

## Metodologias de ensaios de lubricidade: uma revisão de literatura

*Victor Soares Gualberto<sup>1</sup>*  
*Raoni Alves de Lima<sup>2</sup>*  
*André Valente Bueno<sup>3</sup>*  
*Ada Amélia Sanders Lopes<sup>4</sup>*  
*Maria Alessandra de Sousa Rios<sup>5</sup>*

### RESUMO

A partir do momento em que o homem começou a utilizar superfícies com movimento relativo, ele empenhou-se na busca de métodos para reduzir o atrito e, consequentemente, o desgaste. Sempre em busca da maior redução do atrito, cientistas trabalham no desenvolvimento de novas tecnologias que sejam capazes de reduzir o desgaste e, ao mesmo tempo, permitam o desenvolvimento sustentável. Entre os elementos utilizados para a redução do atrito, podem-se destacar os lubrificantes, as graxas, o acabamento superficial, e o uso de revestimentos e aditivos. Entretanto, para que novos produtos, como biolubrificantes, biocombustíveis e aditivos, sejam aplicados no mercado, é necessário realizar ensaios experimentais, que avaliem as propriedades tribológicas nas aplicações desejadas. Como existem vários ensaios tribológicos disponíveis, o pesquisador deve selecionar aquele que mais se adapta às suas necessidades e escolher os parâmetros que se assemelhem à aplicação requerida. A depender da escolha, pode haver interpretações errôneas dos resultados. Dentro desse contexto, o presente trabalho buscou reunir os principais ensaios de tribologia utilizados, apresentando suas finalidades e os principais parâmetros avaliados, permitindo, assim, ao leitor, uma introdução aos conceitos de lubrificação e ao conhecimento dos ensaios de lubricidade.

**Termos para indexação:** biocombustível, biolubrificante, desgaste, ensaio tribológico, lubrificação.

### Lubricity testing methodologies: a literature review

### ABSTRACT

Since man began to use surfaces with relative movement and contact, he has been researching methods to reduce friction and, consequently, wear. Always in search of the greatest reduction of friction, researchers have been working on the development of new technologies capable of reducing wear, and at the same time, allowing sustainable development. Among ways of friction-reducing, lubricants, greases, surface treatment, coatings, and additives can be highlighted. However, for new products such as

### Ideias centrais

- Apresentação dos principais ensaios de tribologia, permitindo ao leitor uma introdução aos conceitos de lubrificação e conhecimento dos ensaios de lubricidade.
- Levantamento bibliográfico sobre bancadas e equipamentos de testes de lubrificantes, biolubrificantes e biocombustíveis, apresentando as diferentes formas de avaliação da lubricidade.
- É retratada a temática biolubrificante/ teste de lubricidade, com apresentação das especificidades dos testes tribológicos Pin on Disk, Four Ball, Block on Ring e HFRR.
- São apresentadas as configurações dos ensaios tribológicos Pin and Vee Block, Pin on Disk, Four ball, Block on ring e Linear reciprocating.

Recebido em  
07/06/2020

Aprovado em  
12/08/2020

Publicado em  
26/10/2020



This article is published in Open Access under the Creative Commons Attribution licence, which allows use, distribution, and reproduction in any medium, without restrictions, as long as the original work is correctly cited.

<sup>1</sup> Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Fortaleza, CE. E-mail: victorgualberto1@gmail.com

<sup>2</sup> Engenheiro mecânico, aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Fortaleza, CE. E-mail: raonialvesdelima@gmail.com

<sup>3</sup> Engenheiro mecânico, doutor em Engenharia Mecânica, professor associado da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. E-mail: bueno@ufc.br

<sup>4</sup> Engenheira química, doutora em Engenharia Civil Saneamento Ambiental, professora adjunta da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Acarape, CE. E-mail: ada@unilab.edu.br

<sup>5</sup> Engenheira química, doutora em Química Inorgânica, professora adjunta da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. E-mail: alessandrarios@ufc.br

biolubricants, biofuels, and additives to be applied to the market, it is necessary to carry out tests to assess the tribological properties in the desired applications. Due to the existence of several tribological tests, the researcher must select the experiment that best suits his needs and choose the parameters that resemble the required application. Misinterpretations of the results may occur due to the wrong choice of method. So, the paper presents a review of the main tribology tests used, showing their purposes and main parameters evaluated, thus allowing the reader to know the fundamentals of lubrication and lubricity tests.

**Index terms:** biofuel, biolubricant, wear, tribological testing, lubrication.

## INTRODUÇÃO

Na maioria dos sistemas mecânicos, o atrito entre as peças é um fator a ser reduzido ao máximo quando se busca o aumento da eficiência. Essa redução do atrito entre as peças que possuem movimento relativo entre si é realizada majoritariamente com a inserção de uma camada fina de lubrificante entre as superfícies em contato. O lubrificante pode formar uma camada entre as superfícies deslizantes, evitando o contato direto e prevenindo o desgaste excessivo, o que contribui para a redução do coeficiente de atrito e para a diminuição de falhas mecânicas e de consumo, e, conseqüentemente, para o aumento da vida útil do equipamento (Krupka et al., 2016; Chan et al., 2018; Peña-Parás et al., 2018; Wang et al., 2018; Machado et al., 2019).

A essa necessidade de utilização de lubrificantes em sistemas mecânicos se soma uma crescente preocupação com o ambiente, pressionando indústrias e pesquisadores a desenvolver produtos biodegradáveis, que não afetem negativamente o ambiente, seguindo a corrente do desenvolvimento sustentável (Chan et al., 2018). Nesse cenário, os biolubrificantes mostram ser um bom substituto de óleos minerais, uma vez que as especificações técnicas dos lubrificantes convencionais são mantidas (Zainal et al., 2018). Segundo Tsagaraki et al. (2017), há expectativa de que o mercado global de biolubrificantes cresça a uma taxa anual de 5,4% entre 2016 e 2024.

Em automóveis de pequeno e médio porte, cerca de 33,3% da energia que poderia ser aproveitada do combustível é gasta com o atrito no motor, na transmissão, nos pneus e nos freios. De toda a energia consumida, somente 21,5% são utilizados no mecanismo de propulsão do veículo. Já em carros elétricos, estima-se que a energia dissipada pelo atrito é de apenas 50% da energia dissipada pelo atrito em carros de combustão interna (Holmberg et al., 2012).

Holmberg et al. (2012) propõem algumas soluções para reduzir o atrito em automóveis, como: a melhoria da qualidade das superfícies de contato dos componentes do motor e da transmissão, o desenvolvimento de novos lubrificantes com baixa viscosidade e a produção de novos aditivos. Com a redução do atrito, os motores de combustão interna aproveitariam melhor a energia disponível no combustível, o que acarretaria a redução do consumo e da emissão de poluentes.

Conforme mencionado anteriormente, um dos mecanismos de redução do atrito entre peças metálicas é a lubrificação, a qual se utiliza de lubrificantes que são majoritariamente produzidos a partir de derivados do petróleo (Cavalcanti, 2014). No entanto, com o intuito de obter-se produtos que atendam às diretrizes do desenvolvimento sustentável, segmentos industriais e centros de pesquisa têm desenvolvido combustíveis e lubrificantes derivados de fontes renováveis, a exemplo do biodiesel e dos biolubrificantes oriundos de óleos vegetais (Attia et al., 2020; Owuna et al., 2020; Rios et al., 2020; Singh et al., 2020). Visando ainda à melhoria da lubrificidade, novos aditivos têm sido produzidos e incorporados às formulações de lubrificantes e biolubrificantes (Anastopoulos et al., 2018; Shaigan et al., 2020; Xie et al., 2020), ajudando a reduzir o atrito e o desgaste das superfícies metálicas.

