

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE GRAXAS COM CÁLCIO E COM LÍTIO EM
ENSAIOS DO TIPO PINO-SOBRE-DISCO

por

Kássio Ferreira Gomes

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Gomes, Kássio Ferreira

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE GRAXAS COM CÁLCIO E COM
LÍTIO EM ENSAIOS DO TIPO PINO-SOBRE-DISCO / Kássio
Ferreira Gomes. -- 2021.

27 f.

Orientador: Ney Francisco Ferreira.

Coorientador: Liu Yesukai de Barros.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. pino-sobre-disco. 2. lubrificação. 3. graxas. 4.
espassantes. 5. lítio e cálcio. I. Ferreira, Ney
Francisco, orient. II. Barros, Liu Yesukai de,
coorient. III. Título.

Kássio Ferreira Gomes

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE GRAXAS COM CÁLCIO E COM LÍCIO EM
ENSAIOS DO TIPO PINO-SOBRE-DISCO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenado do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Professor Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Patric Neis

Prof. Fabiano Disconzi Wildner

Porto Alegre, novembro de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este estudo à minha filha Olívia, gerada na reta final desta graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família e amigos, mas especialmente à minha mulher Karina, que incansavelmente me apoiou, incentivou e jamais deixou esmorecer frente às dificuldades.

Agradeço à toda equipe do LATRIB-UFRGS, por todo auxílio com os ensaios. Em especial ao Professor Ney Francisco Ferreira, que tanto me ajudou, não só nesta monografia, mas em toda a graduação, e ao meu coorientador Liu Yesukai de Barros, por toda presteza e disposição em dirimir dúvidas e auxiliar com esta monografia.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

Gomes, Kássio Ferreira. **Avaliação comparativa de graxas com cálcio e com lítio em ensaios do tipo pino-sobre-disco**. 2021. 27 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

O bom funcionamento de equipamentos mecânicos está diretamente ligado a uma boa lubrificação de suas partes componentes. Graxas, que são lubrificantes de alta viscosidade, se apresentam muito úteis em aplicações com grandes carregamentos e, principalmente, quando a utilização de lubrificantes líquidos é inviável. Maquinários de processamento de alimentos, onde não deve haver contaminação, aplicações onde lubrificantes líquidos oxidam ou se decompõem a altas temperaturas, e maquinário com baixo movimento relativo em suas partes móveis são exemplos onde as graxas são muito utilizadas. O presente trabalho tem como intuito uma avaliação tribológica comparativa entre uma graxa com espessante lítio e uma com espessante cálcio. Ensaio do tipo “pino-sobre-disco” são realizados no tribômetro do Laboratório de Tribologia - LATRIB – UFRGS, onde são aplicadas forças de contato, dos pinos sobre os discos, entre 200N e 600N. O material dos pinos e discos é o aço SAE-52100. Estudo estatístico com ANOVA demonstra que, com 200N, pode-se diferenciar os resultados de tempo de falha de lubrificação entre as graxas. Os ensaios com tal força demonstram o melhor desempenho da graxa com lítio, frente à graxa com cálcio. Tal desempenho deve-se à geometria das partículas do espessante.

PALAVRAS-CHAVE: graxa, lítio, cálcio, tribômetro, lubrificação.

Gomes, Kássio Ferreira. **Comparative evaluation of greases with calcium and lithium in pin-on-disk tests**. 2021. 27 pages. Final Paper Monograph of the Course in Mechanical Engineering – Mechanical Engineering Course, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

The good functioning of mechanical equipment is directly linked to a good lubrication of its component parts. Greases, which are high viscosity lubricants, are very useful in applications with high loads and, especially, when the use of liquid lubricants is not feasible. Food processing machinery, where there should be no contamination, applications where liquid lubricants oxidize or decompose at high temperatures, and machinery with low relative movement in its moving parts are examples where greases are widely used. The presente study aims to compare the tribological behavior between a grease with lithium thickener and one with calcium thickener. "Pin-on-disk" type tests are performed in the tribometer at the Tribology Laboratory - LATRIB - UFRGS, where contact forces are applied between the pins on the discs, between 200N and 600N. The material of the pins and discs is SAE-52100 steel. Statistical study with ANOVA demonstrates that, with 200N, it is possible to differentiate the results between the greases. Tests with such strength demonstrate the better performance of grease with lithium compared to grease with calcium. Such performance is due to the geometry of the thickener particles.

KEYWORDS: grease, lithium, calcium, tribometer, lubrication.

NOMENCLATURA

ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

UFRGS	Universidade Federal do Rio grande do Sul
LATRIB	Laboratório de Tribologia
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
ANOVA	Análise de Variância
VALOR-P	Probabilidade de a diferença detectada entre os grupos ter ocorrido ao acaso

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	01
2.1. Lubrificação	01
2.2. Regimes de Lubrificação	02
2.3. Graxas	03
2.3.1. Óleos Base	04
2.3.2. Espessantes	04
2.3.3. Aditivos	05
3. METODOLOGIA	06
3.1. Preparação de corpos de prova	06
3.2. Tribômetro	07
3.3. Graxas	08
3.4. Parâmetros de ensaios	09
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	09
5. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
APÊNDICE	16

1. INTRODUÇÃO

O bom funcionamento de equipamentos mecânicos está diretamente ligado a uma boa lubrificação de suas partes componentes. Os lubrificantes podem ser sólidos, líquidos e gasosos. Entre os líquidos, temos os óleos de baixa viscosidade, que são os lubrificantes mais utilizados. Adicionando-se espessantes aos óleos, são obtidas as graxas, que são lubrificantes de alta viscosidade. Se apresentam muito úteis em aplicações com temperaturas elevadas, grandes carregamentos e, principalmente, quando a utilização de lubrificantes líquidos é inviável. Maquinários de processamento de alimentos, onde não deve haver contaminação, aplicações onde lubrificantes líquidos oxidam ou se decompõem a altas temperaturas, e maquinário com baixo movimento relativo em suas partes móveis são exemplos onde as graxas são muito utilizadas (ERDEMIR, 2001).

Atualmente, de acordo com SHAN e BRAFF (2018), cerca de 75% do mercado mundial no segmento de graxas lubrificantes utiliza sabões de lítio em sua composição. Sabões de cálcio, por outro lado, são responsáveis por cerca de 10% deste mercado. Entretanto, estes números estão mudando rapidamente frente à alta demanda e/ou elevada especulação sobre o valor do lítio. No ano de 2018, por exemplo, graxas com espessante de lítio representavam 74,1% do mercado. Em 2017, este número era de 76,7%, representando uma queda relativa de 3,3% de sua utilização em apenas um ano. Por outro lado, as graxas feitas com espessantes de sabão de cálcio aumentaram de 9,7% para 11,3% no mercado mundial de 2014 a 2017, representando 16,4% de aumento relativo. Embora pareça uma variação pequena, mudanças no mercado de lubrificantes ocorrem de forma muito mais lenta do que neste caso das graxas (AUBIN, 2019). Além disso, o aumento de procura pelo lítio pode ser observado principalmente na indústria de baterias, para eletroportáteis, ferramentas e veículos elétricos, que estão com demanda elevada e crescendo consideravelmente.

