



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Matheus Hromatka

**Poliftalamida reforçada com fibra de vidro contendo politetrafluoretileno como
lubrificante sólido: uma análise mecânica e tribológica**

Florianópolis

2024

Matheus Hromatka

**Poliftalamida reforçada com fibra de vidro contendo politetrafluoretileno como
lubrificante sólido: uma análise mecânica e tribológica**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Diego Berti Salvaro, Dr.

Florianópolis

2024

Hromatka, Matheus

Poliftalamida reforçada com fibra de vidro contendo politetrafluoretileno como lubrificante sólido: uma análise mecânica e tribológica / Matheus Hromatka ; orientador, Diego Berti Salvaro, 2024.

99 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Tribologia. 3. Desgaste. 4. Compósitos autolubrificantes. 5. Contato e adesão. I. Salvaro, Diego Berti. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Matheus Hromatka

**Poliftalamida reforçada com fibra de vidro contendo politetrafluoretileno como
lubrificante sólido: uma análise mecânica e tribológica**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de
Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais

Florianópolis, 13 de junho de 2024.



Coordenação do Curso

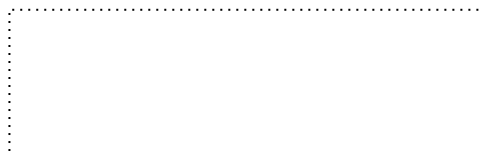
Banca examinadora



Orientador: Dr. Diego Berti Salvaro
UFSC – Dpt. Eng. Mecânica



Avaliador: Prof. Dr. Cristiano Binder
UFSC – Dpt. Eng. Mecânica



Avaliador: Prof. Dr. Eng. Guilherme Mariz de Oliveira Barra
UFSC – Dpt. Eng. Mecânica

Florianópolis, 2024.

Dedicado ao meu avô que veio a falecer
durante a execução deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Laboratório de Materiais da UFSC (LABMAT), ao Professore Dr. Cristiano Binder que em 2018 me convidou para participar das atividades do laboratório. Ao longo dos anos, o laboratório me proporcionou diversas oportunidade tanto profissionais quanto interpessoais.

Ao meu orientador Dr. Diego Berti Salvaro pela seu tempo dedicado, à liberdade e confiança frente ao planejamento e execução das atividades ao longo de todo o trabalho.

À minha família em especial aos meus pais Oscar Ricardo Hromatka Filho e Rosângela Aparecida Rossi Faggion Hromatka por todo o carinho, educação e oportunidades proporcionadas; constantemente moldando a pessoa que sou hoje.

À minha irmã Júlia Hromatka, minha eterna parceira, sempre presentes nos bons e maus momentos.

À minha tia Roseclair Rossi Faggion que nos últimos anos vem cumprindo o papel de minha segunda mãe.

Aos meus colegas Enzo Vanzuita Piazero e Guilherme de Barros Manzine, colegas tanto de curso quanto de trabalho e que me alegra poder chamá-los de amigos; que nossa amizade seja longa e duradoura.

A todos os meus colegas e amigos do laboratório pelos ensinamentos, oportunidades e pela manutenção de um ambiente de trabalho excepcional.

Finalmente, agradeço a todos que colaboraram de forma direta ou indireta para a conclusão desse trabalho, meu muitíssimo obrigado.

One cannot better oneself without enduring adversities for one is both the marble and the skilled sculptor, the raw ore and the masterful smith.

(Unknown)

RESUMO

A ciência e engenharia de materiais possui um papel fundamental no que diz respeito a sistemas mecânicos e sua eficiência energética. É uma ciência que permite o desenvolvimento de novos materiais e a forma como eles são processados; ela complementa o projeto de componentes por meio da utilização de materiais mais leves e mais resistentes, além da aplicação de tecnologias que promovem a redução do atrito e do desgaste de componentes mecânicos. Uma abordagem é por meio da aplicação de materiais poliméricos e compósitos como as poliftalamidas (PPA), também conhecidas como poliamidas de alto desempenho, as quais são comumente reforçadas com fibras. Essas fibras permitem a fabricação de componentes com boas propriedades químicas, térmicas e mecânicas. Este estudo investigou como a adição de politetrafluoretileno (PTFE) afetou o comportamento mecânico e tribológico de um compósito de matriz polimérica comercialmente disponível contendo 30% em massa de fibra de vidro (Kuraray Genestar® G1300A). Os compósitos contendo PTFE foram produzidos via moldagem por injeção com diferentes concentrações de PTFE (0-15% em massa). Para a caracterização mecânica as amostras foram tracionadas seguindo a norma ISO 527 e análises dinâmico mecânicas (DMA) permitiram compreender como a adição do lubrificante sólido variou a temperatura de transição vítrea (T_g) do compósito. Para avaliação tribológica, realizaram-se testes de movimento recíproco (2Hz) e força normal contante (189 N – pressão de contato inicial 630 MPa) na configuração esfera-plano por uma hora. O contracorpo utilizado nos testes tribológico foi uma esfera de aço AISI 52100 com 10 mm de diâmetro. As marcas de desgaste foram analisadas por interferometria de luz branca, perfilometria de contato, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS). Os volumes desgastados foram calculados através dos perfis das marcas obtidos por perfilometria. Como esperado, a introdução do PTFE promoveu uma redução nas propriedades mecânicas dos compósitos, uma vez que os estoques de lubrificante atuam como vazios e concentradores de tensão. A redução da tensão de ruptura dos compósitos foi de 7,9%, 8,5% e 14,8% para as condições contendo 2%, 5% e 15% de PTFE, respectivamente. Compósitos contendo PTFE apresentaram coeficientes de atrito significativamente mais baixos (entre 0,06 e 0,08) quando comparados ao compósito sem lubrificante sólido (0,31). Além disso, obteve-se uma melhora na resistência ao desgaste, pois as taxas de desgaste passaram de $5,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ (sem PTFE) para aproximadamente $1,0 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ para as condições contendo 2% e 5% de PTFE, mas aumentou para 15% de lubrificante ($2,3 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$). Portanto, um melhor desempenho tribológico é atingido pela adição do PTFE até 5%, mesmo com a redução das propriedades mecânicas dos compósitos. Tal desempenho está associado a formação de tribocamadas com baixa resistência ao cisalhamento na região de contato, como confirmado nas análises por EDS que indicaram a presença do flúor na interface de contato, elemento típico do lubrificante sólido. PTFE.

Palavras-chave: Tribologia; Desgaste; Compósitos autolubrificantes; Contato e adesão.

ABSTRACT

Materials science and engineering plays a pivotal role in the context of mechanical systems and their energy efficiency. This field facilitates the development of new materials and their processing methods, it complements component design with lighter and stronger materials, as well as with the application of technologies intended to reduce friction and wear of mechanical components. One approach involves the application of polymeric materials and their composites such as polyphthalamides (PPA), also known as high-performance polyamides, which are commonly reinforced with fibers. These fibers enable the production of components with favorable chemical, thermal, and mechanical properties. This study explored how the addition of polytetrafluoroethylene (PTFE) affected the mechanical and tribological behavior of a commercially available polymer matrix composite containing 30% by weight of glass fiber (Kuraray Genestar® G1300A). The composites containing PTFE were produced via injection molding with varying PTFE concentrations (0-15% by weight). For mechanical characterization, the samples tensile testing in accordance with ISO 527 was conducted, and dynamic mechanical analysis (DMA) was conducted to understand how the addition of the solid lubricant altered the glass transition temperature of the composite. For tribological evaluation, reciprocal motion tests (2 Hz) with a constant normal force (189 N – initial contact pressure of 630 MPa) were performed using a sphere-on-plane configuration for one hour. The counterbody used in the tribological tests was a 10 mm diameter AISI 52100 steel sphere. The wear marks were analyzed using white light interferometry, contact profilometry, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The worn volumes were calculated through the wear scar profiles obtained via profilometry. As expected, the introduction of PTFE resulted in a reduction of the mechanical properties of the composites, for lubricant reservoirs function as voids and promote stress concentration. This reduction in the composite's ultimate tensile strength was 7.9%, 8.5%, and 14.8% for conditions containing 2%, 5%, and 15% PTFE, respectively. Composites containing PTFE exhibited significantly lower friction coefficients (between 0.06 and 0.08) compared to the composite without solid lubricant (0.31). Furthermore, an improvement in wear resistance was observed, with wear rates decreasing from $5.6 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ (without PTFE) to approximately $1.0 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ for conditions containing 2% and 5% PTFE, although it increased for 15% lubricant ($2.3 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$). Therefore, better tribological performance is achieved by adding PTFE up to 5%, despite the reduction in the mechanical properties of the composites. This performance is associated with the formation of low shear strength tribolayers in the contact region, as confirmed by EDS analysis indicating the presence of fluorine at the contact interface, a characteristic element of the solid lubricant PTFE.

Keywords: Tribology; Wear; Self-lubricating composites; Contact and adhesion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Projeção de consumo energético dos anos de 1990 até 2040 em EJ: membros da OECD (verde), não membros (laranja) e mundo (preto).	19
Figura 2 - Esquemática de um substrato metálico e exemplos de contaminação superficial. .	22
Figura 3 - Seção transversal e componentes de uma superfície tipicamente metálica.	22
Figura 4 - Elementos que constituem a topografia de uma superfície.	23
Figura 5 - Esquemática de uma superfície real, daquela gerada pelo perfilômetro e as incertezas de medição associadas à técnica.	24
Figura 6 - À esquerda franjas resultantes da interação entre ondas e à direita pontos não mensurados devido a presença de poros no material.	25
Figura 7 - Perfil obtido por meio da perfilometria de contato (a), estabelecendo a linha média (b) e cálculo da rugosidade Ra (c).	26
Figura 8 - Espaço morfológico e como os parâmetros funcionais de assimetria e curtose permitem visualizar o comportamento da superfície.	28
Figura 9 - Área de contato aparente entre duas superfícies (a), área real em função da morfologia das superfícies (b) e contato entre asperidades (c).	29
Figura 10 - Forças atuantes num bloco que desliza sobre uma superfície e cálculo do coeficiente de atrito	30
Figura 11 - Contato entre asperidades (a), deformação plástica e solda a frio na região de contato (b) e transferência de material (c).	31
Figura 12 - Constituintes de um tribosistema.	32
Figura 13 - Exemplo de superfície 3D obtida por interferometria de luz branca e linhas de abrasão na superfície de um material.	34
Figura 14 - Curva de Stribeck: comportamento do coeficiente de atrito em regimes de lubrificação hidrodinâmica, mista e limite.	37
Figura 15 - Estrutura hexagonal do grafite, parâmetros de rede (a_0) e distâncias interplanares.	39
Figura 16 - Estruturas de repetição: a) grupo amida, b) poliamida 6 e c) da poliaramida.	41
Figura 17 - Estrutura do ácido isoftálico (a) e do ácido tereftálico (b).	42
Figura 18 - Monômero de PTFE (a) e estrutura do gás R-22 (b).	43

Figura 19 - Constituinte e fabricação de uma lâmina unidirecional.	46
Figura 20 - Confeção de um laminado no qual as lâminas apresentam uma orientação de 90° entre si.	47
Figura 21 - Esquemática de uma injetora e suas três principais seções.	48
Figura 22 - Classificações de materiais compósitos: Compósito laminado (a), partículas distribuídas ao longo do volume (b), fibras curtas ou partículas aciculares aleatoriamente distribuídas (c), fibras ou partículas aciculares com orientação preferencial (d).	49
Figura 23 - Esquemática do ensaio de <i>pull-out</i> de fibra e deformações sobre a fibra e matriz perante a solicitação mecânica.	53
Figura 24 - Misturador de múltiplos eixos utilizado na preparação do <i>feedstock</i>	58
Figura 25 Amostras injetadas para ensaios de tração segundo a norma ISO 527 (a) e geometria para ensaios dinâmico-mecânicos (b).	60
Figura 26 - Esquemática da configuração <i>dual-cantilever</i> utilizada para o ensaio de DMA. .	61
Figura 27 - Diagrama representativo dos ensaios tribológicos.	62
Figura 28 - Propriedades analisadas e rotas utilizadas para sua caracterização.	63
Figura 29 - Observação das fibras de vidro via microscopia óptica (a) e curva de distribuição de tamanho das fibras (b).	64
Figura 30 - Pellets do compósito original (a) e aqueles contendo 2 (b), 5 (c) e 15% (d) em massa de lubrificante sólido.	65
Figura 31 - Superfície do compósito sem lubrificante evidenciando seus defeitos (a) e típica superfície da condição contendo 2% de lubrificante.	66
Figura 32 - A esquerda imagem de elétrons retroespalhados e a direita a presença de flúor obtida por EDS para as condições contendo 2% (a), 5% (b) e 15% (c) em massa de PTFE. ..	67
Figura 33 - Disposição da amostra e fixação do extensômetro durante o ensaio de tração.	69
Figura 34 - Imagem de MEV de uma fratura do compósito 0PTFE onde se observa uma forte adesão da matriz polimérica na fibra de vidro.	71
Figura 35 - Módulos de armazenamento (E') para as condições contendo 2, 5 e 15PTFE. .	72
Figura 36 - Módulo de armazenamento e $\tan \delta$ a condição 2PTFE bem como as duas temperaturas de transição vítrea encontradas.	74
Figura 37 - Valores para S_k , S_{pk} e S_{vk} obtidos por interferometria de luz branca para as quatro condições.	76

Figura 38 - Espaço morfológico criado a partir da curtose e da assimetria para as quatro condições.	77
Figura 39 - Evolução das marcas de desgaste em relação ao percentual de lubrificante sólido.	78
Figura 40 - Sobreposição dos perfis de desgaste dos compósitos.	79
Figura 41 - Comportamento típico do coeficiente de atrito para os tribosistemas estudados. .	79
Figura 42 - Taxas de desgaste e coeficiente de atiro para os compósitos.	80
Figura 43 - Típica marca de desgaste para a condição sem lubrificante: imagens obtida por SE (a) e BSE (b), a seta em vermelho indica a direção do movimento.	81
Figura 44 - Marca de desgaste em BSE (a) e análise de EDS com presença de silício ao longo da região de contato (b).	81
Figura 45 - Típica marca de desgaste para as condições com PTFE: imagens obtida por SE (a) e BSE (b), a seta em vermelho indica a direção do movimento.	82
Figura 46 - Típica marca de desgaste para compósitos com PTFE: imagem em BSE (a) e análise de EDS com presença de flúor ao longo da região de contato (b).	82
Figura 47 - Debris típicos coletados das condições 0PTFE e 2PTFE e sua semelhança a um cavaco arrancado (a) e um particulado fino típico para as condições 5PTFE e 15PTFE.	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Eficiência da fase de reforço para alguns ângulos de orientação das fibras em relação a direção da tensão aplicada.	54
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas, térmicas e mecânicas do compósito selecionado.....	56
Tabela 2 – Propriedades do politetrafluoretileno.	57
Tabela 3 – Nomenclatura das amostras produzidas e fração mássica dos materiais utilizados.	57
Tabela 4 – Parâmetros de injeção testados.	59
Tabela 5 – Parâmetros utilizados nos ensaios tribológicos.	62
Tabela 6 – Densidades teóricas, experimentais e presença de vazios dos compósitos produzidos.	65
Tabela 7 – Comparativo entre valores experimentais e teóricos para o módulo elástico.....	70
Tabela 8 – Comparativo entre valores experimentais e teóricos para a tensão de ruptura.	70
Tabela 9 – Valores encontrados para a temperatura de transição vítrea por meio da Tan δ	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μ	Coeficiente de atrito
μ'	Coeficiente de adesão
BSE	Elétron retroespalhado
D	Distância percorrida
$E_{\square}$	Módulo elástico
E_c	Módulo elástico do compósito
EJ	Exajoule
$F_{\square}$	Força
F_{at}	Força de atrito
F_c	Força aplicada sobre o compósito
F_f	Força suportada pela fase de reforço
GFRP	Polímeros reforçados com fibras de vidro
hBN	Nitreto hexagonal de boro
IV	Índice de viscosidade
$K_{\square}$	Coeficiente de desgaste
$k_{\square}$	Taxa de desgaste específica
K_{Ic}	Tenacidade à fratura
L_a	Comprimento arbitrário de fibra
L_c	Comprimento crítico de fibra
M_c	Massa do compósito
M_f	Massa de fibra
m_f	Fração mássica de fibra
MFA	Microscopia de força atômica
M_m	Massa de matriz
m_m	Fração mássica de matriz
MoS2	Bissulfeto de molibdênio
M_p	Massa de partículas
m_p	Fração mássica de partículas
MTR	Moldagem por transferência de resina
N	Força normal
OECD	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
$\emptyset_f$	Diâmetro da fibra
PA	Poliamida
PAEK	Poliariletercetona
PIB	Produto interno bruto
PP	Polipropileno
PPA	Poliftalamida
PTFE	Politetrafluoretileno
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
R_a	Rugosidade média aritmética linear
R_{ku}	Curtose do perfil
R_p	Altura máxima de pico linear
R_q	Rugosidade média quadrática linear

R_{sk}	Parâmetro de assimetria do perfil
R_v	Profundidade máxima de vale em linha
R_z	Altura entre vale mais profundo e pico mais alto em linha
S_a	Rugosidade média aritmética em área
Se	Elétron secundário
S_{ku}	Curtose avaliada em área
S_p	Altura máxima de pico em área
S_q	Rugosidade média quadrática em área
S_{sk}	Parâmetro de assimetria da superfície
S_v	Profundidade máxima de vale em área
S_z	Altura entre vale mais profundo e pico mais alto em área
Tg	Temperatura de transição vítrea
TR	Tensão de ruptura
V_d	Volume desgastado
v_f	Fração volumétrica de fibra
v_m	Fração volumétrica de matriz
v_p	Fração volumétrica de partícula
v_v	Fração volumétrica de vazios
β	Eficiência do reforço
γ	Razão de cisalhamento na interface matriz-partícula
ε_m	Deformação do material
ε_c	Deformação do compósito
ε_{cu}	Deformação máxima do compósito
ε_f	Deformação da fibra
ε_m	Deformação da matriz
η	Viscosidade
λ	Eficiência do recobrimento da fase de reforço pela matriz
ρ_c	Densidade do compósito
ρ_{exp}	Densidade experimental
σ	Tensão sobre o material
σ_c	Tensão sobre o compósito
σ_{cu}	Tensão máxima suportada pelo compósito
σ_f	Tensão sobre as fibras
σ_{fu}	Tensão máxima suportada pela fibra
σ_m	Tensão sobre a matriz
σ_{mu}	Tensão máxima suportada pela matriz
τ_c	Tensão de cisalhamento sobre o compósito

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Média aritmética das alturas	26
(2) Integral em linha para o cálculo de R_a	27
(3) Integral em área para o cálculo de S_a	27
(4) Valor quadrático médio	27
(5) Valor R_q a partir da integral em linha de.....	27
(6) Taxa de desgaste específica	33
(7) Cálculo das frações mássicas de um compósito	51
(8) Cálculo das frações volumétricas de um compósito	51
(9) Densidade resultante do compósito	51
(10) Lei das misturas para o cálculo da densidade final do compósito	51
(11) Cálculo do volume de vazios a partir dos valores de densidade teórica e experimental	52
(12) Lei das misturas simplificada para o cálculo da tensão de ruptura do compósito	52
(13) Cálculo do módulo elástico a partir da lei das misturas.....	52
(14) Lei de Hook associando tensão, deformação e módulo elástico.....	52
(15) Tensão exercida sobre o compósito em função de uma deformação arbitrária	52
(16) Deformação do compósito frente a aplicação de uma tensão	52
(17) Relação entre esforços aplicados sobre o compósito e aqueles suportados pelas fibras ..	53
(18) Cálculo do comprimento crítico de fibra	53
(19) Tensão máxima de ruptura do compósito em função da eficiência da fase de reforço, razão de cisalhamento na interface partícula-matriz e eficiência do recobrimento da fase de reforço pela matriz	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	TRIBOLOGIA.....	20
2.1.1	Superfícies e suas componentes	21
2.1.2	Técnicas de caracterização da superfície.....	23
2.1.3	Parâmetros topográficos	25
2.1.4	Contato entre superfícies e atrito	29
2.1.5	Desgaste	31
2.1.5.1	<i>Desgaste abrasivo.....</i>	<i>33</i>
2.1.5.2	<i>Desgaste adesivo</i>	<i>34</i>
2.2	LUBRIFICANTES E REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO	36
2.2.1	Lubrificação fluida	36
2.2.2	Lubrificação sólida	38
2.3	POLÍMEROS DE ENGENHARIA	40
2.3.1	Poliamidas	40
2.3.1.1	<i>Poliftalamidas.....</i>	<i>42</i>
2.3.2	Politetrafluoretileno.....	43
2.4	MATERIAIS COMPÓSITOS	44
2.4.1	Definição e processamento	45
2.4.2	Micromecânica de materiais compósitos.....	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	MATRIZ, FIBRA E LUBRIFICANTE SÓLIDO	56
3.2	PRODUÇÃO DO COMPÓSITO AUTOLUBRIFICANTE	57
3.3	PARÂMETROS DE INJEÇÃO E PÓS-PROCESSAMENTO.....	58
3.4	CARACTERIZAÇÕES MECÂNICAS E TÉRMICAS.....	59
3.5	CARACTERIZAÇÃO DA TOPOGRAFIA E TRIBOLOGIA.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA METÉRIA PRIMA.....	64
4.2	PÓS-PROCESSAMENTO	65

4.2.1	Densidade e volume de vazios.....	65
4.2.2	Microestrutura do compósito	66
4.3	ANÁLISES DE COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	69
4.3.1	Ensaio de Tração	69
4.3.2	Análise dinâmico-mecânica (DMA)	72
4.4	TOPOGRAFIA	75
4.5	TRIBOLOGIA.....	78
5	CONCLUSÃO.....	84
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

Muito se discute sobre novas fontes de energia e a importância das consideradas alternativas frente a problemas ambientais e legislações cada vez mais rigorosas. Todavia, isso acaba por ofuscar soluções mais simples como a otimização de tecnologias já existentes. É notável que o conhecimento científico evolui de forma exponencial e é impulsionado por descobertas e avanços nas mais diversas áreas.

Recentemente, a área de materiais recebe cada vez mais destaque. Isso ocorre pois o desenvolvimento de novos materiais está intimamente ligado à produção, aplicação e otimização energética. Apesar de não ser possível eliminar por completo os poluentes, investimentos nesse setor apresentam grande potencial para sua redução. Por mínima que ela seja, dadas as proporções em que são geradas, permitiria mitigar danos não só ao meio ambiente, mas também à saúde daqueles expostos aos produtos da queima de combustíveis fósseis.

Um estudo da Universidade de Harvard em conjunto com a Universidade de Birmingham (VOHRA *et al.*, 2021) revela que a queima desses combustíveis, em especial diesel, petróleo e carvão mineral, são responsáveis por 10,2 milhões de mortes prematuras anualmente. Contudo, é importante lembrar que não basta, apenas, desenvolver novas fontes energéticas, é necessário compreender como elas são empregadas, para que a mesma quantidade de energia seja utilizada da forma mais otimizada possível. Ou seja, trabalha-se no ramo da eficiência.

Neste contexto, a tribologia – caracterizada pelo estudo de duas superfícies em contato e movimento relativo – ganha visibilidade e importância. Segundo Holmberg e Erdermir (2017), num trabalho que analisou o impacto do atrito e do desgaste no consumo energético global, concluiu-se que 23% de toda energia produzida se perde devido à baixa eficiência de sistemas mecânicos. Deste total, 83% são utilizados para superar o atrito entre partes móveis enquanto os outros 17% surgem em função do desgaste desses elementos. Os autores afirmam que com investimentos em novos materiais e lubrificantes; espera-se, a curto e longo prazo uma redução na perda energética de 18 e 40%, respectivamente. Isso reflete numa economia anual de 1,4% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial.

Uma das práticas empregadas para mitigar o efeito do atrito e do desgaste de sistemas mecânicos, é por meio da sua lubrificação. A mais conhecida e empregada é a lubrificação fluida - proveniente de óleos e graxas - a qual atua em quatro regimes distintos, como a lubrificação hidrodinâmica, elastohidrodinâmica, mista e limite (MIYOSHI, 1998a, 2007;

HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). A lubrificação fluida é caracterizada pela formação de uma película lubrificante entre as duas superfícies e evita, na maioria dos casos, que asperezas mais proeminentes das superfícies entrem em contato direto. Apesar disso, sua aplicação é limitada por uma série de fatores.

Em ambientes em que o lubrificante trabalha exposto à radiação, meios corrosivos, em extremos de temperatura e pressão, ou em que contaminantes sejam um problema; a lubrificação sólida, a qual é o foco do trabalho, é uma alternativa (MIYOSHI, 1998a). Lubrificantes sólidos são definidos como materiais que apresentam baixa resistência ao cisalhamento; sólidos lamelares como o grafite são frequentemente empregados, mas alguns metais dúcteis como o ouro também são utilizados. Nesse caso, a lubrificação surge por meio da aplicação de um filme fino desse material ou de camadas formadas entre a superfície de contato, porém é limitada à lubrificação limite. A introdução de uma segunda fase, com o intuito de melhorar as propriedades lubrificantes do material; dá origem a compósitos autolubrificantes a seco.

São três os grandes grupos de compósitos: os de matriz metálica, cerâmica e polimérica. Cada vez mais os polímeros ganham espaço frente à baixa densidade e elevadas propriedades mecânicas. Atualmente, são quatro os polímeros mais utilizados como matriz para materiais compósitos: o policloreto de vinila (PVC), o poliuretano (PU), o polipropileno (PP) e a poliamida (PA) (CONRAD, 2023). O desenvolvimento desses materiais apresenta uma série de vantagens, como a liberdade de design dos componentes, fácil processamento, baixo peso, elevadas propriedades mecânicas e tribológicas, dentre outras (AUTAY *et al.*, 2019; CONRAD, 2023).

Fatores que favorecem a utilização dos polímeros são a baixa densidade e estabilidade química. Porém, eles tendem a apresentar propriedades mecânicas muito inferiores quando comparados a materiais metálicos e cerâmicos. Devido a isso, a introdução de aditivos – particulados, fibras, lubrificantes – tornou-se uma prática comum. Esses materiais geralmente contêm de 20 a 50% em massa de reforço. No caso dos termoplásticos, a adição desses reforços não afeta, necessariamente, a rota de processamento (VINCENT *et al.*, 2005).

Estudos indicam que a substituição do ferro fundido e de aços tradicionais, por ligas a base de magnésio e compósitos de matriz polimérica, proporcionaria uma redução no peso total de automóveis em até 50%, enquanto para componentes de engenharia esse valor chega a 60%. Em termos práticos, isso representaria uma economia anual de 18,9 bilhões de litros de combustível, apenas no mercado estadunidense. Dentro deste cenário, compósitos de matriz polimérica conquistam cada vez mais espaço (ESTADOS UNIDOS, s.d.).

Este trabalho se origina de um projeto do Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMAT UFSC) com o programa de Mobilidade Verde e Inovação - MOVER FUNDEP. Este programa tem como principal objetivo impulsionar e modernizar a indústria nacional e ao mesmo tempo desenvolver tecnologias consideradas sustentáveis (MOVER FUNDEP). A necessidade aqui abordada foi a dificuldade de se aliar boas propriedades mecânicas a um bom desempenho tribológico, com foco nas problemáticas relacionadas a eficiência energética de sistemas mecânicos. Isso vai ao encontro de toda a experiência e pesquisa desenvolvidas pelo LABMAT UFSC, uma vez que ele - junto de outros centros da universidade - é considerado uma Unidade Embrapii, com foco em veículos e equipamentos para movimentação, conversão de energia, processos de fabricação e manufatura de materiais (BRASIL, s.d.).

1.1 OBJETIVOS

Dentro do contexto ilustrado, o presente trabalho objetivou avaliar os efeitos da adição do lubrificante sólido PTFE no desempenho tribológico e mecânico de um compósito de matriz polimérica formado por poliftalamida e fibra de vidro.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

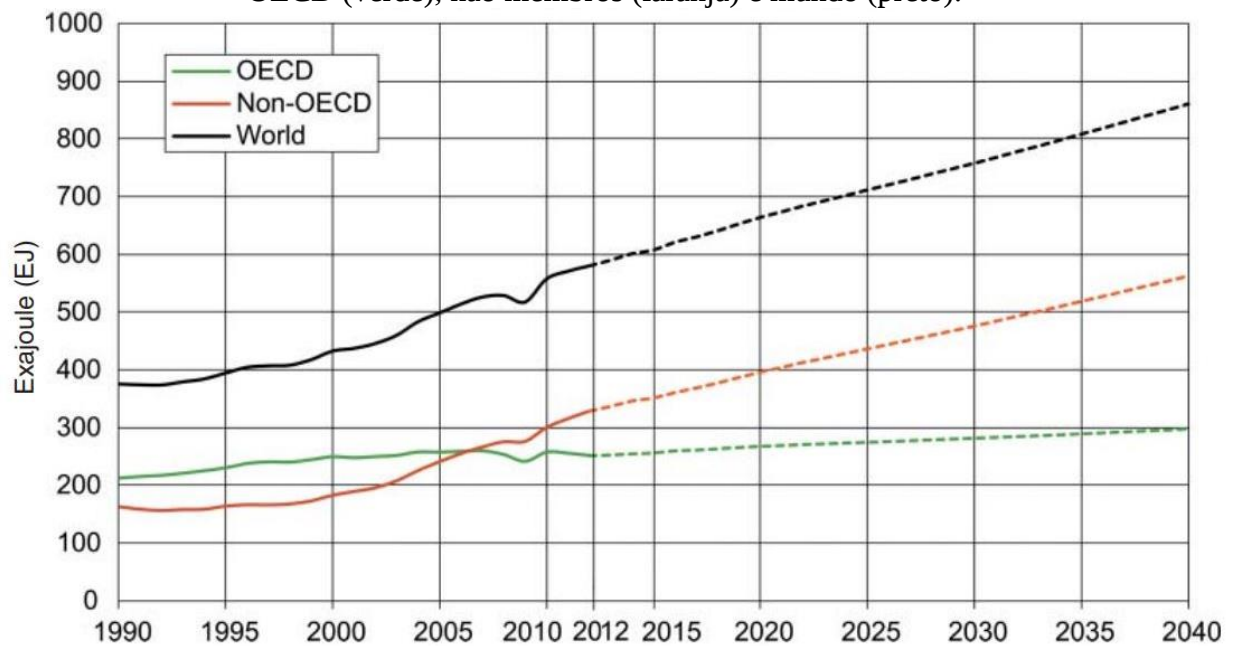
Já em relação aos objetivos específicos têm-se:

- Mensurar o efeito da adição de PTFE no módulo de elasticidade, tensão de ruptura e na temperatura de transição vítrea dos compósitos produzidos;
- Validar a Lei das Misturas como ferramenta analítica para o cálculo de propriedades de materiais compósitos, por meio da comparação com os valores obtidos experimentalmente para a densidade, tensão de ruptura e módulo de elasticidade;
- Medir o efeito da lubrificação sólida na taxa de desgaste específica e no atrito dos tribosistemas desenvolvidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um dos grandes desafios do século é desenvolver sistemas cada vez mais eficientes, com a finalidade de se mitigar os efeitos de uma crescente demanda energética. A Figura 1 é uma projeção da demanda global até 2040. Nela, observa-se um crescimento acentuado no consumo em países não filiados à Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD). Além disso, o consumo global passará dos 579 exajoules (EJ) registrados em 2012 para 860 EJ em 2040, um aumento de 48% (SCHEFFRAN, 2020). Para efeito de comparação, 1 EJ é equivalente ao consumo energético anual de 42 milhões de europeus (RITCHIE, 2020).

