

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

LIZANDRO SPIGOLON

**ESTUDO DA LUBRICIDADE DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS UTILIZADOS EM
MATERIAL DE ATRITO PARA FREIOS AUTOMOTIVOS**

CAXIAS DO SUL
2020

LIZANDRO SPIGOLON

**ESTUDO DA LUBRICIDADE DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS UTILIZADOS EM
MATERIAL DE ATRITO PARA FREIOS AUTOMOTIVOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientadora: Prof. Pós-Dr. María Cristina Moré Farias

CAXIAS DO SUL

2020

LIZANDRO SPIGOLON

**ESTUDO DA LUBRICIDADE DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS UTILIZADOS EM
MATERIAL DE ATRITO PARA FREIOS AUTOMOTIVOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Aprovado em 07/12/2020

Banca examinadora

Prof. Pós Dr. María Cristina Moré Farias

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Márcio Ronaldo Farias Soares

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Me. Francisco Lanferdini Serafini

Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da variação do coeficiente de atrito de compósitos constituídos por resina fenólica e diferentes lubrificantes sólidos em função da temperatura. Para isso, foram realizados ensaios de deslizamento alternado usando um tribômetro com geometria esfera sobre placa, equipado com um módulo de aquecimento. Os lubrificantes sólidos avaliados foram grafite sintético, grafite natural, bissulfeto de molibdênio e trissulfeto de antimônio. Os ensaios foram conduzidos aplicando-se uma força normal de 10 N para as etapas de assentamento e para a etapa de ensaio, ao longo da qual foram coletados o tempo e a temperatura de ensaio, assim como coeficiente de atrito dos lubrificantes. Os ensaios foram realizados com aumento contínuo da temperatura, desde a temperatura ambiente do laboratório, 23 °C, até 400 °C, durante 2 h, utilizando-se uma frequência de 0,5 Hz e um comprimento de trilha de desgaste de 4 mm. A propensão ao *fade* dos compósitos com os diferentes tipos de lubrificantes sólidos foi associada à temperatura para a qual ocorreu a queda brusca no coeficiente de atrito. Os resultados apontaram para o trissulfeto de antimônio como o lubrificante sólido menos propenso ao *fade*, pois apresentou a maior temperatura antes do início da queda acentuada do coeficiente de atrito. O bissulfeto de molibdênio teve o pior comportamento frente ao *fade*. Esse lubrificante sólido também apresentou a menor variação percentual no coeficiente de atrito. Em contraste, o dissulfeto de molibdênio exibiu a temperatura mais baixa para o início do *fade* e a maior variação do coeficiente de atrito com o aumento progressivo da temperatura de teste.

Palavras chave: Compósitos. Lubrificante sólido. Temperatura. Coeficiente de atrito. Lubricidade.

ABSTRACT

The present work aims to study the variation of the friction coefficient of composites constituted by phenolic resin and different solid lubricants as a function of temperature. Reciprocating sliding tests were conducted using a tribometer with a ball on plate geometry, equipped with a heating chamber. The solid lubricants evaluated were synthetic graphite, natural graphite, molybdenum disulfide, and antimony trisulfide. The tests were conducted using a normal force of 10 N for the running-in steps and the test step, along which the test time, the test temperature, and the friction coefficient of solid lubricants were recorded. The tests were carried out progressively increasing the chamber temperature, from the laboratory room temperature, 23 ° C, to 400 ° C, for 2 h, using a frequency of 0.5 Hz and a wear track length of 4 mm. The propensity to fade of the composites with the different types of solid lubricants was associated with the temperature for which an abrupt decrease in friction coefficient occurred. The results pointed to the antimony trisulfide as the solid lubricant least prone to *fade* since it reached the highest temperature before the sudden drop of the friction coefficient. This solid lubricant also showed the lowest percent variation in friction coefficient. In contrast, the molybdenum disulfide exhibited the lowest temperature to fade onset and the highest friction coefficient variation with the progressive increase in temperature.

Palavras chave: Composites. Solid lubricant. Temperature. Friction coefficient. Lubricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de frenagem de um automóvel.....	11
Figura 2 – Esquema de um sistema de freio de tambor.....	12
Figura 3 – Esquema de um sistema de freio de disco.....	13
Figura 4 – Pastilha de freio.....	14
Figura 5 – Ensaio preliminar para amostra de resina fenólica e grafite.....	17
Figura 6 – (a) Superfícies de contato friccionando; (b) Gases de degradação forçando afastamento das superfícies de contato.....	18
Figura 7 – Análise termogravimétrica da resina fenólica.....	18
Figura 8 – Discos de freio com ranhuras.....	19
Figura 9 – Misturador SEMCO.....	20
Figura 10 – Molde da pastilha.....	21
Figura 11 – Pastilha composta por resina fenólica e lubrificante sólido.....	21
Figura 12 – Amostras provenientes do corte da pastilha.....	22
Figura 13 – Serra circular equipada com disco de corte de metais.....	23
Figura 14 – Tribômetro Bruker UMT Tribolab.....	23
Figura 15 – Detalhes do tribômetro.....	24
Figura 16 – Amostra ensaiada posicionada no módulo de aquecimento.....	24
Figura 17 – Representação gráfica das etapas do ensaio separadas por faixa de cores...	25
Figura 18 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (Grafite sintético - GS).....	27
Figura 19 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (Grafite natural - GN).....	28
Figura 20 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (Bissulfeto de molibdênio - BM).....	28
Figura 21 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (Trissulfeto de antimônio - TA).....	29
Figura 22 – Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura e curva derivada para amostra GS.....	30
Figura 23 – Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura e curva derivada para amostra GN.....	30
Figura 24 – Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura e curva derivada para amostra BM.....	31
Figura 25 – Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura e curva derivada para amostra TA.....	31
Figura 26 – Coeficiente de atrito inicial e final.....	32
Figura 27 – Variação percentual do coeficiente de atrito com a temperatura.....	34

Figura 28 – T_{onset} e variação da temperatura	35
Figura 29 – Exemplo das peças a serem cortadas.....	37
Figura 30 – Exemplo de rebarbas em corpos de prova.....	37
Figura 31 – Acoplamento do módulo de aquecimento.....	38
Figura 32 – (a) Esfera fixada ao porta-esferas; (b) Porta-esferas sendo fixado à célula de carga	38
Figura 33 – Corpo de prova fixado ao módulo de aquecimento	39
Figura 34 – Abrir o algoritmo (scrip)	40
Figura 35 – Destino de armazenamento do arquivo gerado no ensaio	41
Figura 36 – Botão “Graph” na guia “Script” para abertura de gráficos de controle de ensaio	42
Figura 37 – Leiaute recomendado para início do ensaio.....	43
Figura 38 – Botão "Start" para início do ensaio	43
Figura 39 – Ensaio exemplo.....	45
Figura 40 – Ensaio dinâmico com sulfeto de manganês	46
Figura 41 – Ensaio dinâmico com grafite flake	46
Figura 42 – Sulfeto de manganês e ferro	47
Figura 43 – Grafite sintético mola	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração dos parâmetros para ensaios dinâmicos	25
Tabela 2 – Pontos iniciais e finais de temperatura e coeficiente de atrito	48
Tabela 3 – Resultados de variação do coeficiente de atrito e temperatura	48

LISTAS DE SIGLAS

UCS	Universidade de Caxias do Sul
IMC	Instituto de Materiais Cerâmicos
CGEE	Centro de Gestão de Estudos Estratégicos
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
NAO	Non-Asbestos Organic
DTA	Differential Thermal Analysis
GN	Grafite natural
GS	Grafite sintético
BM	Bissulfeto de molibdênio
TA	Trissulfeto de antimônio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	JUSTIFICATIVA.....	9
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Objetivo geral	10
1.2.2	Objetivos específicos	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	SISTEMA DE FREIO	11
2.1.1	Tambores e discos de freio	13
2.2	MATERIAIS DE FRICÇÃO.....	14
2.3	LUBRIFICANTES.....	15
2.3.1	Lubrificantes sólidos	15
2.4	FADE	16
3	METODOLOGIA	20
3.1	PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	20
3.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	22
3.3	ENSAIOS TRIBOLÓGICOS.....	23
3.4	ENSAIOS DINÂMICOS – VARIAÇÃO CONTÍNUA DA TEMPERATURA.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	EFEITO DA TEMPERATURA NO COEFICIENTE DE ATRITO	27
4.2	METODOLOGIA PROPOSTA	36
4.2.1	Preparação das amostras	36
4.2.2	Montagem peças e acessórios ao tribômetro	37
4.2.3	Fixação do corpo de prova	39
4.2.4	Configuração do software	39
4.2.5	Ajuste do tribômetro	42
4.2.6	Finalização do ensaio	44
4.3	COMPROVAÇÃO DO MÉTODO.....	46
5	CONCLUSÃO	49
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O que se percebe na indústria automobilística do Brasil é que seu maior desafio é encontrar soluções que garantam maior competitividade ao setor. Essas soluções apontam para a produção de veículos mais leves, econômicos e menos poluentes, mantendo uma harmonia entre tecnologia e sustentabilidade. Um estudo de prospecção do mercado automotivo, encomendado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) junto ao Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE) (ABDI, 2009), identificou a necessidade de aplicação de novas soluções com maior tecnologia, eficiência, confiabilidade e sustentabilidade de produtos e processos do segmento das empresas brasileiras de autopeças, buscando o fortalecimento da competitividade global com a visão de futuro para o ano 2034.

Para atender as demandas do mercado em termos de eficiência, durabilidade e sustentabilidade ambiental, o setor de produção de peças para sistemas de freio é cada vez mais cobrado pela produção de materiais de fricção com maior eficiência na frenagem, menor desgaste e menor emissão de resíduos para o ambiente. Os veículos são considerados fontes substanciais de resíduos lançados ao meio ambiente, por meio do desgaste de pastilhas, lonas, discos e tambores de freios, além das borrachas de pneus, gasolina e óleos lubrificantes derramados (PEREIRA; BORGES; LEANDRO, 2010).

Uma metodologia ainda comumente adotada por indústrias de materiais de fricção é o desenvolvimento de produtos baseado em tentativa e erro, engenharia reversa ou importação de tecnologias. Este tipo de abordagem na área de engenharia de freios se explica pela complexidade da composição dos materiais de fricção, que são materiais compósitos híbridos constituídos por uma grande variedade de matérias-primas, como resinas fenólicas, fibras metálicas e diferentes compostos cerâmicos (BLAU, 2001). Essas matérias-primas determinam um conjunto de propriedades dos materiais de fricção, como propriedades químicas, físicas, térmicas (calor específico, condutividade térmica e difusividade.) e mecânicas (rigidez, resistência à flexão e compressibilidade), além das propriedades tribológicas (atrito, desgaste e lubricidade) (BLAU, 2004). A influência dessas matérias-primas no desempenho dos sistemas de freio é tão complexa que o processo de obtenção da formulação para um determinado material de fricção é ainda referido mais a uma arte do que a uma ciência (KUMAR; BIJWE, 2010).

Assim, o grande desafio para a área de pesquisa em sistemas de freio é a exploração ou aplicação do conhecimento técnico-científico que permita a produção de sistemas de freio competitivos e seguros em nível internacional. As demandas específicas em termos de desempenho do atrito e desgaste dos sistemas de freio são grandes. O coeficiente de atrito deve ser relativamente alto, porém estável. Essa estabilidade deve se manter independentemente das variações de temperatura, umidade, desgaste, corrosão e/ou contaminação oriunda da utilização do veículo (poeiras e gases diversos). Além desses requerimentos específicos de segurança, outras demandas aparecem, como a durabilidade e o alto conforto, associados aos baixos níveis de vibração e de ruído (BLAU, 2004).

Estudos na área de tribologia de sistemas de freios têm contribuído para o desenvolvimento de produtos inovadores com amplo benefício, tanto para a população quanto para o meio ambiente. O aumento da resistência ao desgaste e a manutenção do coeficiente de atrito em níveis adequados e estáveis, contribui para freios mais duráveis, com menor geração de resíduos e menor incidência de ruídos e vibrações.