Dentro do cenário exposto até aqui, o objetivo do trabalho é fazer uma avaliação tribológica comparativa entre uma graxa composta por lítio e uma composta por cálcio, em ensaios realizados em um tribômetro. Esse objetivo geral é alcançado através dos seguintes objetivos específicos:

- Realização de ensaios lubrificadas utilizando o tribômetro do laboratório de Tribologia da UFRGS – LATRIB;
- Análise de desempenho de duas graxas, com espessantes a base de cálcio e lítio, frente a diferentes pressões de contato.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Lubrificação

Um lubrificante pode ser entendido como qualquer substância que reduz o atrito e o desgaste, proporcionando um funcionamento suave e uma vida útil satisfatória para os elementos móveis de máquinas. Os lubrificantes podem ser sólidos (como o grafite) para uso a seco, líquidos (como óleos minerais), graxas para uso em rolamentos ou gases (como o ar) para uso em mancais a gás (HAMROCK et al., 2004).

A formação de um filme de óleo entre pares tribológicos depende primeiramente da geometria do contato, que pode ser entre superfícies conformantes e não conformantes. De acordo com SHIGLEY e MISCHKE (1989), um contato conformante é aquele em que os dois corpos se tocam em vários pontos antes de ocorrer qualquer deformação, como por exemplo um mancal de deslizamento. Um contato não conformante é aquele em que

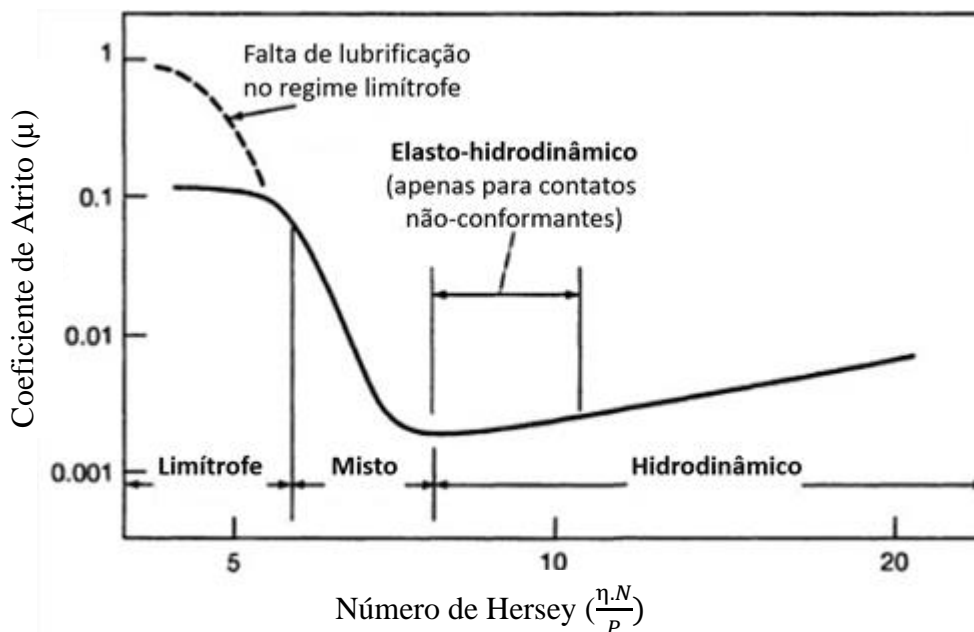
as formas dos corpos são diferentes o suficiente para que, sob carga zero, apenas se toquem em um ponto ou ao longo de uma linha, como por exemplo dentes de engrenagens.

2.2. Regimes de lubrificação

A curva de Stribeck (Figura 01) mostra que o atrito em contatos lubrificados com fluido é uma função não linear da viscosidade do lubrificante, da velocidade de entrada do lubrificante e da carga de contato. Parâmetros esses considerados pelo número de Hersey. O número de Hersey é dado pela Equação (01), onde η é a viscosidade dinâmica do fluido [$\frac{N.s}{m^2}$], N é a velocidade do fluido [m/s] e P a carga normal por comprimento de contato [$\frac{N}{m}$] (HAMROCK et al., 2004).

$$\text{Número de Hersey} = \frac{\eta.N}{P} \quad (01)$$

Figura 01: Curva de Stribeck.



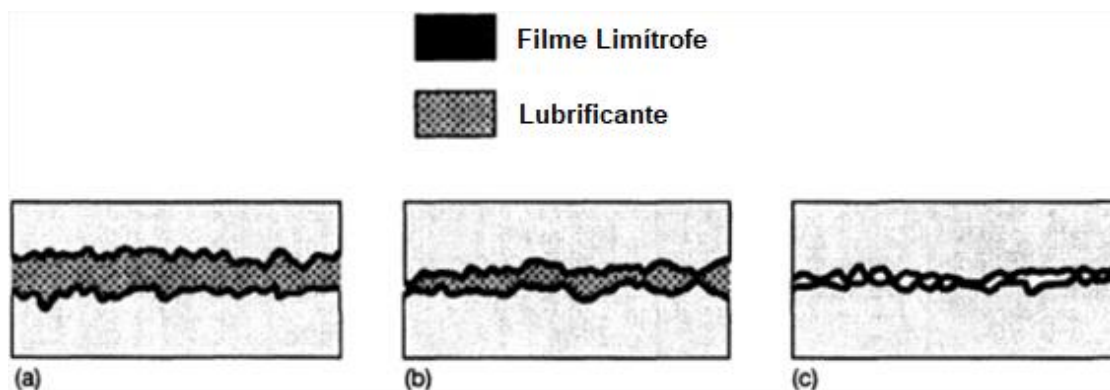
Fonte: adaptado de HAMROCK et al. (2004).

Conforme indicado na curva de Stribeck, observam-se 4 diferentes tipos de regimes de lubrificação. No caso de contato do tipo conformante, 3 regimes de lubrificação podem ocorrer: hidrodinâmico, misto e limítrofe. Já para contatos não-conformantes, tem-se o regime elasto-hidrodinâmico.

No regime hidrodinâmico, entre superfícies conformantes, observa-se a formação de filme de lubrificante completo, devido à pressão que surge no lubrificante em função da velocidade entre contatos, viscosidade do fluido e carga, mantendo o atrito baixo, com as superfícies separadas. Em tal situação, a viscosidade dinâmica do lubrificante dita o comportamento tribológico, pois o aumento do número de Hersey implica em aumento de espessura de filme e aumento do atrito, que não se deve ao contato entre as asperezas, mas sim ao atrito viscoso do lubrificante (HAMROCK et al., 2004). No regime limítrofe, o filme formado não é capaz de manter as superfícies completamente separadas, havendo

grande atrito e desgaste entre as mesmas. Neste regime, a rugosidade das superfícies é mais significativa do que a altura do filme (HAMROCK et al., 2004). No regime misto, há um filme considerável, mas as asperezas das superfícies conseguem se tocar, gerando coeficientes de atrito e desgastes intermediários entre os regimes hidrodinâmico e o limítrofe (HAMROCK et al., 2004). Na Figura 02 podemos ver os 3 regimes de lubrificação para superfícies conformantes.

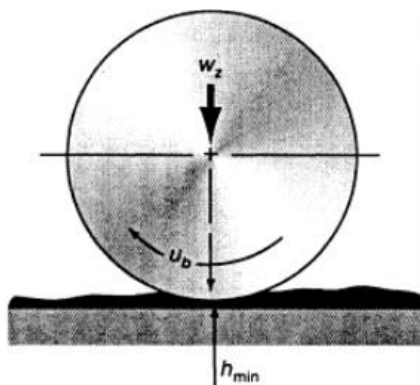
Figura 02: a) lubrificação hidrodinâmica; b) lubrificação mista; c) lubrificação limítrofe.