Figura 1 - Projeção de consumo energético dos anos de 1990 até 2040 em EJ: membros da OECD (verde), não membros (laranja) e mundo (preto).



Fonte: (SCHEFFRAN, 2020).

Outro ponto relevante é que são raros os mecanismos que não possuam partes móveis, sejam eles mecânicos ou até mesmo os biológicos - juntas e articulações (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Reconhece-se, também, a limitação de materiais tradicionais frente às novas aplicações, o que incentiva a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais. Assim, movido por necessidades tecnológicas, sociais e ambientais em busca de um futuro mais sustentável, cabe à comunidade científica desenvolver aspectos como (CZICHOS *et al.*, 1995):

- Performance e confiabilidade de sistemas de engenharia;
- Maior durabilidade de componentes;
- Sistemas mais energeticamente eficientes;
- Componentes de baixo peso e elevadas propriedades mecânicas.

E, surpreendentemente, a tribologia está diretamente ligada à quase todos estes aspectos. Mas, antes de tudo, é preciso definir o que é tribologia, sua função, área de estudo e importância.

2.1 TRIBOLOGIA

Há muito tempo, mesmo que de forma inconsciente, o ser humano vem utilizando conceitos que envolvem a tribologia. Da pré-história com a produção de fogo por meio do atrito gerado ao se esfregar dois pedaços de madeira, ou da fabricação de ferramentas rudimentares a partir de pedras e ossos afiados (ZUM GAHR, 1987), a componentes de engenharia nos dias atuais. Entretanto, foi apenas em 1966 que o termo “tribologia” foi cunhado quando Hans Peter Israel Jost publicou um relatório a respeito do impacto da tribologia na economia do Reino Unido.

Esse termo tem sua origem do grego – τριβος (*tribos*) - que significa esfregar ou atritar. Jost definiu tribologia como uma ciência multidisciplinar, cujo foco de estudo é a interação entre superfícies em contato e movimento relativo; com cerne em três principais aspectos: atrito, desgaste e lubrificação.

A primeira revolução industrial por volta de 1800, impulsionou de forma considerável a automação de processos e aumento das taxas de produção. Nesse contexto, falhas mecânicas e, conseqüentemente, paradas para manutenção tornam-se cada vez mais caras. Dentre as principais causas dessas falhas tem-se a corrosão e o desgaste que, a fim de mitigá-los, levaram aos fundamentos daquilo que se estuda na tribologia e, eventualmente, foram reconhecidos como critérios essenciais no design de engenharia e de grande importância para a indústria (JOST, 1976; BHUSHAN, 2013).

2.1.1 Superfícies e suas componentes

Como estipulado por Jost, a tribologia tem como foco o estudo de superfícies em contato e movimento relativo. Dessa forma, faz-se necessário compreender o que se entende como superfície, com o intuito de se aprofundar nesta temática. Por definição, uma superfície é a região de interface ou descontinuidade de um material para outro. Restringe-se, na maioria das vezes, às primeiras camadas atômicas; entretanto, essa definição pode sofrer variações em função da aplicação (MIYOSHI, 1998b).

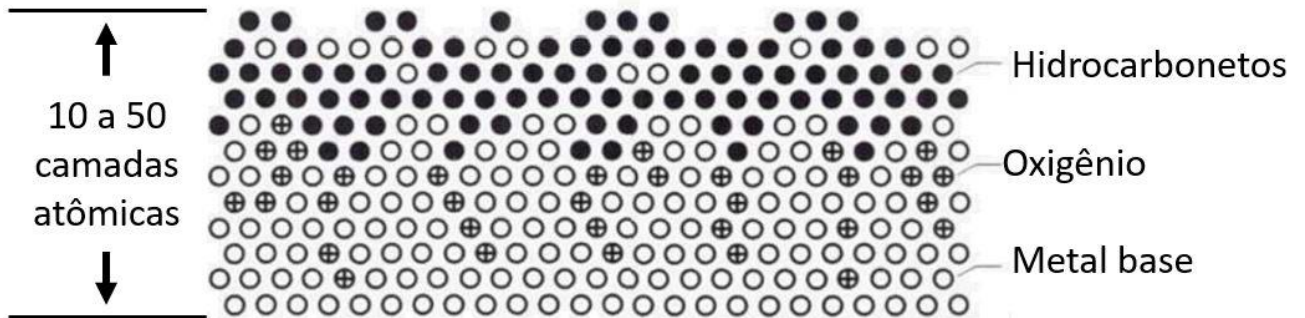
De forma geral, assume-se que átomos próximos à superfície possuam ligações incompletas quando comparados a aqueles do substrato. Aliado a isso, processos de fabricação modificam a superfície do material; geralmente por meio da introdução de defeitos, como a deformação plástica. A combinação desses dois fatores contribui para a alteração de alguns aspectos dessas superfícies como energia e tensão superficial, reatividade química, oxidação, adesão, corrosão, lubrificação, desgaste e atrito (MIYOSHI, 1998b; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Diversos são os elementos que compõe uma superfície, como por exemplo o material base (também denominado substrato), a camada afetada, uma camada de reação e, finalmente, uma camada de contaminantes (BHUSHAN 2013; MIYOSHI, 1998b; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009; POLITIS, 2021;). As Figuras 2 e 3 esquematizam às componentes do que se costuma denominar superfície.

- Substrato: é composto pelo material base e sua estrutura depende de fatores como composição química e rota de processamento;
- Camada afetada/ trabalhada: é a região do material que, em função do processo de manufatura, sofreu algum tipo de esforço mecânico, térmico ou químico. Isso promove tanto a deformação plástica ou microestrutural dessa camada. É de difícil remoção, geralmente objetiva-se mitigar sua extensão (1 -100 μm);
- Camada de reação: mais comumente encontrada em materiais metálicos, surge a partir da reação da camada alterada com o ambiente – na maioria das vezes contendo oxigênio. É muito mais dura que a camada alterada e representa um fator importante para aspectos como lubrificação, atrito e desgaste (10 – 100 nm);

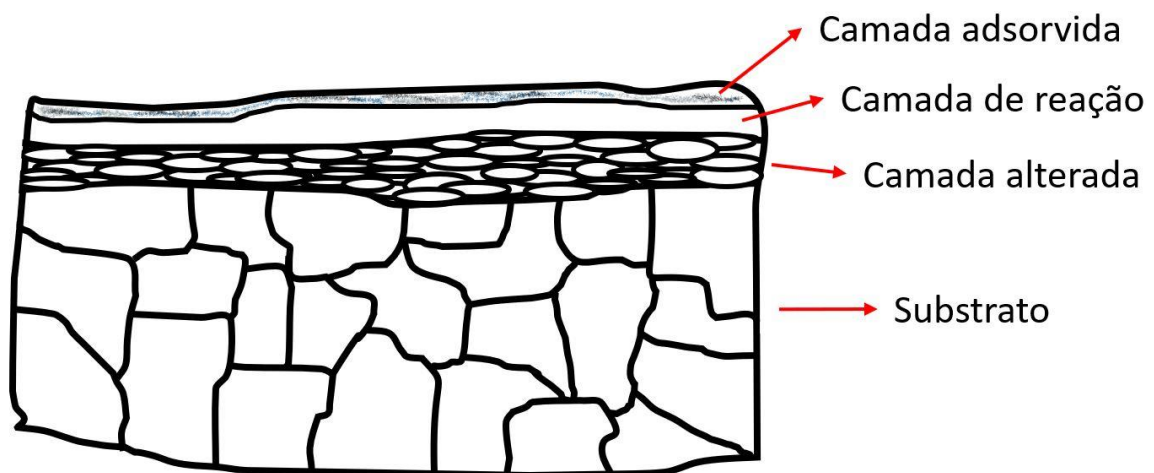
- Camada de contaminantes: elementos provenientes do ambiente bem como do processo de manufatura adsorvidos pelo material. Geralmente composta por óleos e graxas, vapor de água, poeira e outros gases (0,3 – 3 nm).

Figura 2 – Esquemática de um substrato metálico e exemplos de contaminação superficial.



Fonte: Adaptado de (MIYOSHI, 1998b).

Figura 3 – Seção transversal e componentes de uma superfície tipicamente metálica.



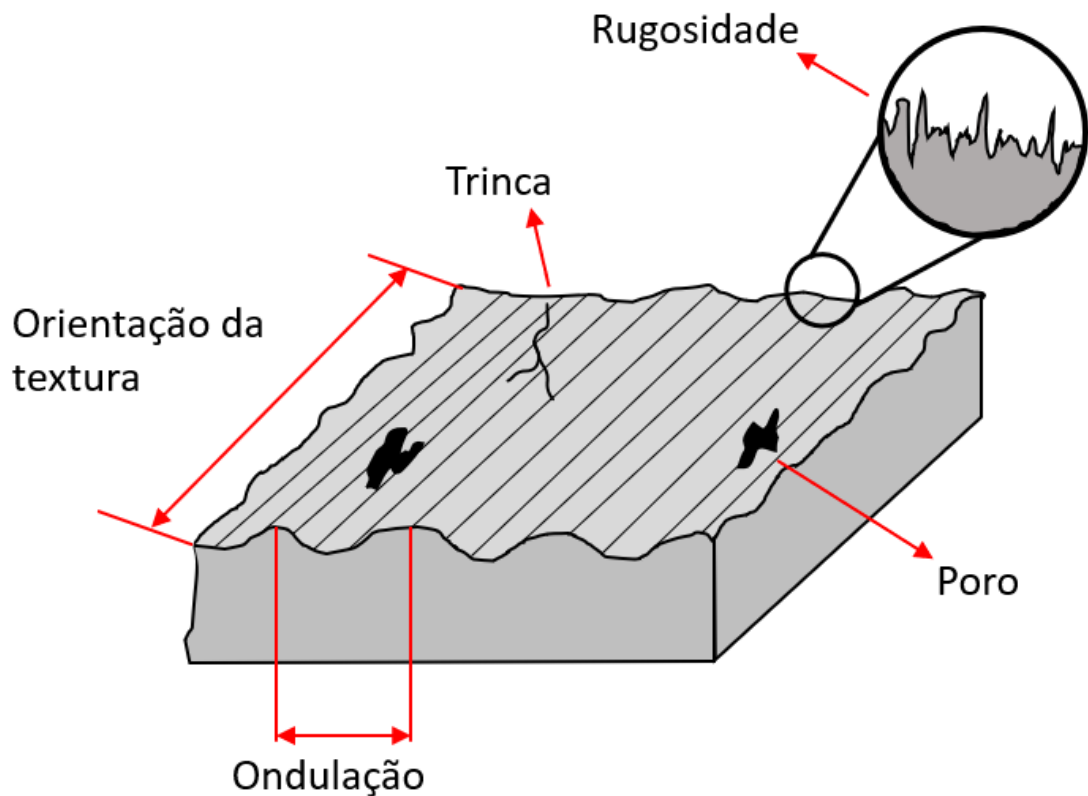
Fonte: Adaptado de (MIYOSHI, 1998b).

Superfícies, além de apresentarem diversidade em sua composição, estão longe daquilo considerado “liso”. Elas são formadas por várias irregularidades (ZUM GAHR, 1987) - como picos e vales (comumente denominadas de asperidades) e a forma como estão distribuídas pela superfície é de grande interesse para a tribologia. O estudo da morfologia da superfície, também denominada topografia, analisa os diversos elementos como defeitos, orientação, ondulação e rugosidade. Ela é expressa por um conjunto de dados que contém as coordenadas 2D ou 3D daquilo que a constitui.

A Figura 4 ilustra aquilo encontrado nestas coordenadas: defeitos, caracterizados por trincas, poros, inclusões e riscos superficiais, ou seja, descontinuidades na topografia; a

orientação da textura superficial – consequência da rota de fabricação -, geralmente visível a olho nu e pode ser paralela, circular, aleatória, hachurada, entre outros. A rugosidade diz respeito a pequenas irregularidades, suas alturas, larguras e espaçamento ao longo da superfície, trabalha-se em pequenas escalas (μm e nm). Finalmente, a ondulação – também chamada de macro rugosidade - expressa o quão longe de um plano perfeito a superfície se encontra. Ela contempla os defeitos em escalas maiores do que a rugosidade e é medida em função da distância das cristas ou vales dessas ondas. Ondulações com dimensões muito grandes também são denominadas de erro de forma. (KALPAKIJAN; SCHIMD, 2009; BHUSHAN, 2013).

Figura 4 – Elementos que constituem a topografia de uma superfície.



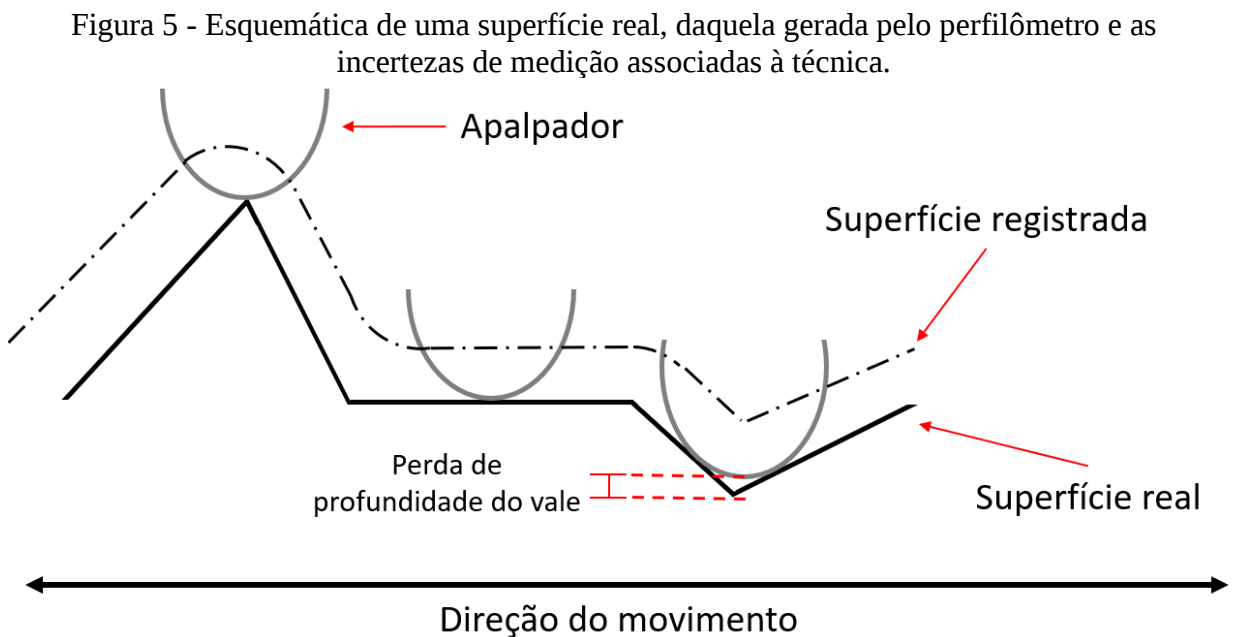
Fonte: Adaptado de (BHUSHAN, 2013).

2.1.2 Técnicas de caracterização da superfície

Múltiplas são as técnicas disponíveis para caracterizar superfícies e elas são divididas em dois grupos: técnicas nas quais a medição é feita pelo contato físico entre a superfície e o equipamento. E técnicas que usam recursos como elétrons, fótons, raios X, entre outros (MIYOSHI, 1998b). Muitas delas permitem a análise da superfície, de filmes finos depositados sobre elas e do próprio substrato.

Uma das mais utilizadas – para caracterizar a topografia - é a perfilometria de contato (KALPAKIJAN; SCHIMD, 2009; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Nela uma espécie de agulha, denominado de apalpador, percorre a superfície numa única direção. O equipamento avalia a variação no eixo vertical desse apalpador além de registrar os pontos de maneira individual e sequencial.

Apesar disso, visto que esta técnica depende do contato do equipamento com a superfície, ela é limitada ao tamanho do apalpador. A maioria deles são de diamante, no formato cônico ou piramidal e contam com raios de 1 a 2,5 μm (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Isso faz com que o apalpador seja incapaz de medir geometrias com resoluções muito pequenas e o equipamento tende a arredondar picos e reduzir a profundidade de vales, conforme ilustrado na Figura 5.

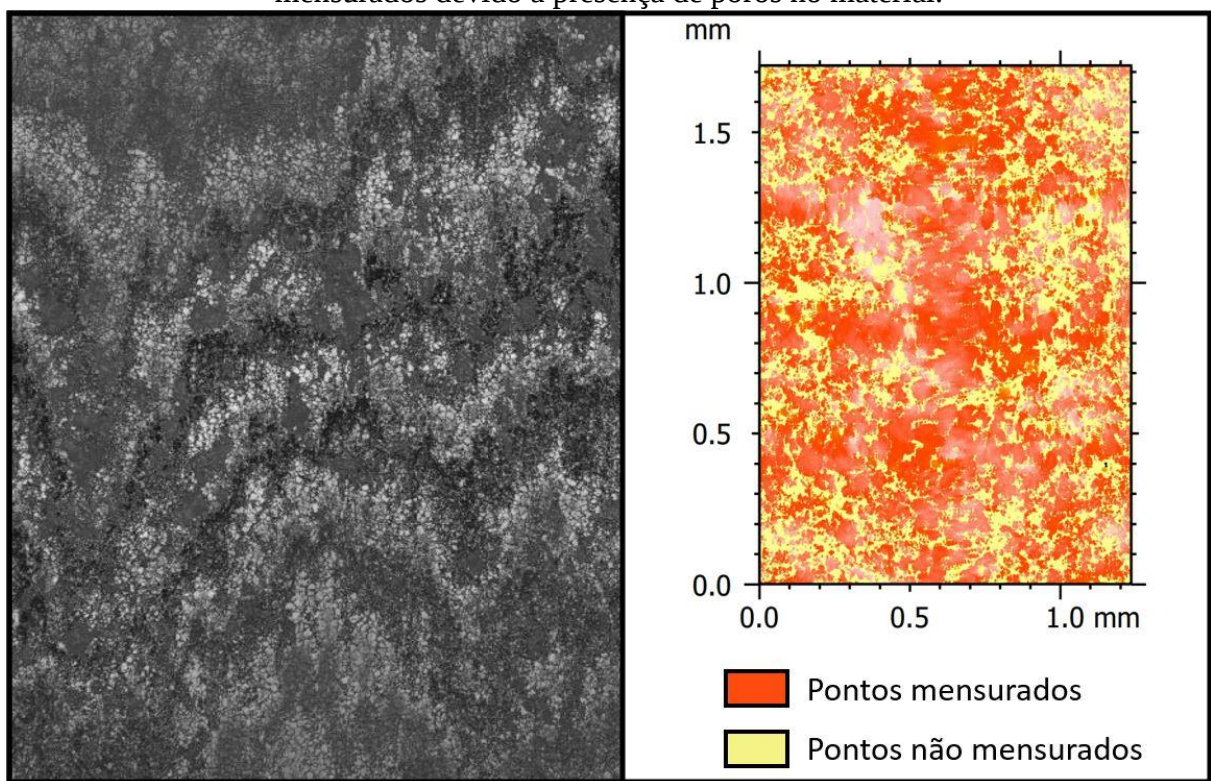


Fonte: Adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Enquanto a perfilometria de contato opera apenas em duas dimensões – em linha, técnicas como a interferometria óptica geram imagens 3D da superfície, ou seja, trabalham em cima de uma determinada área. Uma das mais difundidas é a interferometria de luz branca, fundamentada no princípio da superposição de ondas eletromagnéticas. De maneira simplificada, por meio dessa sobreposição, o equipamento compara a luz refletida pelo material com uma superfície considerada perfeitamente plana. A partir disso, ele é capaz de mensurar diversos parâmetros topográficos (LEITH; SWANSON, 1980; GADELMAWLA *et al.*, 2002).

Deve-se atentar a algumas limitações e detalhes dessa técnica como a presença de pontos não mensurados. Pelo simples motivo dela empregar a luz branca, materiais que a absorvam – grafite - ou que a difratem acabam por dificultar sua captação pelo equipamento, como é o caso de poros e isso faz com que o equipamento os interprete como vazios. Na Figura 6 (a), tem-se um exemplo de franjas presentes na medição da topografia e a Figura 6 (b) contempla a superfície obtida com pontos não medidos, o que pode afetar o cálculo dos parâmetros topográficos.

Figura 6 – À esquerda franjas resultantes da interação entre ondas e à direita pontos não mensurados devido a presença de poros no material.



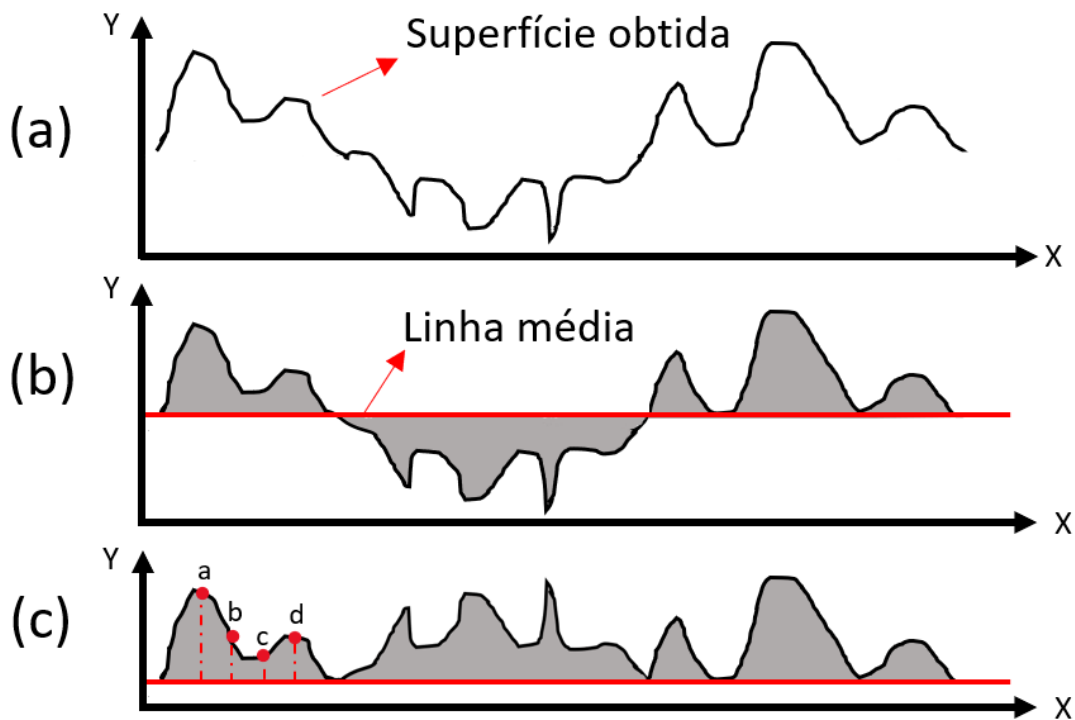
Fonte: Autoria própria.

2.1.3 Parâmetros topográficos

Inúmeros são os parâmetros existentes para caracterizar superfícies e eles são classificados em: parâmetros lineares (2D), obtidos pela perfilometria, por exemplo e são expressos pela letra “R” maiúscula seguida de um subíndice que referência o parâmetro mensurado. E os de área ou superfície (3D), representados por um “S” também seguido do mesmo subíndice.

O parâmetro mais utilizado é o de rugosidade média da superfície (S_a e R_a), definido pela média aritmética das alturas absolutas a partir de uma linha média. Esta linha estabelecida de tal forma que a área acima dela é igual a área abaixo em relação ao perfil. A Figura 7 exemplifica o processo utilizado por softwares para calcular o valor da rugosidade média.

Figura 7 – Perfil obtido por meio da perfilometria de contato (a), estabelecendo a linha média (b) e cálculo da rugosidade R_a (c).



Fonte: Autoria própria.

A eq. 1 aborda, de forma simplificada, como calcular a rugosidade média (R_a) a partir do exemplo dado na Figura 7, onde tem-se o valor absoluto das diversas alturas dividido pelo número de pontos mensurados.

$$R_a = \frac{a + b + c + d + \dots}{n} \quad (1)$$

Na prática, integra-se em linha (eq. 2) ou a área (eq. 3) da função que descreve a superfície. Onde L representa o comprimento da amostragem e $|y(x)|$ o módulo da função da superfície de forma linear. Equivalentemente, o mesmo ocorre para o cálculo de S_a , a diferença é que, agora, trata-se de uma área - indica por A - e $|z(x, y)|$ que é o módulo da função da superfície analisada.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_L^{\square} |y(x)| dx \quad (2)$$

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A^{\square} |z(x, y)| dx dy \quad (3)$$

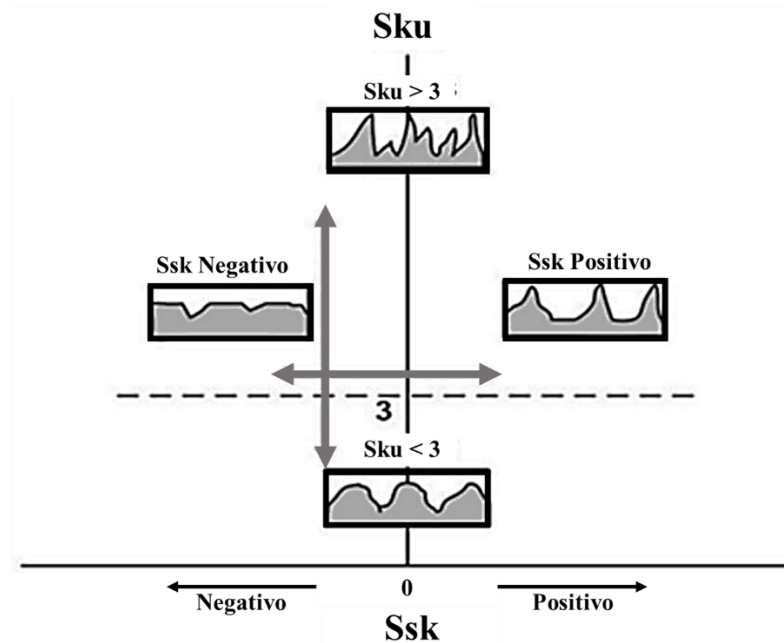
O Rq (ou Sq) também é um parâmetro que diz respeito à rugosidade da superfície, entretanto é expresso pela raiz do valor quadrático médio como expresso nas eq. 4 e 5. Utiliza-se deste recurso pois é mais sensível a valores que se destoam de forma acentuada da linha média - picos muito altos ou vales muito profundos. Uma das desvantagens é que tais parâmetros não discriminam entre picos e vales; muito menos descrevem como estes elementos estão distribuídos (BA *et al.*, 2019). Ou seja, é possível que duas superfícies com morfologias distintas apresentem os mesmos valores de rugosidade.

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}{n}} \quad (4)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_L^{\square} [y(x)]^2 dx} \quad (5)$$

Em função disso, surgem critérios como o de assimetria (Rsk e Ssk), a partir dos quais é possível determinar a distribuição das alturas. Uma presença igual de vales e picos resulta em uma assimetria igual a zero; a predominância de vales resulta numa assimetria negativa, enquanto isso, o predomínio de picos reflete numa assimetria positiva. Junto dele, emprega-se a curtose (Rku e Sku), que para valores acima de 3 acusa a presença de picos protuberantes ou vales muito profundos; o oposto é válido para valores abaixo de 3. Esses parâmetros são interessantes, pois com eles constrói-se o espaço morfológico da superfície. Ele é uma representação gráfica da morfologia de superfície (Figura 8) e como ela pode evoluir dado algum processo, como o de usinagem. (GADELMAWLA *et al.*, 2002; BA *et al.*, 2019, EBERSBACH *et al.*, 2023).

Figura 8 – Espaço morfológico e como os parâmetros funcionais de assimetria e curtose permitem visualizar o comportamento da superfície.



Fonte: Adaptado de (BENDO *et al.*, 2020).

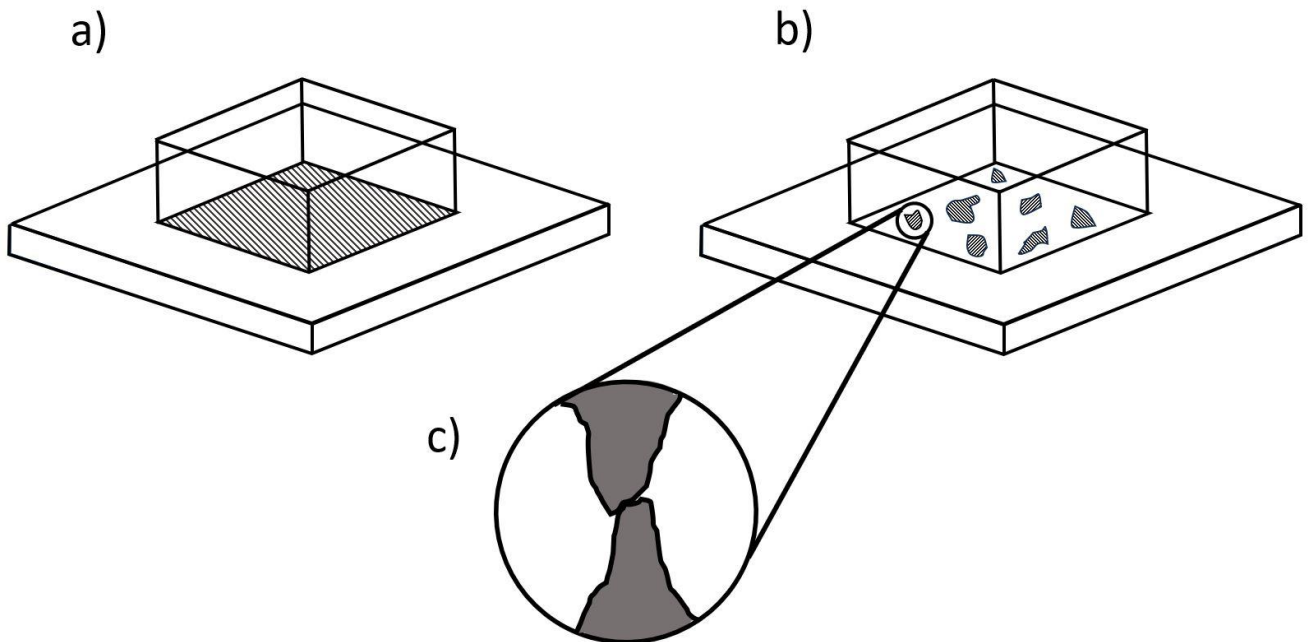
Outros parâmetros frequentemente utilizados são o R_z e S_z que indicam a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos; a altura do pico mais alto (R_p e S_p) acima da linha média; assim como a profundidade do maior vale (R_v e S_v). Finalmente, um parâmetro dito funcional é a altura do núcleo da superfície (S_k), definido como a diferença entre a máxima e mínima altura da superfície, desconsiderando os picos e vales mais proeminentes. Junto dele, calcula-se a altura média dos picos acima do núcleo da superfície (S_{pk}). Essa altura geralmente corresponde às asperidades do material que mais se destoam da altura do núcleo e são nessas regiões que se estabelecem os primeiros contatos durante o início do movimento. A profundidade dos vales abaixo do núcleo (S_{vk}) está relacionado a profundidade dos vales capazes de acomodar eventuais lubrificantes - sólidos e líquidos – e debris. (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Essas informações são de grande relevância para compreender como será o comportamento dessas superfícies iniciado o contato tribológico, o atrito entre elas e, eventualmente, a evolução do desgaste.

