

AVALIAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA A SUBSTITUIÇÃO DE PEÇAS CRÍTICAS: ESTUDO DE CASO E SIMULAÇÕES DE ELEMENTOS FINITOS

Autores

Maria Eduarda de Andrade Castilho¹

Maria Gabriéla Dias da Silva²

Mayra Eduarda Oliveira Siqueira³

Adriano José Sorbille de Souza⁴

Ingrid Meirelles Salvino Tomazewski⁵

Resumo

A escolha de materiais adequados e o uso de Análise por Elementos Finitos (FEA – *Finite Element Analysis*) serão fundamentais para garantir desempenho e durabilidade de componentes mecânicos. Este trabalho utilizou essa abordagem para investigar o desgaste prematuro de uma peça crítica no setor de embalagem de uma indústria metalúrgica, cuja falha recorrente provocava paradas no processo produtivo e elevava os custos de manutenção. Sem reposição disponível, tentou-se imprimir a peça em 3D com PLA (Ácido Polilático), mas o material falhou diante das exigências operacionais. Diante disso, o estudo propôs a análise comparativa entre PLA, Nylon e ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), três termoplásticos amplamente usados na manufatura aditiva. Através de simulações via FEA, foi avaliado o desempenho estrutural de cada material em condições reais de trabalho. O objetivo geral foi indicar a alternativa mais viável para futuras manutenções, considerando resistência mecânica e custo-benefício e os objetivos específicos foram: analisar uma variedade de materiais aplicáveis à construção da garra; realizar simulações computacionais por meio da Análise por Elementos Finitos (FEA) e por fim por fim, a elaboração de um comparativo técnico e econômico entre os materiais testados. Para tanto, a metodologia utilizada neste trabalho de graduação foi a pesquisa bibliográfica em livros, sites e artigos sobre o tema e um estudo de caso.

Palavras-chave: Elementos finitos. Polímeros. Manufatura aditiva. Usinagem.

EVALUATION OF ALTERNATIVE MATERIALS FOR THE REPLACEMENT OF CRITICAL PARTS: A CASE STUDY AND FINITE ELEMENT SIMULATIONS

Abstract

The choice of appropriate materials and the use of Finite Element Analysis (FEA) will be fundamental to ensuring the performance and durability of mechanical components. This work used this approach to investigate the premature wear of a critical part in the packaging sector of a metallurgical industry, which generated downtime and high maintenance costs. With no replacement available, an attempt was made to 3D print the part with PLA (Polylactic Acid), but the material failed to meet operational demands. Therefore, the study proposed a comparative analysis between PLA, Nylon, and ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), three thermoplastics widely used in additive manufacturing. Through

¹ Graduação Superior de Tecnologia em Gestão da Produção Industrial da Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC Prof. Waldomiro May. E-mail: maria.castilho01@fatec.sp.gov.br

² Graduação Superior de Tecnologia em Gestão da Produção Industrial da Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC Prof. Waldomiro May. E-mail: maria.silva515@fatec.sp.gov.br

³ Graduação Superior de Tecnologia em Gestão da Produção Industrial da Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC Prof. Waldomiro May. E-mail: mayra.siqueira@fatec.sp.gov.br

⁴ Doutorado em em Tecnologias da Inteligência e Design Digital pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo - PUC/SP e docente na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC. E-mail: adriano.souza26@fatec.sp.gov.br

⁵ Doutorado em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense –UFF e docente na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC. E-mail: ingridmsalvino@gmail.com

FEA simulations, the structural performance of each material was evaluated under real working conditions. The overall objective was to indicate the most viable alternative for future maintenance, considering mechanical resistance and cost-effectiveness, and the specific objectives were: to analyze a variety of materials applicable to the construction of the gripper; This undergraduate thesis involved conducting computer simulations using Finite Element Analysis (FEA) and, finally, developing a technical and economic comparison between the tested materials. The methodology employed in this project consisted of bibliographic research in books, websites, and articles on the subject, as well as a case study.

Keywords: *Finite elements. Polymers. Additive manufacturing. Machining.*

INTRODUÇÃO

Em um ambiente industrial cada vez mais dinâmico e competitivo, a busca por eficiência operacional e redução de custos tem impulsionado a adoção de novas tecnologias capazes de transformar a forma como produtos e componentes são fabricados. Entre essas inovações, destaca-se a manufatura aditiva (*Additive Manufacturing.*), também conhecida como impressão 3D, que vem ganhando espaço nas rotinas de manutenção. Essa tecnologia permite a produção de peças tridimensionais por meio da adição de camadas sucessivas de material, a partir de modelos digitais, oferecendo uma alternativa versátil e ágil aos métodos tradicionais de fabricação.

Segundo Soriano (2003), nas indústrias, onde falhas inesperadas de equipamentos podem causar interrupções críticas e prejuízos significativos, a capacidade de produzir peças de reposição sob demanda se torna um diferencial estratégico. A manufatura aditiva se apresenta como uma solução eficaz para suprir a necessidade de componentes que não estão prontamente disponíveis em estoque, sejam peças descontinuadas, de difícil aquisição ou que demandem personalização.

A manufatura aditiva pode apresentar limitações em aplicações que exigem alta resistência mecânica, tolerâncias dimensionais precisas ou acabamentos específicos. Nessas situações, a usinagem de polímeros se mostra uma alternativa viável, permitindo a produção de peças com boa precisão e acabamento por meio da remoção de material com ferramentas de corte. Esse processo pode ser mais eficiente e econômico, especialmente quando a manufatura aditiva não alcança os requisitos técnicos ou de desempenho desejados.

Este trabalho propôs uma análise do papel da manufatura aditiva e usinagem de polímeros em projetos voltados à criação de peças para manutenções corretivas, explorando suas vantagens, desafios e aplicações práticas no ambiente industrial.

Quais materiais poliméricos são mais adequados para substituir a garra de um robô industrial, garantindo resistência mecânica, durabilidade e redução de custos?

O objetivo geral deste trabalho consistiu em realizar um estudo aprofundado sobre os materiais adequados à fabricação de uma garra robótica, peça fundamental na manipulação de objetos, que exige alto desempenho em termos de resistência mecânica, durabilidade, precisão. Além disso, o estudo buscou compreender os motivos que teriam levado ao insucesso do material inicialmente adotado pela empresa, analisando suas limitações técnicas frente às exigências operacionais.

E os objetivos específicos foram: analisar uma variedade de materiais aplicáveis à construção da garra, considerando suas propriedades físicas (densidade, dureza, elasticidade), mecânicas (resistência à tração, compressão e flexão) e térmicas (condutividade e resistência ao calor); Selecionar os materiais que melhor atenderam às exigências do projeto, com base em critérios como resistência, durabilidade e desempenho em diferentes condições de uso; Realizar simulações computacionais por meio da Análise por Elementos Finitos (FEA), para avaliar o comportamento dos materiais sob diferentes tipos de carga, identificando possíveis falhas antes da fabricação. Por fim, a elaboração de um comparativo técnico e econômico entre os materiais testados, considerando desempenho, custo, viabilidade de produção e impacto ambiental, com o objetivo de justificar a escolha mais adequada para a aplicação.

A justificativa deste estudo foi fundamentada na necessidade da indústria por soluções rápidas e eficientes para a substituição de peças críticas, como a garra de um robô. A manufatura aditiva foi considerada uma alternativa viável, desde que, acompanhada da escolha correta do material.

Como parte da abordagem metodológica deste trabalho, as autoras recorreram a uma combinação de pesquisa aplicada e explicativa, aliando revisão bibliográfica, estudo de caso e simulações por elementos finitos. A pesquisa foi desenvolvida em um ambiente real de produção, com foco na reposição emergencial de uma peça crítica por meio da manufatura aditiva. Com isso, o estudo buscou propor uma solução inovadora, técnica e economicamente viável.