Fonte: Adaptado de HAMROCK et al. (2004)

Para superfícies não conformantes, segundo HAMROCK et al. (2004), teremos o regime elasto-hidrodinâmico. A pressão de contato se torna consideravelmente alta, acarretando em deformações elásticas do par tribológico. Nesta situação, o lubrificante aumenta a viscosidade com a pressão, o que auxilia na formação de uma película de fluido capaz de evitar a interação entre asperezas do par tribológico (Figura 03). Para este fenômeno de aumento de viscosidade do lubrificante com o aumento de pressão dá-se o nome de piezoviscosidade (PUNIT KUMAR e KHONSARI, 2009).

Figura 03: lubrificação elasto-hidrodinâmica.



Fonte: Adaptado de HAMROCK et al. (2004).

2.3. Graxas

Graxa lubrificante é o produto do espessamento de um fluido lubrificante, chegando a um estado sólido ou semissólido, por meio de agente espessante (HISSA, 1991). Normalmente, as graxas são compostas por 3 componentes: óleo base (50 a 95 por cento em massa [%m/m]), espessante (3 a 40[%m/m]) e aditivos (1 a 15[%m/m]) (KERNIZAN, 2019). Para que seja uma graxa e não óleo espessado, é obrigatório que

partículas do espessante se agrupem em uma rede tridimensional, formando uma estrutura semissólida. O agente espessante é insolúvel no fluido lubrificante e cria uma mistura heterogênea composta por agente dispersante e disperso, ou seja, fluido lubrificante e espessantes. Para MOTEURS (1975), a estabilidade da suspensão do espessante depende de quatro principais parâmetros: concentração do espessante, dimensões elementares do espessante, poder solvente do fluido lubrificante e das forças de atração entre as partículas do espessante e as cadeias do fluido.

Segundo KANAZAWA et al. (2017), em valores altos de número de Hersey, com filme completo, a graxa se comporta como óleo, mas com filme um pouco mais espesso. Nessa região, o filme é composto predominantemente pelo óleo base. À medida que o número de Hersey diminui, a graxa deixa de se comportar como óleo. Com esta redução, a espessura do filme vai ser definida pela morfologia e quantidade do espessante.

2.3.1. Óleos Base

Em graxas, o óleo base comumente é mineral, graxo ou sintético. A viscosidade e o tipo do óleo têm grande influência nas propriedades de uma graxa quando se trata da espessura da película lubrificante, solvência do fluido e separação da fase líquida (CARRETEIRO e BELMIRO, 2006).

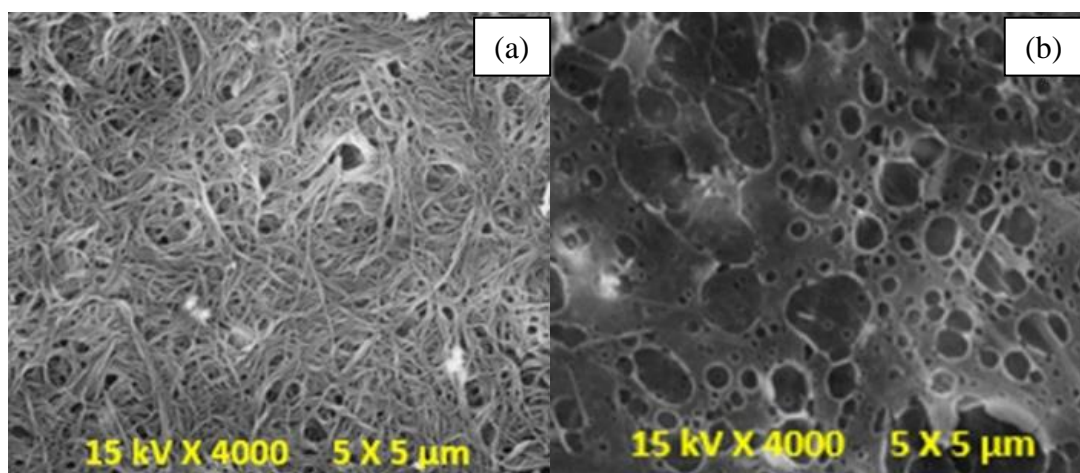
Óleos minerais são provenientes do petróleo e suas propriedades devem-se ao óleo cru que os gerou e ao método de refino. Óleos graxos são óleos vegetais e animais, compostos por cadeias mono ou poli-insaturadas, com alto grau de ácidos graxos que proporcionam altíssima lubricidade e aderência em superfícies metálicas, devido à sua alta polaridade. Os óleos graxos, por reagirem e se degradarem mais facilmente com altas temperaturas e pressões, vêm sendo substituídos por óleos minerais. Os óleos sintéticos são obtidos por síntese orgânica, com propriedades funcionais melhores que os óleos minerais e graxos, por terem suas cadeias mais estáveis e não se degradarem facilmente quando expostos a temperatura e pressão (CARRETEIRO e BELMIRO, 2006).

2.3.2. Espessantes

FAN et al. (2018) afirmam que a função lubrificante da graxa é normalmente considerada como o desempenho do óleo base ou aditivo, enquanto a função de espessante é negligenciada. O espessante, na verdade, também está envolvido no processo de lubrificação, e experimentos mostram que o espessante pode formar o filme depositado e o filme de reação triboquímica nas superfícies de contato. Assim, o espessante pode fornecer a função de lubrificação, uma vez que o filme de óleo não está mais presente ou foi quebrado sob alta carga aplicada ou outras condições adversas, porque pode prevenir eficientemente o contato direto entre asperezas. Para CANN et al. (1992), a concentração do espessante, somada ao aumento na viscosidade do óleo, contribui para um filme de maior espessura em condições hidrodinâmicas.

Os espessantes mais utilizados em graxas são a base de lítio e cálcio. Na Figura 04, são observadas as características morfológicas destes espessantes, onde é possível visualizar a diferença que existe no formato das moléculas formadas por lítio (Figura 04-a) e cálcio (Figura 04-b). Segundo CYRIAC et al. (2016), o lítio se apresenta em fibras cilíndricas alongadas, entrelaçadas por estarem concentradas. O cálcio apresenta morfologia esférica, um pouco alterada devido ao processo de lavagem da graxa com solventes para separação do espessante.

Figura 04: Imagens em MEV mostrando partículas de (a) lítio e (b) cálcio.



Fonte: adaptado de CYRIAC et al. (2016).

A Tabela 01 apresenta comprimentos e diâmetros médios das partículas dos espessantes lítio e cálcio:

Tabela 01: morfologia e dimensões das partículas dos espessantes.

Espessante	Morfologia	Diâmetro médio [μm]	Comprimento médio [μm]	Volume médio [μm^3]
Lítio	Fibras cilíndricas	$\approx 0,1000 \pm 0,0200$	$\approx 2,0000 \pm 0,0200$	$\approx 0,0157$
Cálcio	Esférica	$\approx 0,2600 \pm 0,0500$	–	$\approx 0,0090$

Fonte: adaptado de CYRIAC et al. (2016).

