

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS-UFAL  
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**THIAGO FERRO DE OLIVEIRA**

**ADITIVAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS A ÓLEOS LUBRIFICANTES EM MOTORES  
DE COMBUSTÃO INTERNA**

**RIO LARGO  
2022**

Thiago Ferro de Oliveira

ADITIVAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS A ÓLEOS LUBRIFICANTES EM MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias.

Orientador: Profa. Dra. Amanda Santana Peiter  
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Henrique V. de Sousa

Rio Largo  
2022

Catálogo na Fonte  
Universidade Federal de Alagoas  
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA  
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana  
CRB - 1512

O48a Oliveira, Thiago Ferro de.

Aditivação de nanopartículas em a óleos lubrificantes em motores de combustão interna. / Thiago Ferro de Oliveira. – 2022.

52 f.: il.

Orientador(a): Amanda Santana Peiter.

Coorientador: Eduardo Henrique V. de Sousa.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2022.

Inclui Bibliografia

1. Nanopartículas. 2. Ciclo Otto. 3. Desgaste. I. Título.

CDU:620.1:626.51

## Folha de Aprovação

THIAGO FERRO DE OLIVEIRA

Aditivação de nanopartículas a óleos lubrificantes em motores de combustão interna

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia pela Universidade Federal de Alagoas. Aprovado em 16 de dezembro de 2022.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** AMANDA SANTANA PEITER  
Data: 21/12/2022 11:35:55-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Profa. Dra. Amanda Santana Peiter, CECA/UFAL (Orientadora)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** EDUARDO HENRIQUE VIANA DE SOUSA  
Data: 21/12/2022 12:17:46-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Eduardo Henrique Viana de Sousa, IFAL (Coorientador)

### Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** JERUSA GOES ARAGAO SANTANA  
Data: 21/12/2022 13:38:58-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Profa. Dra. Jerusa Goes Aragão Santana, CECA/UFAL (1ª Avaliadora)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RINALDO VIEIRA DA SILVA JUNIOR  
Data: 21/12/2022 18:07:55-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Rinaldo Vieira da Silva Júnior, CECA/UFAL (2º Avaliador)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e por guiar minhas decisões.

Aos meus pais, Iracema Ferro Ferraz e Marco Antonio Guerra de Oliveira e ao meu filho Miguel Rodrigues de Freitas Ferro, proporcionaram as condições e os subsídios de amor e carinho para que eu pudesse seguir firme e forte na caminhada.

A minha orientadora e amiga Amanda Santana Peiter, que sempre se mostrou solícita e disposta a ouvir o que eu tinha pra falar e que tanto me acrescentou dentro e fora do meio acadêmico. Obrigado por acreditar no meu potencial e por ter contribuído tanto para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao meu querido coorientador Eduardo Henrique Viana de Sousa, por todo auxílio e subsídios para pesquisa, pela oportunidade de ingressar na iniciação científica, pessoa fundamental para a elaboração desse trabalho.

Ao meu professor e orientador de pesquisa acadêmica Rinaldo Vieira da Silva Junior que me deu a oportunidade de aprofundar na iniciação científica, experiência gratificante em minha trajetória acadêmica.

A professora Jerusa Goes Aragão Santana por ter me proporcionado a experiência de monitor da disciplina de Cálculo II, com certeza foi mais uma experiência gratificante.

Ao Instituto Federal de Alagoas que financiou e proporcionou a estrutura para o desenvolvimento do trabalho.

Agradecer também a todos os docentes que por minha trajetória passaram e que contribuíram para minha formação. A Universidade Federal de Alagoas e todo seu corpo técnico e operacional. Para mim, é um grande orgulho ter estudado nessa instituição.

"The only true test of values, either of men or of things, is that of their ability to make the world a better place in which to live".

Henry Ford

## RESUMO

Os motores automotivos a combustão encontram-se entre os maiores responsáveis pelas emissões de gases poluentes atualmente. Para reduzir essas emissões e mitigar o impacto ambiental gerado por elas, se faz necessário desenvolver motores e tecnologias subjacentes mais ecoeficientes. Em face disso, o presente trabalho consiste em avaliar a inserção de nanopartículas em óleos lubrificantes de motores a combustão interna de Ciclo Otto, com a finalidade de produzir lubrificantes capazes de reduzir eficientemente os desgastes mecânicos existentes nesses motores. De acordo com os resultados obtidos no ensaio pino contra disco, os óleos lubrificantes utilizados nesse trabalho quando nanoaditivados apresentaram uma redução satisfatória no desgaste comparado aos óleos puros.

**Palavras-chave:** Nanopartículas. Ciclo Otto. Desgaste.

## **ABSTRACT**

Combustion automotive engines are among the most responsible for polluting gas emissions today. To reduce these emissions and mitigate the environmental impact generated by them, it is necessary to develop more eco-efficient engines and underlying technologies. In view of this, the present work consists of evaluating the insertion of nanoparticles in lubricating oils of Otto Cycle internal combustion engines, with the purpose of producing lubricants capable of efficiently reducing the mechanical wear existing in these engines. According to the results obtained in the pin against disk test, the lubricating oils used in this work when nanoadditivated showed a satisfactory reduction in wear compared to pure oils.

**Keywords:** Nanoparticle. Otto cycle. Wear.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transformação de Energia nos Motores de Combustão Interna . . . . .	17
Figura 2 – Etapas do motor ciclo Otto 4 tempos . . . . .	18
Figura 3 – Processos de desgaste por modos de desgaste . . . . .	19
Figura 4 – Desgaste abrasivo entre dois corpos e três corpos. . . . .	20
Figura 5 – Desgaste devido adesão nas junções . . . . .	20
Figura 6 – Etapas do desgaste por fadiga . . . . .	21
Figura 7 – Desgaste devido a tribo-oxidação . . . . .	21
Figura 8 – Curva de Stribeck . . . . .	22
Figura 9 – Ensaio Pino Contra Disco . . . . .	27
Figura 10 – Etapas para obtenção do óleo lubrificante aditivado. . . . .	29
Figura 11 – Inspeção visual de sedimentação. . . . .	29
Figura 12 – Etapas Do Ensaio Pino Contra Disco. . . . .	30
Figura 13 – Desgastes dos corpos - Disco e Pino . . . . .	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação SAE . . . . .	24
Tabela 2 – Classificação API . . . . .	25
Tabela 3 – Propriedades dos lubrificantes . . . . .	28
Tabela 4 – Massa Específica ( $g/cm^3$ ) . . . . .	31
Tabela 5 – Disco . . . . .	32
Tabela 6 – Pino . . . . .	32
Tabela 7 – Coeficiente de Desgaste Relativo - Disco . . . . .	33
Tabela 8 – Coeficiente de Desgaste Relativo - Pino . . . . .	33
Tabela 9 – Taxa de Perda Relativa . . . . .	34
Tabela 10 – Resistividade Relativa - Disco . . . . .	34
Tabela 11 – Resistividade Relativa - Pino . . . . .	34

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

NP	Nanopartículas
OL	Óleo Lubrificante
OLM	Óleo Lubrificante Mineral
OLS	Óleo Lubrificante Sintético
OLSM	Óleo Lubrificante Semissintético
SAE	Society Automotive Engineers
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>14</b>
1.1	Justificativa . . . . .	16
1.2	Objetivos . . . . .	16
1.2.1	Objetivos Gerais . . . . .	16
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>17</b>
2.1	Motores a Combustão Interna . . . . .	17
2.2	Desgaste . . . . .	19
2.3	Óleos Lubrificantes . . . . .	22
2.4	Aditivos . . . . .	25
2.5	Nanopartículas . . . . .	26
2.6	Ensaio Pino Contra Disco . . . . .	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>28</b>
3.1	Os Óleos Lubrificantes . . . . .	28
3.2	Obtenção do Óleo Lubrificante Aditivado . . . . .	29
3.3	Ensaio Pino Contra Disco . . . . .	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>31</b>
4.1	Desgaste Volumétrico . . . . .	32
4.2	Coefficiente Relativo de Desgaste . . . . .	33
4.3	Taxa de Perda Relativa . . . . .	33
4.4	Resistividade Relativa . . . . .	34
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>35</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	35
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>36</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os primeiros motores de combustão interna comerciais surgiram no início do século XIX, mas foi somente a partir de 1876 com a construção dos motores de Ciclo Otto, realizado por Nikolaus August Otto, que os motores de combustão interna ganharam destaque, inaugurando uma nova fase de avanços tecnológicos e industriais que fora a principal responsável pelo nascimento da pujante indústria automobilística [1].

Conceitualmente, os motores de combustão interna são dispositivos mecânicos que transformam energia química existente no combustível em energia térmica, para produzir trabalho mecânico. Em outras palavras, um pistão oscila periodicamente mediante a combustão do combustível existente no cilindro, transmitindo energia ao eixo de transmissão, enquanto válvulas controlam o fluxo de gás de entrada e saída do motor [1].

Desde o seu surgimento, a essência do funcionamento dos motores de combustão interna tem permanecido inalterada, ocorrendo basicamente, ao longo do tempo, somente melhorias na confiabilidade, eficiência térmica e nível de emissões, mas que foram suficientes para levar rapidamente ao seu amplo uso, estando hoje presentes na maioria dos veículos terrestres, aéreos e marítimos [2]. Por exemplo, em 2021 foram produzidos no mundo 80 milhões de veículos, sendo a grande maioria movidos a motores de combustão interna [3].

Em compensação, o amplo uso dos motores de combustão interna os fez serem uns dos maiores responsáveis atualmente pela poluição do ar e pelo aquecimento global [4,5], gerando uma urgente necessidade de reduzir as emissões de gases poluentes desses motores.

