

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DE MATERIAL POLIMÉRICO
UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA E MANUFATURA ADITIVA FDM EM
UM COMPONENTE AUTOMOTIVO

Por

Bruno Oliveira Gaulio

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2022.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Oliveira Gaulio, Bruno

Estudo da viabilidade de aplicação de material polimérico utilizando otimização topológica e manufatura aditiva FDM em um componente automotivo / Bruno Oliveira Gaulio. -- 2022.

15 f.

Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Coorientador: Marcelo Favaro Borges.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Manufatura aditiva. 2. Otimização topológica. 3. Seleção de materiais. 4. Polímeros. 5. Fused Deposition Modeling. I. Milbrath De Leon, Daniel, orient. II. Favaro Borges, Marcelo, coorient. III. Título.

Bruno Oliveira Gaulio

ESTUDO DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DE MATERIAL POLIMÉRICO
UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA E MANUFATURA ADITIVA FDM EM
UM COMPONENTE AUTOMOTIVO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Daniel Milbrath de Leon

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Daniel Milbrath de Leon

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, maio de 2022.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Mari Rosangela Dias Oliveira, meu pai, Ulises Gaulio Junior, minhas irmãs, Laura Oliveira Gaulio e Maria Eduarda Oliveira Gaulio e à minha esposa, Francine Souza Pereira, pois sem vocês ao meu lado nada disso seria possível e tampouco faria sentido.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Daniel Milbrath de Leon e ao Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges pela disponibilidade e assistência prestada ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao LAMEF por disponibilizar os equipamentos e matéria prima necessários para a realização deste trabalho.

Aos colegas e amigos do LAMEF que ajudaram não só na impressão das amostras e na realização dos ensaios mecânicos, mas discutiram e colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que durante estes anos de graduação a faculdade me apresentou, em especial àqueles que considero irmãos pra vida.

À UFRGS pela qualidade do ensino oferecido.

Oliveira Gaulio, Bruno. **Estudo da viabilidade de aplicação de material polimérico utilizando otimização topológica e manufatura aditiva FDM em um componente automotivo**. 2022. 15p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

A busca por novos materiais é uma prática bem estabelecida na indústria automotiva desde os primeiros veículos que contém componentes poliméricos. A cada nova geração de materiais se faz possível desenvolver novas soluções para otimização estrutural que reduzem custos de processamento, melhora de desempenho e ainda diminuição de peso. Dentre as técnicas que permitem a redução de massa dos componentes automotivos se destaca a utilização combinada do método dos elementos finitos e de fórmulas matemáticas para a otimização topológica. Porém, muitas vezes esta levará a geometrias impraticáveis pelos processos de fabricação tradicionais, e neste ponto a manufatura aditiva leva vantagem, pois é capaz de produzir geometrias complexas de design orgânico. Assim, o presente trabalho tem como objetivo viabilizar e validar a substituição de um componente mecânico metálico, a alavanca de freio de estacionamento, encontrado em automóveis por uma peça fabricada em um polímero de alto desempenho e com sua topologia otimizada por meio da manufatura aditiva. Através da seleção de materiais do portfólio de materiais de engenharia da linha *Ultrafuse®* da *BASF Forward AM*, levantou-se as principais características de cada opção à fim de obter a matéria prima polimérica com melhor custo-benefício para a fabricação do componente que foi otimizado topologicamente no software *Fusion360* da Autodesk e fabricado na impressora 3D FDM da BCN3D modelo *Sigmax R19*. Dentre as opções avaliadas, o polímero *Acetonitrile Styrene Acrylate* (ASA) se mostrou a melhor opção devido a sua alta temperatura de transição vítrea e principalmente a sua resistência à degradação frente a exposição a raios UV. Os resultados dos ensaios mecânicos foram satisfatórios e validaram o design otimizado do componente que tem cerca de 30% da massa do modelo original, visto que os corpos de prova resistiram à carga máxima de 40 kg prevista na norma NBR 10966-2 com coeficiente de segurança maiores que 2,4.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura aditiva. Otimização topológica. Seleção de materiais. Polímeros. Fused Deposition Modeling.

Oliveira Gaulio, Bruno. **Study of the feasibility of applying a polymeric material using topology optimization and FDM additive manufacturing in an automotive component.** 2022. 15p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

The search for new materials is a well-established practice in the automotive industry since the first vehicles that contain polymeric components. With each new generation of materials, it is possible to develop new solutions for structural optimization that reduce processing costs, improve performance and even reduce weight. Among the techniques that allow the mass reduction of automotive components, the combined use of the finite element method and mathematical formulas for topological optimization stands out. However, this will often lead to geometries that are impractical for traditional manufacturing processes, and at this point additive manufacturing has an advantage, as it is capable of producing complex geometries of organic design. Thus, the present work aims to enable and validate the replacement of a metallic mechanical component, the parking brake lever, found in automobiles by a part made of a high-performance polymer and with its topology optimized through additive manufacturing. Through the selection of materials from the engineering materials portfolio of the Ultrafuse® line of BASF Forward AM, the main characteristics of each option were raised in order to obtain the most cost-effective polymeric raw material for the manufacture of the component that was optimized topologically in Autodesk Fusion360 software and manufactured on the BCN3D model Sigmax R19 FDM 3D printer. Among the options evaluated, the polymer Acetonitrile Styrene Acrylate (ASA) proved to be the best option due to its high glass transition temperature and especially its resistance to degradation in the face of exposure to UV rays. The results of the mechanical tests were satisfactory and validated the optimized design of the component that has about 30% of the mass of the original model, since the specimens resisted the maximum load of 40 kg provided for in the NBR 10966-2 standard with a safety factor. greater than 2.4.

KEYWORDS: Additive Manufacturing. Topological optimization. Material selection. Polymers. Fused Deposition Modeling.

Símbolos

HDT	<i>Heat Deflection Temperature</i>
Tg	<i>Glass Transition Temperature</i>

Abreviaturas e acrônimos

3D	Tridimensional
ABS	<i>Acetonitrile Butadiene Styrene</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASA	<i>Acetonitrile Styrene Acrylate</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B3DPS	<i>BASF 3D Printing Solutions</i>
BASF	<i>Badische Anilin & Soda Fabrik</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
FR	<i>Flame Retardant</i>
CAD	<i>Computed Aided Design</i>
CS	Coeficiente de Segurança
CP	Corpo de Prova
PA	<i>Polyamide</i>
PC	<i>Polycarbonate</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
t/a	toneladas / ano
UV	Ultravioleta

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos polímeros. Fonte: Hemais (2003)	3
Figura 2 - Representação das principais etapas do processo de AM. Fonte: (VOLPATO 2017).	3
Figura 3 - Tecnologias de manufatura aditiva. Fonte: Adaptado de ISO/ASTM 52900:2015...4	
Figura 4 - Impressão 3D FDM. Fonte: (OZSOY 2020)	4
Figura 5 - Otimização topológica para um componente genérico. Fonte: Adaptado de AUTODESK (2022)	5
Figura 6 - Pirâmide dos requisitos de um projeto de produto. Fonte: (ASHBY e JOHNSON 2003).....	5
Figura 7 - Efeito estufa acontece no interior de veículos expostos ao sol. Fonte: (HINGANE 2018).....	6
Figura 8 - Plotagem da temperatura medida no ambiente, no porta malas e dentro da cabine de um veículo	7
Figura 9 - Peça otimizada do estudo de Dorneles (2021). Fonte: Adaptado de Dorneles (2021)	7
Figura 10 - Fluxograma de atividades desenvolvidas no escopo do trabalho. Fonte: O Autor..8	
Figura 11 – [a] Vista lateral do modelo original. Fonte: Dorneles (2021). [b] Vista lateral do modelo CAD com condições de contorno para otimização da topologia. Fonte: O Autor. [c] Vista frontal do modelo CAD. Fonte: O Autor	9
Figura 12 - Impressora 3D FDM BCN3D <i>Sigma</i> R19. Fonte: BCN3D (2022).....	10
Figura 13 – Peça impressa em FDM na BCN3D <i>Sigma</i> R19. Fonte: O Autor.....	10
Figura 14 - MTS <i>Bionix</i> ® <i>Tabletop Test Systems 370.02</i> . Fonte: Catálogo MTS (2017).....	11
Figura 15 - Conjunto montado pronto para realizar o ensaio. Fonte: O Autor.	11
Figura 16 - Gráfico radar com ênfase nas principais características observadas. Fonte: O Autor	12
Figura 17 - Geometria final. Fonte: O Autor.....	13
Figura 18 - Força máxima e CS dos corpos de prova ensaiados. Fonte: O Autor.....	14
Figura 19 - Gráfico de força vs. deslocamento do CP 2. Fonte: O Autor	14
Figura 20 - CP's após ensaio mecânico. Locais de ruptura indicados nas setas vermelhas. Fonte: O Autor.....	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados técnicos dos materiais de engenharia do portfólio <i>Ultrafuse</i> ®. Fonte: Adaptado de BASF <i>Technical Datasheet</i>	8
Tabela 2 - Parâmetros de impressão dos corpos de prova. Fonte: O Autor	10

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
2.1	Objetivo geral	2
2.2	Objetivos específicos	2
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1	Polímeros	2
3.2	Manufatura aditiva	3
3.3	Otimização topológica	5
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1	Seleção de materiais.....	5
4.2	Temperatura interna de veículos.....	6
4.3	Parâmetros do processo de impressão 3D.....	7
4.4	Otimização topológica	7
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
5.1	Metodologia	8
5.2	Seleção de materiais.....	8
5.3	Otimização topológica	9
5.4	Produção via manufatura aditiva FDM.....	9
5.5	Ensaio mecânicos	10
6.	RESULTADOS	12
6.1	Escolha do material.....	12
6.2	Otimização topológica	13
6.3	Ensaio mecânicos	13
7.	CONCLUSÃO.....	15
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	15
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1. INTRODUÇÃO

Setores da indústria altamente competitivos, como o automobilístico, buscam o equilíbrio entre funcionalidade, qualidade, custo, inovação e consciência ambiental. Este direcionamento provou-se de suma importância para que fabricantes se mantenham na vanguarda das tecnologias com a intenção de competir por uma maior parcela de mercado (MONARO, LIMA e TONETTI 2012). Como solução, considerar a troca de matérias prima tradicionais por polímeros de engenharia se torna uma alternativa conveniente devido a suas contribuições mecânicas aliadas a uma possível redução de peso.