No estudo da interação e desgaste de superfícies em movimento relativo tem-se a tribologia, ciência dedicada aos assuntos e práticas relacionadas ao atrito, desgaste e lubrificação. Como eixo inovador da área, com vista à preservação do meio ambiente, à sustentabilidade e ao desenvolvimento de bioprodutos, surgiu a chamada “tribologia verde” ou *green tribology*. De acordo com Zhang (2013), *green tribology* representa o uso do conhecimento em tribologia para economizar energia e material, reduzir a poluição sonora e aumentar o uso de biolubrificantes, resultando em melhoramento da qualidade de vida. Para Nosonovsky & Bhushan (2010), *green tribology* é o estudo tribológico de turbinas eólicas e painéis solares, além de ser uma ciência que avalia o meio ambiente e os impactos

tribológicos, não estando focada apenas em eficiência mecânica e redução de custos. Já Dutta & Singh (2014) relatam que *green tribology* tem papel fundamental na questão da preservação ambiental, pois aborda a economia do uso de carbono, que dialoga diretamente com a crise energética, a poluição ambiental e a mudança climática, mostrando-se como um tema atual, com crescente discussão e nível de importância mundial.

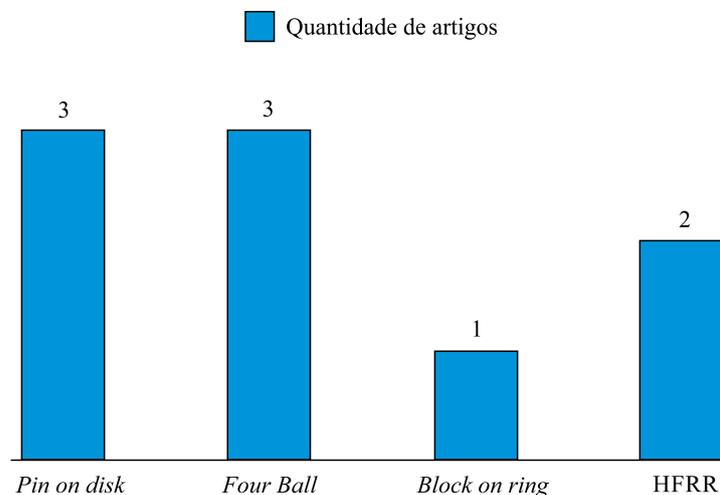
Sabe-se, no entanto, que, em alguns experimentos, somente a inclusão de aditivos não é capaz de promover a efetiva lubrificidade dos sistemas mecânicos. Podgornik & Vižintin (2005) avaliaram a utilização do revestimento de carbono (*diamond-like-carbon*) e as reações químicas que ocorrem entre os metais com esse revestimento e os aditivos utilizados nos lubrificantes em contato com esses metais. Observaram, então, que, a depender do tipo de aditivo que está em contato com o revestimento, é possível haver redução do coeficiente de atrito e formação do tribofilme de forma mais acelerada.

Muitos experimentos devem ainda ser realizados para identificar a performance de novos lubrificantes e aditivos de lubrificidade, conforme suas condições de uso. Como cada lubrificante e cada aditivo possuem compostos químicos diferentes, eles naturalmente apresentarão comportamentos distintos e capacidades de lubrificação diferentes. Nesse cenário, este trabalho teve como objetivo realizar um levantamento bibliográfico, com base na literatura internacional, sobre bancadas e equipamentos de testes de lubrificantes, biolubrificantes e biocombustíveis, e as diferentes formas de avaliação da lubrificidade.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida entre os meses de março de 2019 e abril de 2020, com foco na avaliação da lubrificidade de lubrificantes, biolubrificantes e biocombustíveis, com o intuito de fazer um levantamento das metodologias existentes, dos equipamentos específicos, de bancadas de teste, bem como dos resultados encontrados e suas interpretações.

Com o objetivo de refinar a busca e direcionar a pesquisa, foram utilizadas as palavras-chave: *lubricant, bench test, wear test, high frequency reciprocating rig (HFRR), scar assessment, biolubricant, green tribology, pin and vee block, tribotester e pin on disk*. Foram utilizadas as seguintes bases: ScienceDirect e os periódicos Capes, Scielo e Scopus. Os principais artigos analisados foram publicados em revistas de alto impacto. Do levantamento realizado, quatro artigos retrataram a temática biolubrificante/teste de lubrificidade, um avaliou a lubrificidade do biodiesel e três investigaram aditivos com impacto na lubrificidade de óleos. Quanto à especificidade dos testes tribológicos, três autores utilizaram o teste *pin on disk*, três utilizaram o *four ball*, um utilizou o *block on ring* e dois utilizaram o HFRR. A Figura 1 apresenta a quantidade de artigos analisados por tipo de triboteste aplicado.



**Figura 1.** Quantidade de artigos analisados por triboteste aplicado.

## TEMAS AVALIADOS

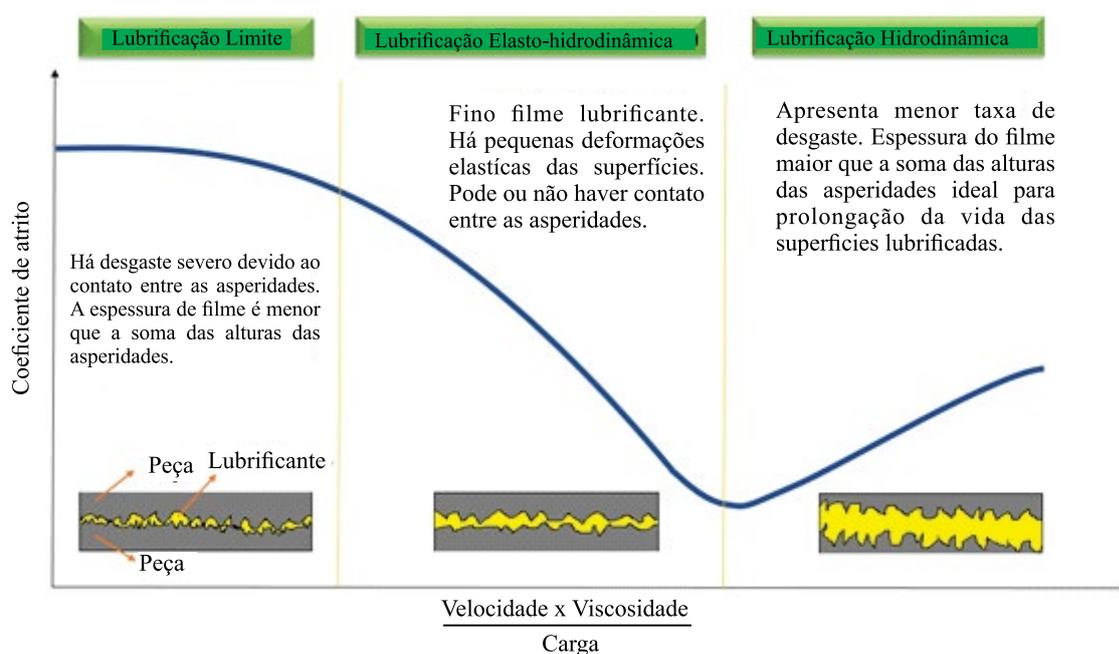
**Lubrificação**

Devido à presença de rugosidade nas superfícies dos sólidos, o contato entre picos e vales gera forças resistentes ao movimento relativo de dois corpos em contato (Hsieh & Bruno, 2015). A função principal do lubrificante é criar uma camada de filme entre as superfícies em contato, de forma que a espessura dessa camada seja maior que a soma dos picos, impedindo, assim, que elas se toquem, reduzindo, conseqüentemente, o atrito no sistema. Além disso, os lubrificantes exercem também a função de resfriamento, limpeza, proteção e transferência de potência (Li et al., 2020; Liu et al., 2020; Vengudusamy et al., 2020). A principal função do lubrificante dependerá do sistema ao qual será aplicado (Rizvi, 2009).