Diante do exposto acima, o presente trabalho deter-se-á a avaliação de diferentes tipos de lubrificantes sólidos encontrados nos compósitos de lonas e pastilhas de freio. Os resultados obtidos contribuirão para um melhor entendimento das características desses lubrificantes sólidos em função das exigências normativas e de clientes, contribuindo com a competitividade no setor de produtos de sistemas de freio automotivos.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo proposto neste trabalho vem ao encontro de uma necessidade primária na área automotiva, principalmente, pelo fato de o sistema de freio se tratar de um item de segurança fundamental no mundo automobilístico. Neste contexto, se faz necessária uma melhor compreensão do comportamento das diferentes matérias-primas que compõe os materiais de fricção, pois como apontam Chan e Stachowiak (2004), a seleção de matérias-primas formadoras de compósitos de pastilhas e lonas de freio a fricção ainda é baseada principalmente em experimentos de tentativa e erro ao invés de um entendimento dos fundamentos sobre esses materiais, e como eles influenciam nas características químicas, físicas, mecânicas e tribológicas do material de fricção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo principal propor uma metodologia para avaliação da lubricidade e propensão ao *fade* de lubrificantes sólidos utilizados em materiais de fricção.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral, são estabelecidos alguns objetivos específicos, que são:

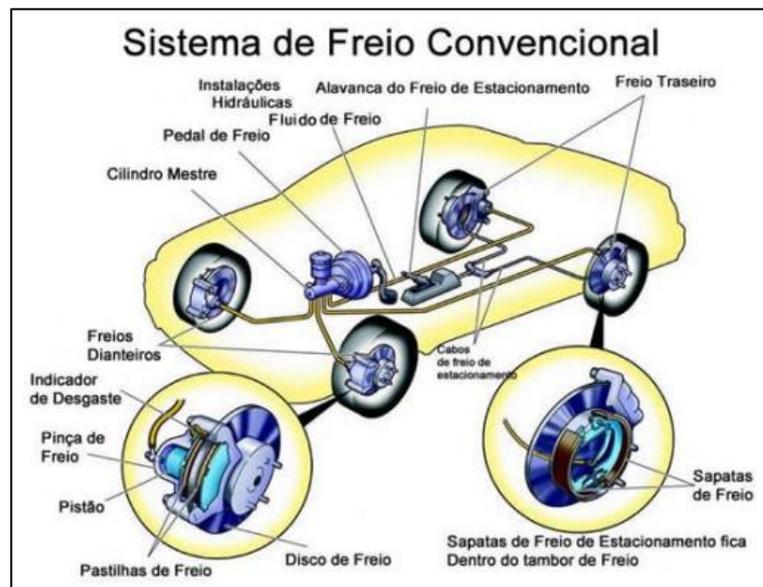
- a) Avaliar a influência da temperatura no coeficiente de atrito de diferentes lubrificantes sólidos em ensaios dinâmicos de deslizamento alternado;
- b) Identificar e quantificar a redução do coeficiente de atrito dos lubrificantes sólidos com o aumento da temperatura (*fade*) durante os ensaios dinâmicos de deslizamento;
- c) Propor uma metodologia para cálculo do coeficiente de atrito e do *fade*.
- d) Validar a metodologia para avaliação da resistência ao *fade*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMA DE FREIO

De forma simplificada, um sistema de freio é responsável por desacelerar ou parar um veículo que esteja em movimento, por meio da pressão de contato entre o material de fricção da lona ou da pastilha de freio e uma segunda superfície de contato ou contraparte (disco ou tambor de freio). O princípio de frenagem está relacionado ao efeito da força de atrito entre o material de fricção e uma superfície de contato, que transformam a energia cinética (energia do movimento do veículo) em energia térmica (calor) nos freios, a qual é dissipada ao meio ambiente (BLAU, 2001; REIF, 2014) . Os principais componentes do sistema de freio e responsáveis pela aplicação da força entre as superfícies de contato são: pedal de freio, alavanca de freio, cilindro mestre, linhas de fluido, cilindros das rodas ou cilindros escravos, lonas ou pastilhas, tambores ou discos e fluido de freio. A Figura 1 ilustra o mecanismo do sistema de frenagem com pastilha e disco de freio de um veículo leve.

Figura 1 – Sistema de frenagem de um automóvel

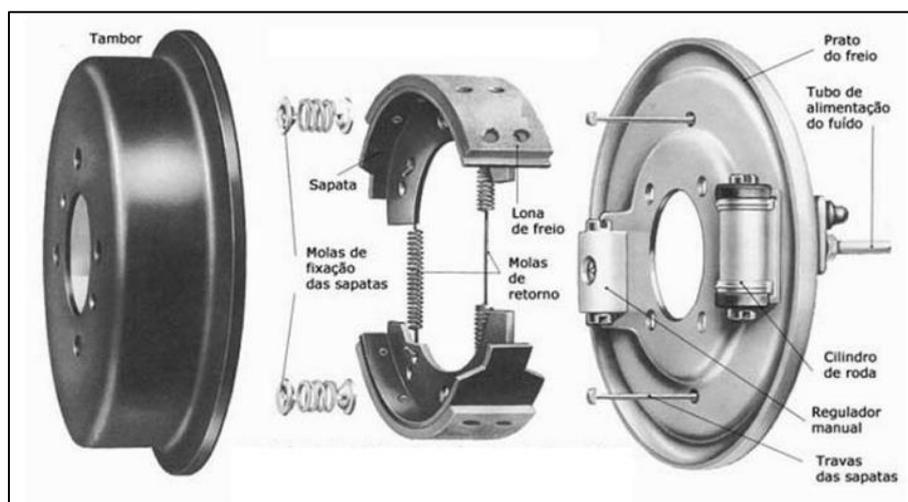


Fonte: adaptado de Reif (2014).

Os freios geralmente utilizados em veículos podem ser divididos em freios a tambor e freios a disco ou uma combinação dos dois tipos. Normalmente, em veículos de pequeno/médio porte, os projetos contemplam freios a disco nas rodas dianteiras e freios a tambor nas rodas traseiras. Os termos que definem cada tipo de freio são relacionados com a forma de contato e com a configuração de cada sistema (REIF, 2014).

Os freios a tambor foram os primeiros sistemas desenvolvidos para veículos e continuam sendo usados até hoje, principalmente em veículos pesados. Os componentes principais desse sistema são: tambor, sapatas, lonas e molas de retorno, cilindro de roda, como ilustra a Figura 2. Nesse sistema de freio, quando o pedal do freio é acionado, a pressão hidráulica é transmitida pelo fluido de freio até o cilindro, e o efeito dessa pressão empurra as sapatas pela ação dos pistões contidos no interior do cilindro. Essa ação gera uma pressão de contato entre as lonas de freio e a superfície interna do tambor, que gira em conjunto com a roda do veículo, então o material de fricção da lona, presa na superfície das sapatas, produz o atrito necessário para desacelerar o veículo. Nesse tipo de freio, a superfície em contato com o material de fricção é um cilindro metálico, conhecido como tambor, e normalmente fabricado em ferro fundido cinzento (BLAU, 2001).

Figura 2 – Esquema de um sistema de freio de tambor

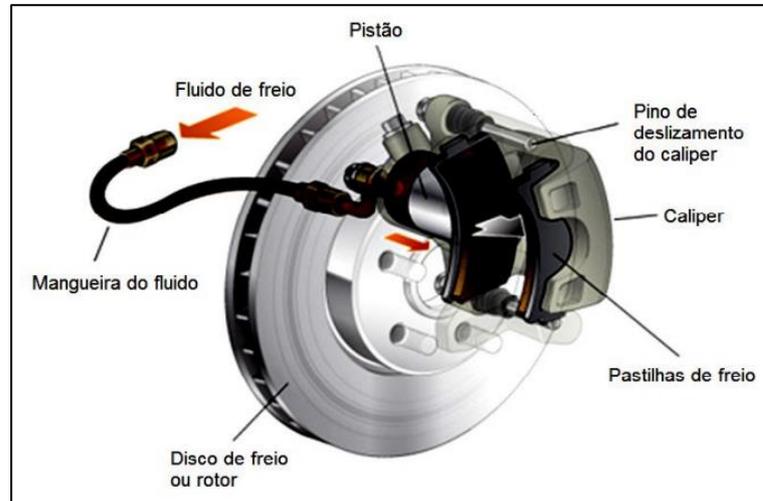


Fonte: <http://www.portalsaofrancisco.com.br>.

Nos sistemas de freios a disco, Figura 3, o tambor é substituído por um disco de freio ou rotor plano fabricado em ferro fundido cinzento, preso ao cubo de roda, que é comprimido nas suas duas faces pelas pastilhas de freio, gerando o atrito necessário para

frear o veículo. As pastilhas são montadas dentro das pinças (calipers) e são empurradas contra o disco por efeito do pistão quando o pedal de freio é acionado.

Figura 3 – Esquema de um sistema de freio de disco



Fonte: <https://eurobahnmotorsports.wordpress.com>.

2.1.1 Tambores e discos de freio

Para ambos os sistemas de freio, o coeficiente de atrito determina a força que deve ser aplicada ao pedal de freio para produzir a frenagem, assim como a dirigibilidade e estabilidade do veículo. Em relação ao material do disco ou tambor de freio, materiais ferrosos, como ferro fundido cinzento e ferro fundido vermicular dominam o mercado mundial de freios. Esses materiais apresentam uma série de vantagens, como elevada resistência mecânica, boa condutividade térmica, e baixos custos de produção. Os aços são usados preferencialmente para freios de alta eficiência em veículos de alta velocidade, enquanto, os ferros fundidos são os materiais preferidos em freios de disco para caminhões. No entanto, o mercado global de automóveis está focado no desenvolvimento de novos materiais com o intuito de reduzir o peso dos componentes automotivos e obter melhor eficiência e desempenho. Nesse sentido, têm sido desenvolvidos materiais alternativos, incluindo ligas leves de titânio e de alumínio e materiais compósitos de matriz metálica (alumínio, titânio) reforçados com partículas cerâmicas (BLAU et al., 2007).

2.2 MATERIAIS DE FRICÇÃO

O material da pastilha ou da lona de freio é chamado material de atrito ou material de fricção (Figura 4). São várias as exigências técnicas que o material de fricção deve apresentar para satisfazer as condições de frenagem: coeficiente de atrito elevado e estável; resistência ao *fade* (queda acentuada do coeficiente de atrito com o aumento da temperatura durante a frenagem), resistência ao desgaste, resistência mecânica a elevadas temperaturas, baixo ruído, entre outras (BLAU, 2001; REIF, 2014)

Figura 4 – Pastilha de freio



Fonte: o autor.

Os materiais de fricção, são materiais compósitos híbridos, que contêm uma variedade de componentes ou ingredientes, que de acordo a sua função são classificados em aglomerantes (resinas fenólicas), cargas (barita, óxido de ferro, óxido de alumínio, mica, talco, resinas em pós), reforços (lã de aço, pó de cobre, fibras de aço e de cobre, fibras cerâmicas) e modificadores de atrito, como abrasivos (alumina, quartzo, sílica, silicato de zircônio, óxido de cromo) e lubrificantes sólidos (grafita, bissulfeto de molibdênio, trissulfeto de antimônio, cobre, latão) (BLAU, 2001; REIF, 2014). Constata-se, portanto, que a composição dos materiais de fricção é bastante complexa, consistindo normalmente de mais de 10 matérias-primas, para atender as exigências técnicas e, como já comentado, a quantidade e tipo de cada ingrediente é frequentemente determinada por tentativa e erro, na base de observações empíricas. Cabe ressaltar que as quantidades exatas, as propriedades e o papel que esses ingredientes desempenham no atrito e desgaste dos materiais de fricção são pouco documentados na literatura por motivos de propriedade intelectual.

2.3 LUBRIFICANTES

Uma fina camada com baixa resistência ao cisalhamento, formada por uma substância gasosa, sólida ou líquida, interposta entre duas superfícies de contato em movimento relativo, afim de diminuir o desgaste e promover a condução do calor gerado, é como Stachowiak e Batchelor (2001) definem os lubrificantes. Os autores ainda se referem ao lubrificante como uma camada de espessura muito fina, entre 1 e 100 μm , responsável por evitar, ou ao menos diminuir consideravelmente o contato direto entre superfícies, o que garante maior vida útil às peças. Segundo Norton (2013), os lubrificantes são classificados em sólidos, líquidos e gasosos. Os lubrificantes líquidos são os mais utilizados, principalmente, na forma de óleo mineral. Porém, aplicações especiais, que não podem ser atendidas com a utilização de lubrificantes líquidos, como elevadas temperaturas de operação, utilizam lubrificantes sólidos.

2.3.1 Lubrificantes sólidos

Um exemplo de aplicação especial que não admite, no cenário atual, a utilização de lubrificantes líquidos, são as pastilhas e lonas de freio. Nesse caso, lubrificantes sólidos são responsáveis por promover o controle do atrito dos materiais de fricção, o que garante, entre outras vantagens, a redução do desgaste dos tambores e discos de freio, além da diminuição do desgaste do próprio material de fricção.

Um lubrificante sólido é classificado, segundo Carreteiro e Moura (1998), como sólido laminar ou composto orgânico. Os sólidos laminares, objeto deste estudo, são formados por camadas de átomos, com uma ligação forte entre os átomos de uma mesma camada, porém, fraca entre camadas distintas. Dentre os diversos lubrificantes sólidos existentes, os mais comuns são a grafita (grafite) e o bissulfeto de molibdênio (MoS_2).

Segundo Österle e Dmitriev (2016), o grafite é o lubrificante sólido mais utilizado em materiais de fricção, além de ser um dos constituintes da microestrutura do ferro fundido cinzento, material dos discos e tambores de freio. Todavia, Carreteiro e Moura (1998), atribuem ao grafite uma boa lubrificidade a temperaturas de até 370 °C, quando passa a sofrer oxidação, o que limita a utilização desse lubrificante sólido em aplicações severas.

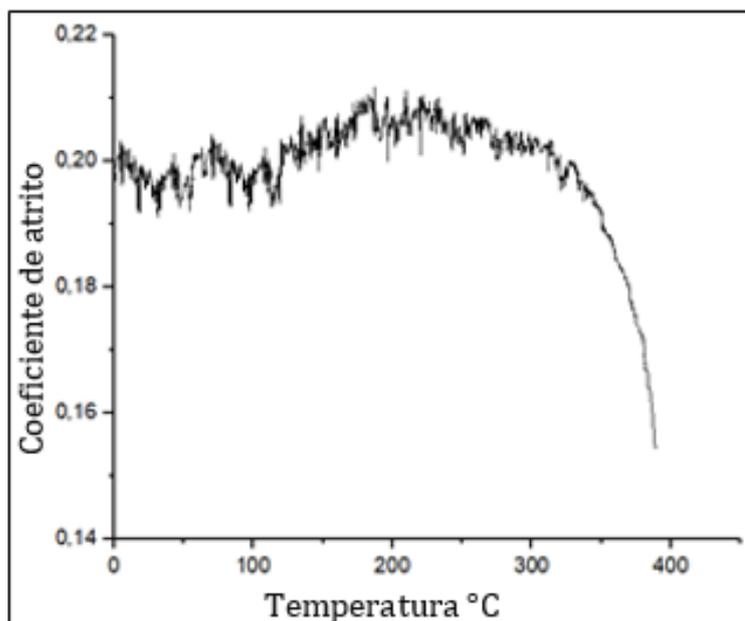
2.4 FADE

A queda acentuada no coeficiente de atrito em determinada temperatura é definida como *fade* conforme Freidrich (2012). Esse fenômeno é geralmente percebido em faixas de temperatura acima de 300 °C e é altamente indesejado por comprometer a segurança dos ocupantes do veículo, caso venha a ocorrer durante a frenagem.