2.3.3. Aditivos

AHMAD et al. (2019) afirmam que a redução de atrito e desgaste em máquinas, como sistemas de engrenagens submetidos a condições extremas de pressão e ou temperatura, exigem lubrificantes cada vez mais eficientes. Nestas condições, normalmente os lubrificantes operam dentro do regime limítrofe ou misto. Assim, os aditivos utilizados neste tipo de aplicação visam reduzir atrito e desgaste.

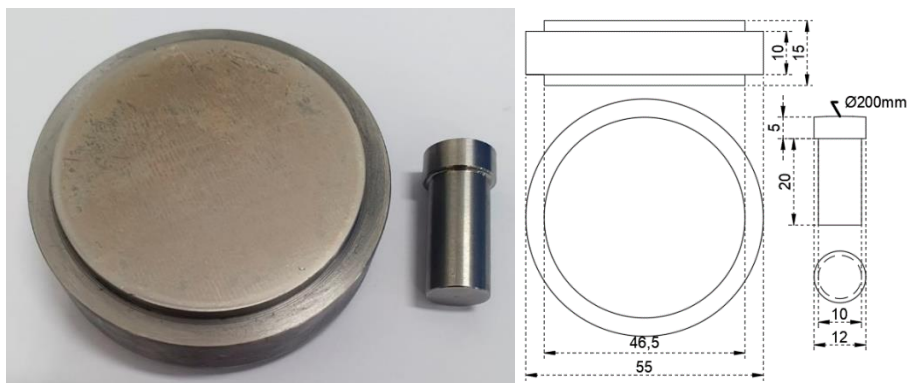
Segundo GUPTA et al. (2022), lubrificantes contendo dissulfeto de molibdênio (MoS_2) e outros aditivos têm se mostrado eficazes na redução do atrito interfacial. Os autores demonstraram experimentalmente que a mistura de MoS_2 nano particulado nos lubrificantes levaram a melhorias no desempenho tribológico de contatos não-conformantes, como vistos entre dentes de engrenagens. A adição de lubrificante sólido MoS_2 (concentração de 4% em peso) na graxa, comparada com a graxa misturada com grafite sólido (mesma concentração), resultou em menor desgaste nas superfícies de dentes de engrenagens. Para NAGARE e KUDAL (2018), a combinação dos aditivos grafite e dissulfeto de molibdênio é comumente associada ao desempenho antidesgaste para pressão extrema em graxas lubrificantes.

3. METODOLOGIA

3.1. Preparação dos corpos de prova

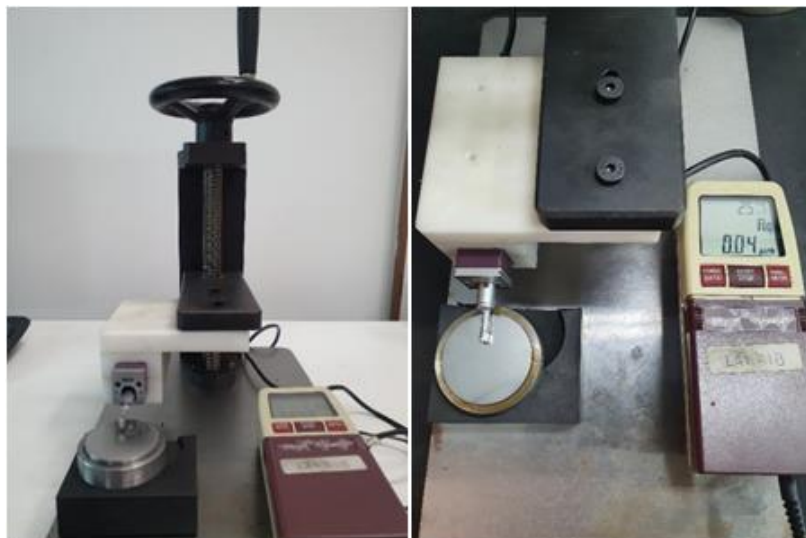
Os pares tribológicos (discos e pinos) utilizados neste estudo, apresentados na Figura 05, foram usinados e retificados a partir de blocos de aço SAE-52100, escolhidos por sua alta dureza e resistência ao desgaste. Como preparação das superfícies de disco e pino, aplicado um processo de lixamento molhado, com lixas de 3 granulometrias diferentes (400, 600 e 1200, nesta sequência), utilizando uma lixadeira/politriz metalográfica Arotec AROPOL-VV. Cabe ressaltar que os pinos foram usinados com curvatura na face de atrito, com raio de 200mm, com objetivo de evitar problemas de desalinhamento no contato não-conformante entre as superfícies de pino e disco.

Figura 05: pinos e discos.



Após lixamento, foram feitas medições de rugosidade, utilizando um rugosímetro Mitutoyo SJ-201, posicionado em uma base confeccionada especialmente para esse tipo de medição (Figura 06). Quatro medições radiais foram realizadas em cada disco, distanciadas por 90 graus, e a rugosidade adotada foi Rq. Para aceitação do disco para ensaio, foi adotado o valor máximo de Rq igual a 0,1um.

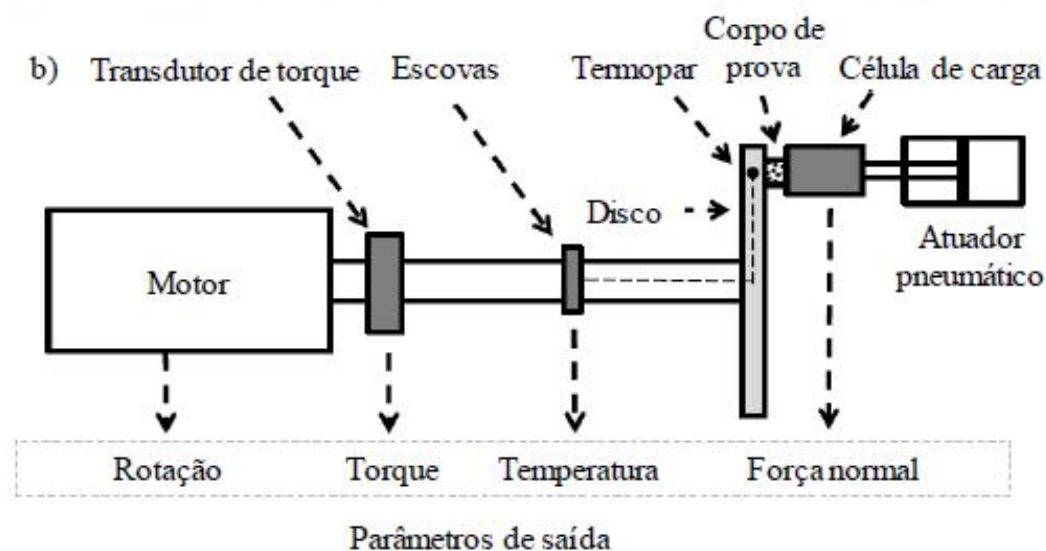
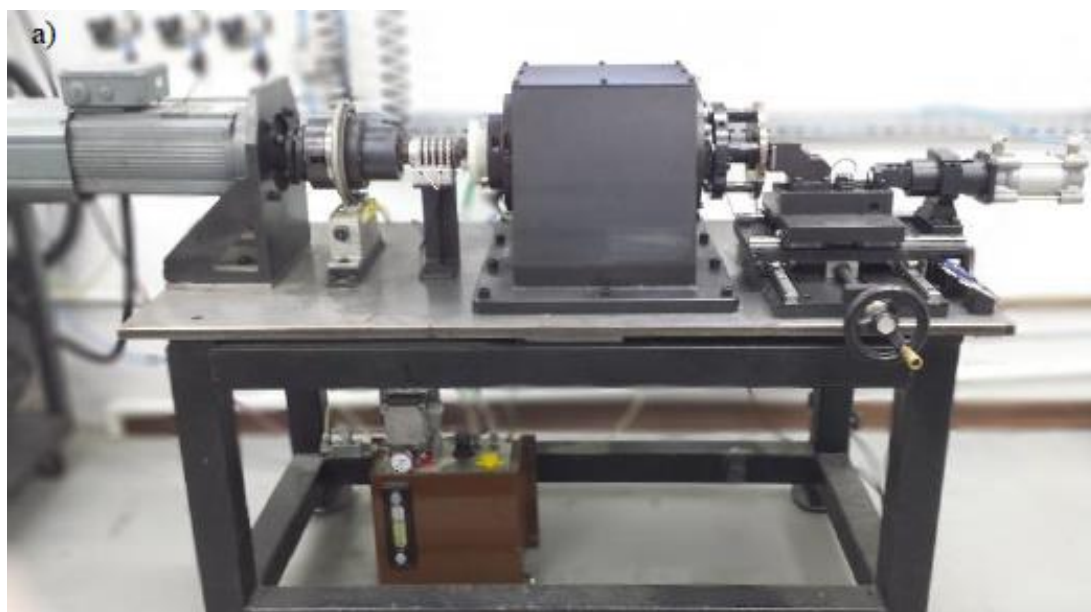
Figura 06: medição de rugosidade.