Dessa forma, a metodologia utilizada neste trabalho, foi a pesquisa bibliográfica em sites, livros e artigos sobre o tema e foi feito uma pesquisa de campo em uma empresa metalúrgica localizada no Vale do Paraíba. Essa abordagem mostrou-se eficaz para alcançar os objetivos propostos, ao unir a fundamentação acadêmica à aplicação prática voltada à inovação e à melhoria dos processos industriais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, foi apresentado os principais conceitos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho de graduação. Sendo assim, foram abordados temas como os materiais utilizados na fabricação de peças industriais, com foco em polímeros como o ABS, Nylon 6.6 e o PLA, além do processo de usinagem e manufatura aditiva como alternativas de fabricação. Por fim, foi explicado o Método dos Elementos Finitos (FEA), que é uma ferramenta essencial para simular e avaliar o comportamento da peça da garra do robô antes da produção. Esses tópicos serviram de base para as decisões técnicas deste trabalho e para a análise dos resultados obtidos.

2.1 Manufatura aditiva

Segundo Gonçalves (2020), a manufatura aditiva é um processo inovador de fabricação que permite gerar objetos tridimensionais pela deposição sucessiva de camadas de material a partir de um modelo digital. Esse conjunto de técnicas, também chamado de impressão 3D, difere dos métodos tradicionais de fabricação, que removem material (processos subtrativos), pois constrói a peça apenas com o material necessário, camada a camada.

De acordo com Albino (2018), o pesquisador japonês Hideo Kodama é amplamente reconhecido como um dos pioneiros desse campo. Em 1981, ele descreveu métodos de fabricação de modelos de plástico tridimensional utilizando polímeros fotossensíveis e cura por luz ultravioleta, fundamentos importantes para o que hoje se conhece como manufatura aditiva.

Em comparação com os métodos tradicionais de fabricação, especialmente a usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado), a manufatura aditiva (AM) possui tanto benefícios quanto restrições.

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015), a manufatura aditiva tem revolucionado o desenvolvimento de produtos ao permitir liberdade de design e redução de custos em prototipagem.

A manufatura aditiva permite criar peças complexas com menos desperdício, sem necessidade de ferramentas ou fixações, sendo ideal para protótipos e pequenas produções. Também possibilita variação de materiais e propriedades em uma única peça. A manufatura aditiva apresenta limitações quanto aos materiais que podem ser utilizados, não sendo possível imprimir alguns materiais como madeira, tecido, papel, vidro, rochas e cerâmicas. Além disso, objetos com geometrias muito complexas ou detalhes muito pequenos podem apresentar dificuldades para serem produzidos com precisão (KALPAKJIAN; SCHMID, 2017). De acordo com Rodrigues et al. (2017):

Vários são os setores que podem se beneficiar do uso das tecnologias de AM, sendo já bastante difundidas nas indústrias aeroespacial, automobilística, de bioengenharia

(medicina e odontologia), de produtos elétricos (utensílios domésticos), de produtos eletrônicos em geral e nos setores de joalheria, artes, engenharia civil, arquitetura etc.

Diversos autores destacaram que a manufatura aditiva é uma alternativa inovadora aos métodos tradicionais, oferecendo vantagens como maior flexibilidade no design, agilidade na produção e menor desperdício de material. Apesar de suas limitações, estudos apontaram um grande potencial de aplicação, com expectativa de expansão devido aos avanços tecnológicos.

Já a usinagem, outra alternativa comum, consiste na remoção de material para obtenção da forma desejada, garantindo alta precisão, embora com maior desperdício em comparação à manufatura aditiva.

2.2 Usinagem

A usinagem é segundo Costa e Filho (2023), um conjunto de processos mecânicos que visam modificar a forma, as dimensões ou o acabamento superficial de uma peça por meio da remoção controlada de material, geralmente em forma de cavacos. Esse processo é amplamente utilizado na fabricação de componentes metálicos, plásticos e cerâmicos em diversas indústrias, como automotiva, aeronáutica, naval e de bens de consumo.

Dentre os métodos de usinagem, destacam-se de acordo com Costa e Filho (2023), o torneamento, fresamento, furação, rosqueamento, mandrilamento, retificação e a eletroerosão. Os processos podem ser realizados em máquinas convencionais ou em centros de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado), que garantem maior precisão, repetibilidade e produtividade.

Neste trabalho, a usinagem também foi considerada uma opção de processo para a fabricação da peça da garra do robô, devido à sua capacidade de proporcionar alta precisão e acabamento adequado às especificações exigidas.

2.3 Plásticos

Os plásticos e compostos são segundo Spadetti et al. (2017), materiais poliméricos sintéticos ou naturais que podem ser moldados em diferentes formas para aplicações industriais. Eles são amplamente utilizados devido às suas propriedades como leveza, resistência química, durabilidade e flexibilidade no design.

Essas características tornam os plásticos ideais para substituir materiais mais pesados ou menos resistentes, contribuindo para a eficiência e inovação nos processos produtivos.

São polímeros puros ou combinados com aditivos para melhorar características específicas, como resistência térmica e mecânica (SPADETTI et al., 2017).

O uso de aditivos é uma estratégia comum para adaptar os polímeros a condições mais

exigentes, aumentando sua aplicabilidade em projetos que demandam maior desempenho.

Segundo Spadetti et al. (2017), alguns exemplos incluem polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e policarbonato (PC), que fazem parte dos termoplásticos mais utilizados na indústria.

Esses materiais são amplamente empregados devido à sua boa processabilidade, custo acessível e propriedades que atendem a uma ampla gama de aplicações industriais.

Um destaque importante é o desenvolvimento de plásticos biodegradáveis, que se decompõem por processos biológicos em substâncias simples, como água, dióxido de carbono e biomassa, sob condições ambientais adequadas. Um exemplo é o ácido polilático (PLA), derivado de fontes renováveis como milho e cana-de-açúcar, sendo uma alternativa sustentável aos plásticos convencionais, especialmente em embalagens e produtos descartáveis. Além disso, o uso de materiais reciclados tem crescido, contribuindo para a redução do desperdício e a economia de recursos naturais.

Para Paula et al. (2025) a reciclagem avançada, conhecida como reciclagem química, também tem sido foco de pesquisa de muitas empresas e deve evoluir muito no médio prazo.

Com a adoção dessas práticas pela indústria do plástico, há um potencial enorme para a redução da poluição e conservação dos recursos naturais. Além disso, contribui significativamente para a economia circular, onde os materiais são reutilizados ao máximo, minimizando desperdícios.

2.3.1 Escolhas dos Materiais

Escolher corretamente o material antes de iniciar seu processo de produção é fundamental para garantir que a peça atenda às necessidades do projeto. Cada material possui características específicas que influenciam o desempenho, a durabilidade e a eficiência do produto final. Por isso, conhecer as particularidades de cada polímero é essencial para obter melhores resultados.

De acordo com Gessi, (2022), o ácido polilático (PLA) é um polímero termoplástico biodegradável obtido a partir de fontes renováveis, como amido e açúcares derivados de milho e cana-de-açúcar.

O PLA pode ser processado por moldagem, sopro, extrusão, termoformagem e impressão 3D, permitindo a fabricação de diversos produtos, como embalagens e peças médicas. Foi escolhido pela alta precisão na impressão 3D, facilidade de processamento, boa rigidez e resistência, sendo ideal para partes da garra que não exigem flexibilidade. Sua biodegradabilidade também contribui para a sustentabilidade.

Segundo Gessi (2022), o Nylon 6.6 é um plástico resistente e durável, produzido pela reação química entre a hexametilenodiamina (HMD) e o ácido adípico (AA). Pode ser processado por moldagem, extrusão, injeção, sopro, fiação e usinagem, sendo usado na fabricação de peças técnicas como engrenagens, buchas e roldanas. Por ser um termoplástico semicristalino, permite operações de usinagem como corte, fresagem e torneamento, desde que a temperatura seja controlada para evitar deformações.

Segundo Cruz et al. (2022, p. 5), o Nylon 6/6 é frequentemente usado para substituir metais como o latão, bronze, alumínio e aço em aplicações onde a redução de peso e a resistência à corrosão são importantes.

Esse material foi escolhido por suas excelentes propriedades mecânicas e térmicas, sendo uma alternativa viável aos metais. Destaca-se entre os termoplásticos de engenharia pela alta resistência à tração, rigidez, resistência ao desgaste e estabilidade térmica, adequado para componentes estruturais e técnicos.