Desde a década de 50, quando o primeiro veículo contendo materiais poliméricos em sua composição foi lançado pela Chevrolet, nomeado como Corvette (SHERMAN 2009), gradativamente, devido a razões econômicas e tecnológicas, os polímeros passaram a ocupar um lugar de destaque como um dos materiais mais utilizados pela indústria automobilística (HEMAIS 2003). A facilidade de alterar os aspectos de seus materiais e processos fez com que os polímeros ganhassem novos espaços globais na indústria automobilística, passando a ser peça chave na composição de pesquisas e estudos, tendo como intuito o melhoramento constante do material utilizado além do seu processo de manufatura (NETO, et al. 2015).

Segundo Hemais (2003), os polímeros têm demonstrado um alto índice de confiabilidade e muitas vantagens sobre os materiais tradicionais que vieram a substituir, tais como o aço, o alumínio e o vidro, por exemplo. Sua flexibilidade de projeto e baixa densidade são essenciais para a redução de peso de veículos e conseqüentemente no consumo de combustível dos mesmos. Segundo APME (*Association of Plastic Manufacturing in Europe*), para 100 quilos de peças plásticas utilizadas em um veículo, 200 a 300 quilos de outros materiais deixam de ser consumidos. Se considerarmos um veículo pesando 1 tonelada, isso representa uma economia de cerca de 7,5% de combustível, o suficiente para economizar 750 litros de combustível em uma vida útil de 150 mil quilômetros. Essa redução relevante no consumo contribui também para a diminuição da emissão de dióxido de carbono proveniente de veículos à combustão (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL 2013).

Dentre os diversos fornecedores mundiais de polímeros, podemos citar a química multinacional *Badische Anilin & Soda Fabrik* (BASF), que desde a década de 50 vem desenvolvendo pesquisas e oferecendo soluções inovadoras para o mercado de polímeros (BASF 2022). E mais recentemente, a partir de 2017, está presente no mercado com a divisão *BASF 3D Printing Solutions* (B3DPS), a qual investe fortemente em pesquisa e desenvolvimento de novas soluções e oferece hoje uma ampla gama de materiais de alta performance, inclusive a linha *Ultrafuse® Engineering Filaments*, com um vasto portfólio para fabricação por filamento fundido (*FFF – Fused Filament Fabrication*) para aplicações industriais avançadas (BASF 2021).

Além da busca por materiais alternativos em áreas que demandem componentes de alto desempenho, é possível encontrar diferentes abordagens, como a otimização estrutural topológica. Para Gordon (2003), otimizar significa, de forma geral, tornar algo tão bom quanto possível. Na mecânica, uma estrutura é entendida como qualquer união de materiais cujo objetivo é sustentar diferentes tipos de solicitações. Portanto, otimização topológica dedica-se a encontrar a melhor distribuição de material que sustenta determinadas solicitações (MOREIRA 2018).

Embora a otimização topológica seja um recurso valioso, sua aplicação prática tem alguns pontos críticos, em diversos casos a produção de tais geometrias otimizadas pode ser difícil ou até mesmo impraticável, necessitando passar por uma etapa de remodelagem para se tornar viável (AHMAD, BICI e CAMPANA 2021). Assim, a manufatura aditiva auxilia na utilização dos processos de otimização topológica, pois é capaz de produzir geometrias complexas sem qualquer tipo de remodelagem, trazendo design orgânico e minimalista aos componentes fabricados (DORNELES 2021).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Validar a substituição de um componente mecânico originalmente metálico, a alavanca de freio de estacionamento, encontrado em veículos por uma peça otimizada topologicamente e fabricada em polímero de alto desempenho por meio da manufatura aditiva FDM (*Fused Deposition Modeling*) que seja compatível com as solicitações de sua aplicação.

2.2 Objetivos específicos

- Selecionar material polimérico de engenharia para Fabricação por Fusão de Filamento (FFF – *Fused Filament Fabrication*) com a melhor relação de desempenho vs. custo frente as características mecânicas, térmicas e químicas solicitadas pelo componente;
- Otimizar a topologia do componente diante das novas características apresentadas pelo material escolhido;
- Validar o componente proposto no material escolhido com coeficiente de segurança maior que 2 por meio de ensaio mecânico em amostras produzidas via manufatura aditiva FDM.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Polímeros

A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é formado por dezenas de milhares de meros repetidos ligados por ligações covalentes (CANEVAROLO 2010). Segundo Callister e Rethwisch (2016), muitos dos polímeros são compostos orgânicos com sua química baseada no carbono, no hidrogênio e em outros elementos não-metálicos.

Dentre as características dos materiais poliméricos, vale ressaltar sua resistência a variações climáticas, à oxidação, ao calor, à radiação ultravioleta (UV), aos esforços mecânicos, entre outros (NETO, et al. 2015). Segundo Hemais (2003), tais materiais são identificados entre si segundo seu grau de diferenciação, escala de produção, nível de consumo e valor agregado.

De acordo com Bomtempo (2004), os polímeros podem ser classificados em três grandes grupos quanto ao seu valor agregado: polímeros para usos gerais (*commodity*), polímeros para usos específicos (*quasi-commodities*) e polímeros de alto desempenho (especialidades).

Os produtos *commodity* são aqueles produzidos em larga escala e amplamente consumidos, com isso tem baixo preço, baixo valor agregado e não apresentam diferenciação. Logo após temos os produtos *quasi-commodities*, que ainda assim apresentam grande escala, porém já possuem desempenho diferenciado e propriedades que elevam não apenas seu custo, mas também seu valor agregado. No topo da pirâmide temos os produtos de especialidades, que são aqueles que apresentam alto desempenho e alto valor agregado, por isso estão disponíveis em menores quantidades e são utilizados em aplicações específicas (HEMAIS 2003). Na Figura 1 temos a representação gráfica desta classificação geral proposta.

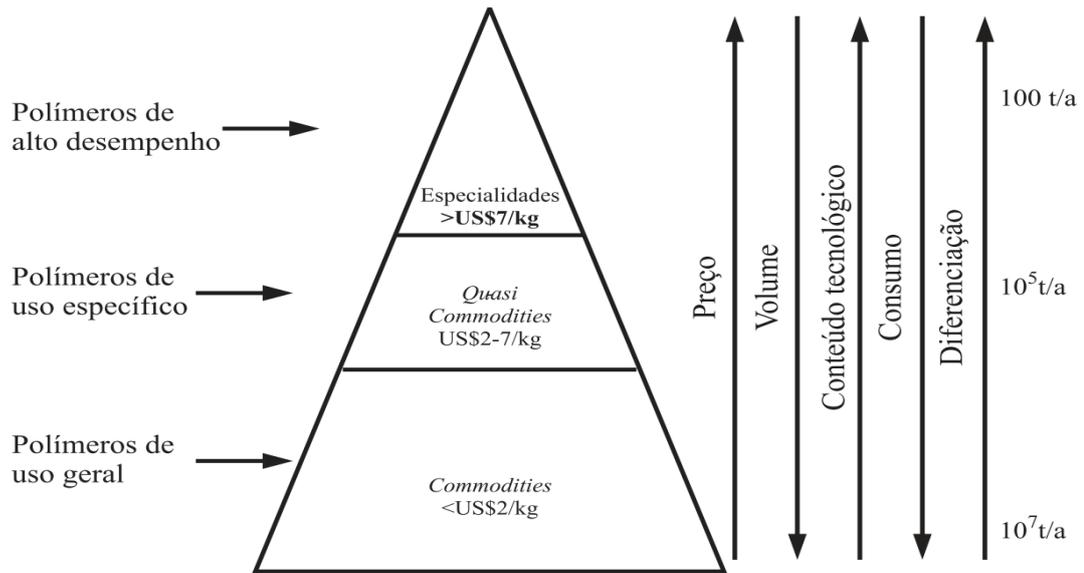


Figura 1 - Classificação dos polímeros. Fonte: Herais (2003)

É importante ressaltar que esta classificação não é permanente, visto que produtos *commodity* podem ser misturados e/ou modificados com outros polímeros, aguçando determinadas características que possibilitem substituir polímeros de alto desempenho em aplicações específicas (HEMAIS 2003).

