

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

OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA DE ALAVANCA DE FREIO DE ESTACIONAMENTO
VEICULAR PRODUZIDA EM PLA PRO1 VIA MANUFATURA ADITIVA.

por

Natan Pereira Dorneles

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, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Pereira Dorneles, Natan

Otimização topológica de alavanca de freio de estacionamento veicular produzida em PLA PRO1 via manufatura aditiva. / Natan Pereira Dorneles. -- 2021. 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, 2021.

1. impressão 3D FDM. 2. otimização topológica. 3. BASF PLA PRO1. 4. manufatura aditiva. I. Milbrath de Leon, Daniel, orient. II. Favaro Borges, Marcelo, coorient. III. Título.

Natan Pereira Dorneles

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE ALAVANCA DE FREIO DE ESTACIONAMENTO
VEICULAR PRODUZIDA EM PLA PRO1 VIA MANUFATURA ADITIVA.

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: Dr. Daniel Milbrath de Leon

Coorientador: Dr. Marcelo Favaro Borges

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Milbrath de Leon

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, novembro de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente, a minha irmã, Jamila Pereira Dorneles, ao meu pai, Carlos Dorneles, a minha mãe, Nilvia Rejane e aos meus avós, por terem me ensinado os valores que me trouxeram até aqui, além de me proporcionarem absolutamente todas as condições necessárias para a graduação. Dedico também a minha namorada, Paula Schinoff, por sempre me apoiar e estar ao meu lado durante esta etapa, o teu apoio fez toda a diferença.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Daniel Milbrath de Leon por todo auxílio e disponibilidade durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges por todos os ensinamentos, ajuda e amizade durante os vários anos de IC que, certamente, me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF e ao Grupo de Mecânica Aplicada – GMAp pelo auxílio na realização dos ensaios mecânicos e impressões 3D, além da disponibilidade de uso dos equipamentos de forma geral.

Agradeço a empresa Mascolo e Filhos pela fabricação de um dos dispositivos de ensaio utilizado neste trabalho.

Agradeço ao Ettore Pilla e ao Egnaldo Neto pelo auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos meus colegas de faculdade: Bruno Gaulio, Jaidson Franz, Leonardo Sochacki e Lucas Garcia pela amizade, parceria e ajuda durante todas as etapas da universidade. Sem vocês o caminho não teria sido tão memorável.

Agradeço ao meu amigo de infância, Leonardo Américo, por todo apoio e conversas durante esses anos.

Agradeço a minha família que sempre me apoiou e acreditou em mim durante esta longa jornada.

Agradeço a UFRGS pelo ensino de qualidade que estará sempre comigo.

Dorneles, Natan. **OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE ALAVANCA DE FREIO DE ESTACIONAMENTO VEICULAR PRODUZIDA EM PLA PRO1 VIA MANUFATURA ADITIVA**. 2021. 15p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

O presente estudo desenvolveu, por meio da otimização topológica de uma alavanca de freio de estacionamento automotiva, geometrias com diferentes valores de redução de massa em comparação ao componente comercial. O componente comercial é fabricado em aço carbono e os componentes otimizados gerados foram produzidos em PLA PRO1 via processo de manufatura aditiva. A geometria inicial deste componente foi obtida a partir do desenho do modelo comercial pertencente ao veículo Volkswagen Gol G4. A otimização foi realizada no *software* Fusion360, com objetivo de maximização de rigidez respeitando um limitante de redução de massa. Comparando com o componente metálico original, a redução de massa variou de 38% até 70%. As diferentes geometrias foram impressas via manufatura aditiva FDM com a utilização de PLA PRO1, polímero de engenharia fabricado pela BASF. Para avaliação da resistência dos componentes, foi desenvolvido um dispositivo para fixação da alavanca de freio otimizada em uma bancada de ensaios mecânicos. Seguindo o proposto na NBR 10966-2, a carga vertical máxima de 400 N na manopla foi atingida com coeficientes de segurança entre 4 e 8. A geometria final apresentou redução de massa de 70,08% com coeficiente de segurança de 4,58.

PALAVRAS-CHAVE: impressão 3D FDM, otimização topológica, BASF PLA PRO1, manufatura aditiva.

Dorneles, Natan. **TOPOLOGY OPTIMIZATION OF AUTOMOTIVE PARKING BRAKE LEVER PRODUCED WITH PLA PRO1 THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING**. 2021. 15p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

The present study developed, through topology optimization of an automotive parking brake lever, geometries with different values of mass reduction in comparison to the commercial component. The commercial component is manufactured in carbon steel and the optimized components were produced in PLA PRO1 via additive manufacturing process. The initial geometry of this component was obtained from the design of the commercial model belonging to the Volkswagen Gol G4 vehicle. The optimization was carried out in Fusion360 *software*, with the objective of maximizing stiffness respecting a limit of mass reduction. In comparison with the original metallic component, the mass reduction ranged from 38% to 70%. The different geometries were printed through FDM additive manufacturing process using PLA PRO1, engineering polymer manufactured by BASF. To evaluate the mechanical resistance of the components, a device for assembling the optimized brake lever on a mechanical test bench was developed. Following the proposal in NBR 10966-2, the maximum vertical load of 400 N on the handle was reached with a safety factor between 4 and 8. The final geometry presented a 70.08% reduction of mass with a safety factor of 4.58.

KEYWORDS: 3D printing FDM, topology optimization, BASF PLA PRO1, additive manufacturing.

Símbolos

ϵ	Deformação elástica	adimensional
ν	Coefficiente de Poisson	adimensional
CS	Coefficiente de segurança	adimensional
σ	Tensão	[Pa]
E	Módulo de Young	[Pa]
F	Força	[N]
V	Velocidade	[m/s]
T	Temperatura	[°C]
M	Massa	[g]

Abreviaturas e acrônimos

FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
PLA	Poli (ácido-láctico)
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
MEF	Método de elementos finitos
3D	Tridimensional
CPs	Corpos de prova
SIMP	<i>Solid Isotropic Material with Penalization</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de impressão 3D FDM. Fonte: adaptado de Volpato et al (2017).....	2
Figura 2 - Fluxograma de desenvolvimento do estudo. Fonte: O autor.	5
Figura 3 – Alavanca de freio de estacionamento do VW Gol G4. Fonte: O autor.....	6
Figura 4 - Alavanca de freio de estacionamento desenhada em <i>software</i> CAD. Fonte: O autor.	6
Figura 5 - Impressora 3D FDM German RepRap X1000. Fonte: German RepRap.	7
Figura 6 – Geometria durante processo de fatiamento no <i>software</i> Simplify3D. Fonte: O autor.	8
Figura 7 – [A] Condições de contorno da geometria otimizada topologicamente; [B] Vista em detalhe da aplicação de força na manopla. Fonte: O autor.	9
Figura 8 – [A] Dispositivo para distribuição de carga na manopla; [B] Chapa inclinada para acoplamento do corpo de prova na bancada de ensaios mecânicos. Fonte: O autor.	10
Figura 9 – Amostra posicionada na bancada de tração. Fonte: O autor.	10
Figura 10 - [A] Otimização do CP 01 e CP 02; [B] Otimização do CP 03, CP 04 e CP 05; [C] Otimização do CP 06. Fonte: O autor.	11
Figura 11 – Comparação entre geometria pré e pós-processamento. Fonte: O autor.....	11
Figura 12 – Posicionamento e orientação das peças na mesa de impressão. Fonte: O autor. ..	12
Figura 13 – Gráfico comparativo entre os ensaios de tração para os 06 corpos de prova.....	13
Figura 14 – Gráfico comparativo entre coeficiente de segurança e redução de massa dos CPs. Fonte: O autor.....	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas: PLA, ABS e PRO1. Fonte: BASF (2020).....	7
Tabela 2 - Resultados dos corpos de prova otimizados e ensaiados. Fonte: O autor.	13