Segundo Martinez et al. (2023), o ABS é um termoplástico do tipo terpolímero, formado pela combinação de acrilonitrila, butadieno e estireno. Essa estrutura confere ao material uma excelente resistência ao impacto, rigidez e boa aparência superficial, o que o torna ideal para processos como moldagem por injeção e extrusão, além de possibilitar acabamentos como pintura e lixamento. Este material pode ser usado em diferentes processos de transformação industrial, como: moldagem por injeção, extrusão, termoformagem e impressão 3D.

O ABS foi escolhido por sua alta resistência mecânica e térmica, boa resistência a impactos e flexibilidade moderada, ideal para peças duráveis que suportam esforços repetitivos. Além disso, permite acabamentos como lixamento e pintura para melhorar a estética e funcionalidade.

Além dos materiais citados, o poliuretano (PU) também foi incluído neste estudo por ter sido identificado como o material original de fabricação do mordedor da garra robótica. O PU é um polímero versátil, que pode apresentar diferentes níveis de rigidez e elasticidade conforme sua formulação, destacando-se pela boa resistência mecânica, durabilidade e capacidade de absorção de impactos. Sua inclusão possibilitou uma análise comparativa mais acertiva, permitindo avaliar o desempenho dos materiais alternativos em relação ao material originalmente utilizado no componente.

2.3.2 Análise das propriedades mecânicas dos materiais

A análise de materiais segundo Carvalho e Helbig (2019), é uma etapa fundamental antes da realização da Análise de Elementos Finitos (AEF), pois assegura que o modelo

computacional represente com precisão o comportamento real do material. A exatidão dos resultados depende das propriedades mecânicas, térmicas e físicas, como resistência, elasticidade e condutividade térmica. Compreender essas características permite definir parâmetros corretos para a simulação e escolher o modelo mais adequado, evitando erros e distorções. Assim, a caracterização do material contribui para aumentar a confiabilidade do projeto, melhorando o desempenho e a segurança dos componentes analisados.

Para embasar essa escolha, a Tabela 1 apresenta uma comparação sistemática entre os polímeros PLA, NYLON e ABS, considerando propriedades mecânicas fundamentais, como resistência à tração, alongamento, resistência ao impacto, resistência ao desgaste, resistência térmica, além de aspectos como biodegradabilidade, facilidade de processamento e custo relativo. Essa análise comparativa teve como objetivo oferecer uma visão crítica das vantagens e limitações de cada material, contribuindo para decisões mais assertivas. A tabela 1 a seguir compara as propriedades dos materiais escolhidos.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais alternativos

Propriedades	PLA	ABS Premium	Nylon
Densidade	1,24 g/cm ³	1,04 g/cm ³	1,02 g/cm ³
Temperatura de Fusão	165–180 °C	–	178 °C
Temperatura do Extrusor	185–220 °C	210–240 °C	235–260 °C
Resistência Térmica VICAT	55 °C	99 °C	138 °C
Tensão de Escoamento	66 Mpa	38 MPa	45 MPa
Tensão de Ruptura	–	–	67,5 MPa
Resistência à Flexão	130 Mpa	68 MPa	–
Módulo de Elasticidade	4350 MPa	2350 MPa	1400 MPa
Impacto Izod	40 J/m ²	294 J/m ²	7000 J/m ²

Fonte: Assan (2020)

Dessa forma, a Tabela 1 permite compreender com clareza as vantagens e limitações dos materiais PLA, ABS e Nylon em comparação ao material de origem do componente. O PU se destaca por sua flexibilidade, boa resistência mecânica e elevada capacidade de absorção de impactos, características que contribuem para a redução de concentrações de tensão e aumento da durabilidade da peça em serviço.

Em relação aos materiais alternativos, o PLA se destaca por sua rigidez e facilidade de impressão, sendo indicado para peças conceituais e protótipos, embora tenha baixa resistência

ao impacto e ao calor.

O ABS apresenta um bom equilíbrio entre resistência mecânica e flexibilidade, sendo apropriado para componentes funcionais sujeitos a esforços moderados. Já o Nylon demonstra desempenho superior em resistência ao impacto, à flexão e à temperatura, sendo ideal para aplicações técnicas que exigem maior durabilidade e desempenho mecânico. A análise comparativa dessas propriedades é essencial para a seleção adequada do material, contribuindo para decisões mais assertivas no desenvolvimento de peças com base na manufatura aditiva.

2.4 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica usada para resolver problemas complexos dividindo um grande sistema em peças menores e mais simples, chamadas de elementos finitos.

Para Behseresht e Ho (2024), a aplicação de FEA na engenharia de polímeros é essencial para prever falhas e garantir a confiabilidade dos componentes em campo. Embora a ideia seja antiga, foi com o surgimento dos computadores que o MEF se tornou uma ferramenta prática e eficiente para a engenharia, permitindo simular e analisar estruturas, fluxos de fluido e outros fenômenos complexos.

Segundo Assan (2020):

O método dos elementos finitos está hoje completamente agregado às atividades do engenheiro, de modo que seu aprendizado é essencial para que se possa lidar com lucidez com os programas comerciais disponíveis em quase todos os escritórios de projetos.

Dessa forma, a colocação de Assan (2020) evidencia que o método dos elementos finitos não é apenas uma ferramenta complementar, mas uma competência fundamental para a atuação do engenheiro moderno.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se tornado uma ferramenta essencial no cotidiano dos engenheiros, como destaca Assan (2020). A popularização desta técnica não se limita apenas à teoria, mas também à sua aplicabilidade prática nos programas de simulação que são amplamente utilizados em escritórios de projetos.

Segundo Liu, Li e Park (2022) “atualmente, a análise por elementos finitos (FEA) tornou-se uma das técnicas numéricas mais populares devido à sua aplicabilidade a um amplo campo da mecânica do contínuo e muitas outras disciplinas [...]”

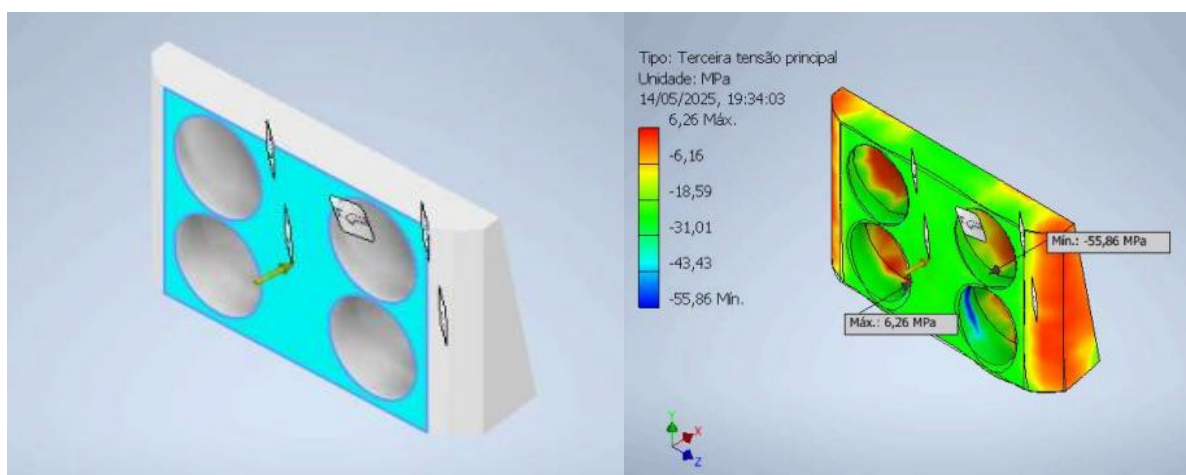
A opinião de Liu, Li e Park (2022) complementa esse contexto ao afirmar que a análise por elementos finitos se tornou uma das técnicas numéricas mais populares devido à sua ampla aplicabilidade. Ela não se restringe apenas à mecânica estrutural, mas também abrange outras

áreas da engenharia, como a mecânica do contínuo e a termodinâmica. O estudo ocorre ao dividir a peça em várias partes pequenas. Depois, analisa cada parte para ver como ela reage a forças, calor ou pressão. Juntando tudo, o método mostra como a peça inteira vai funcionar. Assim, é possível descobrir onde a peça pode quebrar ou falhar antes de fazê-la de verdade.