2.1.4 Contato entre superfícies e atrito

Apesar de certas superfícies serem visualmente lisas, em escalas microscópicas a realidade é bem diferente. Asperidades representam os pontos nos quais duas superfícies realmente se tocam. A partir desse preceito, surgem dois termos abordados na Figura 9: a área aparente, definida pela própria geometria do componente e a área real, designada como a soma da área das inúmeras asperidades em contato. Elas são as responsáveis por suportar a carga do conjunto e gerar o atrito entre as superfícies em movimento relativo (FERRANTE, 1987; ZUM GAHR; 1987; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Figura 9 – Área de contato aparente entre duas superfícies (a), área real em função da morfologia das superfícies (b) e contato entre asperidades (c).



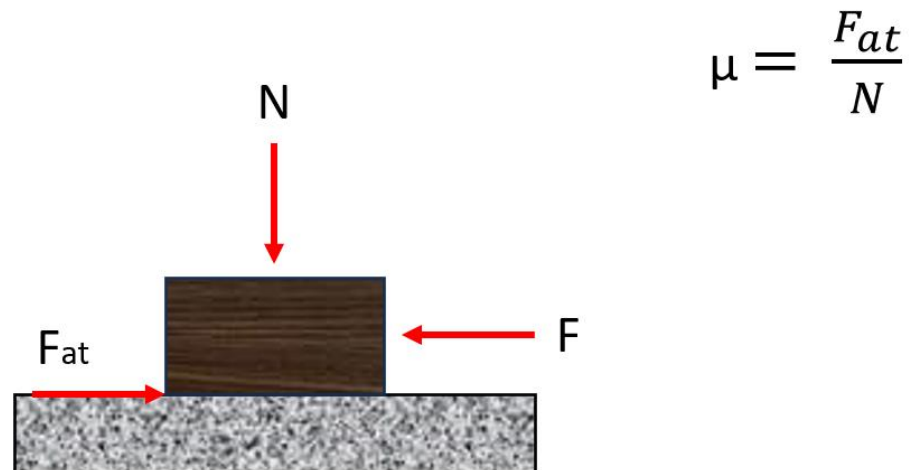
Fonte: Adaptado de (ZUM GAHR; 1987).

Ao se identificar como ocorrerá o contato entre as partes de um conjunto e quais os mecanismos envolvidos, é possível projetar sistemas mecânicos mais eficientes. Um exemplo disso é o atrito entre as partes móveis de um automóvel. Estudos sugerem que anualmente um automóvel perde 340 litros de combustível para essas interações. Isso representou um consumo de 208 milhões de litros de gasolina apenas em 2009 (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2011).

O atrito em questão é conhecido como uma força que surge em resistência ao movimento relativo entre superfícies em contato. A Figura 10 ilustra a Força F tangencial necessária para mover um bloco de madeira sobre uma superfície de granito. Sobre o bloco,

uma Força Normal (N) é aplicada, a qual é proveniente do próprio peso do bloco ou de agentes externos. A razão entre a Força de Atrito (F_{at}) e a Força Normal aplicada resulta no coeficiente de atrito do sistema, indicado por μ .

Figura 10 – Forças atuantes num bloco que desliza sobre uma superfície e cálculo do coeficiente de atrito

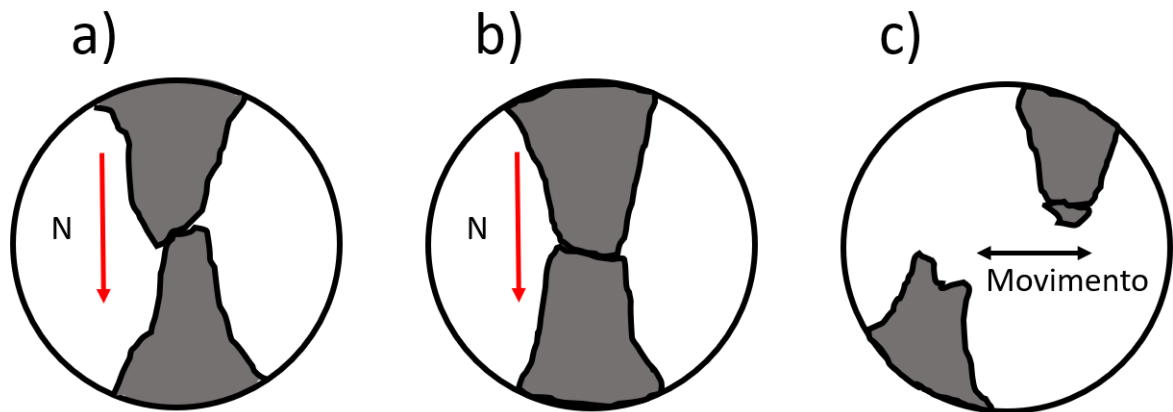


Fonte: Autoria própria

Junto do coeficiente de atrito, algumas foram as leis associadas à força de atrito. Hutchings e Shipway (2017) mencionam que a F_{at} é proporcional à força normal do sistema. Por meio da equação presente na Figura 9, conclui-se que μ depende diretamente da Normal. Eles também abordam o fato de a F_{at} ser independente da área aparente e da velocidade de deslizamento das superfícies. A força de atrito, na verdade, é descrita como a soma de duas componentes distintas: a força de adesão entre as asperidades em função da interação atômica e energia de superfície e uma componente a partir da deformação plástica delas (MIYAKE, 2000; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Ao entrarem em contato, certas regiões se unem, por meio de uma solda fria. Entretanto, a força referente ao movimento do sistema é superior à de ligação entre as duas asperidades. Assim, a eventual fratura ocorre na interface entre elas ou o material com menor resistência mecânica cede. Parte dele permanece aderido à asperidade e passa a fazer parte dela; o que caracteriza a transferência de matéria e alteração da topografia original (ZUM GHAR, 1987; KALPAKJIAN, 2009). A Figura 11 representa uma situação de contato entre duas asperidades de superfícies distintas e como a aplicação de uma força normal (N), aliada às forças de adesão e deformação plástica são capazes de alterar topografia de um sistema.

Figura 11 – Contato entre asperidades (a), deformação plástica e solda a frio na região de contato (b) e transferência de material (c).



Fonte: Autoria própria.

2.1.5 Desgaste

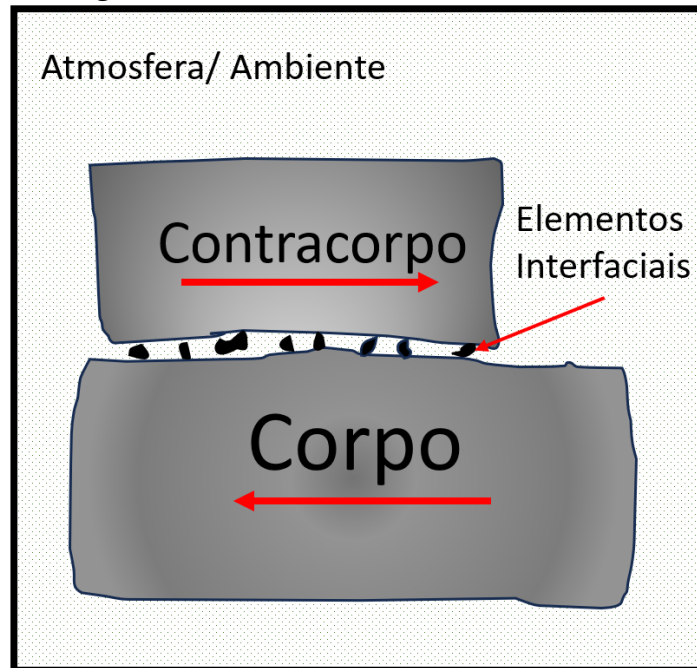
O desgaste é um processo comum ao cotidiano de todos e está presente nas mais simples ações, como o ato de escrever com um lápis numa folha ou com um giz no quadro-negro. Mais do que isso, ele possui um papel importante do ponto de vista econômico e de engenharia, uma vez que ele altera o dimensional de diversos componentes. Eventualmente, matrizes de estampagem, moldes de injeção, bielas, pistões, engrenagens, entre outros, desgastam e passam a apresentar folgas, por exemplo. Muitas vezes, alguns processos são capazes de recuperar a função destes componentes como afiar uma faca que perdeu seu fio, mas nem sempre isso é uma possibilidade.

Em função disso, o desgaste é definido como uma perda sistemática de material frente a aplicação de esforços mecânicos, reações química ou uma combinação de ambos e que raramente atuam de forma independente uns dos outros (ZUM GAHR, 1987). Em outras palavras, é um processo de perda de volume localizado de uma superfície que resulta na alteração das dimensões locais (MATTHEWS; FRANKLIN; HOLMBERG, 2007). Todavia, a fim de compreender o comportamento do atrito e do desgaste, faz-se necessário delimitar a região de análise. Mais especificamente, precisa-se definir o sistema que se estudará, eis o caráter sistêmico da tribologia.

Zum Gahr (1987) descreve o sistema, neste caso, o tribosistema, como a combinação de quatro importantes fatores, conforme a Figura 12. O corpo ou superfície em questão, o corpo que atrita contra ela – denominado de contra-corpo – o qual é sólido, líquido, gasoso ou uma

mistura deles. Além disso há a presença de elementos interfaciais como possíveis lubrificantes, sujeira, fluidos e, por fim, o ambiente em que a análise ocorre.

Figura 12 – Constituintes de um tribosistema.



Fonte: Adaptado de (ZUM GAHR; 1987).

A combinação de materiais, variáveis do ambiente (temperatura, atmosfera, partículas, entre outros) e elementos interfaciais, resultam em sistemas específicos e que sofrem influência do atrito e do desgaste ao longo do tempo. Esses regem questões como efeito térmico (proveniente do atrito), possíveis reações químicas e a eventual deformação da topografia original. Assim, só é possível comparar resultados em sistemas semelhantes.

A partir do contato e movimento relativo entre duas superfícies, o desgaste é computado em três principais escalas: nano, micro e macroscopicamente. Em função das tecnologias disponíveis para análises em nanoescala – microscopia de força atômica (MFA) – este é um segmento que apresenta grande potencial de descoberta para a tribologia (MATTHEWS; FRANKLIN; HOLMBERG, 2007). Em contrapartida, muito se conhece de mecanismos e caracterizações para as outras duas escalas.

Como visto anteriormente, uma das maneiras mais utilizadas para se identificar o desgaste é por meio da modificação da topografia original. Outras mudanças também incluem alteração na microestrutura da superfície desgastada, seja por meio da deformação plástica, variações de temperatura em função do atrito e dissipação de calor. Além disso, é provável o surgimento de partículas de desgaste entre as regiões de contato, também denominadas de

debris (BHUSHAN, 2000; STACHOWIAK, 2006; MATTHEWS; FRANKLIN; HOLMBERG, 2007).

Do mesmo modo que é se quantifica o coeficiente de atrito de um par ou sistema tribológico, alguns são os valores obtidos para o desgaste. Dentre eles o coeficiente de desgaste (K) e, mais utilizado ainda, a taxa de desgaste específico (k) (STACHOWIAK, 2006; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017) – eq. 6. Essa taxa é expressa como a razão entre o volume desgastado (V_d) pelo produto entre carga normal aplicada (N) e distância percorrida (D); com unidades expressas frequentemente expressas em $\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$.

$$k = \frac{V_d}{N \cdot D} \quad (6)$$

2.1.5.1 Desgaste abrasivo

Existe uma gama de mecanismos de desgaste (ZUM GHAR, 1987). Contudo, neste trabalho, foca-se em dois considerados predominantes nos tribosistemas estudados. Um deles é o desgaste abrasivo, que é muito presente em sistemas que englobam corpos e contra corpos cerâmicos ou metálicos. Segundo Davis (2001), os custos relacionados ao desgaste abrasivo variam de 1 a 4% do PIB de um país.

Ele é resultado do deslizamento de protuberâncias ou partículas de maior dureza ao longo da superfície. Neste tipo de desgaste, é comum que se observe linhas paralelas – vales – no sentido do movimento. Em materiais dúcteis, é comum que ocorra o endurecimento do corpo, contra corpo ou ambos, por meio da encruamento, transições de fase ou deposição de particulados na interface que sofrem os mesmos mecanismos de endurecimento (BHUSAN, 2000; DAVIS, 2001).

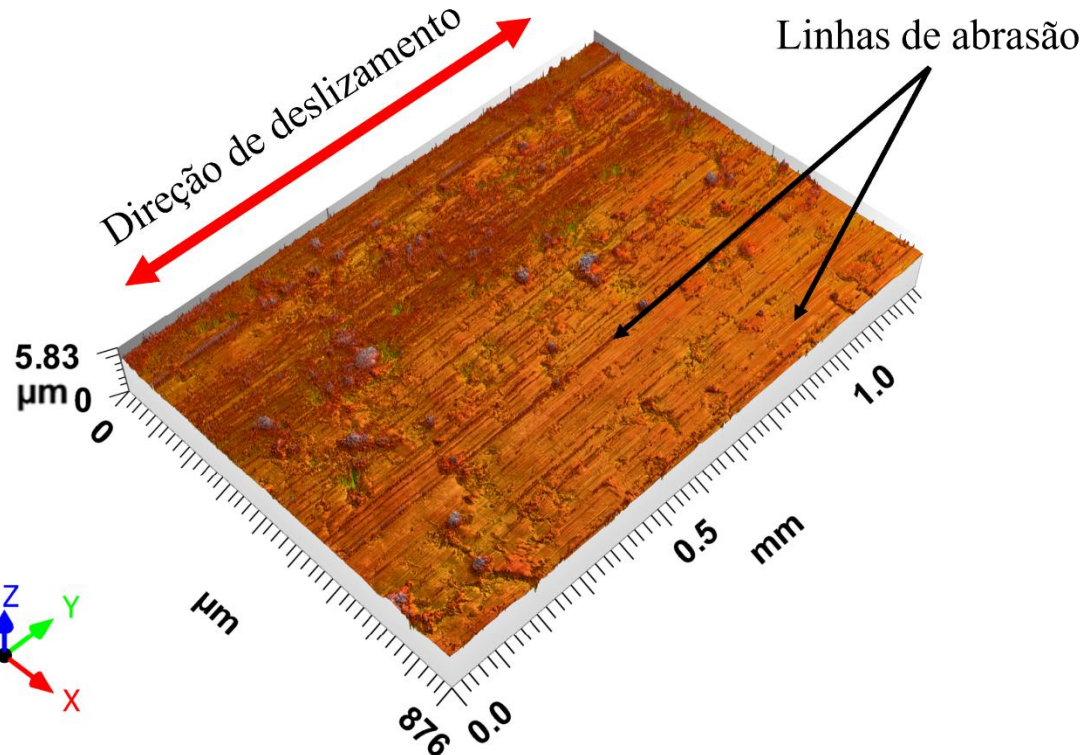
Isso faz com que a abrasão se classifique em dois grupos: abrasão de dois corpos onde as asperidades, na maioria das vezes, são as responsáveis pelo desgaste; e o de 3 corpos no qual o elemento abrasivo está na interface de contato, como visto da Figura 12. (ZUM GAHR; 1987).

Uma maneira simples de imaginar tal processo é visualizando um arado que lavra o solo. Asperidades e partículas esculpem a nova superfície de contato o que dá origem às linhas de abrasão ilustradas na Figura 13. Isso ocorre por meio do micro sulcamento, micro usinagem, fadiga ou micro trincamento da superfície. Para materiais dúcteis, a formação de sulcos e o micro corte são mais evidentes, enquanto materiais frágeis contam com o micro trincamento.

Hutchings e Shipway (2017) e Busan (2000) afirmam que é possível relacionar a resistência ao desgaste à abrasão a algumas propriedades dos materiais. No caso dos metais, a

taxa de desgaste específico é linearmente proporcional à dureza; para as cerâmicas utiliza-se a tenacidade à fratura (K_{IC}). No caso dos polímeros, a resistência ao desgaste é inversamente proporcional ao produto entre a tensão e a deformação na ruptura.

Figura 13 – Exemplo de superfície 3D obtida por interferometria de luz branca e linhas de abrasão na superfície de um material.



Fonte: Autoria própria.

2.1.5.2 Desgaste adesivo

Como mencionado anteriormente e ilustrado na Figura 9 (c), a partir do momento que duas asperidades entram em contato, é possível que elas se deformem plasticamente além da ocorrência de micro soldas pontuais. A razão entre a força normal aplicada e a necessária para separar essas duas superfícies – também denominada força de adesão – dá origem ao coeficiente de adesão (μ') (BHUSHAN, 2013). Deve-se lembrar que, assim como o atrito, a adesão é dependente da área real de contato – Figura 9 (b).

Diversas são as teorias que suportam os mecanismos envolvendo a adesão e, para alguns autores como Buckley (1981) e Zum Gahr (1987), elas são afuniladas em quatro grandes grupos: ancoramento mecânico, difusão, teoria eletrônica e adsorção. Ou, de forma ainda mais simplificada: teorias físicas e químicas.

A adesão em função das interações interatômicas, as quais possuem caráter tanto físico quanto químico. As químicas envolvem ligações dos tipos metálicas, iônicas e covalentes. Já as interações físicas são restritas as forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio, as quais são significativamente mais fracas por não envolverem a troca de elétrons – interações intermoleculares; além do possível travamento mecânico (físico) entre as asperidades da superfície.

Existem outras características intrínsecas aos materiais que estão diretamente relacionadas ao coeficiente de adesão. Sikorski (1963) cita que, para metais, quanto maior a dureza, o módulo elástico, resistência ao fluxo plástico e a presença de impurezas, menor será o efeito da adesão entre regiões de contato. A temperatura do sistema também desempenha um importante papel na adesão, visto que o seu aumento promove o fluxo de material. No caso do contato metal-metal predominam-se fenômenos como a difusão e solubilidade, já no contato polímero-polímero favorece-se a interdifusão das cadeias poliméricas, sendo ainda mais acentuada caso haja afinidade entre os substratos (BHUSHAN, 2013, MYSHKIN; KOVALEV, 2017).

No caso deste trabalho, foca-se no contato metal-polímero, que representa uma parcela considerável dos contatos já existentes e daqueles que surgirão a partir da crescente substituição de aços tradicionais e ferros fundidos por compósitos poliméricos (ESTADOS UNIDOS, s.d.). Dentro deste contexto, Buckley (1981) conduziu alguns testes para avaliar o comportamento da adesão de polímeros em substratos metálicos e cerâmicos. Independente do substrato utilizado, em função dos mecanismos já mencionados, as forças de adesão da interface são superiores às aquelas de coesão do próprio polímero.

Dessa forma, por meio da aplicação de uma força tangencial, o cisalhamento ocorre no substrato polimérico, superando as ligações das cadeias ou entre elas, o que promove a deposição de um filme de material que permanecerá aderido à superfície. Fora as propriedades já mencionadas que influenciam o coeficiente de adesão, Buckley (1981) chama a atenção para a cristalinidade e temperatura de transição vítrea (T_g) dos polímeros. Segundo o autor, quanto mais cristalino for o material e se a sollicitação ocorrer abaixo da temperatura de transição, menores serão os efeitos da adesão.

2.2 LUBRIFICANTES E REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Com a finalidade de mitigar a influência dos mecanismos de desgaste, bem como reduzir os efeitos do atrito e melhorar a eficiência de um sistema, é muito comum que eles disponham de elementos lubrificantes. Na maioria das aplicações tribológicas, a lubrificação fluida é uma forma simples e de baixo custo para contornar esses problemas em superfícies em movimento relativo. Entretanto, situações em que o tribosistema é exposto a condições ambientais mais severas, lubrificantes sólidos são os mais indicados (ANSELMO *et al.*, 2022).

Para melhor compreender este assunto, precisa-se definir o que é um lubrificante e como eles funcionam. Para Hutchings e Shipway (2017) lubrificantes são elementos dispostos na região de interface e podem, ou não, promover a separação total entre as superfícies. Mesmos em casos que não se eliminou completamente o contato entre as asperidades, o lubrificante é capaz de reduzir a taxa de desgaste do sistema. Isso é possível pois eles apresentam pouca resistência ao cisalhamento.

2.2.1 Lubrificação fluida

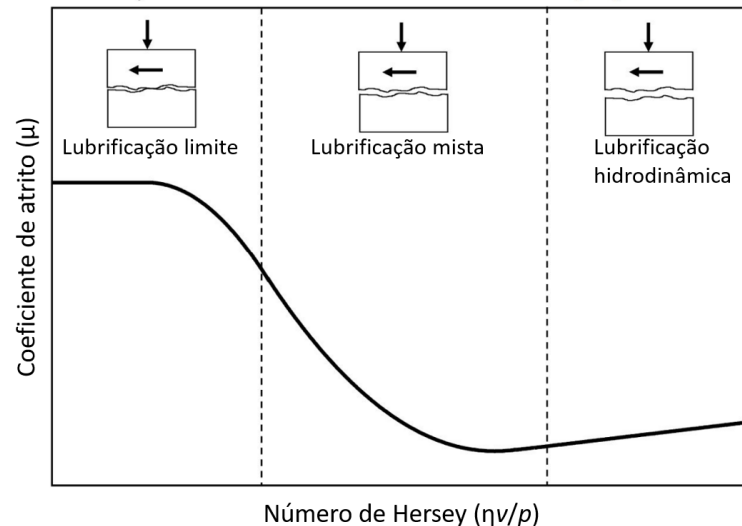
No caso dos lubrificantes denominados fluidos, são dois os tipos mais utilizados. Os óleos são compostos por longas cadeias – lineares ou com algumas ramificações - de hidrocarbonetos saturados, também conhecidas como parafinas. A maioria é de origem mineral; porém, óleos sintéticos também são aplicados (MANGAS; SOGORB; VILANOVA, 2014).

A viscosidade, por sua vez, é a característica mais importante para os lubrificantes fluidos, indicada pela resistência do fluido ao fluxo cisalhante. Segundo Salvaro (2015), a viscosidade reflete diretamente em como o filme formado se comportará em função da velocidade do movimento e das cargas aplicadas. A viscosidade também é utilizada para o cálculo de parâmetros importantes como viscosidade cinemática e o índice de viscosidade (IV) de um fluido. O IV informa a dependência da viscosidade frente a variação da temperatura. Quanto maior o índice de viscosidade, menor é a influência da temperatura sobre o óleo (AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Outro importante valor obtido a partir da viscosidade é o número de Hersey, representado pela razão entre o produto da densidade do fluido e a velocidade do sistema (v) pela força normal (N). A relação entre o número de Hersey e o coeficiente de atrito do sistema

resulta no diagrama de Stribeck Figura 14, que permite identificar os regimes de lubrificação desse sistema.

Figura 14 – Curva de Stribeck: comportamento do coeficiente de atrito em regimes de lubrificação hidrodinâmica, mista e limite.



Fonte: Adaptado de (YAZAWA; MINAMI; PRAKASH, 2014)

Estes autores, Yazawa, Minami e Prakash (2014), defendem a existência de três regimes bem definidos. Na lubrificação hidrodinâmica (LH) – número de Hersey suficientemente alto – as duas superfícies são separadas por um filme lubrificante espesso. Neste contexto, isso significa que a espessura do filme é muito maior do que as asperidades e as superfícies não entram em contato.

Alguns autores, Sadeghi (2010), Salvaro (2015), Hutchings e Shipway (2017) e Anselmo (2022), citam um regime transitório entre a LH e a lubrificação mista (LM); a lubrificação elastohidrodinâmica (LEH). Nesse regime, a pressão aplicada é tamanha que a espessura do filme diminui significativamente a ponto de ele possuir as mesmas dimensões das asperidades. Junto disso, ocorre a variação da viscosidade do fluido e, agora, as deformações elásticas da superfície não são mais ignoradas.

Na lubrificação limite (LL), a espessura do filme lubrificante é inferior às dimensões das asperidades e existe o contato direto entre superfícies, o que promove o desgaste elevado e o aumento do atrito entre elas. Tal regime é predominante em situações de início ou parada de movimento das partes do sistema, trocas de carga até que ele atinja o equilíbrio, além de ser o regime no qual lubrificantes sólidos atuam. Finalmente, a lubrificação mista é um intermediário entre a LL e a LEH, na qual parte da carga é suportada pelas asperidades e a outra pelo fluido lubrificante. (YAZAWA; MINAMI; PRAKASH, 2014; SALVARO, 2015; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.2.2 Lubrificação sólida

Num futuro não muito remoto – com a instalação de bases lunares ou a exploração de planetas distantes como Marte – o sucesso de habitats, veículos e, conseqüentemente, da exploração do espaço possui uma dependência crítica do funcionamento de dispositivos móveis nos mais variados ambientes. Faz-se essencial compreender os mecanismos de desgaste envolvidos nestes componentes, como mancais, rolamentos, engrenagens, entre outros; a fim de selecionar o melhor lubrificante e garantir o correto funcionamento do sistema (MIYOSHI, 2007).

Lubrificantes tradicionais como óleos e graxas, apesar de muito versáteis para aplicações do cotidiano, nem sempre são as melhores opções. Em casos como: alta temperatura, temperaturas criogênicas, ambientes de baixa pressão (vácuo); os lubrificantes sólidos são mais indicados. Eles também são uma alternativa para sistemas de difícil acesso e nos quais a constante adição de lubrificante é inviável (satélites, estações espaciais, aeronaves). Ou em ambientes corrosivos, de alta pressão, constantemente expostos à radiação, ou quando o ambiente exige um elevado teor de limpeza (pouca contaminação) como nas indústrias farmacêutica e alimentícia. (MIYOSHI, 1998a; KUMAR *et al.*, 2022).

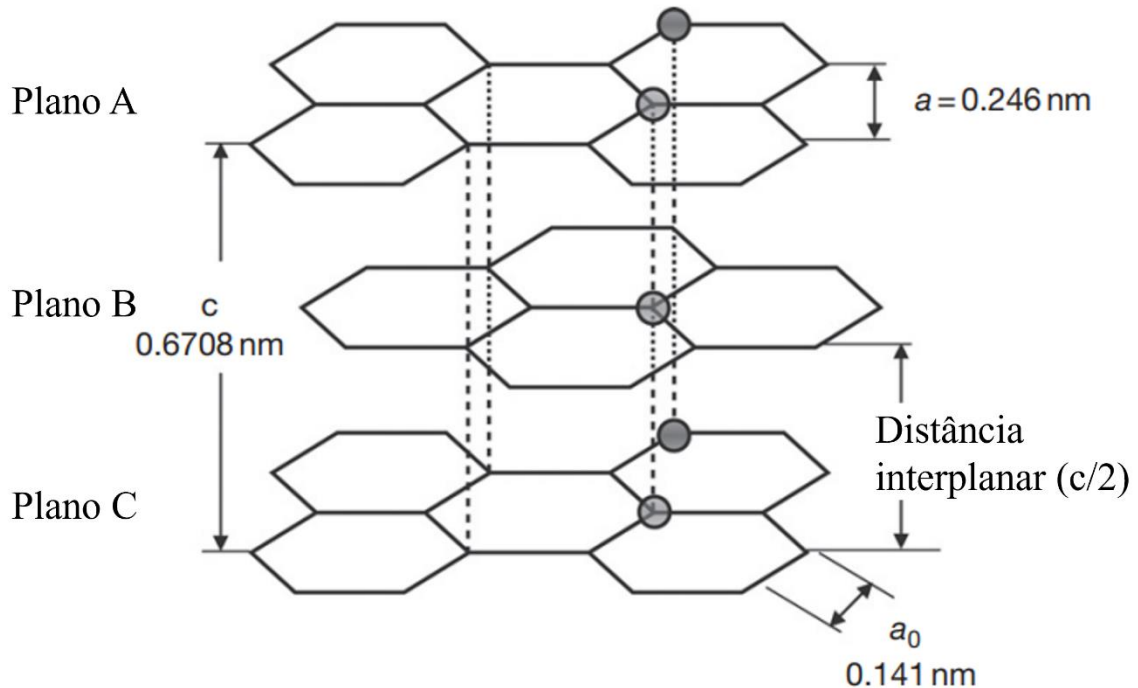
Ademais, lubrificantes sólidos podem ser empregados de diferentes maneiras, algumas delas incluem: apenas nas superfícies em contato e movimento relativo – da mesma forma como os lubrificantes fluidos - ou dispersos ao longo do substrato. A incorporação do lubrificante no volume ocorre tanto por meio da mistura com o substrato sem que haja a dissolução nem reação com ele; bem como pela precipitação ou interação química entre elementos durante o processamento (BINDER, 2009).

Miyoshi (1998a, 2007) define esse tipo de lubrificante como qualquer sólido utilizado na forma de um filme fino ou pó sobre uma superfície para protegê-la durante o movimento relativo, reduzir o atrito e o desgaste. Ressalta-se que a capacidade lubrificante da maioria desses sólidos é consequência da sua baixa resistência ao cisalhamento. Em relação aos materiais metálicos mais utilizados tem-se os metais moles (baixa dureza e elevada ductilidade) como o ouro, chumbo e zinco.

O grafite, o dissulfeto de molibdênio (MoS_2) e o nitreto hexagonal de boro (hBN) pertencem a uma classe intitulada de sólidos lamelares e são frequentemente incorporados ao substrato – geralmente metálico – dando origem a compósitos autolubrificante a seco. (HUTCHKINS; SHIPWAY, 2017; DE MELLO *et al.*, 2022). Na Figura 15 tem-se a estrutura cristalina do grafite, que é bem similar a dos outros dois materiais. Átomos de um mesmo plano

apresentam ligações covalentes entre si. A união dos planos cristalográficos se dá, apenas, pelas forças de Van der Waals - eis a sua baixa resistência ao cisalhamento (SHARMA; ANAND, 2016).

Figura 15 – Estrutura hexagonal do grafite, parâmetros de rede (a_0) e distâncias interplanares.



Fonte: Adaptado de (SERP, 2013).