3.2 Manufatura aditiva

Segundo a norma ISO/ASTM 52900:2015, a manufatura aditiva (AM – *Additive manufacturing*) é o processo de união de materiais para fazer peças a partir de um modelo 3D, camada sobre camada, em oposição às metodologias de fabricação subtrativa e formativa. Tal processo aditivo permite fabricar componentes físicos a partir de vários tipos de materiais, em diferentes formas e por meio da combinação de diversos princípios com grande facilidade de automatização (VOLPATO 2017). Na Figura 2 podemos ver a representação das principais etapas do processo de AM, ou impressão 3D (tridimensional), como é comumente conhecido.



Figura 2 - Representação das principais etapas do processo de AM. Fonte: (VOLPATO 2017).

Uma maneira simples de classificar os processos de AM é pelo estado ou forma inicial da matéria-prima utilizada na fabricação. Sendo assim, podemos dividir em líquido, sólido e pó (VOLPATO 2017). Porém, este tipo de classificação não indica informações sobre os princípios utilizados em cada tecnologia. Assim, a norma ISO/ASTM 52900:2015 subdivide a AM em 7 famílias diferentes, as quais são representadas na Figura 3.

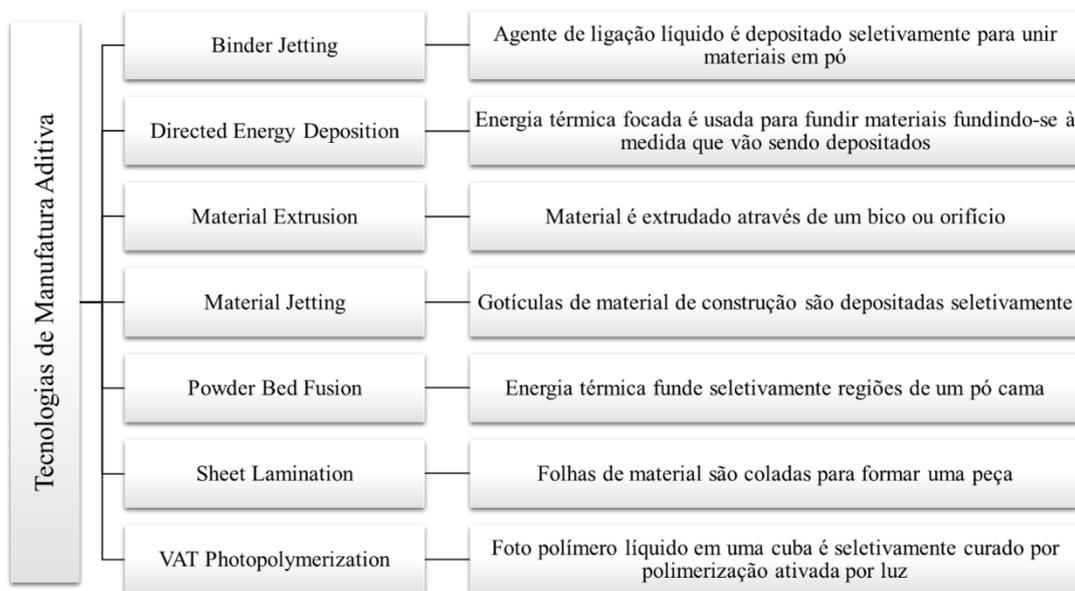


Figura 3 - Tecnologias de manufatura aditiva. Fonte: Adaptado de ISO/ASTM 52900:2015

Dentre as inúmeras vantagens de se utilizar o processo de manufatura aditiva destaca-se a grande liberdade geométrica na fabricação, capaz de criar projetos e designs com formas livres, o que abre espaço e possibilidades para otimizar projetos para a máxima resistência e o mínimo peso, alcançando geometrias normalmente impossíveis de serem reproduzidas por outros processos de fabricação (VOLPATO 2017).

No processo de impressão 3D FDM, um filamento disposto em forma de bobina e produzido de polímero termoplástico é aquecido e extrudado através de um bico que se move no plano x-y junto a uma cabeça de extrusão. Tal conjunto deposita material sobre uma base aquecida, que conforme sobrepõe-se camadas a plataforma movimenta-se no sentido vertical (eixo z) até a construção total da peça (ABREU 2015). Na Figura 4 podemos ver os princípios de funcionamento da impressão 3D FDM.

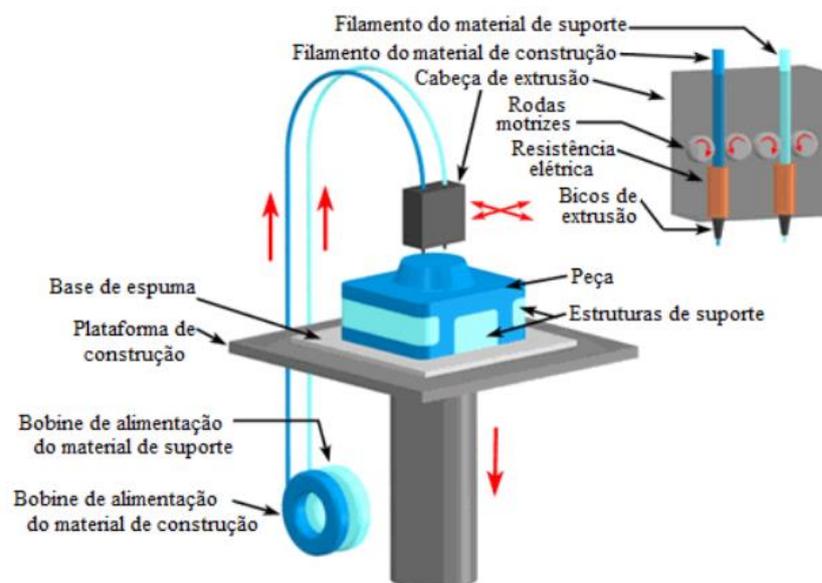


Figura 4 - Impressão 3D FDM. Fonte: (OZSOY 2020)

3.3 Otimização topológica

O objetivo da otimização topológica é encontrar o layout ideal de uma estrutura dentro de uma região especificada. As únicas grandezas conhecidas no problema são as cargas aplicadas, as possíveis condições de apoio, o volume da estrutura a ser construída e possivelmente algumas restrições adicionais de projeto, como a localização e o tamanho dos furos prescritos ou áreas sólidas (BENDSØE e SIGMUND 2003).

A otimização topológica é o processo da otimização estrutural a qual irá revelar o design mais eficiente baseado em um conjunto de restrições ou características, geralmente removendo material do projeto (AUTODESK 2022). Dessa maneira, é utilizada na indústria principalmente para redução de peso, otimização de design e conformidade estrutural, onde se alinham os vários tipos de fenômenos físicos atrelados ao projeto para encontrar a forma ideal. Na Figura 5 podemos ver o exemplo de uma otimização topológica de um componente genérico.



Figura 5 - Otimização topológica para um componente genérico. Fonte: Adaptado de AUTODESK (2022)

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Seleção de materiais

Seleção de materiais eficientes e processos de fabricação adequados são a questão chave no projeto mecânico. A grande evolução dos materiais poliméricos nos últimos anos à procura de melhor desempenho e redução de peso tem buscado novas soluções em materiais termoplásticos para substituição de peças tradicionalmente metálicas (SANT'ANNA 2007).

Na busca pela adoção de novos materiais surgem alguns problemas, como confiabilidade, preço, disponibilidade, conversão das plantas de manufatura, reciclabilidade, entre outros (GORNÍ 2014). Segundo Ashby e Johnson (2003), na Figura 6 podemos ver os principais pontos para que um produto tenha sucesso: funcionalidade, usabilidade e satisfação ao usuário.

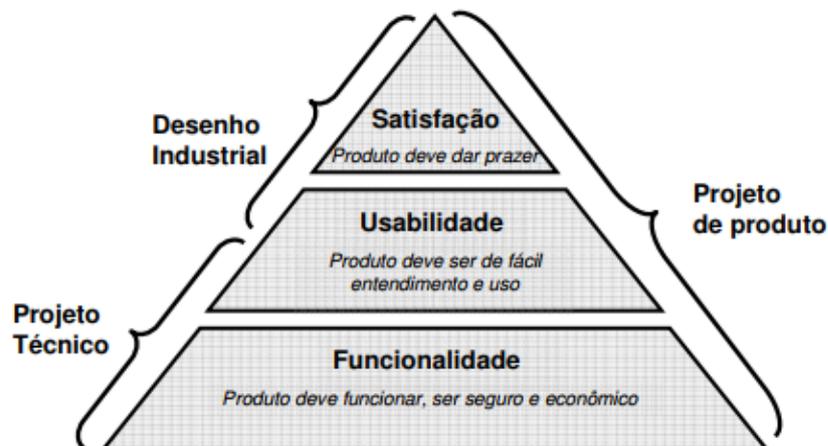


Figura 6 - Pirâmide dos requisitos de um projeto de produto. Fonte: (ASHBY e JOHNSON 2003).

Dentre os principais critérios para substituição do metal pelo polímero, deverão ser analisados os aspectos econômicos, redução de massa, liberdade de design, isolamento, funcionalidade, aparência, manutenção e resistência química (GORNI 2014).

Assim, sugere-se que uma forma mais completa e abrangente do campo de seleção de materiais deverá levar em consideração não apenas o material, mas também o método de fabricação, geometria e condições de contorno do problema.

4.2 Temperatura interna de veículos

Quando um veículo está estacionado sob o sol direto a temperatura interna pode aumentar rapidamente. Segundo Hingane (2018), os componentes internos recebem a energia vinda do sol na parte visível do espectro e absorvem essa energia fazendo com que a peça aqueça. Então, cada objeto que possui energia absorvida deverá emití-la novamente ao ambiente, que por sua vez poderá se encontrar fechado e com ventilação reduzida, como exemplificado na Figura 7. Tal mecanismo é conhecido como efeito estufa, e explica o porquê a região interna do veículo pode aquecer muito mais que as superfícies externas dele.