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
2.1. Objetivo geral	1
2.2. Objetivos específicos.....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
3.1. Sistema de freios.....	1
3.2. Manufatura aditiva - FDM.....	2
3.3. Otimização topológica.....	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4.1. Normas aplicáveis.....	4
4.2. Propriedades da impressão 3D	4
4.3. Otimização topológica.....	5
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
5.1. Metodologia.....	5
5.2. Materiais e equipamentos utilizados.....	6
5.2.1 Alavanca de freio de estacionamento	6
5.2.2 Matéria prima e impressora 3D	7
5.3. Processo e parâmetros da impressão 3D.....	8
5.4. Otimização topológica.....	8
5.5. Apresentação do aparato experimental.....	9
6. RESULTADOS	11
6.1. Otimização topológica.....	11
6.2. Pós-processamento	11
6.3. Geometrias desenvolvidas	12
6.4. Ensaio mecânicos.....	12
7. CONCLUSÃO.....	14
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	14
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é uma das bases da nova revolução industrial – indústria 4.0. Dentre o conjunto de técnicas de fabricação que a compõe, a Impressão 3D tende a ser uma das primeiras a chegar em larga escala ao ambiente fabril. Embora uma série de variantes desta tecnologia esteja presente no mercado, a mais comum continua sendo a FDM (*fused deposition modeling*), onde um extrusor aquecido funde um carretel de filamento e produz a peça por meio da sobreposição de camadas. Assim como a FDM é a variante mais comum, também há um material predominantemente utilizado, o PLA (*Polyactic Acid*). A partir desta grande demanda, surgem diversas empresas com interesse na otimização das características deste material. Uma das empresas é a BASF, fabricante do filamento Ultrafuse PLA PRO1, que, conforme BASF (2020) garante três principais aspectos: velocidade de impressão superior, nível de dificuldade de impressão idêntica ao do PLA tradicional e propriedades mecânicas superiores ao ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), material que é conhecido por sua resistência significativa a esforços mecânicos. Tendo em vista que o desenvolvimento tecnológico do PLA PRO1 se traduz, também, em custo do quilograma superior se comparado aos filamentos de PLA comumente comercializados no mercado brasileiro, a otimização topológica é um recurso extremamente poderoso que pode ser explorado em busca de um melhor aproveitamento do material sem significativas perdas em resistência mecânica. Neste estudo, a otimização topológica foi aplicada em uma alavanca de freio de estacionamento a partir da validação de corpos de prova com diferentes parâmetros de redução de massa por meio de ensaios mecânicos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Projetar, produzir e qualificar uma alavanca de freio de estacionamento funcional, a partir da otimização da geometria original, com foco na qualidade percebida do usuário, que atenda aos requisitos de esforços mecânicos da NBR 10966-2 com coeficiente de segurança igual ou superior a 4 e possua rigidez estrutural percebida semelhante à da peça original.

2.2. Objetivos específicos

- Comparar variantes de uma alavanca de freio de estacionamento produzidas via impressão 3D FDM variando espessura e número de linhas de contorno a partir de diferentes critérios de otimização topológica, a fim de desenvolver um componente que possibilite a maior redução de massa com a capacidade de resistir a um carregamento estático de 400 N com coeficiente de segurança entre 4 e 5.
- Desenvolver um componente com redução de massa de, no mínimo, 50% frente ao componente original.
- Produzir um componente que seja visualmente mais moderno e explore as capacidades da manufatura aditiva – FDM.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Sistema de freios

O sistema de freios é uma das partes essenciais dos veículos, pois proporciona segurança e permite a correta utilização destes em diferentes situações de tráfego. Diante da

grande relevância de tais mecanismos, Limpert (1999, apud BEZERRA e SILVA, 2012) demonstra que tal sistema é regido por requisitos legais. Os sistemas de freios de veículos automotores podem ser classificados como:

- Freio de serviço, responsável pela redução de velocidade durante o movimento.
- Freio secundário ou de emergência, responsável pela redução da velocidade com menor grau de eficiência quando o sistema de freio de serviço falha parcialmente.
- Freio de estacionamento, responsável por manter o veículo estático em locais de estacionamento ou sob situações específicas.

Conforme Bezerra e Silva (2012), a maior parte dos sistemas de freio de estacionamento utiliza lona ou pastilha de freio para travar as rodas traseiras. No caso de veículos automotores, tal sistema é acionado a partir de uma alavanca que é instalada, majoritariamente, entre os dois bancos dianteiros.

Noel e Clere (1993) relatam que as alavancas de freio de estacionamento comerciais são fabricadas por meio de chapas metálicas dobradas em formato de U, no qual as duas extremidades do U são utilizadas para fixação da alavanca nos outros componentes do sistema. Além da parte estrutural da alavanca, o componente possui, por razões estéticas e de conforto do usuário, uma manopla metálica soldada ou dobrada que, usualmente, é revestida por algum componente plástico decorativo. O custo destas alavancas é relativamente alto e é composto por uma montagem de peças menores.

Avaliando os métodos de fabricação disponíveis hoje, a manufatura aditiva é capaz de atender a este tipo de demanda por conta das diferentes possibilidades de resistência mecânica e acabamento, disponíveis num mesmo componente impresso, sem a necessidade de diversas peças complementares.

3.2. Manufatura aditiva - FDM

Embora a impressão 3D possua diversas variações, uma das mais difundidas é a modelagem por fusão e deposição (*fused deposition modeling* - FDM). Segundo Volpato et al (2017), no caso deste grupo específico de manufatura aditiva, um carretel de filamento polimérico é alimentado por meio de uma extrusora até um cabeçote extrusor aquecido. A temperatura de aquecimento varia de acordo com a matéria prima a ser utilizada. Para se obter a geometria da peça em cada uma das camadas, este cabeçote possui movimentos controlados no plano X-Y. Tal sistema opera sobre uma mesa de impressão que, durante o processo, pode ser aquecida e se movimentar verticalmente para baixo na direção do eixo Z, numa distância equivalente à altura de cada camada conforme exibido na Figura 1.

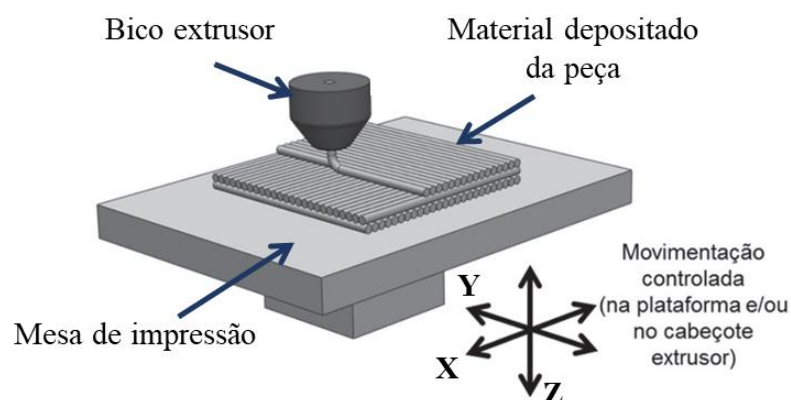


Figura 1 - Processo de impressão 3D FDM. Fonte: adaptado de Volpato et al (2017).

A tecnologia FDM trabalha com carretéis de filamento, um destes é o poli (ácido láctico), PLA, um termoplástico biodegradável e biocompatível, extremamente disseminado na área de manufatura aditiva FDM, por sua facilidade de impressão. Além disso, tal matéria prima é proveniente de recursos renováveis, como a batata, a cana-de-açúcar e o milho (GARLOTTA, 2001, apud OLIVEIRA, 2017). Diante da evolução da demanda por impressão 3D, diversos fabricantes trabalham no desenvolvimento de otimizações deste polímero. Uma das variantes do PLA é o PLA PRO1, desenvolvido pela BASF.