Em face dos problemas acima expostos e dos demais provocados ao meio ambiente pela industrialização e pelo desenvolvimento econômico, foi aprovado em 1992 o tratado Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima durante uma conferência das Nações Unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento, com o objetivo de estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera oriundas das ações humanas na natureza [6].

Anualmente, desde 1995, as partes signatárias do tratado da Convenção-Quadro das Nações Unidas se reúnem para avaliarem os progressos obtidos, assim como estabelecer novas estratégias e novos acordos para solução ou mitigação desses problemas. Essas reuniões são chamadas de Conferências das Partes.

No acordo mais recente, firmado na 26ª Conferência das Partes em 2021, as partes se comprometeram em acelerar a transição dos motores automotivos de combustão para veículos elétricos, de modo que em 2035 a maioria dos carros fabricados sejam elétricos. Esse acordo

ficou conhecido como Pacto Climático de Glasgow [7].

Entretanto, substituir abruptamente os motores de combustão interna poderá gerar impactos extremos nos setores econômicos e sociais, já que a cadeia produtiva de motores elétricos é ampla, complexa e com elevados custos para um crescimento rápido e em larga escala [8–10].

Pesquisas indicam que em 2030 aproximadamente 60% dos veículos novos serão elétricos, mas 80% dos carros existentes ainda funcionarão a base de motores de combustão movidos a combustíveis convencionais, reduzindo pela metade somente em 2050 [11–13]. Para que esses motores sejam inteiramente substituídos por elétricos, serão necessários: um sistema de geração de energia elétrica suficientemente descarbonizado; melhorias e expansão da infraestrutura de abastecimento para os veículos elétricos; maior capacidade no armazenamento de energia para assegurar uma autonomia aos carros elétricos comparável aos atuais carros de motores de combustão; um amplo controle dos impactos de toxicidade na cadeia de suprimentos de baterias bem como no seu eventual descarte [9, 10, 14].

Em outras palavras, é improvável que se consiga atingir a meta do Pacto Climático de Glasgow dentro do prazo estipulado, devido seus elevados custos econômicos, sociais e políticos para que se possa alterar toda a cadeia produtiva do setor automobilístico para produzir somente carros elétricos, sendo necessária muita mais décadas para que isso efetivamente ocorra [15, 16].

Desse modo, é premente que se mantenha ativamente as pesquisas que buscam melhorias nos motores de combustão interna, visto que é possível reduzir significativamente o consumo de combustível desses motores em relação ao usado em um carro típico atual, principalmente com a hibridização e com a diminuição do peso do veículo [15, 17–19].

A energia resultante do combustível que chega as rodas do automóvel é aproximadamente 11,87%. Só as perdas mecânicas consomem mais de 15% dessa energia, em sua maioria devido ao atrito proveniente dos movimentos relativos entre os componentes do motor. Ademais, como os motores a combustão interna são máquinas térmicas, seus componentes estão mais propensos a sofrerem dilatação, que acarreta folgas entre as peças e mais atrito [20]. Esses fatores reduzem o rendimento do motor e consequentemente aumenta a emissão de gases poluentes [21]. Uma redução de 10% no atrito pode acarretar em média 1,5% a menos no consumo de combustível [22, 23].

Dentre ações para redução do atrito, o uso dos óleos lubrificantes se destaca, pois desempenham um papel importante no funcionamento do motor, desde a melhora no transporte de carga (condução do calor) até a redução do atrito e das perdas por desgaste, portanto possibilitando maior eficiência e redução nas emissões de gases poluentes [24, 25]. Por isso, os óleos

lubrificantes tem sido fortemente pesquisados, em particular, os que usam nanopartículas [26].

As nanopartículas em lubrificantes tem ganhado destaque porque melhoram as propriedades físico-químicas do óleo e produz uma fina camada de filme sobre a superfície, que reduz o desgaste das peças e o atrito, além de melhorar a capacidade de transporte de calor [27, 28].

## 1.1 Justificativa

Há décadas o impacto dos avanços tecnológicos e industriais sobre o meio ambiente tem sido motivo de grande preocupação, de modo que hoje se considera imprescindível que estejam aliados com a sustentabilidade e a conservação ambiental. A crescente emissão de resíduos poluidores tem sido um desses impactos que tem ganhado grande destaque atualmente.

Mas se por um lado os avanços tecnológicos e industriais são causadores, em sua maioria, dos problemas ambientais existentes, por outro, eles são os maiores responsáveis pela melhoria da qualidade de vida da humanidade nos últimos dois séculos.

Desse modo, muito mais que reconhecer que a dicotomia entre avanços tecnológicos e meio ambiente, em voga no século passado, não resolve os problemas ambientais e muito menos atende os anseios da humanidade, é imperioso superá-la não somente estabelecendo avanços tecnológicos sustentáveis e que preserve o meio ambiente, mas também que sejam ecoeficiente.

Com isso, este trabalho de conclusão de curso se propõe a caracterizar e avaliar o desempenho da aditivização de nanopartículas a óleos lubrificantes para motores de ciclo Otto, mostrando que seu uso contribui para redução da poluição e aumento da ecoeficiência do sistema.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Avaliar alguns óleos lubrificantes para motor de combustão interna automotivo de ciclo Otto para ser nanoaditivado com a finalidade de produzir óleos lubrificantes mais ecoeficiente.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os óleos com aditivos e sem aditivos;
- Comparar os desgastes entre os óleos;
- Obter um óleo lubrificante que aditivado nano partículas que reduz os desgastes mecânicos
- Discutir as observações realizadas no ensaio;

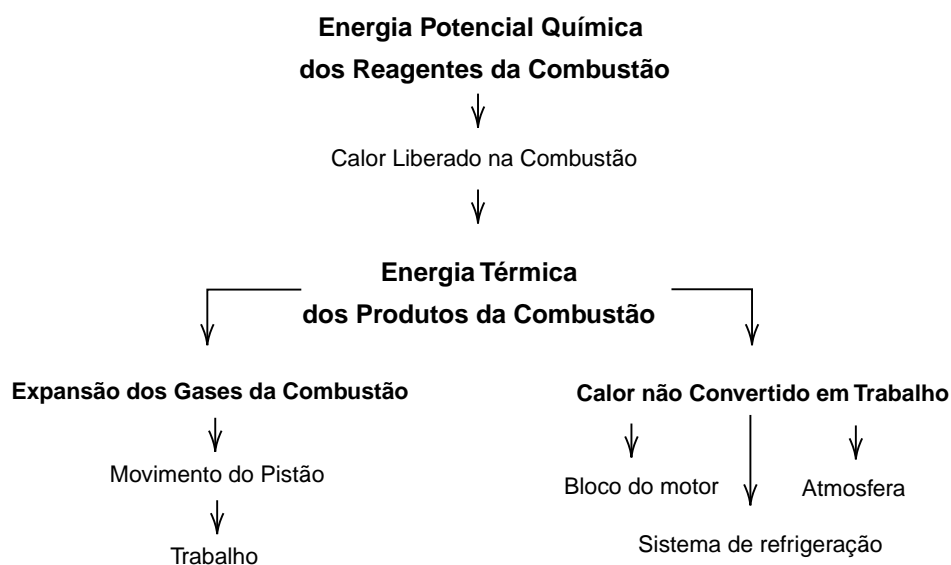
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Motores a Combustão Interna

Os motores a combustão interna são máquinas que geram trabalho mecânico a partir da transformação da energia e possuem diversas aplicações, geometrias, componentes e formas de funcionamento. Apesar dessa diversidade, o funcionamento básico desses motores são iguais.

Inicialmente, o combustível é injetado em uma câmara. Em seguida, ele é misturado com o ar e entra em combustão. O calor gerado parcialmente absorvido pelos gases resultantes da combustão os expandem, movendo o pistão, que por sua vez transfere energia para rodas. A outra parte do calor não absorvido é perdida. Apenas 30% da energia térmica se converte em energia mecânica [29]. A Figura 1 sintetiza o processo descrito.

Figura 1 – Transformação de Energia nos Motores de Combustão Interna



Fonte: Adaptado de [29].

No mercado, os motores de combustão interna que mais se destacam são os de ignição por compressão (Ciclo Diesel) e os de ignição por centelha (Ciclo de Otto), devido a simplicidade, robustez, alta relação potência/peso, eficiência e baixo custo deles. Esses motores são divididos em 2 ou 4 tempos (etapas). A utilização de motores de dois tempos tem sua maior empregabilidade na indústria náutica, enquanto os de quatro tempos na indústria automobilística.

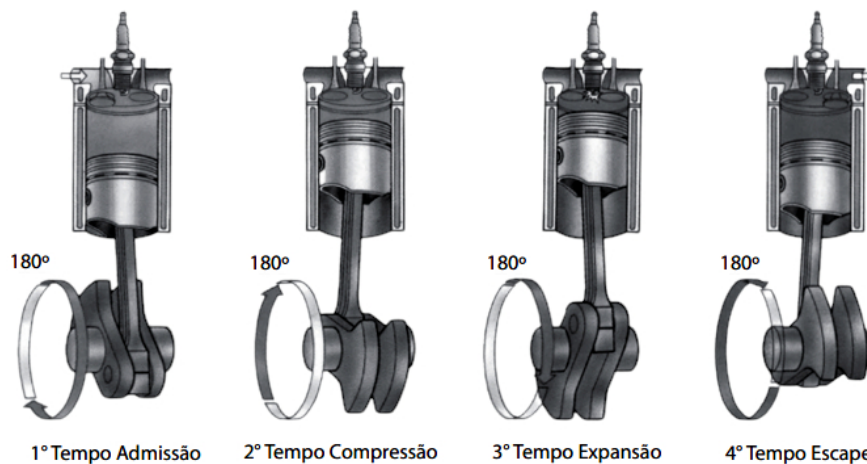
Os motores de Ciclo Diesel são movidos a diesel, enquanto os motores de Ciclo Otto são movidos a gasolina, ou a gás, ou a etanol.



