

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**EDUARDO JACICHEN
LUIZ VINICIUS CRUZ ZAMBAN**

**ANÁLISE SOBRE A CONSIDERAÇÃO DA ANISOTROPIA DE MATERIAL E
PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA
PEÇA DE ABS PARA MONTADORA DE CAMINHÕES**

CURITIBA

2022

**EDUARDO JACICHEN
LUIZ VINICIUS CRUZ ZAMBAN**

**ANÁLISE SOBRE A CONSIDERAÇÃO DA ANISOTROPIA DE MATERIAL E
PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA
PEÇA DE ABS PARA MONTADORA DE CAMINHÕES**

**Analysis of taking into account the material anisotropy and the 3d printing
process parameters in topology optimization of an abs part for truck
manufacturer**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Neri Volpato, Ph.D.

**CURITIBA
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**EDUARDO JACICHEN
LUIZ VINICIUS CRUZ ZAMBAN**

**ANÁLISE SOBRE A CONSIDERAÇÃO DA ANISOTROPIA DE MATERIAL E
PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA
PEÇA DE ABS PARA MONTADORA DE CAMINHÕES.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 20 de junho de 2022

Neri Volpato

Doutor em Mechanical Engineering (University Of Leeds, LEEDS*)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Curitiba.

Marco Antônio Luersen

Doutor em Sciences de l'Ingénieur (Institut National des Sciences Appliquées de Rouen)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Curitiba.

José Aguiomar Foggiatto

Doutor em Engenharia Mecânica (Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Curitiba.

CURITIBA

2022

AGRADECIMENTOS

Na fase final da graduação é possível ter uma noção do grande caminho percorrido, do esforço despendido e dos ótimos momentos dedicados a nos tornarmos pessoas melhores. Ao final dessa caminhada não podemos sentir nada diferente de orgulho e carinho por todos os amigos, colegas, professores e pesquisadores que fizeram parte dessa história.

Nossos mais sinceros agradecimentos ao nosso orientador Prof. Ph.D. Neri Volpato, pelo voto de confiança, paciência e compreensão nesse período de conclusão de curso.

Ao Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto e ao Prof. Dr. Marco Antônio Luersen por suas palavras de sabedoria e apoio.

E à todos nossos amigos que fizeram do ensino de engenharia mecânica uma experiência de vida, enfrentamos desafios juntos, fomos derrotados juntos, mas também vencemos juntos.

“A engenharia é a profissão de resolver problemas, se você é bom em resolver problemas, você vai ser um bom engenheiro.”
(Zamban, Vanderlei L.; 2011)

RESUMO

A fabricação por impressão 3D vem se tornando cada vez mais relevante no contexto industrial, com sua importância reforçada pelo uso da otimização topológica. Este trabalho objetiva verificar a aplicabilidade de um procedimento de otimização topológica proposto para peças impressas em 3D no setor de Manufatura Virtual da Volvo do Brasil, considerando a geometria e o material ortotrópico resultantes do processo de impressão. Como caso de estudo, empregou-se o novo procedimento em um espaçador de engate de cabos elétricos impresso por tecnologia de extrusão de material. O estudo estrutural por elementos finitos, otimização topológica e comparação das propriedades mecânicas entre o procedimento atual aplicado na empresa e o proposto, foram feitos no *software* Ansys versão Estudante 19.2. Em conclusão, foi observado que, apesar do resultado da simulação do comportamento mecânico ser mais realista no procedimento proposto, a complexidade da estrutura interna do material gerada pelo processo de impressão foi responsável por aumentar em até 13 vezes o tempo total de procedimento.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Otimização Topológica; Anisotropia.

ABSTRACT

The 3D printing process is becoming even more relevant in the industrial context, with its importance strengthened by the application of structural optimization. This final project aims to verify the applicability of a proposed topology optimization procedure for 3D printed parts at the Virtual Manufacturing department at Volvo from Brazil, considering its resulting geometry and orthotropic material from the printing process. As a case study, the new procedure was used on an electrical cable spacer component printed with material extrusion technology. The finite element structural study, topological optimization and mechanical properties comparison between the current process used in the department and the proposed were made using Ansys Student version 19.2. In conclusion, it was observed that even though the simulation mechanical behaviour results are more realistic in the proposed procedure, the complexity created by the printed geometry was responsible for increasing the total procedure time in 13 times.