Compreender o funcionamento do Método dos Elementos Finitos é essencial segundo Liu, Li e Park (2022) para interpretar corretamente os resultados obtidos. A etapa de discretização, que transforma a geometria contínua em uma malha composta por elementos menores, permite que diferentes regiões do modelo sejam analisadas individualmente, garantindo maior precisão na previsão de tensões e deformações.

A imagem 1 representa parte da aplicação do método de Elementos Finitos. Com o avanço dos computadores, o MEF tornou-se essencial na engenharia e design para analisar cargas e tensões. Softwares paramétricos são usados para modelagem CAD e geração de malha, dividindo a geometria em elementos finitos (ASSAN, 2020).

Imagem 1: Aplicação da Análise



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

A **Imagem 1** apresenta uma simulação pelo **Método dos Elementos Finitos (MEF)**, mostrando a **distribuição de tensões** em uma peça. À esquerda, visualizam-se o **carregamento aplicado** e as **restrições do modelo**; à direita, o **mapa de tensões**, em escala de cores, destaca as **regiões críticas** em **vermelho**, que indicam maiores concentrações de tensão.

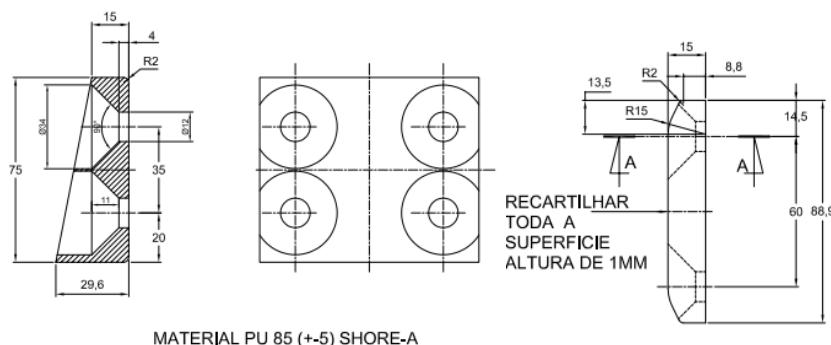
A análise reforça a **importância da escolha adequada dos materiais** e do uso de **ferramentas computacionais**, como o MEF, na **engenharia de produtos**. A integração entre as **propriedades mecânicas dos polímeros** e as **simulações estruturais** permite avaliar com precisão o **desempenho das peças**, **reduzir erros de projeto** e **otimizar o processo produtivo**.

A seção seguinte descreve a **metodologia da análise comparativa dos materiais** e a **aplicação prática da simulação**.

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido pelos discentes do 6º período do curso de Gestão da Produção Industrial da Faculdade de Tecnologia de Cruzeiro Profº Waldomiro May (Fatec Cruzeiro), com o objetivo de propor uma solução para a reposição emergencial da garra de um robô industrial em uma empresa metalúrgica da região. A partir deste problema real identificado no ambiente de trabalho de um dos integrantes do grupo, que atua nesta empresa, identificou-se a ausência de peças reservas no estoque da empresa, e constatou-se que a peça em questão era produzida apenas sob encomenda, com alto custo e longo prazo de entrega. Diante disso, optou-se por investigar alternativas viáveis utilizando manufatura aditiva e a usinagem de polímeros. A imagem 2 demonstra o esboço do desenho da peça da garra robótica.

Imagem 2: Desenho técnico do mordedor



Fonte: Ficha de identificação do mordedor (2015)

Quanto à natureza da pesquisa, este trabalho classificou-se como uma pesquisa aplicada, uma vez que busca gerar conhecimento direcionado à solução de um problema prático, com aplicação direta no contexto da empresa estudada.

Em relação aos objetivos, tratou-se de uma pesquisa explicativa, pois procurou compreender as causas do problema enfrentado e analisar como a manufatura aditiva pode ser uma alternativa eficaz, estabelecendo relações de causa e efeito a partir de análises técnicas e simulações.

Quanto aos procedimentos metodológicos, a pesquisa se caracterizou como uma pesquisa bibliográfica. Segundo Gil (2010), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos, podendo ser também publicações periódicas (jornais e revistas). Serão pesquisados artigos científicos e

livros que, de alguma forma, estão ligados ao tema.

Também se configurou como uma pesquisa-ação, uma vez que os próprios alunos participaram ativamente da identificação do problema, do levantamento de dados, do desenvolvimento da solução aplicada no ambiente empresarial.

Em seguida, foi feito um estudo de caso com o intuito de coletar informações sobre o contexto do problema e as necessidades reais da empresa.

Segundo Marconi e Lakatos (2017):

A pesquisa de campo é utilizada com o objetivo de conseguir informações e ou conhecimentos acerca de um problema, para o qual se procura uma resposta que se queira comprovar, ou, ainda, descobrir novos fenômenos ou as relações entre eles. Ainda dizem que, a pesquisa de campo consiste na observação de fatos, fenômenos, tal como ocorrem espontaneamente, coleta de dados a eles referentes e no registro de variáveis que presumem relevantes, para analisá-los.

Diante disso, a pesquisa de campo foi utilizada para fundamentar, analisar e colher o material. O desenvolvimento da garra do robô foi realizado no Autodesk Inventor, seguindo etapas que incluíram a definição dos requisitos do projeto (dimensões, tipo de movimentação e força necessária), a criação do esboço 2D e a geração do modelo 3D. Após a modelagem, foram adicionados furos, encaixes e acabamentos essenciais à montagem e ao funcionamento.

Definiu-se o material da peça, permitindo ao software calcular propriedades como peso e resistência, além de realizar uma análise estrutural para verificar sua capacidade de suportar os esforços. Por fim, foi elaborado o desenho técnico e o projeto foi exportado para fabricação. Na etapa prática, as simulações pelo Método dos Elementos Finitos (FEA) possibilitaram prever o desempenho da peça e realizar otimizações estruturais, contribuindo para a redução de custos, aumento da segurança e agilidade no desenvolvimento.

3.1 Análise de Simulação de elementos finitos (FEA)

A seleção adequada de materiais é determinante para garantir a funcionalidade, durabilidade e eficiência de componentes industriais. Neste trabalho, a análise por elementos finitos (FEA - *Finite Element Analysis*) foi aplicada à um componente fabricado por manufatura aditiva e usinagem, permitindo avaliar o desempenho de diferentes materiais poliméricos, como PLA, ABS e Nylon.

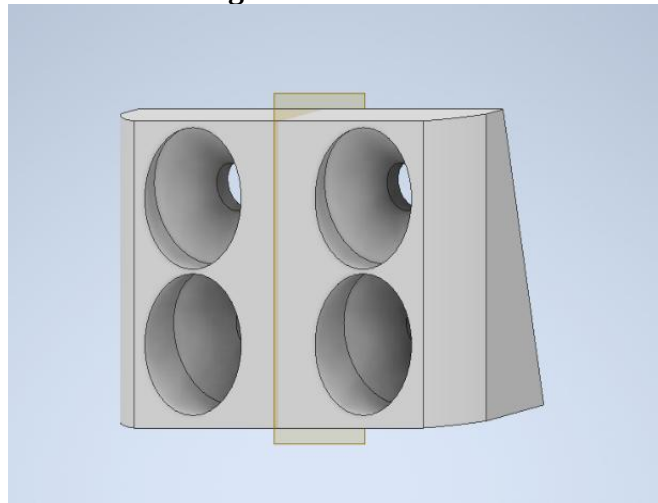
3.1.1 Procedimento da Análise FEA

A análise por elementos finitos foi conduzida em etapas estruturadas, que englobam desde a preparação do modelo até a avaliação experimental. O procedimento seguiu as etapas descritas a seguir:

a. Preparação do modelo CAD (Computer-Aided Design)

O modelo 3D da garra foi exportado e preparado para a simulação, com todos os parâmetros conferidos para garantir precisão nas unidades (mm, N, MPa). A imagem 3 exibe o modelo criado no software.