Nos motores de Ciclo Diesel, ao abrir a válvula de admissão, ocorre a entrada de ar na câmara de combustão deslocando o pistão até ao ponto morto inferior. Em seguida, o pistão sobe comprimindo o ar até atingir o ponto morto superior. Nesse momento, o diesel é injetado e se inflama instantaneamente ao entrar em contato com o ar aquecido devido a compressão, provocando a descida do pistão até o ponto morto inferior. Esse movimento oscilatório de sobe e desce do pistão é o responsável pelo movimento do veículo.

Por outro lado, nos motores de Ciclo Otto o processo de combustão ocorre na etapa, de admissão da mistura ar e combustível. Isto é, a válvula de admissão se abre concomitante ao movimento de descida do pistão, que sai do ponto morto superior e vai para o inferior, permitindo o cilindro admitir ar e combustível. Em seguida, o pistão realiza o movimento inverso, comprimindo a mistura ar-combustível, ao mesmo tempo que a vela de ignição solta uma centelha que inflama o combustível. Essa explosão expande o gás resultante da combustão movimentando o pistão, que por sua vez move o veículo, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Etapas do motor ciclo Otto 4 tempos



Fonte: [30].

Segundo [31], os principais fatores que contribuem para a diminuição da eficiência dos motores de combustão interna são:

- Atritos e desgaste entre os diversos componentes do motor;
- Trocas térmicas entre componentes e fluidos;
- Geração de entropia no sistema de escapamento.

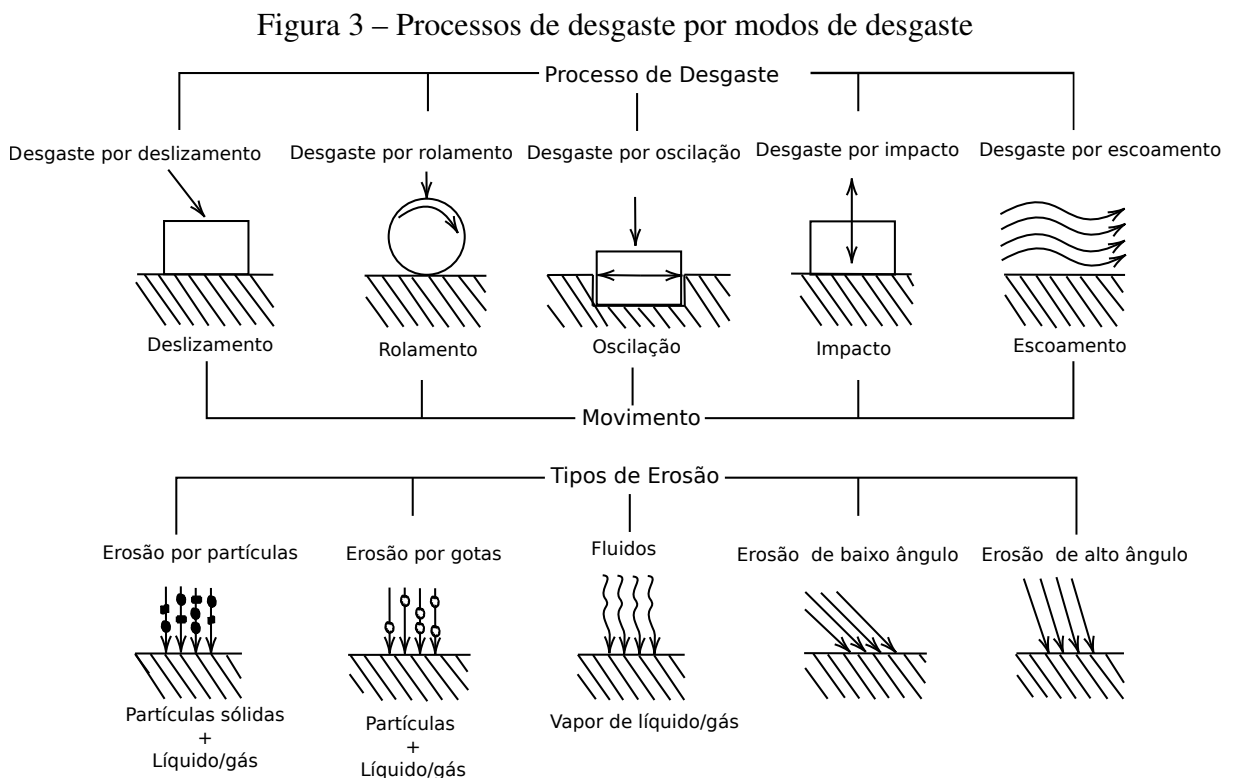
Como as perdas de atrito e desgaste afetam diretamente o rendimento do motor e também o consumo de combustível [1], o estudo de medidas para mitigar o desgaste torna-se necessário para melhorar o desempenho do sistema automotivo.

## 2.2 Desgaste

A tribologia é a ciência e a engenharia que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo e possui diversas aplicações, como: a diminuição da resistência ao deslizamento ou rolamento ou o aumento da resistência ao deslizamento de sistemas que funcionem à base de atrito; a facilitação de processos de fabricação ou o transporte de materiais por meio de sistemas de deslizamento ou rolagem; a determinação de lubrificantes mais adequados [32].

As principais variáveis estudadas pela tribologia são o desgaste, a fricção e o efeito do lubrificante. O desgaste é o dano material decorrente das interações tribológicas da face exposta de um sólido e sua interface com o ambiente. Os principais mecanismos de desgaste são: adesão, abrasão, corrosão e fadiga superficial [33].

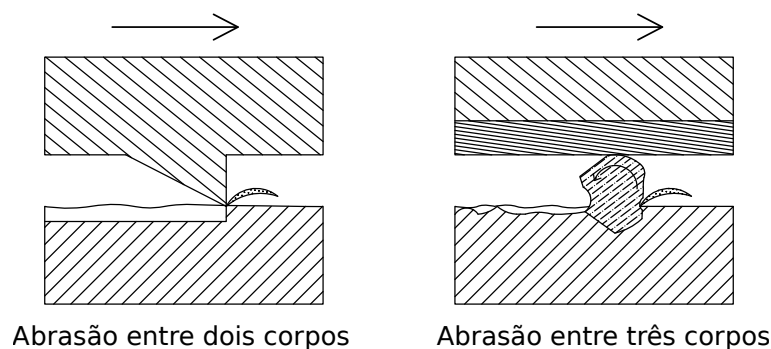
A Figura 3 ilustra as diferentes formas de ação na superfície de um corpo sólido, que podem ocasionar desgastes durante o movimento relativo, assim como alguns tipos de erosão que pode gerar desgastes no material.



Fonte: Adaptado de [33].

O desgaste abrasivo ocorre a partir da partículas abrasivas existente entre superfícies e depende de fatores como velocidade relativa, dimensões, dureza e a pressão de contato imposta [34]. A Figura 4 ilustra o desgaste abrasivo decorrente da interação de dois e três corpos.

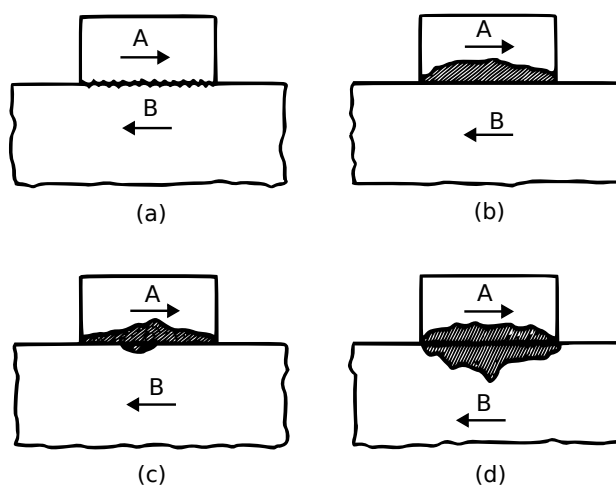
Figura 4 – Desgaste abrasivo entre dois corpos e três corpos.



Fonte: Adaptado de [33].

O desgaste por adesão ocorre quando pressões locais são exercidas entre as superfícies durante o movimento relativo causando adesão de partes de uma superfície na outra, frequentemente encontrada em processos em máquinas e equipamentos [35, 36]. A Figura 5 ilustra o desgaste adesivo decorrente da interação de dois corpos.

Figura 5 – Desgaste devido adesão nas junções



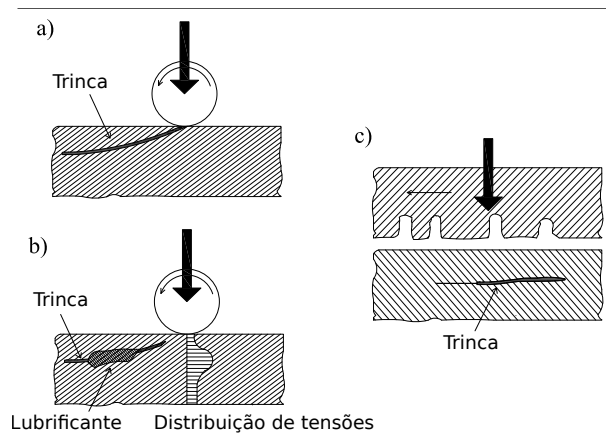
Ruptura das junções dentro: (a) da interface anterior; (b) do material mais macio A; (c) do material mais macio A predominantemente, mas também em B ou (d) de ambos os materiais A e B em partes iguais

Fonte: Adaptado de [33].

Já o desgaste por fadiga ocorre pela formação de rachaduras na superfície ou no interior do material, devido tensões mecânicas alternadas e repetidas. Esse desgaste segue o seguinte processo: inicialmente ocorre uma deformação elástica, depois uma deformação plástica seguida

por um encruamento, para por fim surgir a trinca e sua propagação [33]. A Figura 6 ilustra as etapas do processo de desgaste por fadiga.