Keywords: Additive Manufacturing; Topology Optimization; Anisotropy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Direção de aplicação de forças	17
Figura 2 - Método de Simulação Virtual de Otimização Topológica (MSVOT) do setor de Manufatura Virtual da Volvo do Brasil	18
Figura 3 - Variação da densidade de preenchimento.	24
Figura 4 - Preenchimento do tipo raster com alternância de direção de 90° entre camadas.	25
Figura 5 - Exemplificação do parâmetro de espessura de paredes laterais.	26
Figura 6 - Comportamento mecânico de materiais	28
Figura 7 - Exemplo de discretização de um corpo em elementos finitos.....	34
Figura 8 - Diferentes métodos de otimização.....	35
Figura 9 - Definições de pré-processamento, análise e pós-processamento no Ansys ...	38
Figura 10 - Ansys Workbench Workflow	38
Figura 11 - Proposta de novo procedimento para otimização topológica	40
Figura 12 - Quadro de resultados das simulações de teste quanto ao deslocamento total	41
Figura 13 - Parâmetros de malha indicados no Ansys	43
Figura 14 - Parâmetros de convergência de otimização indicados no Ansys	44
Figura 15 - Estudo comparativo em FEA utilizando ABS isotrópico (a) e ABS ortotrópico (b) submetidos às mesmas condições.	47
Figura 16 - (a) Geometria em CAD, (b) Geometria real impressa.....	48
Figura 17 - Exemplificação dos parâmetros de impressão 3D atribuídos a uma peça exemplo.....	48
Figura 18 - Relatório de resultado de solução no Ansys AIM, totalizando tempo	49
Figura 19 - Aplicação real da peça PN22	50
Figura 20 - Representação em CAD da peça PN22 do caminhão da linha F	51
Figura 21 - Modelo CAD da montagem da PN22 para análise de elementos finitos.....	52
Figura 22 - Malha da montagem	53
Figura 23 - Vetores de carregamento e fixação.....	54
Figura 24 - Ilustração das áreas de exclusão e de otimização.....	55
Figura 25 - Exemplificação dos parâmetros de impressão na PN22	56
Figura 26 - Comparação da entrada de informações de materiais no software ANSYS ...	56
Figura 27 - Fluxo de operações ANSYS Workbench.....	57
Figura 28 – Resultados iniciais da análise de elementos finitos na PN22 de tensão a), e deslocamento b).....	59

Figura 29 - Peça inicialmente otimizada pelo processo atual de MSVOT	60
Figura 30 - Resultado de tensão (a) e deslocamento (b) do novo modelo otimizado topologicamente pelo MSVOT atual.....	61
Figura 31 - Vista em corte do modelo CAD da PN22 otimizada pelo MSVOT atual após a aplicação da mudança de geometria decorrente da impressão 3D.....	61
Figura 32 - Vista em corte da análise FEA de tensão (a) e deslocamento (b) da PN22 utilizando a mudança de geometria.....	62
Figura 33 - Resultados das rotinas iterativas.....	65
Figura 34 - Peças resultantes do MSVOT atual (redução de 70% de massa) a), e MSVOT proposto (redução de 28% de massa) b).....	66
Figura 35 - Peça otimizada pelo MSVOT atual em montagem no caminhão.....	67
Figura 36 - Peça otimizada pelo MSVOT proposto em montagem no caminhão.....	67
Figura 37 - Foto em detalhe da fratura da peça otimizada pelo MSVOT atual	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configurações de impressão	55
Tabela 2 - Resultados das análises de elementos finitos das diferentes propostas da peça PN22.....	62
Tabela 3 - Resultados obtidos pela simulação das diferentes versões da PN22 em elementos finitos.....	64
Tabela 4 - Resultados produtivos entre diferentes procedimentos de simulação virtual da PN22.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variáveis do processo de extrusão de material	23
Quadro 2 - Exemplificação de variação de parâmetros de impressão 3D.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
AMF	<i>Additive Manufacturing File</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MSVOT	Método de Simulação Virtual de Otimização Topológica
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>Stereolithography</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Oportunidade de pesquisa	16
1.2. Problemas e premissas	18
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo geral.....	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
1.4. Justificativas	19
1.5. Organização do trabalho	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1. Tecnologia de manufatura aditiva (AM)	21
2.2. Parâmetros de AM por extrusão de material	23
2.2.1. Preenchimento.....	24
2.2.2. Espessura das paredes laterais.....	25
2.2.3. Orientação em relação à mesa de impressão.....	26
2.2.4. A geometria originada a partir da impressão 3D.....	26
2.3. Anisotropia	28
2.4. Categorização de material impresso em 3D como ortotrópico	30
2.5. Critério de falha	30
2.5.1. Critério de falha de Tsai-Wu	31
2.6. Análise estrutural estática	33
2.7. Análise de Elementos Finitos	33
2.7.1. Procedimentos da Análise de Elementos Finitos	34
2.8. Otimização estrutural	35
2.9. Otimização Topológica	36

2.10.	Procedimentos de uma Otimização Topológica.....	36
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1.	Método de simulação virtual de otimização topológica (MSVOT).....	39
3.2.	Pré-processamento e análise.....	42
3.3.	Otimização topológica e pós-processamento.....	43
3.4.	Categorização do material ABS ortotrópico gerado pela impressão 3D...45	
3.5.	Considerações dos parâmetros de impressão no modelo CAE.....	47
3.6.	Análises de tempo de processamento.....	49
3.7.	Caso de estudo.....	50
3.8.	Pré-processamento e análise do estudo de caso.....	56
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1.	Otimização Topológica e pós processamento do estudo de caso.....	59
4.2.	Resultado do MSVOT proposto.....	63
5.	CONCLUSÕES.....	69
6.	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

O termo Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing* – AM) é comumente conhecido na indústria como impressão 3D, e refere-se a um conjunto de tecnologias que se difere dos métodos convencionais de fabricação por remoção, conformação, fundição, etc. A AM é caracterizada pela adição de material por meio da construção e empilhamento de camadas sucessivas.

Além da AM ter crescido nos últimos anos, outras tecnologias têm se adaptado a esse novo método de fabricação. Dentre eles o mercado de *softwares* de planejamento de processo, tecnologias agregadas a novos materiais, soluções de controle de impressoras, otimização de impressão 3D e de simulação de peças impressas. O mercado da AM vem mudando o foco da produção de protótipos para a fabricação de produtos acabados, isso também contribui para a demanda de melhor planejamento do processo e a necessidade comercial de minimizar as iterações para chegar no produto final.