As propriedades mecânicas deste material, aliadas ao processo de impressão 3D e custo convidativo de comercialização, tornam possível a produção de componentes funcionais que, previamente, necessitavam de diversos processos e diferentes tipos de manufatura para a concretização de uma peça. Este método de fabricação possibilita que, a partir de um arquivo digital inicial (em formato .STL, por exemplo), diversas modificações de geometria e redução de massa possam ser realizadas antes de sua produção.

Tais modificações não impedem a fabricação pelo método de manufatura aditiva, sendo assim, limitantes que anteriormente existiam na fabricação de geometrias otimizadas topologicamente deixaram de ser barreira na indústria 4.0.

3.3. Otimização topológica

Uma das variantes da otimização estrutural é a otimização topológica, onde a busca pelo componente ótimo é realizada a partir da variação da topologia da estrutura. Neste cenário é possível que ocorra alteração tanto na disposição espacial de alguns membros estruturais quanto no padrão de conectividade entre eles.

O Fusion360 é um *software* que, além de diversas outras capacidades, realiza a otimização topológica. Este *software* desenvolve a otimização por meio do método SIMP – *Solid Isotropic Material with Penalization*, onde a abordagem aplicada se baseia na densidade dos elementos de malha do modelo. Conforme Leuck (2015), na Equação 1 cada elemento e possui uma respectiva densidade tratada como x_e e que define seu módulo de elasticidade E , conforme ilustrado abaixo.

$$E_e = E_{min} + x_e^p (E_0 - E_{min}), \quad x_e \in [0,1] \quad (1)$$

Onde:

E_0 é o módulo de Young do material;

E_{min} é o valor mínimo do módulo de elasticidade que, conforme Sigmund (2007, apud LEUCK, 2015) é essencial para evitar que a matriz de rigidez que governa o sistema se torne singular, impossibilitando a convergência do modelo.

p corresponde ao fator de penalização de densidades intermediárias (definido = 3 no *software* Fusion360).

De acordo com Bahia (2005), a otimização estrutural busca encontrar uma geometria que satisfaça as restrições do modelo com o melhor desempenho. Tratando-se da solução em termos matemáticos, procura-se um resultado para a função objetivo e restrição que pertença ao domínio de solução viável e que atinja o extremo de uma função objetivo, previamente definida.

Os critérios de avaliação podem ser diversos, como: mínima massa, mínima frequência natural crítica, controle da tensão máxima, máxima rigidez, entre outros. No caso da análise via restrição de volume/massa com relação as variáveis do projeto, a definição formal do problema resolvido pelo *software* é descrita na Equação 2.

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } x: \quad & C(x) = u^T K u = \sum_{e=1}^N E_e(x_e) u_e^T K_0 u_e \\
 \text{Sujeito a:} \quad & \frac{V(x)}{V_T} = f_v \\
 & K u = f \\
 & x_e^{\min} \leq x_e \leq 1
 \end{aligned} \tag{2}$$

Onde:

$C(x)$ é a flexibilidade;

K_0 é a matriz de rigidez elementar;

u é o vetor de deslocamentos;

$V(x)$ corresponde ao volume estrutural;

V_T é o volume total do domínio de projeto;

f_v é a fração do volume total do domínio.

Embora a otimização topológica seja um recurso de grande valor para algumas áreas da engenharia, sua utilização tem alguns pontos críticos. Conforme Abas et al (2021), previamente ao advento da manufatura aditiva, a produção de algumas geometrias otimizadas topologicamente poderia ser uma tarefa desafiadora e, em certos casos, inalcançável. Diante de tal problema, geometrias otimizadas necessitavam de uma etapa de remodelagem, para que, após esta etapa, pudessem ser produzidas de forma simples e sem custos excessivos. Entretanto, o processo de remodelagem destes componentes, além de aumentar a massa das geometrias, gerava um aumento do tempo de desenvolvimento das peças. Sendo assim, a capacidade da manufatura aditiva de produzir geometrias complexas sem qualquer tipo de remodelagem auxilia na utilização do processo de otimização topológica.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Normas aplicáveis

A principal norma aplicável ao projeto, comissionamento e operação dos sistemas de freio é a ABNT NBR 10966-2 (2019), que sumariza os ensaios necessários para validação dos sistemas de freio de veículos automotores, além de definir as cargas de operação dos componentes, como, por exemplo, a força máxima aceitável para acionamento da alavanca do freio de estacionamento.

4.2. Propriedades da impressão 3D

De acordo com Hernandez et al (2016), a avaliação da resistência a esforços de flexão, a orientação de 0° com relação aos planos XY (*flat*), demonstrados na Figura 1 – Processo de Impressão 3D FDM, apresentou resultado 50,81% superior aos outros dois posicionamentos na mesa de impressão (vertical e lateral). Durgun e Ertan (2014) mostraram que as amostras impressas com ângulo de 0° (*flat*) também apresentaram a maior resistência à flexão, se comparadas com as outras orientações.

Além do melhor posicionamento do componente na mesa, outro resultado importante na análise dos materiais utilizados na impressão 3D diz respeito ao Coeficiente de Poisson. Conforme Ferreira et al (2017), o valor encontrado para o PLA convencional é de 0,33 com desvio padrão de 0,011.

Referente aos diferentes tipos de preenchimento disponíveis no método de manufatura aditiva FDM, Alafaghani e Qattawi (2018) retratam que a utilização do preenchimento *rectilinear* apresenta efeito mínimo sobre a rigidez, com valor de módulo de Young ligeiramente superior.

Outro parâmetro disponível no processo de impressão 3D FDM é a escolha da espessura de parede. Conforme Panda et al (2018), o aumento da espessura de parede das peças impressas influencia no aumento da tensão de escoamento até o limiar de 2,6 mm de espessura, onde ocorre um ponto de inflexão e, após este valor, é observado um declínio na curva da tensão de escoamento.

4.3. Otimização topológica

Sarawade et al (2017) realizaram a otimização topológica e análise da distribuição de tensão de uma alavanca de freio de estacionamento metálica produzida em chapa de aço estrutural S235. Neste estudo foi observada, a partir da aplicação da metodologia de otimização, fabricação do novo componente e validação por meio de comparação entre ensaio mecânico e simulação via MEF, uma redução de massa de 10% com relação ao componente original. O coeficiente de segurança obtido para tal otimização foi de 5,4. Este valor garante a segurança de funcionamento do componente final.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Metodologia

Para realização do estudo, as atividades de desenvolvimento do modelo computacional, impressão 3D, ensaios mecânicos e análise dos resultados foram realizadas de acordo com o fluxograma exibido na Figura 2.