A Figura 15 revela que a distância entre planos do grafite é da ordem de 0,3354 nm. Para efeito de comparação, a espessura de um fio de cabelo humano varia entre 50.000 e 100.000 nm (LODGE; BHUSHAN, 2006). Visto que as asperidades estão separadas por apenas alguns planos atômicos, lubrificantes sólidos fazem com que o sistema opere no regime de lubrificação limite e ele não possui a capacidade de amortecimento e arrefecimento mencionada anteriormente. (SALVARO, 2015, ANSELMO 2022).

Já para os polímeros pertencem a classe de materiais de origem orgânica estruturados na forma de cadeias (SHARMA; ANAND, 2016). O mais utilizado é o politetrafluoretileno (PTFE). Todavia o nylon, o polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), a polieterecetona (PEEK) ganham espaço por aliarem baixo coeficiente de atrito e alta resistência ao desgaste frente a superfícies de elevada dureza – geralmente metálicas. (HUTCHKINS; SHIPWAY, 2017; DE MELLO *et al.*, 2022).

Esses materiais poliméricos não são completamente cristalinos – semicristalinos – ou seja, não estão dispostos de forma ordenada ao longo de todo o volume. Neles, os átomos

também apresentam ligações covalentes, enquanto os planos – neste caso as cadeias - estão unidas por forças relativamente mais fracas como as de Van der Waals e ligações de hidrogênio, permitindo um certo movimento entre elas.

De maneira geral, De Mello *et al.* (2022) defendem a ideia de que lubrificantes sólidos são uma das soluções mais promissoras para contornar o desgaste, reduzir o atrito e melhorar a eficiência energética de sistemas modernos. Ademais, seus estudos apontam para a ideia de que uma das grandes vantagens dos lubrificantes sólidos é que a maioria apresenta efeito sinérgico quando introduzidos como aditivos em lubrificantes fluidos.

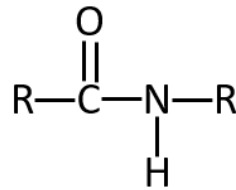
Mas, infelizmente, ainda não existe um único lubrificante capaz fornecer resistência ao desgaste adequado junto de um baixo coeficiente de atrito em amplas condições de serviço. Todos apresentam limitações e, por isso, reitera-se a importância de se compreender as solicitações de projeto, possíveis eventos e mecanismos envolvidos, a fim de se optar pelo melhor conjunto de elementos para o tribosistema (MIYOSHI, 1998b, 2007; HUTCHINGS; SHIPWAY; 2017; DE MELLO *et al.*, 2022).

2.3 POLÍMEROS DE ENGENHARIA

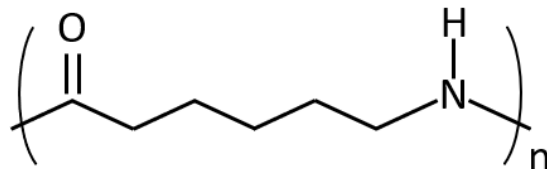
2.3.1 Poliamidas

Ao se abordar polímeros de engenharia, não se pode deixar de mencionar as poliamidas. Elas compõem uma família de polímeros orgânicos caracterizada pela presença de grupos amida (CONH) na sua estrutura e pode ser dividida em dois grandes grupos: as alifáticas como a poliamida 6 (PA6) e a 6,6 (PA66) popularmente denominadas de nylons. O outro grupo engloba as poliamidas aromáticas, ou aramidas, como o kevlar por exemplo. (TRIGO-LOPEZ *et al.*, 2013; KAUSAR, 2020). A Figura 16 ilustra a estrutura do grupo amida bem como as estruturas de repetições dos exemplos mencionados.

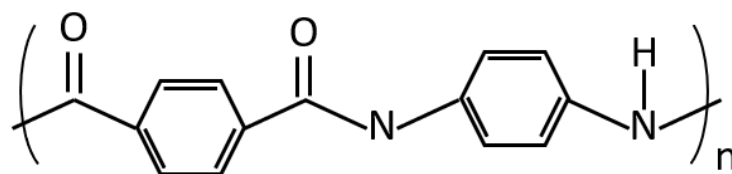
Figura 16 – Estruturas de repetição: a) grupo amida, b) poliamida 6 e c) da poliaramida.



a) Grupo funcional amida



b) Poliamida 6 (Nylon 6)



c) Poliaramida (Kevlar)

Fonte: Autoria própria.

As poliamidas foram um dos primeiros polímeros de engenharia comercialmente disponibilizados, frente aos avanços da empresa Dupont, pioneira no ramo de pesquisa desses materiais. Originalmente plásticos de engenharia ou de alto desempenho eram definidos como aqueles com elevadas propriedades mecânicas (limite de resistência, módulo elástico e tenacidade) e térmicas (ponto de fusão e temperatura de transição vítrea). Entretanto com a introdução das PAs, especialmente das aromáticas, essa definição passou a abranger propriedades como: estabilidade química; resistência a chamas e fluência; hidrofiliicidade e hidrofobicidade; baixo ou alto coeficiente de adesão; elevada condução térmica e elétrica e boas propriedades tribológicas (baixo coeficiente de atrito e resistência ao desgaste) (MELTON; PETERS; ARISMAN, 2011; LI, 2011; TRIGO-LOPEZ *et al.*, 2013; AUTAY *et al.*, 2019).

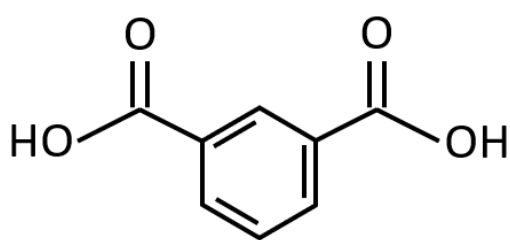
Tais características conferem versatilidade de aplicação das poliamidas como na confecção de tubulações; filtros industriais e membranas; correias; tecidos para aplicação esportiva, com resistência ao calor e cortes; proteção balística e componentes para aplicações tribológicas. Quando utilizadas como matrizes de materiais compósitos, destacam-se como

possíveis substitutas para o aço, frente a baixa densidade, resistência a corrosão e a fluência (TRIGO-LOPEZ *et al.*, 2013).

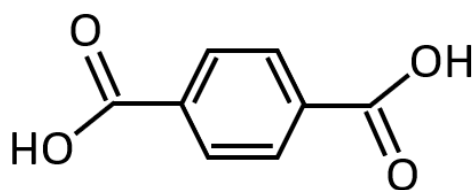
2.3.1.1 Poliftalamidas

Também conhecidas como Poliamidas de Alta Performance, elas pertencem ao grande espectro das poliamidas. Como o nome sugere, elas são empregadas em ambientes mais agressivos ou aplicações que demandem maiores esforços mecânicos. Elas se diferem das poliamidas aromáticas por serem uma combinação específica de ácidos carboxílicos aromáticos, mais especificamente dos ácidos isoftálico e tereftálico como mostra a Figura 17. Isso dá origem a um nicho de poliamidas semi-aromáticas, denominado de poliftalamidas (PPA). Alguns são os requisitos para que o polímero se classifique como uma PPA e eles são normatizados pela ASTM D5336 15A. A norma afirma que a massa molar dos ácidos deve ser igual ou superior à 55% da massa do monômero e o material deve apresentar uma temperatura de transição vítrea de no mínimo 85°C. A presença de anéis aromáticos e dos ácidos, além do aumento da temperatura de transição, permite um aumento significativo das propriedades mecânicas e elevada resistência química. (COUSIN; GALY; DUPUY, 2012, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015; DE GORTARI; MISRA; MOHANTY, 2022).

Figura 17 - Estrutura do ácido isoftálico (a) e do ácido tereftálico (b).



a) Ácido isoftálico



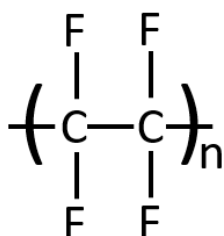
b) Ácido tereftálico

Fonte: Autoria própria.

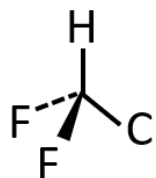
2.3.2 Politetrafluoretileno

Da família dos fluoropolímeros, o PTFE é de longe o mais conhecido. Ele foi descoberto por Roy J. Plunkett em 1941 enquanto ele realizava algumas pesquisas relacionadas a fluidos refrigerantes para a empresa Dupont. De forma simplificada, o monômero do PTFE é obtido pela degradação térmica do gás clorodifluormetano, popularmente comercializado como gás refrigerante R-22; as estruturas destas duas substâncias estão dispostas na Figura 18. As elevadas forças de ligação carbono-flúor conferem elevada estabilidade química ao polímero (LIU *et al.*, 2014).

Figura 18 – Monômero de PTFE (a) e estrutura do gás R-22 (b).



a) Monômero de PTFE



b) Clorodifluorometano

Fonte: Autoria própria.

Domínguez (1993) afirma que esse material é insolúvel em todos os solventes conhecidos em temperaturas menores do que 300°C. Além disso, o PTFE apresenta excelente estabilidade térmica nas faixas de -270 a 260°C. Tanto é que a sua primeira aplicação foi no Projeto Manhattan como material de vedação para ambientes corrosivos ricos compostos fluorinados. Em relação às propriedades tribológicas ele apresenta baixo coeficiente de adesão e baixo coeficiente de atrito frente à maioria dos sistemas tribológicos, devido a elevada eletronegatividade do flúor.

Como matéria prima, o PTFE é comumente vendido na forma de pó, o qual possui coloração branca. O peso molecular utilizado varia em função da necessidade de aplicação e rota de processamento. Mas de maneira geral, o PTFE comercialmente disponível possui peso molecular variando entre 400.000 e 9.000.000 g/mol. Dependendo dos parâmetros de processo, em especial velocidade de resfriamento, esse polímero é capaz de apresentar um grau de cristalinidade de até 94%. Na forma de produtos semiacabados, esse material é vendido na forma de blocos, perfis das mais diversas geometrias, barras, tubos, mangueiras, filmes, fitas e até mesmo rolamentos. Esses produtos podem conter PTFE na sua forma pura ou, muitas vezes,

apresentar aditivos como grafite, negro de fumo, MoS₂, fibra de vidro e pó de ligas ferrosas ou bronze (DOMININGHAUS, 1993; HUTCHKINS; SHIPWAY, 2017; DE MELLO *et al.*, 2022).

A ideia base do estudo era introduzir o PTFE na matriz de poliftalamida sem alterar significativamente suas propriedades mecânicas. Da literatura disponível, Li *et al.* (2013a; 2013b) e You *et al.* (2013; 2014), percebe-se que para valores acima de 10% em massa de lubrificante as diferenças nas propriedades tribológicas não são tão significativas; em alguns chegam a ser desfavoráveis às propriedades mecânicas.

Outros pesquisadores membros do LABMAT, Salvaro *et al.*, 2023, desenvolveram pesquisas semelhantes em relação a adição de PTFE em diferentes materiais. Na ocasião, os autores exploraram a morfologia e propriedades tribológicas de uma blenda polimérica de poliariletercetona (PAEK) com PTFE, cujas frações mássicas variaram em 2, 5, 15 e 30%. No trabalho em questão, os autores validaram a influência de dois processos de mistura das blendas - alta e baixa energia. Constatou-se que ambos os processos se mostraram adequados e que o ganho ótimo de propriedades tribológicas ocorria com 15% de massa de PTFE. Apesar de apresentar diferença, a adição de 30% em massa de PTFE não justifica a melhoria de desempenho, além de, porventura, comprometer outras propriedades do material e a viabilidade econômica do processo, já que o PTFE apresenta um custo elevado.

Apesar desse material apresentar propriedades antiaderentes e baixo coeficiente de atrito, estudos recentes sugerem que a aplicação do PTFE seja restrita para o setor de engenharia e que seu contato com alimentos deve ser evitado, como nas famosas frigideiras antiaderentes. O aquecimento excessivo de panelas contendo PTFE pode favorecer a liberação de substâncias como as perfluoroalquiladas (PFAS) e ácidos perfluorooctanóicos (PFOA). Essas substâncias vêm sendo pesquisadas devido ao seu possível impacto na saúde humana (LAU *et al.*, 2007; WHITE; FENTON; HINES, 2011).

2.4 MATERIAIS COMPÓSITOS

Esta seção tem como principal objetivo introduzir de maneira simplificada alguns conceitos importantes em relação à classe dos compósitos. O foco se dará principalmente em definições, aplicações, vantagens de se optar por esse tipo de material, os tipos de reforços e algumas formas de prever as propriedades finais de forma teórica.

2.4.1 Definição e processamento

Por definição, materiais compósitos surgem a partir da junção de dois ou mais elementos com propriedades distintas. O resultado é um material contendo propriedades intermediárias perante seus constituintes além da presença de uma ou mais fases descontínuas incorporadas numa fase contínua – denominada matriz. Ela promove a integridade estrutural, recobre as demais fases e promove a transferência de carga entre os constituintes. No caso de compósitos poliméricos, a matriz tende a apresentar propriedades mecânicas inferiores à fase descontínua, também chamada de segunda fase. (ALTENBACH; ALTENBACH; KISSING, 2004; AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2006).

Compósitos são classificados em três principais categorias em função do tipo de matriz utilizada: compósitos de matriz polimérica (PMC), de matriz metálica (MMC) e de matriz cerâmica (CMC). Já a fase de reforço é dividida em duas macro categorias: os contendo fibras (curtas ou longas) são os mais utilizados, porém promovem a anisotropia do compósito. Ou seja, o material apresenta propriedades distintas em diferentes direções. O segundo tipo de reforço é o particulado (partículas, *flakes*, *whiskers*,) e ele favorece a isotropia do material. (ALTENBACH; ALTENBACH; KISSING, 2004; PARVIZI-MAJIDI; BEGUM; 2016)

Diversos são os ramos da engenharia que trabalham com materiais compósitos como o setor aeroespacial, automotivo, civil, entre outros. Nestes casos, as propriedades mais atraentes são a elevada resistência mecânica e baixa densidade (DOAN; THAI; TRAN, 2020; HASSANI; MOUSAVI; GANDOMI, 2021). Um dos exemplos mais simples é o concreto armado. O concreto cumpre o papel de matriz, o aço atua como se fossem as fibras e possíveis agregados (brita) atuam como partículas. Além das propriedades mecânicas, a fase de reforço desenvolve outras funções como modificar as propriedades térmicas, elétricas, ópticas e tribológicas do material (ZUCCHELI *et al.*, 2010; LI, 2011).

Exemplos de aditivos muito utilizados, principalmente em matrizes poliméricas são os lubrificantes sólidos. Como mencionado anteriormente, lubrificantes podem estar dispostos no volume do material. Materiais como grafite, poliamida, PTFE, MoS₂, entre outros são empregados como lubrificantes sólidos nesses materiais. Porém como eles são imiscíveis nas matrizes poliméricas, precisam passar por algumas etapas a fim de homogeneizar a blenda polimérica.

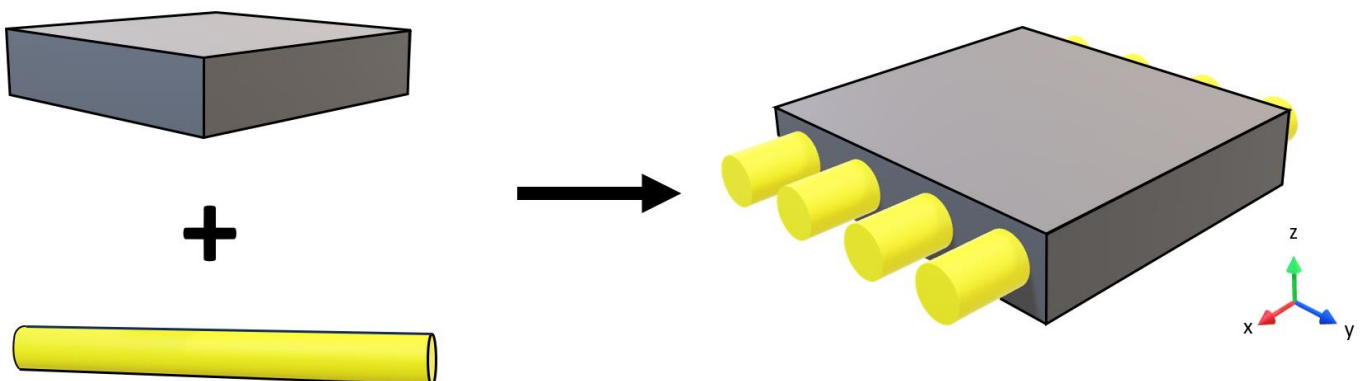
Outros aditivos focados em reforçar a matriz são as fibras de vidro, carbono e kevlar® que são comumente comercializadas em fios ou na forma da malha propriamente dita. Elas oferecem elevadas propriedades mecânicas e são utilizadas para as mais diversas aplicações.

Kevlar®, por exemplo, consegue atingir módulos elásticos de até 112 GPa e tensões de ruptura de até 3000 MPa (DUPONT, 2019) e por isso é frequentemente utilizado no setor militar; enquanto fibras de vidro e de carbono permeiam desde equipamentos esportivos a aeronaves. Como os compósitos apresentam grande versatilidade de aplicação, eles vêm ganhando cada vez mais espaço. Relatórios apontam, Straits Research (2023) e Markets and Markets (2023), que o mercado desses materiais foi avaliado em \$93,25 bilhões em 2023 com expectativa de atingir \$133,05 bilhões em 2032. Desse montante, estima-se que materiais reforçados com fibra de vidro representarão \$44,3 bilhões até 2028.

O design e a seleção apropriada de matriz e fase de reforço afetam diretamente as propriedades finais do material, bem como o custo e a rota de processamento. Como o foco do trabalho são materiais poliméricos, as técnicas a seguir são, em sua maioria, restritas à polímeros. Neste caso, as rotas de processamento como a laminação e a moldagem por transferência de resina (MTR) são frequentemente utilizadas. Nela as fibras são recobertas por uma resina termofixa – geralmente epóxi, dando origem a finas estruturas denominadas de lâminas (AHMED *et al.*, 2023).

De forma simplificada, a principal diferença entre esses processos é que na laminação a resina é aplicada de forma contínua. E, na MTR, as fibras se encontram dentro de um molde e a resina é injetada sob pressão; o que garante uma melhor impregnação do reforço. Além disso, a transferência de resina consegue minimizar a formação de defeitos estruturais como vazios. A Figura 19 representa de forma didática como seria a estrutura de uma lâmina formada por fibras longas numa única direção.

Figura 19 – Constituinte e fabricação de uma lâmina unidirecional.



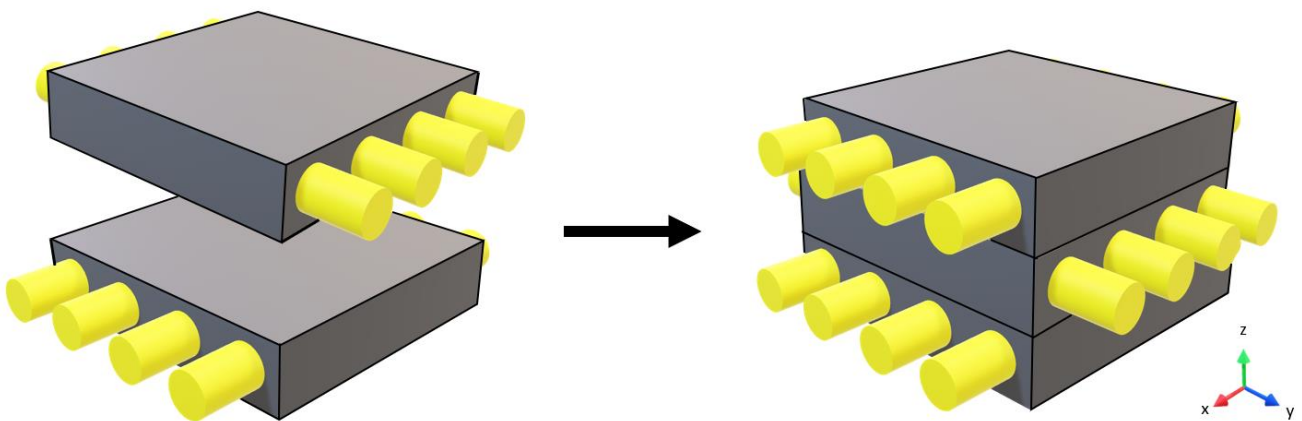
Fonte: Autoria própria.

Entretanto, por ser muito fina – apenas alguns micrometros - e apresentar baixas propriedades mecânicas, poucas são as aplicações de engenharia que envolvem o uso de uma

única lâmina. Com isso em mente, o processo de laminação envolve a sobreposição de diversas lâminas, o que dá origem ao laminado. Esse por sua vez possui as propriedades estruturais do componente final. Outro ponto interessante, é que esse processo possibilita não só controlar a espessura do laminado, mas também a orientação das lâminas (AHMED *et al.*, 2023). Isso permite com que os compósitos laminados assumam um comportamento intermediário entre um material isotrópico e anisotrópico. Os chamados materiais ortotrópicos apresentam ao menos três eixos de simetria, os quais são perpendiculares entre si. Nesses eixos o material se comporta de maneira isotrópica (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2006).

Infinitas são as possibilidades de combinações envolvendo a orientação das lâminas. Autores como Al-Qureshi (1988) explicam que tudo depende da aplicação e das propriedades desejadas. Mas, que para efeito de cálculo e a fim de se aproximar de algo isotrópico, laminados simétricos são muito utilizados. Um exemplo seria um laminado constituído por 5 lâminas que apresentam a seguinte orientação em relação a um referencial: (90° , 45° , 0° , 45° , 90°). A Figura 20 esquematiza a estrutura de um laminado no qual as lâminas estão defasadas em 90° umas em relação as outras.

Figura 20 – Confeccção de um laminado no qual as lâminas apresentam uma orientação de 90° entre si.



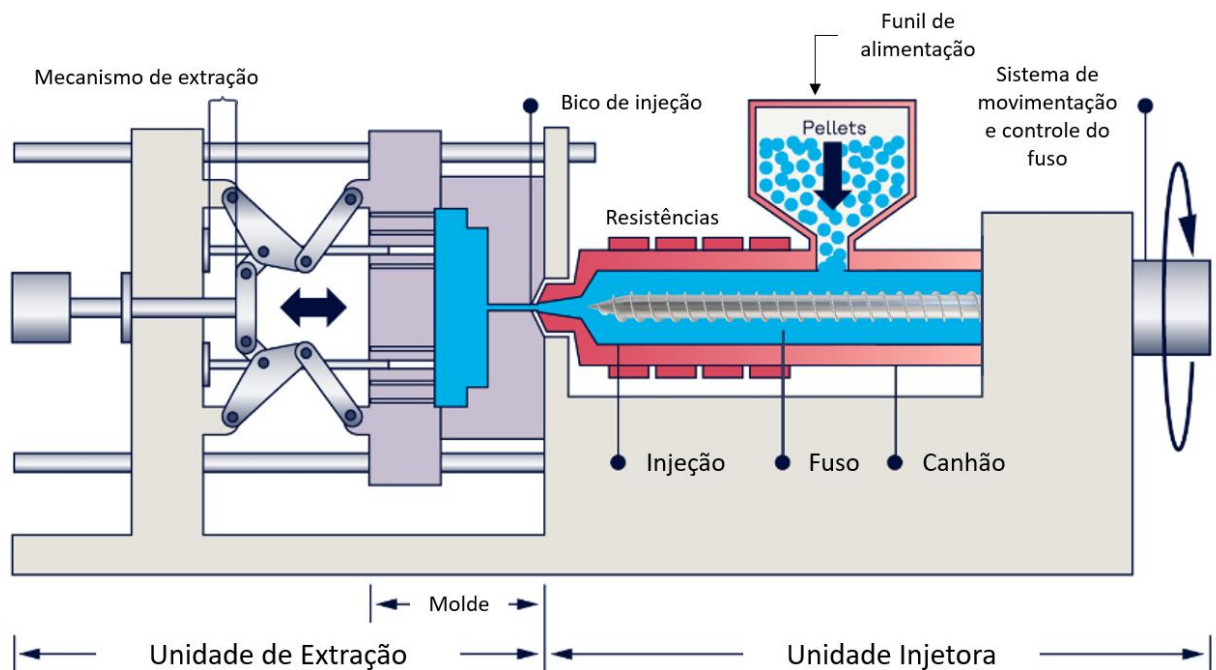
Fonte: Autoria própria

Para materiais reforçados com particulados ou fibras curtas, as rotas disponíveis para o processamento são bem diferentes. Ao contrário da laminação que utiliza termofixos, uma das rotas mais comuns é a de moldagem por injeção. Ele é um processo amplamente difundido

que alia a produção de peças em larga escala a um baixo custo, geometrias complexas e liberdade de design das partes injetadas (CONRAD, 2023).

A Figura 21 ilustra a estrutura de uma injetora e suas três principais divisões: introduz-se na unidade injetora o material – geralmente na forma de *pellets*. Ela conta com resistências para o aquecimento e eventual fusão do polímero e de um fuso responsável por homogeneizar essa mistura e transportá-la até um bico injetor. Em seguida o polímero é injetado sob elevadas pressões no molde. Este por sua vez é feito de aços de maior dureza a fim de evitar o desgaste prematuro e tem como função dar a geometria final do componente. A unidade de extração é responsável por abrir e fechar o molde e ejetar a peça produzida, dando início a um novo ciclo. Entretanto, para assegurar sua eficiência desse processo, faz-se necessário controlar certos parâmetros, como: velocidade de injeção, temperatura do molde e do polímero, pressão de injeção, entre outros (HAN; KIM, 2017; CONRAD, 2023).

Figura 21 – Esquemática de uma injetora e suas três principais seções.



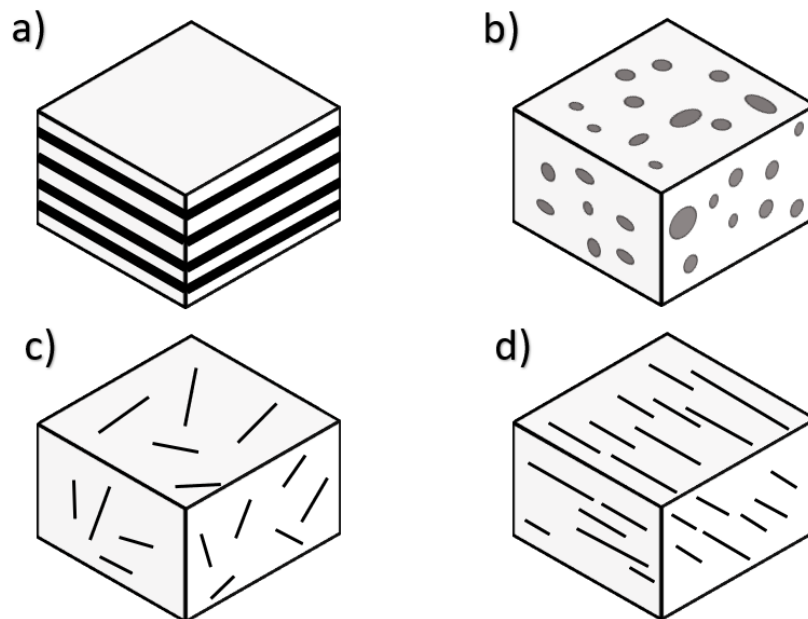
Fonte: Modificado a partir de (CONRAD, 2023).

A adição de fibras curtas ou particulados não altera significativamente a rota de injeção. Uma das formas mais simples de se introduzir esses tipos de reforços é durante a fabricação dos *pellets*. Com o auxílio de uma extrusora, mistura-se o polímero com o reforço. Esse equipamento então extruda um filamento que poderia ser utilizado para processos como

impressão 3D ou, para o processo de injeção, ele é peletizado. Pelo simples fato de o material não ser mais o mesmo, reitera-se a necessidade de se reavaliar os parâmetros de injeção em relação àquele do *datasheet* do polímero. Outra questão é de que a durabilidade dos componentes em contato direto com o material (molde, fuso, bico, canhão) tendem a apresentar um desgaste prematuro, visto que alguns aditivos apresentam caráter abrasivo, especialmente os utilizados como fase de reforço.

Ao contrário da laminação que permite escolher a direção de alinhamento das fibras camada por camada, para o componente resultante da injeção as fibras curtas e partículas com geometria acicular tendem a se alinhar com a direção fluxo de material. E, para efeitos de cálculo, o componente injetado se assemelha a uma lâmina, mesmo que possua dimensões consideráveis (CASARIL *et al.*, 2007). A Figura 22 traz algumas outras classificações de materiais compósitos em função do tipo de reforço e sua disposição ao longo do volume.

Figura 22 - Classificações de materiais compósitos: Compósito laminado (a), partículas distribuídas ao longo do volume (b), fibras curtas ou partículas aciculares aleatoriamente distribuídas (c), fibras ou partículas aciculares com orientação preferencial (d).



Fonte: Autoria própria.

Dentre os compósitos mais utilizados pela indústria, tem-se os polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP). A fibra de vidro apresenta custo muito competitivo quando comparada a outras fibras sintéticas (carbono, boro e kevlar), boa estabilidade térmica, química e excelentes propriedades mecânicas (LI, 2011). Definidos os requisitos de projeto do

componente, selecionados os aditivos e a matriz que irão compor o compósito, a rota de processamento que será empregada; basta definir a quantidade de cada fase no material para atender as especificações. Para isso, diversas são as técnicas disponíveis para prever e simular as futuras propriedades do material.

2.4.2 Micromecânica de materiais compósitos

O estudo dessa classe de materiais é dividido em duas grandes áreas (AL-QURESHI, 1988; CASARIL *et al.*, 2007): a micromecânica que foca nos microconstituintes (matriz e fase de reforço) e como eles refletem nas propriedades da lâmina ou da estrutura, considerada contínua. Já a macro mecânica, foca no conjunto de lâminas – laminado - e como ele se comporta frente a aplicação de esforços mecânicos. No caso deste trabalho, limita-se à micromecânica, em função da estrutura do material trabalhado – fibras curtas orientadas numa matriz continua - e a rota de processamento utilizada – injeção.

Al-Qureshi (1988) sugere que para efeito de cálculo e tornar factível a previsão das propriedades do material compósito, algumas aproximações e suposições são necessárias. Além disso, certas variáveis são de grande importância para tais cálculos como a massa (M_i) e o volume (V_i) dos componentes trabalhados, onde “i” é um subíndice que indica a que a propriedade se refere – compósito (c), matriz (m) ou fibra (f) ou partícula (p).

1. A lâmina ou estrutura é macroscopicamente homogênea;
2. A estrutura não apresenta tensões residuais seja de origem interna, térmica, entre outras;
3. Os aditivos apresentam dimensões e propriedades homogêneas ao longo do compósito, elas estão uniformemente distribuídas pelo volume do material e apresentam boa adesão com a matriz;
4. A matriz é homogênea, isotrópica e possui comportamento elástico linear.