Um método comum de AM é o baseado na tecnologia de extrusão de materiais. Segundo Volpato (2017), os processos de fabricação desse grupo depositam filamentos extrudados por um bico calibrado deslocado normalmente por um sistema de movimentação no plano X-Y. Nesses casos, esses sistemas realizam a movimentação no eixo Z em camadas sucessivas.

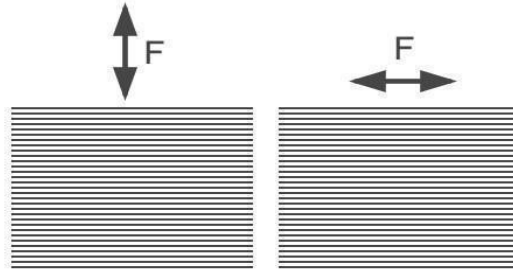
Os processos atuais de simulação e otimizações de peças impressas podem ser efetuados por diversas plataformas disponíveis no mercado, que hoje trabalham majoritariamente com materiais isotrópicos e não levam em conta a distribuição do material no interior da geometria da peça impressa, que decorre do preenchimento, espessura de parede ou diâmetro do filamento impresso. Assim, implica-se uma diferença das peças fabricadas para os modelos simulados.

1.1 Oportunidade de pesquisa

Como todo processo de fabricação, a AM por extrusão de material, possui as suas limitações. Seu conceito de deposição de camadas de polímeros fundidos acarreta uma diferença de propriedades mecânicas dependendo da direção que o

esforço está sendo aplicado em relação à direção de empilhamento das camadas, como demonstra a Figura 1.

Figura 1 - Direção de aplicação de forças



Fonte: Os Autores (2022)

Segundo Azevedo (2013), a impressão 3D produz peças com propriedades mecânicas inferiores às fornecidas por injeção de plástico, mesmo ambas trabalhando com o mesmo material. Isso é explicado pelo fato das peças serem constituídas por camadas que podem ser descoladas, e portanto, se comportam de maneira diferente conforme a direção e sentido da força aplicada.

Considerando que a aplicação dessa tecnologia seja majoritariamente na prototipagem, não existiria uma grande necessidade de garantir elevadas propriedades mecânicas. Entretanto, a gama de aplicações dessa tecnologia vem aumentando cada vez mais, segundo Mendes (2017), a indústria já utiliza peças impressas em dispositivos para auxílio a produção, além de possuir capacidade de desenvolvimento de produtos finais. Também com o aumento da popularidade da impressão 3D, o mercado global desse setor foi avaliado em 13,78 bilhões de dólares em 2020 com um previsto crescimento composto anual de 21% até 2028 (GRAND VIEW RESEARCH, 2021).

A otimização estrutural já faz parte do projeto de produto em métodos convencionais de fabricação, e pode também ser aplicada à AM. Isso é observado, principalmente, porque a AM consegue produzir peças com geometrias complexas, como as das peças obtidas por otimização estrutural. Fato que torna a combinação desse método de fabricação e do processo de otimização especialmente eficaz. Entretanto, ainda é difícil aproximar a simulação às condições reais da peça final devido às características de fabricação da AM, que geram uma peça de material anisotrópico composto por camadas. Esse é um problema que não é tão comum em

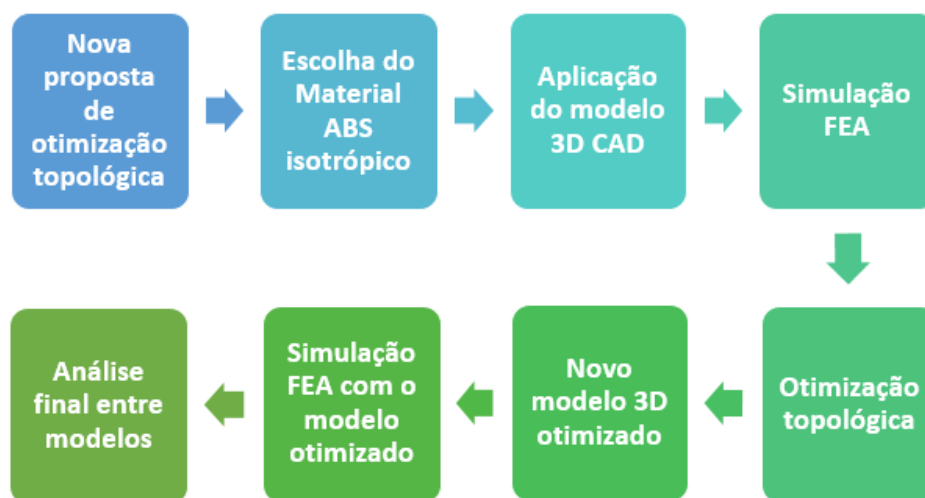
métodos convencionais de fabricação, por normalmente produzirem peças de geometrias maciças e idealmente isotrópicas.

1.2 Problemas e premissas

Atualmente, nas áreas de impressão 3D das grandes empresas, como é apontado no caso de estudo deste trabalho, é comumente encontrado um método de impressão, simulação e otimização estrutural em aplicação. Porém, ainda existem várias incertezas nesse processo que influenciam a tomada de decisão.

