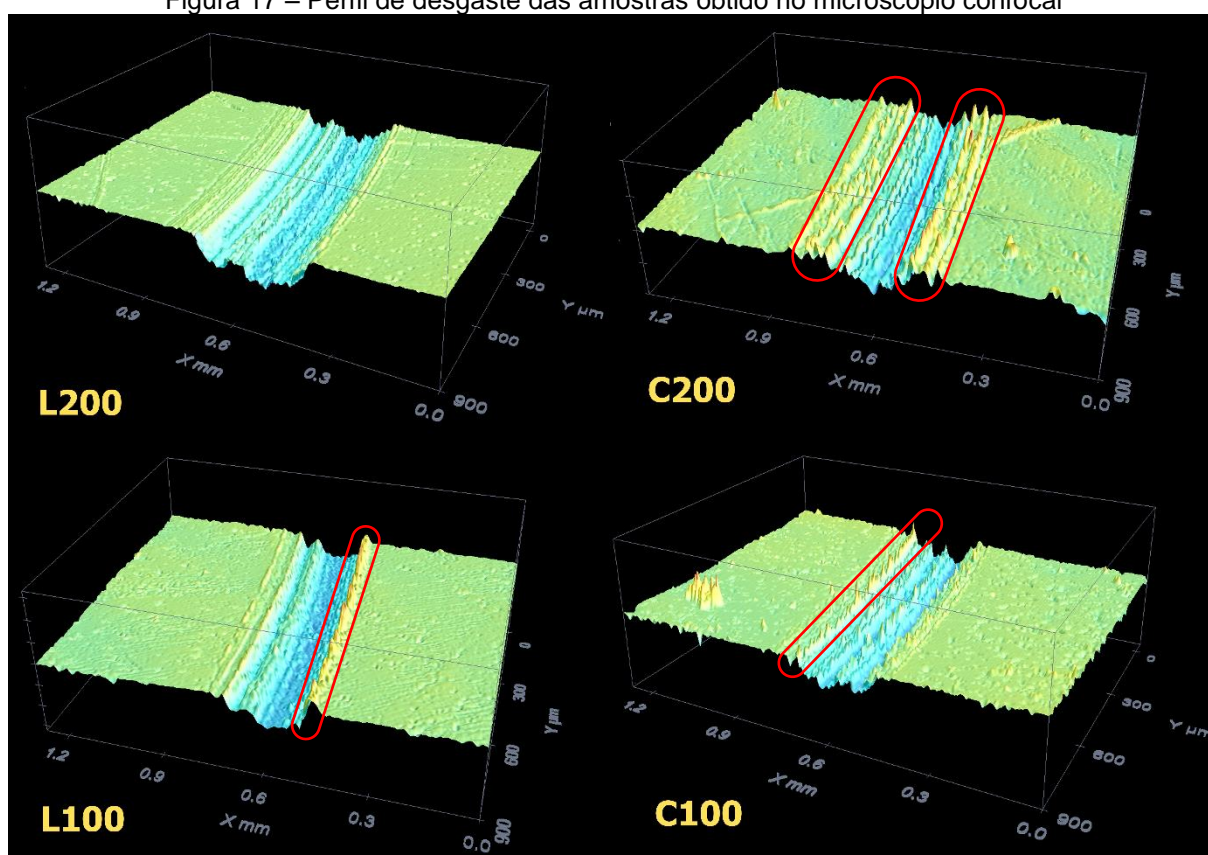


Fonte: Produção do próprio autor (2018).

A trilha de desgaste não apresenta diferenças visíveis a olho nu, quanto a aparência do lubrificante. É possível perceber uma oxidação ligeiramente maior nas amostras com carga de 20 N (L200 e C200).

A figura 17 apresenta em detalhe o perfil de desgaste obtido no ensaio de deslizamento obtidas no microscópio confocal. Tal equipamento permite analisar o desgaste gerado. Pode-se então comparar a profundidade da trilha de desgaste assim como a dispersão das revoluções da esfera.

Figura 17 – Perfil de desgaste das amostras obtido no microscópio confocal



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

As amostras com lubrificante SAE 5W30 apresentam um perfil de desgaste elevado quando comparado com as amostras com SAE 5W30 e condicionador de metais.