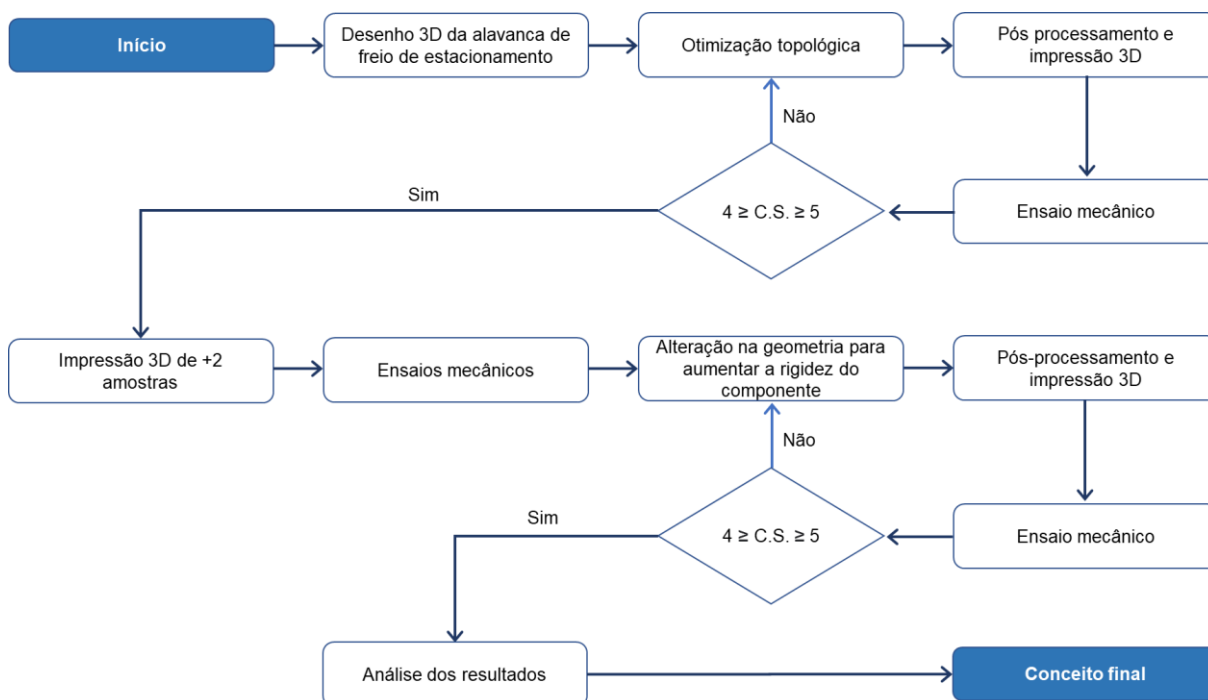


Figura 2 - Fluxograma de desenvolvimento do estudo. Fonte: O autor.

5.2. Materiais e equipamentos utilizados

5.2.1 Alavanca de freio de estacionamento

A alavanca de freio de estacionamento utilizada como base para este estudo pertence ao veículo Volkswagen Gol G4. A Figura 3 demonstra a geometria do componente comercial. Este componente foi pesado e apresentou massa total de 300 g.



Figura 3 – Alavanca de freio de estacionamento do VW Gol G4. Fonte: O autor.

A partir da geometria comercial, foi realizado o desenho via *software* CAD Fusion360. A peça digital é exibida na Figura 4.

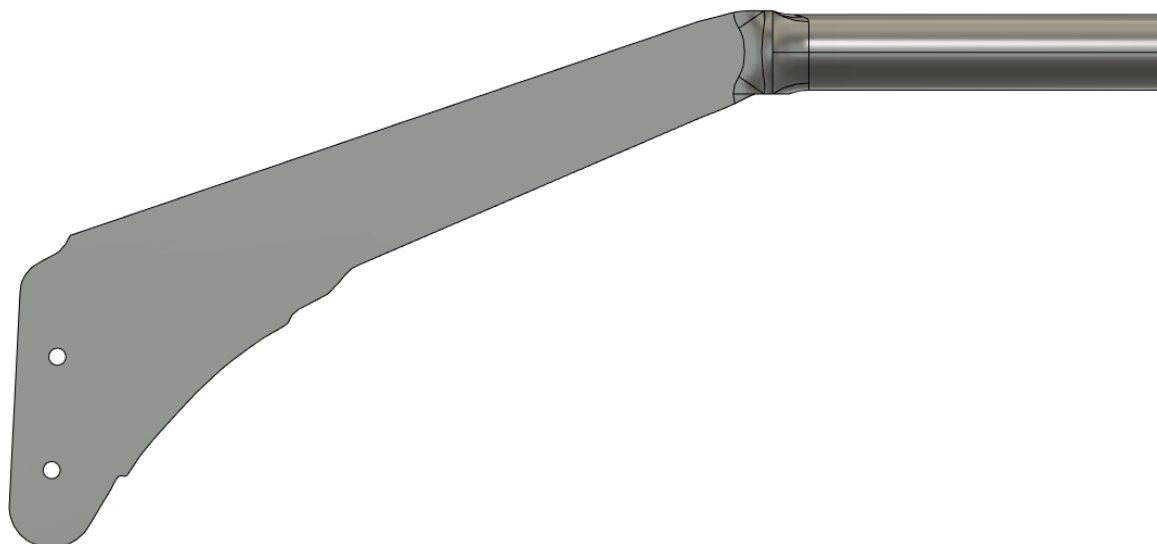


Figura 4 - Alavanca de freio de estacionamento desenhada em *software* CAD. Fonte: O autor.

5.2.2 Matéria prima e impressora 3D

Para produção dos corpos de prova, utilizou-se o filamento Ultrafuse PLA PRO1, matéria prima lançada recentemente pela BASF e que compõem a linha de filamentos de engenharia da empresa.

O material PRO1 foi escolhido por possuir propriedades mecânicas superiores ao ABS (exceto na propriedade de temperatura de transição vítrea, onde o ABS apresenta o valor de 104 °C, frente aos 63 °C do PRO1) e dificuldade de impressão idêntica ao do PLA (material fácil de ser impresso), de acordo com o fabricante BASF (2020). A Tabela 1 exibe a comparação entre os três filamentos.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas: PLA, ABS e PRO1. Fonte: BASF (2020).

Propriedades mecânicas				
Descrição	Norma	Orientação - XY (paralelo a mesa)		
		PLA	ABS	PRO1
Resistência à tração	ISO 527	34.7 MPa	36.3 MPa	48 MPa
Alongamento de ruptura	ISO 527	4,20%	7,40%	21,90%
Módulo de Young	ISO 527	2308 MPa	1958 MPa	3166 MPa

Neste trabalho foram utilizadas as propriedades fornecidas pelo fabricante desta matéria prima e, portanto, o estudo não contempla o estudo profundo do comportamento deste polímero. A folha de dados do material está apresentada no ANEXO A.

Os corpos de prova – CPs foram impressos em uma impressora 3D FDM German RepRap X1000, que conta com as seguintes dimensões de impressão: 1000 mm x 800 mm x 600 mm. A impressora 3D é mostrada na Figura 5.



Figura 5 - Impressora 3D FDM German RepRap X1000. Fonte: German RepRap.

5.3. Processo e parâmetros da impressão 3D

As configurações de impressão dos CPs foram definidas a partir do *software* Simplify3D versão 4.1.0, programa gerador de camadas (chamado de *Slicer* – em inglês). As impressões foram realizadas com velocidade 50 mm/s, altura de camada de 0,3 mm, temperatura de 215 °C no bico extrusor e 60 °C na mesa de impressão.

Para todas as amostras, a porcentagem de preenchimento interno foi de 15% e o padrão utilizado foi o *rectilinear*, com orientação de impressão variando de -45° até 45° entre as camadas. A espessura de parede majoritariamente utilizada foi de 2,4 mm, pois, conforme Panda et al (2018) está próximo do valor de melhor aproveitamento desta propriedade. A Figura 6 exibe o preenchimento interno do componente. O bico utilizado para produção dos corpos de prova tem diâmetro de 0.8 mm, valor também aplicado a largura das linhas.