Hoje no setor de Manufatura Virtual da Volvo do Brasil, o Método de Simulação Virtual de Otimização Topológica, que será chamado de MSVOT neste trabalho, utiliza apenas materiais isotrópicos na simulação e desconsidera a estrutura interna do material decorrente dos parâmetros de impressão 3D. Portanto, as análises de elementos finitos, ou FEA, podem não corresponder com precisão para esse método de fabricação. Esse procedimento segue o fluxo apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Método de Simulação Virtual de Otimização Topológica (MSVOT) do setor de Manufatura Virtual da Volvo do Brasil



Fonte: Os Autores (2022)

Os procedimentos atuais são os mesmos aplicados à simulação e otimização de peças fabricadas por qualquer outro processo de fabricação. Assim, nota-se uma oportunidade de adaptação do procedimento atual, que já é aplicado na indústria, para a AM. O trabalho tem como foco a validação desse novo procedimento, de forma que possa ser aplicado para diferentes peças, máquinas e matérias-primas, e analisar a importância dos parâmetros singulares de produção para a otimização de peças impressas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a aplicabilidade de considerar a anisotropia do material e as estruturas internas decorrentes dos parâmetros de impressão 3D, características do processo AM por extrusão de material, no procedimento de otimização topológica de peça de ABS para o setor automotivo, visando aumentar a confiabilidade do mesmo.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho tem se:

- Categorizar o material ABS conforme a bibliografia, que decorrente do processo de impressão 3D apresenta ortotropia.
- Aproximar a geometria do modelo CAD da peça de estudo a da peça real fabricada pelo método de impressão 3D.
- Realizar ciclos iterativos de otimização topológica para alcançar uma geometria que atenda o critério de resistência especificado.
- Analisar comparativamente o procedimento atual de peças impressas em 3D com o procedimento proposto pelo estudo, considerando os parâmetros de impressão e anisotropia do material.

1.4 Justificativas

O mercado de fabricação de veículos automotores brasileiro representou 4,64% do PIB nacional segundo o perfil da indústria brasileira no ano de 2018. Neste mesmo ano, o setor de fabricação de caminhões e ônibus representou 1,19% do PIB, cerca de 26% da categoria (IBGE, 2018). Outro grande indicador é a participação no investimento empresarial dedicado à pesquisa e desenvolvimento de 16,6% da indústria de veículos automotores, o primeiro lugar de todos os setores da indústria em 2018 (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2018).

A busca por novas tecnologias que podem servir como grande impulso competitivo torna a AM um dos principais focos desse setor da industrialização, representando um grande pilar para a digitalização e inovação na indústria de fabricação de caminhões.

Dentre as várias iniciativas relacionadas à impressão 3D da Volvo Group, pode-se destacar a criação de um time interno focado em desenvolvimentos dessa tecnologia e os diversos estudos ativos de otimização topológica para consolidar montagens. Um desses estudos, por exemplo, foi capaz de diminuir cerca de 120 kg do peso total do motor e consolidar 200 peças em componentes singulares. Fazendo uso da impressão 3D e otimização topológica no motor “*DTI 5 4-cylinder Euro 6 step C*”, apresentando uma significativa redução de 25% da massa total do motor (VOLVO, 2018).

Sumarizando, ainda há a necessidade da construção de um procedimento confiável para a simulação estrutural e otimização de peças impressas em 3D, considerando as verdadeiras singularidades desse procedimento produtivo. Na AM há uma grande oportunidade para novas tecnologias no ramo da simulação, por isso se faz cada vez mais necessário o estudo detalhado dos materiais, máquinas e métodos ligados a essa área. Portanto, o aumento da confiabilidade do MSVOT, através da proposta deste trabalho, pode garantir um processo de simulação que gere peças que necessitem de menos material e tempo de máquina e conseqüentemente diminuindo seus custos de fabricação.

1.5 Organização do trabalho

Este documento é dividido em cinco capítulos: Capítulo 1 - Introdução: ocorre uma breve apresentação do tema abordado pelo trabalho, com os problemas do procedimento atual e as justificativas de trabalho objetivando o desenvolvimento do novo procedimento. Capítulo 2 – Fundamentação teórica: revisa o conhecimento acerca da impressão 3D no mundo atual, a anisotropia comum em materiais impressos, critérios de falha que podem ser aplicados nesses materiais, métodos de simulação por FEA e os procedimentos de otimização topológica. Capítulo 3 – Materiais e métodos: aborda os métodos utilizados na categorização do material anisotrópico conforme a literatura e os demais métodos a serem empregados para realização deste trabalho, como os parâmetros atuais e futuros para a otimização topológica. Capítulo 4 – Resultados e discussões: resultados obtidos e aplicações diretas na peça escolhida como estudo de caso. Capítulo 5 – Conclusões: são descritas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo fornece conceitos básicos a respeito de tópicos, como: AM por extrusão de material, anisotropia de materiais, processos de análise de elementos finitos e otimização topológica, necessários para o total entendimento dos métodos empregados no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Tecnologia de manufatura aditiva (AM)

Antes dos anos 1980, os processos de fabricação convencionais não faziam uso do princípio de adição de materiais, se baseando principalmente nos métodos de moldagem, remoção, conformação e união. Mas a manufatura aditiva ou impressão 3D, introduziu esse novo conceito ao meio produtivo (CARVALHO, 2017).

Segundo Gibson et al. (2015), o processo de AM é comumente composto de oito passos, que demonstram as etapas envolvidas na produção de uma peça.