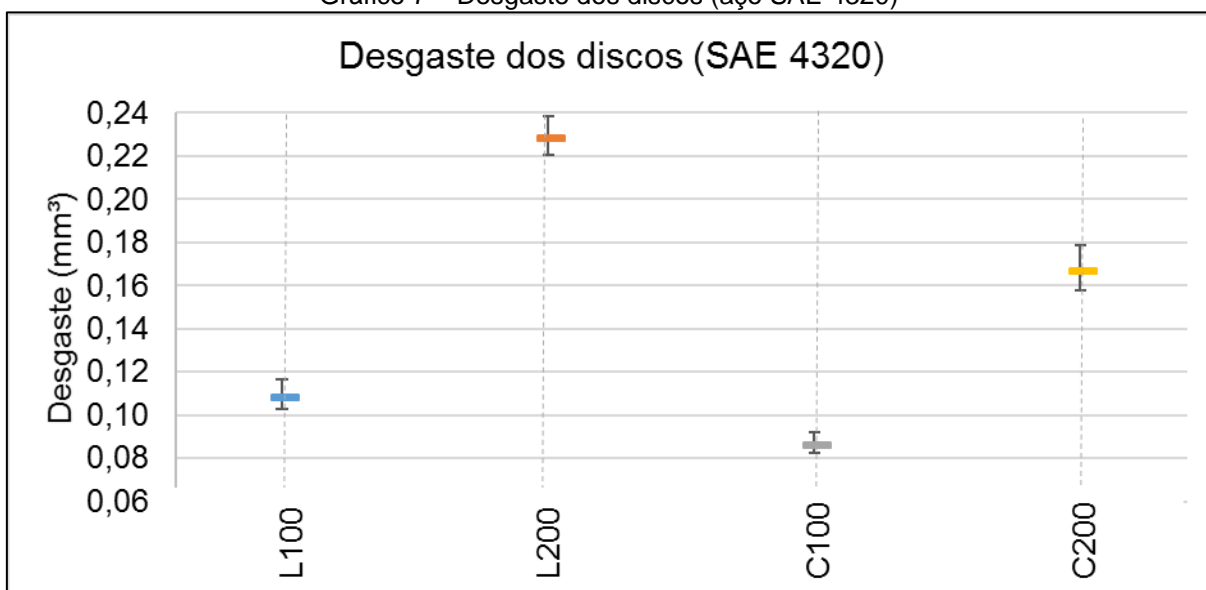
Durante o ensaio de deslizamento, partículas do metal oxidado ou não, chamados de *debris*, se desprendem do corpo principal.

Na figura 17, é possível visualizar picos nas laterais da trilha das amostras C100, C200 e L100, destacados em vermelho, tal fenômeno pode ter sido gerado pelo atrito reduzido quando comparado com as amostras L200. Com atrito reduzido, propõe-se que os *debris* foram deformados para as laterais, porém, não destacados do corpo principal. Este fenômeno pode não ter sido visualizado nas amostras L200 pelo atrito elevado, ocasionando o desprendimento dos *debris*. Para melhor entendimento da situação, são necessários estudos aprofundados de tal fenômeno.

5.3.1. Desgaste dos discos

Os discos utilizados no ensaio de deslizamento foram fabricados em aço SAE 4320. No gráfico 7 são apresentados os resultados do desgaste dos ensaios de deslizamento nos discos. As amostras L200 tiveram o maior desgaste seguidas pelas amostras C200; após seguem as amostras L100 e com menor desgaste estão as amostras C100.

Gráfico 7 – Desgaste dos discos (aço SAE 4320)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Assim como nos resultados da força tangencial de atrito, é possível perceber que as amostras tratadas com condicionador de metais obtiveram menor desgaste quando comparadas com as amostras com o lubrificante SAE 5W30 puro.

Na tabela 13 são apresentados os resultados da variação de massa assim como os valores calculados da variação de volume dos discos.

Tabela 13 - Desgaste das amostras de aço SAE 4320

***	Varição de massa (Δm)	Varição de volume (Δv)
L100	0,0009 \pm 0,00005 g	0,1096 \pm 0,00698 mm ³
L200	0,0018 \pm 0,00007 g	0,2293 \pm 0,00901 mm ³
C100	0,0007 \pm 0,00004 g	0,0870 \pm 0,00482 mm ³
C200	0,0013 \pm 0,00008 g	0,1682 \pm 0,01066 mm ³

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Na avaliação de desgaste, de forma similar aos resultados da força tangencial de atrito, a redução do volume por desgaste se comportou de forma proporcional à carga.

Nas amostras com lubrificante SAE 5W30 puro, com a redução da carga em 50% o desgaste reduziu em aproximadamente 52%, ao passo que, nas amostras tratadas com condicionador de metais Alfa-x houve uma redução no desgaste de aproximadamente 48%.

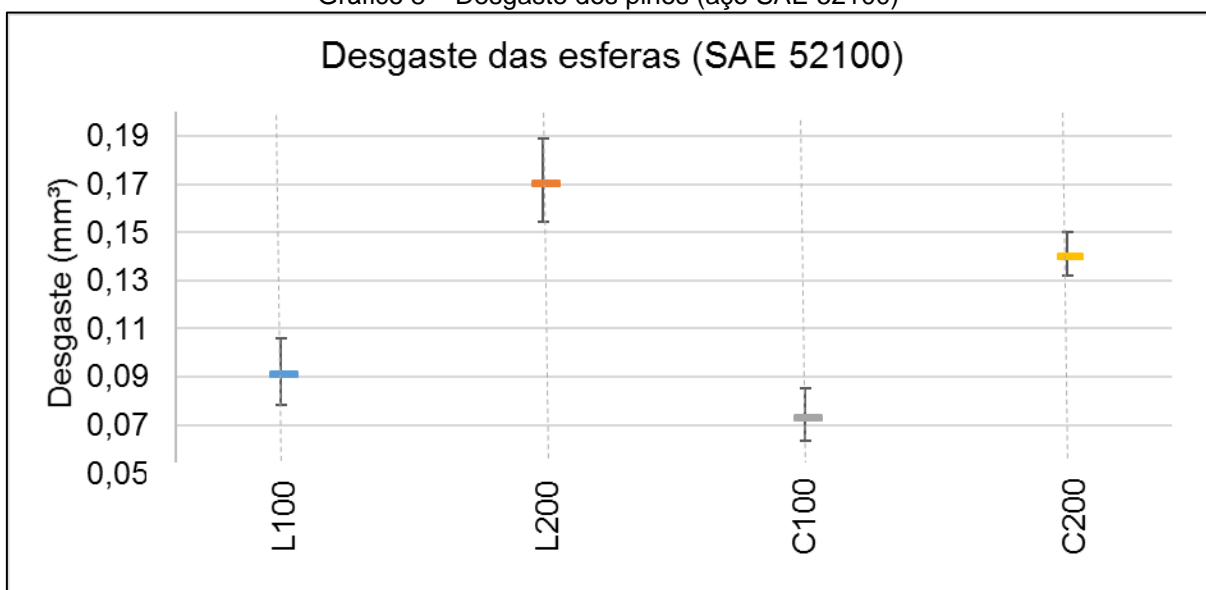
Ao comparar-se o desgaste com base na lubrificação, nas amostras com carga de 10 N e adição do condicionador de metais, obteve-se aproximadamente 20% a menos de desgaste. Nas amostras com carga de 20 N e adição do condicionador de metais houve uma redução de aproximadamente 18% do desgaste. Ambos os casos, quando comparados com amostras lubrificadas com SAE 5W30 puro e mesma carga.