Figura 6 – Etapas do desgaste por fadiga

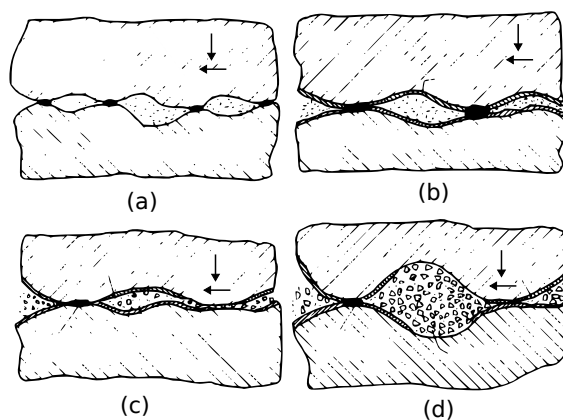


Fonte: Adaptado de [33]

O desgaste por corrosão ocorre por deterioração gradual do material devido a sua interação com o ambiente, gerando desgaste interno, a corrosão alveolar, rachaduras e a ferrugem. Os processos mais comuns de corrosão são os eletrolíticos, químicos e eletroquímicos, sendo este último o de maior destaque, pois ocorre com metais em presença de água [33]. Já os desgastes triboquímicos ou tribo-oxidação decorrem do contato deslizante que leva a uma reação química.

Esses desgastes por corrosão ou tribo-oxidação são uma constante ameaça aos materiais, pois qualquer alteração do pH ou presença de meio oxigenado aumentará sua chances de ocorrência no material. A Figura 7 ilustra as alguns desses desgastes.

Figura 7 – Desgaste devido a tribo-oxidação



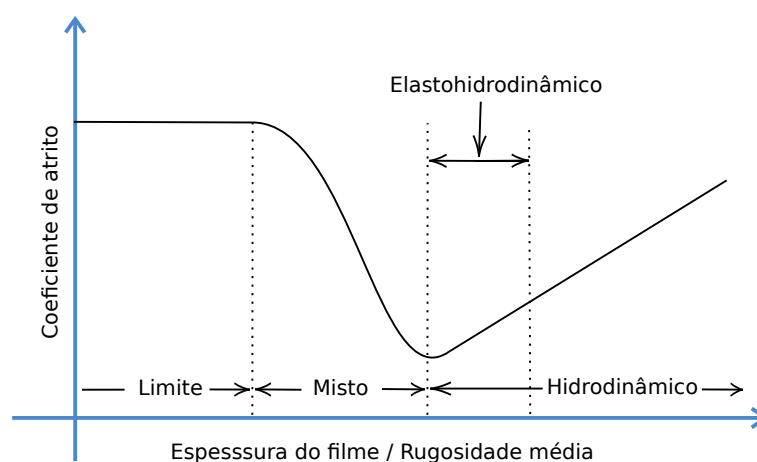
(a) a adesão remove pedaços de metal, que podem depois oxidar; (b) reação química com o ambiente, produzindo camada protetora que reduz o contato entre os metais; (c) rachaduras na camada protetora devido a alta pressão ou microfadiga, produzindo detritos; (d) detritos de desgastes que podem agir de forma abrasiva na superfície.

Fonte: Adaptado de [33].

Em sistemas mecânicos, o desgaste gera perda de material, que pode resultar em folgas, comprometendo a precisão ou a estrutura do sistema [37]. Desse modo, adota-se medidas que venham proteger o sistema de desgastes, com destaque para o uso de lubrificantes, devido seu custo baixo, praticidade e simplicidade de uso. No entanto, para escolher um lubrificante é necessário determinar o regime de lubrificação, que por sua vez depende da carga, velocidade e da rugosidade entre as superfícies do sistema.

Os regimes de lubrificação podem ser hidrodinâmico, elastohidrodinâmico, misto e limítrofe, e suas evoluções são normalmente registradas em um gráfico denominado de Curva de Stribeck, como ilustrado na Figura 8 [32].

Figura 8 – Curva de Stribeck



Fonte: Adaptado de [38]

O regime hidrodinâmico ocorre em superfícies geometricamente semelhantes e é caracterizado pela formação de um filme lubrificante que separa as superfícies em contato. Já o elastohidrodinâmico, ocorre em superfícies não conformes e é caracterizado por expressivas deformações elásticas das superfícies. Por fim, o regime limítrofe é caracterizado pela formação de um fino filme lubrificante de dimensões moleculares [32].

Em sistemas mecânicos reais são encontrados mais de um regime de lubrificação, assim a compreensão das especificidades do sistema, bem como seu mecanismo de funcionamento, são de suma importância para escolha adequada do lubrificante de acordo com seus mecanismos.

### 2.3 Óleos Lubrificantes

Os óleos lubrificantes são substâncias utilizadas para reduzir o atrito e o desgaste devido o movimento relativo entre as superfícies, mas também para eliminar o calor, proteger contra corrosão, transmitir potência, vedar e evitar impurezas [39]. Para seu correto uso, é necessário

determinar as características físicas e químicas do sistema. As principais características de uma boa lubrificação são: boa aderência, coesão e ter espessura maior que rugosidade da superfície [32].

Essencialmente, os óleos lubrificantes se diferenciam quanto à base (mineral, sintética, semissintética, animal e vegetal) e pelo estado físico (sólido, líquido, gasoso, semi gasoso). Os de base mineral são produzidos a partir do petróleo; os de base sintética por meio de reação e síntese química; os de base semissintética misturando ambos; os de base animal são provenientes de gordura animal e os de base vegetal são extraídos das sementes oleaginosas.

Apesar dos óleos lubrificantes sintéticos terem surgidos no final do século XIX, foi só em meados do século XX, que começaram ser produzidos e utilizados a níveis industriais [40]. Apresentam boa resistência ao calor e a oxidação, e possuem uma longa vida útil de trabalho comparada aos de base mineral, reduzindo o número de troca de óleo. Entretanto, possuem um alto custo de aquisição, de modo que sua utilização é direcionada a sistemas nos quais os outros tipos de óleos não podem ser empregados com desempenho suficiente de trabalho.

Os óleos lubrificantes minerais detêm a maior parcela no mercado nos dias de hoje. Eles possuem boa lubricidade e custo reduzido de produção, entretanto são agressivos ao meio ambiente e a saúde, e sua lubricidade está condicionada a qualidade do petróleo [41].

Atualmente existem três tipos de óleos lubrificantes minerais: naftênico, aromático, e parafínico. Os naftênicos incluem átomos de carbono cíclicos em estrutura sem ligações insaturadas. Já os aromáticos possuem estrutura semelhante ao benzeno, enquanto os parafínicos são formados por estruturas lineares de hidrocarbonetos [42].

Os óleos lubrificantes de origem vegetal tem crescido rapidamente no mercado, ganhando importância econômica, principalmente porque atendem certas questões ambientais e industriais: produção bio sustentável, atóxicos, alto ponto de fulgor, elevado poder calorífico, alta viscosidade, excelente lubricidade e biodegradáveis [43]. No entanto, possuem insaturações que geram características desvantajosas, a saber: propensão a hidrólise em meio ácido, alta probabilidade de oxidação e solidificação em temperaturas baixas. A utilização de aditivos tem sido uma boa alternativa para superar o problema da hidrólise e da oxidação desses óleos [44].

Os óleos lubrificantes de origem animal, que outrora foram muito utilizados, hoje possuem uso limitado principalmente devido as rigorosas normas ambientais. Além disso, apesar da vantagem de suportarem grandes pressões, tem duas grandes desvantagens: são difíceis de encontrar fontes para sua produção e são caros de produzir [45–47].

Em 1911, a Society of Automotive Engineers (SAE) desenvolveu o primeiro sistema

de classificação para óleos automotivos fundamentado na viscosidade com o objetivo de evitar o risco de uso de óleo errado no automóvel. Ela vem acompanhada por números e às vezes por letra também, dividindo-os em dois grupos: mono viscosos, representados por um número, e multi viscosos, representados por dois números. Por exemplo, a informação SAE 15W 40 na embalagem de um óleo indica que ele é multi viscoso e a viscosidade é de  $15m^2/s$  a uma temperatura de  $0^\circ C$  no momento em que se dá a partida no motor. Enquanto a letra W indica que ele é adequado para baixas temperaturas e o número 40 informa que a viscosidade é de  $40m^2/s$  a uma temperatura de  $100^\circ C$ , quando o motor já está em funcionamento.

Os óleos multi viscosos possuem maior empregabilidade devido a sua capacidade de adaptação à temperatura, isto é, a viscosidade reduz no momento em que o óleo é aquecido e aumenta quando resfriado [48].

A Tabela 1 resume a classificação SAE para cada nomenclatura de lubrificante automotivo. O primeiro número representa a viscosidade em baixa temperatura e o segundo em alta temperatura. A letra W que segue o grau no primeiro ou único número indica que o óleo é adequado para temperaturas baixas e sua ausência indica óleo para temperaturas altas.