- O primeiro passo representa o desenvolvimento em plataforma CAD do modelo geométrico da peça, por meio de um sólido ou superfície;
- Em seguida, o modelo 3D passa por uma conversão para o formato STL (STereoLithography) ou AMF (Additive Manufacturing File), que consiste na representação dos sólidos ou superfícies da peça através de uma malha triangular;
- O terceiro passo descreve a manipulação do modelo 3D, definindo a correta posição, tamanho e orientação;
- Então é realizado o *setup* da máquina e da matéria-prima, nessa etapa são definidos os parâmetros de impressão, alterando assim propriedades onde a máquina se movimenta, aquece e imprime a peça;
- O quinto passo é a produção da peça propriamente dita, normalmente consiste num processo altamente automatizado, portanto a interação humana só é necessária no caso de eventuais falhas do processo;
- O sexto passo consiste em retirar a peça da máquina, esse processo pode ser automatizado ou não.
- Então, é feito o passo de pós-processamento. Essa etapa é importante pois grande parte das geometrias impressas necessitam da retirada de suporte,

seja ele do recipiente de pó, dos recortes de material ou em material solidificado.

- Finalmente é o passo de aplicação, algumas peças podem necessitar de limpeza ou tratamento superficial. Também nessa etapa é realizado a montagem de componentes caso necessário.

A aplicação da peça pode ser considerada como o oitavo e último passo. Esse processo genérico descreve uma forma ilustrativa da qual grande parte dos processos de fabricação devem passar, considerando que fabricações mais complexas ou menos complexas podem usar mais, ou menos passos (GIBSON et al., 2015).

Como descrito por Carvalho (2017), e complementado por Gross (2014), os processos de fabricação por AM são divididos segundo a norma ISO/ASTM 52900:2021, inicialmente pela matéria-prima de trabalho, podendo ser líquida, sólida ou em pó. Após a categorização por meio da matéria-prima foi observada a necessidade de categorizar pelos princípios de adição de material, assim, pode-se brevemente resumir alguns dos diferentes métodos de AM como:

- I. Fotopolimerização em cuba — Baseado na cura seletiva por luz de um polímero fotossensível líquido dentro de uma cuba.
- II. Jateamento de aglutinante — Camadas de partículas são espalhadas por meio de um rolo sobre uma superfície, então um ligante líquido é pulverizado no padrão desejado, formando a estrutura final. As partículas não ligadas são removidas no final do processo.
- III. Fusão de leito de pó — Semelhante à tecnologia de jateamento de aglutinante, em que camadas de partículas são espalhadas por um rolo sobre uma superfície, exceto que as partículas são fundidas usando um laser ou feixe de elétrons.
- IV. Adição de lâminas — Consiste na disposição de camadas de materiais como papel, plástico ou metal, colocadas através de um rolo e o material é cortado para formar um padrão usando um *laser* ou uma lâmina. Depois que uma folha é recortada no formato desejado, a próxima é colocada em cima e o processo é repetido.

- V. Deposição com energia direcionada — A tecnologia consiste num bocal controlado que segue um trajeto enquanto adiciona um *spray* de pó metálico ou arame juntamente a um laser de alta potência.
- VI. Extrusão de material — Nessa tecnologia o material é extrudado e depositado por um bico ou orifício, realizando movimentos pré-determinados gerando camadas sobrepostas de material sucessivamente.
- VII. Jateamento de material – Semelhante ao processo de impressão 2D, esse processo descreve o jateamento de material líquido para uma plataforma e em seguida é solidificado fisicamente ou quimicamente.

Para a execução deste estudo foi escolhido o por extrusão de material, por seu baixo custo de equipamentos e matéria-prima, facilidade de manuseio, mas principalmente por se tratar do método atual para impressão do estudo de caso (WIKI, 2017).

2.2 Parâmetros de AM por extrusão de material

As características de uma peça obtida pelo processo de impressão 3D são moldadas por diversas variáveis pertinentes ao método de fabricação, denominados parâmetros de impressão. Esses parâmetros demonstram definições a serem cumpridas pela máquina, como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Variáveis do processo de extrusão de material

Operação	Máquina	Material	Geometria
Espessura do fatiamento	Diâmetro do bico	Viscosidade	Comprimento do vetor de preenchimento
Largura do filamento depositado	Taxa de alimentação do material (filamento ou granulado)	Rigidez do filamento	Estrutura de suporte
Velocidade do cabeçote	Velocidade dos roletes tracionadores (alimentação com filamento) ou velocidade do parafuso extrusor	Flexibilidade	Quantidade de trechos de <i>raster</i>
Temperatura de extrusão	Vazão	Condutividade térmica	Tempo entre deposição de camadas
Temperatura do envelope	Diâmetro do filamento ou dimensão do granulado	Higroscopia	
Padrão de preenchimento	Convecção no interior do envelope	Características do ligante	
		Características do pó (FDC, FDMet)	

Fonte - VOLPATO (2017)

Segundo Cunico (2015), pode-se destacar dentre os parâmetros de impressão, a orientação da impressão, estratégia de preenchimento, *gap* (distância entre filamentos), espessura de camada e de parede e velocidade do cabeçote. A seguir são detalhados os parâmetros mais influentes no estudo proposto de otimização topológica.

2.2.1 Preenchimento

O preenchimento de uma peça impressa em 3D é definido por parâmetros que caracterizam as principais formas e estratégias de ocupar o seu volume interno. Esses parâmetros possuem grande influência sobre as características mecânicas, tempo de impressão e quantidade de matéria-prima, além de ser fundamental para garantir integridade estrutural para a parte interna da peça. Sendo controlado principalmente por dois parâmetros, a distância entre filamentos no preenchimento e o padrão de preenchimento (CUNICO, 2015). O primeiro controla a densidade com que o interior da peça é preenchido pelo filamento, como apresentado na Figura 3. O segundo define o padrão seguido pelo preenchimento.

