



REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA
FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE COMPÓSITOS PET-GF20 E PA6-GF30 PARA ENGRENAGENS
PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA COM VALIDAÇÃO VIA FEA**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF PET-GF20 AND PA6-GF30 COMPOSITES FOR GEARS
PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING WITH FEA VALIDATION**

Thales Renato de Souza Ferreira ^{1, i}
Leandro Cardoso da Silva ^{2, ii}
Edgard Gonçalves Cardoso ^{3, iii}
Lucas Almeida Willenshofer ^{4, iv}
Manuel Patricio da Silva Bisneto ^{5, v}

Data de submissão: (27/05/2025). Data de aprovação: (22/09/2025)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre dois compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro – PET-GF20 e PA6-GF30 – aplicados em engrenagens cilíndricas de dentes retos produzidas por manufatura aditiva, com validação via análise por elementos finitos (FEA). O objetivo principal foi avaliar o desempenho mecânico de cada material, considerando parâmetros como resistência à tração e deformação. Os resultados indicam que o PA6-GF30 possui desempenho mecânico superior, sendo adequado para aplicações críticas, enquanto o PET-GF20 se destacou pelo seu potencial de reciclabilidade, o que sugere perspectivas positivas em termos de sustentabilidade. O estudo reforça o uso integrado de ferramentas CAD/CAE e manufatura aditiva como estratégia eficiente para o desenvolvimento de componentes de boa performance estrutural. Propõe-se a continuidade da pesquisa com foco em análises experimentais de fadiga, desgaste e em estudos de ciclo de vida (LCA) que permitam quantificar de forma objetiva o impacto ambiental.

Palavras-chave: compósitos poliméricos; fibra de vidro; manufatura aditiva; Análise por Elementos Finitos (FEA); sustentabilidade.

¹ Pós-graduado no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: thalesrenato@gmail.com

² Docente e Dr. em Engenharia Mecânica no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: leandro.cardoso@sp.senai.br

³ Docente e Me. em Energia no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: edgard.cardoso@sp.senai.br

⁴ Docente e Me. em Engenharia Mecânica no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: lucas.willenshofer@sp.senai.br

⁵ Docente e Dr. em Nanociências e Ciência dos Materiais no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: manuel.bisneto@sp.senai.br

ABSTRACT

This work presents a comparative analysis of two glass-fiber reinforced polymer composites – PET-GF20 and PA6-GF30 – applied in additively manufactured spur gears, with validation via Finite Element Analysis (FEA). The main objective was to evaluate the mechanical performance of each material, considering parameters such as tensile strength and deformation. The results indicate that PA6-GF30 has superior mechanical performance, making it suitable for critical applications. In contrast, PET-GF20 stood out due to its recyclability potential, suggesting positive prospects for sustainability. The study reinforces the integrated use of CAD/CAE tools and additive manufacturing as an efficient strategy for developing components with high structural performance. The continuity of this research is proposed, focusing on experimental fatigue and wear analyses, and on Life Cycle Assessment (LCA) studies to objectively assess the environmental impact.

Keywords: polymeric composites, glass fiber, additive manufacturing, Finite Element Analysis (FEA), sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de materiais termoplásticos nas empresas reflete a busca contínua por soluções mais eficientes e sustentáveis na indústria. Nos últimos anos, o avanço das tecnologias de manufatura e a necessidade de reduzir custos, peso e impacto ambiental impulsionaram o desenvolvimento de polímeros com propriedades aprimoradas. Esse cenário tem levado pesquisadores e engenheiros a explorarem novas formulações e combinações de materiais para atender às exigências dos mais diversos setores, desde a indústria automotiva e aeroespacial até a área médica e eletrônica (Callister & Rethwisch, 2020, p. 13). Entre as alternativas mais promissoras, os polímeros reforçados com fibras ganham destaque devido ao seu alto desempenho mecânico, resistência ao impacto e estabilidade dimensional. Esses materiais são amplamente utilizados na fabricação de componentes estruturais, blindagens, peças técnicas e outras aplicações industriais, demonstrando um grande potencial para substituir materiais convencionais e melhorar processos produtivos (Islam *et al.*, 2024).

A evolução dos polímeros, desde os primeiros sintéticos como a baquelite, até os termoplásticos de alto desempenho como polietileno e policarbonato, demonstra um avanço contínuo. Atualmente, a pesquisa concentra-se em polímeros reforçados e manufatura aditiva, que permitem a produção de peças complexas com excelente relação resistência-peso e uso eficiente de matéria-prima (Gibson, Rosen & Stucker, 2015). Esse avanço resulta no desenvolvimento de compósitos inovadores, como o PET-GF20 (PET reforçado com 20% de fibra de vidro), que combina as vantagens dos termoplásticos com propriedades mecânicas superiores.

Estimulada pela demanda por polímeros de alto desempenho, a indústria tem experimentado o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras, como o PET-GF20 e o PA6-GF30 (Poliamida 6 reforçada com 30% de fibra de vidro), cada um com características distintas que os tornam adequados para aplicações específicas. Neste estudo, foi investigada a viabilidade da substituição de engrenagens cilíndricas de dentes retos, tradicionalmente fabricadas por materiais metálicos e utilizadas em redutores de velocidade de baixa carga, por alternativas construídas com o compósito PET-GF20. A proposta visa analisar o desempenho

mecânico, a durabilidade e o custo-benefício da nova solução, a literatura em geral atribui ao PET características como resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito, em comparação com o PA6-GF30. Além disso, foram realizadas simulações no ANSYS para avaliar o comportamento desses materiais sob cargas reais, comparando as tensões de escoamento e verificando a viabilidade de aplicação do PET-GF20 em componentes de máquinas.

1.2 Problema de pesquisa

A busca por alternativas aos materiais tradicionalmente utilizados em componentes de máquinas, como engrenagens de tornos mecânicos, ganha relevância não apenas pela necessidade de soluções mais leves, econômicas e sustentáveis, mas também pela crescente demanda por eficiência operacional e redução de impactos ambientais. A manutenção eficiente de máquinas, com foco na redução do tempo de inatividade e na diminuição dos custos de manutenção, tornou-se um fator crítico para a competitividade industrial. Nesse contexto, a substituição de materiais tradicionais por compósitos poliméricos reforçados com fibras, como o PET-GF20 e o PA6-GF30, surge como uma estratégia promissora. A fabricação desses componentes através da manufatura aditiva oferece vantagens significativas, como a produção de peças complexas com maior precisão, redução de desperdícios de material e flexibilidade no design.