Por meio das massas e dos volumes dos constituintes, estabelece-se determinadas igualdades – eq. 7 e eq. 8 - importantes para a aquisição de variáveis como a fração mássica da matriz (m_m), da fibra (m_f) e da partícula (m_p) e as frações volumétricas (v_m , v_f e v_p). Estas serão veementemente utilizadas para os cálculos futuros.

$$\frac{M_f}{M_c} + \frac{M_m}{M_c} + \frac{M_p}{M_c} = 1 \quad \rightarrow \quad m_f + m_m + m_p = 1 \quad (7)$$

$$\frac{V_f}{V_c} + \frac{V_m}{V_c} = 1 \quad \rightarrow \quad v_f + v_m + v_p = 1 \quad (8)$$

Diversas são as formas de se prever o comportamento e as propriedades de um compósito, como é o caso da simulação numérica (DOAN; THAI. TRAN, 2020). Porém, trata-se de um processo complexo e muitas vezes demorado até que se consigam resultados próximos de valores experimentais. Uma alternativa simples e muito utilizada para o cálculo das propriedades de materiais compósitos é a lei das misturas (MARK *et al.*, 1969; AL-QURESHI, 1988; CASARIL *et al.*, 2007; IMANAKA *et al.*, 2021). Ela se baseia no princípio da aditividade e afirma que as propriedades finais do material são um intermediário daquelas dos seus constituintes como limites de resistência, módulos elásticos e de cisalhamento, coeficiente de Poisson, entre outros.

Neste caso, cita-se a densidade teórica do compósito (ρ_c), um dos grandes atrativos desses materiais e é possível obtê-la com a relação da massa do compósito sobre seu volume - eq. 9; bem como por meio da lei das misturas – eq. 10.

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} \quad \rightarrow \quad \rho_c = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m + \rho_p V_p}{V_c} \quad (9)$$

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m + \rho_p v_p \quad (10)$$

Porém, sabe-se que os processos de fabricação não são perfeitos. É inevitável a presença de defeitos estruturais. Nos materiais compósitos, os vazios são a classe de defeitos mais estudada por causa da sua influência sobre as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. Atenta-se ao fato de que a formação de vazios é distinta à cada processo em função da termodinâmica e reologia envolvidas (MEHDIKHANI *et al.*, 2019).

Como explicitado pelo nome, eles são regiões de ausência de material e atuam como concentradores de tensão. A eq. 11, partir dos valores de ρ_c e da densidade experimental (ρ_{exp}), calcula a fração volumétrica de vazios (v_v), ou por meio de uma simples relação entre as frações volumétricas de matriz e da fibra.

$$v_v = 1 - \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_c} \rightarrow v_v = 1 - (v_m + v_f + v_p) \quad (11)$$

A lei das misturas – assumindo que as deformações da matriz (ε_m), da fibra (ε_f) e do compósito (ε_c) são iguais - também permite o cálculo da máxima tensão suportada pelo compósito (σ_{cu}). Para isso, utiliza-se o limite de resistência das fibras (σ_{fu}) e da matriz (σ_{mu}) como expresso na eq. 12 e o módulo elástico do compósito (E_c) – eq. 13. Na maioria dos casos esses valores são calculados pela lei de Hook onde a tensão sobre o material (σ) é uma relação entre o módulo elástico (E) e a deformação (ε) como na eq. 14. Experimentalmente esses valores são obtidos por meio de ensaios de tração, compressão e cisalhamento.

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu}v_f + \sigma_{mu}v_m \quad (12)$$

$$E_c = E_f v_f + E_m v_m \quad (13)$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (14)$$

Para estes materiais, estipulam-se critérios de falha, geralmente, a partir da tensão máxima suportada ou uma deformação limite. A eq. 15 expressa a tensão sobre o compósito σ_c em função de uma deformação ε_c arbitrária, podendo estas variáveis serem os limites máximos de tensão e deformação estipulados em projeto (σ_{cu} e ε_{cu}). Ou por meio da manipulação dessa equação, obtêm-se a eq. 16, que representa a deformação sofrida pelo compósito frente a uma tensão aplicada. Vale lembrar, que estas equações até então apresentadas são válidas apenas para lâminas e similares com fibras longas e com solicitação mecânica longitudinal às fibras.

$$\sigma_c = \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right) v_f E_f \varepsilon_c + E_m \varepsilon_c \quad (15)$$

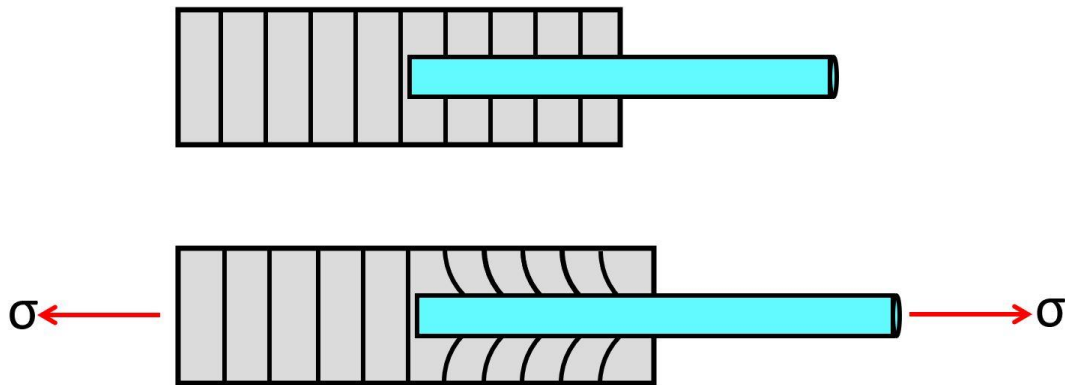
$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{\left[\left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right) v_f E_f + E_m\right]} \quad (16)$$

Mas, como abordado anteriormente, existem diversos tipos de reforços. No caso deste trabalho o foco são fibras curtas. Ao se trabalhar com esses reforços, surgem conceitos como o tamanho crítico de fibra (L_c). A finalidade da carga de reforço é suportar a maior parte das solicitações dos componentes, aliviando, assim, a exigência sobre a matriz.

A eq. 17 apresenta a relação entre os esforços aplicados sobre o compósito (F_c) e aquele suportado pela fase de reforço (F_f). Neste contexto, surge uma variável denominada de comprimento crítico. Ela é o comprimento mínimo da fibra necessário para garantir que elas sejam capazes de suportar a carga projetada, dar a devida tenacidade ao compósito e garantir a transferência de carga para a matriz sem que ocorra a falha da estrutura. (OHSAWA *et al.*, 1978; AMER; SCHADLER, 1998; SUN; HAN; DAI, 2009).

Vários são os métodos para calcular o L_c e um dos mais simples é o teste de arrancamento, popularmente conhecido como *pull-out* (AMER; SCHADLER, 1998; HEIM *et al.*, 2013). A Figura 23 esquematiza o ensaio; nele embute-se um comprimento arbitrário de fibra (L_a) na matriz que se deseja utilizar. Tanto a matriz quanto a parte exposta da fibra são tracionadas e duas são as possibilidades: a fibra “escorrega” para fora da matriz, indicando que $L_a < L_c$. Ou a fibra se rompe, o que indica que $L_a \geq L_c$. Isso ocorre, pois a partir do L_c surgem tensões cisalhantes suficientes na interface fibra-matriz. A eq. 18 indica como calcular o comprimento crítico a partir do limite de resistência da fibra (σ_{fu}), o diâmetro da fibra ($\varnothing_f$) e a tensão crítica de cisalhamento para que a fibra se rompa (τ_c).

Figura 23 - Esquemática do ensaio de *pull-out* de fibra e deformações sobre a fibra e matriz perante a solicitação mecânica.



Fonte: Autoria própria.

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right)}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + \left(\frac{v_m}{v_f}\right)} \quad (17)$$

$$L_c = \frac{\sigma_{fu} \varnothing_f}{2\tau_c} \quad (18)$$

Por meio desses valores de L_c e da modificação das eq. 12, Casaril *et al.* (2007) e Al-Qureshi (1988) afirmam que é possível calcular mais precisamente a resistência do compósito frente a esforços longitudinais ao alinhamento das fibras, dando origem a eq. 19. Nela, surgem novas variáveis como a tensão limite de resistência da matriz (σ_{mu}) – visto que os autores afirmam que a matriz é o agente limitante (menor resistência) e a falha deve ocorrer nela e o comprimento da fibra utilizada (L).

$$\sigma_c = \beta E_f \frac{\sigma_{mu}}{E_m} v_f \left(1 - \frac{L_c}{2L}\right) + \lambda v_m \sigma_{mu} + \gamma v_p \frac{\sigma_{mu}}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

Essa equação também engloba a contribuição de eventuais partículas dispersas no volume do material. Para isso, necessita-se conhecer a fração volumétrica das partículas. Além disso, Qureshi (1998), considera fatores de correção como a eficiência da fase de reforço (β), que depende da orientação, distribuição e se as fibras são longas ou curtas. A eficiência do recobrimento da fase de reforço pela matriz (λ) e a razão de cisalhamento na interface matriz-partícula (γ) que também variam entre 0 e 1 e estão sujeitas a variáveis como material utilizado, rota de processamento, entre outros. O Quadro 1 compila alguns valores de β para diferentes orientações das fibras.

Quadro 1 – Eficiência da fase de reforço para alguns ângulos de orientação das fibras em relação a direção da tensão aplicada.

Orientação da fibra	Direção da aplicação de carga	Eficiência do reforço (β)
Todas as fibras paralelas.	Paralelas às fibras.	1
	Perpendicular às fibras.	0
Bidirecionais (tecidos).	Metade das fibras paralelas e metade perpendiculares.	1/2
Fibras distribuídas uniforme e randomicamente num plano específico.	Qualquer direção no plano das fibras.	3/8
Fibras distribuídas uniforme e randomicamente num espaço tridimensional.	Qualquer direção.	1/5

Fonte: (CASARIL *et al.*, 2007).

Com tudo isso em mãos, é notável a importância do planejamento prévio de um sistema no sentido de se compreender: os possíveis mecanismos de desgaste; o tipo ou tipos de lubrificantes mais adequados; os cálculos das propriedades finais do material desenvolvido e como eles conversam com valores práticos.

Assim, espera-se que mesmo aqueles de fora da área estejam um pouco mais familiarizados com as temáticas de tribologia e materiais compósitos; afinal, são tópicos relativamente recentes e em constante evolução.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O foco deste capítulo é introduzir, de maneira simplificada, a metodologia escolhida para a fabricação dos compósitos utilizados, as técnicas de caracterização e a propriedades analisadas. Vale ressaltar que todos os equipamentos e análises foram feitas dentro do Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMAT - UFSC) o qual conta com estrutura para o desenvolvimento de pesquisa e processos em escala laboratorial e industrial.

3.1 MATRIZ, FIBRA E LUBRIFICANTE SÓLIDO

Para a execução desse trabalho, foi elaborado um compósito cuja matriz é uma subclasse de poliamida, o reforço é oriundo das fibras de vidro e adicionou-se PTFE como lubrificante sólido. O LABMAT dispunha de um polímero comercialmente disponível, o qual é vendido na forma pellets para o processo de injeção. Esse material é uma poliftalamida denominada G1300A comercializada pela empresa Kuraray e, no período em questão, foi cotado em aproximadamente \$60/kg. Esse polímero contém 30% em massa de fibra de vidro como fase de reforço vidro ($m_f = 0,3$ e $m_m = 0,7$) e a Tabela 1 apresenta suas principais propriedades.

A fim de avaliar o tamanho de médio das fibras, a matriz de alguns pellets foi degradada termicamente numa mufla a 600°C por 1 hora em atmosfera de oxigênio. Mediu-se o comprimento dessas fibras com o auxílio do *software* do microscópio óptico da marca Leica modelo DM4000M num aumento de 50x.

Tabela 1 – Propriedades físicas, térmicas e mecânicas do compósito selecionado.

Propriedade	Valor	Unidade
Fração de fibra de vidro	30	% em peso
Densidade	1,37	g/cm ³
Ponto de fusão	300	°C
Temperatura de transição vítrea	125	°C
Tensão de ruptura à tração	190	MPa
Alongamento na tração	2,5	%
Módulo elástico	9,74	GPa
Resistência a flexão	270	MPa

Fonte: Adaptado de (KURARAY, s.d.).

Em relação ao lubrificante sólido, politetrafluoretileno na forma de pó foi adquirido da empresa Supreme Lub, a qual orçou o material em \$100/kg. A Tabela 2 traz algumas informações a respeito das propriedades desse polímero.

Tabela 2 – Propriedades do politetrafluoretileno.

Propriedade	Valor	Unidade
Tamanho médio de partícula	2,53	µm
Densidade	2,18	g/cm ³
Ponto de fusão	330	°C
Temperatura de serviço	-268 a 316	°C
Tensão de ruptura	0,86 - 41,4	MPa
Alongamento na tração	40 - 650	%
Módulo elástico	0,39 - 2,25	GPa
µ estático	0,02 - 0,28	-

Fonte: Adaptado de (MATWEB, s.d.; Supreme Lub, s.d.).

3.2 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO AUTOLUBRIFICANTE

Fundamentado no trabalho de Salvaro *et al.*, 2023, optou-se por desenvolver 4 linhas de estudo das quais a primeira continha apenas poliftalamida e fibra de vidro enquanto que nas outras três adicionou-se 2, 5 e 15% em massa de PTFE. Acredita-se que esses valores sejam suficientes para atingir um coeficiente de atrito inferior a 0,2 e uma taxa de desgaste específica menor do que $10^{-6} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, valores estes que caracterizam um material autolubrificante (CZICHOS *et al.*, 1995). Na Tabela 3 estão dispostas as frações mássicas de cada elemento do compósito bem como a nomenclatura utilizada para cada grupo de amostras.

Tabela 3 – Nomenclatura das amostras produzidas e fração mássica dos materiais utilizados.

Denominação	PPA+Fibra de vidro (% em massa)	PTFE (% em massa)
0PTFE	100	0
2PTFE	98	2
5PTFE	95	5
15PTFE	85	15

Fonte: Autoria própria.

O PTFE é facilmente disperso na matriz de poliamida, fato que dispensa o uso de agentes compatibilizantes – como no caso do UHMWPE – reduzindo o custo de processamento (YOU *et al.*, 2013). A homogeneização dessa blenda polimérica, na maioria das vezes, é feita com o auxílio de uma extrusora de dupla rosca capaz de produzir o filamento que é posteriormente peletizado e injetado (LI *et al.*, 2013a; YOU *et al.*, 2013). No caso deste trabalho, esta etapa foi feita pelo fuso da própria injetora.

Primeiramente, secou-se os pellets de PPA por 12 horas a 100°C em atmosfera ambiente, por meio de um secador acoplado à injetora Arburg modelo 320S, a fim de remover a umidade do material. A etapa de secagem é importante pois além de promover o surgimento de defeitos de acabamento como manchas, alguns tipos de poliamidas têm suas propriedades mecânicas prejudicadas por absorverem água (JIA; KAGAN, 2001). Em seguida, os *pellets* do compósito e o pó de PTFE foram homogeneizados utilizando um moinho de múltiplos eixos da marca Hexagon modelo Alphie-3 por 30 minutos em cada direção a 30 rpm, ou seja, um processo de mistura de baixa energia. A Figura 24 ilustra o misturador utilizado. Finalmente, encaminhou-se o *feedstock* para a injetora, a qual cumpriu o papel de extrusora, proporcionando uma melhor homogeneização da mistura e fabricação dos corpos de prova.

Figura 24 - Misturador de múltiplos eixos utilizado na preparação do *feedstock*.



Fonte: Autoria própria.

3.3 PARÂMETROS DE INJEÇÃO E PÓS-PROCESSAMENTO

Em função do material ser comercializado na forma de *pellets* e do laboratório possuir duas injetoras e moldes com diversas geometrias, a injeção foi escolhida como rota de processamento. Nela diversos são os parâmetros capazes de influenciar o componente final como a velocidade, temperatura e pressão de injeção. Uma das informações presentes no

datasheet são sugestões de parâmetros como mostra a Tabela 4; todavia eles estão dispostos em intervalos bem distintos.

Com a finalidade de se atingir as melhores propriedades mecânicas e otimizar o processo de injeção, alguns estudos internos foram desenvolvidos. A ferramenta usada para isso foi o design de experimentos (DOE) e foram feitas diversas combinações desses parâmetros e os valores considerados ideais também estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de injeção testados.

	Pressão de injeção (bar)	Velocidade de injeção (mm/s)	Temperatura (°C)
<i>Datasheet</i>	1000 - 2000	100 - 150	290 - 340
Valores otimizados	1000	100	320

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que a temperatura recomendada para a injeção da PPA é inferior à temperatura de fusão do PTFE. Isso implica que ele não funde e tende a permanecer na forma de partícula no volume do compósito. Nesse caso, dependendo da disposição do PTFE na matriz do compósito, duas suposições foram feitas: 1) o PTFE foi devidamente incorporado à matriz do compósito e, apesar da baixa resistência mecânica, atua como partícula de reforço - Figura 22 (b). Ou 2) o particulado de PTFE tende a se aglomerar e forma estoques de lubrificante sólido e na forma de pó e passa a se comportar como um vazio, prejudicando as propriedades mecânicas. Para os dois casos, espera-se que a adição de PTFE contribua para as propriedades tribológicas do compósito.

Finalizado o processo de injeção, mediram-se as massas e as densidades – método de Arquimedes - das amostras injetadas, utilizando uma balança modelo XS205 da marca Mettler Toledo. Avaliou-se a eficiência do processo de injeção através do cálculo da presença de vazios nos componentes injetados, comparando a densidade teórica com a experimental – eq. 11.

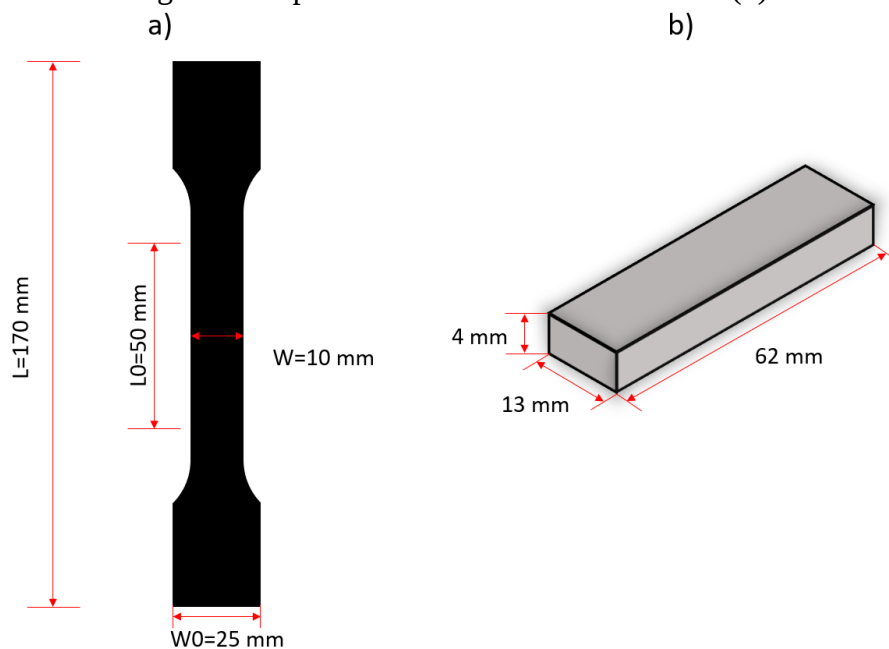
3.4 CARACTERIZAÇÕES MECÂNICAS E TÉRMICAS

Em concordância com aquilo discutido ao longo do trabalho, um dos objetivos é verificar como a introdução de um lubrificante sólido interfere nas propriedades mecânicas do compósito. Para isso, três caracterizações foram feitas: ensaios de tração para obtenção de propriedades como tensão de ruptura e módulo elástico. Os ensaios de tração seguiram a norma ISO 527. A geometria estipulada se encontra na Figura 25 (a). Os ensaios foram conduzidos

com velocidades de 5 mm/min com 5 repetições para cada condição. O equipamento utilizado foi uma máquina da marca MTS modelo Criterion Model 45, a qual comporta várias configurações de ensaio.

Junto disso, utilizou-se da lei das misturas com o intuito de comparar os valores teóricos com os experimentais. Ela é uma ferramenta amplamente utilizada para materiais compósitos e possibilita simular o comportamento mecânico desses materiais frente a alteração das fases presentes e suas proporções.

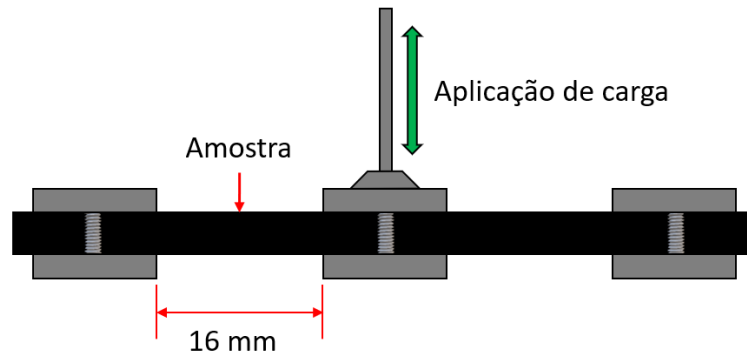
Figura 25 Amostras injetadas para ensaios de tração segundo a norma ISO 527 (a) e geometria para ensaios dinâmico-mecânicos (b).



Fonte: Autoria própria.

Além dos ensaios de tração, foram feitas análises dinâmico mecânicas (DMA) a fim de compreender a influência da adição de lubrificante no comportamento do compósito, especialmente na temperatura de transição vítrea. Esses ensaios foram realizados num equipamento DMA 242-E da marca NETZSCH, com a configuração *dual-cantilever*, como expresso pela Figura 26. As amostras utilizadas foram os paralelepípedos ilustrados na Figura 25, porém as amostras foram lixadas para reduzir sua largura para 12 mm em função da limitação do equipamento. Elas foram ensaiadas a uma frequência de 1 Hz, num intervalo de temperatura de 25 a 200°C com taxa de aquecimento de 2°C/min. A força aplicada foi de 8 N e um deslocamento de pico a pico de 25 μm .

Figura 26 – Esquemática da configuração *dual-cantilever* utilizada para o ensaio de DMA.



Fonte: Autoria própria.

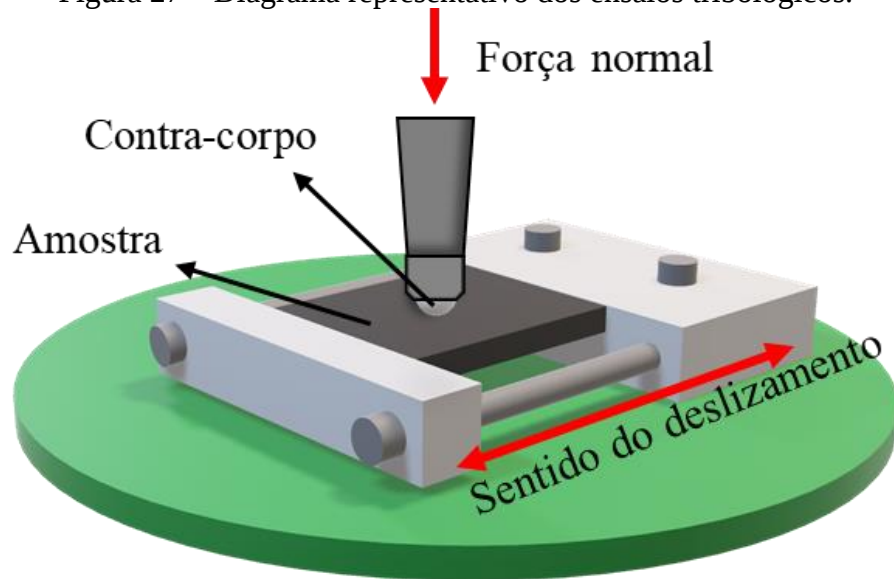
É importante salientar, que para ambas as geometrias – tração e DMA – o preenchimento da cavidade do molde ocorre no sentido do comprimento das amostras. Dessa forma, a sollicitação no ensaio de tração ocorre no sentido das fibras; já na análise dinâmico-mecânica a sollicitação é perpendicular às fibras.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DA TOPOGRAFIA E TRIBOLOGIA

Esta etapa consistiu em analisar a topografia de cada condição antes dos testes tribológicos. A caracterização topográfica foi feita por meio de um interferômetro óptico de luz branca modelo Newview 7300 da marca Zygo. A análise das topografias foi realizada na região mais extrema dos corpos de prova para tração (Figura 25(a)), uma vez que os ensaios tribológicos também foram conduzidos nessa região. Para cada condição, mapearam-se áreas de 1 mm² cada, as quais foram escolhidas aleatoriamente. Os dados foram tratados usando o software MountainsMap Universal 7.4, possibilitando a aquisição dos parâmetros de rugosidade. Para tal, preencheram-se os pontos não mensurados e nivelou-se a superfície e, observada uma ondulação mais pronunciada, utilizou-se um *cut-off* de 250 µm. Parâmetros considerados de interesse para esse trabalho foram os parâmetros funcionais Ssk, Sku, Sk, Spk e Svk, pois a partir deles é possível compreender a distribuição dos motivos da superfície e estimar o comportamento de partículas – lubrificantes ou debris – iniciado o contato e o movimento relativo.

A caracterização tribológica consistiu em ensaios de deslizamento alternado na configuração esfera no plano. O equipamento utilizado foi um tribômetro modelo UMT-4 da marca americana CERT contendo uma célula de carga de 50 kg, como ilustrado na Figura 27. O contra-corpo escolhido foi uma esfera de 10 mm de diâmetro de aço AISI 52100. Os testes foram realizados em atmosfera ambiente a temperatura de 21±2°C e umidade relativa de 40%.

Figura 27 – Diagrama representativo dos ensaios tribológicos.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios consistiram em aplicar uma força normal de 189 N sob um percurso de 10 mm a uma frequência de 2 Hz por 1 hora. Essa força foi definida em função da pressão de contato da esfera contra o material, ou seja, ela correspondeu a uma pressão máxima de 630 MPa, acima das tensões de resistências à tração (190 MPa) e de flexão (270 MPa) do material. A ideia era expô-lo a esforços mecânicos extremamente severos a fim de se avaliar o desgaste do corpo e do contra-corpo. A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados nos ensaios tribológicos.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados nos ensaios tribológicos.

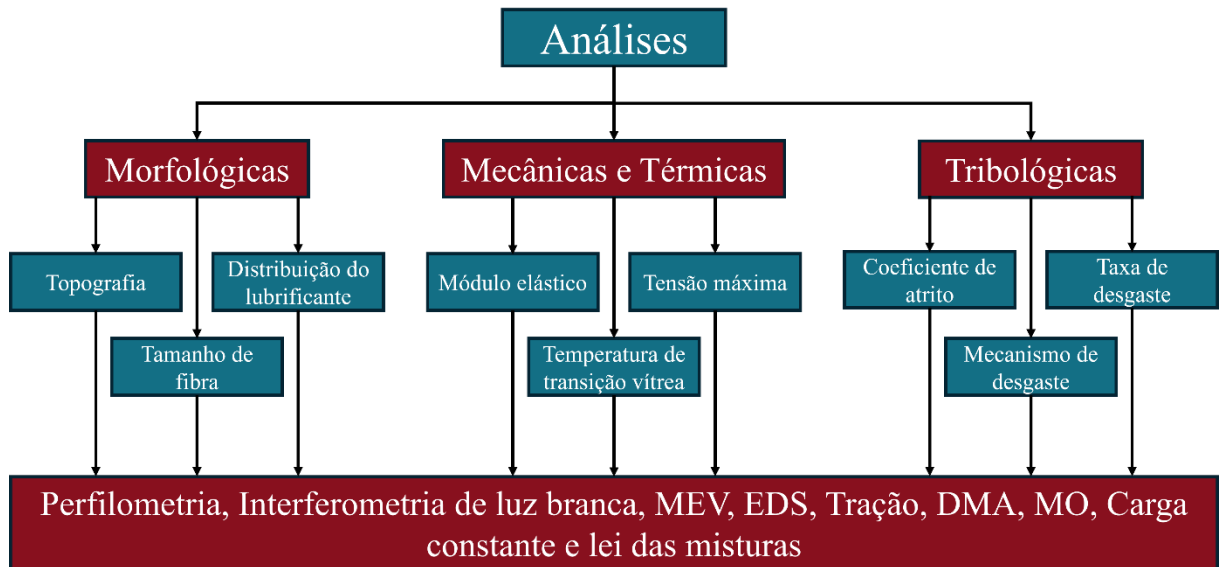
Ensaio Tribológico	
Tipo de ensaio	Desgaste
Configuração	Esfera-Plano
Movimento	Recíproco
Contra corpo	AISI 52100 (Ø10 mm)
Repetições	3
Pressão máxima (MPa)	630
Pressão média (MPa)	270
Força Normal (N)	189
Tempo (min)	60
Frequência (Hz)	2
Tamanho de pista (mm)	10

Fonte: Autoria própria.

Finalizado os ensaios no tribômetro, calculou-se a taxa de desgaste específica por meio do volume desgastado da amostra. Este foi obtido por meio de um perfilômetro de contato da marca Taylor Robson modelo Form Taylorsurf série 120 mm. Para essa etapa, utilizou-se apenas um perfil da região central da marca de desgaste, o qual foi considerado como representativo. A área do perfil obtido foi multiplicada pelo comprimento da marca de desgaste (10 mm), obtendo-se assim o volume desgastado. Novamente, o software utilizado para tratar esses dados foi o MountainsMap.

Finalizados os ensaios tribológicos, as amostras foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Tescan modelo Vega3 LM, onde se analisou a região desgastada, sua morfologia, a distribuição do lubrificante ao longo da região de contato e uma análise da topografia do compósito. Esse mesmo equipamento possibilitou realizar análises qualitativas dos elementos presentes no compósito por meio da espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) aliada as imagens de elétrons retroespalhados (BSE). A Figura 28 contempla todas as propriedades estudadas neste trabalho bem como as análises associadas a elas.

Figura 28 – Propriedades analisadas e rotas utilizadas para sua caracterização.