A fina camada que é formada entre as superfícies é produzida por processos de quimissorção ou fisissorção das moléculas polares do lubrificante na superfície, em que quais átomos, moléculas ou íons são retidos na superfície de um sólido por meio de reações químicas ou físicas. Os processos de adsorção promovem uma barreira efetiva contra o contato metal-metal (Liang et al., 2003).

Os lubrificantes líquidos apresentam geralmente três regimes de lubrificação: a lubrificação limite, a lubrificação elasto-hidrodinâmica e a lubrificação hidrodinâmica. Na lubrificação limite, a espessura do filme é menor que  $0,025 \mu\text{m}$ , que acaba sendo normalmente menor do que a altura da aspereza da superfície. A lubrificação elasto-hidrodinâmica é caracterizada por um filme fino de lubrificação, com espessura de aproximadamente  $0,025 \mu\text{m}$  a  $2,5 \mu\text{m}$ . Apesar de serem filmes finos, podem ser maiores que a altura da aspereza da superfície. Muitas vezes, é considerada como um regime de lubrificação intermediária, podendo ser classificada como um filme misto, ou seja, de transição entre a lubrificação limite e a lubrificação elasto-hidrodinâmica. A lubrificação hidrodinâmica consiste em uma espessura de filme tipicamente maior que  $0,25 \mu\text{m}$ , que é normalmente superior às alturas das asperezas das superfícies.

Esses regimes de lubrificação podem ser verificados na curva de Stribeck, que é um gráfico do coeficiente de fricção, como função do produto da viscosidade absoluta e da velocidade de rotação em revolução por segundo, dividido pela carga por unidade de área (Liang et al., 2003). A Figura 2 apresenta o gráfico de Stribeck e os regimes de lubrificação.



**Figura 2.** Gráfico de Stribeck: coeficiente de atrito *versus* [(velocidade × viscosidade)/carga].

## Testes de lubrificação e desgaste

Existem muitas metodologias de avaliação da interação entre superfícies na presença de lubrificantes. De acordo com os testes, o projetista, tendo conhecimento de como as superfícies interagem, pode tomar decisões para reduzir o desgaste resultante do contato durante o movimento relativo, e, assim, aumentar a durabilidade do sistema (Górny et al., 2019; Raja et al., 2020; Xie et al., 2020).

Os equipamentos para a avaliação do desgaste apresentam três níveis de complexidade. Alguns equipamentos utilizam modelos de contato simplificados, que é o caso de dispositivos de laboratórios; outros utilizam partes e montagem da aplicação que se deseja analisar, que são as bancadas de teste de componentes; e ainda há os testes de campo, nos quais os materiais são analisados diretamente nos sistemas que se deseja investigar. Dessa forma, diferentes sistemas tribométricos podem ser utilizados.

O uso de bancadas de laboratório, embora muitas vezes não reproduza com exatidão o comportamento do desgaste na aplicação desejada, permite a investigação de diferentes cenários, com a modificação de certos parâmetros, como velocidade, carga, umidade, temperatura e materiais, além de serem de baixo custo e simples operação (Malakar & Trishul, 2020). Nesse contexto, esses equipamentos têm sido aplicados em etapas preliminares de projetos de pesquisa e desenvolvimento, haja vista admitirem a avaliação de múltiplos cenários, ao contrário da aplicação de equipamentos de grande porte e de testes em campo, os quais permitem estudos de casos específicos, sendo utilizados em etapas finais dos projetos (Voitik, 1993).

Nos ensaios tribológicos, certos parâmetros devem ser avaliados, devendo representar o comportamento do sistema real da forma mais fiel possível. Os parâmetros são: movimento, velocidade, carga, pressão de contato, materiais e duração do teste (Singh & Goel, 2018). Ajustando-se esses parâmetros, devem-se obter como resposta dados relacionados ao desgaste, à força de fricção ou torque, ao coeficiente de fricção e à análise do lubrificante e aditivos de lubrificidade. O pesquisador deve ficar atento à velocidade e à carga aplicadas no teste, pois, dependendo dos valores selecionados, pode haver mudança do regime de lubrificação, sendo necessária uma prévia avaliação do gráfico de Stribeck, o qual mostrará a relação entre o coeficiente de atrito e a razão da viscosidade, a velocidade e o inverso da carga, conhecido como número de Sommerfeld (Figura 2).

## Testes tribológicos

Para avaliar a lubrificidade de biolubrificantes e biocombustíveis, existem muitos testes tribológicos, com variação de metodologia de ensaio, duração do teste e investigação de parâmetros. Na Tabela 1, estão apresentadas referências para os diferentes tipos de testes tribológicos, envolvidos na avaliação da lubrificidade de biolubrificantes, biocombustíveis e aditivos.

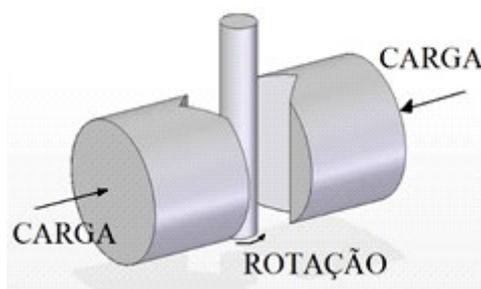
De acordo com as informações apresentadas na Tabela 1, os testes tribológicos *pin on disk*, *four ball*, *block on ring* e HFRR são bastante utilizados para avaliar a performance de lubrificantes do biodiesel, lubrificantes derivados de óleos vegetais e aditivos de lubrificidade.