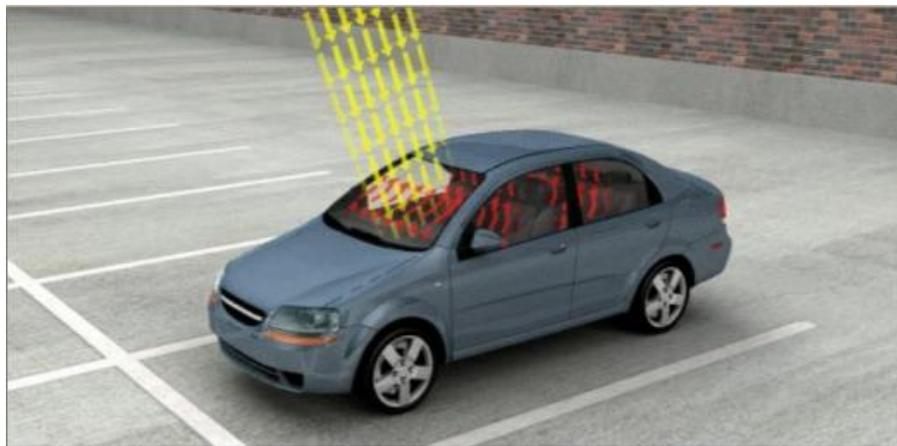


Figura 7 - Efeito estufa acontece no interior de veículos expostos ao sol. Fonte: (HINGANE 2018)

O calor acumulado pode afetar diversas partes internas do veículo, como coberturas de couro, componentes eletrônicos e principalmente peças plásticas, que podem ter sua degradação acelerada e sua vida útil diminuída (AL-KAYIEM, SIDIK e MUNUSAMMY 2010).

Como apresenta Ahmad e Ali (2018), a temperatura interna dos veículos poderá ser 20°C superior se comparada a temperatura externa. Dadour et al (2011) (DADOUR, et al. 2011) também mostra que em suas medições a temperatura interna alcançou quase 70°C em dias com a máxima de 40°C, vide Figura 8. Tais aferições podem variar devido a diversos fatores, como hora de exposição, tempo de exposição, cor da lataria, orientação geográfica, localização do veículo, enclausuramento total ou parcial, entre outros.

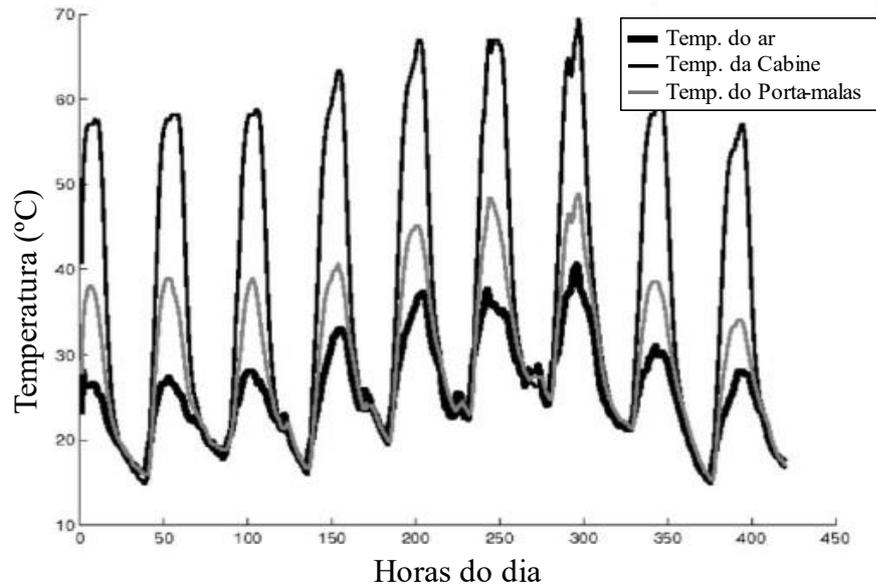


Figura 8 - Plotagem da temperatura medida no ambiente, no porta malas e dentro da cabine de um veículo durante o período de 9 dias de verão. Fonte: Adaptado de (DADOUR, et al. 2011)

4.3 Parâmetros do processo de impressão 3D

Além de uma impressora limpa e calibrada, a correta orientação da peça na mesa de impressão influencia diretamente na resistência mecânica final do componente. Segundo Hernandez et al (2016), a orientação de 0° em relação à mesa de impressão (plano XY) tem a melhor resistência aos esforços de flexão, incrementando em até 50% o resultado se comparado aos demais posicionamentos.

De acordo com Alafaghani e Qattawi (2018), maiores temperaturas de extrusão, espessura de camada de 0.3mm e padrão de preenchimento retilinear otimizam a rigidez, resistência à tração e melhoram a ductilidade. Além destes parâmetros, a escolha da espessura de parede influencia diretamente no aumento da tensão de escoamento do componente, tendo um valor ótimo de 2,6mm (PANDA, et al. 2018).

4.4 Otimização topológica

Conforme Dorneles (2021) apresenta em seu estudo, a otimização topológica da alavanca de freio de estacionamento (Figura 9) produzida no material PLA PRO1 foi satisfatória, visto que dentre os CP's testados obteve-se uma redução de massa de aproximadamente 70% e coeficientes de segurança maiores que 4,5. Porém, o trabalho sugere que este material não possui uma boa resistência térmica, deixando essa lacuna em aberto para trabalhos futuros.



Figura 9 - Peça otimizada do estudo de Dorneles (2021). Fonte: Adaptado de Dorneles (2021)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Metodologia

Para realizar o estudo proposto neste trabalho foi seguido o seguinte fluxograma de atividades identificado na Figura 10. Cada etapa será detalhada nos tópicos seguintes.

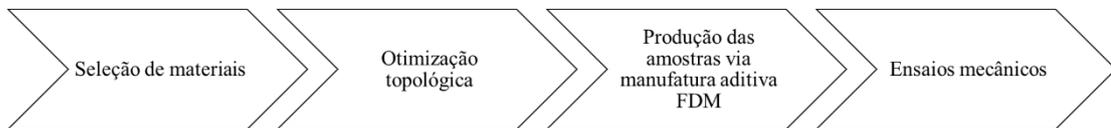


Figura 10 - Fluxograma de atividades desenvolvidas no escopo do trabalho. Fonte: O Autor

5.2 Seleção de materiais

Dentre os inúmeros fabricantes de filamentos para impressão 3D FDM disponíveis, cada qual com sua diversidade de produtos, optou-se por analisar o portfólio *Ultrafuse®* da BASF.

Os materiais oferecem diversas propriedades benéficas como facilidade de impressão, estabilidade dimensional, durabilidade e flexibilidade.

Dentre as opções disponíveis, a que mais se enquadra para a aplicação proposta do componente deste trabalho é a linha de filamentos de engenharia, pois são materiais que estão alocados entre os polímeros de uso específico e os de alto desempenho devido suas características para aplicações avançadas da indústria.

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades dos seguintes materiais: PLA PRO1, ABS Fusion+, ASA, PA e PC/ABS FR. Das características disponibilizadas destacam-se a facilidade de impressão, temperatura de transição vítrea, resistência mecânica, resistência térmica, resistência química, preço e disponibilidade no mercado nacional.

Tabela 1 - Dados técnicos dos materiais de engenharia do portfólio *Ultrafuse®*. Fonte: Adaptado de BASF *Technical Datasheet*

Material		PLA PRO1	ABS FUSION+	ASA	PC-ABS	PA	
Propriedades mecânicas	Resistência à tração	Mpa	48	29,5	34,6	50,1	61,4
	Alongamento à ruptura	%	21,9	10,9	4,5	10,7	9,6
	Módulo de Young	MPa	3166	1379	1828	2545	2419
	Resistência à flexão	MPa	92,4	48,3	59,4	88,1	77
	Módulo de flexão	MPa	2823	1406	1733	2550	2051
	Tensão flexural na ruptura	%	4,3	5,6	5,4	5,6	-
	Resistência ao impacto	KJ/m ²	20,4	32	8,9	13,3	5,6
Propriedades térmicas	Tg	°C	63	114	112	94	49
	HDT at 1.8 Mpa	°C	-	71	92	79	65
	HDT at 0.45 Mpa	°C	-	91	101	86	135
	Temperatura de fusão	°C	170-180	-	-	227	195-197
	Taxa de volume de fusão	cm ³ /10min	18,2	10	3,9	46,6	49,5
Parâmetros de processamento de impressão 3D recomendados	Temperatura de bico	°C	200-220	240-260	260-280	260-280	220-250
	Temperatura de mesa	°C	50-70	100-120	100-120	90-110	90-120
	Velocidade de impressão	mm/s	40-150	40-80	30-60	30-50	30-60
Propriedades gerais	Densidade	Kg/m ²	1250	1075	1069	1167	1115
	Resistência UV		+	+	++	+-	+-
	Facilidade de impressão		++	++	+	+	+
	Pós-processamento		+	+	+	+	-
	Estabilidade dimensional		++	+	-	+-	+-

Para a seleção do material a ser utilizado recorreu-se a uma metodologia baseada em gráfico radar, que permite a visualização de vários dados ao mesmo tempo e facilita a análise. Tendo em vista que o ambiente interno dos veículos está sujeito a altas temperaturas e incidência de radiação UV, as principais características consideradas foram a temperatura de

transição vítrea e a resistência química do material. Além disso, características de resistência à tração, alongamento na ruptura, densidade, facilidade de impressão, pós processamento e estabilidade dimensional também foram consideradas na seleção.