5.3.2. Desgaste dos pinos

Nos ensaios de deslizamento, foram utilizados como pinos esferas de aço SAE 52100. No gráfico 8 são apresentados os resultados do desgaste destes.

Novamente, é possível perceber que as amostras tratadas com condicionador de metais apresentaram desgastes inferiores às amostras com lubrificante SAE 5W30 puro.

Gráfico 8 – Desgaste dos pinos (aço SAE 52100)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

A tabela 14 apresenta os resultados das variações de massa e volume nos pinos.

Tabela 14 - Desgaste das amostras do aço SAE 52100

***	Varição de massa (Δm)	Varição de volume (Δv)
L100	0,0007 ± 0,00011 g	0,0922 ± 0,01403 mm ³
L200	0,0013 ± 0,00013 g	0,1716 ± 0,01718 mm ³
C100	0,0006 ± 0,00008 g	0,0743 ± 0,01071 mm ³
C200	0,0011 ± 0,00007 g	0,1408 ± 0,00905 mm ³

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Com base no carregamento, o desgaste nas amostras com carga de 10 N e adição do condicionador de metais foi aproximadamente 46% inferior quando comparadas com as amostras com 20 N de carga. Já nas amostras com lubrificante SAE 5W30 puro e 10 N de carga obteve valores de desgaste aproximadamente 47% abaixo dos resultados com carga de 20 N.

Explicitando os resultados com base na lubrificação, as amostras com carga de 10 N e adição do condicionador de metais obteve um desgaste aproximadamente 19% inferior às amostras com mesma carga e lubrificante SAE 5W30 puro.

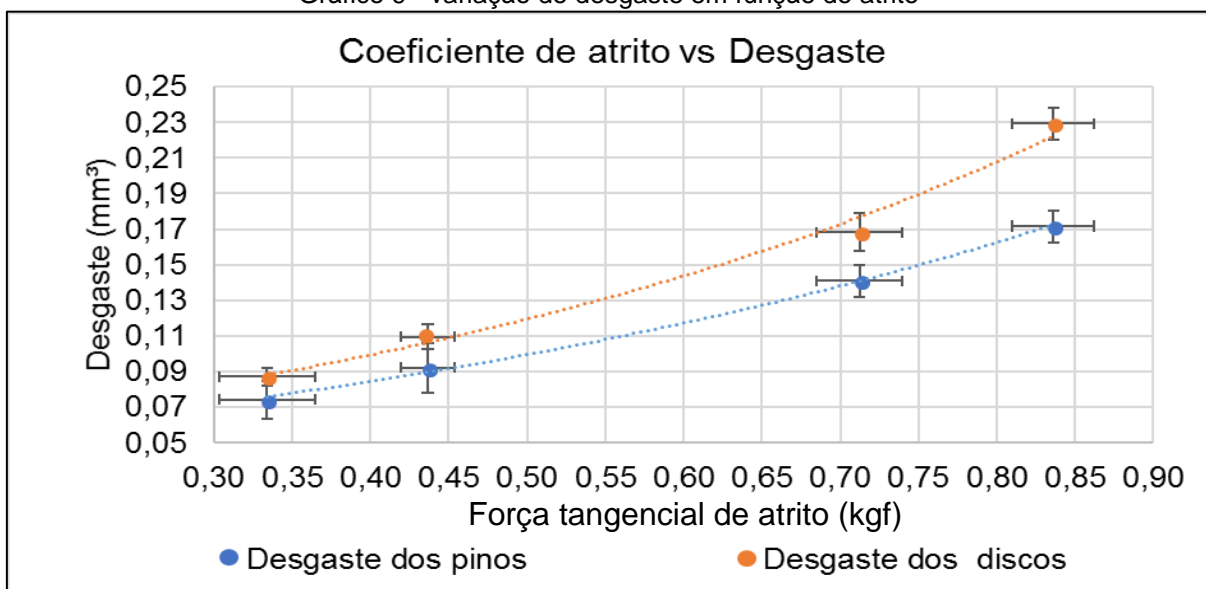
As amostras com carga de 20 N e adição do condicionador de metais, obtiveram valores de desgaste aproximadamente 18% inferiores às amostras com lubrificante SAE 5W30 puro e mesma carga.