**Tabela 1.** Testes tribológicos para a avaliação da lubrificidade de biolubrificantes, biocombustíveis e aditivos.

Tipo de teste	Fluido analisado	Duração do teste	Velocidade e frequência	Carga	Melhor performance	Referência
<i>Pin on disk</i>	Biolubrificante à base de óleo de palma e óleo hidráulico	1 hora	0,4 m/s e 4 m/s	10 N	Biolubrificante à base de óleo de palma	Syahrullail et al. (2013)
<i>Pin on disk</i>	Óleo SAE 10W30 com e sem grafeno como aditivo	2 horas	191 rpm	125,66 N	Lubrificante com grafeno	Wang et al. (2019)
<i>Pin on disk</i>	Diferentes concentrações da mistura de biolubrificante e biodiesel feito à base de óleo de cozinha usado	1 hora	500 rpm	49 N	Mistura com 10% de óleo lubrificante com biodiesel	Singh & Goel (2018)
<i>Four ball</i>	Biolubrificante à base de óleo de palma sem TBHQ e com TBHQ	1 hora	1.200-1.400 rpm	392 N	Biolubrificante com TBHQ	Zulhanafi & Syahrullail (2019)
<i>Four ball</i>	Lubrificante mineral e biolubrificante adicionado de óxido de titânio	0,1 hora	1.200 rpm	392,4 N 784,8 N 1.177,2 N 1.569,6 N	Biolubrificante adicionado de óxido de titânio	Zulkifli et al. (2013)
<i>Four ball</i>	Lubrificante mineral com partículas suspensas de óxido de cobre e sem partículas suspensas	0,25 hora	1.200 rpm	392,4 N	Lubrificante com partículas suspensas de óxido de cobre	Asrul et al. (2013)
<i>Block on ring</i>	Biolubrificante à base de óleo de carnaúba	2 horas	1500 rpm	1,2 N	Não houve comparação	Cavalcanti (2014)
HFRR	Diesel-etanol e biodiesel-etanol	0,8 hora	50 Hz	1,96 N	Não houve comparação	Kuszewski et al. (2017)
HFRR	Diferentes concentrações da mistura de biolubrificante e biodiesel feito à base de óleo de cozinha usado	0,3 hora	20 Hz	9,8 N	Mistura com 10% de óleo lubrificante com biodiesel	Singh & Goel (2018)

### Instrumentos para a avaliação da lubrificidade

Basicamente, o teste consiste em um pino vertical, que apresenta velocidade de rotação específica, e dois pinos com ponta em V, que pressionam um contra o outro, tendo como intermédio o pino rotacional na vertical (Omran et al., 2016). A Figura 3 apresenta a configuração do teste *pin and vee block*. As informações do coeficiente de fricção estão diretamente relacionadas à medição do torque no pino giratório. Por ser uma configuração antiga, existem poucos trabalhos, em comparação com outras configurações de tribômetros, que ainda utilizam esse modelo para a realização de ensaios tribológicos.

**Figura 3.** Configuração do teste *pin and vee block*.

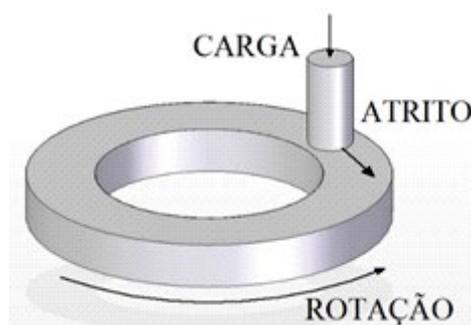
Zhou et al. (1992) avaliaram a performance de aditivos de lubrificidade em um óleo mineral. Os experimentos foram realizados com superfícies de cobre, aço e ferro fundido, e os aditivos investigados foram dibenzyl disulfide, D-*n*-butyl phosphite, zinc dialkylidithiophosphate e organo-boron antiwear additive. Os autores utilizaram uma carga de 88,9 N, com acréscimo de 88,9 N a cada 2 minutos. De

acordo com os resultados, o organo-boron antiwear additive apresentou significativa propriedade antidesgaste, principalmente quando em contato com superfícies de cobre e aço. O D-*n*-butyl phosphite mostrou boa capacidade de lubrificação quando em contato com as superfícies de cobre, aço e ferro fundido. Já os aditivos dibenzyl disulfide e zinc dialkyldithiophosphate potencializaram a lubricidade do óleo mineral em superfícies de aço.

No estudo de Riddle & Bailerare (2005), o teste de *pin and vee block* foi utilizado para avaliar a resistência ao desgaste de uma superfície revestida por níquel-boro, a qual foi preparada por meio da tecnologia do banho de revestimento Ultracem™. Foi aplicada uma pressão de 3.447 MPa por 15 minutos. Os resultados apontaram que o sistema apresentou pouca perda de massa e menor valor para o coeficiente de atrito, quando comparado aos revestimentos de níquel não eletrizado, carbeto de tungstênio e cromo.

### ***Pin on disk***

O mecanismo de teste é composto por um disco em rotação e um pino sob o qual é aplicada uma carga (Figura 4). O disco pode tocar uma mesma região radial ou variar sua posição, entrando em contato com regiões que ainda não sofreram desgaste. O experimento geralmente é utilizado para investigar a taxa de desgaste e o coeficiente de fricção. A medição do desgaste pode ser feita por um perfilômetro, que avalia a profundidade das ranhuras formadas no disco, decorrentes do desgaste.



**Figura 4.** Configuração do teste *pin on disk*.

Na investigação de Kennedy et al. (2015), equações foram formuladas para predição da temperatura na região de contato em amostras de cerâmica (zircônia), metal (aço inoxidável) e polímero (polietileno), durante a execução do teste *pin on disk*. A possibilidade de predição da temperatura no teste tribológico pode evitar que se atinjam temperaturas prejudiciais aos materiais em contato e, assim, possam mascarar os resultados. Como conclusão do estudo, os autores relataram que a simulação computacional por elementos finitos apresentou resultados compatíveis com os experimentos realizados em laboratório. Ademais, descobriu-se que o desgaste em discos de cerâmica e pino metálico pode acarretar o aumento do desgaste na cerâmica, por conta da transformação de fase, que ocorre pela alta temperatura na região de contato.

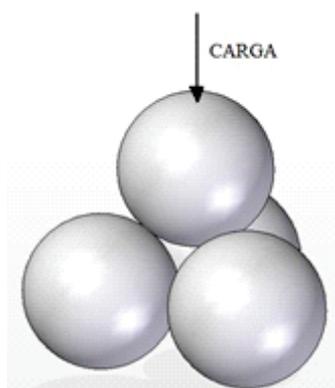
Syahrullail et al. (2013) utilizaram o tribômetro no teste *pin on disk* para avaliar a lubricidade de um lubrificante produzido a partir do óleo de palma em comparação com outro, à base de óleo hidráulico. Os autores aplicaram uma carga vertical de 10 N e testaram o comportamento do óleo em duas velocidades, 0,4 m/s e 4,0 m/s, seguindo a norma ASTM G99. A ponta do pino tem formato semiesférico. Tanto o pino quanto o disco eram fabricados em aço inoxidável 316 L. O teste durou aproximadamente uma hora. Foi verificado que a viscosidade do óleo de palma foi menor que a do óleo hidráulico. O coeficiente de atrito, a taxa de desgaste e a medição do diâmetro das cicatrizes de desgaste mostraram que o óleo de palma tinha maior lubricidade que o óleo hidráulico. Além disso, também foi observado que o aumento da velocidade de deslizamento provocava o aumento do desgaste e do coeficiente de atrito. Dessa forma, o óleo de palma, sendo um biolubrificante, mostrou-se vantajoso em relação à redução do desgaste, quando comparado ao óleo hidráulico, uma vez que o biolubrificante advém de fonte renovável.

No estudo de Wang et al. (2019), foi avaliada a influência do grafeno, em diferentes concentrações, no óleo SAE 10W30, em comparação com a lubrificidade do óleo sem a presença do grafeno. O aditivo foi preparado pelo método de esfoliação em fase líquida. Os discos utilizados no tribômetro foram feitos de bronze; já os pinos foram fabricados em aço GCr15. A carga vertical foi de 125,66 N, a velocidade de rotação foi de 191 rpm, e o teste durou 7.200 s. Para a confirmação da taxa de desgaste, os discos foram limpos e pesados antes e depois da execução do teste, utilizando-se uma balança de precisão. Os autores perceberam que o óleo SAE 10W30 sem o grafeno apresentou os maiores valores de coeficiente de atrito e as maiores taxas de desgaste, enquanto o óleo com 0,05% de grafeno mostrou o menor coeficiente de atrito e a menor taxa de desgaste. Amostras de óleo com maiores concentrações de grafeno resultaram em maior coeficiente de atrito por causa do acúmulo de grafeno entre as asperezas das superfícies, o que promoveu contato entre o metal e o grafeno, e reduziu o espaço a ser ocupado pelo fluido lubrificante, proporcionando a fricção seca entre as superfícies.