Imagem 3: Modelo CAD



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

b. Definição das propriedades dos materiais

Foram analisados três materiais: PLA, ABS e Nylon (PA6/6). As propriedades mecânicas foram extraídas de fichas técnicas. Na Imagem 4, são apresentadas as principais propriedades dos materiais selecionados para o estudo.

Tabela 2: Propriedade dos materiais

Materiais			Materiais			Materiais		
Nome	NYLON 6/6		Nome	PLA		Nome	ABS	
Geral	Densidade de massa	1,02 g/cm³	Geral	Densidade de massa	1,24 g/cm³	Geral	Densidade de massa	1,04 g/cm³
	Resistência a escoamento	45 MPa		Resistência a escoamento	66 MPa		Resistência a escoamento	38 MPa
	Resistência máxima à tração	90 MPa		Resistência máxima à tração	50 MPa		Resistência máxima à tração	40 MPa
Tensão	Módulo de Young	2,93 Gpa	Tensão	Módulo de Young	4 Gpa	Tensão	Módulo de Young	1,79 Gpa
	Coefficiente de Poisson	0,38 s_m		Coefficiente de Poisson	0,38 s_m		Coefficiente de Poisson	0,39 s_m
	Módulo cortante	1,06159 Gpa		Módulo cortante	1,44928 Gpa		Módulo cortante	0,643885 Gpa
Nome(s) de peça	TG garra robo.ipt		Nome(s) de peça	TG garra robo.ipt		Nome(s) de peça	TG garra robo.ipt	

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

A Imagem 4 compara as propriedades dos materiais escolhidos como possíveis substitutos, destacando suas características principais. Esses parâmetros são essenciais para avaliar o desempenho de cada material em sua aplicação no estudo.

c. Condições de contorno

As superfícies de fixação foram identificadas e restrições de deslocamento aplicadas.

Forças concentradas ou pressões distribuídas foram aplicadas nas regiões de contato da garra. A imagem 5 a seguir exemplifica as regiões onde ocorre a aplicação de força e fixação.

Imagem 4: Condições de funcionamento



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

A Imagem 4 apresenta as condições de funcionamento aplicadas ao modelo, realçando as áreas onde foram impostas as restrições e forças. Essas áreas em destaque representam os pontos de fixação e de aplicação de carga durante a simulação.

d. Tipo de análise e solucionador

A análise inicial foi estática linear para avaliação preliminar. Usada para comparar o desempenho estrutural dos diferentes materiais em estudos, observando **a distribuição de tensões de Von Mises, deslocamentos máximos e rigidez**, a fim de identificar qual material apresenta **melhor comportamento mecânico** sob as mesmas condições de carga.

e. Geração de malha e teste de convergência

A malha foi gerada no padrão do Software, teve como objetivo dividir o modelo em pequenos elementos triangulares para realizar o cálculo matemático sobre a estrutura de cada material. Já o teste de convergência, por sua vez, assegura que os resultados obtidos sejam independentes da consistência da malha gerada, garantindo assim precisão nos resultados.

f. Execução da simulação e pós-processamento

Foram obtidos mapas de Von Mises, tensões principais, deslocamentos e fatores de segurança. Pontos críticos foram identificados e analisados. Os resultados foram comparados entre os materiais, gerando tabelas de deslocamentos máximos, tensões e fatores de segurança.

A simulação por elementos finitos revelou diferenças significativas no comportamento dos materiais analisados. A tabela 2 apresenta uma comparação entre os principais parâmetros mecânicos obtidos nas simulações de elementos finitos. Observou-se que o PLA apresenta elevada rigidez, mas baixa resistência à deformação e ductilidade, enquanto o ABS oferece um bom equilíbrio entre resistência e flexibilidade. O Nylon destacou-se como o material com melhor desempenho geral, especialmente em resistência à tração, o que o torna o mais adequado para aplicações que exigem durabilidade e absorção de tensões.

Tabela 3: Comparativo de materiais

Material	Rigidez	Resistência à Deformação	Ductilidade	Resistência à Tração	Desempenho Geral
PLA	★ ★ ★ ★ ☆	★ ★ ☆ ☆ ☆	★ ☆ ☆ ☆ ☆	★ ★ ☆ ☆ ☆	Médio
ABS	★ ★ ★ ☆ ☆	★ ★ ★ ★ ☆	★ ★ ★ ★ ☆	★ ★ ★ ☆ ☆	Bom
Nylon	★ ★ ★ ☆ ☆	★ ★ ★ ★ ☆	★ ★ ★ ★ ☆	★ ★ ★ ★ ★	Excelente

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

O teste confirmou a importância da escolha do material adequado e forneceu dados confiáveis para futuras decisões de projeto e experimentação.

3.1.2 Massa

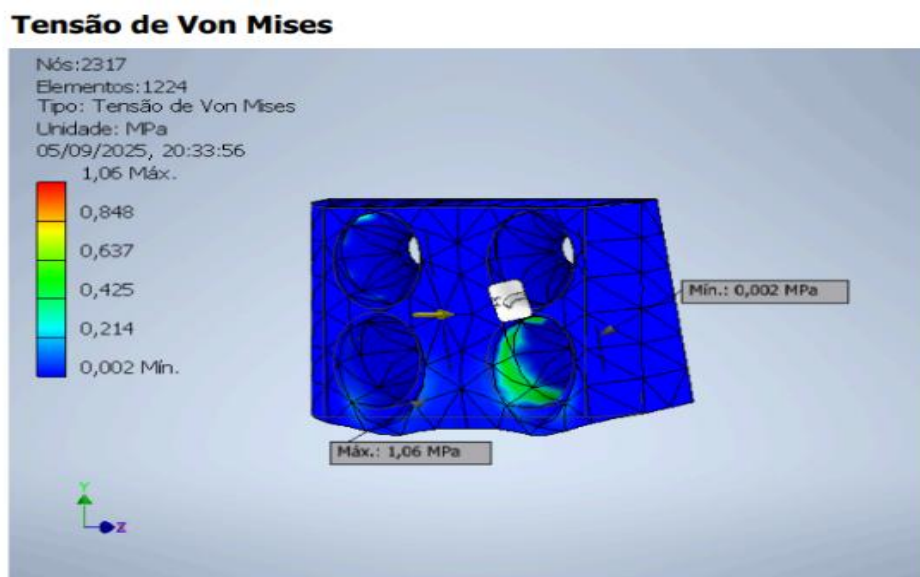
A massa de um componente segundo Guo et al. (2023), influência diretamente seu movimento e o comportamento estrutural frente a cargas aplicadas, sendo essencial em simulações de engenharia. Ela determina a resistência do objeto a mudanças em seu estado de movimento e sua interação gravitacional com outros corpos.

3.1.3 Tensão Von Mises

A tensão de Von Mises é segundo Petracconi (2009), amplamente utilizada para prever a falha de materiais dúcteis sob carregamentos complexos, fornecendo uma tensão equivalente que indica quando ocorre a deformação plástica. Em situações reais, os materiais raramente sofrem apenas tração ou compressão unidirecional; eles estão sujeitos a combinações de esforços em múltiplas direções. A tensão de Von Mises traduz esses esforços combinados em uma tensão equivalente única, que pode ser comparada com a tensão de escoamento do material. Quando a tensão equivalente alcança o valor da tensão de escoamento, o material começa a sofrer deformação plástica localizada. Em análises por elementos finitos, esse critério é fundamental para identificar regiões críticas de falha e estimar a resistência real da peça sob condições operacionais. A Imagem 5 representa como é demonstrado a Tensão de Von Mises

no relatório do Software.