5.3.3. Desgaste em função do atrito

Quando comparados o desgaste e a força tangencial de atrito, fica clara a proporcionalidade entre essas duas propriedades nos ensaios realizados.

O gráfico 9 apresenta a força tangencial de atrito médio em função do desgaste para todos os ensaios executados com e sem adição do condicionador de metais.

Gráfico 9 - variação do desgaste em função do atrito



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

É possível perceber duas linhas distintas, a superior representa o desgaste obtido nas amostras do aço SAE 4320, utilizadas como discos no ensaio de deslizamento. A linha inferior representa o desgaste obtido nas amostras do aço SAE 52100, utilizadas como pinos. O desgaste reduzido do aço SAE 52100 em comparação ao aço SAE 4320 pode ser devido à sua maior dureza.

Nota-se que à medida que as amostras apresentam uma força tangencial de atrito médio mais elevado o desgaste tende a acompanhar, indicando forte proporcionalidade entre esses parâmetros.

5.3.4. Coeficiente adimensional de desgaste

Definido por Holm em 1946, o coeficiente adimensional de desgaste expressa a probabilidade de o encontro de dois átomos resultar em remoção de material. Em outras palavras, é uma medida da eficiência do material removido para a quantidade de trabalho realizada.

A equação de Archard (1) indicada na página 13 emprega a carga aplicada, a dureza do material mais macio, a distância de deslizamento e o volume de material removido. A carga aplicada e a distância percorrida são parâmetros utilizados no ensaio de deslizamento, a perda de volume e a dureza foram dados obtidos durante a execução da metodologia deste trabalho.

A tabela 15 apresenta os valores de dureza Rockwell B obtidos do aço SAE 4320, assim como a conversão para dureza Brinell.

Tabela 15 - Dureza do aço SAE 4320

Amostra	Dureza Rockwell B	Dureza Brinell
01	84 HRB	158 HB
02	83 HRB	158 HB
03	83 HRB	158 HB
04	84 HRB	158 HB
05	83 HRB	158 HB
06	83 HRB	158 HB
07	83 HRB	158 HB
08	84 HRB	158 HB
Média	83 HRB	158 HB
Desvio Padrão	0,5 HRB	***

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Foram calculados o coeficiente de desgaste adimensional para cada condição ensaiada, empregando a equação (1), utilizando valores de dureza Brinell. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 16.

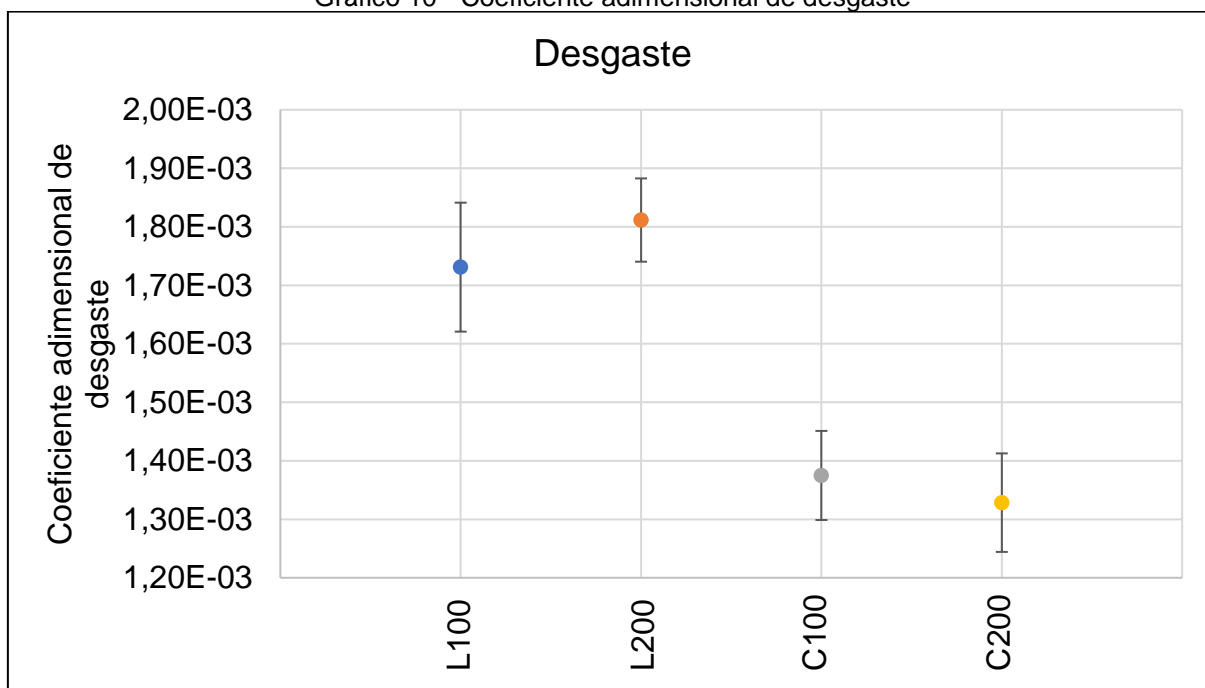
Tabela 86 - Coeficiente adimensional de desgaste calculado

Amostra	K ($1 \cdot 10^{-3}$); desvio padrão ($1 \cdot 10^{-3}$)
L100	1,73 \pm 0,1102
L200	1,81 \pm 0,0712
C100	1,37 \pm 0,0762
C200	1,33 \pm 0,0842

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

O gráfico 10 apresenta os resultados do coeficiente adimensional de desgaste calculado.