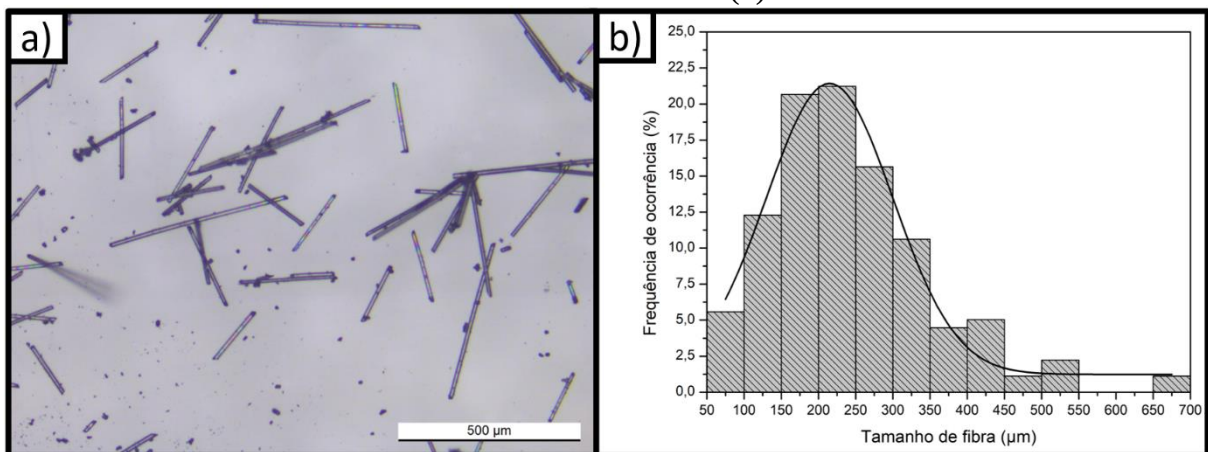
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

Um dos primeiros resultados obtidos foi o tamanho de fibra presente na poliamida como recebida do fornecedor. Degradada a matriz polimérica, realizaram-se 180 medições com auxílio do MO e o valor médio encontrado foi de 242 μm . Os vários comprimentos mensurados possibilitaram a construção de uma curva – Figura 29 – correlacionando o tamanho de fibra e a frequência de ocorrência. Vale ressaltar que essa análise visou compreender apenas como era a distribuição dessas fibras no material base e que, devido à injeção, não necessariamente é a mesma no compósito injetado.

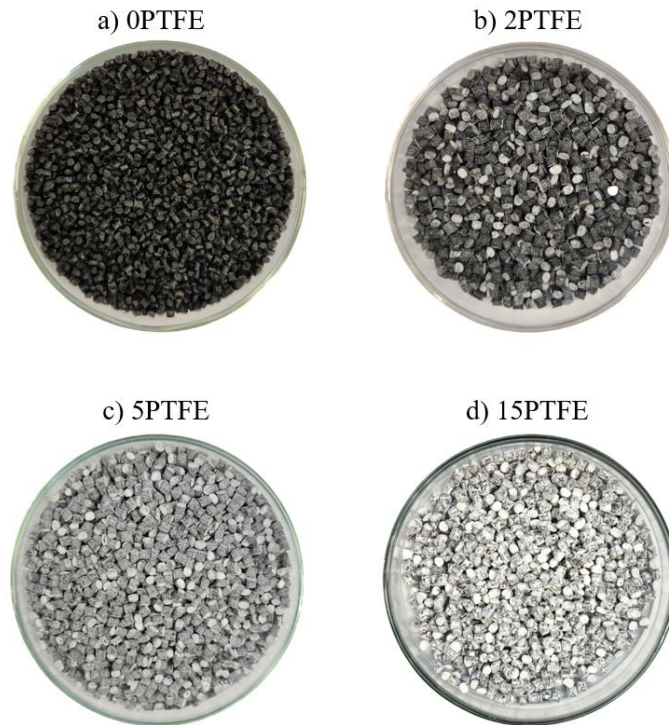
Figura 29 – Observação das fibras de vidro via microscopia óptica (a) e curva de distribuição de tamanho das fibras (b).



Fonte: Autoria própria.

É possível notar a eficiência do processo de mistura, uma vez que se identificou uma mudança na aparência dos pellets após a adição do lubrificante. A Figura 30 (a) mostra a diferença do material base e como sua coloração muda conforme mais PTFE adere à superfície. Ao fim da mistura, as condições contendo 2 e 5% em massa de PTFE conseguiram incorporar todo esse volume de lubrificante às suas superfícies – Figura 30 (b,c). Porém, na condição com 15% ocorreu a saturação dos pellets e parte do lubrificante se concentrava no fundo do misturador.

Figura 30 – *Pellets* do compósito original (a) e aqueles contendo 2 (b), 5 (c) e 15% (d) em massa de lubrificante sólido.



Fonte: Autoria própria.

4.2 PÓS-PROCESSAMENTO

4.2.1 Densidade e volume de vazios

A densidade teórica foi estimada em função das densidades da PPA e do PTFE – eq. 10. Já para a densidade experimental, utilizou-se do princípio de Arquimedes que correlaciona a massa de um objeto com a sua massa enquanto submerso num fluido. A Tabela 6 apresenta os valores encontrados para as densidades e a fração volumétrica de vazios.

Tabela 6 – Densidades teóricas, experimentais e presença de vazios dos compósitos produzidos.

Condição	Densidade teórica (kg/m ³)	Densidade experimental (kg/m ³)	Vazios (%)
0PTFE	1370	1368 ± 2	0,14
2PTFE	1380	1379 ± 4	0,07
5PTFE	1396	1388 ± 1	0,57
15PTFE	1450	1440 ± 1	0,7

Fonte: Autoria própria.

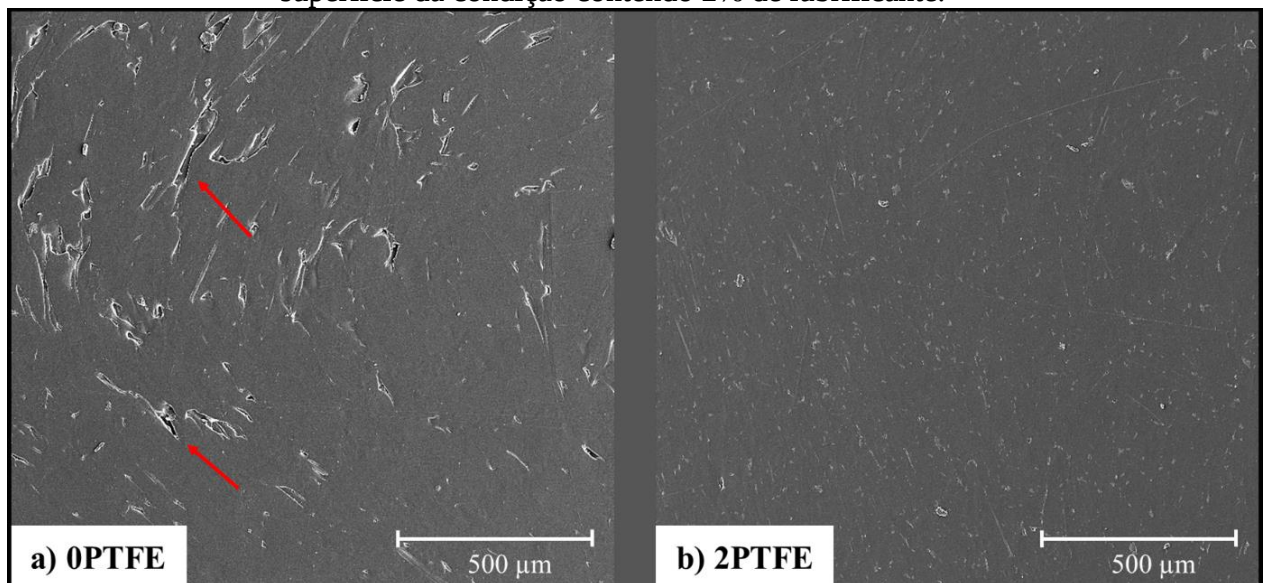
Apesar de pequena, a quantidade de vazios é sempre vista como prejudicial para as propriedades mecânicas. Seu tamanho e geometria fazem com que eles atuem como concentradores de tensão. Ou seja, pequenos raios de arredondamento que aumentam a intensidade da tensão em uma região diminuta quando o material sujeito a esforços. Essas regiões são pontos suscetíveis a nucleação e propagação de trincas.

Percebe-se que a injeção do material base resultou em valores muito pequenos para a presença desses vazios, com o maior valor encontrado sendo para a condição 15PTFE com 0,7%. Apesar de baixa, a quantidade de vazios diminui em 50% ao se adicionar 2% em massa de PTFE e voltou a crescer ao passo em que se adicionou cada vez mais lubrificante. Saenz-Castillo *et al.* (2019) afirmam que aplicações rigorosas toleram frações volumétricas de 1 a 2% enquanto outras chegam até 5% desses defeitos.

4.2.2 Microestrutura do compósito

Os resultados referentes às superfícies concordam com os valores obtidos para a presença de vazios. A Figura 31 (a) mostra como é a superfície da condição sem lubrificante e como ela contém uma série de descontinuidades. Enquanto isso, a Figura 31 (b) traz a típica superfície da condição contendo 2% de PTFE.

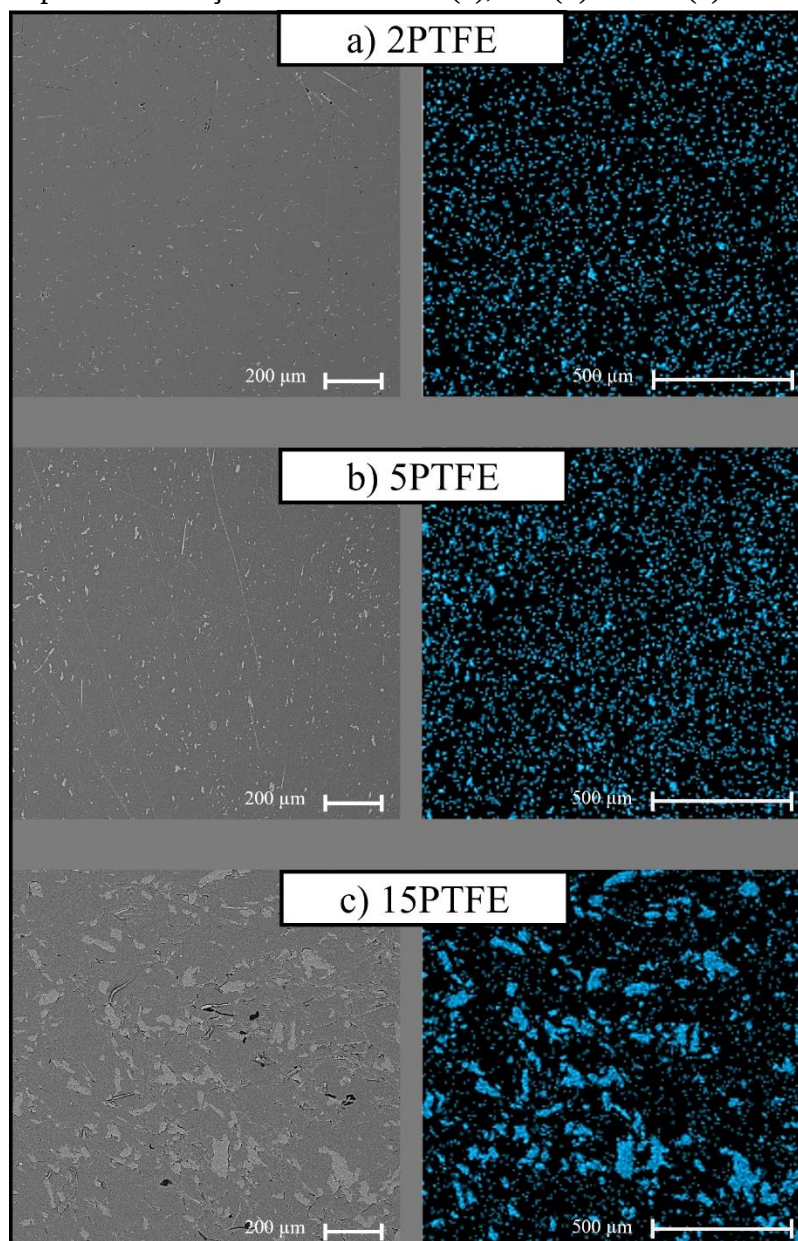
Figura 31 – Superfície do compósito sem lubrificante evidenciando seus defeitos (a) e típica superfície da condição contendo 2% de lubrificante.



Fonte: Autoria própria.

O principal defeito evidenciado na condição sem lubrificante são pequenas descontinuidades na superfície, as quais tendem a diminuir com a introdução de pequenas quantidades de lubrificante. Após a adição, a superfície mostrou-se mais homogênea e, visualmente, a quantidade de defeitos diminui. Além disso, observou-se o surgimento de uma segunda fase. Na Figura 32, a coloração mais clara na imagem em modo BSE indica que ela é composta por átomos mais pesados, como o flúor. Neste caso, acredita-se que essas regiões surgiram devido a aglomeração de partículas de lubrificante sólido. Uma rápida análise via EDS detecta a presença de flúor conforme o esperado.

Figura 32 – A esquerda imagem de elétrons retroespalhados e a direita a presença de flúor obtida por EDS para as condições contendo 2% (a), 5% (b) e 15% (c) em massa de PTFE.



Fonte: Autoria própria.

Para a condição contendo 2% de PTFE, a análise de EDS mostrou que o lubrificante estava distribuído de forma homogênea ao longo do compósito; com pequenos aglomerados pontuais. O mesmo ocorre para a condição 5PTFE, que além de uma maior concentração de lubrificante, também apresenta um aumento desses estoques.

A microestrutura do compósito muda drasticamente para a condição 15PTFE. Nela, a segunda fase de lubrificante sólido é mais evidenciada, com estoques de PTFE que apresentam dimensões significativas (200 μm) - Figura 33 (c). O lubrificante, que nas condições 2PTFE e 5PTFE, estava distribuído de maneira homogênea ao longo do volume, na condição 15PTFE passa a se concentrar em estoques. Três são os fatores identificados como responsáveis para que isso ocorra. O primeiro é a grande quantidade de lubrificante presente no compósito. Por meio da lei das misturas e da densidade dos materiais utilizados, obteve-se a fração volumétrica de PTFE para cada uma das condições: elas contêm 1,27; 3,20 e 9,98% em volume de lubrificante, respectivamente. Da mesma forma que a superfície dos *pellets* estava saturada de PTFE – Figura 31 (d), algo semelhante ocorre para a matriz, a qual atinge seu limite de solubilidade para PTFE. Essas frações volumétricas tornam-se ainda mais significativas, uma vez que o restante do volume do compósito contempla não apenas a matriz de PPA; mas também a fase de reforço.

Os outros dois pontos estão relacionados à temperatura de fusão do PTFE e o seu tamanho de partícula. De acordo com o fornecedor, o lubrificante em questão funde a 330°C; contudo, a injeção das amostras ocorreu a 320°C. Espera-se, assim, que ele tenha permanecido na forma de um particulado. Aliado a isso, o pequeno tamanho de partícula ($\sim 2,5 \mu\text{m}$) favorece uma elevada energia de superfície. Na preparação do *feedstock*, já se identificou essa tendência que o pó de PTFE tinha em formar grânulos maiores.

Existem duas maneiras de se interpretar o impacto desses estoques nas propriedades do material. De um ponto de vista tribológico, eles favorecem a presença de lubrificante entre as superfícies em contato e movimento relativo. Isso resulta na constante renovação do filme lubrificante enquanto se mantém um baixo coeficiente de atrito. O simples fato desses estoques serem compostos por partículas facilita ainda mais sua dispersão no contato tribológico, já que a força necessária para cisalhá-los é menor.

Em relação ao caráter mecânico, os estoques, por serem um aglomerado de partículas, não agregam nas propriedades do material. Eles equivalem a vazios e, a depender da sua geometria, atuam como concentradores de tensões. As partículas dispersas uniformemente ao longo do volume também se comportarão como vazios devido ao baixo coeficiente de adesão do PTFE com a matriz - ligações fracas na interface PTFE-PPA.

4.3 ANÁLISES DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

Um dos objetivos desse trabalho foi mensurar como a adição de lubrificante sólido modificou as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos. A seguinte seção apresenta os principais resultados obtidos bem como teorias a fim de se compreender como e o porquê dessas alterações.

4.3.1 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração permitiram identificar diversas propriedades do material, como: módulo elástico, tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongamento, tenacidade, entre outros. Entretanto, optou-se por focar apenas em duas destas propriedades: o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura (TR). O motivo para isso é que por meio da lei das misturas foi possível estabelecer um comparativo entre os valores calculados para essas propriedades e aqueles obtidos de forma experimental.

Na Figura 33, observa-se a fixação do corpo de prova para os ensaios de tração junto da presença do extensômetro. Este é o responsável por medir a deformação da amostra frente a aplicação de uma carga, o que dá origem ao segmento de reta utilizado para calcular o módulo elástico. Uma vez que o *datasheet* não fornece os parâmetros de injeção para se alcançar as propriedades desejadas; os valores considerados reais para o material puro foram os encontrados por meio dos ensaios da condição OPTFE.

Figura 33 – Disposição da amostra e fixação do extensômetro durante o ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

A primeira propriedade analisada foi o módulo de elasticidade. Para a execução dos cálculos, duas foram as suposições feitas: dada a temperatura de injeção, os estoques de lubrificantes consistem em aglomerados de partículas e por isso não possuem resistência mecânica alguma. A segunda é que as partículas dispostas de maneira aleatória no volume não interagem com a matriz de PPA em função do baixo coeficiente de adesão do PTFE. Essencialmente, assumiu-se que todo o lubrificante adicionado ao compósito se comporta como vazios, de modo que sua contribuição para as propriedades mecânicas é nula. Isso faz com que o módulo elástico teórico seja apenas a fração volumétrica de PPA e fibra de vidro multiplicada pelo módulo da condição 0PTFE. A Tabela 7 traz um compilado entre os valores do módulo obtidos de forma experimental e teórica.

Tabela 7 – Comparativo entre valores experimentais e teóricos para o módulo elástico.

	Módulo Elástico (GPa)	Módulo Elástico Teórico (GPa)
0PTFE	11,7 ± 0,2	11,7
2PTFE	11,5 ± 0,2	11,6
5PTFE	11,4 ± 0,2	11,4
15PTFE	10,5 ± 0,4	10,6

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que para as condições 2 e 5PTFE, em função das pequenas quantidades de lubrificante – 1,27 e 3,2% em volume, respectivamente; não foi possível mensurar a variação do módulo pois os valores se encontram dentro da dispersão. Essa diferença foi identificada na condição 15PTFE, onde o volume de PTFE é elevado e o módulo decai em aproximadamente 1,1 GPa. Os resultados obtidos mostram que neste caso, a lei das misturas permitiu estimar as propriedades finais do compósito. Em seguida, os mesmos cálculos foram feitos para a tensão de ruptura do compósito e elas estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparativo entre valores experimentais e teóricos para a tensão de ruptura.

	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Ruptura Teórica (MPa)
0PTFE	166,8 ± 3,1	166,8
2PTFE	153,6 ± 2,4	164,6
5PTFE	152,5 ± 3,9	161,4
15PTFE	142,1 ± 1,1	150,1

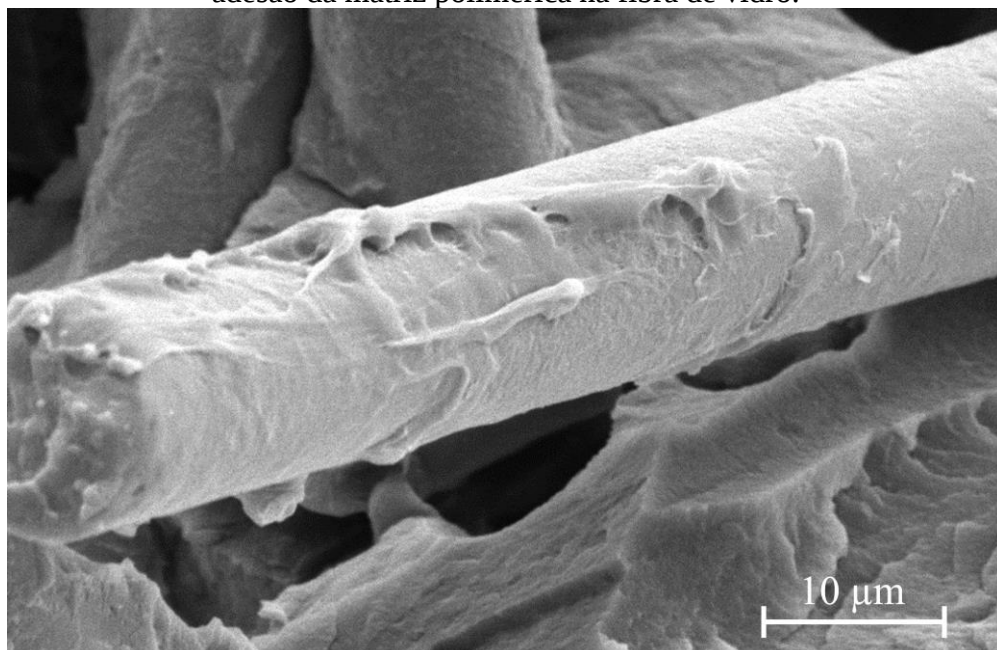
Fonte: Autoria própria.

Diferentemente do módulo elástico, a TR tem uma redução maior do que aquela informada pela lei das misturas. A adição de PTFE reduziu esses valores em 7,9%, 8,5% e 14,8%, respectivamente. Algumas são as proposições do porquê isso ocorreu. A equação utilizada foi a da lei das misturas simplificada (eq. 12) e ela não contabiliza como as diferentes fases do compósito interagem entre si e a morfologia do compósito.

Neste caso, acredita-se que o modelo matemático mais adequado para estimar a tensão de ruptura seria o modelo apresentado na [eq. 19](#). Como discutido, ele apresenta uma série de fatores de correção para melhor se aproximar da realidade. Neste caso, a eficiência da fase de reforço (β) já é conhecida. Entretanto, mensurar a eficiência do recobrimento da fase de reforço pela matriz (λ) e a razão de cisalhamento matriz-partícula (γ) requer um maior aprofundamento da temática e foge ao escopo do trabalho. Entretanto, uma análise de fratura do compósito OPTFE – Figura 34 - revelou uma boa molhabilidade da matriz na fibra, resultando num bom ancoramento da fibra na matriz. Essa característica além de ser fundamental perante as propriedades mecânicas do compósito, é um indicativo de que λ seria suficientemente alto – próximo de 1.

Outra possível explicação para essa diferença nas tensões de ruptura é a morfologia dos estoques de lubrificante. Como mencionado, geometrias mais complexas e irregulares atuam como concentradores de tensão, promovendo assim a nucleação e propagação de eventuais trincas.

Figura 34 – Imagem de MEV de uma fratura do compósito OPTFE onde se observa uma forte adesão da matriz polimérica na fibra de vidro.



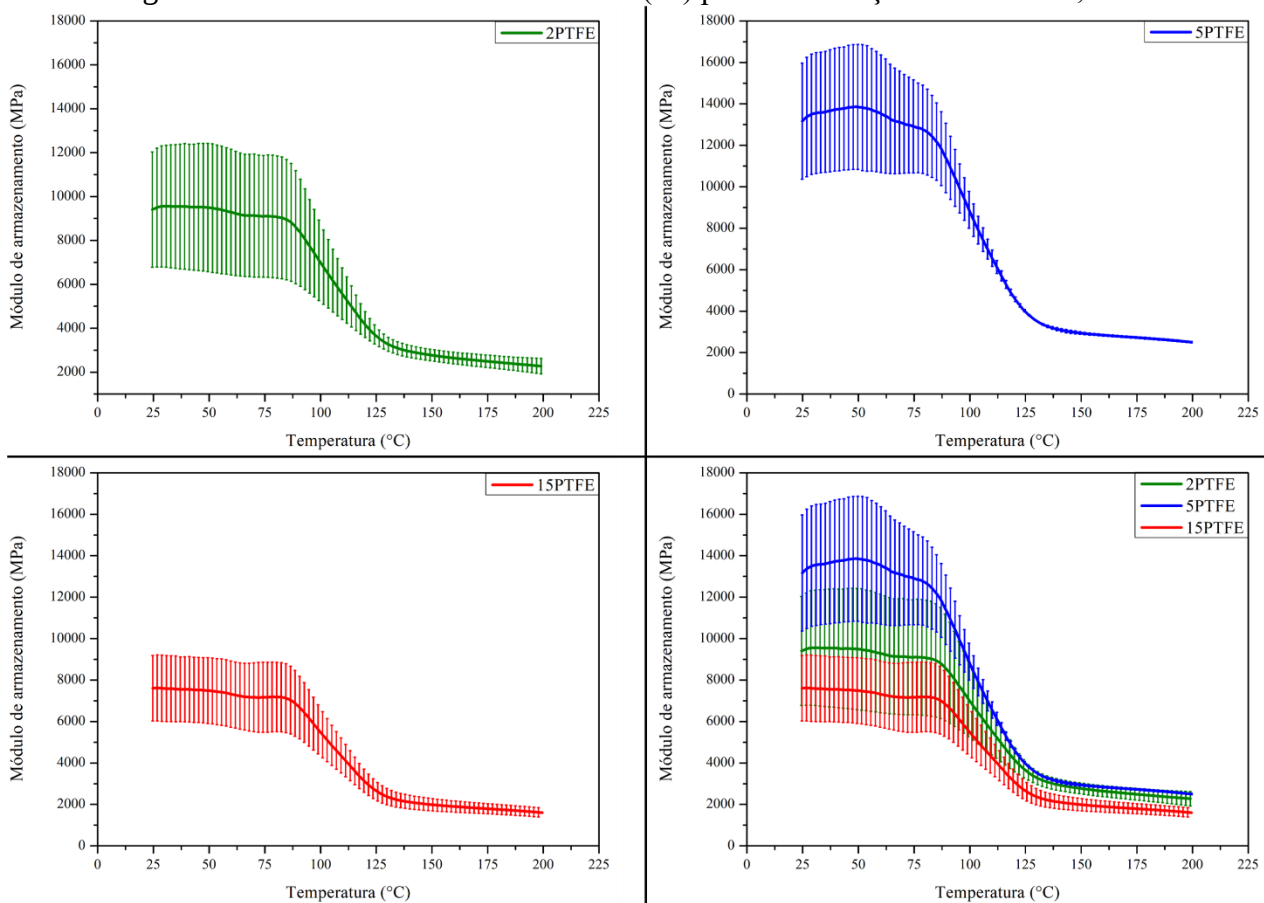
Fonte: Autoria própria.

Outra possível explicação é a formação dos estoques de lubrificante que atuam como concentradores de tensão, e isso ocorreu principalmente na condição 15PTFE. Na Figura 33 percebe-se o quão irregular é a geometria desses estoques e como ela poderia promover a nucleação de uma trinca. Ressalta-se que apesar da significativa adição de PTFE, as propriedades mecânicas não foram severamente alteradas. Mesmo a variação entre os valores das tensões experimentais e as calculadas não apresentar grande disparidade, reitera-se a importância conciliar prática e teoria.

4.3.2 Análises dinâmico-mecânicas (DMA)

Nesta seção, serão discutidas as duas propriedades mensuradas por meio dos ensaios de DMA: o módulo de armazenamento e a temperatura de transição vítrea, bem como a maneira que elas variam em função da adição de PTFE como lubrificante sólido. A Figura 35 mostra as curvas médias obtidas para as 3 condições contendo 2, 5 e 15% de PTFE

Figura 35 – Módulos de armazenamento (E') para as condições contendo 2, 5 e 15PTFE.



Fonte: Autoria própria.

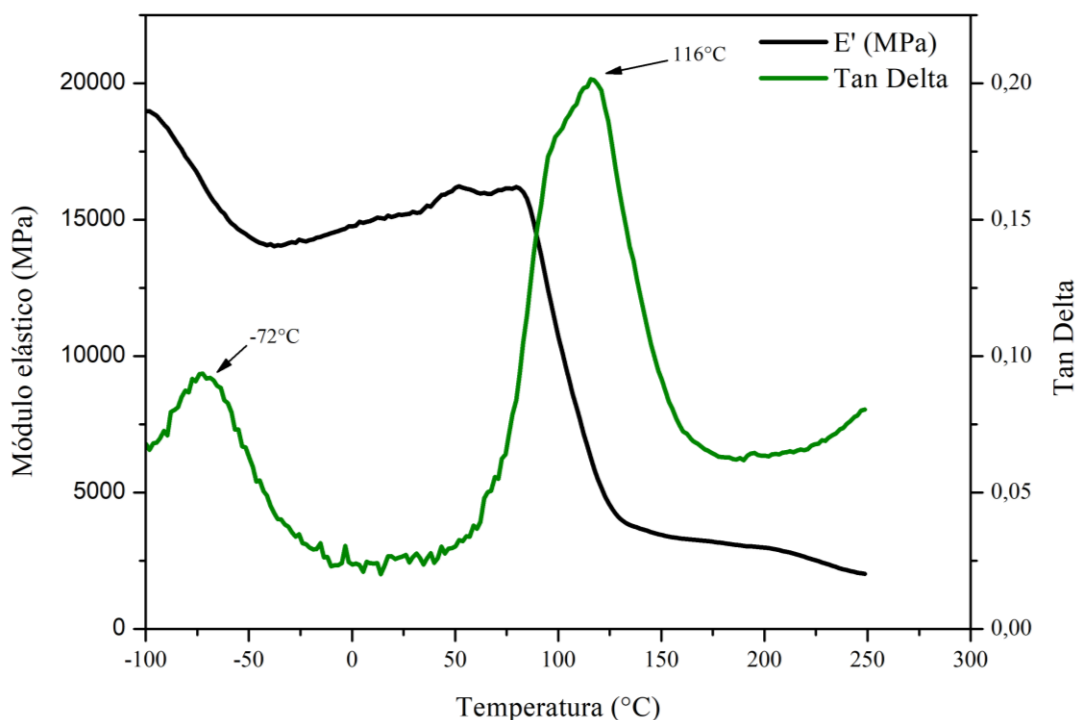
O primeiro resultado ao se analisar as curvas de maneira individual, é a ampla variação dos resultados obtidos, visto que os módulos de armazenamento obtidos (E') para as condições de 2, 5 e 15% de PTFE foram de $9,5 \pm 2,6$ GPa, $13,2 \pm 2,8$ GPa e $7,6 \pm 1,6$ GPa, respectivamente; o que pode dificultar a interpretação dos resultados.

Uma das hipóteses propostas para justificar essa variação no módulo de armazenamento seria a influência do PTFE na estrutura do compósito, que poderia alterar de alguma maneira o seu comportamento frente a solicitação mecânica. Entretanto, dois pontos levantados contradizem essa linha de raciocínio. O primeiro sendo o fato de que a condição contendo 5PTFE apresentou um E' cerca de 40% maior do que a condição 2PTFE e volta ela decai para a condição 15PTFE, o que poderia ser um indicativo de um ponto ótimo de lubrificante. Entretanto, caso o PTFE realmente alterasse de forma tão significativa as propriedades mecânicas do material, esperava-se que essa dispersão também estivesse presente nos valores de módulo elástico e tensão de ruptura previamente discutidos.