Tabela 1 – Classificação SAE

Graus de Viscosidade SAE	Viscosidades a Baixas Temperaturas		Viscosidades a Altas Temperaturas		
	Viscosidade máxima na partida ASTM D 5293	Viscosidade máxima no bombeamento ASTM D4684	Viscosidade Cinemática a Baixa Taxa de Cisalhamento	Viscosidade Cinemática a Alta Taxa de Cisalhamento	
			Mínimo	Máximo	Mínimo
0W	6.200 @ $-35^\circ C$	60.000 @ $-40^\circ C$	3,8		
5W	6.600 @ $-30^\circ C$	60.000 @ $-35^\circ C$	3.8		
10W	7.000 @ $-25^\circ C$	60.000 @ $-30^\circ C$	4.1		
15W	7.000 @ $-20^\circ C$	60.000 @ $-25^\circ C$	5.6		
20W	9.500 @ $-15^\circ C$	60.000 @ $-20^\circ C$	5.6		
25W	13.000 @ $-10^\circ C$	60.000 @ $-15^\circ C$	9.3		
8			4.0	6.1	
12			5.0	7.1	2
16			6.1	8.2	2.3
20			5.6	9.3	2.6
30			9.3	12.5	2.9
40			12.5	16.3	2.9*
40			12.5	16.3	3.7**
50			16.3	21.9	3.7
60			21.9	26.1	3.7

\*

0W-40, 5W-40 e 10W-40. Para 0W, 5W e 10W, o limite de HTHS é 2,9 cSt.

\*\* 15W-40, 20W-40, 25W-40 e 40. Para 15W, 20W e o limite SAE 40 HTHS é 3,7 em vez de 2,9

Fonte: adaptado de [49]

Outro importante sistema de classificação criado em 1947 é a da American Petroleum Institute (API). Nele consta a especificação de desempenho dos lubrificantes que estão categorizados pelo tipo de motor projetado e a existência da sigla API na embalagem do óleo, informa que o óleo está de acordo com as normas desse instituto.

A sigla API vem acompanhada por duas letras ou duas letra e um número: SG, SH, SJ, SL, SM, SN, CA, CB, etc. A letra S indica que o óleo é adequado para motores a álcool ou gasolina, enquanto a letra C informa que o óleo é para motores a diesel. As letras A, B, ..., G, H, etc, na ordem alfabética, indicam o nível do desempenho do óleo. Por exemplo, o óleo API-SG é inferior ao API-SH em desempenho.

A classificação referente aos motores ciclo Otto, ou seja, a classificação API S é encontrada na Tabela 2, onde a primeira letra (S) indica a categoria do motor e a segunda de acordo com a modernidade do motor, dada pelo ano de fabricação.

Tabela 2 – Classificação API

SN	Atual	Introduzido em outubro de 2010
SM	Atual	Para motores automotivos de 2010 e mais antigos
SL	Atual	Para motores automotivos de 2004 e mais antigos
SJ	Atual	Para motores automotivos de 2001 e mais antigos

Fonte: adaptado de [50]

Em resumo, os óleos lubrificantes automotivos são especificados por alguns códigos e siglas registrados em sua embalagem. Eles tem a função de informar as suas condições, desempenho e finalidade de trabalho. Para cada motor e condições do automóvel há um tipo de óleo adequado. A não observância disso pode ocasionar danos severos ao motor.

## 2.4 Aditivos

Os aditivos são substâncias acrescentadas ao óleo base com o intuito de adicionar novas propriedades ao óleo ou para alterar as propriedades (físicas ou químicas) do óleo, melhorando o seu desempenho.

Na prática, geralmente se usa vários aditivos no mesmo óleo. No entanto, isso exige atenção para que eles trabalhem de modo sinérgico, ou seja, em equilíbrio químico, evitando rivalidade pela superfície metálica, o que comprometeria a eficácia deles.

Conforme [51, 52], os aditivos possuem propriedades com relevantes efeitos, tais como: melhorador do índice de viscosidade, adequa a viscosidade à temperatura, assegurando a qualidade hidrodinâmica do óleo; agente anti-desgaste, ameniza os efeitos do atrito por meio da formação de um filme protetor; antioxidante, neutraliza o ataque de ácidos e do oxigênio mediante uma película protetora; detergente, pois evita o depósito de impurezas; dispersante, porque dispersa a fuligem e as demais impurezas; antiespumante, ao evitar o surgimento de bolhas de ar; extrema pressão, ao reduzir o atrito e evitar o travamento; abaixador do ponto



de fluidez, pois evita o congelamento do óleo em baixas temperaturas; e anticorrosivo, já que protege as partes metálicas do sistema contra a ação de agentes corrosivos.

## 2.5 Nanopartículas

As nanopartículas são partículas extremamente pequenas com dimensões entre 1 e 100 nanômetros que tem ganhado atualmente muito destaque nas pesquisas científicas e na indústria devido sua grande variedade de aplicações industriais e domésticas. Apesar delas serem também produzidas pela natureza, geralmente são as sintética, obtida por meio de processos artificiais, que são as mais utilizadas [53].

Elas podem ser classificadas com base em suas propriedades, formas ou tamanhos e apresentadas em forma de pó, gel ou solução. Por terem tamanho reduzido, possuem uma razão área superficial por volume muito alta e uma elevada reatividade, características que a confere qualidades singulares [54].

A composição química das nanopartículas podem ser baseada em metais, óxidos metálicos, nanopartículas de carbono, nanocompósitos e sulfetos, sendo os mais utilizados os metais, óxidos metálicos e os sulfetos [41].

Os atuais processos de produção industrial de nanopartículas são os métodos de agregação de moléculas (bottom up) e de remoção de material (top down), com destaque para bottom up, por apresentar pouca dispersão no tamanho das partículas produzidas e possuir boa reprodutibilidade, razões que explicam seu maior uso [54].

Uma das aplicações das nanopartículas que tem gerado um interesse considerável nas pesquisas científicas devido os resultados promissores é o seu uso como aditivo para lubrificantes com a finalidade de melhorar as suas propriedades, tais como: a capacidade de reduzir o atrito e o desgaste no sistema [55–57]. Por exemplo, em sistemas mecânicos, o atrito e o desgaste são fatores relevantes no consumo de energia [31].

As nanopartículas podem ser utilizadas como aditivos em óleos lubrificantes de qualquer natureza. Elas possuem a capacidade de produzir uma fina película sobre as superfícies em deslizamento, reduzindo o atrito e o desgaste, e aumentando o transporte de carga [58, 59].

Essencialmente, as nanopartículas atuam como esferas que rolam entre as superfícies de contato e convertem o atrito de deslizamento em combinação de atrito de deslizamento e rolamento [57].

Dois outros importantes efeitos do uso da nanopartículas como aditivo em lubrificantes são o efeito de recuperação e o de polimento. O primeiro é caracterizado pela deposição de

nanopartículas durante a fricção das superfícies, acarretando compensação nas perdas de massa [57]. Já o segundo, reduz a rugosidade das superfícies por abrasão com as nanopartículas [60,61].

Em resumo, para que as nanopartículas possam atuar como um bom aditivo é necessário se atentar ao método de sua produção (síntese), a rugosidade da superfície do material onde será utilizada, assim como ao comportamento de algumas de suas propriedades, a saber: morfologia, tamanho, concentração, carga, óleo base, material das nanopartículas, temperatura.

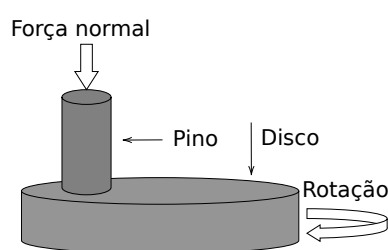
Por exemplo, os nanocompósitos apresentam geralmente melhor desempenho que as nanopartículas simples devido ao efeito sinérgico de combinação. Concentrações de nanopartículas entre 0,05% e 2,97% contribuem para melhora das propriedades dos óleos lubrificantes, enquanto concentrações maiores prejudicam, pois podem causar aglomerações, responsáveis por desgaste [28]. Ao passo que o tamanho da nanopartícula é um parâmetro que afeta diretamente o desempenho tribológico, já que quanto menores elas forem maior será a facilidade em se posicionar entre as superfícies [57].

## 2.6 Ensaio Pino Contra Disco

O ensaio pino contra disco é um teste tribológicos amplamente utilizado para avaliar o desgaste de materiais no deslizamento do pino sobre o disco e é regido pela norma ASTM G99, isto é, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus [62]. Esse ensaio permite estudar as relações existentes entre o desgaste e os parâmetros do sistema como carga aplicada, pressão, velocidade de deslizamento, distância de deslizamento, temperatura, coeficiente de atrito, propriedades do material e lubrificação. No entanto, o teste não realiza previsão do desgaste no cenário real sob condições diferentes do teste.

Para assegurar que durante o ensaio não haverá interferências dos fatores ambientais no teste, a temperatura e os gases do ambiente devem ser controlados. Um esquema da máquina pino contra disco é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Ensaio Pino Contra Disco



Fonte: Autor(2022)

### 3 METODOLOGIA

Neste estudo, considerou-se 3 óleos lubrificantes com características diferentes para motores de combustão interna de ciclo Otto. Os equipamentos (balança de precisão, agitador magnético térmico, banho ultrassônico, pino, disco, politriz) e as nanopartículas utilizadas para obtenção do fluido nanoaditivado e para o teste de desempenho na redução de desgaste foram disponibilizados pelo Instituto Federal de Alagoas (IFAL). Já os óleos sintético, semissintético e mineral foram de aquisição própria. No entanto, as nanopartículas utilizadas neste estudo não serão divulgadas devido ao potencial inovador do lubrificante adquirido com a aditivação, sendo portanto passível a depósito de patente ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

#### 3.1 Os Óleos Lubrificantes

Neste trabalho, os óleos lubrificantes utilizados foram o óleo mineral Mach 5 Plus da fabricante Petronas, o óleo semi sintético Magnatec da fabricante Castrol e o óleo sintético Helix HX8 da fabricante Shell.

O óleo Mach 5 Plus é um lubrificante aditivado multi viscoso de alto desempenho [63]. Já o óleo Magnatec contém base sintética e mineral, aditivos antidesgaste, antioxidante, detergente, dispersante, antiespumante, anticorrosivo e modificador do índice de viscosidade [64]. Enquanto o óleo Helix HX8, segundo o fabricante, gera alto nível de limpeza e proteção, além de ajudar a prevenir o atrito do motor, e pode ser utilizado em motores a gasolina e biocombustíveis. [65].