1.3 Objetivo

Este estudo tem como objetivo comparar a viabilidade técnica e o desempenho mecânico do uso do PET-GF20 e do PA6-GF30 na fabricação de engrenagens para tornos mecânicos, produzidas por manufatura aditiva. O PET-GF20, amplamente reciclável e abundante, é considerado neste trabalho como uma alternativa potencialmente mais sustentável ao PA6-GF30, que, apesar de suas boas propriedades mecânicas, apresenta desafios no processo de reciclagem segundo relatos da literatura. Para isso, o modelo 3D da engrenagem foi elaborado no Solidworks e, posteriormente, importado para o ANSYS, onde foram realizadas simulações para avaliar o comportamento das engrenagens sob cargas de operação, incluindo análises estáticas. O estudo também discute aspectos associados à manufatura aditiva, como a possibilidade de redução de desperdícios e a produção de peças complexas, sem quantificar esses efeitos. O objetivo final é avaliar se o PET-GF20 pode se configurar como alternativa viável ao PA6-GF30 em aplicações de máquinas-ferramentas, considerando o desempenho mecânico obtido e seu potencial de reciclabilidade.

1.4 Justificativa

Este trabalho propõe analisar alternativas sustentáveis e eficientes para a fabricação de engrenagens utilizadas em tornos mecânicos, tradicionalmente produzidas com materiais metálicos. A substituição desses materiais por compósitos poliméricos reforçados com fibras, oferece vantagens significativas, como redução de peso, custos e impacto ambiental. A produção desses componentes por manufatura aditiva também contribui para a justificativa do estudo, uma vez que essa tecnologia permite a fabricação de peças complexas com maior precisão, redução de desperdícios e flexibilidade no design. Dessa forma, a pesquisa busca validar o potencial do PET-GF20 e o PA6-GF30 como uma alternativa viável e sustentável

aos materiais metálicos como bronze e aço baixo carbono em aplicações de transmissão de potência, contribuindo para a inovação na indústria de máquinas-ferramentas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva é um processo de unir materiais para fazer objetos a partir de dados de modelo 3D, geralmente camada sobre camada, ao contrário das metodologias de fabricação subtrativas e formativas. A manufatura aditiva tem várias vantagens sobre os processos de fabricação tradicionais, incluindo a capacidade de produzir geometrias complexas, designs personalizados e protótipos sob demanda. A manufatura aditiva também pode ser usada para criar ferramentas, gabaritos e acessórios, bem como produtos de uso final. Existem vários tipos diferentes de tecnologias de manufatura aditiva, cada uma com seus próprios benefícios e limitações.

Algumas das tecnologias de manufatura aditiva mais comuns incluem foto polimerização em cuba, jateamento de aglutinante, fusão de leito de pó, extrusão de material, jato de material, laminação de folha e deposição direta de energia. A manufatura aditiva está sendo usada em uma variedade de indústrias, incluindo aeroespacial, automotiva, médica e de bens de consumo. Algumas das aplicações mais comuns da manufatura aditiva incluem prototipagem, ferramentas, gabaritos e acessórios, produtos de uso final, implantes médicos, peças aeroespaciais e peças automotivas. A manufatura aditiva é uma tecnologia poderosa que tem o potencial de revolucionar a forma como os produtos são projetados e fabricados. À medida que a tecnologia continua a se desenvolver, podemos esperar ver aplicações ainda mais inovadoras para a manufatura aditiva no futuro (Gibson, Rosen & Stucker, 2015).

2.2 Revisão de polímeros

Os polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de unidades menores chamadas monômeros, unidas por ligações covalentes. Esses materiais possuem propriedades únicas e versáteis, como moldabilidade, flexibilidade e resistência, o que os torna essenciais no nosso dia a dia. Eles estão presentes em diversos setores, desde embalagens e utensílios domésticos até aplicações de alta tecnologia nas indústrias aeroespacial e biomédica (Sperling, 2006; Callister & Rethwisch, 2020).

A diversidade dos polímeros está diretamente ligada à sua estrutura molecular, que pode variar em composição, arquitetura e organização. Quanto à composição, eles podem ser homopolímeros (formados por um único tipo de monômero) ou copolímeros (que combinam dois ou mais tipos de monômeros, resultando em propriedades aprimoradas) (O dian, 2004). A arquitetura das cadeias poliméricas também é crucial: cadeias lineares são mais flexíveis, enquanto cadeias ramificadas ou reticuladas aumentam a rigidez e a resistência mecânica (Rubinstein & Colby, 2003).

Além disso, a organização das cadeias pode formar regiões cristalinas (ordenadas, com maior resistência e opacidade) ou amorfas (desordenadas, resultando em materiais mais flexíveis e transparentes) (Sperling, 2006). Os polímeros podem ser classificados de acordo com sua origem (naturais, como amido e celulose, ou sintéticos, como polietileno e poliéster), estrutura (lineares, ramificados ou reticulados) e composição (homopolímeros ou copolímeros) (Young & Lovell, 2011; Rubinstein & Colby, 2003; Odian, 2004). Essa variedade

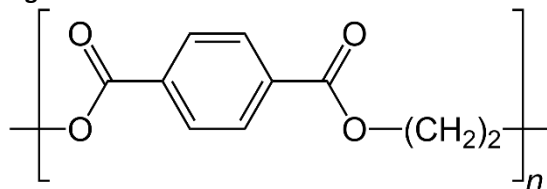
permite ajustar suas propriedades para diferentes aplicações, seja pela escolha dos monômeros, controle da arquitetura das cadeias ou adição de aditivos.

As propriedades dos polímeros dependem de sua estrutura molecular, composição e processamento. Por exemplo: Propriedades mecânicas: Resistência à tração, flexão e impacto são influenciadas pelo tamanho das cadeias, grau de cristalinidade e uso de reforços, como fibras de vidro ou carbono (Sperling, 2006). Propriedades térmicas: A temperatura de transição vítrea (T_g) indica quando o polímero passa de rígido para flexível, enquanto a temperatura de fusão (T_m) é o ponto em que o polímero cristalino derrete (Callister & Rethwisch, 2020). Propriedades ópticas: Transparência e opacidade dependem da estrutura molecular e da adição de corantes ou pigmentos (Young & Lovell, 2011). Essa versatilidade permite aplicações em diversos setores. Na indústria de embalagens, os polímeros protegem alimentos e facilitam transporte e armazenamento, seja em filmes flexíveis ou embalagens rígidas (Oadian, 2004). Na construção civil, são usados em tubulações, revestimentos e isolantes, contribuindo para a eficiência e segurança das estruturas (Sperling, 2006).