5.3 Otimização topológica

A otimização topológica do componente foi realizada na versão estudantil do software Autodesk *Fusion 360*. As condições de contorno foram o engaste nas direções x, y e z dos dois pinos inferiores, força aplicada na face inferior da manopla em direção de baixo para cima com ângulo de inclinação de 6° a fim de simular a posição aproximada de um motorista aplicando a força no componente e preservação de geometria nas regiões tanto da manopla quanto dos dois furos que foram engastados, conforme demonstra a Figura 11.

Após a etapa de otimização topológica o software gera um arquivo Stereolithography (STL) que aproxima as superfícies do modelo sólido em triângulos. Este arquivo foi refinado no *software* Meshmixer para aumentar o número de elementos de malha a fim de obter uma superfície mais limpa e homogênea.

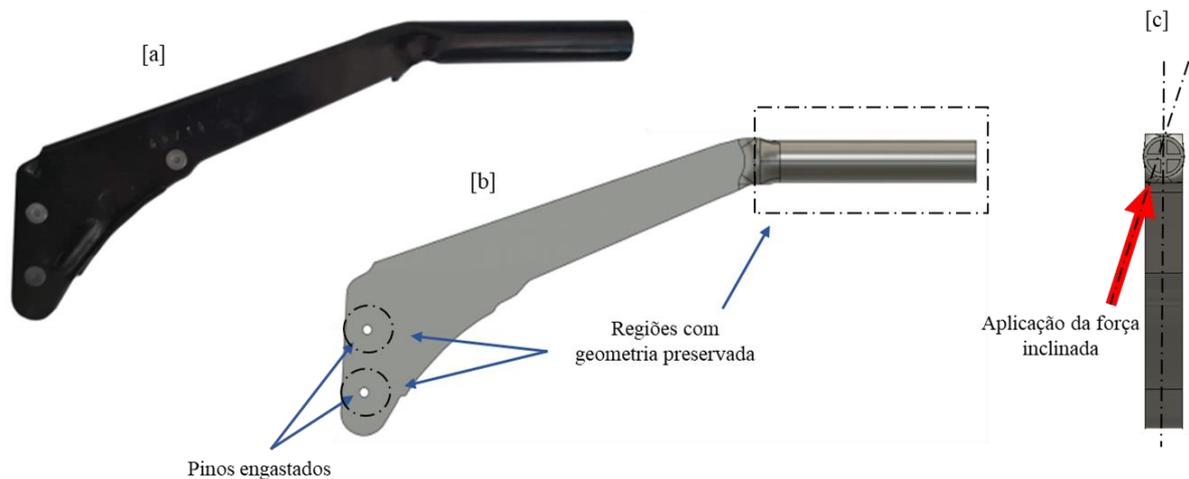


Figura 11 – [a] Vista lateral do modelo original. Fonte: Dorneles (2021). [b] Vista lateral do modelo CAD com condições de contorno para otimização da topologia. Fonte: O Autor. [c] Vista frontal do modelo CAD. Fonte: O Autor

5.4 Produção via manufatura aditiva FDM

A produção dos CP's (corpos de prova) foi realizada na impressora 3D FDM da marca BCN3D modelo *Sigma R19* com volume de impressão de 420mm X 297mm X 210mm (Figura 12).

A fim de comparar os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, os parâmetros de impressão basearam-se na literatura de Dorneles (2021), diferenciando apenas as temperaturas de bico e de mesa, que são referentes ao material escolhido e consideram os dados disponibilizados na folha de dados do material *Ultrafuse® ASA*. Os parâmetros de impressão foram configurados a partir do programa fatiador Ultimaker Cura e os principais dados são identificados na Tabela 2.

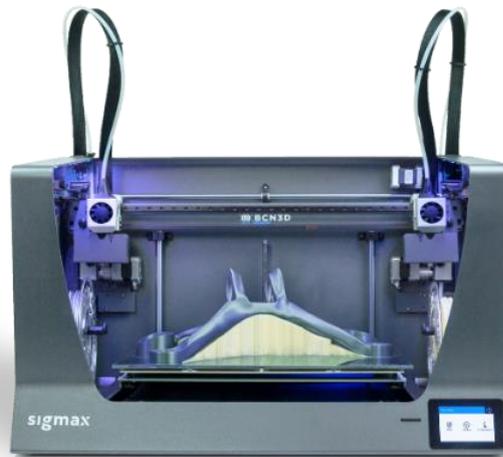


Figura 12 - Impressora 3D FDM BCN3D *Sigmax R19*. Fonte: BCN3D (2022)

Tabela 2 - Parâmetros de impressão dos corpos de prova. Fonte: O Autor

Temperatura do bico	260 °C	Layers de topo	4
Temperatura da mesa	100 °C	Layers de base	3
Altura de camada	0.3 mm	Padrão de preenchimento	Rectilinear
Largura de linha	0.8 mm	Quantidade de preenchimento	15%
Diâmetro do bico	0.8 mm	Velocidade de impressão	50 mm/s
Número de contornos	3	Orientação do CP na mesa	Plano XY (0°)

Na Figura 13 é possível ver uma peça sendo finalizada ainda na mesa de impressão da Impressora 3D FDM BCN3D *Sigmax R19*.

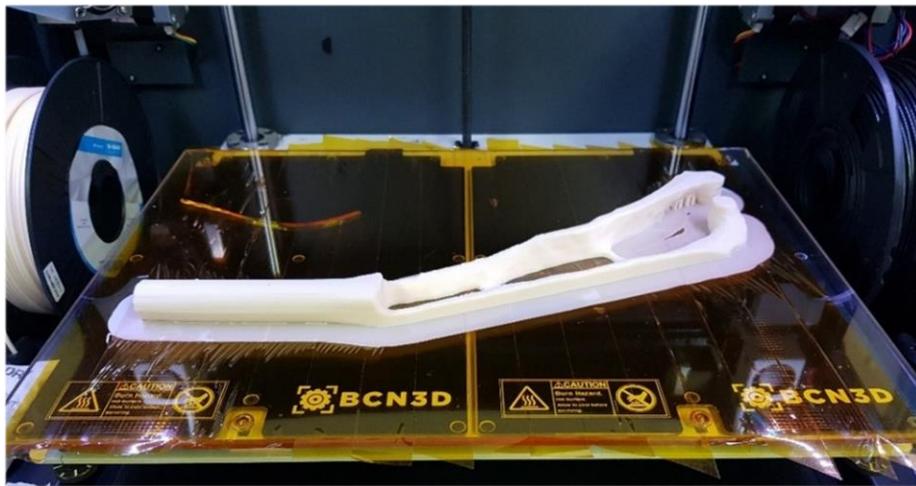


Figura 13 – Peça impressa em FDM na BCN3D *Sigmax R19*. Fonte: O Autor

5.5 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaios MTS *Bionix® Tabletop Test Systems* modelo 370.2 idêntica à mostrada na Figura 14 com uma taxa de deslocamento constante de 10 mm/min até a ruptura do componente.



Figura 14 - MTS Bionix® Tabletop Test Systems 370.02. Fonte: Catálogo MTS (2017)

Para realizar a fixação dos corpos de prova na máquina foi utilizado um dispositivo fabricado a partir de uma chapa de aço horizontal como base com uma haste vertical soldada com ângulo de inclinação de 6° . O CP foi fixado no dispositivo por dois parafusos na sua base e tracionado pela máquina através de um segundo dispositivo que encaixa na manopla do componente. Os 4 parafusos laterais no dispositivo superior são responsáveis por aumentar a superfície de contato com a manopla, evitando o escorregamento durante o ensaio. A Figura 15 mostra o conjunto montado pronto para realizar o ensaio.

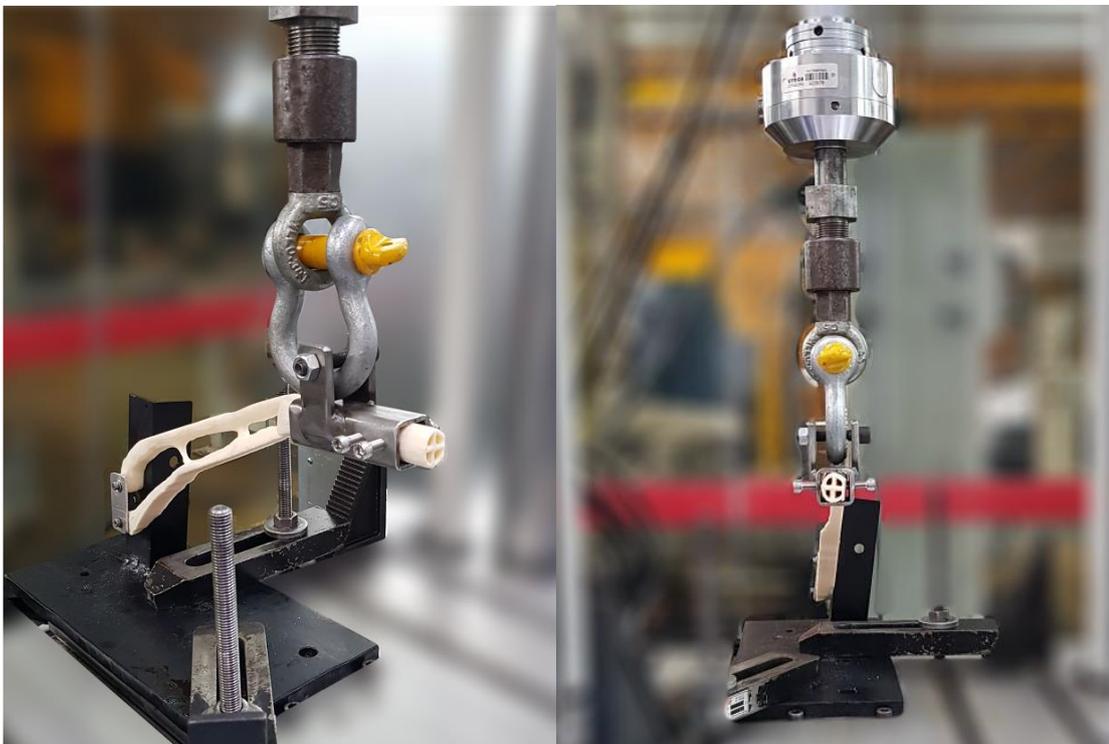


Figura 15 - Conjunto montado pronto para realizar o ensaio. Fonte: O Autor.