3.2. Tribômetro

Os experimentos foram realizados em tribômetro multifuncional (Figura 07) do Laboratório de Tribologia da UFRGS – LATRIB. Este equipamento permite o controle de força normal do pino sobre o disco e rotação do eixo, além de permitir o monitoramento de torque e velocidade de giro no eixo durante os experimentos. Nos ensaios, foram feitas aquisições de dados a 100Hz. Maiores detalhes deste equipamento podem ser vistos em NEIS (2012).

Figura 07: Tribômetro funcional. a) imagem real; b) diagrama esquemático.



Fonte: adaptado de BARROS, L. Y. et al (2019).

Os discos foram fixados no tribômetro por meio de um suporte parafusado diretamente ao eixo do mesmo, com uma trava externa. Os pinos foram fixados por meio de mandril, parafusado na base móvel de atuação pneumática com força controlada.

3.3. Graxas

Duas graxas com formulações conhecidas foram escolhidas para os ensaios deste estudo. Importante salientar que essas graxas apresentam os mesmos tipos de óleos base, mesmas viscosidades de óleos base em variadas temperaturas, mesmos tipos e concentrações de aditivos e, o mais importante, mesma concentração de espessantes, apenas variando o tipo de espessante, conforme Tabela 02.

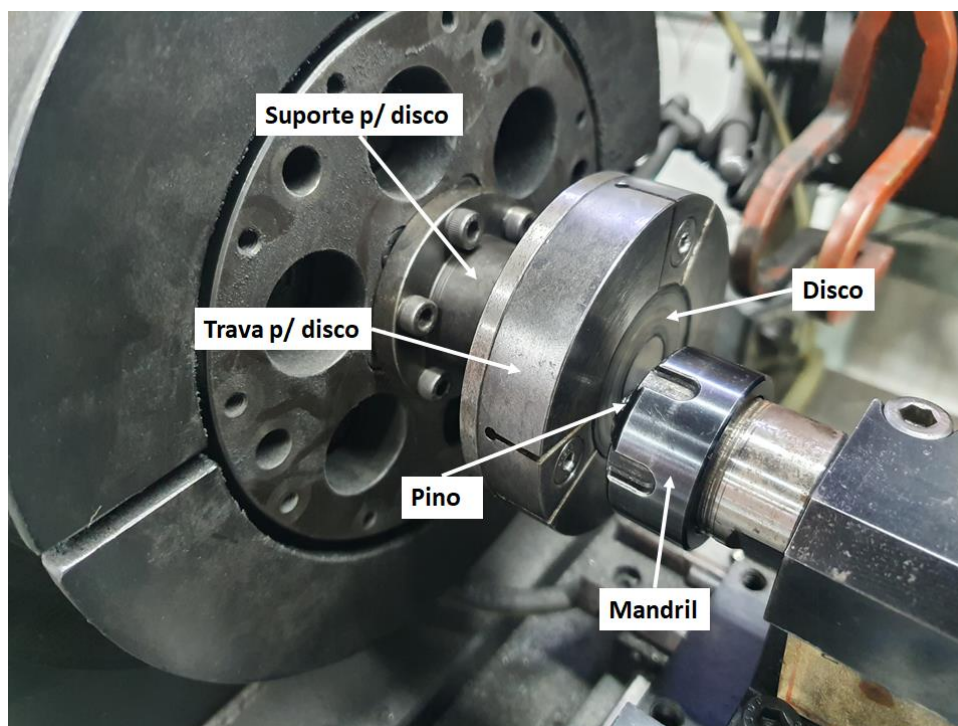
Tabela 02: Características das graxas utilizadas.

Características de formulação	Graxa LiM500	Graxa CaM500
Classe	Formulação UTFPR	Formulação UTFPR
Tipo de óleo base	Mineral	Mineral
Viscosidade do óleo base a 32°C [mm ² /s]	865,2	865,2
Viscosidade do óleo base a 40°C [mm ² /s]	500	500
Viscosidade do óleo base a 100°C [mm ² /s]	32,6	32,6
Tipo de espessante	Sabão de lítio	Sabão de cálcio
Concentração de espessante [%m/m]	7	7
Tipo de aditivo sólido	MoS ₂ + Grafite	MoS ₂ + Grafite
Concentração de aditivos sólidos [%m/m]	4	4

Fonte: Adaptação de FERRER (2020).

As graxas foram acondicionadas em seringas milimetradas para facilitar a aplicação nos discos para os ensaios. Experimentos preliminares mostraram que 1,5 ml de graxa, distribuída uniformemente com pano, foram o suficiente para o recobrimento da pista de atrito (vide Apêndice, Figura A01 (a)). A Figura 08 mostra o aparato experimental.

Figura 08: aparato experimental: disco e pino fixados no tribômetro.



3.4. Parâmetros de ensaios

A tabela 03 apresenta o procedimento experimental adotado. A velocidade de deslizamento foi mantida constante em 0,5 m/s em todos os ensaios. Variou-se a força normal em 5 patamares distintos, variando de 200 a 600N. Cada ensaio foi repetido três vezes. No total foram realizados 30 ensaios.