Imagem 5: Tensão de Von Mises

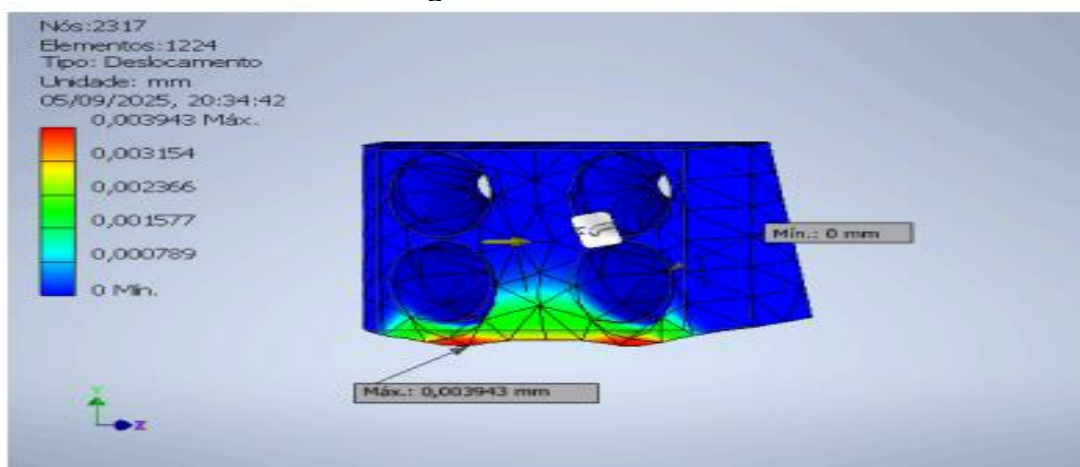


Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

3.1.4 Deslocamento

O deslocamento é de acordo com Pasa (2007), uma medida do movimento de um ponto ou corpo em relação à sua posição inicial. Em engenharia estrutural e simulações FEA, o deslocamento representa a mudança de posição de um ponto ou corpo e é fundamental para avaliar a deformação de peças submetidas a cargas. Além de indicar a deformação global da estrutura, o deslocamento também ajuda a identificar regiões de maior deformação, que podem comprometer a funcionalidade do componente ou gerar tensões elevadas. A análise de deslocamento é, portanto, essencial para garantir que a peça trabalhe dentro dos limites de serviço sem perda de desempenho. A seguir a Imagem 6 retrata o deslocamento no modelo.

Imagem 6: Deslocamento



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

As simulações por elementos finitos permitiram identificar tensões críticas, deslocamentos e a influência da massa na garra do robô. Com base nesses resultados, a seção a seguir apresenta a análise detalhada do desempenho estrutural e comparativo entre os materiais estudados.

4. ESTUDO DE CASO

Uma empresa metalúrgica implementou a manufatura aditiva para produzir um componente da garra de um robô que é responsável pela manipulação de rodas, visando reduzir custos, aumentar a eficiência e facilitar manutenções.

No início do projeto, a falta de informações sobre o material original da peça da garra, chamada **mordedor**, dificultou sua reprodução. Optou-se por utilizar **PLA reforçado**, um polímero leve, resistente e de fácil impressão. Porém, nos testes operacionais, o **mordedor não apresentou resistência suficiente** para suportar as cargas repetitivas, sofrendo **deformações e falhas estruturais prematuras**.

Posteriormente, identificou-se que o material original era Poliuretano (PU), conhecido por sua resistência e flexibilidade. Com isso, foi desenvolvido um novo projeto utilizando PU, que, após a fabricação e instalação, apresentou desempenho satisfatório, suportando as cargas sem falhas.

Este trabalho propôs um estudo complementar com o uso da Análise de Elementos Finitos (FEA – *Finite Element Analysis*), visando identificar materiais que possam apresentar desempenho igual ou superior ao Poliuretano, considerando tanto aspectos técnicos quanto de custo-benefício. O objetivo foi avaliar a viabilidade de alternativas que garantam resistência mecânica adequada sem comprometer a eficiência econômica do processo produtivo. Dessa forma, o estudo contribuiu para a inovação e otimização do processo, oferecendo à empresa novas opções de materiais para futuras reposições da peça.

Após a implementação da garra em Poliuretano (PU), foi realizado um estudo de custos, durabilidade e fornecedores para avaliar a viabilidade da solução. Antes, a peça era comprada pronta por R\$ 4.044,00 mensais. Com a compra de tarugos de PU 150 × 150 mm a R\$ 2.635,35 e usinagem interna, houve redução de ~35% nos custos e menor prazo de reposição, mantendo o desempenho da máquina. A peça produzida internamente mostrou alta resistência e durabilidade.

Segundo os operadores, a troca de material não afeta o desempenho da garra, embora testes com outros polímeros ainda sejam necessários. O levantamento de custos realizado na

implementação em poliuretano confirmou que a substituição não compromete a funcionalidade.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

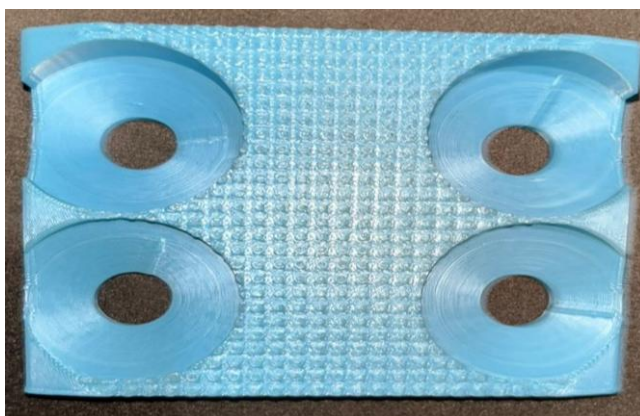
Nesta etapa, são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do trabalho, tanto na análise prática do caso real quanto nas simulações computacionais realizadas. O objetivo é compreender o comportamento dos diferentes materiais escolhidos relacionando suas propriedades mecânicas e térmicas. O Poliuretano (PU) foi adotado como material de referência por ser o material **originalmente utilizado** na fabricação da garra robótica, sendo, portanto, o **parâmetro de comparação** para a avaliação dos materiais alternativos, uma vez que apresenta desempenho satisfatório nas condições reais de operação.

5.1 Análise do Estudo de Caso e Falha Inicial

A análise do estudo de caso teve como finalidade investigar as causas do insucesso do primeiro protótipo do mordedor da garra, produzido em PLA, e comparar seu desempenho com a nova peça fabricada em Poliuretano (PU).

A primeira peça a ser substituída foi impressa em PLA, foi instalada na garra do robô para suportar o movimento repetitivo das rodas na linha de embalagem. Nos primeiros testes, a peça apresentou deformação plástica e falhas estruturais, decorrentes do contato contínuo com as rodas e dos esforços mecânicos repetitivos durante a operação da garra. A imagem 7 é mostra o protótipo utilizado inicialmente.

Imagem 7: Peça em PLA



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

O insucesso da peça em PLA se deve às limitações do material: baixa resistência térmica, que provoca deformação plástica sob aquecimento localizado, e fragilidade, com baixa tenacidade e absorção limitada de impactos. Sob cargas repetitivas, surgem microtrincas e risco

de fraturas prematuras, tornando o inadequado para aplicações industriais que exigem resistência a esforços contínuos e variações de temperatura, como na garra do robô.

5.2 Análise Estrutural Comparativa por Elementos Finitos (FEA)

O desenvolvimento de projetos no campo da engenharia industrial e mecânica exige uma análise detalhada do comportamento dos materiais e componentes quando submetidos a diferentes condições. Através dessa análise técnica, é possível observar com maior precisão a distribuição de tensões, deslocamentos e deformações, permitindo uma avaliação mais completa de seu desempenho.

5.2.1 Distribuição de Tensão (Von Mises) e Pontos Críticos

A análise da tensão de Von Mises permitiu identificar como cada material respondeu ao carregamento aplicado de 980,665 N sobre o mordedor da garra robótica. Observou-se que os valores máximos de tensão se mantiveram muito próximos entre os materiais, variando de 1,047 MPa (ABS) a 1,0598 MPa (PLA e Nylon 6.6).

Esses resultados indicam que, embora os materiais possuam propriedades mecânicas diferentes, o comportamento estrutural frente ao esforço aplicado é semelhante no contexto desta simulação. Os pontos críticos de concentração de tensão se localizaram, principalmente, nas regiões de fixação e nas extremidades das garras, áreas onde ocorre a maior transferência de carga.