Gráfico 10 - Coeficiente adimensional de desgaste



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

É possível perceber que a carga empregada não afeta o resultado do coeficiente de desgaste adimensional. Considerando o desvio padrão, as amostras L100 e L200 obtiveram o mesmo resultado assim como as amostras C100 e C200.

Além disso, pode-se perceber uma diferença entre as amostras com lubrificante 5W30 puro e a solução do 5W30 com condicionador de metais Alfa-x, com redução de aproximadamente 24% no coeficiente adimensional de desgaste. Portanto, a solução do lubrificante aplicada, tem influência direta no coeficiente de desgaste adimensional, tendo uma vantagem perceptível para as amostras com Alfa-x.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou o estudo do desgaste por deslizamento lubrificado com óleo SAE 5W30 puro e lubrificado com solução de SAE 5W30 com condicionador de metais Alfa-x a 3% da massa. Executado em um equipamento do tipo pino contra disco com o objetivo de caracterizar a força tangencial de atrito e o desgaste mediante variação da carga aplicada. As principais conclusões deste trabalho são:

6.1. Sobre o efeito da adição do condicionador de metais.

A presença do condicionador de metais Alfa-x em 3% da massa do lubrificante SAE 5W30 surtiu em um efeito benéfico, com a redução da força tangencial de atrito, do desgaste e do coeficiente adimensional de desgaste em todos os casos testados.

a) Com carga de 10 N, houve uma redução de aproximadamente 23% na força tangencial de atrito.

b) Para a carga de 20 N, apresentou-se uma redução de aproximadamente 15% na força tangencial de atrito.

c) Com carga de 10 N, o desgaste nos discos (SAE 4320) apresentou uma redução de aproximadamente 20%.

d) Para a carga de 20 N, houve uma redução no desgaste dos discos (SAE4320) de aproximadamente 18%.

e) Nos pinos (SAE 52100), para a carga de 10 N houve uma redução de aproximadamente 19% do desgaste.

f) Com a carga de 20 N, o desgaste dos pinos (SAE 52100) foi de aproximadamente 18%.

g) O coeficiente de desgaste adimensional sofreu uma redução de aproximadamente 24% independente da carga aplicada.

A presença do condicionador de metais gerou maior instabilidade na força tangencial de atrito.

a) Considerando que, para a carga de 10 N, as amostras com lubrificante SAE 5W30 puro apresentaram uma variação na força tangencial de atrito de 0,1571 kgf, enquanto as amostras com a solução do lubrificante SAE 5W30 tratadas com condicionador de metais Alfa-x sofre uma variação de 0,1783 kgf.

b) O mesmo pode ser visto com carga de 20 N, as amostras com lubrificante SAE 5W30 puro sofreram uma variação na força tangencial de atrito de 0,2707 kgf, ao passo que as amostras tratadas com condicionador de metais a 3% sofreram uma variação de 0,4471 kgf.

6.2. Sobre o efeito da variação da carga.

O aumento da carga reduz o efeito do condicionador de metais;

a) Levando em conta que para a carga de 10 N a diferença na força tangencial de atrito entre o lubrificante SAE 5W30 puro e a solução do lubrificante SAE 5W30 com condicionador de metais Alfa-x foi de aproximadamente 23%, ao passo que para a carga de 20 N foi de aproximadamente 15%.

b) Além disso, houve variação no desgaste dos discos (aço SAE 4320) entre o lubrificante SAE 5W30 puro e a solução do lubrificante SAE 5W30 com condicionador de metais Alfa-x ao variar-se a carga. Com 10 N de carga, houve redução do desgaste de aproximadamente 20% enquanto com carga de 20 N houve redução de 18%.

c) Nos pinos (aço SAE 52100) apresentou-se o mesmo cenário, com diferença na variação do desgaste entre o lubrificante SAE 5W30 puro e a solução do lubrificante SAE 5W30 com condicionador de metais Alfa-x ao variar-se a carga. Com 10 N de carga, houve uma redução no desgaste de aproximadamente 19% ao passo que para carga de 20 N houve uma redução de 18%.

A variação da carga não implicou efeito no coeficiente de desgaste adimensional;

a) Considerando que ao variar-se a carga nas amostras com lubrificante SAE 5W30 puro, o coeficiente de desgaste adimensional não apresentou variação.

b) O mesmo efeito pode ser notado nas amostras com solução do lubrificante SAE 5W30 tratadas com condicionador de metais Alfa-x a 3% da massa, ao variar-se a carga, o coeficiente de desgaste adimensional permaneceu sem alteração.