A ocorrência do *fade* é mais comum em veículos que exigem maior demanda do sistema de freio. Como o calor dissipado é menor que o calor gerado durante a frenagem, existe um acúmulo de energia, que aumenta a temperatura do sistema de freio. Porém, em veículos pequenos, as possibilidades de ocorrência desse fenômeno são menores que em veículos de carga, pois a energia necessária para diminuir a velocidade é menor, principalmente, pela reduzida massa do veículo. Em contrapartida, veículos de carga como caminhões carregados, possuem massa que podem superar 60 vezes a massa de um veículo de passeio, e nesse contexto, percebe-se a importância do estudo do *fade* para a indústria de materiais de fricção.

Em termos de aplicação, é comum observar caminhões carregados trafegando em declives acentuados com velocidade média inferior à de veículos leves. Entre outros motivos, isso se deve ao melhor aproveitamento do freio auxiliar (freio motor), o que diminui a exigência sobre o freio a fricção. Caso contrário, em poucas centenas de metros, o pedal do freio deixa de responder. Esse é um exemplo clássico de *fade*. O “deixar de responder” é o momento em que o coeficiente de atrito cai a nível crítico e apenas “responderá” novamente quando o calor for dissipado, ou seja, quando a temperatura ficar abaixo da temperatura de *fade*. Ao fenômeno de retorno do coeficiente de atrito à níveis anteriores ao *fade* dá-se o nome de “recuperação” (FRIEDRICH, 2012). Na Figura 5, pode-se visualizar o efeito do aumento da temperatura na diminuição do coeficiente de atrito em ensaio preliminar, realizado em laboratório, utilizando um tribômetro.

Figura 5 – Ensaio preliminar para amostra de resina fenólica e grafite

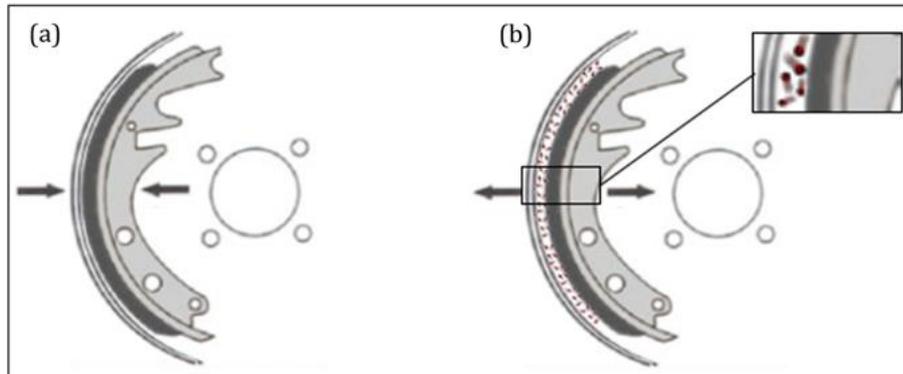


Fonte: o autor.

O principal fator da queda do coeficiente de atrito com o aquecimento do material de atrito é atribuído à presença de gases entre as superfícies de contato, conforme ilustrado na Figura 6. Esses gases são formados durante a frenagem, quando o aquecimento do material de fricção, em determinado nível, degrada a resina fenólica, ligante do compósito. Um estudo feito por Schmidt (2016) reforça essa hipótese ao estudar a perda de massa da resina com o aquecimento, como ilustrado na Figura 7.

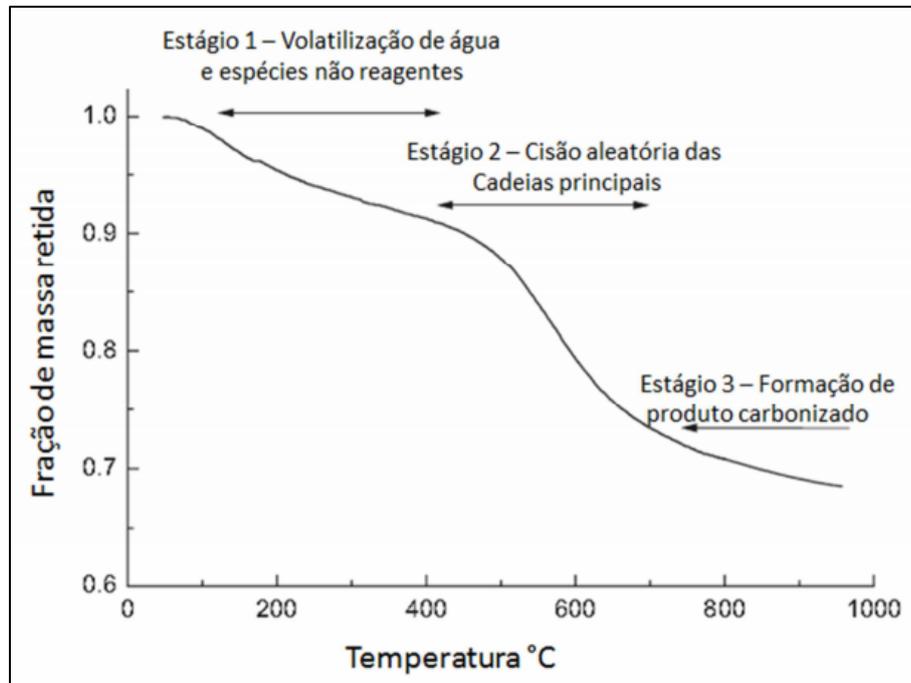
No entanto, lubrificantes sólidos alteram o comportamento das curvas de atrito em função da temperatura. Österle e Dmitriev (2016) atribuíram tal comportamento às reações que ocorrem também com os lubrificantes sólidos em função do aumento da temperatura, que oxidam e com isso alteram seus coeficientes de atrito. Österle e Dmitriev (2016) destacam ainda a o fato de as reações de oxidação ocorrerem principalmente na região de contato, já que nessa região a temperatura é consideravelmente superior à temperatura média do corpo de prova.

Figura 6 – (a) Superfícies de contato friccionando; (b) Gases de degradação forçando afastamento das superfícies de contato



Fonte: o autor.

Figura 7 – Análise termogravimétrica da resina fenólica



Fonte: Schmidt (2016).

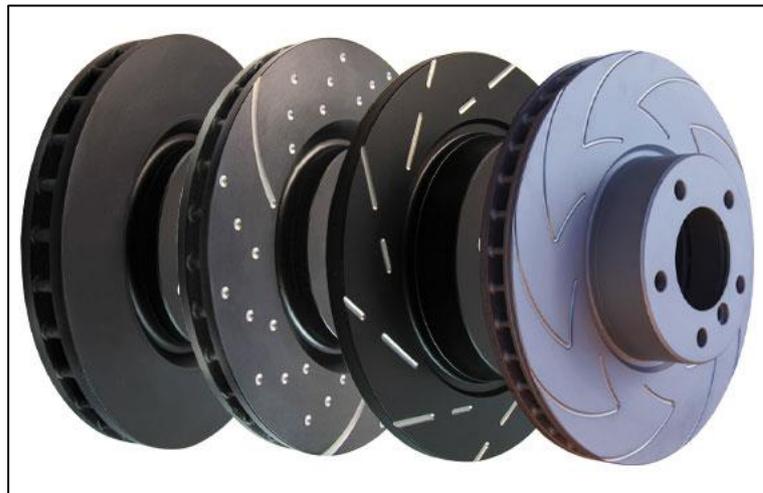
Schmidt (2016) classifica a degradação térmica da resina fenólica em 3 estágios, em que a perda de massa no primeiro estágio, que compreende temperaturas entre 100 e 300 °C, é pequena e se dá pela vaporização de água e volatilização de fenol formaldeído e reações incompletas no processo de cura. Já no segundo estágio, com temperaturas superiores a 300 °C, ocorre a cisão das cadeias, liberando uma variedade de gases voláteis, tais como monóxido de carbono, metano, fenol, cresóis e xilenóis. Esse é o estágio em que

ocorre a maior degradação do material, a qual contribui para a ocorrência do *fade*. No terceiro estágio, ocorre a fusão da resina.

Evidências da relação entre a resina fenólica e *fade*, são observadas também no estudo feito por Rajan e colaboradores (2018), que experimentaram formulações contendo diferentes quantidades em massa de resina fenólica e concluíram que quanto menor o percentual de resina na mistura, maior a resistência ao *fade*. Por outro lado, um maior percentual de resina proporcionou uma melhor resistência ao desgaste do material compósito.

Uma solução encontrada pelos engenheiros para minimizar os efeitos do *fade*, foi o desenvolvimento de discos com geometrias que favorecem a drenagem dos gases e, conseqüentemente, melhoram o desempenho em relação ao *fade*. Para isso, ranhuras e furos foram feitos, conforme ilustração na Figura 8, com o objetivo de conduzir os gases enclausurados entre as superfícies de contato para fora do sistema (EBC BRAKES, 2019).

Figura 8 – Discos de freio com ranhuras



Fonte: EBC Brakes (2019).

3 METODOLOGIA

3.1 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Neste trabalho, foram utilizadas amostras com a mesma geometria de pastilhas de freio, constituídas por diferentes lubrificantes sólidos e resina fenólica (formulação modelo), as quais foram fornecidas pela empresa Fras-le S.A. Essas amostras foram produzidas no Laboratório Piloto da empresa. Primeiramente, as matérias-primas selecionadas foram pesadas na proporção de 25 % e 75 %, em massa, de resina e lubrificante sólido, respectivamente. Essa proporção foi obtida de forma experimental e correspondeu à proporção adequada de resina capaz de fornecer pastilhas com a integridade geométrica adequada e as propriedades mecânicas necessárias para a realização do estudo. Com quantidades inferiores de resina fenólica as amostras se desmancharam ou não resistiram às cargas propostas no estudo, uma vez que a resina é responsável pela união das partículas dos materiais. Em seguida, as matérias-primas de cada formulação modelo foram misturadas a seco, utilizando um misturador do tipo SEMCO (Figura 9) com 1800 RPM durante 8 min.

Figura 9 – Misturador SEMCO



Fonte: Fras-le S.A.

Após a preparação das misturas, elas foram conformadas a quente em molde positivo, conforme ilustrado na Figura 10, o que promoveu a fusão da resina e a sua ligação com as partículas do lubrificante, com o aumento da temperatura e pressão de

compactação. Na conformação a quente, os seguintes parâmetros foram controlados: a massa e o espalhamento da mistura no molde, a temperatura do molde (cavidade e punção), a pressão aplicada à mistura e o ciclo de cura do material, que incluiu o tempo sob pressão e o tempo de dosagem.

Figura 10 – Molde da pastilha



Fonte: Fras-le S.A.

Por fim, as pastilhas foram submetidas a um tratamento térmico, que garantiu a sua estabilidade dimensional e finalização do processo de cura do material aglomerante (resina fenólica). O tratamento térmico foi conduzido com a utilização de uma estufa estática, controlando-se a temperatura e o tempo de residência. Os dados de temperatura, tempo e pressão, bem como maiores detalhes da fabricação, não foram fornecidos pela empresa, por serem considerados segredo industrial. A Figura 11 ilustra o componente finalizado.

Figura 11 – Pastilha composta por resina fenólica e lubrificante sólido



Fonte: o autor.

As pastilhas dos materiais das formulações modelos foram fabricadas com os diferentes lubrificantes sólidos, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Identificação das amostras com o tipo de lubrificante sólido

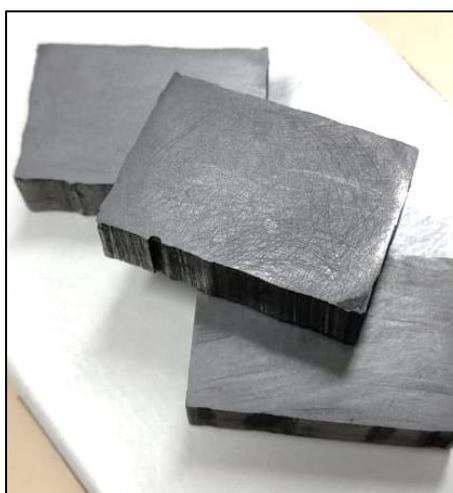
Identificação	Lubrificante
GN	Grafite natural
GS	Grafite sintético
BM	Bissulfeto de molibdênio
TA	Trissulfeto de antimônio

Fonte: o autor.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

Para a realização dos ensaios tribológicos, foram preparadas amostras a partir das pastilhas, as quais foram cortadas na forma de placas de (20×30×6) mm, aproximadamente (Figura 12), e correspondem aos chamados corpos dos ensaios tribológicos (amostras de estudo). O corte foi realizado em uma serra circular (Figura 13), equipada com disco de corte para aços. Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Metalografia (LAMEC), da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Figura 12 – Amostras provenientes do corte da pastilha



Fonte: o autor.

Figura 13 – Serra circular equipada com disco de corte de metais



Fonte: o autor.

3.3 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

Os ensaios tribológicos de deslizamento alternado com aquecimento foram realizados em um tribômetro UMT Tribolab, da Bruker (Figura 14). O equipamento encontra-se no Instituto de Materiais Cerâmicos da UCS (IMC-UCS).

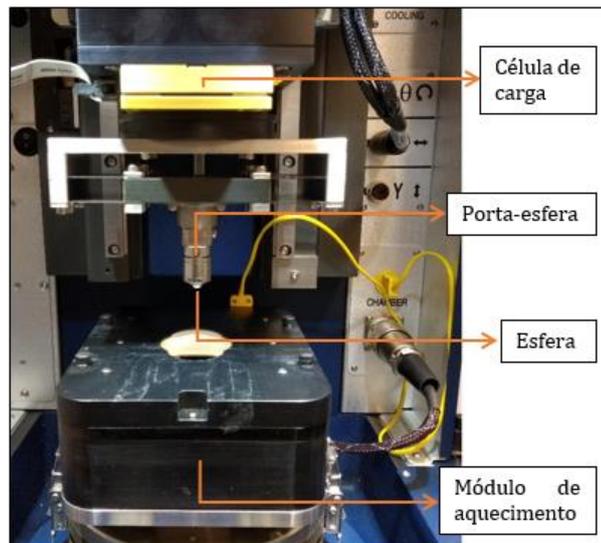
Figura 14 – Tribômetro Bruker UMT Tribolab



Fonte: o autor.