As propriedades físicas dos óleos utilizados neste trabalho, conforme a normatização da American Society for Testing and Materials [62], estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades dos lubrificantes

Propriedade	Método (ASTM)	Helix HX8	Magnatec	Mach 5 Plus
Base	-	sintética	semi sintética	mineral
SAE	-	5W-30	10W-30	15W-40
API	-	SN	SN	SL
Densidade a 15 °C	D4052	0,84 g/ml	0,87 g/ml	0,88 g/ml
Viscosidade Cinemática a 40°C	D445	71,7 cSt	76 cSt	>20.5 cSt
Viscosidade Cinemática a 100°C	D445	11,9 cSt	11,1 cSt	14,8 cSt
Ponto de Fulgor	D92	244°C	200°C	226°C
Ponto de Fluidez	D97	-48°C	-42°C	-24°C

Fonte: Adaptado de [63–65]

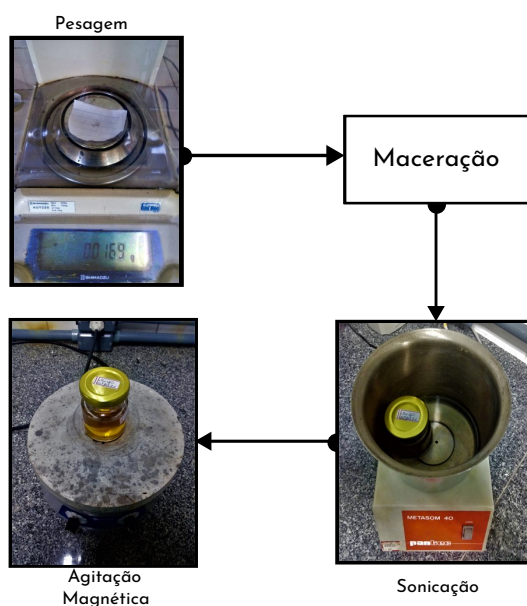
### 3.2 Obtenção do Óleo Lubrificante Aditivado

Inicialmente, foi separado as nanopartículas na proporção de 0,033% gramas de NP por volume de óleo, ou seja, 0,3g/L. Em seguida, realizou-se a maceração das nanopartículas para eliminar as aglomerações existentes e atenuar as forças atrativas entre elas.

Por fim, para assegurar que todas as aglomerações fossem eliminadas devidamente e, assim, obtida uma mistura homogênea de óleo e nanopartículas, foi depositado o óleo com as nanopartículas maceradas no ultrassom e depois no agitador magnético.

Essas etapas, sintetizadas na Figura 10, foram realizadas a uma temperatura entre 25 °C e 35°C, e os parâmetros foram modificados conforme o óleo utilizado.

Figura 10 – Etapas para obtenção do óleo lubrificante aditivado.



Fonte: Autor (2022)

Após o ensaio, foi realizada a inspeção visual dos lubrificantes, conforme a Figura 11, para identificar possível ocorrência de sedimentação de nanopartículas.

Figura 11 – Inspeção visual de sedimentação.

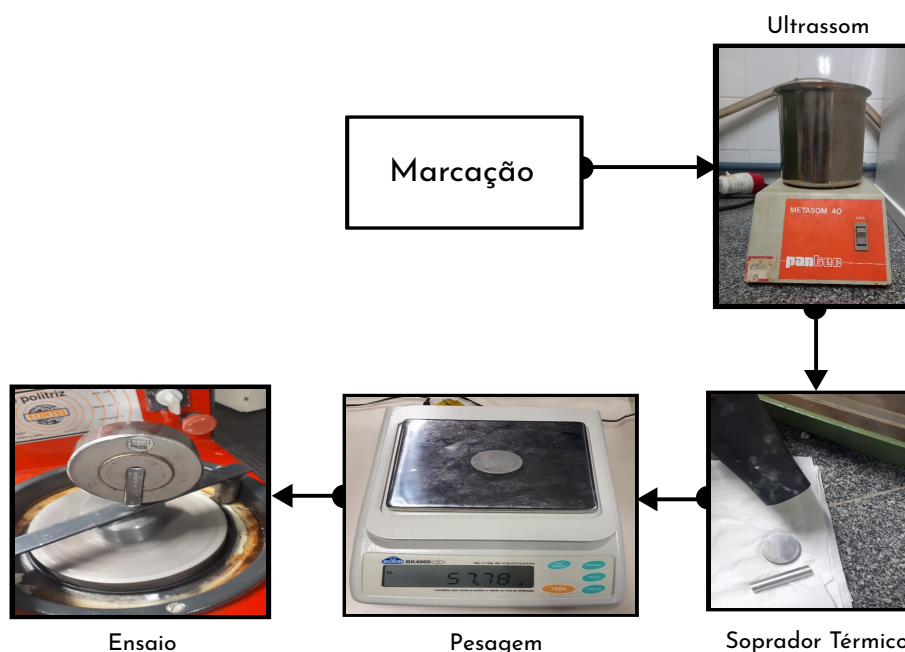


Fonte: Autor (2022)

### 3.3 Ensaio Pino Contra Disco

O ensaio pino contra disco ocorreu por meio de uma lixadeira/politriz adaptada, modelo PLF da fabricante Fortel, com um disco de aço 1020 girando a uma velocidade de 150 RPM por 15 min e um pino de alumínio submetido a uma carga de 10 N. Durante todo o ensaio a temperatura foi mantida em 25 °C e a quantidade de óleo lubrificante usada para cada ensaio foi 2,5 ml. As etapas que antecederam a realização do ensaio estão ilustradas na Figura 12.

Figura 12 – Etapas Do Ensaio Pino Contra Disco.



Fonte: Autor (2022)

Inicialmente, os pares tribológicos (pino e disco) foram identificados com marcação numérica para não haver quaisquer misturas de corpo de prova. Em seguida, os pares foram banhados, separadamente, por 5 minutos no ultrassom para retirar as impurezas e secados mediante um secador térmico e papel toalha, para depois serem pesados cuidadosamente. O recipiente com o óleo também foi banhado no ultrassom. Por fim, com todos os pares e óleos prontos, foi realizado o ensaio pino contra disco para os óleos com as nanopartículas e os óleos sem as nanopartículas. Cada ensaio durou 15 min e após cada realização o respectivo corpo de prova (pino e disco) era submetido a pesagem para verificar a perda de massa devido ao desgaste.

O ultrassom utilizado foi o METASOM 40 da fabricante PANTEE, a balança foi uma semi-analítica da marca Gehaka, modelo bk 4000 e os corpos do ensaio (pino e disco) a cada ensaio passavam pelo mesmo procedimento de limpeza para retirar resquícios do ensaio anterior, evitando contato com impurezas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com ASTM G99, o teste pino contra disco pode ser aplicado em uma ampla variedade de materiais, desde que os corpos de prova suportem as tensões impostas durante o ensaio e não apresentem flexão excessiva [62]. Desse modo, além de atender esses critérios, os materiais que constituem o pino e o disco para este trabalho foram escolhidos com base na facilidade de aquisição, na diferença da dureza entre eles e na sua capacidade de desgaste.

Para obtenção dos resultados a seguir, foram utilizados um pino de alumínio e um disco de aço 1020. Os valores das massas específicas correspondentes utilizados estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Massa Específica ( $g/cm^3$ )

Disco (Aço 1020)	Pino (Alumínio)
7,87	2,7

Fonte: [66]

Já as perdas por desgaste, doravante desgaste volumétrico, sofridas pelo pino e o disco foram determinadas a partir da perda de volume, que por sua vez foi obtido por meio da Equação 1, que relaciona a densidade ( $\rho$ ), a massa removida ( $m_r$ ) e volume removido ( $V_r$ ).

$$V_r = \frac{m_r}{\rho} \quad (1)$$

Existem mais duas importantes medidas que permitem avaliar o nível do desgaste do material e a propensão ao desgaste, a saber: o coeficiente de desgaste relativo e a resistividade,

O coeficiente de desgaste relativo ( $K$ ), que indica a quantidade de material (volume ( $V$ ) ou massa ( $m$ )) removido após o ensaio em relação a quantidade inicial do material, foi determinado pelas Equações 2 e 3.

$$K_v = \frac{\Delta V}{V} \quad (2)$$

$$K_m = \frac{\Delta m}{m} \quad (3)$$

A resistividade ( $R$ ) relativa do material ao desgaste foi obtido pelas Equações 4 e 5.

$$R_v = \frac{1}{K_v} \quad (4)$$

$$R_m = \frac{1}{K_m} \quad (5)$$

#### 4.1 Desgaste Volumétrico

A Tabela 5 mostra os valores obtidos para o disco no experimento do pino contra disco submetido a lubrificação, para os casos com e sem nanopartículas.

Tabela 5 – Disco

	OLM		OLS		OLSM	
	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP
Massa inicial (g)	59,18	59,64	59,13	57,8	64,1	56,53
Desgaste (g)	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01
Desgaste ( $cm^3$ )	0,079	0,079	0,236	0,157	0,157	0,078

Fonte: Autor(2022)

Enquanto a Tabela 6 mostra os valores obtidos para o pino no experimento do pino contra disco submetido a lubrificação, para os casos com e sem nanopartículas.

Tabela 6 – Pino

	OLM		OLS		OLSM	
	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP
Massa inicial (g)	17,64	18,21	18,37	18,25	17,47	18,33
Desgaste (g)	0,04	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01
Desgaste ( $cm^3$ )	0,1148	0,0287	0,1148	0,0574	0,0574	0,0287

Fonte: Autor(2022)

Resumidamente, o ensaio pino contra disco para o óleo mineral sem nanopartículas apresentou desgaste de 0,01g no disco e 0,04 g no pino. Nos óleos com nanopartículas, o disco sofreu desgaste de 0,01g, assim como no pino, representando uma diminuição no desgaste do pino em 75%.