O Nylon 6.6, devido à sua maior resistência à tração (90 MPa) e tenacidade, apresentou melhor distribuição das tensões, sugerindo uma capacidade superior de absorver esforços sem risco iminente de falha. Já o ABS demonstrou comportamento adequado, porém com menor resistência ao escoamento (29,6 MPa), o que o torna mais suscetível à deformação plástica sob cargas maiores. O PLA, apesar de apresentar uma resistência intermediária (40 MPa) e um módulo de Young elevado (4 GPa), pode se tornar mais frágil em regiões sujeitas a impacto ou esforços repetitivos.

Nesse contexto, o **Nylon 6.6** apresentou resposta mais compatível com o Poliuretano, uma vez que ambos demonstraram boa distribuição das tensões e menor propensão à concentração crítica em regiões específicas da peça. Essa semelhança indica que o Nylon 6.6, assim como o PU, possui capacidade adequada de suportar esforços repetitivos, reduzindo o risco de falhas estruturais durante a operação.

5.2.2 Deslocamento Máximo e Rigidez

O deslocamento máximo é um parâmetro essencial para avaliar a rigidez estrutural e a estabilidade da peça. Entre os três materiais analisados, os valores obtidos foram: PLA 0,00394 mm; Nylon 6.6 0,00538 mm; ABS 0,00884 mm.

Esses resultados demonstram que o PLA apresentou o menor deslocamento, evidenciando maior rigidez e menor deformação elástica quando submetido à mesma carga. Essa característica está diretamente relacionada ao seu módulo de elasticidade mais alto (4 GPa).

Por outro lado, o ABS exibiu o maior deslocamento, o que confirma seu comportamento mais flexível, associado ao módulo de Young inferior (1,79 GPa). Já o Nylon 6.6 apresentou um desempenho equilibrado, com um deslocamento intermediário e boa capacidade de absorver deformações sem comprometer a integridade estrutural, o que o torna uma opção interessante para aplicações que exigem resistência combinada à flexibilidade.

Entre os materiais analisados, o **Nylon 6.6** apresentou comportamento mais próximo ao PU, exibindo deslocamentos intermediários, inferiores aos do ABS e superiores aos do PLA. Esse resultado evidencia um equilíbrio entre rigidez e flexibilidade, característica desejável para o mordedor da garra robótica, pois permite a absorção de impactos e variações de carga sem gerar deformações excessivas ou falhas prematuras.

5.2.3 Massa

A massa da garra robótica também foi um fator relevante na comparação, pois influencia diretamente na eficiência energética e na dinâmica do robô. As massas obtidas foram: ABS 0,166 kg; Nylon 6.6 0,179 kg; PLA 0,195 kg.

O ABS se destacou como o material mais leve, característica vantajosa em aplicações onde a redução de peso é prioritária. O Nylon 6.6, embora um pouco mais denso, oferece um bom equilíbrio entre peso e desempenho mecânico, apresentando uma excelente relação resistência/massa. O PLA, por sua vez, mostrou a maior densidade entre os três, o que pode representar um acréscimo no peso final da garra, mas também contribui para sua maior rigidez estrutural.

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados obtidos nas simulações, elaborou-se uma tabela comparativa reunindo os principais parâmetros; Tensão de Von Mises, Deslocamento máximo e Massa. Esse resumo permite uma visibilidade das diferenças de desempenho entre o PLA, o ABS e o Nylon 6.6, destacando as variações no comportamento

estrutural de cada material frente às mesmas condições de carregamento e restrição. Os valores e observações correspondentes estão presentes na tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Resultados comparativos das análises por Elementos Finitos (FEA)

Material	Tensão de Von Mises (MPa)	Deslocamento Máximo (mm)	Massa (kg)	Principais Observações
PLA	1,0598	0,00394	0,195	Maior rigidez e menor deslocamento; material mais denso e frágil sob impacto.
ABS	1,047	0,00884	0,166	Menor rigidez, maior deslocamento; leve e de fácil processamento.
Nylon 6.6	1,0598	0,00538	0,179	Boa resistência mecânica e flexibilidade; equilíbrio entre peso e rigidez.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

Em relação à **massa**, o Poliuretano (PU) apresenta uma densidade intermediária, o que contribui para um bom equilíbrio entre resistência mecânica e eficiência dinâmica da garra robótica. Entre os materiais analisados, o **Nylon 6.6** demonstrou comportamento mais próximo ao PU, pois, apesar de possuir massa superior ao ABS e inferior ao PLA, mantém uma relação adequada entre peso e desempenho estrutural. Essa característica é favorável para aplicações robóticas, nas quais o controle de massa influencia diretamente o consumo energético, a precisão dos movimentos e a vida útil do equipamento.

5.3 Análise de Custos e Processos

A análise de custos é uma etapa essencial na avaliação da viabilidade econômica de materiais alternativos, pois é por meio dela que se verifica se a substituição proposta representa uma opção financeiramente vantajosa, assegurando retorno econômico compatível com os objetivos da empresa. Essa etapa é indispensável para fundamentar a tomada de decisão quanto à escolha do material mais adequado, considerando não apenas o desempenho técnico, mas também o impacto financeiro ao longo do ciclo produtivo.

O estudo de caso realizado demonstrou que a **fabricação interna da peça da garra robótica em Poliuretano (PU)** proporcionou uma **redução aproximada de 35% nos custos**, quando comparada à aquisição da mesma peça junto a fornecedores externos. Essa alteração não apenas reduziu despesas operacionais, como também otimizou o tempo de reposição e manteve o desempenho funcional da garra.

Dando continuidade ao estudo, realizou-se à **análise comparativa dos materiais estudados como possíveis substitutos**, considerando orçamentos atualizados. A seguir, a tabela 4 apresenta um resumo dos custos médios e principais características dos materiais analisados, possibilitando uma visão consolidada do desempenho econômico e técnico de cada alternativa.

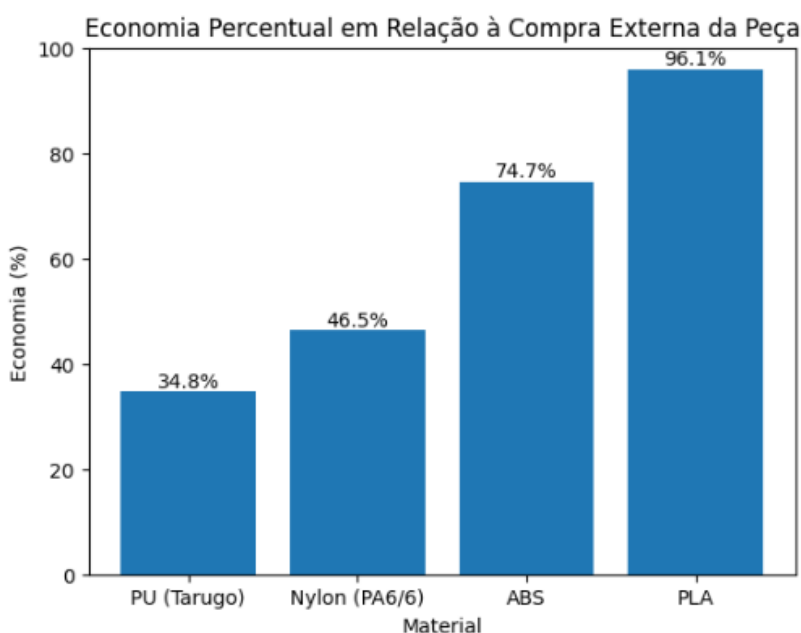
Tabela 5 – Comparativo de custos de materiais alternativos

Material	Formato / Dimensão	Custo Médio	Percentual de Economia
Poliuretano (PU)	Peça pronta (fornecedor externo)	R\$ 4.044,00/mês	-
Poliuretano (PU)	Tarugo 150 × 150 mm – Shore A90	R\$ 2.635,35	34,8 %
Nylon (PA 6.6)	Chapa	R\$ 1.200,00 a R\$ 3.125,00	46,5%
ABS	Tarugo	R\$ 850,00 a R\$ 1.200,00	74,7%
PLA	Filamento (impressão 3D)	R\$ 67,92 a R\$ 250,00/kg	96,1%

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

Com base nos valores apresentados na Tabela 4, foi elaborado uma representação gráfica com o intuito de demonstrar, de forma mais clara e objetiva, o percentual de economia obtido com cada material analisado em relação ao custo original da peça adquirida externamente (Imagem 8). Essa visualização permite uma melhor compreensão do impacto financeiro de cada alternativa, evidenciando quais materiais proporcionam maior redução de custos e, conseqüentemente, melhor relação custo-benefício para a empresa.