2.3 Polietileno tereftalato

O polietileno tereftalato (PET) é um polímero termoplástico amplamente utilizado em embalagens, fibras têxteis e aplicações industriais devido à sua alta resistência mecânica, estabilidade térmica e transparência (Joseph *et al.*, 2024). Sua composição química é baseada na polimerização do ácido tereftálico com o etilenoglicol, resultando em um material com excelente resistência química e barreira contra gases, tornando-o ideal para garrafas de bebidas e embalagens alimentícias (Umdagas *et al.*, 2025). No entanto, a demanda crescente por PET tem gerado desafios ambientais relacionados ao descarte inadequado e ao acúmulo de resíduos plásticos em aterros e oceanos (Joseph *et al.*, 2024). A reciclagem do PET, tanto mecânica quanto química, desempenha um papel essencial na economia circular, permitindo a reutilização do material sem perda significativa de propriedades físicas (Umdagas *et al.*, 2025). A reciclagem mecânica envolve a trituração e fusão do material para a produção de novos produtos, enquanto a reciclagem química busca a quebra da cadeia polimérica para obtenção de monômeros puros, que podem ser reutilizados em fibras de PET virgem (Joseph *et al.*, 2024). Estudos indicam que a qualidade do PET reciclado pode ser otimizada por meio do controle de impurezas e aprimoramento dos processos de separação e purificação (Umdagas *et al.*, 2025).

Figura 1- Fórmula Estrutural do Polietileno Tereftalato



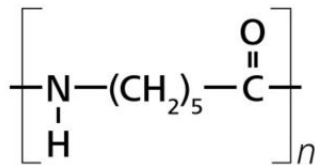
Fonte: Wikipedia (2024).

2.4 Poliamida

A poliamida (PA), conhecida como náilon, é um polímero termoplástico com alta resistência mecânica, tenacidade e resistência ao desgaste (Kohan, 1995). Sua estrutura é formada por grupos amida (-CONH-), resultantes da reação entre diaminas e ácidos dicarboxílicos ou da abertura de anéis de lactamas (O dian, 2004). Essas características conferem ao material propriedades como resistência à tração, flexibilidade e absorção de impactos, tornando-o ideal para aplicações têxteis, automotivas e eletrônicas (Kohan, 1995).

As poliamidas são classificadas em tipos como PA6, PA66, PA11 e PA12, dependendo dos monômeros usados. Por exemplo, a PA6 é derivada da caprolactama, enquanto a PA66 resulta da reação entre hexametilenodiamina e ácido adípico (O dian, 2004). Cada tipo possui propriedades específicas, como temperatura de fusão e resistência química, que podem ser ajustadas conforme a aplicação (Kohan, 1995). Apesar de sua resistência térmica e química, a PA pode absorver umidade, afetando sua estabilidade dimensional e rigidez, o que exige cuidados no processamento (Kohan, 1995). A reciclagem mecânica, que envolve trituração e reprocessamento, é comum, mas a reciclagem química, que recupera monômeros, tem sido explorada para reduzir impactos ambientais (O dian, 2004; Joseph *et al.*, 2024).

Figura 2 - Fórmula Estrutural da Poliamida



Fonte: Wikipedia (2024).

2.5 Fibra de vidro

A fibra de vidro é um material amplamente utilizado para desenvolver polímeros devido à sua elevada resistência mecânica, baixa densidade e excelente resistência à corrosão. Em compostos como o polímero reforçado com fibra de vidro, as fibras são distribuídas dentro da matriz polimérica, influenciando diretamente suas propriedades anisotrópicas, ou seja, a resistência varia conforme a direção da carga aplicada (Landesmann *et al.*, 2015). Esse comportamento faz com que o desempenho mecânico do material dependa do alinhamento das fibras em relação ao carregamento externo, sendo mais resistente quando a força é aplicada no sentido longitudinal da fibra (Landesmann *et al.*, 2015). Além disso, a utilização desse reforço melhorou a relação resistência-peso do composto, tornando-o uma opção viável para aplicações estruturais que desativam alta resistência mecânica sem aumento significativo de massa. Estudos indicam que a consideração da orientação das fibras durante a modelagem estrutural melhora a precisão das análises mecânicas e pode melhorar o desempenho de peças plásticas reforçadas (Landesmann *et al.*, 2015).

Propriedades da Fibra de Vidro:

- Alta Resistência Mecânica: Elevada resistência à tração e ao impacto.
- Baixa Densidade: Reduz o peso estrutural dos compósitos.
- Boa Resistência Química: Mantém suas propriedades em ambientes agressivos.
- Isolamento Elétrico: Característica vantajosa para eletrônica e engenharia elétrica.

2.6 Fadiga e desgaste em compósitos para engrenagens

Compósitos poliméricos reforçados com fibras são amplamente utilizados em engrenagens devido à sua elevada resistência mecânica e baixo peso. No entanto, esses materiais estão sujeitos a modos de falha específicos sob cargas cíclicas:

- a) Desgaste progressivo: em compósitos de fibra de vidro E-glass com matriz bioepóxi, observa-se uma relação linear entre o volume de material removido e o número de ciclos, com aceleração do desgaste em torques elevados (Mojškerc *et al.*, 2024).
- b) Delaminação:
 - *Intra-bundle*: Entre fibras dentro de uma mesma camada.
 - *Inter-ply*: Entre camadas do material, precedendo a falha estrutural.
- c) Efeitos térmicos: o calor gerado durante o engrenamento pode aproximar a temperatura da matriz de sua Tg (transição vítrea), reduzindo a resistência mecânica e acelerando a degradação. A análise desses mecanismos, combinada com técnicas otimizadas de projeto e fabricação, é essencial para garantir a durabilidade desses componentes.

2.7 Técnicas de caracterização de compósitos

A caracterização de compósitos é essencial para avaliar suas propriedades e desempenho em aplicações específicas. Entre os principais ensaios realizados, destacam-se:

- Ensaios Mecânicos: Determinam propriedades como resistência à tração, compressão, flexão e impacto.
- Análise Térmica: Inclui técnicas como DSC (calorimetria exploratória diferencial) e TGA (análise termogravimétrica) para avaliar a estabilidade térmica e temperatura de transição vítrea.
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): Permite a análise da interface matriz-reforço e possíveis defeitos estruturais.
- Ensaios de Desgaste e Atrito: Importantes para aplicações resistência ao desgaste, como engrenagens e mancais.
- Análise Dinâmico-Mecânica (DMA): Mede o comportamento viscoelástico do material em diferentes condições de temperatura e frequência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado por meio de simulação numérica baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), seguindo um fluxo de trabalho integrado entre os softwares SOLIDWORKS, ANSYS Workbench e ANSYS Mechanical. Essa abordagem garantiu eficiência e precisão em cada etapa do processo, conforme detalhado abaixo:

3.1 Modelamento geométrico

- a) Desenvolvimento da Geometria: o modelo 3D do componente foi criado no solidworks, priorizando fidelidade às dimensões reais e considerando simplificações estratégicas para otimizar a análise.