6. RESULTADOS

6.1 Escolha do material

Das características apresentadas na Tabela 1 foi dado ênfase em oito principais às quais foram atribuídos valores entre 1 e 4 e que são apresentadas na Figura 16: Resistência à tração, alongamento na ruptura, resistência térmica, densidade, resistência UV, facilidade de impressão, pós processamento e estabilidade dimensional.

Na etapa de seleção de material, o primeiro fator importante de descarte é a temperatura de transição vítrea (T_g), pois acima desta temperatura o componente começará a apresentar perda de rigidez mais acelerada. Dentre as 5 opções levantadas como alternativas de material os que apresentam baixas T_g são o PLA PRO1 e a PA (63°C e 49°C respectivamente), o que inviabiliza a sua utilização em um ambiente onde temperaturas podem ultrapassar facilmente os 70°C como aponta Dadour et al (2011).

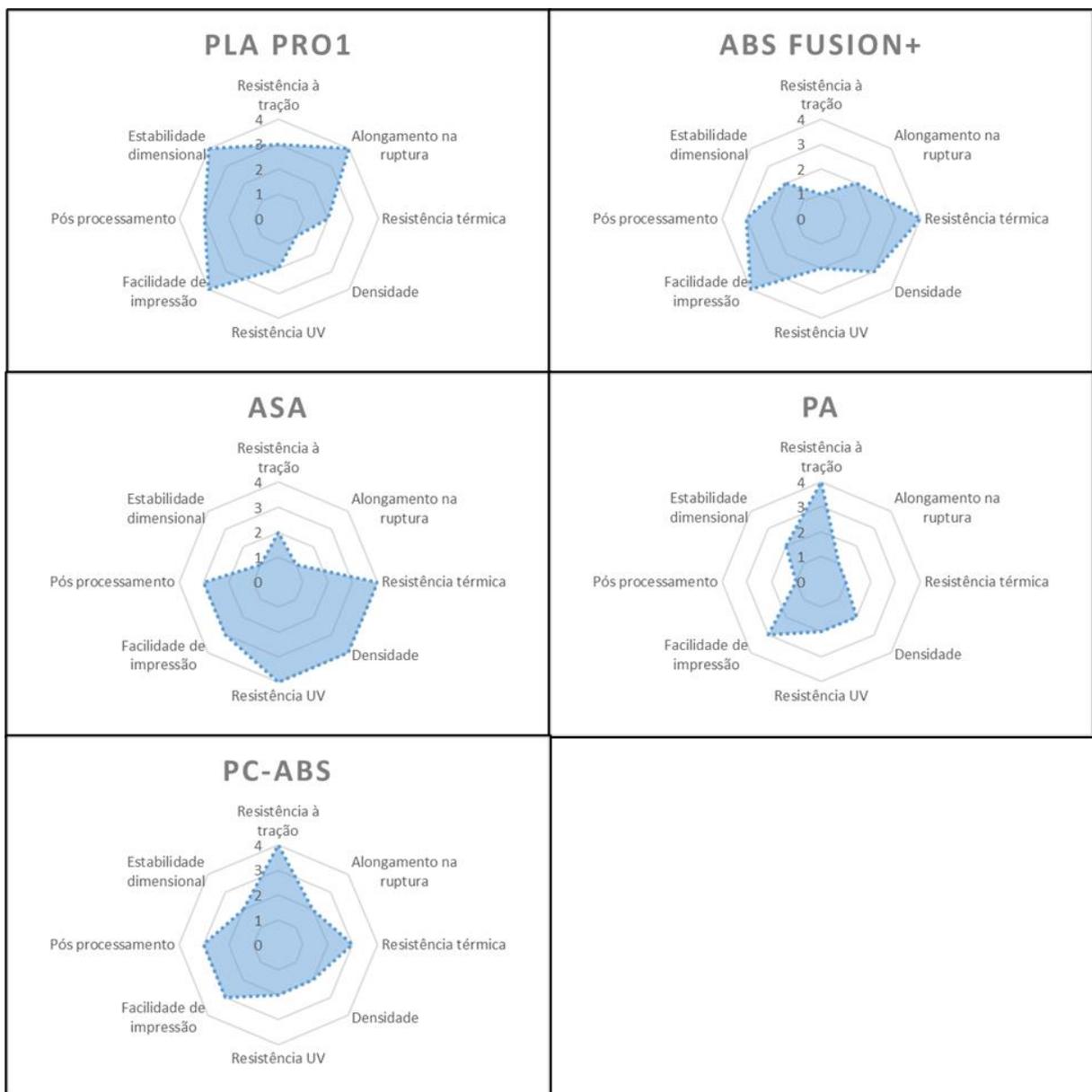


Figura 16 - Gráfico radar com ênfase nas principais características observadas. Fonte: O Autor

Além das altas temperaturas atingidas no interior do veículo temos também um ambiente sujeito à exposição constante aos raios UV através dos vidros, e neste ponto o único material que se destaca por essa propriedade apurada é o polímero ASA, que pertence à família do ABS com propriedades mecânicas semelhantes, mas com destaque à resistência UV devido sua estrutura molecular com ligações químicas reforçadas.

Quanto à facilidade de impressão e pós processamento, todos os materiais apresentam ótimos índice (exceto o pós processamento do PA com índice 0), destacando-se o PLA PRO1 e o ABS FUSION+ pelo seu fácil manuseio.

No que diz respeito a resistência à tração, destacam-se o PA e o PC-ABS, atingindo valores máximos para esta propriedade.

Ainda, quando se trata de redução de peso, o polímero ASA apresenta a menor densidade entre as opções, valor 17% menor que o PLA PRO1, por exemplo.

Assim, o material selecionado para a produção dos CP's e realização dos ensaios foi o polímero *Acetonitrile Styrene Acrylate* (ASA), pois dentre as características apresentadas este material apresentou maior destaque na resistência UV, resistência térmica e densidade.

6.2 Otimização topológica

A otimização topológica executada conforme a metodologia e condições de contorno sugeridas na seção 5.3 definiu a geometria final que pode ser vista na Figura 17.

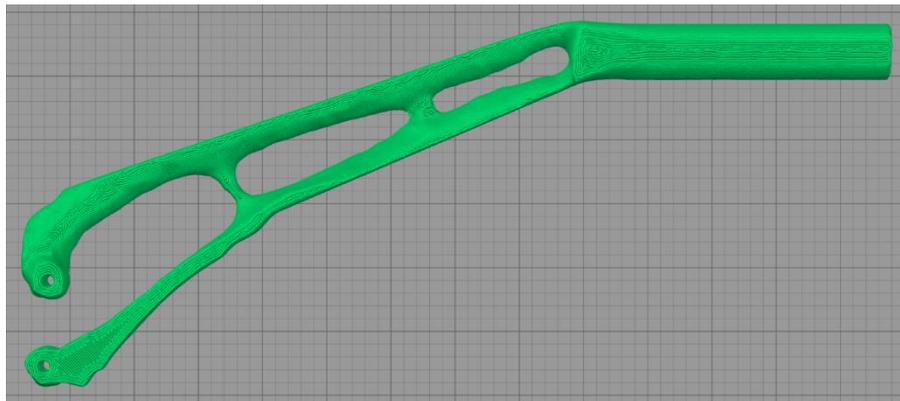


Figura 17 - Geometria final. Fonte: O Autor.

Embora as condições de contorno utilizadas por Dorneles (2021) tenham sido as mesmas que as utilizadas neste trabalho, a similaridade dos resultados de otimização se dá devido os materiais terem propriedades mecânicas semelhantes.

A massa do componente foi reduzida de 300g (componente metálico) para 78g. Essa redução representa 74%, 4% maior que o trabalho de Dorneles (2021) devido a densidade do material ASA ser menor que o PLA PRO1.

6.3 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados a uma taxa de 10 mm/min levaram todos corpos de prova até a ruptura. Os CP's suportaram cargas entre 958,5 N e 1192,9 N com média de 1063,1 N e desvio padrão de 85,5 N. Os coeficientes de segurança (CS) ficaram entre 2,4 e 3 frente ao que a norma NBR 10966-2 solicita e são considerados satisfatórios para o teste. Tais resultados podem ser vistos no gráfico da Figura 18, onde as barras azuis representam a carga máxima suportada por cada CP e a linha vermelha representa o respectivo coeficiente de segurança.