A Figura 15 mostra uma representação esquemática dos componentes do tribômetro, onde estão identificados o porta-esfera, dispositivo no qual é posicionado um contracorpo esférico, a célula de carga, responsável pela medição das forças na direção do eixo z e x. A figura também identifica o módulo de aquecimento, local onde a amostra é fixada, e responsável pelo aquecimento da amostra durante a realização do ensaio.

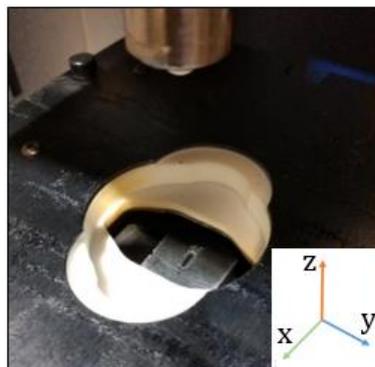
Figura 15 – Detalhes do tribômetro



Fonte: o autor.

Uma imagem da amostra dentro do módulo de aquecimento pode ser visualizada na Figura 16, que exibe os eixos das coordenadas para melhor visualização do sentido das forças z (correspondente à força normal aplicada ao corpo de prova) e do eixo x (correspondente à força de atrito).

Figura 16 – Amostra ensaiada posicionada no módulo de aquecimento



Fonte: o autor.

3.4 ENSAIOS DINÂMICOS – VARIAÇÃO CONTÍNUA DA TEMPERATURA

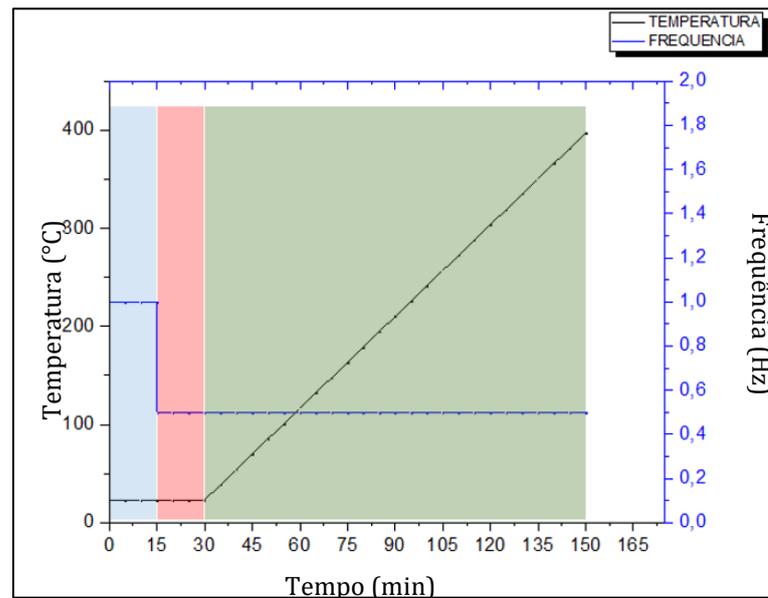
Como contracorpos foram utilizadas esferas de alumina com 6 mm de diâmetro e com rugosidade controlada de acordo com a norma ISO 3290. A escolha pela esfera de alumina justifica-se pela redução dos efeitos da natureza do contracorpo nas respostas dos lubrificantes, já que esferas de aço ou ferro fundido, podem oxidar e desgastar, influenciando nos resultados do ensaio. Para cada um dos quatro materiais compósitos, os ensaios foram repetidos 4 vezes para maior consistência estatística dos resultados. Os parâmetros dos ensaios estão apresentados na Tabela 1, em que se nota uma sequência de 3 etapas: assentamento 1, assentamento 2 e ensaio de deslizamento. Para facilitar a compreensão, a Figura 17 ilustra graficamente as etapas do ensaio.

Tabela 1 – Configuração dos parâmetros para ensaios dinâmicos

Etapa	Força normal (N)	Frequência (Hz)	Tempo (min)
Assentamento 1	10	1	15
Assentamento 2	10	0,5	15
Ensaio	10	0,5	120

Fonte: o autor.

Figura 17 – Representação gráfica das etapas do ensaio separadas por faixa de cores



Fonte: o autor.

Em cada ensaio, após o contato da esfera com a amostra, acontecem as etapas de assentamento, onde a esfera gera uma deformação e subsequente remoção de material local na amostra, criando uma marca (trilha de desgaste). A profundidade dessa trilha e, por conseguinte, o volume de material removido, tendem a crescer durante a etapa subsequente com aumento linear da temperatura. As duas etapas de assentamento, com suas respectivas frequências, foram definidas em ensaios preliminares e representaram a condição mais apropriadas, em termos de repetitividade do comportamento do atrito ao longo do ensaio. Por fim, a terceira etapa corresponde ao ensaio de deslizamento propriamente dito, em que a amostra é aquecida até 400 °C, numa taxa de 3 °C/min. É na etapa 3 que são obtidos os valores para a geração dos gráficos de coeficiente de atrito e temperatura em função do tempo.

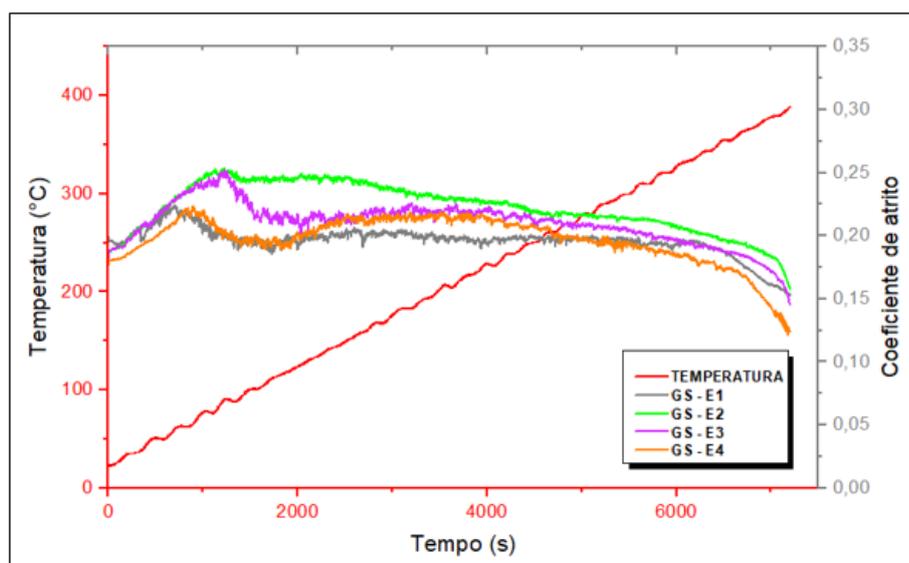
Com relação ao ambiente de ensaio, para maior precisão nos resultados, sugere-se condições de temperatura e umidade controlados, já que esses fatores são considerados variáveis que podem afetar os resultados. A umidade, por exemplo, geralmente proporciona um aumento das taxas de desgaste e a introdução de agentes corrosivos tornando o desgaste corrosivo-abrasivo, como sugere Stachowiak (2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 EFEITO DA TEMPERATURA NO COEFICIENTE DE ATRITO

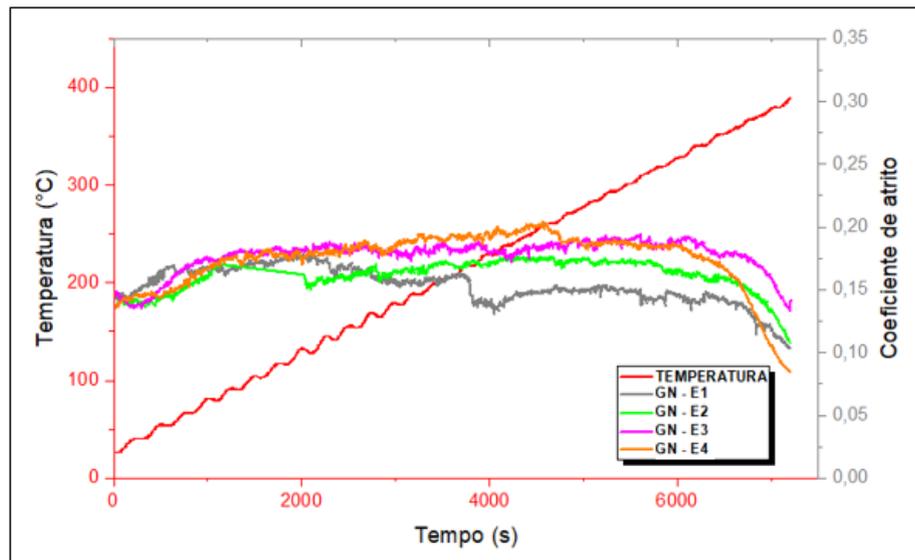
Os gráficos da variação do coeficiente de atrito e da temperatura ao longo do ensaio são apresentados nas Figura 18, 19, 20 e 21. Nessas figuras, mostra-se a variação do coeficiente de atrito das quatro repetições de ensaio para cada lubrificante sólido, designadas por Ex (E, de ensaio e x = 1 a 4, as repetições de ensaio). Observa-se que, de modo geral, o coeficiente de atrito das quatro repetições realizadas para cada um dos lubrificantes sólidos, seguiu a mesma tendência, o que indica uma boa repetibilidade entre os ensaios.

Figura 18 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (Grafinte sintético - GS)



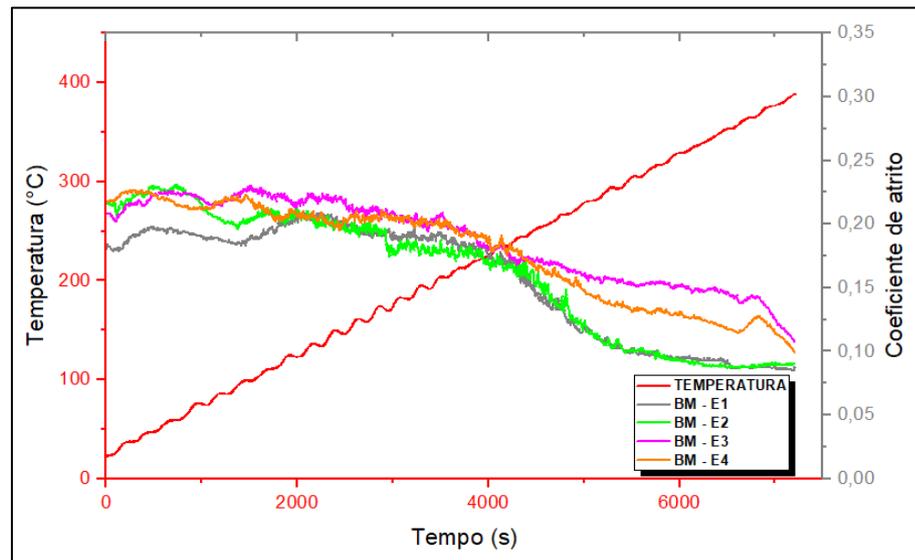
Fonte: o autor.

Figura 19 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (Grafite natural - GN)



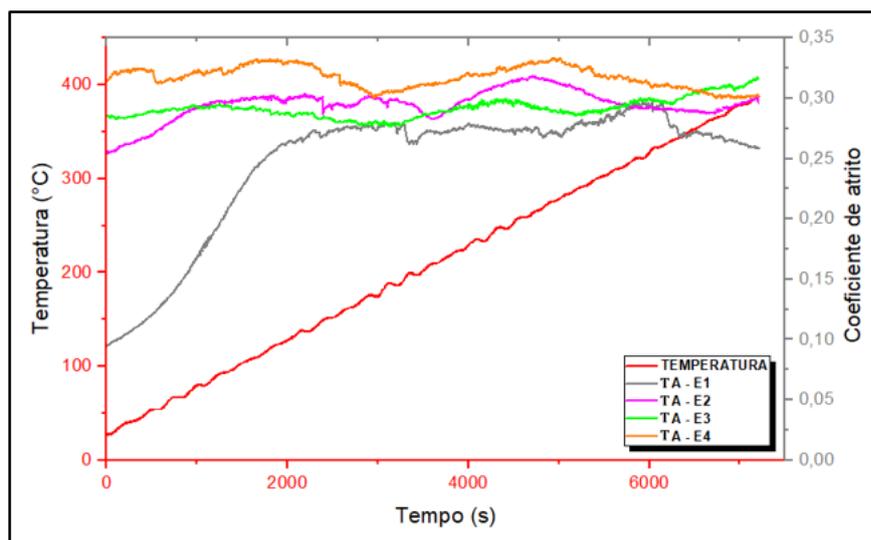
Fonte: autor.

Figura 20 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (Bissulfeto de molibdênio - BM)



Fonte: autor.

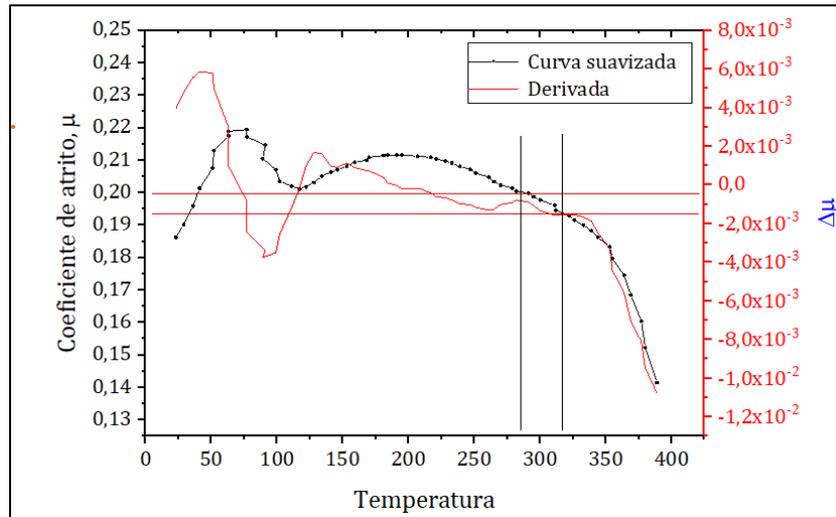
Figura 21 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (Trissulfeto de antimônio - TA)



Fonte: o autor.