O segundo ponto, e provavelmente o responsável por essa variação, está relacionado ao preparo das amostras para o ensaio. Conforme mencionado, as amostras foram lixadas manualmente a fim de se atingir as dimensões comportadas pelo equipamento. Acredita-se que esta etapa possa ter introduzido estresses mecânicos e térmicos nas amostras dada a severidade do lixamento. Inclusive, algumas amostras foram descartadas, pois, finalizada a preparação, elas apresentavam distorções em suas geometrias. Além disso, a maioria dos ensaios apresentou ruído para os valores de E' e $\tan \delta$ (Tan δ) – evidenciado na Figura 36. A hipótese de o processo de preparação interferir nos resultados é suportada pelos valores obtidos para E' na condição 0PTFE. O módulo encontrado foi de $1,1 \pm 0,1$ GPa, tão baixo que ele foi removido da Figura 35 por aparentar um comportamento linear perante a escala das outras condições.

Os resultados obtidos para os módulos de armazenamento não são satisfatórios, dado o fato das curvas se sobreporem em função da dispersão e dos valores de E' encontrado para 0PTFE se destoarem muito dos demais. Por isso, não foi possível mensurar a influência do PTFE nessa propriedade do material. A fim de contornar esse problema, seria necessário adaptar o molde de injeção para que as amostras sejam produzidas dentro da tolerância dimensional do equipamento de DMA. Isso eliminaria a necessidade de uma etapa de preparação e, possivelmente, reduziria a dispersão de valores e ruídos observados.

Figura 36 – Módulo de armazenamento e Tan δ a condição 2PTFE bem como as duas temperaturas de transição vítrea encontradas.



Fonte: Autoria própria.

Já em relação a temperatura de transição vítrea, ela foi calculada tanto por meio do módulo de armazenamento quanto por tan delta. De maneira simplificada, a temperatura de transição é identificada como a temperatura na qual E' sofre uma súbita alteração. Por meio desse método, os compósitos contendo PTFE apresentaram uma temperatura de transição vítrea de aproximadamente 90°C, já na condição 0PTFE isso ocorreu a 116°C; o que indica uma redução significativa dessa temperatura com a adição do lubrificante sólido. Percebeu-se também que os módulos obtidos apresentavam certa inclinação, o que poderia ser um indicativo de uma segunda temperatura de transição vítrea; possivelmente abaixo de 0°C.

Com isso em mente, um único ensaio foi conduzido com a condição 2PTFE, na qual a faixa de temperatura explorada foi de -100 a 250°C – Figura 36. A análise de E' indicou uma Tg de 90°C como identificado para as outras condições. Por meio da análise de tan delta, identificou-se uma segunda Tg a -72°C e outra a próxima a 116°C. Tan delta corresponde a razão entre a resposta viscosa (módulo de perda - E'') e elástica do polímero (E') e nos picos de máximo, onde a derivada é zero, é possível identificar a Tg. A Tabela 9 expõe os valores encontrados para essa temperatura. Já em relação aos valores de tan delta, eles permaneceram muito próximos para todas as condições (aproximadamente 0,17).

Tabela 9 – Valores encontrados para a temperatura de transição vítrea por meio da Tan δ .

Temperatura de Transição Vítrea (°C)	
0PTFE	131,0 $\pm$ 2,0
2PTFE	118,0 $\pm$ 2,4
5PTFE	118,0 $\pm$ 2,8
15PTFE	119,2 $\pm$ 1,2

Fonte: Autoria própria.

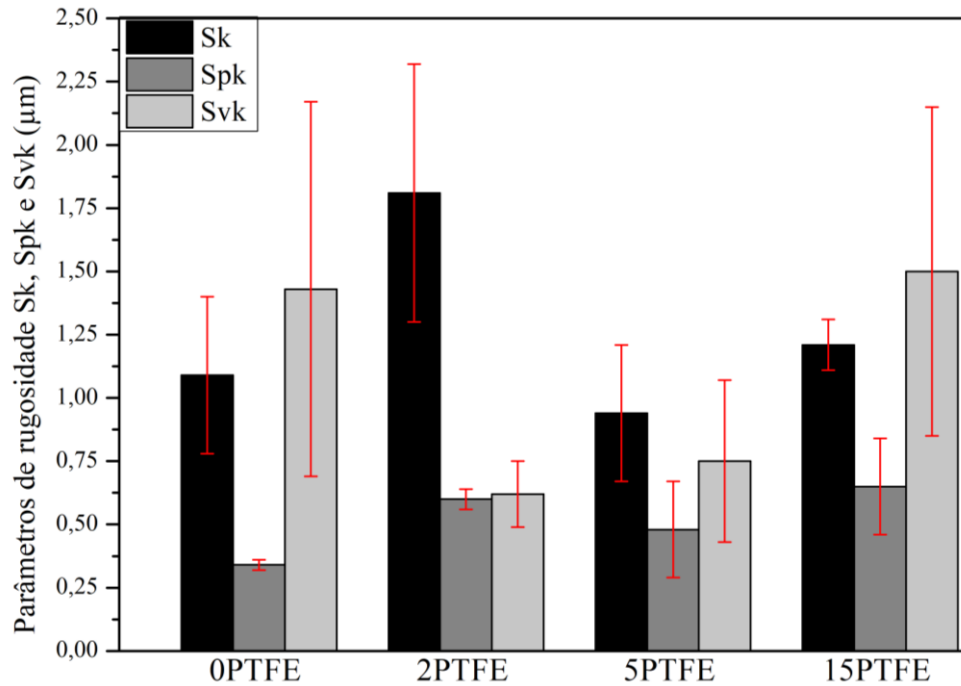
A análise das curvas de Tan δ revelou que a adição de PTFE, por menor que seja, é suficiente para reduzir ligeiramente a temperatura de transição vítrea do compósito em questão. Em relação ao valor para Tan δ , ele se mostrou relativamente estável para todas as condições; um indicativo de que apesar dos compósitos autolubrificantes terem sofrido uma redução na temperatura em que podem ser empregados, sua capacidade de dissipar energia não foi afetada de forma significativa.

Visto que se apresentou duas formas de se calcular a Tg de um material e ambas resultam em valores distintos para essa propriedade, faz-se um adendo em relação às suas aplicações. A Tg obtida por meio da redução do módulo de armazenamento é utilizada principalmente no design de componentes; uma vez que a integridade estrutural e a resposta do material a esforços mecânicos são severamente afetadas. Já a temperatura obtida por tan delta, é de interesse quando se estuda o comportamento do material em função da introdução de aditivos, por exemplo, e se o material tende a dissipar energia por meio da componente elástica ou se ela é transformada em energia elástica.

4.4 TOPOGRAFIA

A Figura 37 ilustra os valores de Sk, Spk e Svk para as quatro condições. A superfície do componente injetado é um reflexo do acabamento do molde aliado aos devidos parâmetros de injeção. Entretanto, observou-se um aumento de cerca de 66% no valor de Sk para a condição 2PTFE, para as demais condições os valores de Sk tendem a se aproximar da condição 0PTFE.

Figura 37 – Valores para S_k , S_{pk} e S_{vk} obtidos por interferometria de luz branca para as quatro condições.



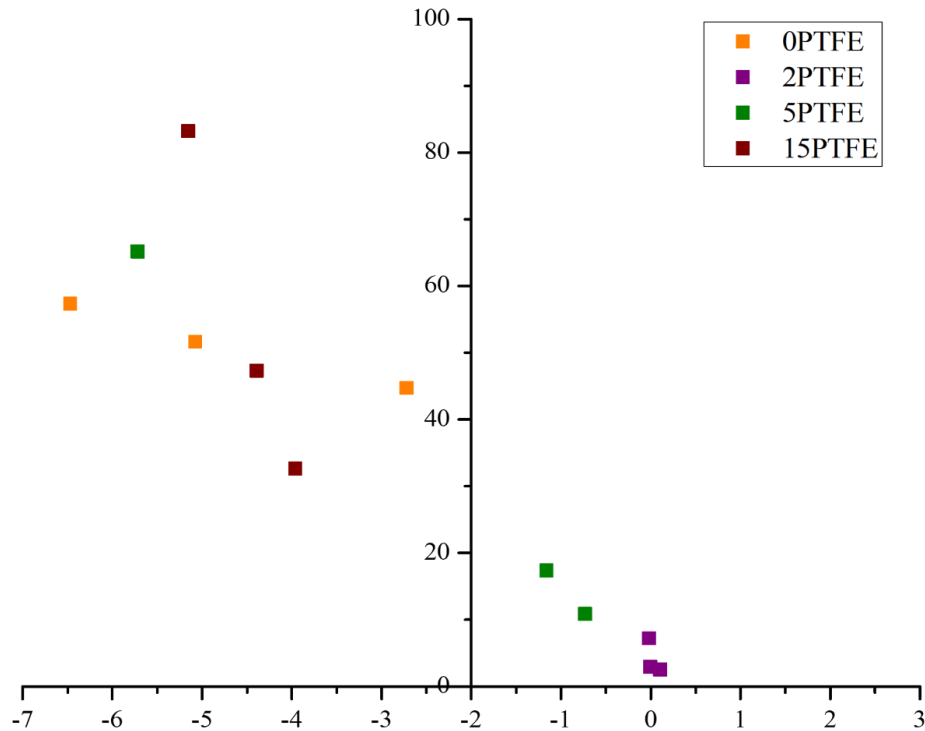
Fonte: Autoria própria.

Os valores encontrados para a altura reduzida de pico indicam que uma fração pequena de material será removida dada a aplicação da força e início do movimento relativo. Isso reflete diretamente na quantidade de debris que serão formados no início do processo de desgaste.

Referente à profundidade reduzida de vale, notou-se uma redução considerável desse parâmetro para as condições 2 e 5PTFE: 57 e 48%, respectivamente. Valores elevados para S_{vk} podem ser interessantes do ponto de vista tribológico pois autores como Ebersbach *et al.* afirmam que eles estão diretamente ligados à capacidade da superfície de reter tanto lubrificantes fluidos ou sólidos bem como eventuais debris. Isso ocorrerá caso as dimensões dos vales sejam significativamente maiores do que as dimensões das partículas presentes na região de contato e movimento relativo.

Junto disso, compreendeu-se como esses vales e asperidades estavam distribuídos ao longo da superfície por meio da sua assimetria (S_{sk}) e curtose (S_{ku}). Construiu-se o espaço morfológico com o intuito de facilitar a visualização desses parâmetros - Figura 38. Apesar da dispersão de valores, foi possível estabelecer algumas correlações.

Figura 38 – Espaço morfológico criado a partir da curtose e da assimetria para as quatro condições.



Fonte: Autoria própria.

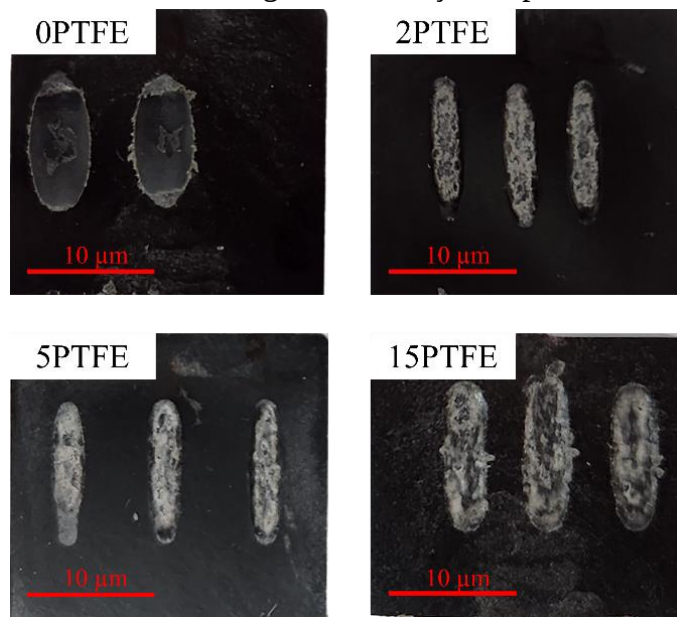
O principal resultado que se obteve é que a condição 2PTFE possui uma superfície simétrica em relação à presença de picos e vales indicado pelo valor de S_{sk} que tende a zero. Além disso, como a curtose se aproxima de 3, afirma-se que a distribuição das alturas dos elementos da superfície se ocorre de forma normal (mesocúrtica) em relação à linha média.

Com relação às outras condições, especialmente para a 0 e 15PTFE, observou-se uma diferença significativa dessas distribuições e alturas dos constituintes da superfície. De imediato, percebe-se que a superfície deixou de ser simétrica e passou a exibir uma maior presença de vales, representado por um valor negativo para S_{sk} . Junto disso, valores elevados de curtose ($S_{ku} \gg 3$) sugerem que as alturas dos motivos da superfície, neste caso dos vales, se destoam muito da linha média, indicado por uma distribuição leptocúrtica. Com a finalidade de gerar novos estoques e disponibilizar PTFE durante o contato, a predominância de vales mostra-se favorável à componente autolubrificante dos compósitos.

4.5 TRIBOLOGIA

Os resultados dos ensaios de carga constante foram surpreendentes, pois mesmo quando o material foi submetido a uma carga elevada (189 N – 630 MPa), constata-se a significativa influência da adição do lubrificante sólido nas propriedades tribológicas, especificamente na taxa de desgaste e no coeficiente de atrito. Essa redução no desgaste pode ser observada de maneira macroscópica – Figura 39.

Figura 39 - Evolução das marcas de desgaste em relação ao percentual de lubrificante sólido.



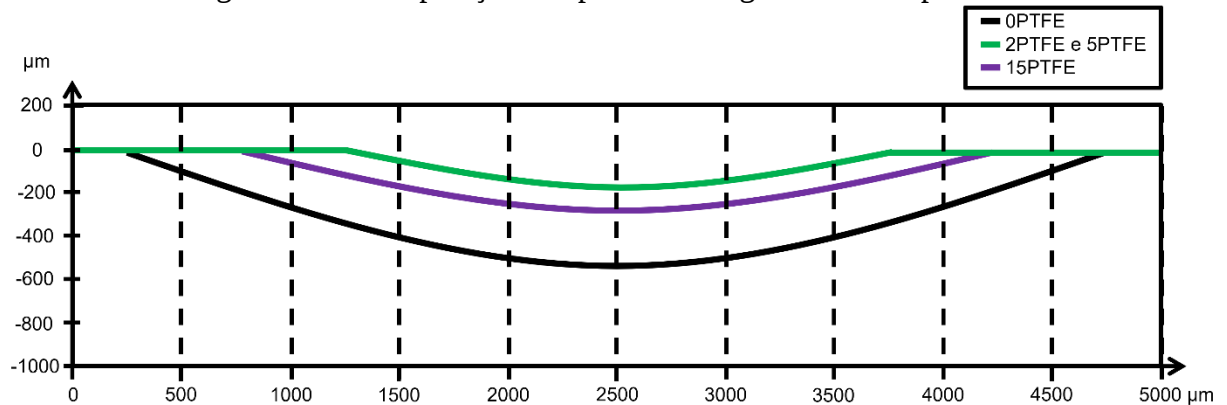
Fonte: Autoria própria.

As marcas de desgaste da condição 0PTFE apresentaram uma largura próxima a 5 mm (equivalente ao raio do contra corpo), acompanhada de uma taxa de desgaste de $5,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Paralelamente, os compósitos 2 e 5PTFE apresentaram uma taxa de desgaste de $1,0 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ e as profundidades e larguras das marcas diminuíram significativamente. O desgaste volta a aumentar para maiores concentrações de PTFE, atingindo $2,3 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ para 15% de PTFE.

Por meio de uma rápida análise visual das marcas de desgaste, suspeita-se da presença de PTFE na interface de contato, indicado pela coloração esbranquiçada, característica desse material – Figura 39. Para melhor visualizar o efeito da adição de lubrificante, criou-se um perfil médio de desgaste, levando em conta os dados retirados da perfilometria de contato. Na Figura 40, fez-se a sobreposição de forma manual, mas em escala, dos perfis típicos para cada compósito. Ressalta-se o fato de que tanto para essa análise quanto para as taxas de desgaste,

os valores trabalhados pertencem à região central das marcas e de que ela não é representativa da rugosidade da superfície, mas sim das larguras e profundidades das marcas de desgaste.

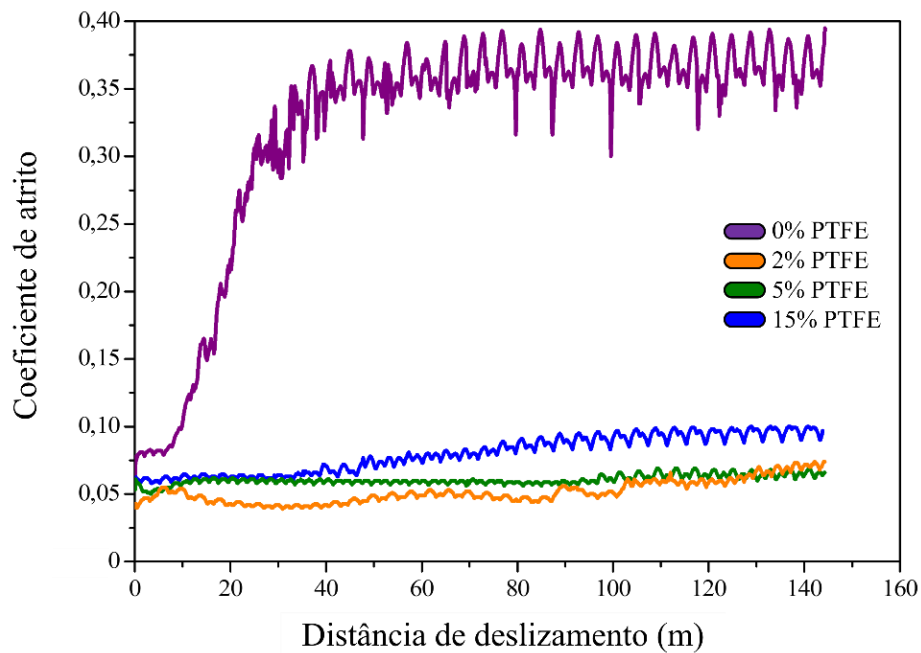
Figura 40 – Sobreposição dos perfis de desgaste dos compósitos.



Fonte: Autoria própria.

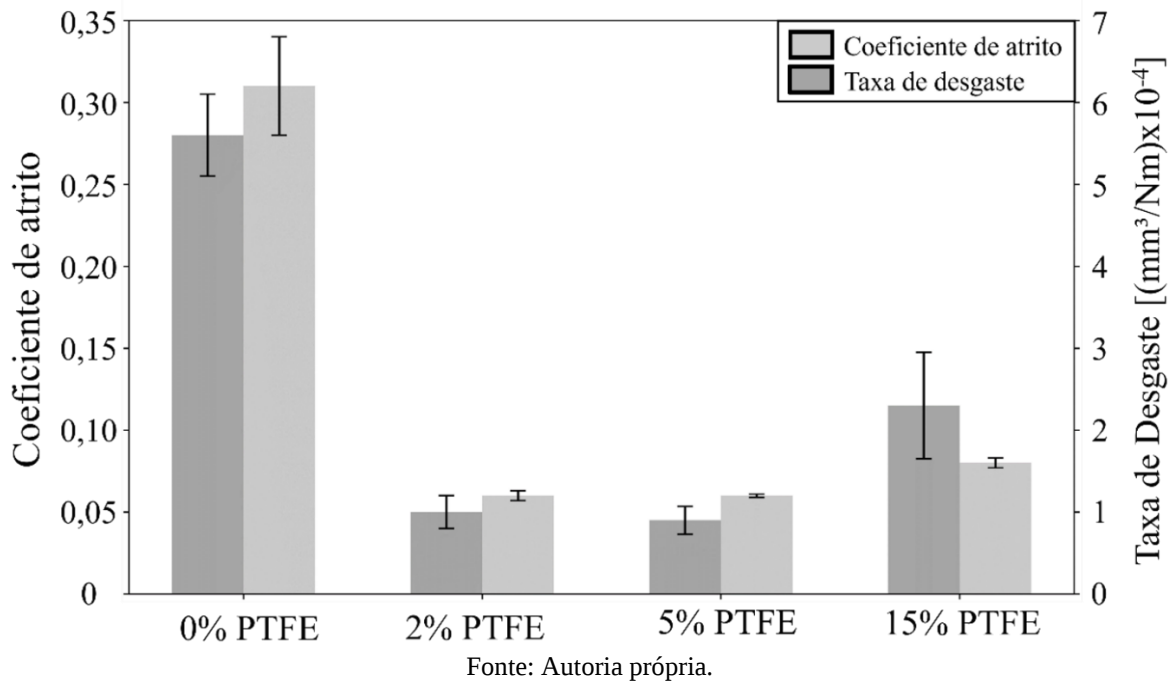
Com a adição de PTFE, o coeficiente de atrito cai drasticamente – Figura 41. A medida que o lubrificante é disperso da interface de contato, forma-se de um filme capaz de reduzir a adesão da polifitalamida no contra-corpo, o que favorece a redução do atrito, e, eventualmente, do desgaste do sistema. A Figura 42 correlaciona o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste médios para cada um dos tribosistemas estudados.

Figura 41 - Comportamento típico do coeficiente de atrito para os tribosistemas estudados.



Fonte: Autoria própria.

Figura 42 - Taxas de desgaste e coeficiente de atrito dos tribosistemas.



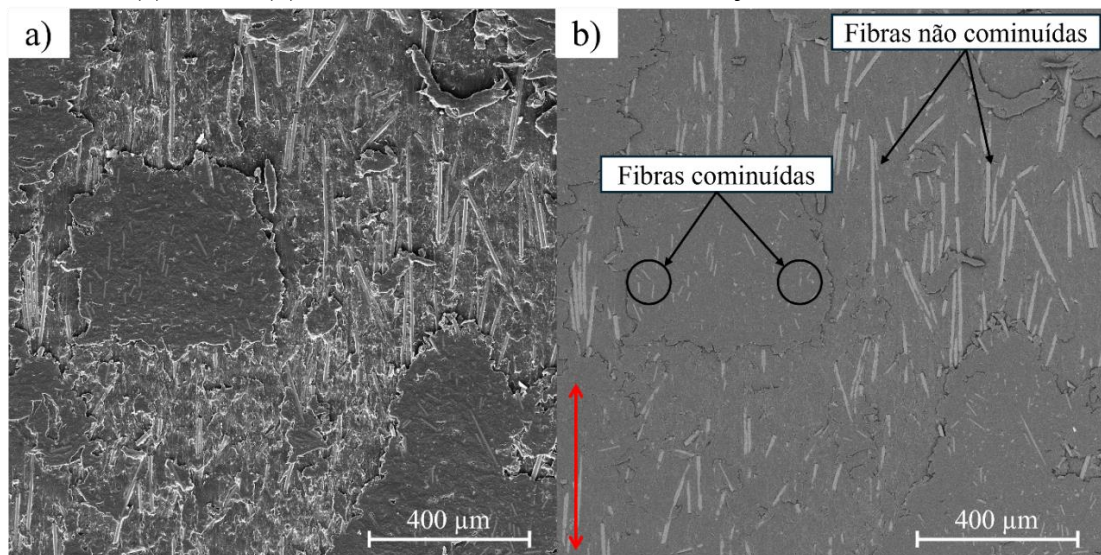
As condições contendo 2 e 5% em massa de PTFE apresentaram resultados muito semelhantes para o desempenho tribológico. Aumentando ainda mais essa carga de PTFE (15PTFE), o coeficiente de atrito – apesar de sofrer um aumento de 33% (de 0,06 para 0,08) – ainda se mantém baixo. Contudo, o desgaste sofre um incremento; acredita-se que isso ocorre em função da grande quantidade de estoques presentes na interface de contato. Como explicado anteriormente, a condição 15PTFE contém estoques de lubrificante sólido maiores ao longo do volume. Essa fase de PTFE apresenta pouca ou nenhuma resistência mecânica. Assim, uma menor porção do material é responsável por suportar a força normal aplicada. O resultado é a aplicação de maiores pressões de contato sobre a matriz do compósito. Em relação ao desgaste do contra corpo, mesmo para a condição mais severa (0PTFE) não foi possível quantificar esse desgaste; assim sendo, ele foi desconsiderado para os cálculos das taxas de desgaste.

Partindo para a análise do mecanismo envolvido, na Figura 43 tem-se a análise de MEV para uma típica marca de desgaste da condição 0PTFE. Constata-se que o desgaste do material ocorre de maneira heterogênea, visto que a imagem obtida por elétrons secundários (SE) - Figura 43 (a) – permite analisar essa diferença no relevo. As camadas superiores são aquelas em contato com o contra-corpo. Isso é evidenciado pela imagem à esquerda, obtida por BSE, na qual as regiões mais superficiais revelam fibras cominuídas, com dimensões significativamente menores e muitas vezes com direções diferentes das originais. Com a evolução do desgaste, regiões que ainda não fazem parte do contato passam a participar da

interface tribológica, promovendo a deformação da matriz e a quebra das fibras de vidro, explicitado pela diferença nas dimensões dessas fibras.

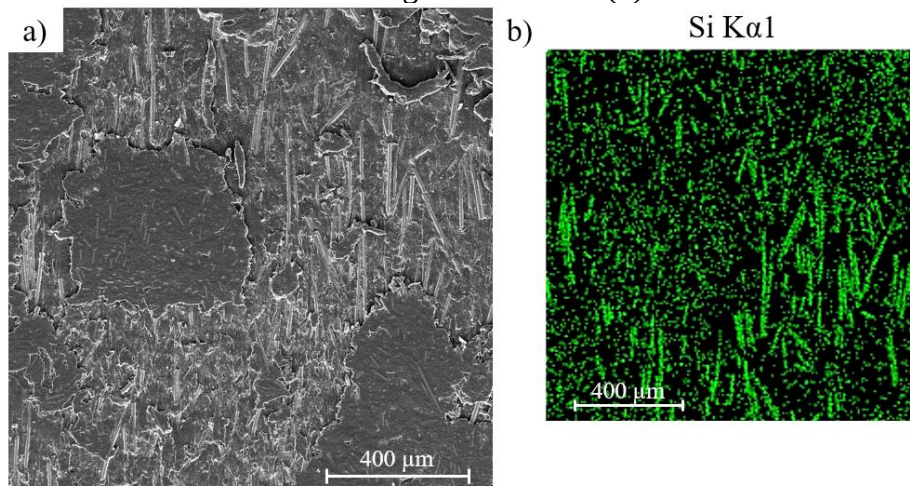
Do ponto de vista do desgaste, uma das hipóteses era de que os debris formados pela cominuição das fibras de vidro estariam presentes na região de interface do contato. Isso aumentaria ainda mais o desgaste dado o caráter abrasivo das fibras. Entretanto, não foi observado um desgaste abrasivo intenso nas marcas de desgaste. Por meio da detecção do Si por EDS, é possível observar as regiões onde as fibras estão mais cominuídas e mais inteiriças. – Figura 44.

Figura 43 – Típica marca de desgaste para a condição sem lubrificante: imagens obtida por SE (a) e BSE (b), a seta em vermelho indica a direção do movimento.



Fonte: Autoria própria.

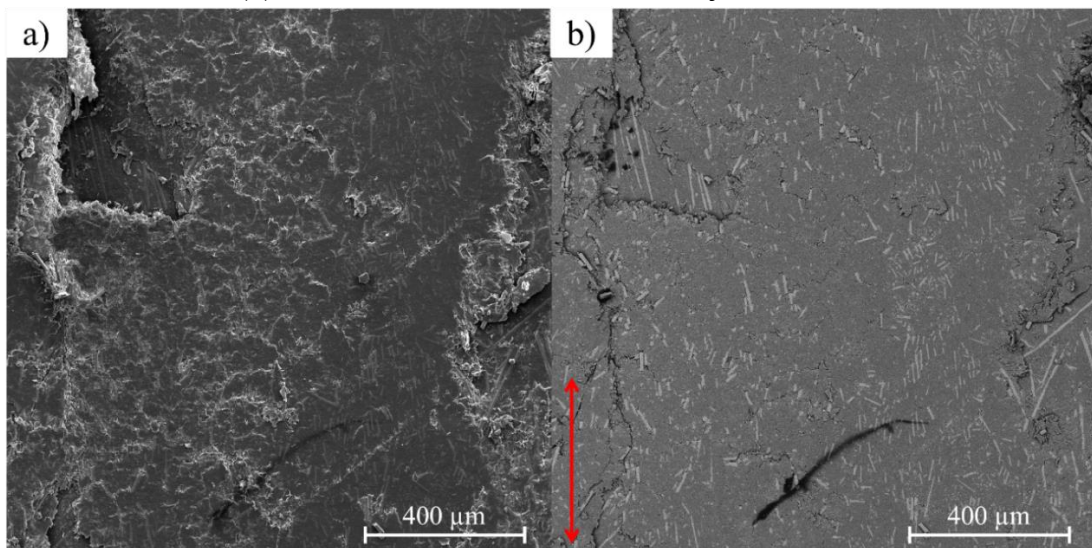
Figura 44 – Marca de desgaste em BSE (a) e análise de EDS com presença de silício ao longo da região de contato (b).



Fonte: Autoria própria.

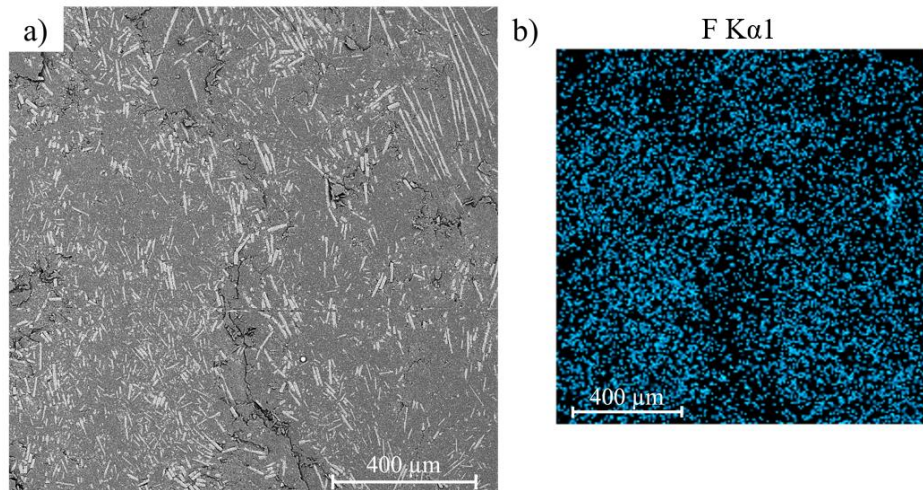
Com a adição de lubrificante, o desgaste se tornou evidentemente menor, entretanto a morfologia das marcas de desgaste permaneceu muito similar. Na Figura 45 é possível identificar a mesma fragmentação das fibras na região de contato enquanto as dispostas em camadas mais profundas permanecem intactas. Assim como na condição sem lubrificante, o silício está presente em toda a região de contato. Contudo, além dessas partículas abrasivas, é possível identificar PTFE disperso na região de contato para as três condições, um indicativo de que há a formação de um filme de PTFE e confirmando que a fase de coloração branca é de fato o lubrificante – Figura 46.

Figura 45 - Típica marca de desgaste para as condições com PTFE: imagens obtida por SE (a) e BSE (b), a seta em vermelho indica a direção do movimento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Típica marca de desgaste para compósitos com PTFE: imagem em BSE (a) e análise de EDS com presença de flúor ao longo da região de contato (b).