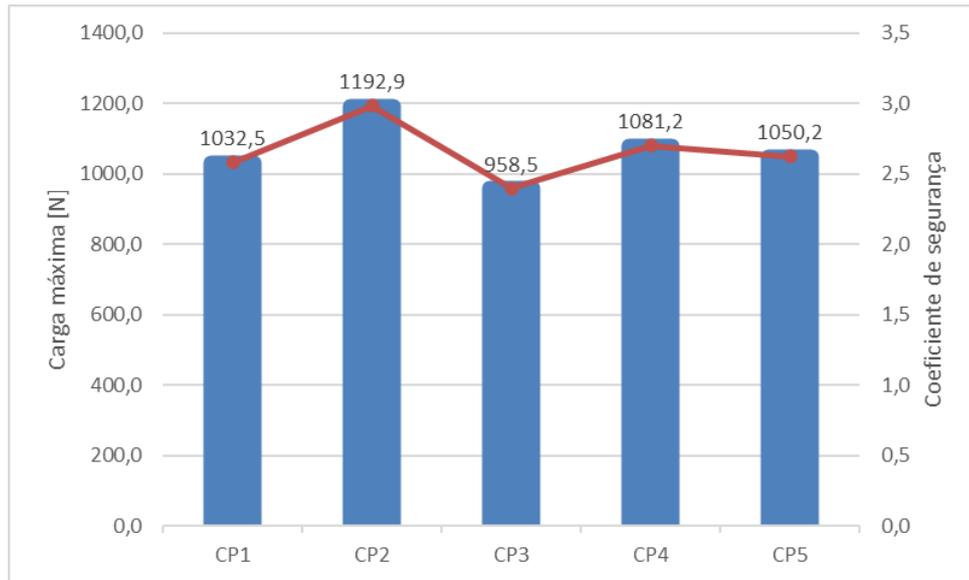


Figura 18 - Força máxima e CS dos corpos de prova ensaiados. Fonte: O Autor

Além disso na Figura 19 o gráfico de Força vs. Deslocamento do CP 2, apresentado como exemplo, mostra o comportamento característico dos ensaios, onde é possível ver que as amostras tiveram grandes deformações antes da sua ruptura. O gráfico possui bastante oscilação inicial devido a folgas, ajustes do mecanismo de tração e deslizamento entre o CP e a máquina de ensaio. Os demais gráficos (CP's 1, 3, 4 e 5) estão apresentados no APÊNDICE A. Vale ressaltar neste ponto que mesmo com a grande deformação inicial dos CP's não se observou deformação permanente após os ensaios, porém, será importante para trabalhos futuros analisar outras geometrias com menor redução de peso à fim de encontrar um componente mais rígido e que tenha uma melhor percepção de acionamento para o usuário final.

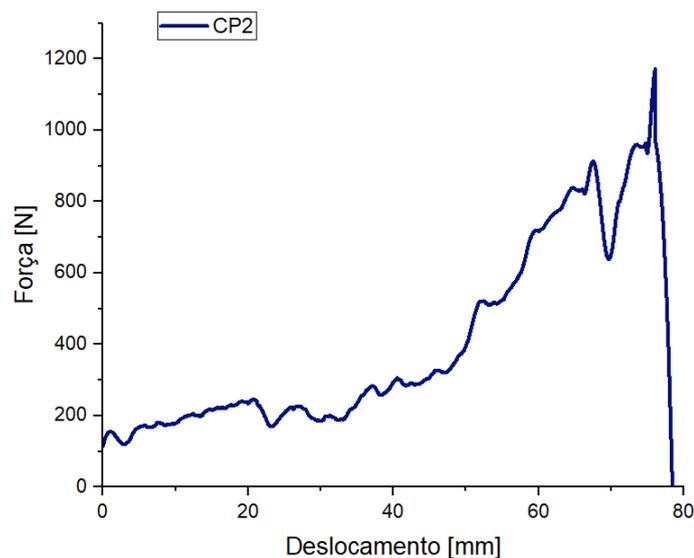


Figura 19 - Gráfico de força vs. deslocamento do CP 2. Fonte: O Autor

Na Figura 20 podemos ver os locais de ruptura dos corpos de prova. Os CP's 1, 2 e 4 romperam na transição entre manopla e corpo do componente, já os CP's 3 e 5 romperam no furo inferior onde é feita a fixação. Embora a ruptura tenha sido em dois pontos diferentes, a carga máxima apresentou valor similar. Os locais estão identificados pelas setas vermelhas na imagem.

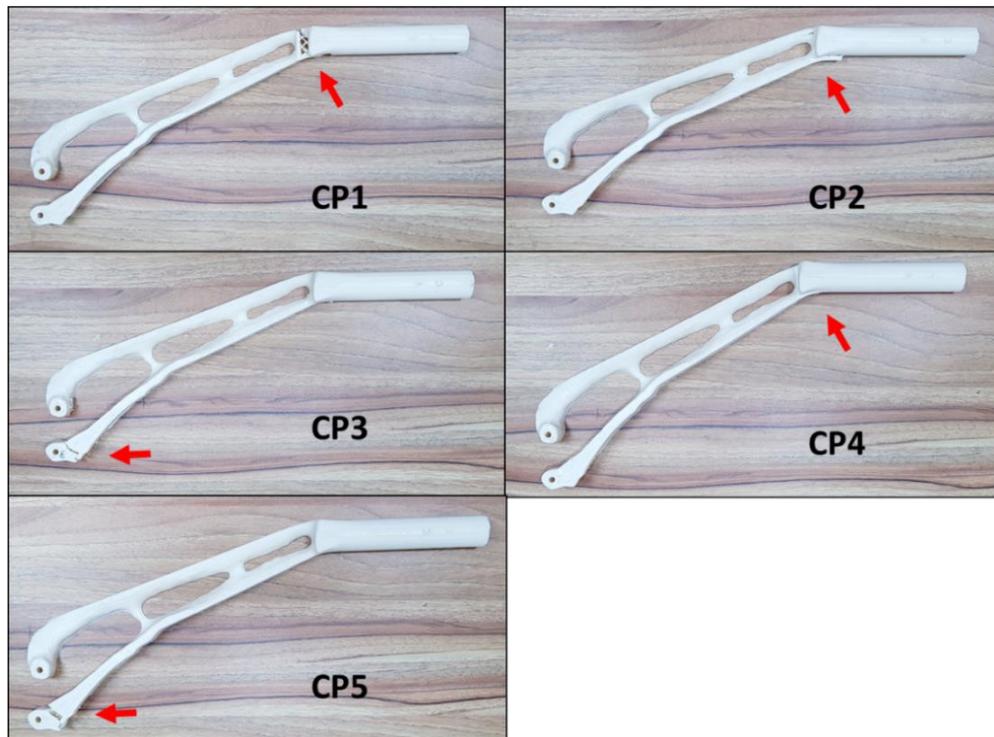


Figura 20 - CP's após ensaio mecânico. Locais de ruptura indicados nas setas vermelhas. Fonte: O Autor

7. CONCLUSÃO

De acordo com a análise de resultados expostos na seção anterior podemos concluir que a substituição do material metálico por um polimérico somado à otimização topológica do componente e produção via manufatura aditiva é viável, visto que todos os CP's suportaram a carga máxima pretendida de 400 N conforme a norma NBR 10966-2 com coeficiente de segurança acima de 2,4. Os CP's tiveram grande deslocamento inicial, porém sem deformação permanente aparente. Além disso, os CP's romperam em dois locais diferentes, na transição da manopla para o corpo e no furo de fixação inferior. A massa do componente foi reduzida de 300g para 78g, uma redução significativa de 74%. Dentre os materiais estudados o polímero ASA se mostrou como a melhor opção, pois sua temperatura de transição vítrea de 114°C atrelada às demais propriedades mecânicas e químicas poderá suportar de forma segura àquelas que o interior do veículo estará sujeito.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de somar a este estudo são sugestões de trabalhos futuros os seguintes tópicos:

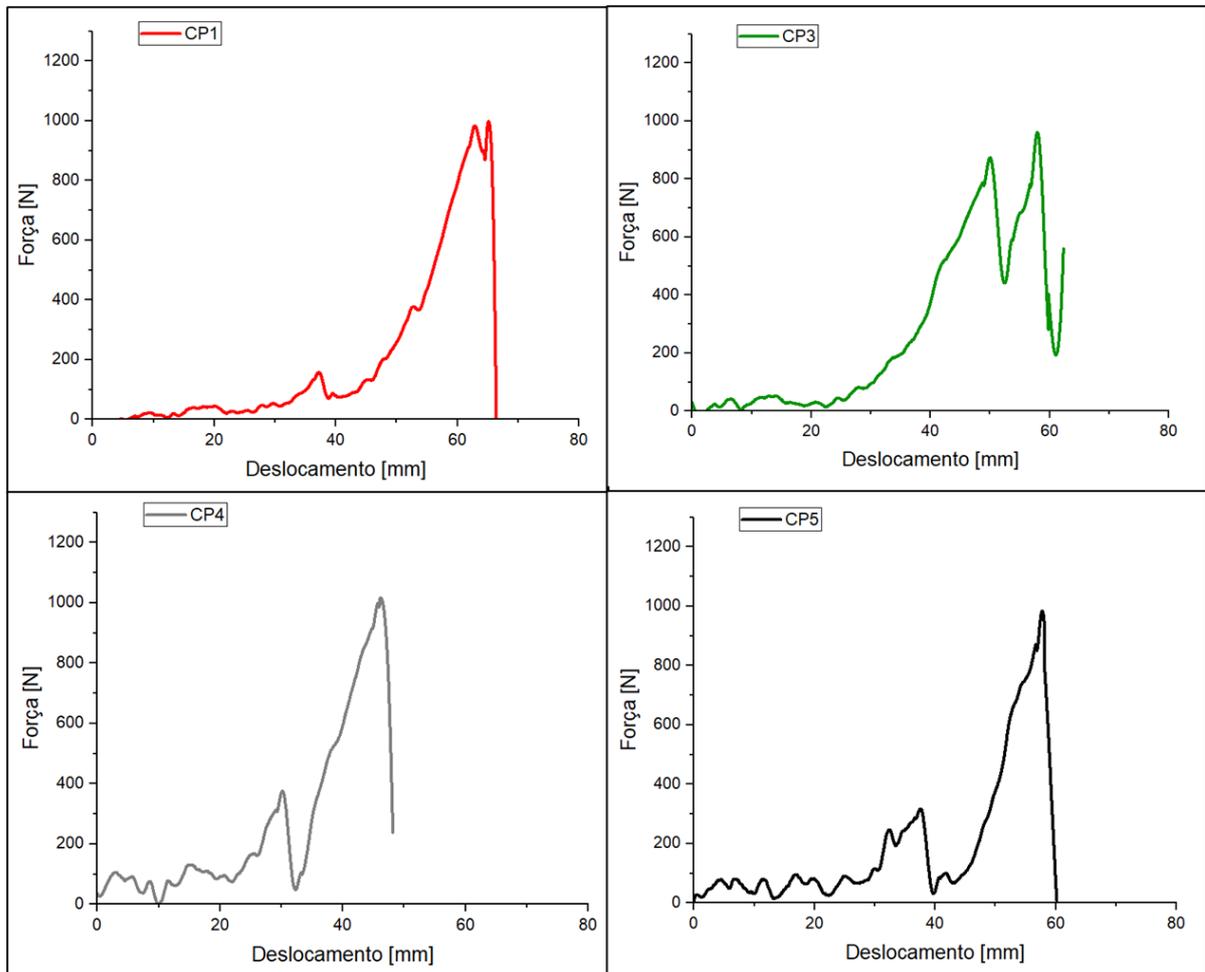
- Conduzir ensaio de exposição à luz do dia filtrada através de vidro como descrito na norma ASTM G24 para analisar se existe perda de resistência devido à influência de degradação UV no componente fabricado em polímero;
- Realizar ensaios em câmara aquecida no intuito de analisar o comportamento tanto do material quanto do componente quando o veículo estiver exposto ao calor do ambiente;
- Conduzir ensaio de exposição acelerada do material a fontes de luz como descrito na norma ASTM G151 a fim de prever o comportamento do material quando exposto a longos períodos de radiação UV;
- Fazer uma análise completa da viabilidade econômica e de produção em grande escala do componente;

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, SOFIA ALEXANDRA CHAVES. “Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo.” Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015, 259.
- AHMAD, ABAS, MICHELE BICI, e FRANCESCA CAMPANA. “Guidelines for topology optimization as concept design tool and their application for the mechanical design of the inner frame to support and ancient bronze statue.” Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Sapienza Università di Roma, Roma, 2021, 18.
- AHMAD, MUSHTAQ, e JAMSHID ALI. *Study of air temperature propagation of parked car.* International Journal of Scientific & Engineering Research, 2018, 12.
- ALAFAGHANI, ALA'ALDIN, e ALA QATTAWI. “Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method.” Department of Mechanical Engineering, University of California Merced, Merced, CA, 2018, 11.
- AL-KAYIEM, HUSSAIN H, M FIRDAUS BIN M SIDIK, e YUGANTHIRA R A L MUNUSAMMY. *Study on the thermal accumulation and distribution inside a parked car cabin.* Perak, Malasya: American Journal of Applied Sciences, 2010, 6.
- AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. *Plastics in automotive markets technology roadmap: A new vision for the Road Ahead.* 2013. http://www.plastics-car.com/roadmap_fullversion.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “ISO/ASTM 52900:2015 - Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology.” 2016.
- APME - ASSOCIATION OF PLASTIC MANUFACT. IN EUROPE. *A material for choice for the automotive industry.* 1999. www.apme.org.
- ASHBY, M, e K JOHNSON. *The art of materials selection.* Materials Today, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “ABNT NBR 10966-2 - Veículos rodoviários automotores - Sistema de Freio - Parte 2: Ensaios de frenagem e desempenho para veículos das categorias M, N e O.” 30 de Setembro de 2019. 23.
- AUTODESK. *Topology Optimization.* 2022. <https://www.autodesk.com/solutions/topology-optimization> (acesso em 13 de Abril de 2022).
- BASF. *Engineering Ultrafuse Filaments Portfolio.* 2021. <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-%20fabrication-fff/engineering-filaments/> (acesso em 10 de Abril de 2022).
- BASF FORWARD AM. “Technical Data Sheet Ultrafuse ABS Fusion+.” 13 de Novembro de 2019.
- . “Technical Data Sheet Ultrafuse ASA.” 13 de Novembro de 2019.
- . “Technical Data Sheet Ultrafuse PA.” 12 de Novembro de 2019.
- . “Technical Data Sheet Ultrafuse PC/ABS FR Black .” 09 de Dezembro de 2021.
- . “Technical Data Sheet Ultrafuse PLA PRO1.” 06, Novembro de 2020.
- BASF. *História da BASF - 1945 à 1964.* 2022. <https://www.basf.com/br/pt/who-we-are/organization/history/1945-1964.html> (acesso em 11 de Abril de 2022).
- BENDSØE, M P, e O SIGMUND. *Topology optimization: Theory, Methods and Applications.* Alemanha: Springer, 2003.
- BOMTEMPO, J V. “Innovation et organisation: le cas de l'industrie des polymeres.” Tese de Doutorado, L'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2004.
- CALLISTER, WILLIAM D JUNIOR, e DAVID G RETHWISCH. *Ciência e engenharia dos materiais - Uma introdução.* 26 de Julho de 2016.
- CANEVAROLO, SEBASTIÃO V Jr. *Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros.* 3ª. São Paulo, São Paulo: Artliber, 2010.

- DADOUR, I R, I ALMANJAHIE, N D FOWKES, G KEADY, e K VIJAYAN. *Temperature variations in a parked vehicle*. Centre for Forensic Science, University of Western Australia, Crawley: Forensic Science International, 2011, 7.
- DORNELES, NATAN PEREIRA. “Otimização topológica de alavanca de freio de estacionamento veicular produzida em PLA PRO1 via manufatura aditiva.” Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2021, 30.
- GORDON, J E. *Structures: Or why things don't fall down*. Penguin, 10 de Julho de 2003.
- GORNI, ANTONIO AUGUSTO. “Seleção de materiais na indústria automotiva: Competição X cooperação.” 2014, 81.
- HEMAIS, CARLOS A. “Polímeros e a indústria automobilística.” Grupo de Gestão Tecnológica, IMA, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003, 8.
- HERNANDEZ, R, D SLAUGHTER, D WHALEY, J TATE, e B ASIABANPOUR. “Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3d printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling.” Ingram School of Engineering, Texas State University, San Marcos, Texas, 2016, 12.
- HINGANE, AKASH SANJAY. *Temperature variation in parked vehicle during summer and its threats and prevention*. Department of Mechanical Engineering , Trinity College of Engineering and Research , Pune: International Research Journal of Engineering and Technology - IRJET, 2018, 5.
- MONARO, RENATO LUIS GARRIDO, MAYARA CRISTINA LIMA, e MAÍRA MARA TONETTI. *Plásticos de engenharia como agentes competitivos na indústria automobilística*. Faculdade de Jaguariúna, Jaguariúna: Revista Intellectus, 2012, 15.
- MOREIRA, JOÃO BATISTA DIAS. “Otimização topológica multiescala aplicada a problemas dinâmicos.” Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2018, 124.
- MTS. “MTS Bionix Tabletop Test Systems.” Outubro de 2017.
- NETO, CÉSAR MATTOS, JÉSSICA CRISTINA SILVA MELO, PEDRO MARTINS ROCHA, ALLAN DE MELO LOURES SANTOS BARREIROS, e LENNON A VERNECK. “A Utilização dos Polímeros na Indústria Automobilística.” Campus FIC, Grupo Unis, Cataguases, Minas Gerais, 2015, 10.
- OZSOY, KORAY. *A comparative finite element stress analysis of isotropic matriz and 3d printed PLA material*. Burdur, Turkiye: International Conference On Technology and Science, 2020.
- PANDA, BIRANCHI, MARCO LEITE, BIBHUTI BHUSAN BISWAL, XIAODONG NIU, e AKHIL GARG. “Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures.” 2018, 11.
- SANT'ANNA, JOSÉ ALEX PICCOLO. “Subsídios para seleção de materiais poliméricos termoplásticos.” Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007, 124.
- SHERMAN, DON. *One step closer to the no-iron car*. Edição: The New York Times. Nova York, 22 de Outubro de 2009.
- VOLPATO, NERI. *Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo, São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2017.

APÊNDICE A



Apêndice A – Gráfico de força x deslocamento dos CP's 1, 3, 4 e 5.