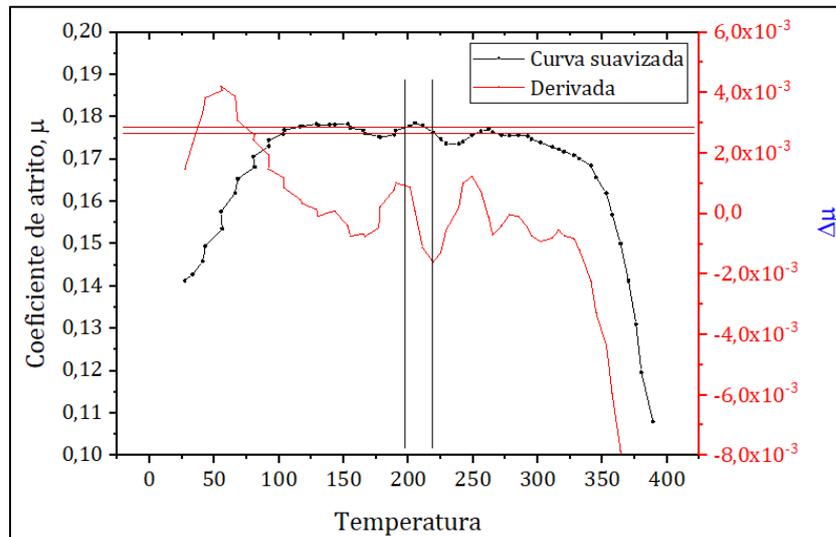
Além da análise visual do comportamento do coeficiente de atrito dos diferentes lubrificantes, uma avaliação quantitativa foi realizada, aplicando-se o diferencial das curvas médias, com o intuito de identificar o ponto de mudança mais acentuada (“ponto de inflexão”) do coeficiente de atrito com a variação da temperatura. Esse ponto foi associado ao fenômeno de *fade*. Para facilitar a identificação do ponto de inflexão, aplicou-se às curvas médias uma técnica de suavização. As curvas mostradas nas Figura 22, 23, 24 e 25 foram geradas a partir desse procedimento de análise.

Figura 22 – Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura e curva derivada para amostra GS



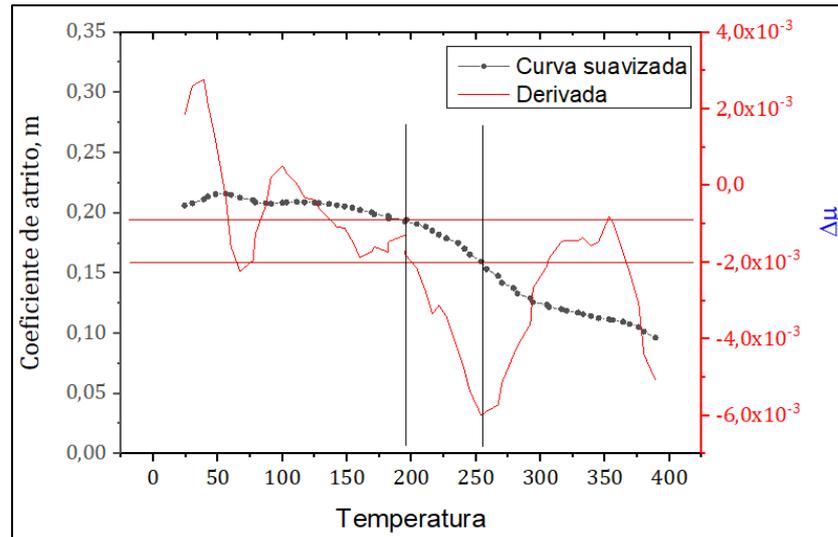
Fonte: o autor.

Figura 23 – Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura e curva derivada para amostra GN



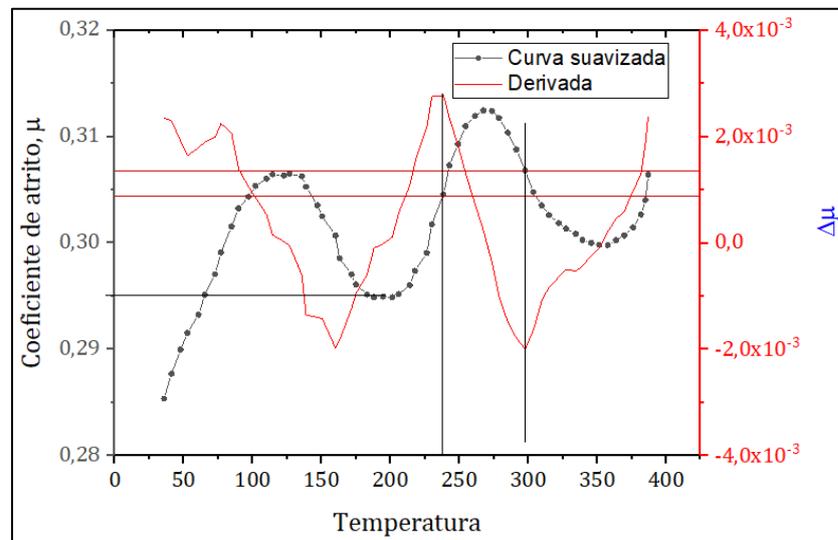
Fonte: o autor.

Figura 24 – Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura e curva derivada para amostra BM



Fonte: o autor.

Figura 25 – Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura e curva derivada para amostra TA



Fonte: o autor.

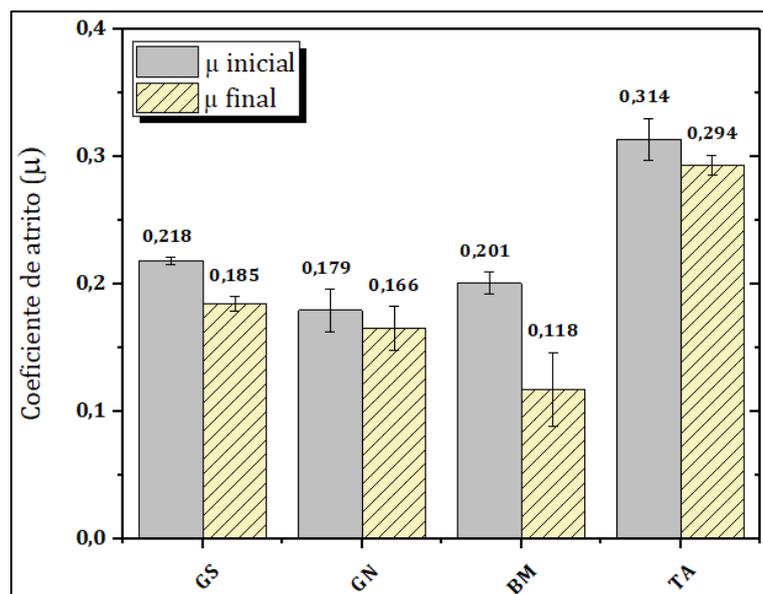
É importante destacar que a temperatura na região de contato é sempre superior à da região imediatamente distante do ponto de contato (temperatura média da amostra), como sugerem Hutchings e Shipway (2017), que identificam a temperatura média de determinada amostra como *bulk*, enquanto a temperatura na região de contato é chamada de *flash*. Ainda segundo Hutchings e Shipway (2017), a diferença de temperatura entre as

regiões varia de acordo com a pressão de contato, coeficiente de atrito do material, velocidade, entre outros fatores.

Sabendo então, que a temperatura na região de contato é superior ao valor medido pelo sensor presente no módulo de aquecimento, para a identificação do ponto de inflexão das curvas, utilizou-se como critério pontos onde a temperatura medida pelo tribômetro ficou acima de 200 °C. Essa escolha se deve também ao fato de o fenômeno de *fade* se manifestar à temperaturas em torno de 315 °C ou superiores, segundo Limpert (2011).

Na Figura 26, são apresentados os valores do coeficiente de atrito antes ($\mu_{inicial}$) e após (μ_{final}) a queda acentuada do coeficiente de atrito, para cada lubrificante. Dentre os lubrificantes analisados, o TA foi o que apresentou coeficiente de atrito mais elevado. Além disso, outra característica que se destaca é o fato de o coeficiente de atrito ter se mostrado bastante estável ao longo do ensaio. No mesmo contexto, o coeficiente de atrito do GN também apresentou bastante estabilidade, o que torna o GN uma alternativa entre os grafites, no quesito estabilidade. Na comparação entre os sulfetos, o BM apresentou coeficiente de atrito menor, o que de certa forma é uma boa qualidade para um lubrificante, porém a variação no coeficiente de atrito foi expressiva.

Figura 26 – Coeficiente de atrito inicial e final



Fonte: o autor.

Utilizando a Equação 1, foram calculadas as variações percentuais dos coeficientes de atrito.

$$\Delta\mu = \frac{\mu_{inicial} - \mu_{final}}{\mu_{inicial}} \times 100 \quad (1)$$

onde: $\Delta\mu$ é a variação do coeficiente de atrito no ponto de maior inflexão;

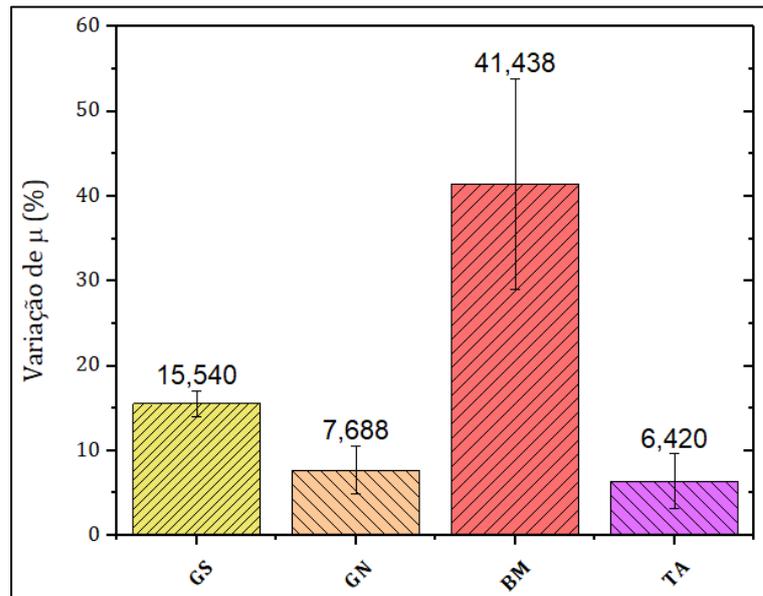
$\mu_{inicial}$ é o ponto onde a derivada apresentou o início da inflexão;

μ_{final} é o ponto de leitura na reta onde a derivada apresentou o final da inflexão.

A Figura 27 apresenta as variações percentuais dos coeficientes de atrito obtidas por meio da Equação 1. Em relação aos grafites, nota-se uma variação menor na queda do coeficiente de atrito para o GN, que apresentou queda de 7,688 %, contra 15,540 % do GS. Já a maior variação do coeficiente de atrito foi observada para o BM, que apresentou 41,438 % de variação. Dentre os lubrificantes analisados, o destaque ficou para o TA, com menor queda no coeficiente de atrito, 6,420 %.

A indústria de materiais de fricção tende a buscar ingredientes que gerem maior estabilidade em seus produtos, pois isso se reflete na eficiência na frenagem (BLAU, 2004). Fazendo uma análise por esse ponto de vista, os lubrificantes que geraram maior estabilidade foram o GN e o TA, já que apresentaram a menor variação no coeficiente de atrito.

Figura 27 – Variação percentual do coeficiente de atrito com a temperatura

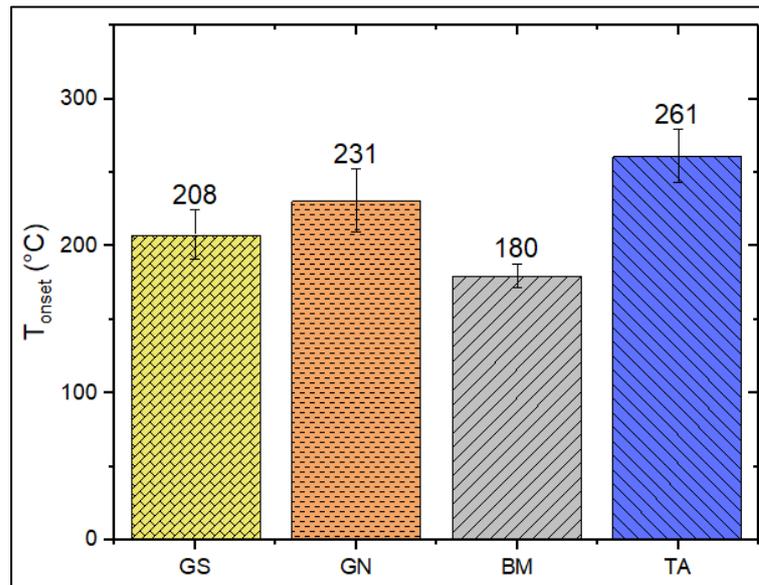


Fonte: o autor.

É desejável, em materiais de fricção, materiais que retardem ao máximo o *fade*. Uma vez que o fenômeno é inevitável, compostos que apresentam T_{onset} mais elevado, são considerados mais resistentes ao *fade* em relação aos compósitos com T_{onset} baixos.

O gráfico apresentado na Figura 28 mostra os valores de T_{onset} obtidos para cada um dos lubrificantes. Os valores foram obtidos utilizando-se o mesmo critério da avaliação de início e fim da queda do coeficiente de atrito. Na figura também se apresenta a variação da temperatura durante a queda (ΔT).

O TA se destacou nessa análise por ter apresentado a maior T_{onset} , 261 °C, seguido pelo GN, 231 °C. Já o GS apresentou T_{onset} de 208 °C, superando o BM, que apresentou o pior resultado dentre os lubrificantes estudados, 180 °C.