Para o lubrificante sintético sem nanopartículas, o ensaio apresentou um desgaste no disco de 0,03g e no pino 0,04g, ao passo que no óleo com nanopartículas o disco e o pino tiveram um desgaste de 0,02g, indicando uma queda no desgaste em 33,3% e 50%, respectivamente.

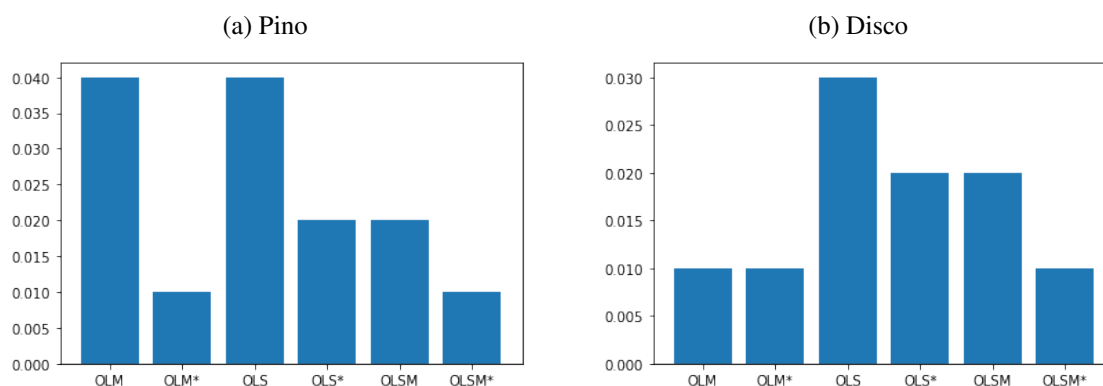
Já o ensaio pino contra disco para óleo semissintético sem nanopartículas, obteve um desgaste de 0,02g no disco e no pino, à medida que com nanopartículas tanto o disco quanto o pino sofreram um desgaste de 0,01g, isto é, uma diminuição de 50% no desgaste.

Em geral, o uso das nanopartículas nos três óleos reduziu o desgaste, com destaque para o óleo mineral, que mostrou maior redução de desgaste no pino quando com nanopartículas.

Os gráficos da Figura 13 ilustram os resultados dessas perdas de material durante o ensaio pino contra disco. OLM, OLS e OLSM representam os óleos mineral, sintético e semi

sintético sem nanopartículas, respectivamente, enquanto OLM\*, OLS\* e OLSM\* correspondem aos mesmos óleos, mas com nanopartículas.

Figura 13 – Desgastes dos corpos - Disco e Pino



Fonte: Autor(2022)

## 4.2 Coeficiente Relativo de Desgaste

Quanto menor for o valor do coeficiente de desgaste relativo menor será a perda por desgaste. Desse modo, o disco mostrou menor tendência ao desgaste em relação ao pino, como o esperado, assim como o uso de nanopartículas diminuiu a tendências a perdas por desgastes.

A Tabela 7 mostra os valores obtidos para o coeficiente de desgaste relativo do disco.

Tabela 7 – Coeficiente de Desgaste Relativo - Disco

	OLM		OLS		OLSM	
	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP
$K_m$ ( $\times 10^{-4}$ )	1,69	1,68	5,07	3,46	3,12	1,77

Fonte: Autor(2022)

A Tabela 8 mostra os valores obtidos para o coeficiente de desgaste relativo do pino.

Tabela 8 – Coeficiente de Desgaste Relativo - Pino

	OLM		OLS		OLSM	
	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP
$K_v$ ( $\times 10^{-4}$ )	4,63	4,60	13,9	9,49	8,56	4,85

Fonte: Autor(2022)

## 4.3 Taxa de Perda Relativa

A taxa de perda relativa, que é uma grandeza adimensional, permite avaliar a intensidade de perda volumétrica material de um corpo em relação a do outro corpo, quando em contato e



movimento relativo entre si, isto é, mede a velocidade relativa de desgaste entres corpos.

No caso do teste pino contra disco, uma taxa superior a um, indica que o pino, que desliza sobre um disco de dureza superior a dele, se desgasta com maior velocidade em relação ao disco.

A Tabela 9 mostra os valores obtidos para taxa de perda relativa de material no ensaio pino contra disco.

Tabela 9 – Taxa de Perda Relativa

	OLM		OLS		OLSM	
	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP
$\Delta V_p/\Delta V_d$	1,45	0,36	0,48	0,36	0,36	0,36

Fonte: Autor(2022)

#### 4.4 Resistividade Relativa

Como a resistividade relativa permite avaliar a resistência ao desgaste de material de um corpo, quanto maior for o seu valor menor será o desgaste. Além disso, é uma grandeza adimensional, visto que ambas as grandezas são da mesma natureza.

A Tabela 10 mostra os valores obtidos da resistividade relativa para o disco quando lubrificada, com ou sem nanopartículas.

Tabela 10 – Resistividade Relativa - Disco

	OLM		OLS		OLSM	
	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP
$1/K (x 10^4)$	0,591	0,595	0,197	0,289	0,320	0,565

Fonte: Autor(2022)

Como esperado, o disco possui uma resistividade superior ao pino. Além disso, quando o lubrificante possui nanopartículas, a resistência ao desgaste aumenta. A Tabela 11 mostra os valores obtidos da resistividade relativa para o pino quando lubrificada, com ou sem nanopartículas.

Tabela 11 – Resistividade Relativa - Pino

	OLM		OLS		OLSM	
	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP	Sem NP	Com NP
$1/K (x 10^4)$	0,216	0,217	0,072	0,105	0,117	0,206

Fonte: Autor(2022)

## **5 CONCLUSÃO**

Com as análises para avaliar o desempenho tribológico, pode-se identificar que a nano aditivção nos óleos lubrificantes trouxe uma melhoria na eficiência considerada a partir do desgaste. O óleo com maior eficiência, quando se refere ao menor desgaste, é o óleo lubrificante mineral nanoaditivado, mas todos os outros óleos com nanopartículas quando colocados à prova possui um desempenho melhor em proteção aos corpos de ensaio do que os óleos sem as nanopartículas. Portanto, conclui-se que a aditivção de nanopartículas, em lubrificantes para motor ciclo Otto, acarreta em melhoria nas propriedades anti desgastantes dos óleos no teste pino contra disco.

### **5.1 Trabalhos Futuros**

Como este trabalho de conclusão de curso é de natureza preliminar, recomenda-se para trabalhos futuros a elaboração de um modelo matemático que descreva e quantifique o desgaste, assim como simulações numéricas que permitam compreender aprofundadamente os comportamentos das variáveis envolvidas e as interações entre si durante o desgaste, inclusive simulando um cenário real, quando usados os óleos nanoaditivados.

Essas ações se bem sucedidas reduziriam naturalmente o custo do projeto de motores a ciclo Otto, quando usado os óleos nanoaditivados em estudo.

Também sugere-se para trabalhos futuros a análise dos os comportamentos das variáveis envolvidas e as interações entre si durante o desgaste em um ambiente real, assim como a avaliação dos óleos nanoaditivados em motores de ciclo a diesel e em transformadores, desse modo ampliando o leque de possibilidades de uso.

## REFERÊNCIAS

- 1 HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: McGraw Hill Education, 2018.
- 2 KIRKPATRICK., C. R. F. A. T. **Internal Combustion Engines Applied Thermosciences**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2000. 384 p.
- 3 OICA. **2021 PRODUCTION STATISTICS**. 2010. Disponível em: <<https://www.oica.net/category/production-statistics/2021-statistics/>>. Acesso em: 11 de out de 2022.
- 4 HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A.; AGHILI, N. The scenario of greenhouse gases reduction in malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 400–409, 2013.
- 5 HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 868–875, 2014.
- 6 FRANGETTO, F. W.; VEIGA, A.; LUEDEMANN, G. **Legado do MDL: impactos e lições aprendidas a partir da implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil como subsídios para novos mecanismos**. [S.l.]: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2018.
- 7 UNIDAS, O. das N. **COP 26: THE GLASGOW CLIMATE PACT**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://ukcop26.org/the-glasgow-climate-pact/>>. Acesso em: 20 de nov de 2022.
- 8 ZHAO, F.; CHEN, K.; HAO, H.; LIU, Z. Challenges, potential and opportunities for internal combustion engines in china. **Sustainability**, v. 12, n. 12, p. 4955, 2020.
- 9 SERRANO, J. R. Imagining the future of the internal combustion engine for ground transport in the current context. **Applied Sciences**, v. 7, n. 10, p. 1001, 2017.
- 10 SERRANO, J. R.; NOVELLA, R.; PIQUERAS, P. Why the development of internal combustion engines is still necessary to fight against global climate change from the perspective of transportation. **Applied Sciences**, v. 9, n. 21, p. 4597, 2019.
- 11 FOUNDATION, F. F. **What cars will we be driving in 2050?, Fuel Freedom Foundation**. 2016. Disponível em: <<https://www.fueelfreedom.org/cars-in-2050>>. Acesso em: 09 de dez de 2022.
- 12 EIA, E. I. A. U. S. **Annual Energy Outlook 2022**. 2022. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/aeo/narrative/pdf/AEO2022\\_Narrative.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/narrative/pdf/AEO2022_Narrative.pdf)>. Acesso em: 09 de dez de 2022.
- 13 AGENCY, I. E. **World Energy Outlook 2022**. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>>. Acesso em: 09 de dez de 2022.
- 14 LORENZI, C. E. **Impactos ambientais e energéticos provocados pela substituição de motores de combustão interna por células a combustível em veículos automotores**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Mauá de Tecnologia , Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, São Caetano do Sul, 2009.