- b) Exportação: a geometria foi exportada em formato compatível para importação no SpaceClaim, preservando features relevantes para a simulação.

3.2 Carregamento de dados e pré-processamento

- a) Definição do Material: Propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, limite de escoamento) foram atribuídas ao modelo.
- b) Configuração do Ambiente de Simulação: Seleção do tipo de análise (*Static Structural*) e ajuste de parâmetros.

3.3 Geração da malha

- a) Discretização do Modelo: A malha foi gerada com elementos finitos adequados.
- b) Aplicação de Carregamentos e Restrições:
- c) Forças e torques aplicados conforme condições operacionais reais.
- d) Condições de contorno (fixações e apoios) foram definidas para representar cenários físicos válidos.

3.4 Resolução e análise

- a) Execução da Simulação: O solver do ANSYS Mechanical resolveu as equações de equilíbrio, gerando resultados de tensões, deformações e outros parâmetros mecânicos.
- b) Pós-Processamento:
- Visualização de campos de tensão (von Mises) e deformação em mapas de cores.
 - Identificação de regiões críticas e comparação com critérios de falha

Tabela 1 – Fluxo de Trabalho

Modelagem CAD	⇒	
Pré-processamento (importação, malha, carga)	⇒	
Processamento (solução)	⇒	
Pós-processamento (resultados e gráficos)	⇒	

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Caracterização do material e origem de dados

Após a definição da malha, é necessário definir as propriedades dos materiais a serem simulados. Para a caracterização mecânica dos compósitos PET-GF20 e PA6-GF30, foram

utilizados os dados de propriedades mecânicas fornecidos pelo fabricante dos filamentos, AKRO-PLASTIC, em seu catálogo técnico (AKRO-PLASTIC, 2025a, 2025b). A utilização de dados de fabricante para análise via MEF é uma prática consolidada na literatura para estudos comparativos e de viabilidade inicial, garantindo que os parâmetros de entrada representem com fidelidade o comportamento do material real conforme especificado pelo produtor (Wojciechowski, 2022).

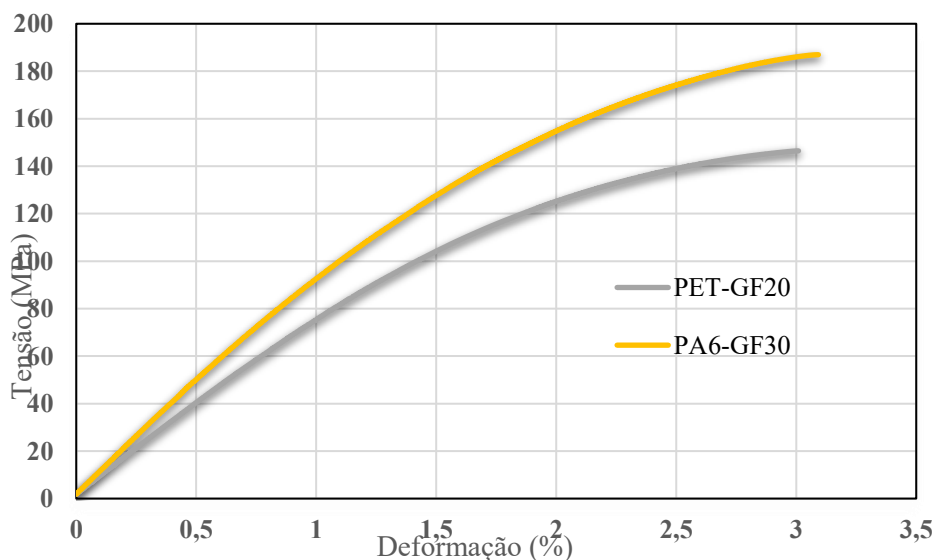
Os valores empregados para definir os parâmetros do material no software de elementos finitos e para construir a curva tensão-deformação teórica (Figura 4) correspondem aos materiais comerciais AKROMID B28 GF 30 6 LT black (8500) (PA6-GF30) e PRECITE E GF 20 natural (7301) (PET-GF20), conforme especificado na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas

Propriedade	Poliamida PA6-GF30	Polietileno tereftalato PET-GF20
Densidade (g/cm ³)	1,35	1,47
Módulo de Tração (MPa)	9 800	7 800
Tensão de Ruptura (MPa)	185	145
Coeficiente de Poisson	0,35	0,42
Limite de Escoamento (MPa)	118	85

Fonte: AKRO-PLASTIC (2024)

Figura 4: Gráfico tensão x deformação



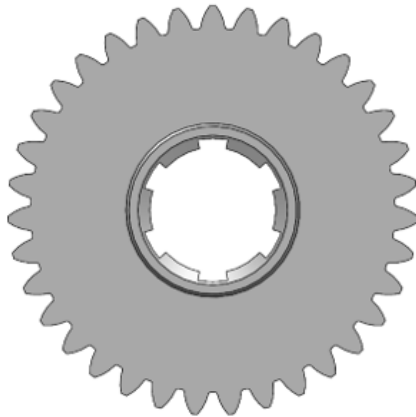
Fonte: Adaptado de AKRO-PLASTIC (2024)

3.6 Determinação do torque e da carga na face da engrenagem.

No estudo de sistemas de transmissão, é essencial compreender os esforços que atuam sobre as engrenagens para garantir seu desempenho e resistência durante o funcionamento. Entre os principais esforços envolvidos estão o torque, que representa a força de rotação aplicada ao eixo, e a carga na face do dente, que corresponde à força transmitida entre os dentes durante o contato. Esses dois parâmetros são fundamentais não apenas para o dimensionamento adequado da engrenagem, mas também para a realização de análises estruturais por meio de simulações computacionais.

Neste tópico, são apresentados os cálculos utilizados para determinar essas grandezas, com base em fórmulas amplamente reconhecidas na literatura técnica, como as contidas no livro Projeto de Elementos de Máquinas, de Shigley. Os resultados obtidos fornecem dados importantes para avaliar o desempenho mecânico do componente e verificar se ele está apto a suportar as condições de operação previstas no projeto.