Tabela 03: lista de ensaios com referidas especificações

Ensaio [Un.]	Graxa	Força normal [N]	Velocidade de deslizamento [m/s]
3	Lítio	200	0,5
		300	
		400	
		500	
		600	
	Cálcio	200	
		300	
		400	
		500	
		600	

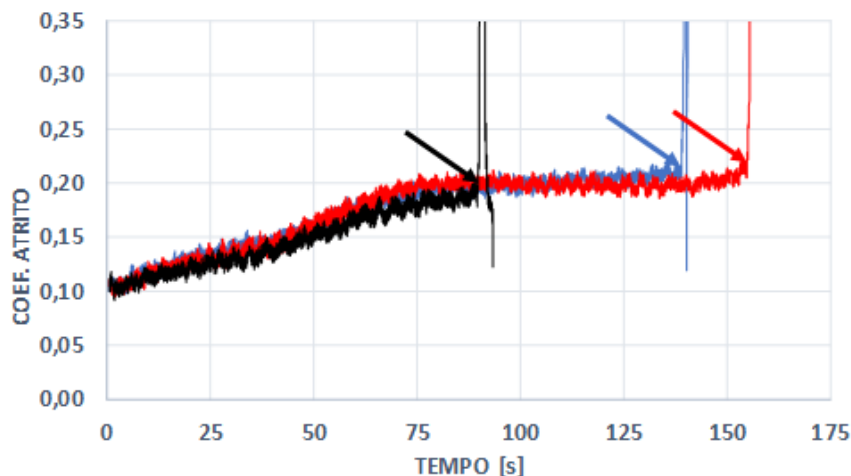
O final de cada ensaio foi determinado pela subida abrupta do coeficiente de atrito devido à falha de lubrificação. Para cada um dos ensaios, o sistema de aquisição de dados do tribômetro salvou arquivos contendo o tempo do ensaio, velocidade de deslizamento do disco, torque frenante no eixo do disco e força normal do pino contra o disco. O coeficiente de atrito é calculado em Excel utilizando a Equação (2), onde μ é o coeficiente de atrito, T é o torque do eixo [Nm], F [N] é a força normal entre pino e disco e R [m] é o raio de deslizamento do pino em relação ao centro do disco.

$$\mu = \frac{T}{F \cdot R} \quad (2)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

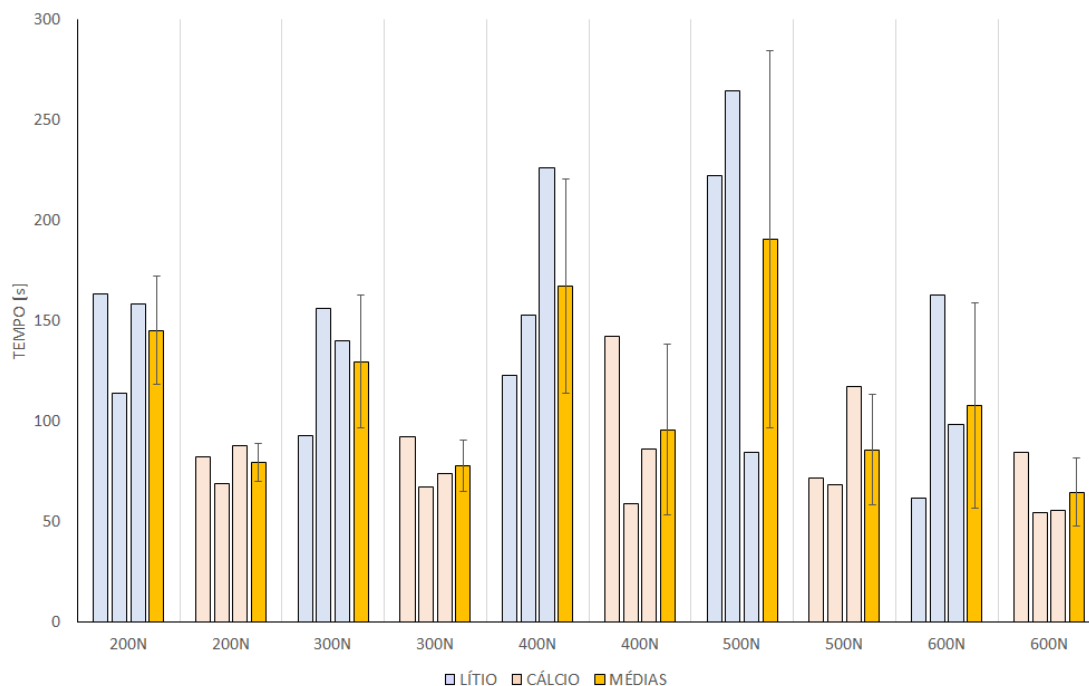
A Figura 09 exemplifica o atrito calculado ao longo dos três ensaios realizados com o lubrificante a base de lítio e com força normal de 300N. As setas indicam os tempos finais de ensaio, que ocorreram devido às falhas catastróficas de lubrificação e subida abrupta de atrito.

Figura 09: Coeficiente de atrito para graxa com espessante lítio, atuação de 300N.



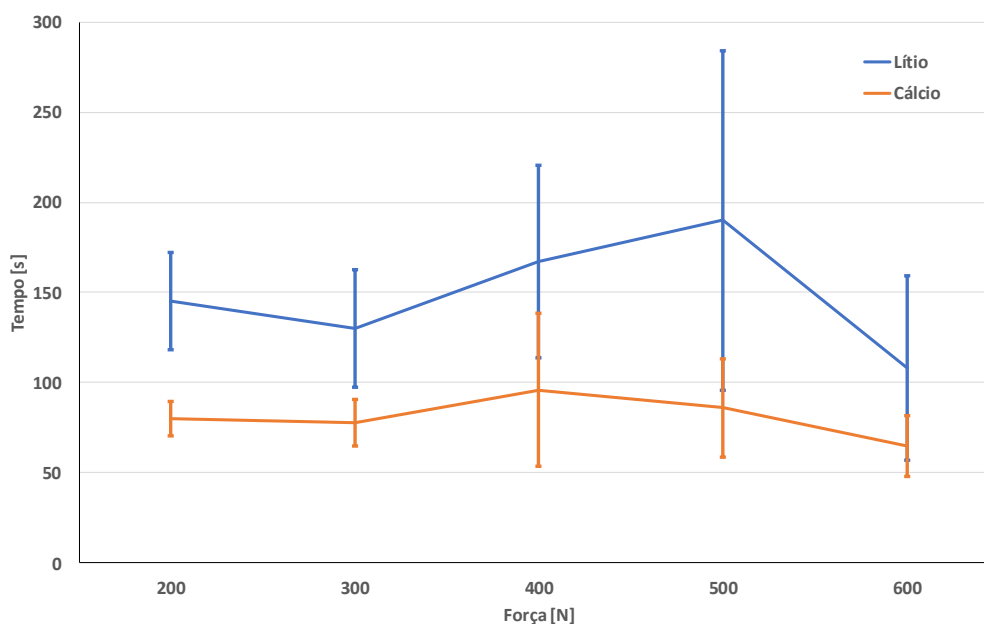
Os demais experimentos usaram o mesmo critério da elevação abrupta do coeficiente de atrito como final de ensaio. A figura 10 apresenta os tempos até a falha de todos os ensaios. Ao lado das três barras em cada uma das condições, é apresentada também uma barra com o valor médio da duração dos três ensaios correspondentes, bem como uma barra de erro que representa o desvio padrão.

Figura 10: Tempo até a falha das graxas para diferentes forças normais.



Na Figura 10, observa-se que o tempo médio de falha da graxa de lítio foi sempre maior que a de cálcio para cada uma das forças aplicadas. Mesmo apresentando desempenho inferior à graxa de lítio, a graxa de cálcio mostrou-se mais estável, com menores variações de tempos de ensaios em todas as forças de atuação, apresentando também menores desvios padrão entre ensaios de mesma força de atuação. Na Figura 11, são apresentados somente os valores médios de cada caso (graxa e força) para melhor entendimento dos comportamentos de tempos e desvios padrão dos ensaios.

Figura 11: Tempo de falha das graxas para diferentes forças normais.