Figura 3 - Variação da densidade de preenchimento.

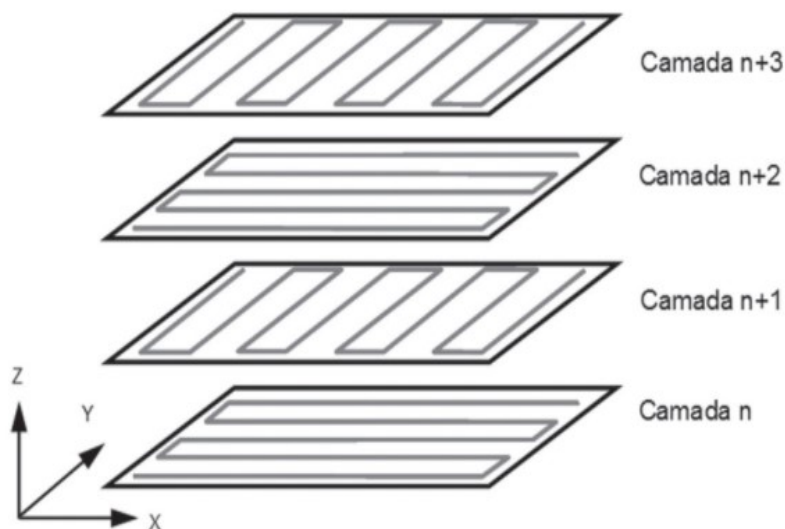


Fonte - IMPRIMALAB (2019)

O padrão de preenchimento descreve o perfil da estrutura interna da peça, podendo ser gerado por diversas estratégias de preenchimento, seja ela por *raster*, *honeycomb*, *grid*, *cross*, *cross 3D*, *gyroid*, entre outros. Cada uma dessas estratégias altera as propriedades estruturais da peça final e toda a sua geometria interna. Enfatizando o padrão de preenchimento por *raster*, por ser um dos mais usados por

equipamentos de impressão 3D (STRATASYS, 2018), onde o filamento é depositado linearmente em camadas alternadas perpendiculares entre si como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Preenchimento do tipo *raster* com alternância de direção de 90° entre camadas.



Fonte – VOLPATO (2017)

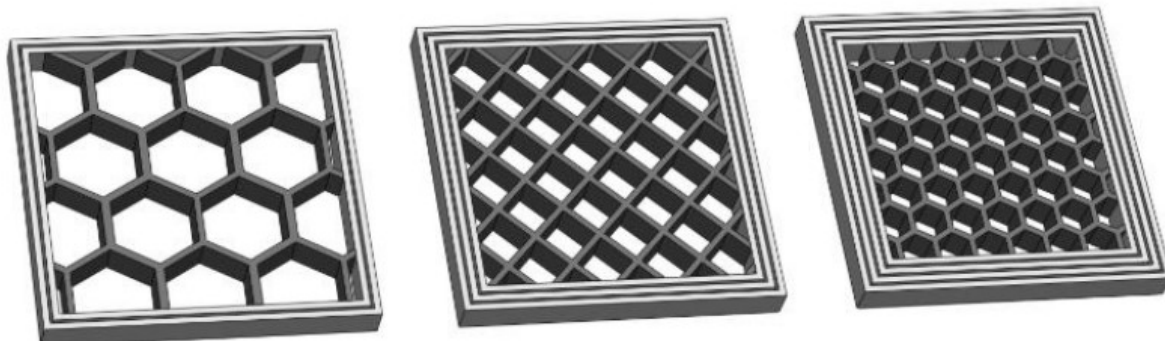
O preenchimento pode ser monitorado pela porcentagem do volume interno preenchido ou pelo espaçamento entre linhas, conhecido como *gap*, a mínima distância entre dois caminhos trilhados pelo filamento extrudado. Esse fator se torna altamente expressivo na diferença entre o procedimento atual de otimização topológica e o proposto, pois a geometria interna da peça impressa, assim como o seu padrão de preenchimento, não são considerados.

2.2.2 Espessura das paredes laterais

O parâmetro espessura das paredes laterais é caracterizado pela quantidade de contornos (perímetros) de filamento com que as paredes da peça são constituídas, influenciando a quantidade de material, custo e tempo de impressão (BROWN, 2020). Como observado na Figura 5, o número de perímetros gerados pela impressão, determina parte do preenchimento da peça e também não é considerado no procedimento atual de otimização topológica. Assim, peças com diferentes

espessuras de parede laterais são otimizadas da mesma forma, não condizendo então com a realidade.

Figura 5 - Exemplificação do parâmetro de espessura de paredes laterais.