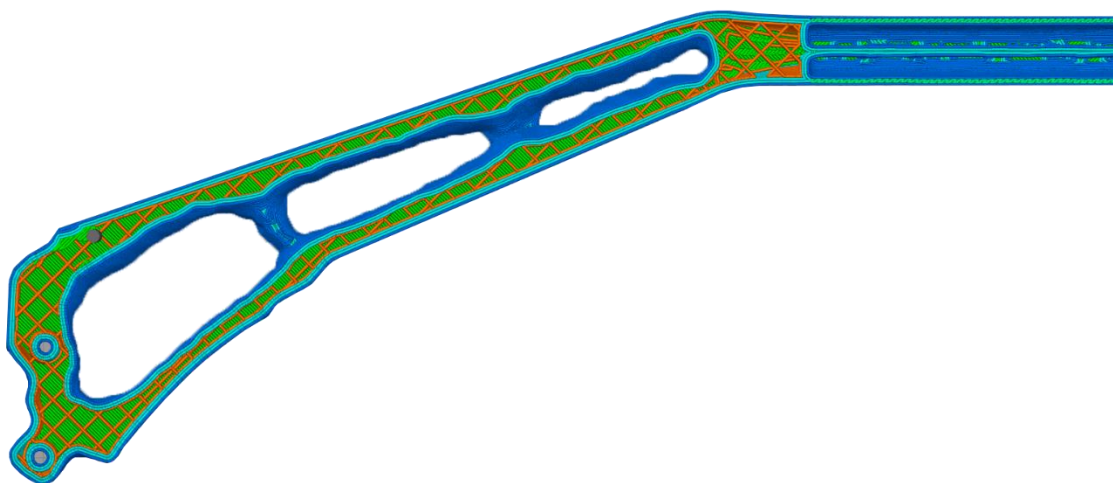


Figura 6 – Geometria durante processo de fatiamento no *software* Simplify3D. Fonte: O autor.

5.4. Otimização topológica

A otimização topológica do componente foi realizada na versão de estudante do *software* Fusion360, desenvolvido pela Autodesk. As condições de contorno utilizadas foram de engaste nos dois pinos e aplicação de carga nas duas faces inferiores da manopla. Para simular a condição real de aplicação durante o acionamento do freio de estacionamento, a força foi aplicada com um ângulo de 6 graus com o eixo vertical, este ângulo se traduz em, aproximadamente, 90% de carga vertical e 10% de carga lateral.

Este valor foi uma consideração, tendo em vista que a aplicação de carga na manopla do freio de estacionamento é realizada com o operador sentado no banco, ou seja, há uma inclinação entre a linha de aplicação de força e a componente perpendicular da alavanca. Esta aproximação foi realizada de forma empírica, pois este ângulo varia de acordo com a altura de quem está conduzindo o veículo e não possui valor sugerido na norma utilizada. As superfícies onde a força foi aplicada são exibidas na Figura 7.

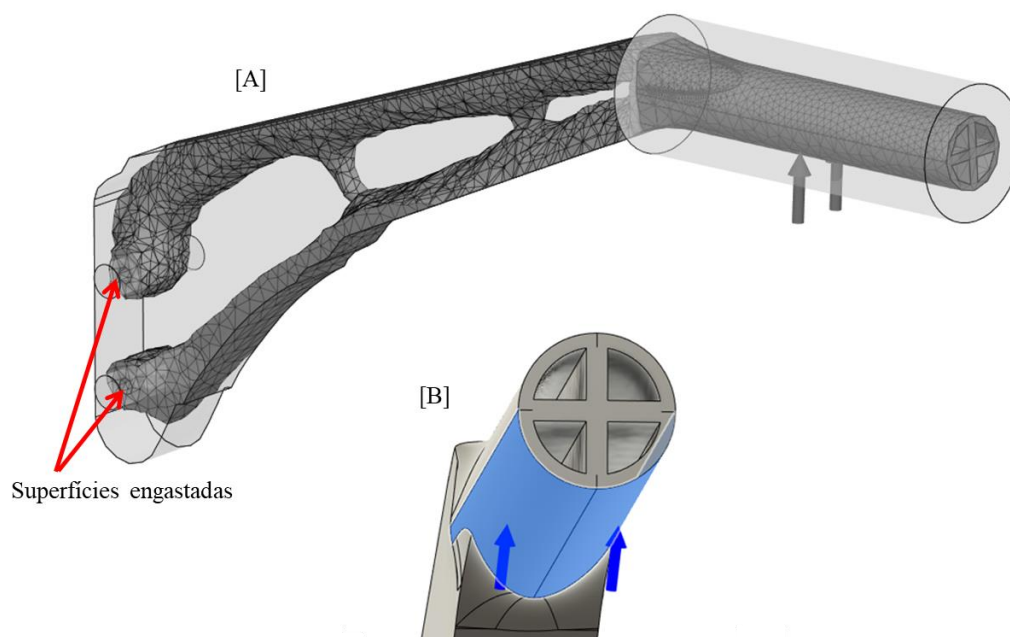


Figura 7 – [A] Condições de contorno da geometria otimizada topologicamente; [B] Vista em detalhe da aplicação de força na manopla. Fonte: O autor.

Durante esta etapa, as otimizações foram feitas com diferentes restrições de massa residual (de 30% até 60%), tendo como finalidade a maximização da rigidez do componente.

5.5. Apresentação do aparato experimental

Os ensaios foram realizados em uma bancada de ensaios universal MTS Bionix 370.02. Para fixação do corpo de prova, dois dispositivos foram utilizados. O primeiro é uma chapa de aço com um batente soldado em um ângulo de 6° , para simular a condição de aplicação vertical e lateral de carga, durante o acionamento da alavanca pelo motorista do veículo. A peça é exibida na Figura 8 – A.

O segundo dispositivo, mostrado na Figura 8 - B foi desenvolvido para distribuir a aplicação de carga na manopla. Os parafusos laterais foram utilizados para evitar que ocorra escorregamento do ponto de aplicação de carga durante a realização do ensaio.

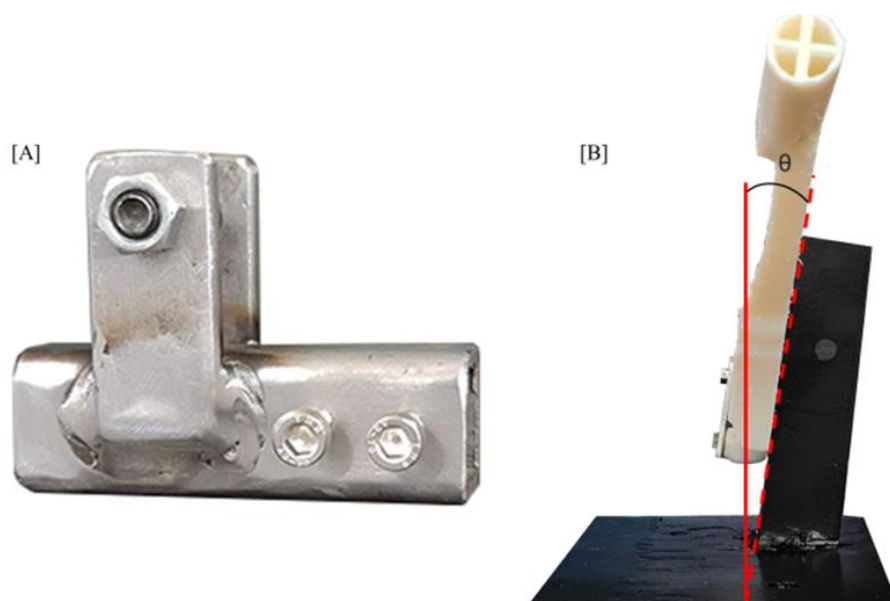


Figura 8 – [A] Dispositivo para distribuição de carga na manopla; [B] Chapa inclinada para acoplamento do corpo de prova na bancada de ensaios mecânicos. Fonte: O autor.

Para garantir que a alavanca estivesse engastada, dois parafusos foram posicionados nos furos posteriores. Além disto, uma chapa foi utilizada para melhor distribuição de carga na superfície lateral. A força vertical foi aplicada por meio de um olhal fixado no fuso da estação de ensaios. Embora durante a utilização do componente comercial as condições de contorno sejam diferentes (há um cabo de aço no furo inferior) e a aplicação de carga na manopla tem seu ângulo variado conforme o componente se move verticalmente (ou seja, o carregamento não é sempre vertical), os dispositivos apresentados na Figura 8 – A e Figura 8 – B foram a melhor representação da condição real de operação sem inviabilizar a realização dos ensaios. A Figura 9 exhibe a amostra durante a realização do carregamento.