Figura 5: Modelo da engrenagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

a. Dados de Operação

- Número de dentes: 35
- Módulo: 4 mm
- Diâmetro primitivo: 140 mm
- Largura da engrenagem: 15 mm
- Potência do Torno: 7,5 kW
- Velocidade Rotação: 500 rpm

b. Cálculo da Carga Tangencial na Engrenagem

A força tangencial W , que atua na base do dente da engrenagem durante a transmissão de potência, pode ser determinada com base na potência transmitida H e na rotação n , segundo Budynas e Nisbett (2021), conforme a Eq.(1):

$$W = \frac{60000 * H}{\pi * d * n} \quad (1)$$

Onde;

W = carga tangencial (força) na base do dente [N]

H = potência transmitida [kW]

d = diâmetro primitivo da engrenagem [mm]

n = rotação [rpm]

Substituindo os valores de operação, obtém-se:

$$W = \frac{60000 * H}{\pi * d * n} \Rightarrow W = \frac{60\,000 * 7,5}{\pi * 140 * 500} \Rightarrow W \approx 2\,100 \text{ N}$$

c. Cálculo do Torque Transmitido

O torque transmitido ao eixo pode ser determinado a partir da força tangencial W atuante no diâmetro primitivo da engrenagem, segundo Budynas e Nisbett (2021), conforme a Eq.(2):

$$T = \frac{W * d}{2} \quad (2)$$

Onde;

T = Torque transmitido em [N.m]

W = força tangencial [N]

d= diâmetro primitivo da engrenagem [mm]

Substituindo os valores de operação, obtém-se:

$$T = \frac{W * d}{2} \Rightarrow T = \frac{2\,100 * 0,14}{2} \Rightarrow T \approx 147 \text{ N.m}$$

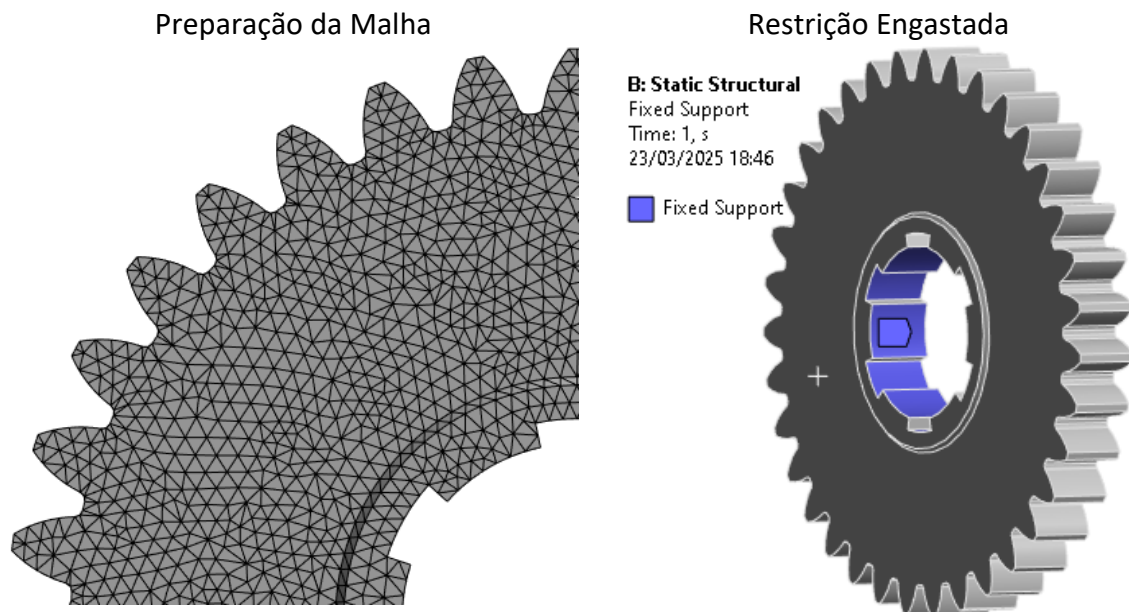
Os valores de torque e força tangencial calculados foram utilizados como condições de carregamento na simulação computacional realizada no software ANSYS. O torque representa o esforço de rotação transmitido pelo eixo, enquanto a força tangencial corresponde à carga aplicada sobre os dentes da engrenagem durante o contato entre os pares. Esses parâmetros foram aplicados ao modelo tridimensional da peça para simular, de forma realista, o comportamento mecânico da engrenagem em operação. Com isso, foi possível analisar a distribuição de tensões e deformações, identificando possíveis concentrações de esforço que poderiam comprometer a integridade do componente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Configuração dos carregamentos e condições de contorno

Nesta seção são apresentados os carregamentos e as condições de contorno adotados no modelo de elementos finitos. Essas definições representam as condições de operação do componente e constituem a base para a obtenção de resultados confiáveis nas análises numéricas realizadas.

Figura 6: Malha e engastamento.



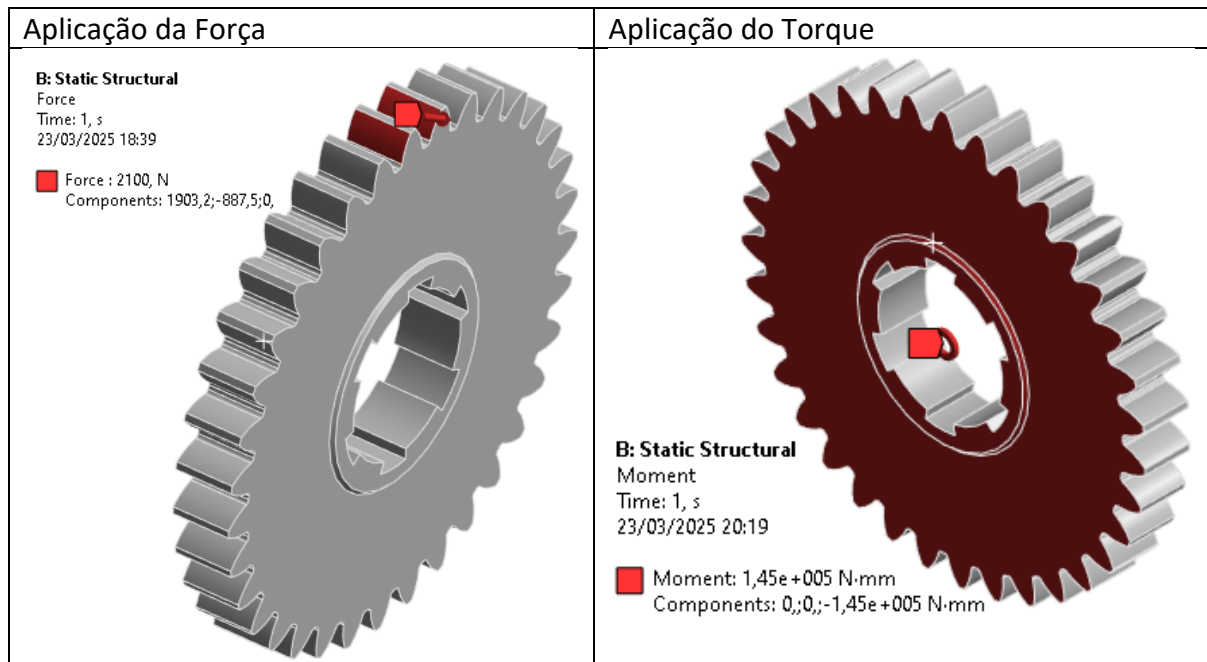
Fonte: Elaborado pelo autor

O carregamento foi modelado por meio da aplicação de uma força de 2100 N sobre a face do dente da engrenagem. A força foi orientada com inclinação de 25° em relação ao eixo horizontal, de forma a representar as condições de contato entre os dentes durante o engrenamento estático.