Fonte - BROWN (2020)

2.2.3 Orientação em relação à mesa de impressão

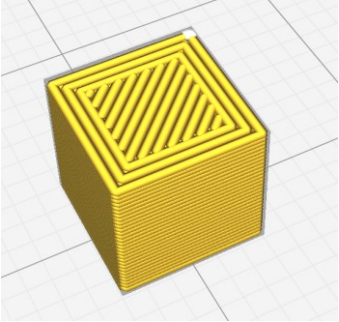
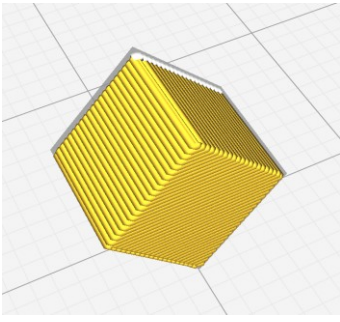
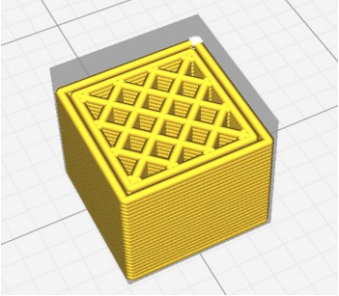
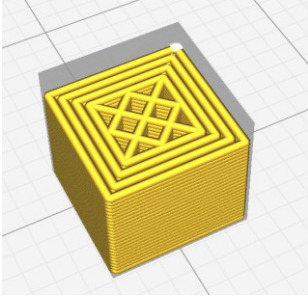
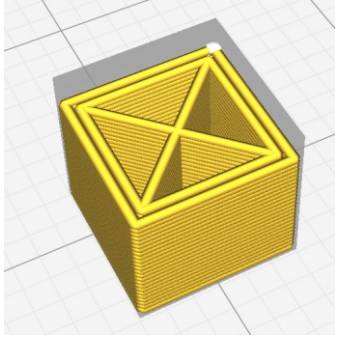
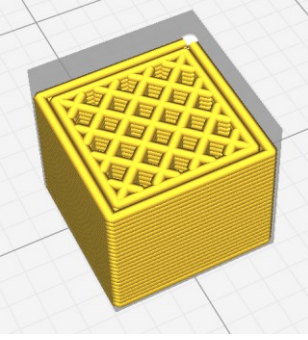
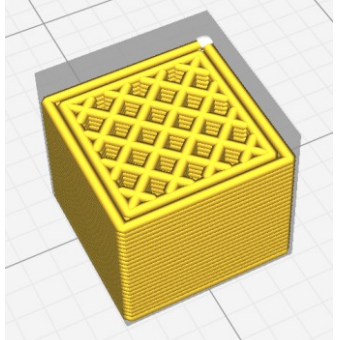
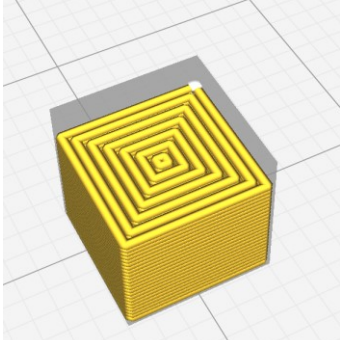
Como o nome sugere, esse parâmetro define a orientação onde a peça será impressa em relação ao eixo vertical da impressora, conseqüentemente a orientação onde as camadas serão empilhadas. Também é uma etapa muito importante para as propriedades mecânicas do produto, influenciando a duração e quantidade de material do corpo gerado (CARVALHO, 2017).

Pelos experimentos de Li (2020), foi possível encontrar diferenças de até 6,6% em propriedades elásticas e 23,8% em resistências mecânicas, apenas variando a orientação da peça em relação à mesa de impressão 3D.

2.2.4 A geometria originada a partir da impressão 3D

Pode-se ilustrar as diferenças geométricas presentes no resultado de peças impressas, através da variação dos parâmetros, utilizando valores ou estratégias diferentes, como exemplificado por meio do Quadro 2 que apresenta dois exemplos por linha, dentre muitos outros disponíveis, exemplificando como a impressão é alterada conforme a variação de cada parâmetro.

Quadro 2 - Exemplificação de variação de parâmetros de impressão 3D

Parâmetro	Variação 01	Variação 02
Orientação de impressão		
Espessura das paredes laterais		
Diferentes parâmetros de preenchimento		
Padrão de preenchimento		

Fonte - Os Autores (2022)

Por este motivo, dentre os fatores apresentados, pode-se demonstrar diferenças físicas reais de geometria e de comportamento de material, entre os modelos CAD com as peças impressas.

2.3 Anisotropia

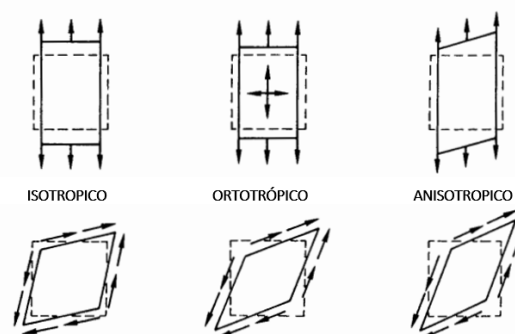
Anisotropia (do grego, $\acute{\alpha}\nu$: prefixo privativo (negação), $\acute{\iota}\sigma\acute{o}\omega$: igualar, $\tau\rho\acute{o}\pi\omicron\varsigma$: direção). Segundo Souza et al. (2002), a anisotropia é uma característica intrínseca do material inerente a sua estrutura e caracteriza que uma substância possui certa propriedade física que varia com a direção. Diferente de um meio isotrópico onde suas propriedades não dependem das orientações dos campos que são submetidas.

“Quando as propriedades de uma substância são independentes da direção em que ela é medida, ela é chamada de isotrópica, assim deve-se esperar que um material isotrópico tenha as mesmas propriedades físicas e mecânicas em todas as direções. As propriedades físicas e mecânicas dos cristais dependem em geral fortemente da direção cristalográfica na qual são medidas, a dependência das propriedades com a direção é chamada de anisotropia.” (DIETER, 1981).