Figura 28 – T_{onset} e variação da temperatura

Fonte: o autor.

A partir dos testes realizados, foram definidos dois parâmetros: O fator *fade*, que mede a queda no coeficiente de atrito com o aumento da temperatura e o *fade onset*, que indica a temperatura no qual o *fade* começa a ocorrer. Observou-se que o BM apresentou o maior fator *fade*. Além disso ocorre a temperaturas mais baixas, em torno de 180 °C.

Dentre os lubrificantes analisados, é importante ressaltar que o TA não possui estrutura lamelar como os grafites e o BM, o que explica o comportamento diferenciado da curva de atrito em função da temperatura, já que mesmo ocorrendo quedas pontuais no coeficiente de atrito, os coeficientes acabaram retornando aos níveis anteriores. A diferenciação do TA em relação aos demais lubrificantes, também se deve à oxidação do TA, isto é, a partir da temperatura de início da oxidação, a geração de óxidos não cessa até o retorno da temperatura a níveis inferiores à temperatura de oxidação, e como esse tipo de óxido apresenta características abrasivas, isso justifica a recuperação do coeficiente de atrito.

Em termos práticos, o lubrificante ideal para a indústria de materiais de fricção, deve apresentar características de estabilidade do coeficiente de atrito médio, coeficiente de atrito elevado e proporcionar boa resistência ao *fade*. Tudo isso coloca o TA como um lubrificante a ser considerado em projetos de materiais de fricção.

Por outro lado, alguns estudos apontam para problemas ambientais relacionados ao Antimônio. Percebeu-se que a beira de rodovias os níveis de antimônio encontrados nas folhas de árvores são muito superiores aos níveis de zonas mais afastadas. Os níveis até então encontrados acendem um alerta, mas isso não torna sua utilização proibida no Brasil, já que esses níveis ainda são baixos. Além do mais, não existem comprovações científicas da relação do antimônio com qualquer tipo de câncer (VIEIRA, 2008).

A utilização do antimônio é largamente utilizada na indústria de polímeros, como retardante de chamas. Exemplos do uso desse elemento são a indústria de plásticos e a vulcanização de pneus (VIEIRA, 2008).

Os processos que originam os grafites podem ser atribuídos a diferença de comportamento entre as amostras que utilizaram grafites. Enquanto o grafite natural é extraído diretamente da natureza, o grafite sintético é obtido com o uso de altas temperaturas, 2600 a 3000 °C, empregando-se matérias primas tais como o coque da hulha ou o antracito. A pureza do grafite sintético é superior ao grafite natural, em torno de 95%, contra purezas que variam de 80 a 90 % para o grafite natural (SAMPAIO et al., 2005).

Diante do exposto no parágrafo anterior, pode-se atribuir a maior resistência ao *fade*, das amostras de GN, às impurezas do lubrificante e a temperatura que o lubrificante é previamente exposto, para sua obtenção.

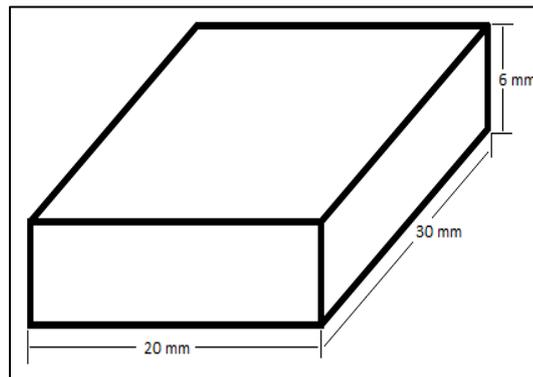
4.2 METODOLOGIA PROPOSTA

Com base nos dados obtidos com a realização dos ensaios e na forma como procederam os ensaios, foi desenvolvida uma metodologia aplicável a ensaios em materiais sólidos compostos por resina fenólica e lubrificante sólido, a fim de identificar e quantificar o fenômeno de *fade*.

4.2.1 Preparação das amostras

As amostras a serem analisadas devem ser fracionadas em pequenas peças com dimensões de 20 x 30 x 6 mm, conforme ilustrado na Figura 29. As dimensões foram obtidas de modo experimental e favorecem tanto a fixação no módulo de aquecimento do tribômetro, quanto a propagação do calor pela peça.

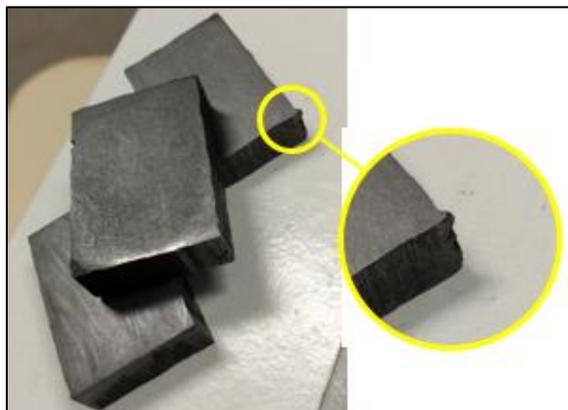
Figura 29 – Exemplo das peças a serem cortadas



Fonte: o autor.

As peças devem ser lixadas com o auxílio de uma lixa com granulometria igual ou superior a 220. Esse procedimento se faz necessário já que no processo de corte podem ocorrer superfícies irregulares como rebarbas ou marcações ocasionadas pelo corte. Os fatores citados podem influenciar tanto na fixação da amostra quanto na inconsistência dos resultados do ensaio. Na Figura 30 pode-se verificar a presença de rebarbas provenientes do corte das peças.

Figura 30 – Exemplo de rebarbas em corpos de prova



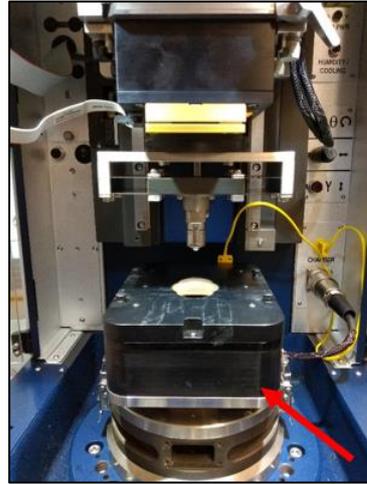
Fonte: o autor.

4.2.2 Montagem peças e acessórios ao tribômetro

Após a preparação dos corpos de prova, o passo subsequente é a preparação do tribômetro para realização do ensaio. O módulo de aquecimento é um acessório do tribômetro responsável pelo aquecimento em ensaios com variação de temperatura. O

módulo possui duas conexões, sendo uma responsável pela ligação com o sistema elétrico, que fornecerá corrente elétrica à resistência, para o aquecimento do corpo de prova, e outro ligado ao marcador digital que fornecerá a temperatura do módulo de aquecimento em tempo real. A Figura 31 mostra o módulo de aquecimento (indicado pela flecha em vermelho), já acoplado ao tribômetro.

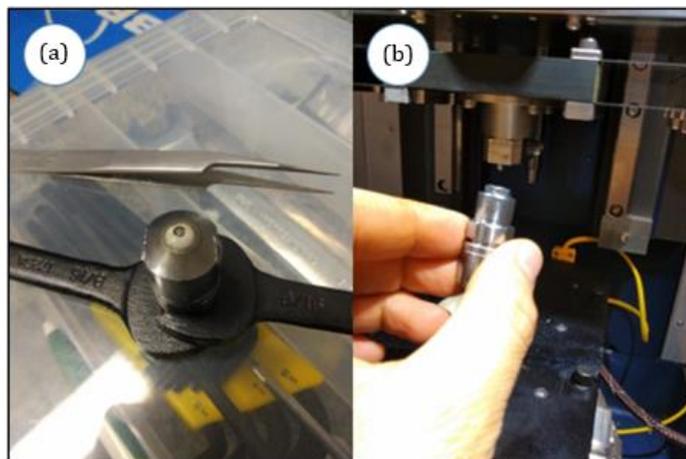
Figura 31 – Acoplamento do módulo de aquecimento



Fonte: o autor.

A esfera de alumina deve ser fixada ao porta-esferas, Figura 32(a), e em seguida o porta-esferas deve ser fixado à célula de carga na parte superior do tribômetro, conforme Figura 32(b).

Figura 32 – (a) Esfera fixada ao porta-esferas; (b) Posicionamento do porta-esferas



Fonte: o autor.

O fechamento das portas do tribômetro conclui as operações físicas para início do ensaio. Se as portas não forem fechadas, os sensores localizados na parte superior das portas não permitirão a ativação do equipamento. A partir desse ponto o tribômetro deve ser ligado e ativado, por meio dos botões apropriados, localizados no painel frontal inferior do tribômetro, bem como o computador ligado ao tribômetro.

4.2.3 Fixação do corpo de prova

A fixação do corpo de prova no módulo de aquecimento se dá por suportes metálicos presos por dois parafusos. É possível visualizar na Figura 33 o corpo de prova já preso, pronto para ser ensaiado.

Figura 33 – Corpo de prova fixado ao módulo de aquecimento



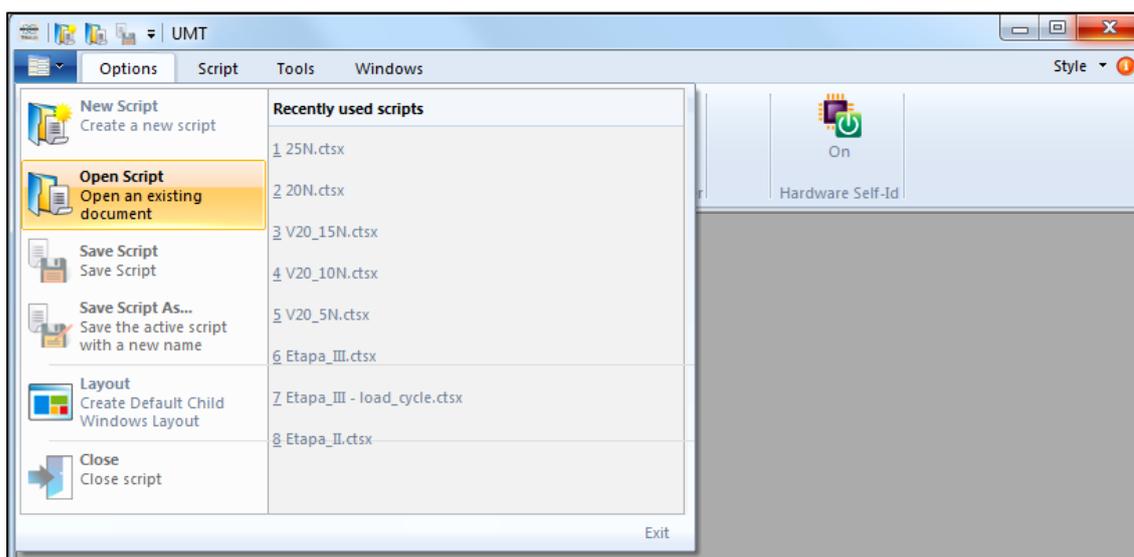
Fonte: o autor.

4.2.4 Configuração do software

No computador, abrir o software “UMT.exe - Shortcut” por meio do ícone localizado na área de trabalho.

Na janela do software, na parte superior esquerda, clicar no menu principal e em seguida selecionar a opção “Open Script”, conforme Figura 34, e abrir o arquivo do script configurado para realização do ensaio.

Figura 34 – Abrir o algoritmo (scrip)



Fonte: o autor.

O arquivo Script é um algoritmo com a sequência a ser executada no ensaio. Para ensaios dinâmicos de lubrificidade o algoritmo deve seguir as seguintes etapas:

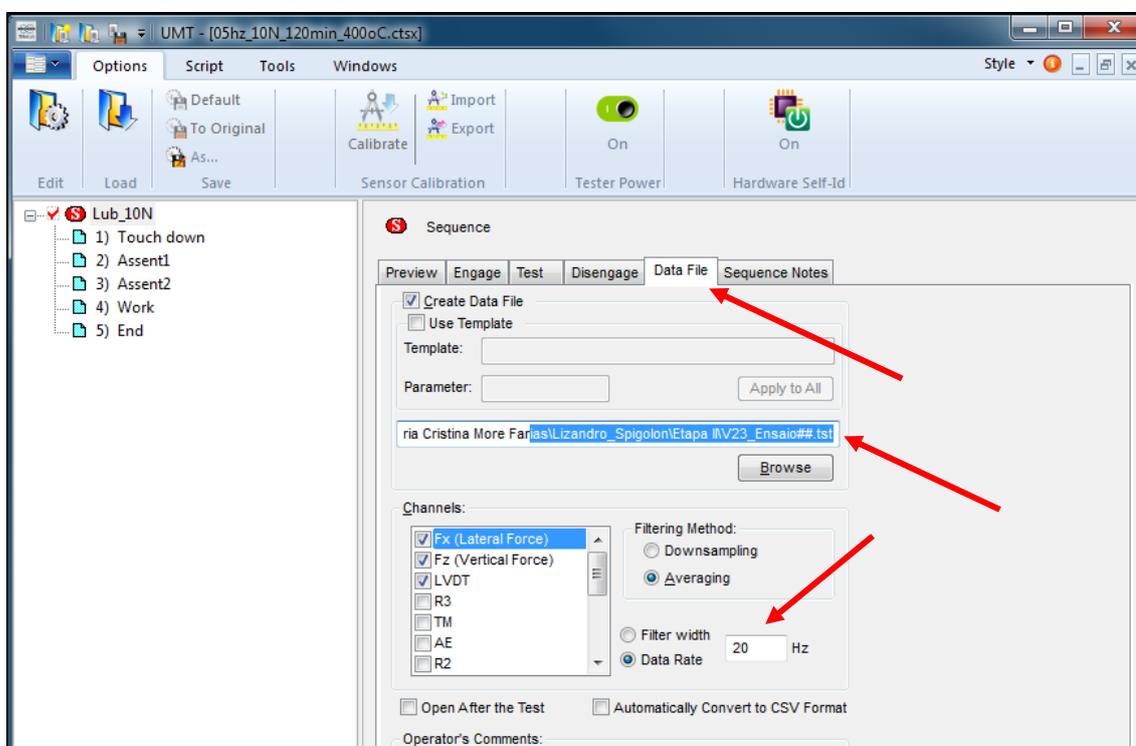
- a) Toque: Seguir as recomendações do equipamento referentes a velocidade de aproximação (pré-toque) e velocidade de carga (toque);
- b) Assentamento: Compreendido em duas etapas, sendo a primeira etapa configurada com velocidade de 1 Hz e a segunda etapa com velocidade de 0,5 Hz. Ambas as etapas em temperatura ambiente, força normal de 10 N e tamanho de trilha igual a 4 mm. A duração de cada uma das duas etapas de assentamento é de 15 min;
- c) Ensaio com temperatura: Os valores de força (10 N) e velocidade (0,5 Hz) da segunda etapa de assentamento são utilizados para o ensaio, bem como o tamanho de trilha de 4 mm, no entanto, o tempo total desta fase é de 120 min e a temperatura deve ser configurada para aumentar da temperatura ambiente até 400 °C durante o tempo do ensaio, ou seja, imediatamente ao término do ensaio a temperatura da amostra deve atingir os 400 °C;
- d) Finalização: Nesta etapa do script o tribômetro será ajustado para desligar o módulo de aquecimento e afastar a esfera da amostra.