6.3. Sobre os efeitos na geração de detritos.

a) A redução da força tangencial de atrito pela adição do condicionador de metais pode ter influenciado na geração de detritos. Pois é possível perceber que, assim como nas amostras L100, as amostras C100 e C200 apresentaram fragmentos metálicos aderidos nas extremidades da pista de deslizamento, ao contrário das amostras L200. Indicando uma possível redução da quebra dos fragmentos. Porém, para melhor entendimento da situação se faz necessário estudos mais aprofundados.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros a realização de estudos envolvendo outros pares de material, diferentes óleos lubrificantes, assim como a variação do percentual do condicionador de metais.

8. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. West Conshohocken, Estados Unidos, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. J417: Hardness Tests and Hardness Number Conversions, West Conshohocken, Estados Unidos, 2018.

ASM INTERNATIONAL, Friction, Lubrication, and Wear Technology, Vol. 18, Oak Ridge: Asm International, 1992. 1879 p. (ASM Handbook).

BAYER, R. G. Selection and Use of Wear Tests for Metals. In: NOVERBER COMMITTEE WEEK, 1., 1975, Philadelphia. ASTM Special Technical Publication. Nova Orleans: Astm Society For Testing And Materials, 1976. p. 14 - 110.

BHUSHAN, Bharat. Introduction to tribology: Second Edition. Ohio: John Wiley & Sons, 2013. 721 p.

BLAU, P. J. Friction science and technology: from concepts to applications. 2nd ed. Boca Raton, FL.; Londres: CRC Press, c2009. xiv, 2009,420 p.

BLAU, Peter J.. Friction Science and Technology: from concepts to applications. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 436 p.

BONI, Luis; BRANDINI Alcides. Introdução Clássica à Química Geral. Porto Alegre: Editora Tchê Química Consultoria Educacional LTDA, 2007. 285 p.

BRAUNOVIC, Milenko; KONCHITS, Valery V.; MYSHKIN, Nikolai K.. Electrical Contacts: Fundamentals, application and technology. Ohio: Taylor & Francis Group, 2006. 659 p.

CALLISTER, William D. Jr. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 5. ed. Utah: John Wiley and Sons, 2000. 620 p.

CARILHO, Júlio Alexandre Couto. Avaliação Experimental da Força de Atrito Durante o Processo de Corte por Arranque de Apara. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

CARRETEIRO, Ronald Pinto; BELMIRO, Pedro Nelson A.. Lubrificantes e lubrificação industrial. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 2006. 504 p.

EDIÇÕES SM LTDA. Ser protagonista química - revisão, 1. ed. São Paulo, 2004. 291p.

FARÍAS, María Cristina Moré. Influência da velocidade de deslizamento, da carga normal e da transformação martensítica induzida por deformação plástica na resistência ao desgaste por deslizamento dos aços inoxidáveis austeníticos. 2004. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

GGD METALS S.A. CATÁLOGO TÉCNICO: Aços e Metais. São Paulo: GGD METALS S.A. 2016. 13 p.

HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: British Library Cataloguing in Publication Data, 1992. 278 p.

K.J. Stout and J. Davis, The Specification of Surface Finish Tolerance for the Control of Manufacture of Engineering Surfaces, Wear, Vol 109, 1986.

KUMAR, Sanjay; SEN, Dr. S. S. Selection of the Material on the Basis of Wear and Friction in Journal Bearing. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, [s.l.], v. 03, n. 09, p.16003-16013, 15 set. 2014. Ess & Ess Research Publications.

MARU, Marcia Marie. ESTUDO DO DESGASTE E ATRITO DE UM PAR METÁLICO SOB DESLIZAMENTO LUBRIFICADO. 2013. 254 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

NEUBER, Ariadne. Calibração e aferição da reprodutibilidade do equipamento de ensaio de desgaste tipo pino sobre disco rotativo. 2017. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2017.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos: LUBRAX VALORA SAE 5W-30. Duque de Caxias: Petrobras Distribuidora S.a., 2016. 10 p.

RABINOWICZ, E. Friction and wear of materials. New York: John Wiley & Sons, 1995. 315 p.

ROVANI, Ane Cheila. Estudo da transição do regime de desgaste moderado para o desgaste severo a seco e sob o regime de lubrificação limítrofe. 2014. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SAITO ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE LUBRIFICAÇÃO (São Bernardo do Campo). BOLETIM TÉCNICO: CONDICIONADOR DE METAIS ALFA-X INDUSTRIAL. São Bernardo do Campo: Saito Engenharia e Tecnologia de Lubrificação, 2014. 4 p.

SAITO ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE LUBRIFICAÇÃO (São Bernardo do Campo). CONDICIONADOR DE METAIS: FICHA DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS. São Bernardo do Campo: Saito Engenharia e Tecnologia de Lubrificação, 2014. 7 p.

SAMMARRAIE, Amir Al; MILCIC, Dragan; AYED, Sadoon. Study behavior the coefficient of friction and wear rate of the brass alloy cuzn30 on counterface material conversely. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRIBOLOGY, 14., 2015, Belgrade. SERBIATRIB '15. Belgrade: Serbian Tribology Society, 2015. p. 49 - 55.

STACHOWIAK, W. G.; BATCHELOR, A. W.. Engineering Tribology. Perth: Elsevier, 1993. 725 p. (Tribology Series).