- 15 MALAQUIAS, A.; NETTO, N.; FILHO, F. A.; COSTA, R.; LANGEANI, M.; BAÊTA, J. The misleading total replacement of internal combustion engines by electric motors and a study of the brazilian ethanol importance for the sustainable future of mobility: a review. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, p. 567, 11 2019.
- 16 KALGHATGI, G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? **Applied Energy**, v. 225, p. 965–974, 2018.
- 17 DAHHAM, R. Y.; WEI, H.; PAN, J. Improving thermal efficiency of internal combustion engines: Recent progress and remaining challenges. **Energies**, v. 15, n. 17, 2022.
- 18 FYFFE, J. R.; DONOHUE, M. A.; REGALBUTO, M. C.; EDWARDS, C. F. Mixed combustion–electrochemical energy conversion for high-efficiency, transportation-scale engines. **International Journal of Engine Research**, v. 18, n. 7, p. 701–716, 2017.
- 19 LEACH, F.; KALGHATGI, G.; STONE, R.; MILES, P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. **Transportation Engineering**, v. 1, p. 100005, 2020.
- 20 TAYLOR, C. Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability. **Wear**, v. 221, n. 1, p. 1–8, 1998.
- 21 CARVALHO, M. **Avaliação de um motor de combustão interna de ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Salvador, 2011.
- 22 AKERLIND, I. B. et al. **On the Road toward 2050: Potential for Substantial Reductions in Light Duty Vehicle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions**. Cambridge, 2015.
- 23 HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v. 47, p. 221–234, 2012.
- 24 ERDEMIR, A.; HOLMBERG, K. Energy consumption due to friction in motored vehicles and low-friction coatings to reduce it. In: \_\_\_\_\_. **Coating Technology for Vehicle Applications**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 1–23.
- 25 LEE, P.; ZHMUD, B. Low friction powertrains: Current advances in lubricants and coatings. **Lubricants**, v. 9, n. 8, p. 74, 2021.
- 26 SHAHNAZAR, S.; BAGHERI, S.; Abd Hamid, S. B. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 4, p. 3153–3170, 2016.
- 27 CHOI, Y.; LEE, C.; HWANG, Y.; PARK, M.; LEE, J.; CHOI, C.; JUNG, M. Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil. **Current Applied Physics**, v. 9, n. 2, Supplement, p. e124–e127, 2009.
- 28 CHOI, S. U.-S. Nanofluid technology: Current status and future research. 10 1998.
- 29 MOREIRA, A.; COUTO, F. **A Termodinâmica do Motor de Combustão Interna: Implicações sociais do uso dessa tecnologia**. Minas Gerais: CEFET-MG, 2019. v. 1. Disponível em: <<https://www.cac.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/30/2019/10/main.pdf>>. Acesso em: 09 de maio de 2022.

- 30 BRUNETTI, F. **Motores a combustão interna**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012. 76 p.
- 31 GALLO, W. **Análise Exergética de Motores a Gasolina e a Álcool**. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica) — Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.
- 32 JÚNIOR, D. **Tribologia, Lubrificação E Mancais De Deslizamento**. Belo Horizonte: Ciência Moderna, 2005.
- 33 CHAPTER 4 Classification of Wear Processes. In: MICROSTRUCTURE and Wear of Materials. [S.l.]: Elsevier, 1987, (Tribology Series, v. 10). p. 80–131.
- 34 BAYER, R. **Theory and Research in Lubrication**. second. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- 35 MENEZES, P. et al. **Tribology for Scientists and Engineers**. [S.l.: s.n.], 2013.
- 36 HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and wear of engineering materials: Second Edition**. [S.l.: s.n.], 2017. 1-388 p.
- 37 JOST, H. Tribology - origin and future. **Wear**, v. 136, n. 1, p. 1–17, 1990.
- 38 HERSEY, M. **Theory and Research in Lubrication**. first. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1966.
- 39 Engineering tribology. In: STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. (Ed.). **Engineering Tribology (Fourth Edition)**. Fourth edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014.
- 40 ZISMAN, W. Historical review, lubricants and lubrication. **Synthetic Lubricants**, Reinhold New York, p. 6–60, 1962.
- 41 JASON, Y. J. J.; HOW, H. G.; TEOH, Y. H.; CHUAH, H. G. A study on the tribological performance of nanolubricants. **Processes**, v. 8, n. 11, p. 1372, 2020.
- 42 SPEIGHT, J. G. **Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes**. Second edition. Boston: Gulf Professional Publishing, 2020. 95-142 p.
- 43 CECILIA, J. A.; PLATA, D. B.; SABOYA, R. M. A.; LUNA, F. M. Tavares de; CAVALCANTE, C. L.; RODRÍGUEZ-CASTELLÓN, E. An overview of the biolubricant production process: Challenges and future perspectives. **Processes**, v. 8, n. 3, p. 257, 2020.
- 44 ERHAN, S. Z.; PEREZ, J. M. **Biobased industrial fluids and lubricants**. [S.l.]: AOCS Publishing, 2002.
- 45 HáJEK, M.; VÁVRA, A.; CARMONA, H. de P.; KOCÍK, J. The catalysed transformation of vegetable oils or animal fats to biofuels and bio-lubricants: A review. **Catalysts**, v. 11, n. 9, p. 1118, 2021.
- 46 HUSSAIN, F.; ALSHAHRANI, S.; ABBAS, M. M.; KHAN, H. M.; JAMIL, A.; YAQOUB, H.; SOUDAGAR, M. E. M.; IMRAN, M.; AHMAD, M.; MUNIR, M. Waste animal bones as catalysts for biodiesel production; a mini review. **Catalysts**, v. 11, n. 5, p. 630, 2021.
- 47 DEVELOPMENT of biolubricants from vegetable oils via chemical modification. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 36, p. 1–12, 2016.
- 48 CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; LU, M. K. **Thermodynamics: an engineering approach**. 5. ed. [S.l.]: McGraw-hill New York, 2011.

- 49 ENGINEERS(SAE), S. of A. Engine oil viscosity classification j300-2015. p. 9, 2015. Disponível em: <[https://www.sae.org/standards/content/j300\\_201501/](https://www.sae.org/standards/content/j300_201501/)>. Acesso em: 11 de out de 2022.
- 50 INSTITUTE, A.-A. P. **Categorias de óleo**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.api.org/products-and-services/pt/eolcs-oil-categories#tab-gasoline>>. Acesso em: 15 de set de 2022.
- 51 ALVES, S. M.; BARROS, B. S.; TRAJANO, M. F.; RIBEIRO, K. S. B.; MOURA, E. I. F. Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions. **Tribology International**, v. 65, p. 28–36, 2013.
- 52 RAINA, A.; HAQ, M. I. U.; ANAND, A.; SUDHANRAJ, J. Lubrication characteristics of oils containing nanoadditives: Influencing parameters, market scenario and advancements. **Journal of The Institution of Engineers (India)**, v. 102, p. 575–587, 2021.
- 53 DAI, W.; KHEIREDDIN, B.; GAO, H.; LIANG, H. Roles of nanoparticles in oil lubrication. **Tribology International**, v. 102, p. 88–98, 2016.
- 54 MINAMI, I. Molecular science of lubricant additives. **Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 445, 2017.
- 55 SUNQING, Q.; JUNXIU, D.; GUOXU, C. Wear and friction behaviour of caco3 nanoparticles used as additives in lubricating oils. **Lubrication Science**, v. 12, n. 2, p. 205–212, 2000.
- 56 LI, S.; RAGU-NATHAN, B.; RAGU-NATHAN, T.; Subba Rao, S. The impact of supply chain management practices on competitive advantage and organizational performance. **Omega**, v. 34, n. 2, p. 107–124, 2006.
- 57 PENG, D.; KANG, Y.; HWANG, R.; SHYR, S.; CHANG, Y. Tribological properties of diamond and sio2 nanoparticles added in paraffin. **Tribology International**, v. 42, n. 6, p. 911–917, 2009.
- 58 TRIBOLOGICAL properties and lubricating mechanisms of Cu nanoparticles in lubricant. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 18, n. 3, p. 636–641, 2008.
- 59 ZHOU, Y.-H.; HARMELIN, M. G.; BIGOT, J.-Y. Sintering behaviour of ultra-fine fe, ni and fe-25wt%ni powders. **Scripta Metallurgica**, v. 23, p. 1391–1396, 1989.
- 60 WU, H.; ZHAO, J.; XIA, W.; CHENG, X.; HE, A.; YUN, J. H.; WANG, L.; HUANG, H.; JIAO, S.; HUANG, L.; ZHANG, S.; JIANG, Z. Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication. **Tribol Lett**, v. 35, p. 127–131, 2009.
- 61 WU, H.; ZHAO, J.; XIA, W.; CHENG, X.; HE, A.; YUN, J. H.; WANG, L.; HUANG, H.; JIAO, S.; HUANG, L.; ZHANG, S.; JIANG, Z. A study of the tribological behaviour of tio2 nano-additive water-based lubricants. **Tribology International**, v. 109, p. 398–408, 2017.
- 62 ASTM. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus:astm g99-17. **American Society for Testing and Materials Society**, p. 6, 2017.
- 63 PETRONAS. **Ficha Técnica MACH 5 15W-40 API SL**. Disponível em: <<https://global.pli-petronas.com/product-data>>. Acesso em: 11 de out de 2022.

64 CASTROL. **Fich Técnica Castrol Magnatec 10W-30**. Disponível em: <<https://msdspdscastrol.com/>>. Acesso em: 11 de out de 2022.

65 SHELL. **Ficha Técnica Shell Helix HX8 Sintético 5W-30**. Disponível em: <<https://www.epc.shell.com/>>. Acesso em: 11 de out de 2022.

66 MATWEB. **MatWeb: Material Property Data**. 1990. Disponível em: <<https://www.matweb.com/>>. Acesso em: 09 de dez de 2022.