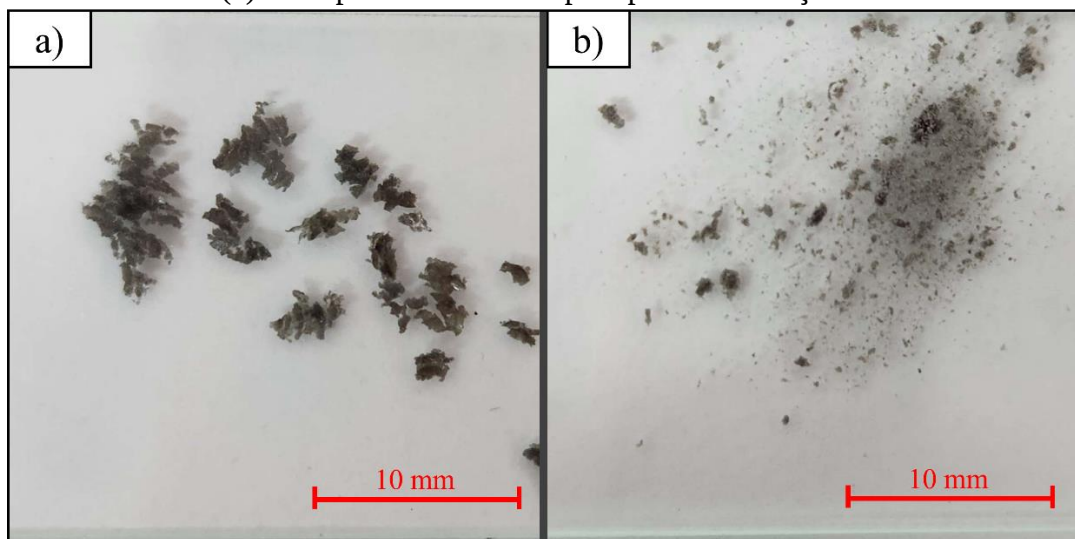


Fonte: Autoria própria.

A formação de um filme de lubrificante na interface corpo – contra corpo é de grande importância para mitigar o desgaste dos componentes envolvidos. Com isso, formulou-se uma hipótese para o mecanismo de desgaste envolvido. Apesar das fibras promoverem um caráter abrasivo para a região de contato, acredita-se que o principal mecanismo envolvido seja a adesão.

Nota-se uma ausência de marcas de abrasão ao longo da região ensaiada e junto disso, a elevada pressão de contato aliada a inexistência de lubrificante, faz com que a matriz de PPA adira ao contra-corpo. A partir disso, essa material é removido da superfície e se torna um elemento interfacial e, dada a afinidade PPA-PPA, o fenômeno da adesão é intensificado. Os debris gerados nos ensaios das condições 0 e 2PTFE corroboram com essa hipótese, já que eles visualmente se assemelham a cavacos arrancados e eles apresentam dimensões consideráveis – até 10 mm. Já para os grupos 5 e 15PTFE, os debris formados se aproximam cada vez mais de um particulado fino conforme a fração de PTFE aumenta. Isso dá a entender que houve uma redução no fenômeno de adesão entre os elementos interfaciais e entre matriz e contra-corpo. A Figura 47 mostra os debris típicos para os compósitos com e sem lubrificante sólido.

Figura 47 – Debris típicos coletados das condições 0PTFE e 2PTFE e sua semelhança a um cavaco arrancado (a) e um particulado fino típico para as condições 5PTFE e 15PTFE.



Fonte: Autoria própria.

De modo geral, conclui-se que a adição de lubrificante sólido, mesmo perante elevadas pressões de contato, foi capaz de reduzir o atrito e o desgaste do tribosistema de maneira significativa. Acredita-se que isso ocorreu em função do PTFE mitigar o efeito da adesão entre os elementos em contato.

5 CONCLUSÕES

A realização deste estudo permitiu associar a influência da adição de politetrafluoretileno nas propriedades mecânicas e tribológicas de um compósito de poliftalamida reforçado com fibra de vidro com o intuito de se desenvolver um novo material autolubrificante. Dos principais resultados obtidos, destacam-se:

- Para as condições contendo 2 e 5% em massa de PTFE, a mistura de baixa energia mostrou-se suficiente para incorporar o lubrificante à superfície dos *pellets* previamente ao processo de injeção;

- Concentrações maiores de lubrificante tendem a saturar esta superfície, o que indica que outras formas de incorporar esse material poderiam ser utilizadas; cita-se como exemplo a peletização;

- Do ponto de vista da microestrutura, a matriz do compósito permitiu a incorporação de pequenas quantidades de lubrificante ao longo do volume. Para a condição 15PTFE, identificou-se uma aglomeração maior das partículas, fato que deu origem a estoques de lubrificante com dimensões significativas;

- Em relação ao módulo elástico, a lei das misturas provou ser uma ferramenta interessante para estimar de forma precisa a como a incorporação de lubrificante alteraria o comportamento do compósito. O mesmo pode ser dito para o cálculo da densidade final do compósito;

- A tensão de ruptura reduziu em 7,9%, 8,5% e 14,8% com a adição do PTFE, 2%, 5% e 15% respectivamente. Visto que esses valores destoam dos calculados teoricamente, acredita-se na necessidade de se aprimorar o modelo matemático utilizado;

- Não foi possível aferir precisamente o valor do módulo de armazenamento dos compósitos e como ele varia com a adição de PTFE, dada a grande dispersão de valores;

- Quanto a temperatura de transição vítrea, os valores obtidos por meio do módulo de armazenamento (t_{onset}) caíram de 116°C para 90°C, uma redução de 29% independentemente da quantidade de PTFE; mas ainda se encontra acima de 80°C como previsto pela ASTM D5336 para as PPAs;

- Por meio da análise do pico de $\tan \delta$, percebe-se que esse compósito apresentou uma outra temperatura de transição vítrea em -72°C. Além disso, a segunda temperatura de transição, obtida por este ensaio, passou de 131°C para temperaturas próximas a 118°C (queda de 9,9%) para todas as condições;

- Não se observou mudanças significativas nos valores de $\tan \delta$ e ele se manteve próximo de 0,17. Menores valores indicam maior rigidez, o que é desejado para compósitos para aplicações estruturais;

- Investigações da topografia revelaram que para a condição 2PTFE, a superfície é simétrica em relação a presença de picos e vales ($S_{sk} = 0$) e que a distribuição destas alturas ocorre de forma normal em relação a linha média ($S_{ku} = 3$);

- As condições 0, 2 e 15 PTFE apresentam valores negativos, indicando a predominância de depressões ao longo da superfície. Junto disso, os valores de curtose estão muito acima de 3, característico de uma distribuição leptocúrtica. Em outras palavras, as profundidades dos vales destoam das alturas da linha média;

- No que se refere à tribologia, o desempenho dos compósitos contendo politetrafluoretileno foi mais do que satisfatória, ao se considerar a pressão de contato a qual foram expostos. A taxa de desgaste das condições 2 e 5PTFE foi aproximadamente 5,5 vezes menor do que a da 0PTFE – $1,0 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ e $5,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, respectivamente. Uma redução similar foi observada para o coeficiente de atrito, que passou de 0,32 para a condição 0PTFE para 0,6 nas condições 2 e 5PTFE. Assume-se que isso esteja diretamente relacionada a redução da adesão entre os elementos do tribosistema;

- Compósitos com ainda mais lubrificante (15PTFE), apresentaram coeficiente de atrito de 0,8 - 4 vezes menor do que a condição original. Já a taxa de desgaste foi de $2,3 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, aproximadamente 2 vezes menor que a condição 0PTFE. Quando comparada às outras duas composições, observou-se um aumento no coeficiente de atrito de 33% e 130% na taxa de desgaste. Acredita-se que isso aconteceu em função da menor quantidade de material disponível para suportar a aplicação de esforços mecânicos;

- De maneira geral, conclui-se que a adição de PTFE na forma de pó à matriz de PPA reforçada com fibra de vidro não altera de forma severa as propriedades mecânicas do compósito final e contribui significativamente na redução do atrito e do desgaste de todos os elementos envolvidos no contato. E isso pode ser feito com pequenas quantidades (2%) de PTFE, sem que se eleve muito o custo do compósito, tornando-o economicamente viável.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Sugere-se desenvolver e estudar compósitos com frações mássicas inferiores a 2% com o objetivo de se identificar uma concentração limite. Essa otimização também permitiria uma maior viabilidade econômica, pois pouco se alteraria o preço do compósito;
- Selecionar a condição mais promissora (2PTFE) e explorar a fundo as propriedades mecânicas e tribológicas desse compósito;
- Realizar ensaios de carga incremental a fim de avaliar o comportamento do coeficiente de atrito frente a evolução da força normal aplicada e avaliar a durabilidade do compósito;
- Testar a resistência ao desgaste dos compósitos em pressões de contato menores e comparar com os resultados deste trabalho;
- Produzir amostras para ensaios de DMA que dispensem ajuste dimensional e observar o impacto disso no módulo de armazenamento do compósito;
- Compreender o comportamento tribológico dos compósitos desenvolvidos em temperaturas mais elevadas e correlacionar os resultados com os valores de temperatura de transição vítrea obtidos.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHKHARA, K. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. 3. ed. Nova Dehli, Índia: John Wiley & Sons, 2006. 562 p.
- AHMED, O. S.; AABID, A.; ALI, J. S. M.; HRAIRI, M.; YATIM, N. M. Progresses and Challenges of Composite Laminates in Thin-Walled Structures: a systematic review. **Acs Omega**, v. 8, n. 34, p. 30824-30837, 16 ago. 2023. American Chemical Society (ACS).
- AL-QURESHI, H. A. **Composite Materials: fabrication and analysis**. 3. ed. São José dos Campos, São Paulo: ITA, 1988.
- ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J.; KISSING, W. **Mechanics of Composite Structural Elements**. Alemanha: Springer, 2004. 487 p.
- AMER, M. S.; SCHADLER, L. S. Micromechanical Behavior of Graphite / Epoxy Composites: part i: the effect of fiber sizing., v. 7, p. 81-113, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2270 – 10**: Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100 °C. ASTM International, 2016. 5 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5336-21**: Standard Classification System and Basis for Specification for Polyphthalamide (PPA) Injection Molding Materials. Estados Unidos, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7264/D 7264M**: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Estados Unidos, 2007. 11 p.
- ANSELMO, L. M. **Estudo da calibração e da lubrificação fluida nas propriedades tribológicas de compósitos autolubrificantes produzidos via metalurgia do pó**. 2022. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.
- ANSELMO, L. M.; LAMIM, T. S.; HROMATKA, M.; DE-MELLO, J. D. B.; KLEIN, Aloisio Nelmo; HAMMES, Gisele; BINDER, Cristiano. Influence of post-sintering sizing process on the tribological behaviour of self-lubricating iron-based composite. **Wear**, v. 496-497, p. 204287, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2022.204287>.
- AUTAY, R.; MISSAOUI, S.; MARS, J.; DAMMAK, F. Mechanical and tribological study of short glass fiber-reinforced PA 66. **Polymers And Polymer Composites**, v. 27, n. 9, p. 587-596, 9 jun. 2019. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0967391119853956>.
- BA, E. C. T.; SILVA, D. A. DA S.; CÂMARA, M.; SÉRGIO, P.; ABREU, C.; COUTO, T.; FERREIRA, A.; LOPES, G.; JUNIO, D.; NEVES, C. A. de S.; SANTOS, D. B. P. EFEITOS DOS PARÂMETROS DE ASSIMETRIA E CURTOSE DE SUPERFÍCIES USINADAS

POR PROCESSOS DE FRESAMENTO E TORNEAMENTO NO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO EM ENSAIO PINO SOBRE DISCO. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2019. ABCM.

BENDO, T.; HERMANN, M. L.; SALVARO, D. B.; BINDER, C.; HAMMES, G.; MELLO, J. D. B. de; KLEIN, A. N. Surface Mo-Enrichment and Plasma Carburizing on Sintered Iron: microstructure and tribological properties. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, v. 29, n. 6, p. 3723-3735, jun. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-020-04870-2>.

BINDER, C. **DESENVOLVIMENTO DE NOVOS TIPOS DE AÇOS SINTERIZADOS AUTOLUBRIFICANTES A SECO COM ELEVADA RESISTÊNCIA MECÂNICA ALIADA A BAIXO COEFICIENTE DE ATRITO VIA MOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO**. 2009. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. 2. ed. Columbus, Ohio: Wiley, 2013. 711 p.

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook: principles of tribology**. Estados Unidos: CRC Press, 2000. 1690 p.

BRASIL. EMBRAPII. **Unidades EMBRAPII**. UNIDADE EMBRAPII DE MOBILIDADE VEICULAR, MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS PARA MOBILIDADE | MOVE/UFSC. s.d.. Disponível em: <https://embrapii.org.br/unidades/unidade-embrapii-de-mobilidade-veicular-maquinas-e-equipamentos-para-mobilidade-move-ufsc/>. Acesso em: 18 jun. 2024.

BUCKLEY, D. H. **Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication**. 5. ed. Amsterdam, Holanda: Elsevier, 1981.

CASARIL, A.; GOMES, E. R.; SOARES, M. R.; FREDEL, M. C.; AL-QURESHI, H. A. Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. **Matéria**, S.L., v. 12, n. 2, p. 408-419, 2007.

CONRAD, R. **Injection molding**. 2023. Disponível em: <https://www.elastomer.kuraray.com/blog/injection-molding/>. Acesso em: 25 out. 2023.

COUSIN, T.; GALY, J.; DUPUY, J. Molecular modelling of polyphthalamides thermal properties: comparison between modelling and experimental results. **Polymer**, v. 53, n. 15, p. 3203-3210, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2012.05.051>.

CZICHOS, H.; KLAFFKE, D.; SANTNER, E.; WOYDT, M.. Advances in tribology: the materials point of view. **Wear**, n. 190, p. 155-161, 25 abr. 1995.

DAVIS, J. R. **SURFACE ENGINEERING FOR CORROSION AND WEAR RESISTANCE**. Ohio, Estados Unidos: Asm International, 2001. 319 p.

DE GORTARI, M. G.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Polyphthalamide polymers: a review on synthesis, properties, and advance manufacturing and emerging applications. **Journal Of**

Applied Polymer Science, v. 139, n. 40, p. 1-31, 17 ago. 2022. Wiley.
<http://dx.doi.org/10.1002/app.52965>.

DE MELLO, J. D. B.; BINDER, C.; PROBST, S. M. H.; KLEIN, A. N..
 InSituGeneratedTurbostratic2DGraphite: ANewWaytoObtainHigh-Performance Self-
 LubricatingIron-BasedComposites. In: MENEZES, P. L.; ROHATGI, P. K.; OMRANI,
 E. **Self-Lubricating Composites**. 2. ed. Alemanha: Springer, 2022. p. 73-122.

DOAN, Q. H.; THAI, D.-K.; TRAN, N. L. A Numerical Study of the Effect of Component
 Dimensions on the Critical Buckling Load of a GFRP Composite Strut under Uniaxial
 Compression. **Materials**, v. 13, n. 4, p. 931, 19 fev. 2020. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/ma13040931>.

DOMININGHAUS, H. **Plastics for Engineers: materials, properties, applications**. Hanser
 Gardener Publications, 1993. 789 p.

DUPONT. **Kevlar® Properties**. 2019. Disponível em:
[https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_Technical_Guide_0319.pdf)
[Technical_Guide_0319.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_Technical_Guide_0319.pdf). Acesso em: 15 maio 2024.

EBERSBACH, F. G.; MÔNEGO, G.; CORNELSEN, M. H.; MELLO, J. D. B. de;
 HAMMES, G.; BINDER, C.; KLEIN, A. N. Effect of reaming on surface properties of self-
 lubricating composites. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And**
Engineering, v. 45, n. 3, p. 1-14, 9 fev. 2023. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s40430-023-04068-2>.

ESTADOS UNIDOS. Office Of Energy Efficiency & Renewable Energy. Lightweight
 Materials for Cars and Trucks: Vehicle Technologies Office. Disponível em:
<https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks>. Acesso em: 29
 set. 2023.

FERRANTE, J. **Tribology Theory Versus Experiment**. Lewis Research Center, Cleveland,
 Ohio: National Aeronautics And Space Administration - NASA, 1987. 24 p.

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MALSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.;
 SOLIMAN, H. H. Roughness Parameters. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.
 l], v. 123, n. 123, p. 133-145, 14 jan. 2002.

HAN, J.-H.; KIM, Y.-C. Study on Effects of Mold Temperature on the Injection Molded
 Article. **Archives Of Metallurgy And Materials**, v. 62, n. 2, p. 1271-1274, 1 jun. 2017.
 Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/amm-2017-0191>.

HASSANI, S.; MOUSAVI, M.; GANDOMI, A. H. Structural Health Monitoring in
 Composite Structures: a comprehensive review. **Sensors**, v. 22, n. 1, p. 153, 27 dez. 2021.
 MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s22010153>.

HEIM, D.; HARTMANN, M.; NEUMAYER, J.; KLOTZ, C.; AHMET-TSAOUS, Ö.;
 ZAREMBA, S.; DRECHSLER, K. Novel method for determination of critical fiber length in
 short fiber carbon/carbon composites by double lap joint. **Composites Part B: Engineering**,

v. 54, p. 365-370, nov. 2013. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.026>.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v. 47, p. 221-234, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2011.11.022>.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, v. 5, n. 3, p. 263-284, set. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology**: friction and wear of engineering materials. 2. ed. Kidlington: Elsevier, 2017. 386 p.

IMANAKA, Y.; ANAZAWA, T.; KUMASAKA, F.; JIPPO, H. Optimization of the composition in a composite material for microelectronics application using the Ising model. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 4 fev. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-81243-2>.

JIA, N.; KAGAN, V. A. Mechanical Performance of Polyamides with Influence of Moisture and Temperature- Accurate Evaluation and Better Understanding. **Plastics Failure Analysis And Prevention**, v., p. 95-104, 2001.

JOST, H. P. Economic Impact of Tribology. **Mechanical Failure: Definition Of The Problem**, Londres, Inglaterra, abr. 1976.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6. ed. Pearson, 2009. 1200 p.

KAUSAR, A. Nanocarbon and macrocarbonaceous filler-reinforced epoxy/polyamide: a review. **Journal Of Thermoplastic Composite Materials**, [S.L.], v. 35, n. 12, p. 2620-2640, 12 jun. 2020. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0892705720930810>.

KUMAR, P. A.; NAMBOODIRI, V. V.; OMRANI, E.; ROHATGI, P.; MENEZES, P. L. SolidLubricants: classification, properties, and applications. In: MENEZES, P. L.; ROHATGI, P. K.; OMRANI, E. (ed.). **Self-Lubricating Composites**. 2. ed. Alemanha: Springer, 2022. p. 1-29.

KURARAY (Japão). **Genestar™ G1300A-M41**. s.d. Disponível em:
<https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Genestar%E2%84%A2+G1300A-M41/Kuraray+Co.+Ltd/678/976d5c3a>. Acesso em: 23 out. 23.

LAU, C.; ANITOLE, K.; HODES, C.; LAI, D.; PFAHLES-HUTCHENS, A.; SEED, J. Perfluoroalkyl Acids: a review of monitoring and toxicological findings. **Toxicological Sciences**, v. 99, n. 2, p. 366-394, 22 maio 2007. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/toxsci/kfm128>.

LEITH, E. N.; SWANSON, G. J. Achromatic interferometers for white light optical processing and holography. **Applied Optics**, v. 19, n. 4, p. 638-644, 15 fev. 1980.

LI, D.-X.; YOU, Y.-L.; DENG, X.; LI, W.-J.; XIE, Y. Tribological properties of solid lubricants filled glass fiber reinforced polyamide 6 composites. **Materials & Design (1980-2015)**, [S.L.], v. 46, p. 809-815, abr. 2013a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.011>.

LI, D.-X.; XIE, Y.; LI, W.; YOU, Y.; DENG, X. Tribological and Mechanical Behaviors of Polyamide 6/Glass Fiber Composite Filled with Various Solid Lubricants. **The Scientific World Journal**, [S.L.], v. 2013b, p. 1-9, 2013b. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/320837>.

LI, J. The Effect of PTFE on the Mechanical and Friction and Wear Properties of GF/PA6 Composites. **Advanced Materials Research**, v. 284-286, p. 2370-2373, jul. 2011. Trans Tech Publications, Ltd. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.284-286.2370>.

LIU, J.; LIN, H.; YI, H. L.; WEI, T.; ZHENG, B. C. The Influence of Modified Polytetrafluoroethylene (PTFE) on the Properties of PA6/PTFE Blends. **Applied Mechanics And Materials**, v. 662, p. 38-45, out. 2014. Trans Tech Publications, Ltd. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.662.38>.

LODGE, R. A.; BHUSHAN, B. Surface characterization of human hair using tapping mode atomic force microscopy and measurement of conditioner thickness distribution. **Journal Of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films**, v. 24, n. 4, p. 1258-1269, jul. 2006. American Vacuum Society. <http://dx.doi.org/10.1116/1.2180275>.

MANGAS, I.; SOGORB, M. A.; VILANOVA, E. Lubricating Oils. **Encyclopedia Of Toxicology**, v. 3, p. 670-676, 2014.

MARK, R. E.; KALONI, P. N.; TANG, R. C.; GILLIS, P. P. Solid Mechanics and Crystal Physics as Tools for Cellulose Structure Investigation. **Textile Research Journal**, v. 39, n. 3, p. 203-212, 1969.

MARKETS AND MARKETS (Estados Unidos). **Fiberglass Market by Glass Type (E Glass, ECR Glass, AR Glass, S Glass), Product Type (Glass Wool, Direct and Assembled Roving, Yarn, Chopped Strand), Application (Composites, Insulation), And Region - Global Forecasts to 2028**. 2023. Disponível em: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/fiberglass-market-6124844.html?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIk5TsrZ_xggMV_h-tBh0sFg6sEAAYASAAEgIHWvD_BwE. Acesso em: 25 out. 2023.

MATTHEWS, A.; FRANKLIN, S.; HOLMBERG, K. Tribological coatings: contact mechanisms and selection. **Journal Of Physics D: Applied Physics**, v. 40, n. 18, p. 5463-5475, 30 ago. 2007. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/40/18/s07>.

MATWEB. **Overview of materials for Polytetrafluoroethylene (PTFE), Molded**. s.d. Disponível em: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4d14eac958e5401a8fd152e1261b6843. Acesso em: 12 fev. 2024.

MEHDIKHANI, M.; GORBATIKH, L.; VERPOEST, I.; LOMOV, S. V. Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on

mechanical performance. **Journal Of Composite Materials**, v. 53, n. 12, p. 1579-1669, 20 nov. 2018. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998318772152>.

MELTON, G. H.; PETERS, E. N.; ARISMAN, R. K. Engineering Thermoplastics. In: KUTZ, M. (ed.). **Applied Plastics Engineering Handbook: processing and materials**. Waltham, Estados Unidos: Elsevier, 2011. p. 7-21.

MIYAKE, S. BOUNDARY LUBRICATION PROPERTIES OF DIAMOND AND SURFACE-MODIFIED DIAMOND FILMS WITH VARIOUS WATER SOLUTIONS. **Thinning Films And Tribological Interfaces**, Nippon Institute Of Technology, Gakuendai, Miyasiro-Mati, Saitama, 345 Japão, p. 559-568, 2000.

MIYOSHI, K. Solid lubrication Fundamentals and Applications: introduction and background. **National Aeronautics and Space Administration - NASA**, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, jul. 1998a.

MIYOSHI, K. Solid Lubrication Fundamentals and Applications: characterization of solid surfaces. **National Aeronautics And Space Administration - NASA**, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, p. 1-83, jul. 1998b.

MIYOSHI, K. Solid Lubricants and Coatings for Extreme Environments: State-of-the-Art Survey. **National Aeronautics and Space Administration - NASA**, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, jan. 2007.

MOLNAR, Viktor; SZABO, Gergely. Designation of minimum measurement area for the evaluation of 3D surface texture. **Journal Of Manufacturing Processes**, v. 83, p. 40-48, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.042>.

MOVER FUNDEP (Brasil). **PROGRAMA MOVER: mobilidade verde e inovação**. Mobilidade Verde e Inovação. s.d.. Disponível em: <https://mover.fundep.ufmg.br/mover/>. Acesso em: 18 jun. 2024.

MYSHKIN, N.; KOVALEV, A. Adhesion and surface forces in polymer tribology—A review. **Friction**, v. 6, n. 2, p. 143-155, 26 fev. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40544-018-0203-0>.

OHSAWA, T.; NAKAYAMA, A.; MIWA, M.; HASEGAWA, A. Temperature Dependence of Critical Fiber Length for Glass Fiber-Reinforced Thermosetting Resins. **Journal Of Applied Polymer Science**, v. 22, p. 3203-3212, 1978.

PARVIZI-MAJIDI, A.; BEGUM, S. Whiskers and Particulates. **Reference Module In Materials Science And Materials Engineering**, v. 1, p. 175-198, 2016. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.03810-8>.

POLITIS, Denis J.; POLITIS, Nicholas J.; LIN, Jianguo. Review of recent developments in manufacturing lightweight multi-metal gears. **Production Engineering**, v. 15, n. 2, p. 235-262, 6 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-020-01011-5>.

RITCHIE, H. **What are the safest and cleanest sources of energy?**: fossil fuels are the dirtiest and most dangerous energy sources, while nuclear and modern renewable energy sources are vastly safer and cleaner. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>. Acesso em: 15 out. 2023.

SADEGHI, F. Elastohydrodynamic lubrication. In: RAHNEJAT, H. **Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain**: fundamentals, applications and future trends. Woodhead Publishing, 2010.

SAENZ-CASTILLO, D.; MARTÍN, M.I.; CALVO, S.; RODRIGUEZ-LENCE, F.; GÜEMES, A. Effect of processing parameters and void content on mechanical properties and NDI of thermoplastic composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 121, p. 308-320, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.03.035>.

SALVARO, D. B. **AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE DLC EM REGIME DE LUBRIFICAÇÃO MISTA**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SALVARO, D. B.; DUDY, J. M. W.; PALHETA, F. de O.; BINDER, C.; KLEIN, A. N.; BARRA, G. M. de O.; DE-MELLO, J. D. B. Influence of grinding energy in morphology and tribological performance of self-lubricating polymeric blends PAEK + PTFE. **Wear**, v. 523, p. 204783, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2023.204783>.

SERP, P. Carbon. **Comprehensive Inorganic Chemistry II**, p. 323-369, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-097774-4.00731-2>.

SHARMA, S. M.; ANAND, A. Solid Lubrication in Iron Based Materials – A Review. **Tribology In Industry**, v. 38, n. 3, p. 318-331, 2016.

SIKORSKI, M. E. Correlation of the Coefficient of Adhesion With Various Physical and Mechanical Properties of Metals. **Journal Of Basic Engineering**, Bell Telephone Laboratories, Nova Jersey, p. 279-285, jun. 1963.

SCHEFFRAN, Jürgen; FELKERS, Miriam; FROESE, Rebecca. Economic Growth and the Global Energy Demand. **Green Energy To Sustainability**, p. 1-44, 3 abr. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/9781119152057.ch1>.

STACHOWIAK, G. W. **WEAR**: materials, mechanisms and practice. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2006. 458 p.

STRAITS RESEARCH (Estados Unidos). **Fiber-Reinforced Composites Market Size, Outlook to 2030**: fiber-reinforced composites market size, share & trends analysis report by fiber type (carbon fibers, glass fibers, aramid fibers, others) by resin type (thermoset composites, thermoplastic composites) by end-use industry (building & construction, automotive, electrical & electronics, aerospace & defense, sporting goods, wind energy, others) and by region (north america, europe, apac, middle east and africa, latam) forecasts, 2020-2023. Disponível em: <https://straitsresearch.com/report/fiber-reinforced-composites-market>. Acesso em: 25 out. 2023.

SUN, Z.-Y.; HAN, H.-S.; DAI, G.-C. Mechanical Properties of Injection-molded Natural Fiber-reinforced Polypropylene Composites: formulation and compounding processes. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, v. 29, n. 5, p. 637-650, 25 fev. 2009. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684408100264>.

SUPREME LUBRIFICANTES (Blumenau - Brasil). **SOLIDLUB PTFE**. Disponível em: <https://supremelub.com.br/produtos/solidlub-ptfe/>. Acesso em: 18 dez. 2023.

TRIGO-LÓPEZ, M.; BARRIO-MANSO, J. L.; SERNA, F.; GARCÍA, F. C.; GARCÍA, J. M. Crosslinked Aromatic Polyamides: a further step in high performance materials. **Macromolecular Chemistry And Physics**, v. 214, n. 19, p. 2223-2231, 29 jul. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/macp.201300342>.

VINCENT, Michel; GIROUD, T.; CLARKE, A.; EBERHARDT, C. Description and modeling of fiber orientation in injection molding of fiber reinforced thermoplastics. **Polymer**, v. 46, n. 17, p. 6719-6725, ago. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2005.05.026>.

VOHRA, K.; VODONOS, A.; SCHWARTZ, J.; MARAIS, E. A.; SULPRIZIO, M. P.; MICKLEY, L. J. Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: results from geos-chem. **Environmental Research**, v. 195, p. 110754, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2021.110754>.

WHITE, S. S.; FENTON, S. E.; HINES, E. P. Endocrine disrupting properties of perfluorooctanoic acid. **The Journal Of Steroid Biochemistry And Molecular Biology**, v. 127, n. 1-2, p. 16-26, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.03.011>.

WOYDT, M. The importance of tribology for reducing CO2 emissions and for sustainability. **Wear**, v. 474-475, p. 203768, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2021.203768>.

YAZAWA, S.; MINAMI, I.; PRAKASH, B. Reducing Friction and Wear of Tribological Systems through Hybrid Tribofilm Consisting of Coating and Lubricants. **Lubricants**, v. 2, n. 2, p. 90-112, 23 jun. 2014. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/lubricants2020090>.

YOU, Y.-L.; LI, D.-X.; DENG, X.; LI, W.-J.; XIE, Y. Effect of Solid Lubricants on Tribological Behavior of Glass Fiber Reinforced Polyamide 6. **Polymer Composites**, v. 34, p. 1783-1793, 2013.

YOU, Y.-L.; LI, D.-X.; SI, G.-J.; LV, R.-Y.; DENG, X. Improvement in the tribological properties of polyamide 6. **Journal Of Thermoplastic Composite Materials**, v. 29, n. 4, p. 494-507, 7 jan. 2014. SAGE Publications.

ZUCHELLI, A.; FOCARETE, M. L.; GUALANDI, C.; RAMAKRISHNA, S. Electrospun nanofibers for enhancing structural performance of composite materials. **Polymers For Advanced Technologies**, v. 22, n. 3, p. 339-349, dez. 2010. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pat.1837>.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and Wear of Materials**. Institute Of Materials Technology, Siegen, Alemanha: Elsevier, 1987. 286 p. (10).