Pode-se observar que forças de atuação mais baixas, como 200N e 300N, apresentaram menores desvios padrão para ambas as graxas, mostrando serem estas as forças mais adequadas para um comparativo entre estas graxas. Acima de 400N, os ensaios apresentaram grandes valores de desvios padrão, aumentando as incertezas quanto ao desempenho das graxas.

Para a comparação de graxas, utilizou-se um método estatístico para verificar em quais forças utilizadas no estudo pode-se diferenciar as graxas. Para isso, utilizou-se a análise de variância (ANOVA), com significância de 5%. Os resultados desta análise são elencados na Tabela 04, onde o Valor-P, calculado através do software Excel, é mostrado para cada força. Caso o Valor-P seja menor do que o valor de significância escolhido (5%), pode-se dizer que existe diferença significativa entre as graxas. Caso contrário, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que os resultados entre as graxas são diferentes.

Tabela 04: análise de variância.

ENSAIO	SIGNIFICÂNCIA (α)	VALOR-P	DIFERENCIÁVEIS
200N		1,66%	SIM
300N		6,30%	NÃO
400N	5,00%	14,37%	NÃO
500N		13,79%	NÃO
600N		23,94%	NÃO

Observa-se que apenas os ensaios com 200N são significativos, apresentando pelo menos 95% de confiança de que há diferença entre os resultados das 2 graxas. Em outras palavras, apenas em 200N as graxas são diferentes. Demais ensaios com forças maiores são inconclusivos, pois não existem evidências suficientes para afirmar que os resultados são diferentes. Vale salientar que isso pode mudar se for realizado um conjunto maior de ensaios.

Uma análise ANOVA geral entre as graxas também foi realizada. Para isso, agrupou-se os valores dos tempos de falha de todos os ensaios para cada graxa, comparando-as através da ANOVA. O resultado obtido do valor-P foi de 0,02%, indicando a existência de diferença geral entre as graxas.

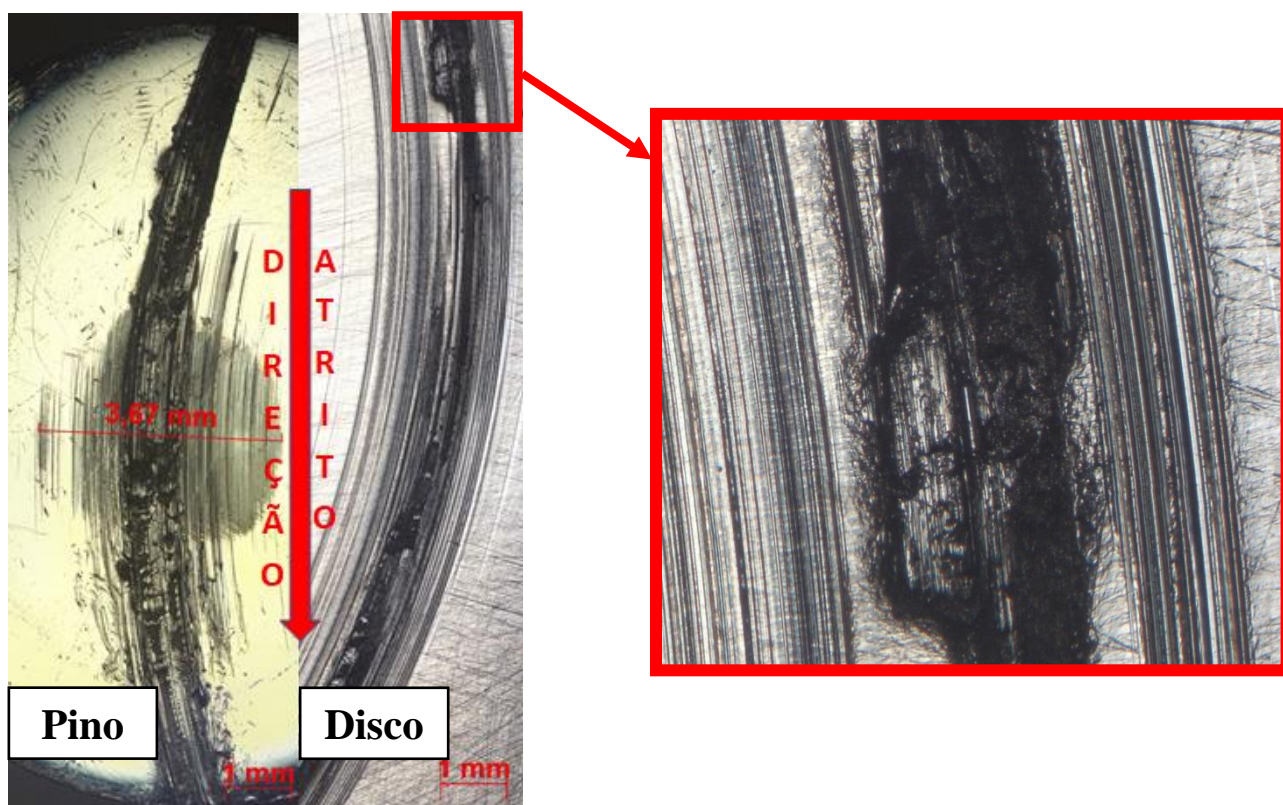
Conforme discutido anteriormente, a composição das graxas é exatamente a mesma, exceto pelo espessante. Logo, diferenças de desempenho apresentadas se devem exclusivamente aos espessantes. Segundo CANN e SPYKES (1992), a espessura do filme é constituída em parte por ação elasto-hidrodinâmica, em parte por camadas residuais formadas pelo espessante nas superfícies.

Uma hipótese que explique o melhor desempenho da graxa com lítio é de que a geometria deste tipo de espessante se apresenta em fibras cilíndricas finas, o que favorece o entrelaçamento das mesmas, mantendo-as mais aglomeradas e estáticas no filme (CYRIAC et al., 2016). Desta forma, o filme se mantém íntegro por mais tempo, melhorando a performance da graxa. Outra hipótese é que a fibra fina do lítio consegue se inserir melhor nas reentrâncias da superfície, melhorando a capacidade do lubrificante manter-se na superfície e formar o filme de reação triboquímica.

Por outro lado, a geometria da partícula do espessante cálcio, esférica, encurta os tempos de ensaios. Enquanto o lítio facilmente se aglomera, as partículas de cálcio têm maior liberdade de movimentação no filme. Como as partículas de cálcio apresentam menor fixação em sua rede estruturante, acabam entrando em contato de forma mais frequente com as superfícies do par tribológico, depositando-se mais facilmente nas asperezas (CYRIAC et al., 2016).

Além do tempo de falha em cada ensaio, foi analisado o mecanismo de desgaste da falha. A Figura 12 mostra imagens microscópicas das superfícies do disco e pino após os experimentos com lítio a 300 N. As imagens do par tribológico para os demais experimentos resultaram em aspectos superficiais similares aos apresentados na Figura 12.

Figura 12: Imagens da cabeça do pino e de parte do trilho atritado do disco.