Figura 9 – Amostra posicionada na bancada de tração. Fonte: O autor.

6. RESULTADOS

6.1. Otimização topológica

Os diferentes resultados obtidos estão representados na Figura 10, onde a Figura 10 – A representa o CP01 e CP02 (redução de massa de 38% e 55%, pois foram impressos com diferentes parâmetros), a Figura 10 – B representa o CP03, CP04 e CP05 (redução de massa de 70%) e a Figura 10 – C representa o CP06 (redução de massa de 69%). Para obtenção do CP 06, foi definida uma maior área de preservação de geometria, ou seja, a região próxima aos pontos de engaste não poderia ter material removido durante o processo de otimização.

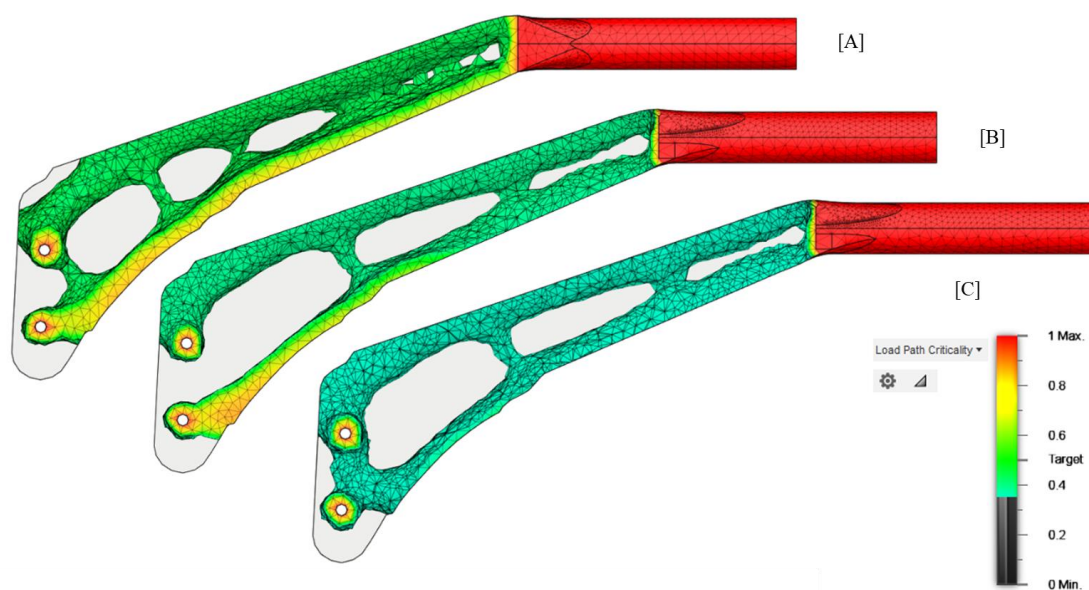


Figura 10 - [A] Otimização do CP 01 e CP 02; [B] Otimização do CP 03, CP 04 e CP 05; [C] Otimização do CP 06. Fonte: O autor.

6.2. Pós-processamento

A etapa de pós-processamento foi realizada utilizando o *software* gratuito Meshmixer. Para obtenção de uma geometria com melhor acabamento superficial, dois recursos foram utilizados: *remesh*, responsável por um aumento significativo do número de elementos de malha e, posteriormente, *local refine*, usado para a redução de cantos vivos e homogeneização das superfícies circulares. A Figura 11 exibe a mesma geometria pré e pós-processamento.

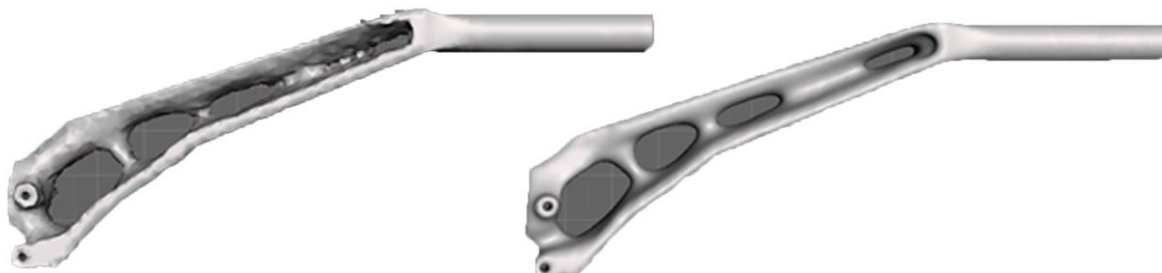


Figura 11 – Comparação entre geometria pré e pós-processamento. Fonte: O autor.

6.3. Geometrias desenvolvidas

A orientação escolhida para impressão dos corpos de prova foi de 0° com relação ao plano XY (Figura 12), pois, conforme Hernandez et al (2016), para carregamentos de flexão, as melhores propriedades mecânicas são obtidas nesta orientação de impressão. Tal resultado vai de acordo com Durgun e Ertan (2014), que comprovaram uma maior resistência à flexão nos corpos de prova impressos em 0° (XY), tendo em vista que o sentido de extrusão de cada camada está paralelo ao plano de flexão do componente.

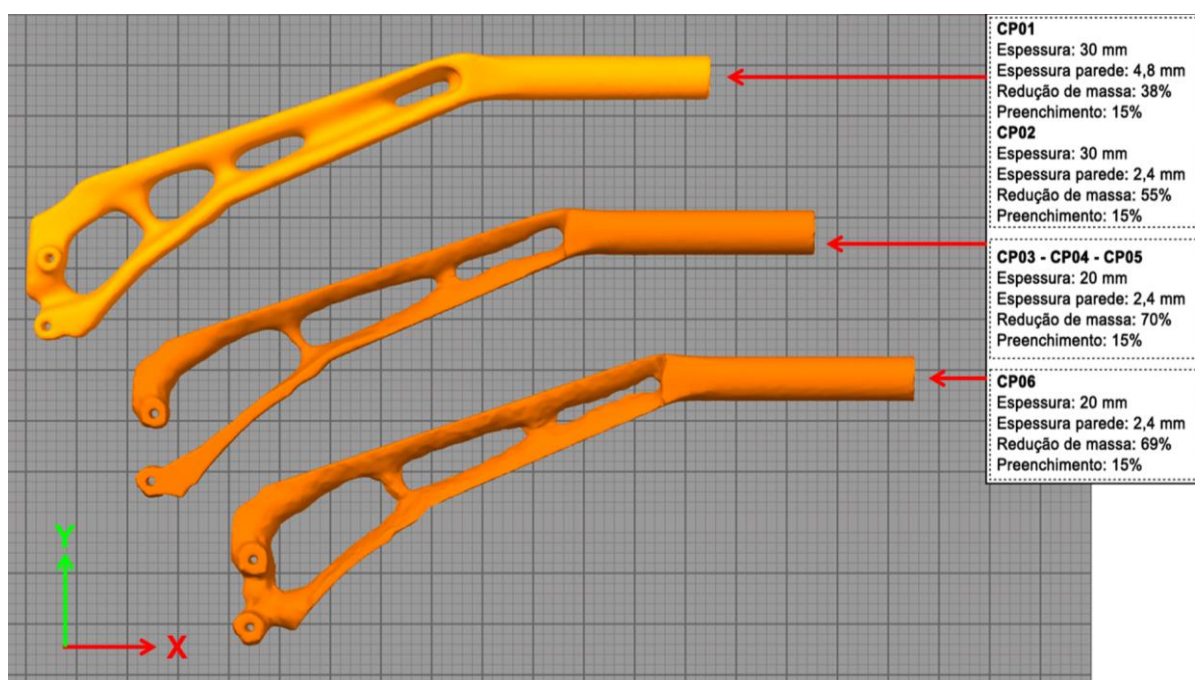


Figura 12 – Posicionamento e orientação das peças na mesa de impressão. Fonte: O autor.