O script ainda deve armazenar o arquivo gerado durante o ensaio em uma pasta específica, para posterior análise. Essa opção está disponível na configuração do script. Na

janela que abre ao selecionar o script, clicar na aba “Data File” e verificar o caminho de armazenamento do documento gerado no ensaio, e se necessário alterar o nome do arquivo e/ou destino. A Figura 35 exibe a tela de configuração dos parâmetros citados, com setas indicativas para facilitar a localização.

As medições realizadas pelo tribômetro são feitas em intervalos de tempo pré-determinados pelo usuário, que segundo recomendações do fabricante do equipamento, sugere utilizar um valor mínimo de 20 vezes a frequência do ensaio. Esse parâmetro deve ser ajustado na guia “Data File”, opção “Data Rate”, também sinalizado na Figura 35.

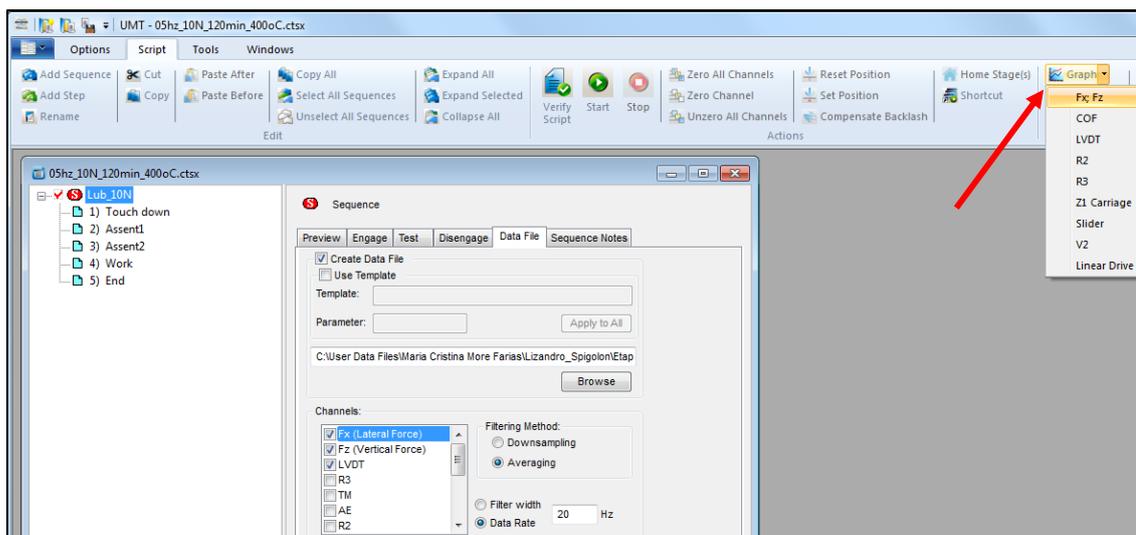
Figura 35 – Destino de armazenamento do arquivo gerado no ensaio



Fonte: o autor.

Na aba Script, no botão de opções do ícone Graph, clicar na opção LVDT para abrir o gráfico referente ao tamanho de trilha e em seguida, na mesma opção, abrir o gráfico “Fx, Fz”, que mostrará em tempo real as forças de atrito e a força normal aplicada a amostra. A Figura 36 aponta para o botão “Graph”, para facilitar a localização.

Figura 36 – Botão “Graph” na guia “Script” para abertura de gráficos de controle de ensaio



Fonte: o autor.

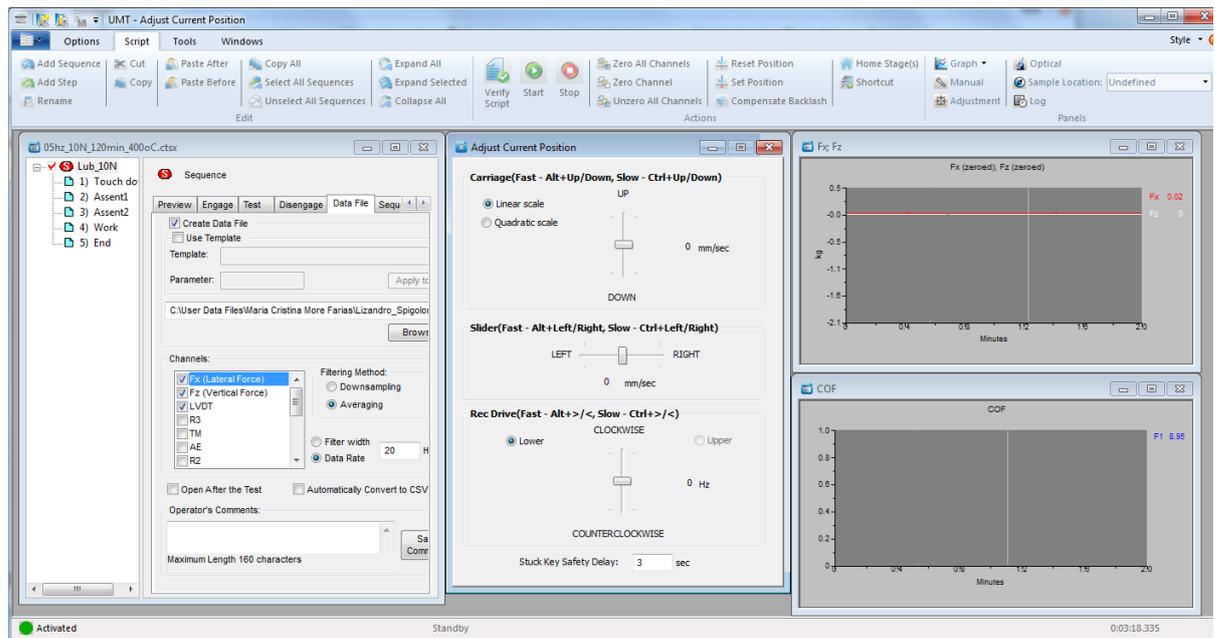
4.2.5 Ajuste do tribômetro

Ainda na aba “Script”, abrir a opção “Adjustment” e em seguida utilizar os controles de posicionamento para aproximar a esfera corpo de prova. Uma distância de aproximadamente 10 mm é suficiente para diminuir o tempo de ensaio, já que a velocidade de aproximação ao iniciar o ensaio é consideravelmente baixa.

A Figura 37 mostra o leiaute de tela recomendado para o início do ensaio. O leiaute é formado por uma janela referente ao script, uma segunda janela que permite ajustes de posicionamento da esfera, a terceira corresponde às forças de aplicação da carga normal na amostra e força de atrito entre a esfera e a amostra, e a quarta e última janela exibe em tempo real a movimentação da amostra em função do tempo.

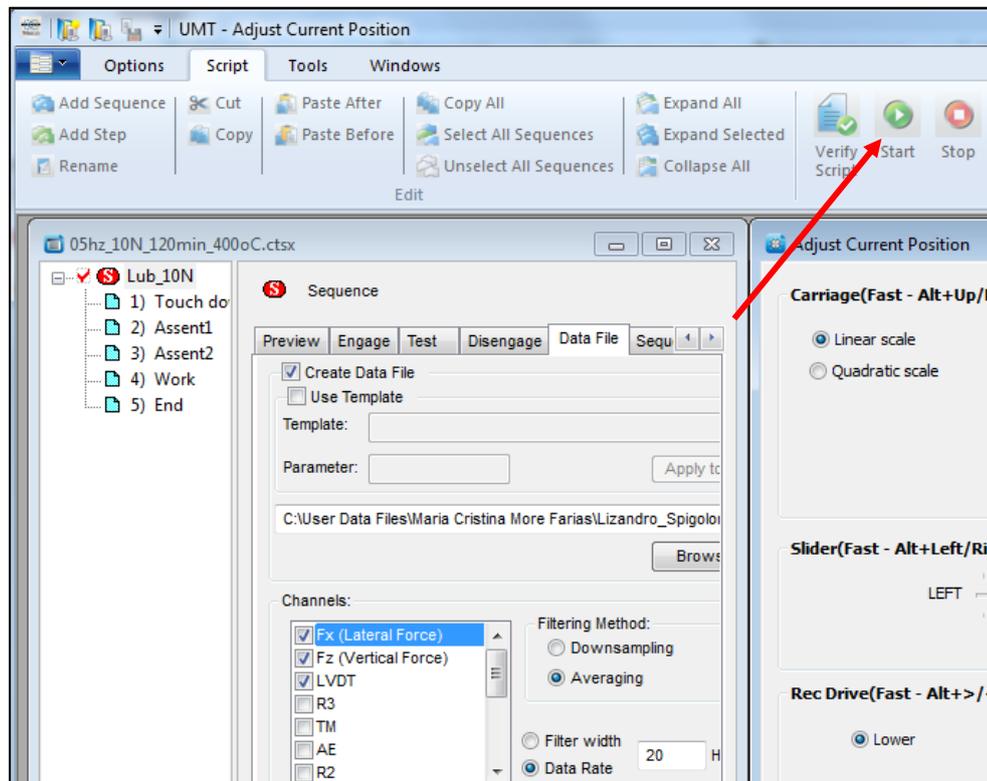
Executar script clicando no botão “Start” e aguardar até a conclusão do ensaio. Indicado na Figura 38.

Figura 37 – Leiaute recomendado para início do ensaio



Fonte: o autor.

Figura 38 – Botão "Start" para início do ensaio



Fonte: o autor.

4.2.6 Finalização do ensaio

Após resfriamento do módulo de aquecimento e da amostra, remover a amostra, identificar e armazenar em local apropriado. Em seguida remover o porta-esfera do suporte e então retirar a esfera, armazenando-a em local apropriado e guardar o porta-esfera no estojo das peças pertinentes ao equipamento.

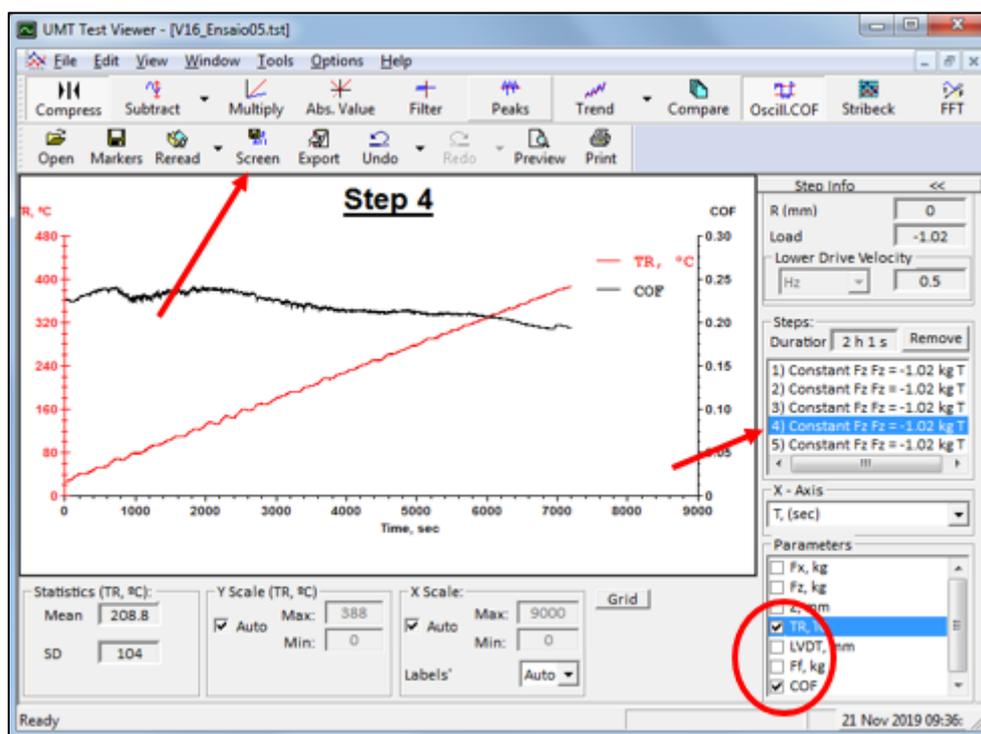
Possivelmente alguma amostra poderá liberar resíduos na forma de poeira, neste caso uma boa prática seria limpar o interior do equipamento com o auxílio de um pincel.

Todas as medições são feitas automaticamente pelo equipamento, cabendo ao operador do tribômetro acompanhar o ensaio, observando possíveis alteração no andamento.