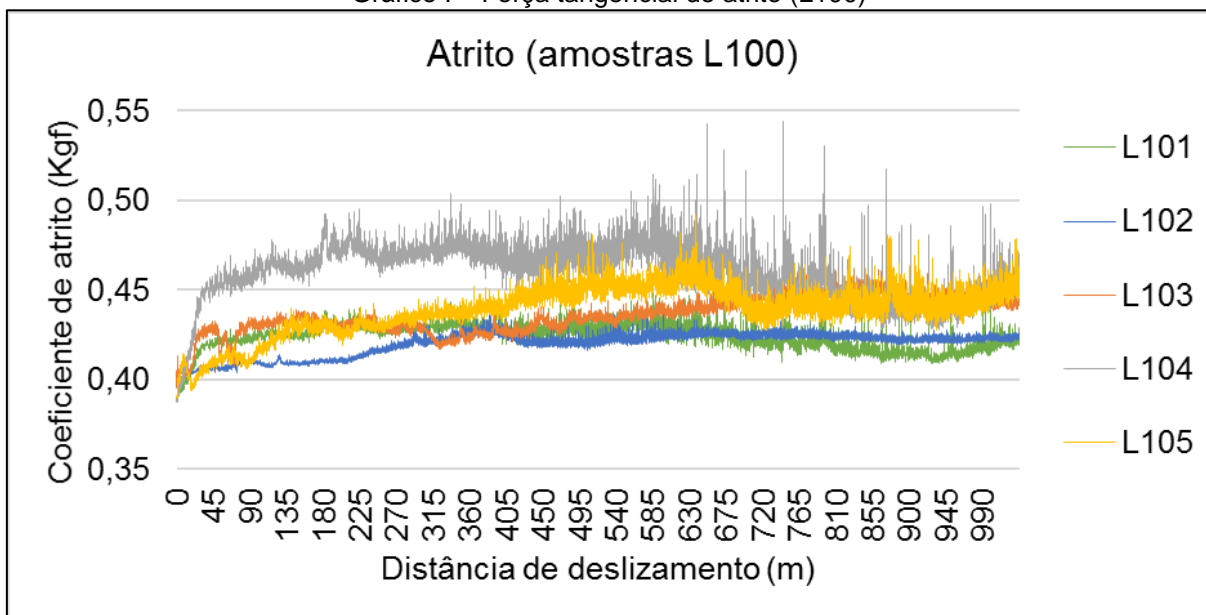
TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE. Mecânica: Parâmetros de rugosidade. São Paulo. 1997. 159p.

TREVISAN, Daniel Carlo Nadalin. Análise do comportamento do desgaste em um sistema pino-disco através de ensaios experimentais combinada com avaliação de pressão de contato por meio de simulação numérica. 2013. 124 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento acadêmico de mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ZMITROWICZ, Alfred. WEAR PATTERNS AND LAWS OF WEAR: A REVIEW. Journal Of Theoretical And Applied Mechanics, Gdańsk, v. 44, n. 2, p.219-253, nov. 2006.

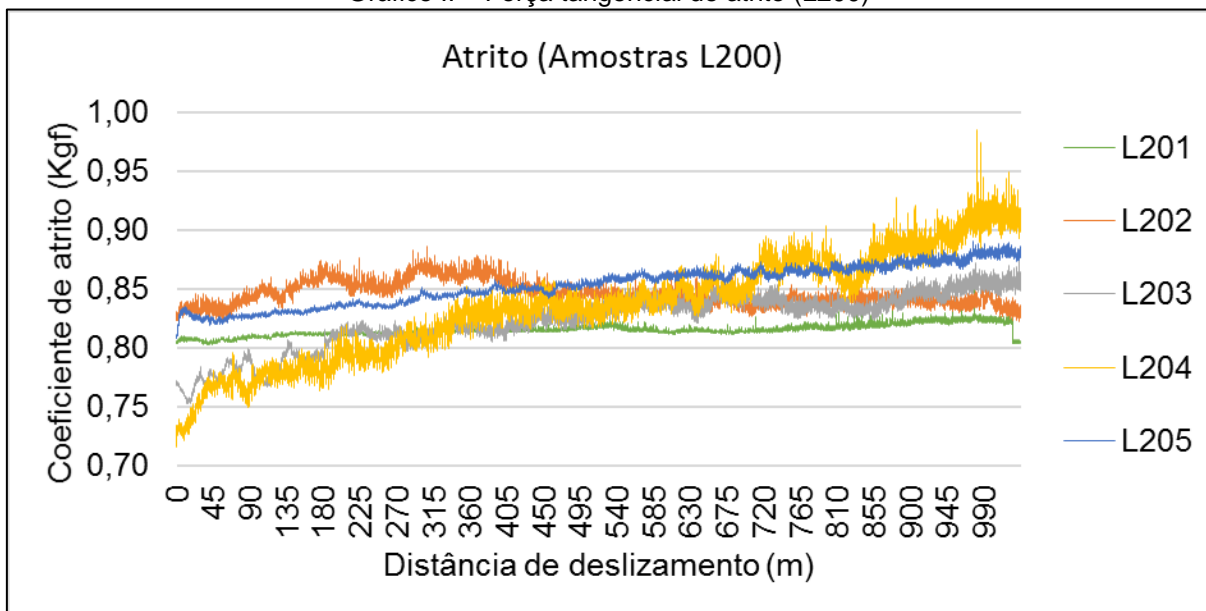
APÊNDICE A – FORÇA TANGENCIAL DE ATRITO

Gráfico I – Força tangencial de atrito (L100)