6.4. Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados com uma taxa de deslocamento constante de 10 mm/min até a ruptura do componente. Foram realizados 06 ensaios, conforme mostrado na Figura 13. O CP 01 e o CP 02 foram impressos com espessura de 30 mm. Diante do superdimensionamento de tais componentes, a espessura foi reduzida para 20 mm nos demais corpos de prova.

A partir da análise dos valores na Figura 13, é possível perceber que todos os carregamentos foram realizados com uma pré-carga de 100 N. Além disso, é possível notar que o componente mais resistente foi o CP 01, com força máxima de 3139 N. O resultado em questão era previsto, tendo em vista que este foi o único componente com 6 linhas de parede. A amostra que apresentou o maior deslocamento foi o CP 06, com 55,9 mm.

O componente em questão, CP 06, foi desenvolvido visando um aumento da rigidez, para maximizar a percepção de segurança do motorista durante a operação da alavanca. Embora possua maior massa, esta variação apresentou o pior resultado no quesito força de ruptura, além de maior deslocamento. A partir deste comportamento, se faz necessário um estudo via MEF para analisar a distribuição de tensões entre as geometrias com 70% e 69% de redução de massa.

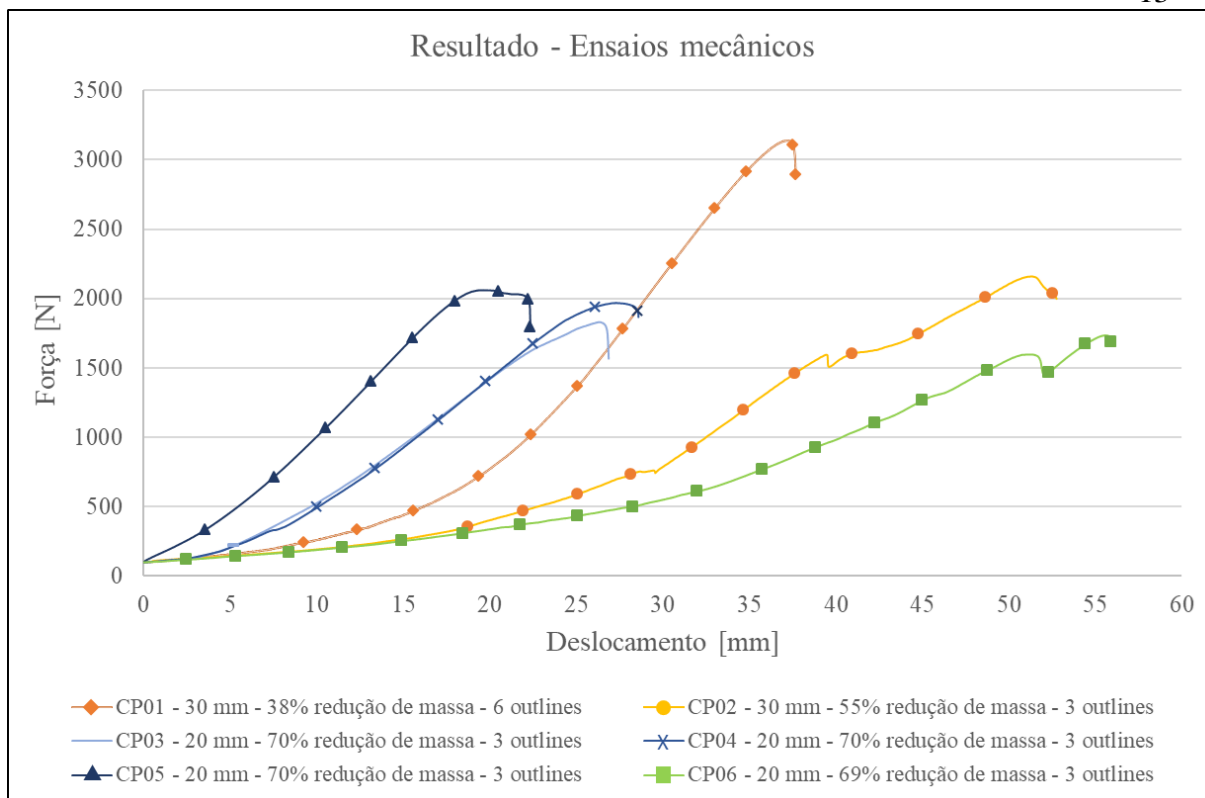


Figura 13 – Gráfico comparativo entre os ensaios de tração para os 06 corpos de prova.

Fonte: O autor.

A Tabela 2 sumariza os resultados obtidos durante os ensaios, adicionando informações de custo de matéria prima e massa total do componente.

Tabela 2 - Resultados dos corpos de prova otimizados e ensaiados. Fonte: O autor.

Amostra	Massa (g)	Redução de massa	C.S.	Nº de contornos	Espessura (mm)	Custo da matéria prima (R\$)
Metálica	300,00	0%	-	-	-	-
CP01	185,31	38%	7,85	6	30	27,80
CP02	133,55	55%	5,40	3	30	20,00
CP03	89,75	70%	4,58	3	20	13,46
CP04	89,75	70%	4,92	3	20	13,46
CP05	89,75	70%	5,15	3	20	13,46
CP06	92,70	69%	4,34	3	20	13,91

De acordo com o resultado apresentado na Figura 14 e Tabela 2, a redução de massa obtida para o componente final foi de 70% em relação ao original, com coeficiente de segurança de 4,58. Este resultado é extremamente satisfatório, quando comparado com a redução de 10% na pesquisa de Sarawade et al (2017) onde realizaram apenas a otimização topológica sem a substituição do processo de fabricação e do material S235.

O resultado encontrado neste estudo demonstra o potencial de uso de ferramentas de otimização topológica aliadas à possibilidade de geração de quase qualquer geometria, capacidade que advém da manufatura aditiva.

Outro ponto importante a ser comparado é o *design* final entre os componentes otimizados, pois, a partir da capacidade de produção de geometrias orgânicas e minimalistas por meio da manufatura aditiva, limitantes referentes ao alto custo de usinagens complexas são facilmente contornados.