Para garantir maior precisão na análise numérica, foi adotado um refinamento da malha na região de contato entre os dentes. Essa estratégia permitiu representar com maior fidelidade as concentrações de tensão e deformação, reduzindo erros numéricos nas áreas submetidas aos maiores esforços mecânicos.

Além da força aplicada, foi considerado um torque de 147 N·m no eixo Z, no sentido horário, reproduzindo as condições típicas de transmissão de potência do conjunto mecânico. As condições de carregamento e de contorno empregadas na simulação são apresentadas na Figura 7.

Figura 7: Aplicação do carregamento.



Fonte: Elaborado pelo autor

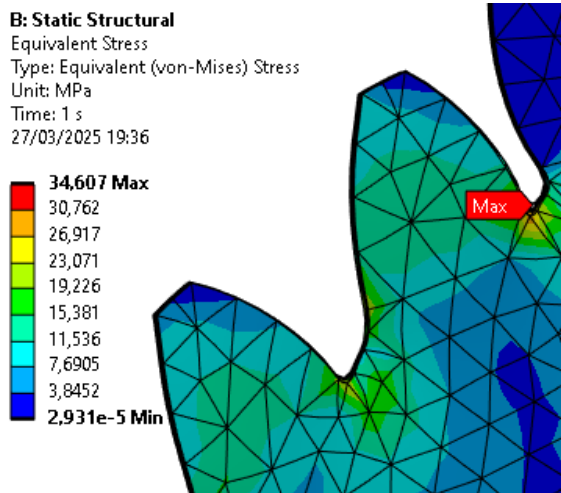
4.2 Resultados da simulação para uma carga: 2100 N

A análise dos resultados demonstrou que a tensão equivalente permaneceu abaixo dos limites admissíveis para ambos os materiais, indicando que as engrenagens possuem capacidade estrutural para suportar as condições de carregamento consideradas. Entretanto, o PA6-GF30 apresentou distribuição de tensões mais favorável e menor suscetibilidade à concentração de esforços quando comparado ao PET-GF20, evidenciando maior desempenho mecânico (Figura 8).

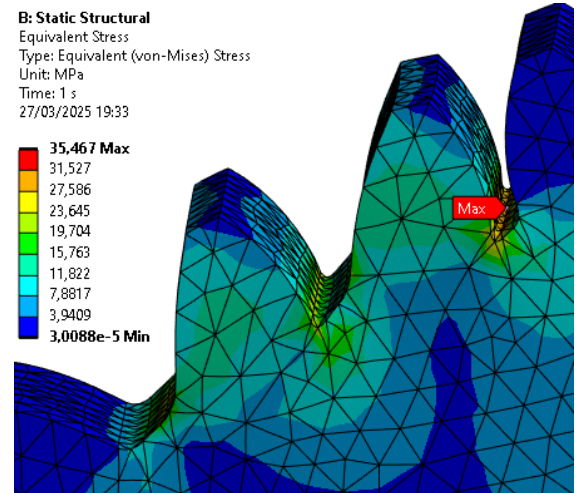
Embora o PET-GF20 também tenha atendido aos critérios de resistência, os resultados sugerem que sua aplicação pode ser aprimorada por meio de otimizações geométricas, como a modificação do perfil ou das dimensões da engrenagem, com o objetivo de reduzir as concentrações de tensão e aumentar a vida útil do componente em serviço.

Figura 8: Tensão PA6-GF30 x PET-GF20.

Tensão de Von Mises - PA6-GF30



Tensão de Von Mises -PET-GF20

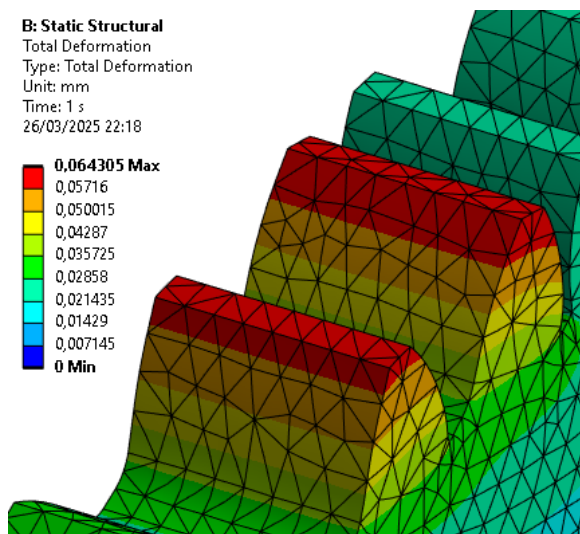


Fonte: Elaborado pelo autor

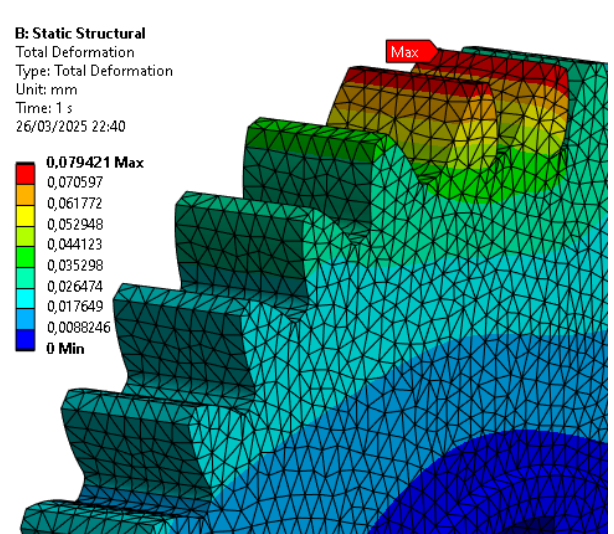
A análise da deformação total revela que o PA6-GF30 apresenta melhor desempenho em termos de resistência à deformação sob a carga aplicada, enquanto o PET-GF20 pode exigir otimizações no projeto para garantir sua adequação à aplicação. A distribuição das cores indica que a deformação também se concentra nas pontas dos dentes da engrenagem conforme Figura 9.

Figura 9: Deformação PA6-GF30 x PET-GF20.