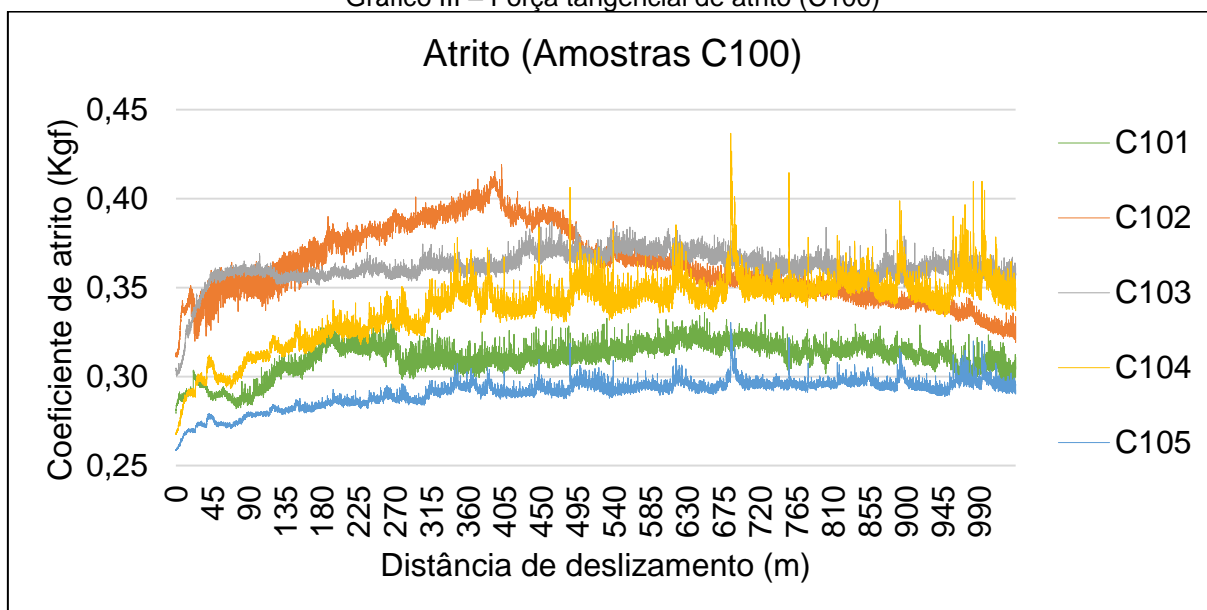
Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Gráfico II – Força tangencial de atrito (L200)



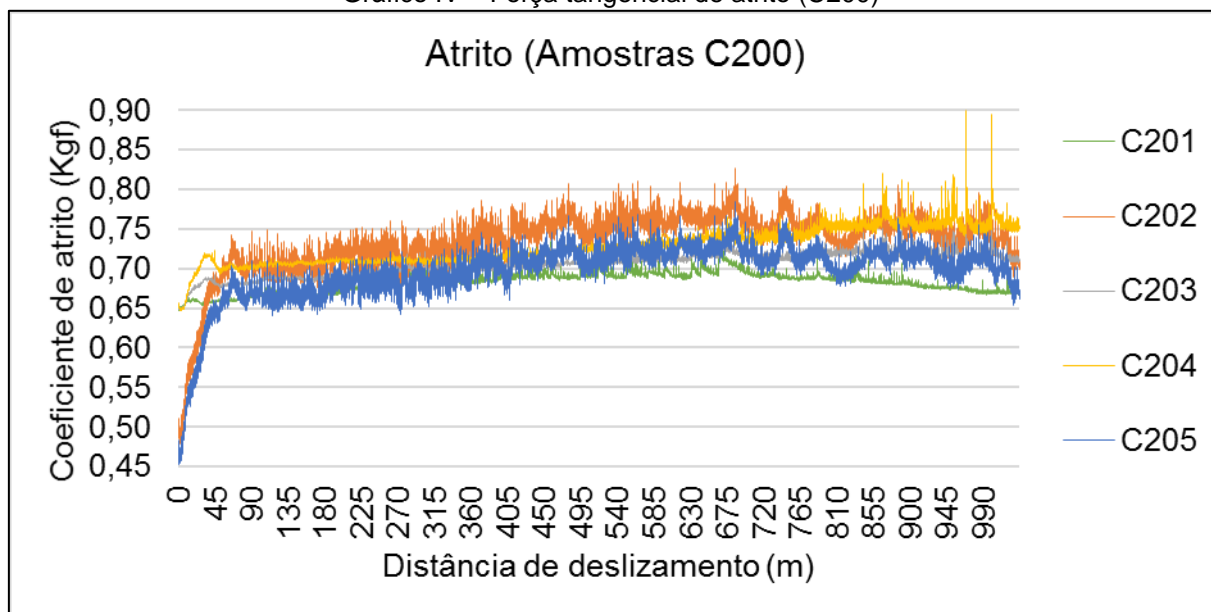
Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Gráfico III – Força tangencial de atrito (C100)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Gráfico IV – Força tangencial de atrito (C200)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).