Leroux et al. (2018) decidiram trabalhar com a bancada *pin on disk*, visando à construção de um modelo de aplicação de carga ativa de até 2.000 N, com sistema de controle duplo da carga. No cenário avaliado, a problemática surgiu principalmente em testes que envolviam grandes valores de carga aplicada e alta velocidade. Comumente, os tribômetros de carga morta aplicam a carga por meio de massas suspensas, que, apoiadas no disco, geram a força que é aplicada. Devido à forma de aplicação das cargas, em testes de alta velocidade e elevados valores de carga, é produzida bastante vibração, que acarreta leituras inconsistentes do desgaste e do coeficiente de atrito. A proposta dos autores foi a utilização de um sistema pneumático, que aplicasse a carga e conseguisse absorver as vibrações. Para a realização do trabalho, foram comparados dois tribômetros: um com sistema de carga morta e outro com sistema de carga pneumática. Os resultados atestaram que os testes realizados com o tribômetro de carga morta apresentaram desgaste mais intenso na região de deslizamento do que os ensaios com o tribômetro pneumático. Dessa forma, as leituras obtidas no tribômetro de carga morta apresentaram incoerências com relação à avaliação do desgaste, em decorrência da vibração ocasionada nos experimentos com carga elevada e velocidade alta.

### **Four ball**

Nesse teste, são utilizadas quatro esferas, sendo uma esfera maior que as outras três. Normalmente, as três esferas menores são mantidas estacionárias, enquanto a esfera maior é rotacionada. Dessa forma, é possível avaliar o desgaste de deslizamento. A medição do desgaste é feita por meio da análise das ranhuras nas três esferas estacionárias, em um microscópio ótico. Na Figura 5, está apresentado o princípio de funcionamento do tribômetro *four ball*.



**Figura 5.** Configuração do teste *four ball*.

O tribômetro *four ball* foi utilizado por Zulhanafi & Syahrullail (2019) na investigação da lubrificidade de um biolubrificante à base de óleo de palma, com a adição do antioxidante *terc*-butil-hidroquinona (TBHQ). Um dos grandes inconvenientes da utilização de produtos à base de biomassa é a susceptibilidade à oxidação. Dessa forma, a adição de antioxidantes é imprescindível. Os autores coletaram dados de temperatura, torque de fricção e carga aplicada. As esferas utilizadas no

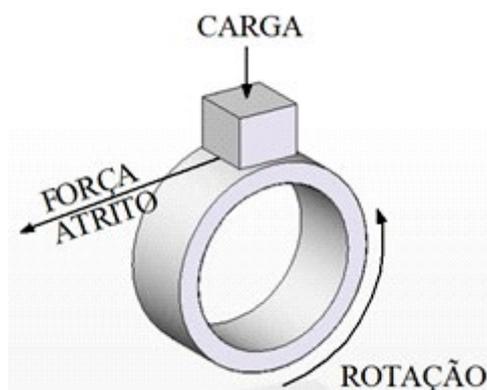
tribômetro foram fabricadas em aço de liga de cromo extrapolida, seguindo a norma AISI E-52100. Foi utilizada uma quantidade de 10 mL de óleo lubrificante por ensaio. A carga aplicada foi de 392 N, a temperatura do óleo foi de 75 °C, e o teste teve duração de 1 hora. A velocidade de rotação variou de 1.200 rpm a 2.400 rpm, com intervalos de 400 rpm. Os resultados apontaram que a adição do antioxidante TBHQ ocasionou a redução no coeficiente de fricção. Entretanto, à medida que a carga aplicada aumentava, a temperatura do biolubrificante também aumentava, o que favoreceu a oxidação, a desestabilização e a consequente ruptura da camada de lubrificação, provocando o aumento do desgaste das superfícies. No entanto, pelo estudo de Zulhanafi & Syahrullail (2019), pode-se inferir que a formulação biolubrificante de óleo de palma + TBHQ, quando aplicada em sistemas em baixa carga, possui potencial lubrificante.

Zulkifli et al. (2013) utilizaram o teste *four ball* para avaliar a lubrificidade de um lubrificante, derivado do petróleo, e de um biolubrificante, o éster trimetilpropano dopado com partículas de óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>). O experimento ocorreu com a análise do uso de diferentes cargas: 40 kg, 80 kg, 120 kg e 160 kg, com rotação de 1.200 rpm, por 10 minutos. A temperatura do teste foi considerada a temperatura do laboratório. Foram necessários 10 mL de lubrificante. Os autores constataram que houve mudança abrupta no coeficiente de fricção, nos ensaios com as cargas de 80 kg e 160 kg. Essa mudança no coeficiente de fricção foi atribuída à ineficiente formação da camada de lubrificação, decorrente da alta carga aplicada entre as superfícies. Com isso, o biolubrificante éster trimetilpropano + TiO<sub>2</sub> apresentou uma redução de 15% no coeficiente de atrito para altas cargas. No entanto, para a carga de 40 kg, o biolubrificante foi mais eficaz na redução dos diâmetros de ranhura das superfícies.

No estudo de Asrul et al. (2013), o tribômetro *four ball* foi aplicado para avaliar a influência de partículas suspensas de óxido de cobre, diluídas em um lubrificante derivado do petróleo, em diferentes concentrações. Os ensaios foram realizados aplicando uma carga de 40 kg, na rotação de 1.200 rpm e com a temperatura do lubrificante variando entre 60 °C e 70 °C, com 15 minutos de duração. De acordo com os resultados, a adição das partículas de óxido de cobre melhorou a lubrificidade do óleo derivado do petróleo. Segundo os autores, a melhoria da performance ocorreu devido ao acúmulo das micropartículas entre as superfícies, principalmente quando a espessura do filme lubrificante se torna pequena, em decorrência das altas cargas, distribuindo parte da carga aplicada entre as partículas e a superfície. Ademais, em decorrência da geometria esférica das partículas de óxido de cobre, estas acabam funcionando como elementos rolantes, auxiliando no movimento de deslizamento entre as superfícies.

### ***Block on ring***

Esse teste é utilizado principalmente nas medições da taxa de desgaste e na classificação de materiais com relação à sua resistência ao movimento de deslizamento puro. O método mais aplicado para essa avaliação é a medição do volume perdido em decorrência do desgaste. No entanto, se os materiais em contato forem iguais, apenas a medição da largura da cicatriz de desgaste já será suficiente para validar o teste. A Figura 6 apresenta o princípio de funcionamento do teste *block on ring*.