Deformação Total – PA6-GF30



Deformação Total – PET-GF20



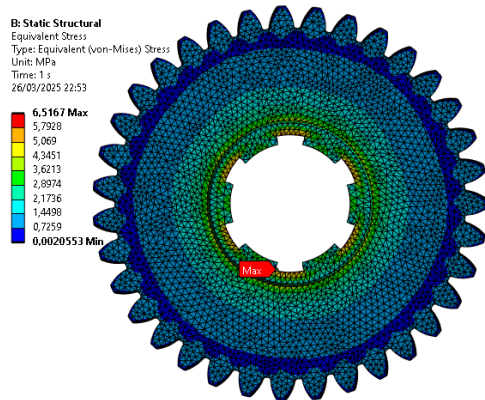
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Resultados da simulação para o momento: 147 N.m

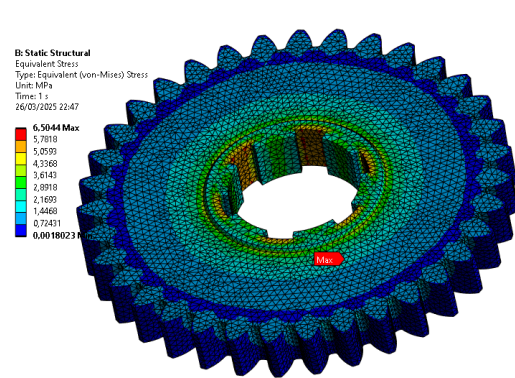
As simulações demonstraram que, sob um torque de 147 N·m, tanto o PA6-GF30 quanto o PET-GF20 apresentam tensões equivalentes de von Mises muito baixas (6,5 MPa), ficando significativamente abaixo de seus limites de escoamento (118 MPa e 85 MPa, respectivamente). Embora os valores sejam próximos, o PA6-GF30 mostra maior margem de segurança, sendo mais adequado para aplicações críticas conforme Figura 10.

Figura 10: Tensão PA6-GF30 x PET-GF20.

Tensão de Von Mises - PA6-GF30



Tensão de Von Mises - PET-GF20

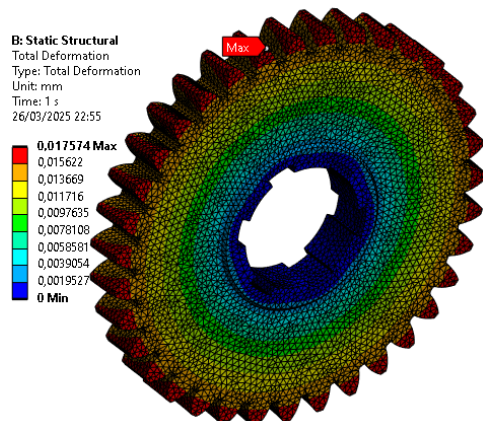


Fonte: Elaborado pelo autor

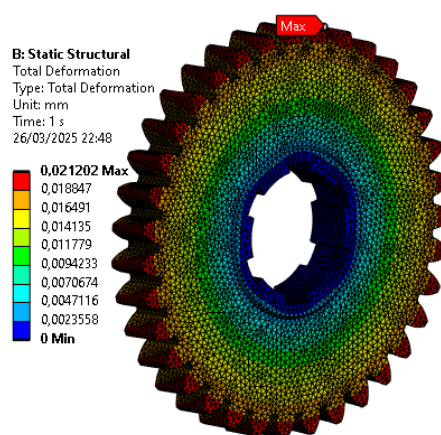
As simulações de deformação total sob torque de 147 N·m revelaram que o PA6-GF30 apresenta menor deformação máxima (0,01752 mm) comparado ao PET-GF20 (0,02702 mm), demonstrando sua superior rigidez. Embora ambos os materiais apresentem deformações insignificantes e bem dentro dos limites seguros para aplicações em engrenagens conforme Figura 11, o PA6-GF30 se mostra mais vantajoso com uma redução de 23% na deformação, reforçando sua adequação para aplicações que demandam maior precisão dimensional.

Figura 11: Deformação PA6-GF30 x PET-GF20.

Deformação Total – PA6-GF30



Deformação Total – PET-GF20



Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 3 demonstra uma síntese referente a compra do PET-GF20 e PA6-GF30.

Tabela 3 - Comparação entre PET-GF20 e PA6-GF30 para engrenagens sob carga de 2.100 N e torque de 147 N.m

Critério	PET-GF20	PA6-GF30	Conclusão
Tensão (MPa)	Tensão de escoamento: 85 Tensão sob carga: 35,50 Tensão sob torque: 6,50	Tensão de escoamento: 118 Tensão sob carga: 34,60 Tensão sob torque: 6,52	PA6-GF30 oferece 42% mais margem de segurança
Deformação(mm)	Sob carga: 0,079 Sob torque: 0,021	Sob carga: 0,064 Sob torque: 0,017	PA6-GF30 tem 19% menos deformação sob carga e 23% menos sob torque
Sustentabilidade	• Alta reciclabilidade • Maior potencial de reciclabilidade	• Dificuldade de reciclagem • Maior impacto ecológico	PET-GF20 é mais sustentável
Aplicações Recomendadas	• Engrenagens auxiliares • Ambientes ecológicos	• Engrenagens críticas • Alta precisão	PA6-GF30 para desempenho PET-GF20 para sustentabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor

5. CONCLUSÃO

Este trabalho realizou uma análise comparativa entre os compósitos poliméricos PET-GF20 e PA6-GF30 aplicados à fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes retos produzidas por manufatura aditiva, utilizando a Análise por Elementos Finitos (FEA) como ferramenta para avaliação do comportamento mecânico. Os resultados obtidos permitiram atingir o objetivo proposto, demonstrando que ambos os materiais apresentam desempenho estrutural compatível com as condições de carregamento analisadas, operando abaixo de seus respectivos limites de escoamento.

Entre os materiais avaliados, o PA6-GF30 apresentou desempenho mecânico superior, caracterizado por maior resistência, menor deformação e maior margem de segurança, sendo a alternativa mais indicada para aplicações que exigem elevada confiabilidade estrutural, precisão dimensional e maiores solicitações mecânicas. Por sua vez, o PET-GF20 demonstrou comportamento estrutural satisfatório, evidenciando potencial para aplicações submetidas a cargas moderadas, com o diferencial de apresentar maior potencial de reciclabilidade e contribuir para estratégias voltadas à economia circular e à sustentabilidade.

Os resultados também evidenciam a importância da integração entre ferramentas CAD/CAE e tecnologias de manufatura aditiva no desenvolvimento de componentes

mecânicos, permitindo avaliar virtualmente diferentes materiais, reduzir custos associados à fabricação de protótipos e acelerar o processo de desenvolvimento de produtos. Essa abordagem mostra-se especialmente relevante para aplicações em que a otimização estrutural e a seleção adequada de materiais são fatores determinantes para o desempenho do componente.