Fica claro que a falha da lubrificação gera desgaste abrasivo durante o ensaio e desgaste adesivo ao final do mesmo (Apêndice, Figura A01). Na Figura A01-(c), por exemplo, pode-se observar marcas iniciais de abrasão aos 80 segundos no ensaio com graxa de lítio a 300N, que veio a apresentar falha aos 140 segundos, com desgaste adesivo (Figura A01-(f)). Segundo FAN et al. (2018), a falha ocorre devido ao rompimento do filme lubrificante. Desta forma, devido à afinidade química do par, ocorre adesão com arrancamento de material superficial, tanto de pino quanto de disco. Como pode-se observar na Figura 12, ficam evidentes no disco as marcas de desgaste por adesão, com arrancamentos significativos. Debris (detritos soltos durante o contato tribológico) podem ser encontrados, tanto livres quanto aderidos à superfície (Hu et al., 2017). Já o desgaste na cabeça do pino, também apresentou riscamento devido ao filme transferido. Segundo STACHOWIAK e BATCHELOR (2005), a formação de filmes de transferência é uma característica do desgaste adesivo onde o material é transferido de uma superfície para outra antes de ser liberado como uma partícula de desgaste.

Durante os ensaios, observou-se que rapidamente ocorre a falha na lubrificação entre o par tribológico. Por tratar-se de contato não-conformante, partindo em regime elasto-hidrodinâmico, a espessura do filme muda rapidamente para escassez (HU et al., 2017), e isso ocorre devido às mudanças nas propriedades de fluxo reológico causadas pela degradação por cisalhamento do espessante (CEN et al., 2014) e devido ao fluxo lateral induzido por pressão e força centrífuga (LUGT, 2012). Sobre este último aspecto, o pino varre a graxa para áreas adjacentes ao caminho de atrito e, com a ausência de mecanismo de reposição da mesma, há o decaimento da espessura do filme até o completo colapso da lubrificação.

5. CONCLUSÕES:

Com relação aos resultados desse estudo, conclui-se que:

- Estatisticamente, a graxa com espessante de lítio teve melhor desempenho geral em tempo até falha crítica de lubrificação quando comparada à graxa com espessante de cálcio.
- O melhor desempenho da graxa com espessante de lítio pode ser relacionado com a geometria do mesmo, apresentando fibras finas, cilíndricas e alongadas. Por outro lado, o espessante de cálcio se apresenta de forma esférica.
- Os experimentos com graxa de cálcio resultaram em tempos até falha com menor dispersão do que os com graxa de lítio.
- Ensaio com força de atuação de 200N apresentaram menores desvios padrão, bem como resultados significativos, apresentando pelo menos 95% de confiança de que há diferença entre os resultados das 2 graxas.
- O mecanismo de desgaste no par tribológico, após a falha dos lubrificantes, foi a adesão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, B., CHAROO, M., “**Effect of Additives on the Tribological Properties of Various Greases-A Review**”, *Materials Today: Proceedings* (2019) 18 4416-4420.

- AUBIN, J. S., “**Estaria a indústria de graxas tendendo ao uso de cálcio?**”, <https://portallubes.com.br/2019/01/graxas-tendendo-ao-uso-de-calcio/> acessado em 09/07/2021.
- BARROS, L. Y., FERREIRA, N. F., NEIS, P. D., PEREIRA, C. H. S., POLETTO, J. C., “**Influence of copper on automotive brake performance**”, WEAR 426-427, 2019.
- CANN, P. M., SPIKES, H.A., “**Film measurements of lubricating greases under normally starved conditions**”. NLGI Spokesm, 56 (2), 21-27, 1992.
- CANN, P. M., WILLIAMSON, B. P., COY, R. C., SPIKES, H. A.. “**The behaviour of grease in elastohydrodynamic contacts**”. J. Phys., D Appl. Phys. 25 (1A), 124-132, 1992.
- CARRETEIRO, R.; BELMIRO, P., “**Lubrificantes e Lubrificação Industrial**”, Rio de Janeiro, 1.ed., Interciência, 2006.
- CEN, H., LUGT, P. M., MORALES-ESPEJEL, G. E., “**Film thickness of mechanically worked lubricating grease at very low speeds**”. Tribol. Trans. 57 (6), 1066–1071, 2014.
- CYRIAC, F., LUGT, P. M., BOSMAN, R., PADBERG, C. J., VENNER, C. H. et al., “**Effect of thickener particle geometry and concentration on the grease EHL film thickness at médium speeds**”, Tribology Letters, v. 61, n. 2, p. 18, 2016.
- ELLWANGER, D., “**Análise de desempenho tribológico de lubrificantes automotivos em ensaio de escorregamento metal-metal**”, Monografia (graduação em engenharia), 20 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.
- ERDEMIR, A., “**Modern Tribology Handbook**”, vol II, Bhushan, B. (ED.), CRC Press, p. 787 – 825, 2001.
- FAN X., LI W., LI H., ZHU M., XIA Y., WANG J., “**Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases**”, Tribology International (2018) 118 128-139.
- FERRER, B. P., “**Avaliação em laboratório do efeito da formulação e das propriedades de graxas lubrificantes no desempenho tribológico do contato roda-trilho.**” Dissertação, 202 p, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.
- GUPTA, N., TANDON, N., PANDEY, R., VIDYASAGAR, K., “**Tribodynamic studies of textured gearsets lubricated with fresh and MoS₂ blended greases**”. Tribology International (2022) 165 107-247.
- HISSA, R., “**Tecnologia de graxas lubrificantes – fundamentos**”. Rio de Janeiro: Texaco Brasil, 1991. 57 p.

- Hu, Y., Wang, L., Politis, D. J., & Masen, M. A. (2017). Development of an interactive friction model for the prediction of lubricant breakdown behaviour during sliding wear. *Tribology International*, *110*, 370–377.
<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2016.11.005>
- KANAZAWA, Y., SAYLES, R. S., KADIRIC, A., “**Film formation and friction in grease lubricated rolling-sliding non-conformal contacts**”. *Tribology International* (2017) 109 505-518.
- KERNIZAN, C. F., Lubgrax Meeting, 10., 2019, São Paulo. “**A Window In Grease Technology**”. São Paulo: 2019. Disponível em: https://www.sellcommevents.com/lubgraxmeeting2019/wp-content/uploads/sites/16/2019/08/10-Lubgrax-Meeting_KVTCLLC.pdf. Acessado em 26/10/2012.
- LUGT, P. M., “**Grease lubricating in rolling bearings**”. Wiley, Chichester, 2012.
- MOTEURS, D., “**La Lubrification Industrielle**”, Paris, 2. ed., Technip, 1985.
- NAGARE, P., KUDAL, H., “**A Taguchi Approach on Influence of Graphite as an Anti-Wear Additive on the Performance of Lithium Grease**”. *Procedia Manufacturing* (2018) 20 487-492
- NEIS, P. D., “**Projeto e construção de um tribômetro com controle independente de temperatura no disco**”, Tese (doutorado em engenharia), 130 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- PUNIT KUMAR, KHONSARI, M. M., “**On the role of lubricant rheology and piezo-viscous properties in line and point contact EHL**”, *Tribology International* Vol. 42, Issues 11–12, 2009, Pages 1522-1530.
- SHAN, R., BRAFF, S., “**Lithium ion battery demands and a discussion of lithium supply crisis: How worried should we be?**”, *National Association Of Lubricating Grease Institute*, vol. 82, number 5, p. 26, 2018.
- STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W., “**Engineering Tribology**”, ed. 3, 2005.

APÊNDICE

Figura A01: imagens ensaio com graxa de lítio a 300N; (a) graxa aplicada no disco; (b) 35s; (c) 80s; (d) 115s; (e) 130s; (f) final do ensaio em 140s.