**Figura 6.** Configuração do teste *block on ring*.

Hattori et al. (2016) utilizaram o teste *block on ring* para avaliar as propriedades tribológicas do revestimento de nitreto de carbono, com deposição realizada pelo sistema de ar filtrado e feixe de nitrogênio, em comparação com o revestimento macio de nitreto de carbono. Para a realização do teste, foi aplicada uma variação de carga entre 94 N e 294 N, com velocidade de rotação de 160 rpm e lubrificante na temperatura ambiente. O estudo foi feito em um lubrificante à base de poliolefina alfa multiviscoso SAE 5W30. Os autores observaram que o revestimento depositado com ar filtrado e feixe de nitrogênio apresentou maior resistência quando comparado ao revestimento aplicado por deposição de feixe elétrico, assistido por feixe de íons, o qual tem um revestimento mais macio. A maior resistência ao desgaste foi atribuída à alta dureza atingida pelo revestimento, que reduziu a penetração e o aprofundamento das ranhuras, e, conseqüentemente, diminuiu o valor do coeficiente de atrito, evitando o aumento abrupto, como se deu no revestimento macio de nitreto de carbono.

Wang et al. (2018) analisaram a influência do grafeno, na concentração de 0,5%, quando utilizado como aditivo na graxa. Foram avaliados três tipos de superfícies de contato, quais sejam, o contato de ponto, o contato linear e o contato de superfície. O teste *block on ring* foi aplicado no estudo do contato em linha. Os autores observaram que a graxa + 0,5% de grafeno proporcionou uma redução de 37,6% na perda por desgaste e 16,8% no coeficiente de atrito, sob aplicação de uma carga de 200 N. Com a aplicação de uma carga de 400 N, houve rápido desgaste; mesmo assim, em comparação com a submissão da mesma carga, quando as superfícies foram lubrificadas com a graxa sem grafeno, a utilização da formulação graxa + 0,5% de grafeno apresentou uma redução de 23,4% na perda por desgaste e 54,8% no coeficiente de atrito. No experimento com carga de 100 N, a formulação não propiciou reduções significativas na perda por desgaste e no coeficiente de atrito. Os resultados obtidos por Wang et al. (2018) sugerem que a adição de 5% de grafeno na graxa promove um aumento da lubricidade e conseqüente redução do desgaste das superfícies.

No estudo de Cavalcanti (2014), foi avaliado um biolubrificante produzido à base de óleo de carnaúba, por se tratar de uma espécie abundante no Nordeste brasileiro. Para a realização do teste tribológico, foi projetada e construída uma máquina com contato do tipo *block on ring*, seguindo-se a norma ASTM G-174. Nos ensaios, foram utilizados os seguintes parâmetros: carga de contato de 1,2 N; rotação de 1.500 rpm; tempo de execução de 2 horas; aplicação da camada lubrificante por gotejamento a uma vazão de 1 gota/minuto. A medição de temperatura foi realizada com um pirômetro. De acordo com os resultados, observou-se que o biolubrificante à base de óleo de carnaúba dissipou mais calor do que o óleo mineral SAE 10W30 e apresentou maior potencial lubrificante, promovendo maior redução do desgaste. Segundo Cavalcanti (2014), a melhor lubricidade do biolubrificante foi atribuída à presença dos grupos carbonila no óleo de carnaúba, que permitiram maior interação das moléculas do óleo com a superfície do metal, induzindo a formação de um filme mais resistente à ruptura por fricção.

### ***Linear reciprocating***

Esse teste se diferencia dos demais por apresentar um movimento de “vai e vem”, permitindo bons resultados da análise do desgaste em sistemas de movimentos alternativos, como o pistão (Mishra et al., 2018). Outro fator importante é a medição da velocidade do teste, que se dá em Hertz ou em ciclos por segundo, devido ao tipo de movimento oscilatório realizado pelo contato entre a carga e a amostra estacionária (Cassar et al., 2010). Nessa bancada de teste, o pesquisador também pode modificar a geometria de contato, que pode ser: pontual, quando se utiliza uma esfera em contato com o prato ou disco; ou linear, quando se utiliza um cilindro na horizontal em contato com um prato ou disco; ou, então, geometria de área, quando se utiliza um cilindro na vertical em contato com um disco ou prato. A Figura 7 apresenta as disposições dos tipos de contato.

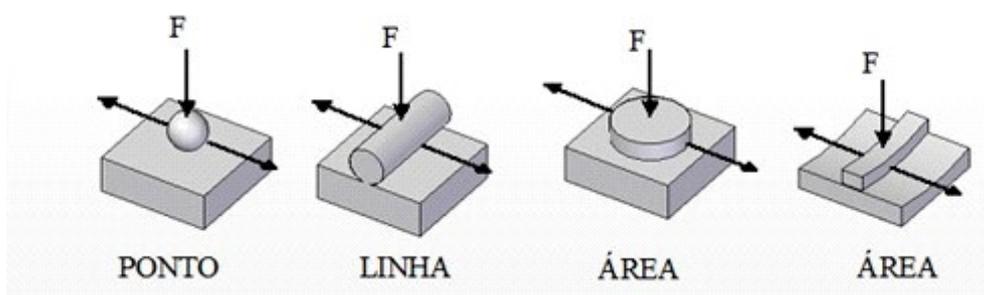


Figura 7. Configuração do teste *linear reciprocating*.

Em busca de novas fontes energéticas e possíveis alternativas para a redução do uso de combustível fóssil, Shahir et al. (2014) analisaram a viabilidade do uso das misturas diesel-etanol e biodiesel-etanol como combustível alternativo ao diesel. De acordo com os resultados, os autores indicaram a mistura biodiesel (25%)/etanol (5%) com potencial de ser adicionada ao diesel comercial. Posteriormente, Kuszewski et al. (2017) avaliaram a lubrificidade da mistura biodiesel/etanol, uma vez que, no sistema de alimentação de combustível, em motores de combustão interna, não há circulação de óleo, sendo o combustível o único fluido lubrificante. Kuszewski et al. (2017) utilizaram o teste HFRR para avaliar a lubrificidade do diesel misturado ao etanol, em diferentes concentrações. O teste HFRR foi escolhido graças à sua sensibilidade ao fluido lubrificante, pois, no referido sistema, o diesel – utilizado nesse estudo como aditivo de lubrificidade – foi adicionado em pequenas concentrações.

Dessa forma, o teste HFRR é indicado para a avaliação da performance de aditivos de lubrificidade em combustíveis e lubrificantes. Os ensaios foram realizados seguindo a norma ISO 12156-1 (ISO, 2018), com duração de 75 minutos, frequência de 50 Hz, comprimento de curso de 1 mm e volume de amostra de 2 cm<sup>3</sup>. De acordo com os resultados, foi constatado que a adição de etanol, até a concentração de 14% (v/v), não causou nenhuma mudança significativa com relação à lubrificidade do diesel. Os autores relataram ainda que houve dificuldade na realização dos testes, por causa da volatilidade do etanol. No entanto, segundo a norma ABNT NBR 15550 (ABNT, 2008), a mistura diesel/etanol atingiu os requisitos de lubrificidade para um combustível.