Como limitação, destaca-se que as análises foram fundamentadas em simulações numéricas utilizando propriedades mecânicas fornecidas pelos fabricantes dos materiais, não contemplando validação experimental. Dessa forma, recomenda-se que trabalhos futuros incluam ensaios mecânicos em corpos de prova e engrenagens produzidas por manufatura aditiva, análises de fadiga, desgaste, influência da orientação de impressão e da anisotropia do processo, além de estudos de ciclo de vida (Life Cycle Assessment – LCA). Essas investigações permitirão validar os resultados obtidos numericamente e ampliar o conhecimento sobre a aplicação de compósitos poliméricos reforçados em componentes de transmissão de potência produzidos por manufatura aditiva.

REFERÊNCIAS

AKRO-PLASTIC GmbH. **Technical data sheet for AKROMID® B28 GF 30 6 LT black (8500).**

Niederzissen: AKRO-PLASTIC GmbH, 2025. 4 p. Disponível em:

[https://hongrunplastics.com/public/uploads/images/20250918/AKRO%20PA6%20AKROMID%20B28%20GF%2030%206%20LT%20black%20\(8500\).pdf](https://hongrunplastics.com/public/uploads/images/20250918/AKRO%20PA6%20AKROMID%20B28%20GF%2030%206%20LT%20black%20(8500).pdf). Acesso em: 10 out. 2024.

AKRO-PLASTIC GmbH. **Technical data sheet for PRECITE E GF 20 natural (7301).**

Niederzissen: AKRO-PLASTIC GmbH, 2025. 4 p. Disponível em: <https://akro-plastic.com/en/product/precite-e-gf-20-natural-7301-en>. Acesso em: 10 out. 2024.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Projeto de elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2021.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials science and engineering: an introduction**. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.

ISLAM, Md Aminul; MOBARAK, Md Hosne; RIMON, Md Israfil Hossain; AL MAHMUD, Md Zobair; GHOSH, Jubaraz; AHMED, Md Mir Shakib; HOSSAIN, Nayem. Additive manufacturing in polymer research: advances, synthesis, and applications. **Polymer Testing**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108364>.

JOSEPH, Tomy Muringayil et al. Polyethylene terephthalate (PET) recycling: a review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, p. 100673, jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100673>.

LANDESMANN, Alexandre; SERUTI, Carlos Alexandre; BATISTA, Eduardo de Miranda. Mechanical properties of glass fiber reinforced polymers members for structural applications. **Materials Research**, São Carlos, v. 18, n. 6, p. 1372–1383, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1516-1439.044615>.

MOJŠKERC, B. *et al.* Fatigue and wear performance of bioepoxy vacuum-infused and autoclave-cured E-glass fiber reinforced polymer composite gears in mesh with a steel pinion. **Polymer Testing**, v. 140, art. 108600, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108600>

ODIAN, George. **Principles of polymerization**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.

RUBINSTEIN, Michael; COLBY, Ralph H. **Polymer physics**. New York: Oxford University Press, 2003.

SPERLING, Leslie H. **Introduction to physical polymer science**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

UMDAGAS, Luqman *et al.* Advances in chemical recycling of polyethylene terephthalate (PET) via hydrolysis: a comprehensive review. **Polymer Degradation and Stability**, v. 234, n. 111246, abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111246>.

WIKIPEDIA. Poliamida. 2024. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Poliamida>. Acesso em: 10 jul. 2024

WOJCIECHOWSKI, Renan Bueno. **Validação do modelo de elementos finitos 3D/método dos blocos para laminação de produtos planos**. 2022. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://sig-arquivos.cefetmg.br/arquivos/2022254045a1a84341340bc577e3e9c4a/Verso_Definitiva_da_Dissertao_-_Renan_Bueno_-_Mestrado_PPGEM_2019-2_-_RB6_2.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

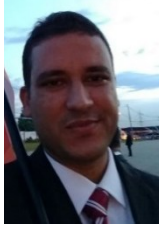
YOUNG, Robert J.; LOVELL, Philip A. **Introduction to polymers**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pela sabedoria e força durante todo o processo de desenvolvimento desta pesquisa. Também expressamos profunda gratidão à nossas famílias pelo apoio incondicional e incentivo ao longo deste trabalho.

Sobre os Autores:

ⁱ **Thales Renato de Souza Ferreira**



Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Paulista, com graduação tecnológica em Projetos Mecânicos pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo e pós-graduado em Projetos de Mecânica Industrial pelo Centro Universitário SENAI. Sua experiência profissional abrange projetos de moldes para injeção de alumínio e ferramentas progressivas de corte, dobra e repuxo. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1588-3865>

ⁱⁱ **Leandro Cardoso da Silva**



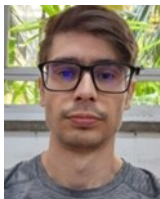
Possui graduação em Engenharia de Produção Mecânica pelo Centro Universitário Nove de Julho, Mestrado em Engenharia de Materiais pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo. Atualmente é professor e pesquisador no Centro Universitário Senai-SP e na FATEC, lecionando disciplinas nas áreas de DFMA, FEA, CFD e Processos de Fabricação. Tem experiência na área de Engenharia de Produção e Materiais, com ênfase em desenvolvimento de produtos, manufatura aditiva e engenharia aplicada à Indústria 4.0. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1636-3685>

ⁱⁱⁱ **Edgard Gonçalves Cardoso**



Engenheiro de Produção Mecânica e de Segurança do Trabalho, mestre e doutorando em Energia, com especializações em Manutenção Industrial, Gestão de Projetos, Gestão de Pessoas e Educação. Atua como Técnico de Laboratório na UFABC e professor de ensino superior no Centro Universitário SENAI-SP, com experiência em manutenção, energia, educação e gestão de riscos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9464>

^{iv} **Lucas Almeida Willenshofer**



Graduado em Engenharia de Controle e Automação e Engenharia Elétrica, mestre em Engenharia Mecânica (IFSP). Professor no SENAI-SP e ENIAC, com experiência em Automação Industrial, Engenharia Elétrica, IoT, redes industriais e integração de sistemas voltados à Indústria 4.0. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8884-7607>

^v **Manuel Patrício da Silva Bisneto**



Doutor em Nanociências e Materiais Avançados (UFABC), mestre em Engenharia Mecânica e Aeronáutica (ITA), especialista em Engenharia de Produção e graduado em Tecnologia em Processos de Produção. Professor e consultor com experiência em desenvolvimento de produtos, gestão de projetos, Lean Manufacturing, modelagem 3D e simulações. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2176-2288>