Os resultados dos ensaios são automaticamente armazenados no diretório pré-determinado no script, porém a sequência abaixo se faz necessária para visualização dos resultados:

- a) Abrir a janela Viewer por meio do ícone “Viewer.exe”, localizado na área de trabalho do computador.
- b) Abrir o arquivo do ensaio executado ou qualquer outro ensaio que já tenha sido realizado, cujo arquivo esteja armazenado no computador ligado ao tribômetro. A Figura 39 é um exemplo de arquivo gerado no ensaio.
- c) Na janela ilustrada na Figura 39, do lado direito, selecionar a etapa correspondente ao ensaio, que no caso acima é a etapa 4, selecionar os parâmetros TR e Fx, em seguida clicar no botão “Screen” e salvar por meio do botão “Save”, na janela que abre. Na pasta de origem do arquivo aberto é criado um novo arquivo com mesmo nome, porém com extensão “.txt”. Esse arquivo poderá ser então aberto no software Microsoft Excel, por exemplo, para posterior análise ou tratamento dos dados.

Figura 39 – Ensaio exemplo



Fonte: o autor.

Para importar o arquivo no software Excel, abrir o software, clicar na guia arquivo e selecionar a opção “Abrir”. Na janela que abre, ao lado do campo “Nome do arquivo”, escolher na lista a opção “Todos os arquivos”. Então abrir a pasta onde encontram-se o(s) arquivo(s), selecionar o arquivo desejado e clicar em abrir. Na janela “Assistente de importação de texto”, que abre, em “Tipo de campo”, escolher a opção “Delimitado” e clicar em avançar. Na janela seguinte, na opção “Delimitadores”, marcar as caixas checkbox “Tabulação” e “Ponto e vírgula”, e clicar em avançar. Na janela seguinte, clicar no botão “Concluir”.

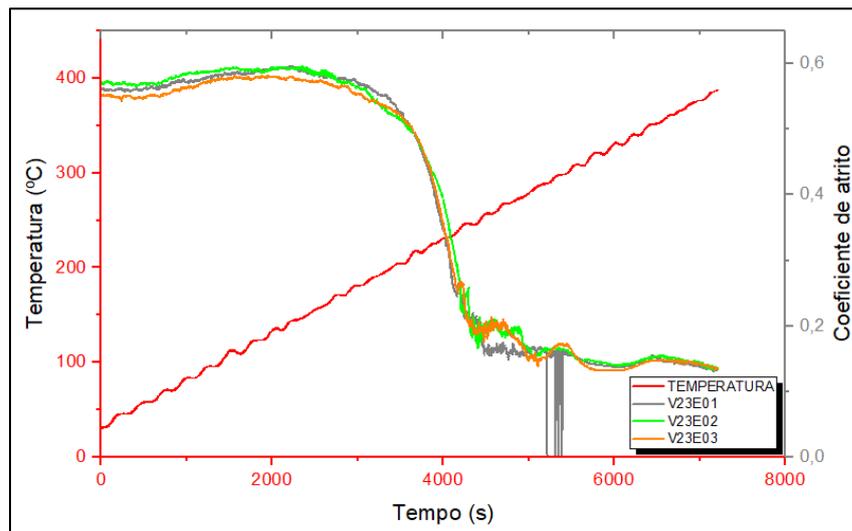
O procedimento acima descrito deve ser realizado para cada ensaio, porém cada arquivo importado deve estar em uma nova planilha.

Com os dados já no Microsoft Excel, pode-se gerar gráficos ou utilizar as ferramentas matemáticas e/ou estatísticas mais convenientes para visualização dos resultados.

4.3 COMPROVAÇÃO DO MÉTODO

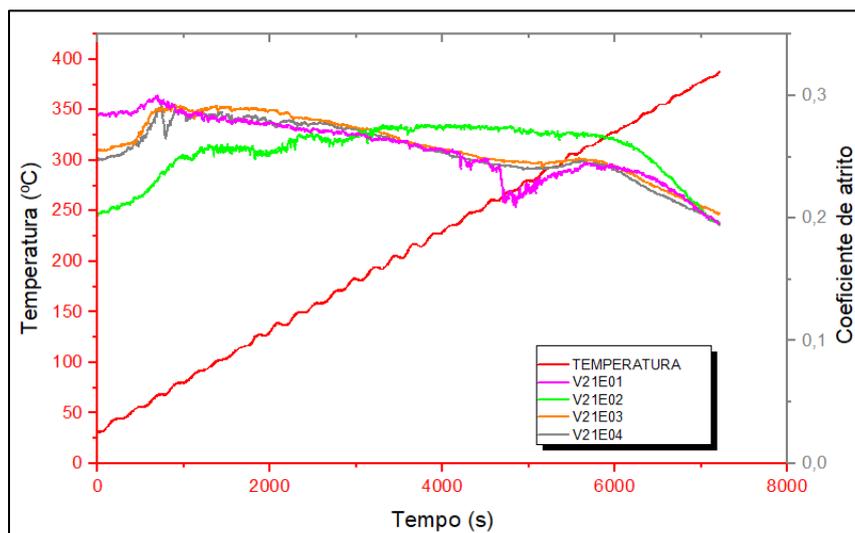
Para efeitos de comprovação do método desenvolvido, foram realizados ensaios com outros dois lubrificantes sólidos, sendo um deles uma das variações do grafite e o outro, um sulfeto a base de manganês. Os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos podem ser visualizados nas Figura 40 e 41

Figura 40 – Ensaio dinâmico com Sulfeto de manganês e ferro



Fonte: o autor.

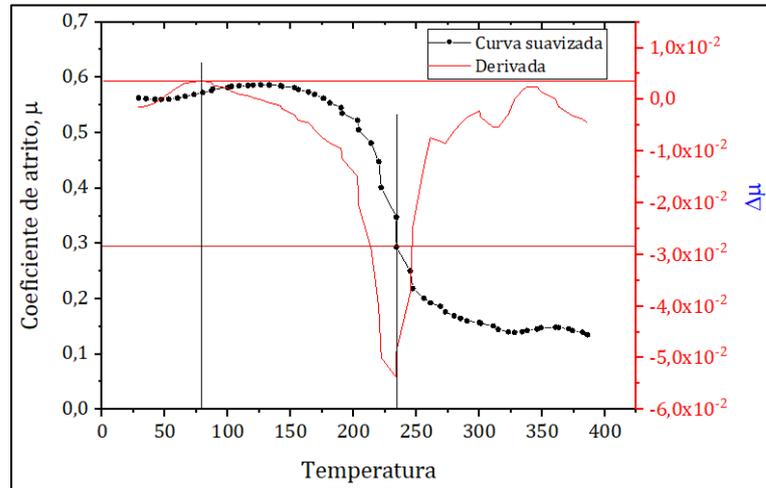
Figura 41 – Ensaio dinâmico com grafite mola



Fonte: o autor.

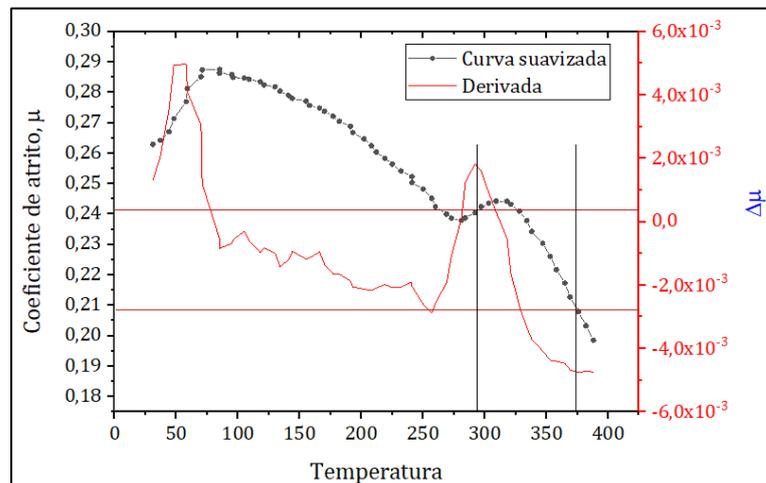
Com os dados importados para o software Microsoft Excel, foram então feitas as médias das curvas para ambos os lubrificantes e em seguida, com a nova curva, foram aplicadas as funções de suavização e derivada, obtendo-se os gráficos das Figura 42 e 43.

Figura 42 – Sulfeto de manganês e ferro



Fonte: o autor.

Figura 43 – Grafite sintético mola



Fonte: o autor.

Foram encontrados os valores das temperaturas de início e fim da queda sistemática do coeficiente de atrito, bem como o coeficiente de atrito, no ponto de início e fim da queda. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Pontos iniciais e finais de temperatura e coeficiente de atrito

	T _{onset}	T _{offset}	μ _{inicial}	μ _{final}
Sulfeto manganês e ferro	60	235	0,59	0,29
Grafite mola	290	375	0,242	0,208

Fonte: o autor.

Tabela 3 – Resultados de variação do coeficiente de atrito e temperatura

	ΔT	Δμ
Sulfeto manganês e ferro	175	0,3
Grafite mola	85	0,034

Fonte: o autor.

Assim como nos ensaios realizados para elaboração do método proposto, no presente trabalho, os dados obtidos nos ensaios para comprovação do método foram consistentes e comprovam a metodologia desenvolvida.

5 CONCLUSÃO

Por meio dos ensaios tribológicos de deslizamento alternado com variação de temperatura desde a temperatura ambiente até 400 °C, foi possível avaliar a influência da temperatura no coeficiente de atrito de formulações modelo contendo diferentes lubrificantes sólidos e resina fenólica.

A temperatura de início da queda no coeficiente de atrito (Tonset) e a variação percentual do coeficiente de atrito com o aumento da temperatura ($\Delta\mu$) permitem qualificar compósitos constituídos por lubrificante sólido e resina fenólica quanto a sua propensão ao fade. Uma maior temperatura Tonset qualifica um material melhor em termos de propensão ao fade que outro que apresente Tonset menor. Também será melhor o material que apresente $\Delta\mu$ menor.

Dentre os quatro lubrificantes sólidos avaliados, o trissulfeto de antimônio (TA) é o de melhor qualidade e o bissulfeto de molibdênio (BM), o pior. Ao aplicar o modelo de análise a todos lubrificantes sólidos avaliados, ficam assim classificados, de melhor a pior, TA, GN, GS e BM.

Os resultados obtidos se mostram consistentes para a proposição de um método de obtenção de parâmetros tribológicos como a lubricidade e o *fade* de compósitos formados por resina fenólica e lubrificante sólido. Ao testar o método com outros lubrificantes sólidos foi possível comprovar a metodologia proposta.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios com medição da temperatura das amostras de lubrificantes sólidos (temperatura bulk) com intuito de estimar a temperatura de contato e avaliar seu efeito no coeficiente de atrito e nas alterações químicas dos materiais durante o contato.

Realizar os mesmos ensaios com outros tipos de lubrificantes sólidos da família de grafites, sulfetos e outros, de forma individual ou com combinações de dois ou mais lubrificantes sólidos.

Estudar amostras com diferentes combinações e proporções de lubrificantes sólidos, de abrasivos e, com constituição cada vez mais próxima dos materiais de fricção.

Além do coeficiente de atrito, e da prospecção ao *fade*, determinar a resistência ao desgaste das diferentes combinações e proporções de lubrificantes sólidos, em função da temperatura e da carga normal.

REFERÊNCIAS

ABDI. Estudo Prospectivo Setorial Automotivo. Brasília: ABDI, 2009.

BLAU, P. J. Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2001.

BLAU, P. J. Research on Non-Traditional Materials for Friction Surfaces in Heavy Vehicle Disc Brakes. A Compilation and Summary of Laboratory Tests. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2004.

BLAU, P. J. et al. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. *Wear*, v. 263, n. 7–12, p. 1202–1211, set. 2007.

BRAKES, E. What is brake fade? Disponível em: <<https://ebcbrakes.com/articles/what-is-brake-fade/>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

CARRETEIRO, R. P.; MOURA, C. R. S. Lubrificantes e lubrificação. 2. ed. [s.l.] Makron, 1998.

CHAN, D.; STACHOWIAK, G. W. Review of automotive brake friction materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, v. 218, n. 9, p. 953–966, 9 set. 2004.

EBC BRAKES. What is brake fade ? Disponível em: <http://www.tibrake.com/What_Is_Brake_fade>. Acesso em: 20 nov. 2019.

FRIEDRICH, K. *Advances in Composite Tribology*. [s.l.] Elsevier Science, 2012.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: Friction and wear of engineering materials: Second Edition*. [s.l.: s.n.].

KUMAR, M.; BIJWE, J. NAO friction materials with various metal powders: Tribological evaluation on full-scale inertia dynamometer. *Wear*, v. 269, n. 11–12, p. 826–837, 2010.

LIMPERT, R. *Brake Design and Safety, Third Edition*. [s.l.: s.n.].

NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem*. 4. ed. [s.l.] Bookman, 2013.

ÖSTERLE, W.; DMITRIEV, A. The Role of Solid Lubricants for Brake Friction Materials. *Lubricants*, v. 4, n. 1, p. 5, 29 fev. 2016.

PEREIRA, A. A.; BORGES, J. D.; LEANDRO, W. M. Metais pesados e micronutrientes no solo e em folhas de *Brachiaria decumbens* às margens de rodovias. *Bioscience Journal*, v. 26, n. 3, p. 347–357, 2010.

RAJAN, B. S. et al. Influence of Binder on Thermomechanical and Tribological Performance in Brake Pad. *Tribology in Industry*, v. 40, n. 4, p. 654–669, dez. 2018.

REIF, K. Brakes , Brake Control and Driver Assistance Systems: Function, Regulation and Components. Fachmedien Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

SAMPAIO, J. A. et al. Grafita. [s.l.] Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005.

SCHMIDT, D. G. Avaliação estrutural de dois materiais compósitos após exposição a alta temperatura. Rio de Janeiro, Brazil: 2018. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul ÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 22 jul. 2016.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. ilustrada ed. [s.l.] Elsevier Butterworth-Heinemann, 2001.

VIEIRA, F. DE A. Estudos sobre o comportamento do antimoniato de meglumina no corpo humano e em macacos Rhesus. [s.l.] PUC-Rio, 2008.