No estudo de Singh & Goel (2018), foi analisada a lubrificidade da mistura óleo lubrificante SAE 20W40 com biodiesel produzido à base de óleo vegetal residual, em diferentes proporções de mistura, utilizando os testes HFRR e *pin on disk*. O teste *pin on disk* avaliou a lubrificidade do óleo com relação à sua aplicação entre o pistão e a camisa do motor de combustão interna. Já o HFRR foi utilizado para avaliar o contato entre o came e o seguidor. Os autores fizeram a medição da taxa de desgaste, do diâmetro das ranhuras de desgaste e do coeficiente de fricção. O lubrificante também foi analisado após a realização do ensaio, por ferrografia. Os resultados apontaram que ocorreu desgaste adesivo no teste *pin on disk*. Em virtude da carga aplicada, as asperezas que aderem à superfície do disco se deformaram. Com relação ao teste HFRR, na análise das misturas óleo SAE 20W40 com 20% e 30% de biodiesel, os detritos do desgaste promoveram abrasão e ocorreu também a formação de pontos de coloração escura. Esse comportamento foi atribuído à susceptibilidade do biodiesel à oxidação, acelerada pelas altas temperaturas que a mistura lubrificante atinge no sistema avaliado. No processo de oxidação do biodiesel, entre os produtos gerados estão os ácidos corrosivos, que afetam negativamente o potencial lubrificante da mistura avaliada.

De acordo com Lathi & Mattiasson (2007), os biolubrificantes apresentam características semelhantes às requeridas para um óleo lubrificante comercial, como alto índice de viscosidade, baixa volatilidade e solubilidade para aditivos; no entanto, apresentam, como desvantagem, a instabilidade oxidativa, sendo, por isso, imprescindível o uso de antioxidantes.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de lubrificantes, combustíveis e aditivos de lubricidade, com foco no desenvolvimento sustentável, requer uma etapa de avaliação para a comprovação da lubricidade desses produtos, que os classificará como conformes ou não conformes para a utilização em sistemas mecânicos.

Dessa forma, considerando a grande possibilidade de aplicações, faz-se necessária a análise de diferentes cenários com variação dos parâmetros carga aplicada, velocidade de rotação, temperatura do fluido lubrificante, superfícies de contato, proporções de aditivos e testes tribométricos. Para que se obtenha uma investigação com resultados consistentes, o pesquisador deve, sempre que possível, verificar o tipo de contato do sistema mecânico no qual se deseja empregar a camada lubrificante, pois o desgaste depende fortemente das condições de aplicação. Uma escolha incorreta dos parâmetros de teste pode trazer dados inconsistentes de desgaste, levando a uma análise errônea da lubricidade de determinado combustível, lubrificante ou aditivo.

Nesse contexto, visando contribuir para a expansão da área de tribologia, bem como para a introdução de conceitos de lubrificação e ensaios de lubricidade para a comunidade técnico-científica interessada nesses temas, o presente trabalho reuniu os principais ensaios tribométricos, quais sejam, *pin and vee block*, *pin on disk*, *four ball*, *block on ring* e *linear reciprocating*, apresentando suas finalidades, parâmetros avaliados e performance quanto aos resultados obtidos.

Com este artigo, os autores esperam auxiliar pesquisadores na tomada de decisão quanto à aplicação de testes tribométricos, para a avaliação de sistemas mecânicos específicos, permitindo êxito em projetos que visem à redução do desgaste de superfícies e, consequentemente, obtenham aumento da eficiência e redução do consumo energético desses sistemas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (406697/2013-2, 459355/2014-7 e 308280/2017-2), Capes (Código de Financiamento 001), Funcap (AEP-0128-00220.01.00/17 e DEP-0164-00195.01.00/19) e Finep.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15550**: combustíveis: determinação da lubricidade pela sonda alternativa de alta frequência (HFRR). Rio de Janeiro, 2008. 7p.
- ANASTOPOULOS, G.; SCHINAS, P.; ZANNIKOU, Y.; KARONIS, D.; ZANNIKOS, F.; LOIS, E. Investigation of the effectiveness of monoethanolamides as low sulfur marine fuel lubricity additives. **Materials Today: Proceedings**, v.5, p.27563-27571, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.09.076>.
- ASRUL, M.; ZULKIFLI, N.W.M.; MASJUKI, H.H.; KALAM, M.A. Tribological properties and lubricant mechanism of nanoparticle in engine oil. **Procedia Engineering**, v.68, p.320-325, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.186>.
- ATTIA, N.K.; EL-MEKKAWI, S.A.; ELARDY, O.A.; ABDELKADER, E.A. Chemical and rheological assessment of produced biolubricants from different vegetable oils. **Fuel**, v.271, p.117578, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117578>.
- CASSAR, G.; AVELAR-BATISTA WILSON, J.C.; BANFIELD, S.; HOUSDEN, J.; MATTHEWS, A.; LEYLAND, A. A study of the reciprocating-sliding wear performance of plasma surface treated titanium alloy. **Wear**, v.269, p.60-70, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.008>.
- CAVALCANTI, S.L. de L. **Caracterização do óleo de carnaúba para uso como biolubrificante**. 2014. 76p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- CHAN, C.-H.; TANG, S.W.; MOHD, N.K.; LIM, W.H.; YEONG, S.K.; IDRIS, Z. Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.93, p.145-157, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.024>.

- DUTTA, S.R.; SINGH, S.K. Development of Industrial Tribology in India. **International Journal of Science and Research**, v.3, p.336-338, 2014.
- GÓRNY, K.; STACHOWIAK, A.; TYCZEWSKI, P.; ZWIERZYCKI, W. Lubricity of selected oils in mixtures with the refrigerants R452A, R404A, and R600a. **Tribology International**, v.134, p.50-59, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.033>.
- HATTORI, T.; UMEHARA, N.; KOUSAKA, H.; DENG, X.; MANABE, K.; HAYASHI, K. Tribological properties of high hardness ta-CN<sub>x</sub> coatings deposited by filtered arc deposition with block-on-ring tribotester. **Procedia Manufacturing**, v.5, p.1224-1233, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.096>.
- HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v.47, p.221-234, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.11.022>.
- HSIEH, P.Y.; BRUNO, T.J. A perspective on the origin of lubricity in petroleum distillate motor fuels. **Fuel Processing Technology**, v.129, p.52-60, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.012>.
- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 12156-1:2018**: diesel fuel: assessment of lubricity using the high-frequency reciprocating rig (HFRR): part 1: test method. Geneva, 2018.
- KENNEDY, F.E.; LU, Y.; BAKER, I. Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting. **Tribology International**, v.82, p.534-542, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.10.022>.
- KRUPKA, I.; SPERKA, P.; HARTL, M. Effect of surface roughness on lubricant film breakdown and transition from EHL to mixed lubrication. **Tribology International**, v.100, p.116-125, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.12.008>.
- KUSZEWSKI, H.; JAWORSKI, A.; USTRZYCKI, A. Lubricity of ethanol–diesel blends – Study with the HFRR method. **Fuel**, v.208, p.491-498, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.046>.
- LATHI, P.S.; MATTIASSON, B. Green approach for the preparation of biodegradable lubricant base stock from epoxidized vegetable oil. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.69, p.207-212, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.06.016>.
- LEROUX, P.; LI, D.; MORRONE, D. Performance characterization of an innovative dual-load controlled tribometer. **Procedia Structural Integrity**, v.9, p.22-28, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.006>.
- LI, X.M.; ZHOU, G.Y.; GUO, F.; WANG, X.B.; ZHANG, J.J. Enhanced lubricant replenishment by angled surface velocities in EHL contacts. **Tribology International**, v.145, p.106132, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106132>.
- LIANG, H.; TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M. Lubrication and tribology fundamentals. In: TOTTEN, G.E. **Fuels and lubricants handbook: technology, properties, performance, and testing**. West Conshohocken: ASTM International, 2003. p.909-961. DOI: <https://doi.org/10.1520/MNL10750M>.
- LIU, H.; LIU, H.; ZHU, C.; PARKER, R.G. Effects of lubrication on gear performance: a review. **Mechanism and Machine Theory**, v.145, p.103701, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103701>.
- MACHADO, Y. de L.; RODRIGUES H.; BEZERRA, R. de A.; MAZZETO, S.E.; RIOS, M.A. de S. Performance de óleos naftênicos: estabilidade térmica e lubrificidade. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v.36, e26389, 2019. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2019.v36.26389>.
- MALAKAR, C.; TRISHUL, M.A. Experimentation and optimisation of wear parameters of glass fibre-graphite reinforced composite. **Materials Today: Proceedings**, v.27, p.1431-1434, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.790>.
- MISHRA, D.; SONIA, F.J.; SRIVASTAVA, D.; GANESHA, G.N.; SINGHA, U.; MUKHOPADHYAY, A. Wear damage and effects of graphene-based lubricants/coatings during linear reciprocating sliding wear at high contact pressure. **Wear**, v.400-401, p.144-155, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.024>.
- NOSONOVSKY, M.; BHUSHAN, B. Green tribology. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v.368, p.4675-4676, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0202>.
- OMRANI, E.; MOGHADAM, A.D.; ALGAZZAR, M.; MENEZES, P.L.; ROHATGI, P.K. Effect of graphite particles on improving tribological properties Al-16Si-5Ni-5Graphite self-lubricating composite under fully flooded and starved lubrication conditions for transportation applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.87, p.929-939, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8531-6>.
- OWUNA, F.J.; DABAI, M.U.; SOKOTO, M.A.; DANGOGGO, S.M.; BAGUDO, B.U.; BIRNIN-YAURI, U.A.; HASSAN, L.G.; SADA, I.; ABUBAKAR, A.L.; JIBRIN, M.S. Chemical modification of vegetable oils for the production of biolubricants using trimethylolpropane: a review. **Egyptian Journal of Petroleum**, v.29, p.75-82, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.11.004>.
- PEÑA-PARÁS, L.; GAO, H.; MALDONADO-CORTÉS, D.; VELLORE, A.; GARCÍA-PINEDA, P.; MONTEMAYOR, O.E.; NAVA, K.L.; MARTINI, A. Effects of substrate surface roughness and nano/micro particle additive size on friction and wear in lubricated sliding. **Tribology International**, v.119, p.88-98, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.09.009>.
- PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. Tribological reactions between oil additives and DLC coatings for automotive applications. **Surface and Coatings Technology**, v.200, p.1982-1989, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.014>.