Imagem 8 – Percentual de Economia



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025)

A análise econômica comparou os materiais com o custo original da peça externa (R\$

4.044,00). Todos os materiais mostraram redução de custos em diferentes proporções. O Poliuretano (PU) em tarugo trouxe economia de ~35%, sendo viável tecnicamente e já validado pela empresa. O Nylon (PA6/6) reduziu cerca de 46%, mas seu custo de usinagem e dureza podem elevar o custo final. O ABS apresentou economia de ~75%, equilibrando custo, resistência e usinagem, sendo promissor para aplicações de menor exigência estrutural. O PLA teve a maior economia (~96%), mas suas limitações mecânicas e térmicas o tornam inadequado para uso industrial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo desenvolvido possibilitou uma análise comparativa entre diferentes materiais aplicáveis à fabricação interna do mordedor da garra robótica, considerando aspectos técnicos, econômicos e de viabilidade produtiva. A partir das simulações realizadas por meio da Análise por Elementos Finitos (FEA), constatou-se que o Poliuretano e o Nylon 6.6 apresentaram os melhores resultados em termos de resistência, rigidez e custo de produção, sendo assim selecionado como as alternativas mais adequadas para a aplicação proposta.

Entretanto, a etapa de avaliação comparativa dos materiais, voltada à justificativa da escolha do material mais apropriado, foi parcialmente alcançada, uma vez que as análises realizadas se basearam exclusivamente em resultados de simulação computacional. Para que essa comparação seja validada de forma conclusiva, torna-se necessário fabricar as peças em Poliuretano e Nylon 6.6 e submetê-las em condições reais de operação, essa etapa permitiria observar o desgaste, o tempo de vida útil e a manutenção do componente.

Dessa forma, recomenda-se que este trabalho sirva de base para pesquisas futuras, voltadas à validação dos resultados simulados e ao aprofundamento da análise do comportamento dos materiais em ambiente industrial. A continuidade dessa investigação poderá contribuir significativamente para o avanço de soluções técnicas e econômicas voltadas à manutenção industrial, bem como para o fortalecimento da integração entre inovação tecnológica e os princípios da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

ALBINO, Leonardo Vieira. **Estudo, Preparação e Aplicação de Fibras Ópticas Poliméricas utilizando tecnologia de Impressão 3D**. Unesp: Araraquara, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/e4c22590-3a9b-4fec-b2f0-93903fad2fa5/content>. Acesso em: 30 nov. 2025.

ASSAN, Aloisio Ernesto. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. 3. ed. rev. e ampl. Campinas: Editora da Unicamp, 2020.

BEHSERESHT, Saeed; HO, Parque Houng. **Manufatura Aditiva de Polímeros Compósitos: FEA Termomecânico e Estudo Experimental**. Revista MDPI, v. 17, nº 8, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.3390/ma17081912>. Acesso em: 30 nov. 2025.

BRASIL ESCOLA. **Poliuretano: por uma boa causa**. Disponível em:

<https://brasilescola.uol.com.br/quimica/poliuretano-por-uma-boa-causa.htm>. Acesso em: 12 dez. 2025.

CARVALHO, João Vitor Azambuja; HELBIG, Daniel. **Simulação numérica para análise de deflexões e tensões em placas finas de aço e de materiais compósitos submetidas a esforços de flexão**. *Scientia Plena*, v. 15, n. 9, 2019. DOI:<https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.049916>. Acesso em: 1 dez. 2025.

COSTA, Carlos Fernando Alves; FILHO, Ramílio Ramalho Reis. **Processo de usinagem: um estudo sobre desgaste de ferramenta de corte em Torno Cnc**. *Revista Interface Tecnológica*, v. 20, nº 2, 2023. Disponível em: https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/pt_BR/article/view/1819/987. Acesso em: 29 nov. 2025.

CRUZ, J. A. et al. **Poliamida como material de engenharia para aplicações avançadas**. In: **Open Science Research VIII**, 2022. Disponível em:

<https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/221211226>. Acesso em: 30 nov. 2025.

DIAMUNDIAL DA LIMPEZA. **O que é poliuretano?** Disponível em:

<https://diamundialdalimpeza.com.br/o-que-e-poliuretano/>. Acesso em: 12 dez. 2025.

GESSI, Loara Costa. **Desenvolvimento de Biocompósitos Poliméricos de PLA e Lignina Obtida a partir da Serragem e do Bagaço da Cana-de-Açúcar**. UFRGS, Trabalho de Conclusão de Engenharia Química: Porto Alegre, 2022. Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/255807/001155503.pdf?jsessionid=C50FC7B673C5A82D1F7937F373581419?sequence=1>. Acesso em: 30 nov. 2025.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015.

Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-2113-3>. Acesso em: 30 nov. 2025.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GONÇALVES, Eduardo. **Manufatura Aditiva: Entenda melhor o processo que está revolucionando a fabricação**. Ufscar, CCDM, 2020. Disponível em:

<https://www.ccdm.ufscar.br/2020/08/21/manufatura-aditiva/>. Acesso em: 30 nov. 2025.

GUO, Guiyong; ZHONG, Shuncong; ZHANG, Qiukun; ZHONG, Jianfeng; LIU, **Efeito da massa adicional nas frequências naturais de estruturas sensíveis ao peso**. *Sensors*, v. 23, n. 17, 7585, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/17/7585>. Acesso em: 30 nov. 2025.

IMPERPLAST. **O que é poliuretano (PU) e para que serve?** Disponível em:

<https://www.imperplast.com.br/o-que-e-poliuretano-pu-e-para-que-serve/>. Acesso em: 12 dez. 2025.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 7. ed. Boston: Pearson, 2017.

LIU, Wing Kam; LI, Shaofan; PARK, Harold S. **Oitenta Anos do Método dos Elementos Finitos: Nascimento, Evolução e Futuro**. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09740-9>. Acesso em: 30 nov. 2025.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MARTINEZ, A. C. P.; SOUZA, D. L.; SANTOS, D. M. dos et al. **Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural**. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, v. 14, n. 1, 2023. DOI: 10.11606/gtp.v14i1.148289. Acesso em: 29 nov. 2025.

MAXION WHEELS. **M-1930 FL.13A Mordedor – Model 1**. Documento técnico interno. São Paulo,

2015.

PASA, Vanessa Fátima. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos**. UFRGS, Dissertação de Mestrado,— demonstra formalmente como os deslocamentos são a base para cálculo de deformações e tensões em FEA: Porto Alegre, 2007. Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10614/000599786.pdf?sequence=1>. Acesso em: 30 nov. 2025.

PAULA, Everton Luiz de; RODRIGUES, Jordane Silva; RIBEIRO, Josy Kelly Lima; OLIVEIRA JÚNIOR, William; CORCINO VIEIRA, Luiz Henrique Oliveira; SILVA, Nathália da Cunha.

Polímeros recicláveis: impulsionando a economia circular sustentável. Revista Tecnologia e Sociedade, 2025. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/20488/11005>. Acesso em: 29 nov. 2025.

PETRACCONI, César. **Análise Comparativa do Comportamento de Fadiga do Gancho Reboque Posterior de um Veículo Automotor**. 2009. (Dissertação/Relatório — PUC-Minas). Disponível em: https://bib.pucminas.br/teses/EngMecanica_Petracconi_1.pdf. Acesso em 30 nov. 2025.

RODRIGUES, Vinícius P.; ZANCUL, Eduardo de Senzi; MANÇANARES, Cauê Gonçalves; GIORDANO, Caio Mezzeti; SALERNO, Mário Sérgio. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações**. Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas, v. 12, n. 3, 2017. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/1657/784>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SORIANO, Humberto Lima. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. Editora da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2003. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=ZQrMIb0Q9gYC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SPADETTI, Carolini et al. **Propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose**. Ciência e Tecnologia, vol.27, nSupl, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2320>. Acesso em: 29 nov. 2025.