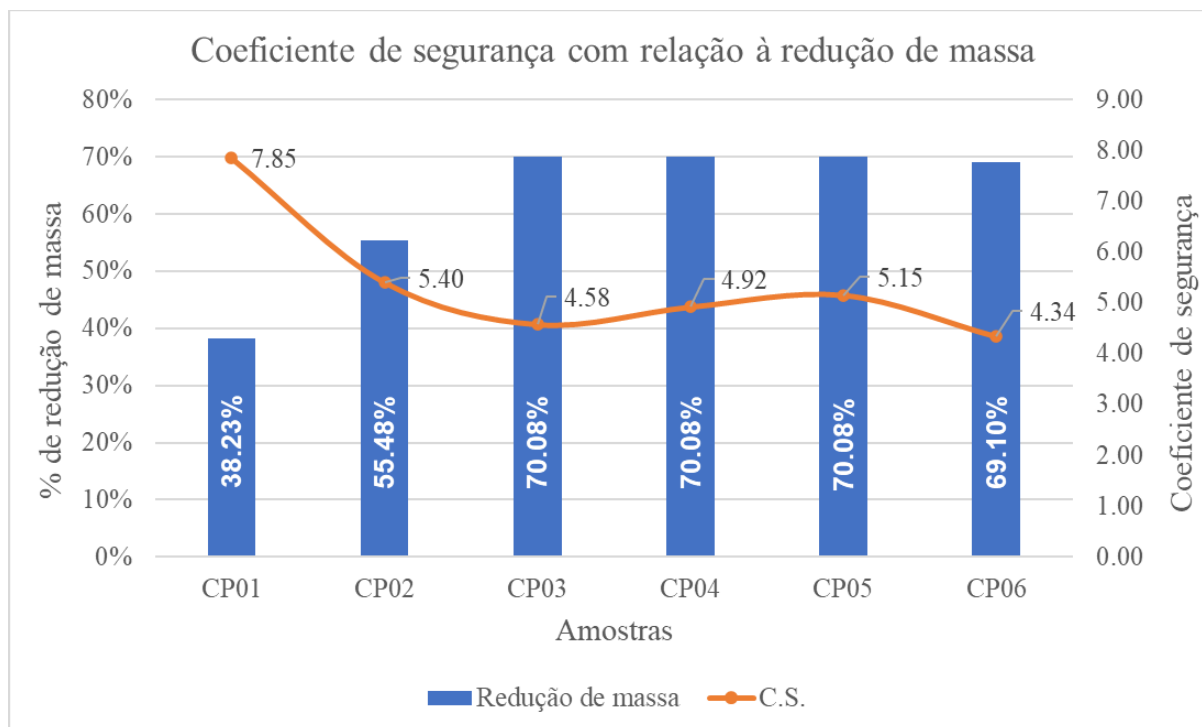


Figura 14 – Gráfico comparativo entre coeficiente de segurança e redução de massa dos CPs.

Fonte: O autor.

7. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos conclui-se que os objetivos do trabalho foram atingidos. Todos os corpos de prova atenderam a demanda de esforços exigida pela norma. Entretanto, para o CP 01 e CP 02, os componentes foram superdimensionados, com coeficiente de segurança superior a 5. O melhor resultado foi obtido com o CP 03, CP 04 e CP 05, que, com redução de 70,08% e CS superior a 4,50, apresentaram os maiores valores quanto a resistência mecânica, rigidez e redução de massa. O CP 06, por outro lado, embora possua massa superior, com o objetivo de transmitir maior segurança ao usuário durante o manuseio da alavanca, apresentou o pior resultado. Este comportamento, contraintuitivo, pode ser explicado a partir de uma análise futura via MEF. O design orgânico e minimalista do componente foi facilmente reproduzido por meio do processo de manufatura aditiva.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar o presente estudo, cinco tópicos podem ser abordados futuramente:

- Realização de ensaio de tração para caracterizar as propriedades do material PLA PRO1 para, posteriormente, realizar a validação do modelo de elementos finitos

(MEF) por meio da comparação entre a força de reação obtida no ensaio mecânico com o modelo, além dos respectivos deslocamentos e distribuições de tensão.

- Ensaio de fadiga do componente, representando as ações de acionamento e liberação da alavanca de freio de estacionamento.
- Realização dos ensaios com um maior número de amostras para análise estatística da repetibilidade dos ensaios.
- Levantamento da temperatura interna em veículo automotor para análise de viabilidade da aplicação do PLA PRO1 nesta condição, tendo em vista que, conforme BASF (2020), a temperatura de transição vítrea do material é de 63 °C, podendo ser necessária a substituição por outro material que possua maior resistência térmica.
- Realização de ensaios mecânicos em diferentes patamares de temperatura, tendo em vista que 10° C podem modificar significativamente o comportamento do componente.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS, A. et al. **Guidelines for Topology Optimization as Concept Design Tool and Their Application for the Mechanical Design of the Inner Frame to Support an Ancient Bronze Statue**. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, Italy, 2021.

ABNT NBR 10966-2. **Veículos rodoviários automotores – Sistema de freio**. 2019.

ALAFAGHANI, A. QATTAWI, A. **Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method**. Journal of Manufacturing Processes 36, Elsevier 164-174, 2018.

BAHIA, M. T. **Otimização topológica aplicada ao projeto de mecanismos flexíveis**. Dissertação – Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade federal de Santa Catarina, 2005.

BASF, “**Technical Datasheet – Ultrafuse PLA PRO1 TDS**”, https://www.ultrafuseff.com/wpcontent/uploads/2018/06/Ultrafuse_PLA_PRO1_TDS_EN_v3.3.pdf. Acessado em 20/09/2021.

BEZERRA, R. B.; SILVA, J. C. M. **Projeto de freio de estacionamento eletrônico**. Trabalho de conclusão do curso – FATEC – Santo André. Curso de Eletrônica Automotiva, 2012.

DURGAN, I.; ERTAN, R. **Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost**. Department of Mechanical Engineering, Uludag University, Bursa, Turkey, 2014.

FERREIRA, R. T. L. et al. **Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers**. Composites Part B 124, Elsevier 88-100, 2017.

HERNANDEZ, R. et al. **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, Texas, 2016.

LEUCK FILHO, R. F. **Avaliação dos métodos SIMP e BESO de otimização topológica de estruturas**. 2015. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

NOEL, J. P.; CLERE, P. **Parking hand brake for a motor vehicle and manufacturing process of brake lever**. Depositante Rockwell Automotive Body Systems France SA. n. 5,205,184, Filed: Feb. 7, 1992. Date of Patent: Apr. 27, 1993.


OLIVEIRA, B. C. **Estudo da degradação *in vitro* de polímeros a base de poli (butileno adipato co tereftalato) processados por impressão 3d e moldagem por injeção**. Monografia

de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Materiais – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.


PANDA, B. et al. **Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures**. Measurement, Volume 116, Elsevier 495-506, 2018.

SARAWADE, S. S. et al. **Topology Optimization and Stress Validation of the Hand Brake Lever**. International Review of Mechanical Engineering, 2017.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Editora Edgard Bucher Ltda, 2017.



FORWARD 3D
Inventing Additive Manufacturing



BASF
We create chemistry

Technical Data Sheet

Ultrafuse PLA PRO1

Date / Revised: 06.11.2020
Version No.: 3.3

General information

Components

Poly(lactic acid) blend based filament for Fused Filament Fabrication.

Product Description

PLA PRO1 is an extremely versatile tough PLA filament made for professionals. It reduces your printing time by 30% – 80%, (subject to printer and object limitations) and the strength exceeds overall mechanical properties of printed ABS parts. Printer settings can be tuned to achieve blazing fast speeds or an unrivaled surface finish. The excellent quality control ensures the highest levels of consistency between colors and batches, it will perform as expected, every time.

Delivery form and warehousing

Ultrafuse PLA PRO1 filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

Product safety

Recommended: Process materials in a well ventilated room, or use professional extraction systems. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

Notice

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

BASF 3D Printing Solutions BV
◆ sales@basf-3dps.com
◆ www.basf-3dps.com

Recommended 3D-Print processing parameters

Nozzle Temperature	200 – 220 °C / 392 – 428 °F
Build Chamber Temperature	-
Bed Temperature	50 – 70 °C / 122 – 158 °F
Bed Material	Glass, tape at low temperatures
Nozzle Diameter	≥ 0.4 mm
Print Speed	40 - 150 mm/s

Drying Recommendations

Drying recommendations to ensure printability	PLA is in a printable condition, drying is not necessary
---	--

General Properties

		Standard
Printed Part Density	1250 kg/m ³ / 78.0 lb/ft ³	ISO 1183-1

Thermal Properties

		Standard
Glass Transition Temperature	63.0 °C / 145 °F	ISO 11357-2
Melting Temperature	170 – 180 °C / 338 – 356 °F	ISO 11357-3
Melt Volume Rate	18.2 cm ³ /10 min / 1.1 in ³ /10 min (210 °C, 2.16 kg)	ISO 1133