- RAJA, R.A.A.; SUNIL, J.; SADASIVUNI, K.K. Estimation of lubricity properties of nanolubricants. **Materials Today: Proceedings**, v.21, p.152-154, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.208>.
- RIDDLE, Y.W.; BAILERARE, T.O. Friction and wear reduction via an Ni-B electroless bath coating for metal alloys. **JOM**, v.57, p.40-45, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0080-7>.
- RIOS, Í.C.; CORDEIRO, J.P.; ARRUDA, T.B.M.G.; RODRIGUES, F.E.A.; UCHOA, A.F.J.; LUNA, F.M.T.; CAVALCANTE JR, C.L.; RICARDO, N.M.P.S. Chemical modification of castor oil fatty acids (*Ricinus communis*) for biolubricant applications: an alternative for Brazil's green market. **Industrial Crops and Products**, v.145, p.112000, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112000>.
- RIZVI, S.Q.A. **A comprehensive review of lubricant chemistry, technology, selection, and design**. West Conshohocken: ASTM International, 2009. 665p. DOI: <https://doi.org/10.1520/MNL59-EB>.
- SHAHIR, S.A.; MASJUKI, H.A.; KALAM, M.A.; IMRAN, A.; FATTAH, I.M.R.; SANJID, A. Feasibility of diesel–biodiesel–ethanol/ bioethanol blend as existing CI engine fuel: an assessment of properties, material compatibility, safety and combustion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.32, p.379-395, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.029>.
- SHAIGAN, N.; NEILL, W.S.; LITTLEJOHNS, J.; SONG, D.; LAFRANCE, S. Adsorption of lubricity improver additives on sliding surfaces. **Tribology International**, v.141, p.105920, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105920>.
- SINGH, D.; SHARMA, D.; SONI, S.L.; SHARMA, S.; SHARMA, P.K.; JHALANI, A. A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. **Fuel**, v.262, p.116553, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116553>.
- SINGH, P.; GOEL, V. Effect of bio-lubricant on wear characteristics of cylinder liner-piston ring and cam-tappet combination in simulated environment. **Fuel**, v.233, p.677-684, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.092>.
- SYAHRULLAIL, S.; NURALIZA, N.; IZHAN, M.I.; ABDUL HAMID, M.K.; RAZAKA, D.M. Wear Characteristic of Palm Olein as Lubricant in Different Rotating Speed. **Procedia Engineering**, v.68, p.158-165, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.162>.
- TSAGARAKI, E.; KARACHALIOU, E.; DELIOGLANIS, I.; KOUZI, E. **Bio-based products and applications potential**. Tartu: Bioways, 2017. 137p.
- VENGUDUSAMY, B.; ENEKES, C.; SPALLEK, R. EHD friction properties of ISO VG 320 gear oils with smooth and rough surfaces. **Friction**, v.8, p.164-181, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0267-5>.
- VOITIK, R. Realizing bench test solutions to field tribology problems by utilizing tribological aspect numbers. In: RUFF, A.; BAYER, R. (Ed.). **Tribology: wear test selection for design and application**. West Conshohocken: ASTM International, 1993. p.45-59. DOI: <https://doi.org/10.1520/stp15964s>.
- WANG, J.; GUO, X.; HE, Y.; JIANG, M.; GU, K. Tribological characteristics of graphene as grease additive under different contact forms. **Tribology International**, v.127, p.457-469, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.06.026>.
- WANG, X.; ZHANG, Y.; YIN, Z.; SU, Y.; ZHANG, Y.; CAO, J. Experimental research on tribological properties of liquid phase exfoliated graphene as an additive in SAE 10W-30 lubricating oil. **Tribology International**, v.135, p.29-37, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.030>.
- XIE, M.; CHENG, J.; HUO, C.; ZHAO, G. Improving the lubricity of a bio-lubricating grease with the multilayer graphene additive. **Tribology International**, v.150, p.106386, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106386>.
- ZAINAL, N.A.; ZULKIFLI, N.W.M.; GULZAR, M.; MASJUKI, H.H. A review on the chemistry, production, and technological potential of bio-based lubricants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, p.80-102, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.004>.
- ZHANG, S. Green tribology: fundamentals and future development. **Friction**, v.1, p.186-194, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-013-0012-4>.
- ZHOU, C.; JUNXIU, D.; SHIZHU, W.; YUANSHEG, J. Investigation of matching characteristics of important frictional materials with lubricant antiwear additives. **Wear**, v.152, p.317-325, 1992. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90129-V](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90129-V).
- ZULHANAFI, P.; SYAHRULLAIL, S. The tribological performances of Super Olein as fluid lubricant using four-ball tribotester. **Tribology International**, v.130, p.85-93, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.09.013>.
- ZULKIFLI, N.W.M.; KALAM, M.A.; MASJUKI, H.H.; YUNUS, R. Experimental analysis of tribological properties of biolubricant with nanoparticle additive. **Procedia Engineering**, v.68, p.152-157, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.161>.