Muitos dos desafios da impressão por extrusão de material são decorrentes dos efeitos anisotrópicos resultantes do processo com que o material é depositado pela impressora. Como o filamento no processo é usualmente fundido e depositado em etapas, a adesão entre camadas limita a resistência à tração no seu sentido transversal, configurando diferentes propriedades mecânicas dependentes da direção que a força é aplicada. Problema que não é tão presente em processos de fusão de leito de pó e fotopolimerização em cuba que tendem a possuir uma ligação mais homogênea entre camadas (SHAFFER et al., 2014).

Uma das propriedades dos materiais anisotrópicos está relacionado com a não simetria de parâmetros elásticos, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Comportamento mecânico de materiais



Fonte – Adaptado de JONES (1999)

O comportamento mecânico em relação aos demais materiais, demonstra assim um material de matriz constitutiva representada pela Equação 1, sendo σ_i e ε_i a tensão e deslocamento normal, C_{ij} sendo as constantes da matriz constitutiva, τ_{ij} e γ_{ij} as tensões e deslocamentos cisalhantes (JONES, 1999).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sendo essa a mais genérica equação linear elástica de materiais caso o material possua um plano de simetria de propriedades de material a matriz relação tensão-deslocamento é reduzida para, ainda sendo considerado anisotrópico na Equação 2.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Outra categorização de materiais anisotrópicos é a de material ortotrópico, usada para materiais isotrópicos que possuem dois planos ortogonais de propriedades mecânicas simétricas. As relações de tensão-deslocamento podem ser novamente simplificadas conforme a Equação 3.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para materiais ortotrópicos são definidas nove constantes para totalmente caracterizar o material, essas constantes são definidas pelas propriedades de materiais isotrópicos, já definidos na literatura, assim é apresentado o conjunto de propriedades formadoras do material na Equação 4 (JONES, 1999).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

Onde:

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde E_1, E_2, E_3 correspondem aos módulos de elasticidade nas direções 1, 2 e 3. Já ν_{ij} corresponde aos coeficientes de Poisson, e por fim, G_{23}, G_{31}, G_{12} aos módulos de cisalhamento nas direções 2-3, 3-1 e 1-2. Portanto, essas são as constantes a serem definidas para total caracterização de um material ortotrópico (JONES, 1999).

2.4 Categorização de material impresso em 3D como ortotrópico

Segundo Bellini et al. (2003), peças fabricadas por extrusão de material apresentam comportamento mecânico característico de materiais ortotrópicos. Foi identificado que a sua matriz tensão deslocamento apresenta dados simétricos em dois planos assim como na Equação 4. Casavola et al. (2016), reitera esse comportamento em peças feitas por extrusão de material, e complementa que a ortotropia é ainda mais presente em peças impressas com o material ABS do que peças impressas em PLA (*Polyatlitic Acid*).

2.5 Critério de falha

No projeto de componentes e peças, a escolha do material e do processo de fabricação são de extrema importância e, nessa fase, é trabalho do engenheiro definir os parâmetros a serem atendidos pelos componentes em atuação. A necessidade de aplicar o critério de falha que seja relevante ao processo empregado pelo produto é essencial. Segundo Buffoni (2017), comumente os materiais dúcteis como alguns

aços, podem utilizar os critérios de Tresca, ou o critério de von-Mises. Materiais frágeis, no que lhe concerne, podem ser atribuídos os critérios de Rankine, ou o critério de Mohr, dentre outros (BUFFONI, 2017).

Para materiais anisotrópicos, as opções são mais restritas, principalmente por estarem submetidos a tensões biaxiais ou triaxiais. Para a simplificação, os materiais ortotrópicos, possuem critérios de falha específicos, considerando as constantes de resistência, dependentes da direção previamente estabelecidas. Sendo possível aplicar a esses materiais, os de critérios da Tensão Máxima (*Maximum Stress Failure Criterion*), de Deformação Máxima (*Maximum Strain Failure Criterion*), os critérios de Tsai-Hill, Hoffman e Tsai-Wu (SOUZA et al., 2002).

2.5.1 Critério de falha de Tsai-Wu

O critério de falha de Tsai-Wu é o mais indicado para o uso em materiais ortotrópicos, pois seu tensor é invariante pelo efeito de rotação dos eixos coordenados, assim sendo apenas dependente do eixo de disposição (SOUZA et al., 2002). Para a definição desse critério de falha é necessário partir da Equação 5, que se pode considerar que o material falha quando:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (5)$$

Sendo F o índice obtido a partir das combinações das tensões de resistência de tração e compressão nas direções X e Y, sendo “X” a direção da resistência axial ou longitudinal e “Y” a direção da resistência transversal. Seguindo o modelo adotado de condições de planos ortogonais simétricos e de tensão de plano, é possível reduzir a função de seis dimensões para Equação 6.

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (6)$$

Para melhor categorização do critério de falha, são utilizadas as seguintes definições de cada um desses termos de F_i . Utilizando para as forças sendo aplicadas no mesmo ângulo da direção do filamento impresso, categorizando a natureza ortotrópica do material impresso, é encontrado o primeiro termo. Para os demais, serão aplicados os mesmos métodos, nas direções ortogonais e no meio do caminho entre os dois, ou seja, 45° da direção inicial do filamento impresso. Desta forma, encontra-se as seguintes equações:

$$F_1 = 0 \quad \& \quad F_{11} = \frac{1}{X^2} \quad (7)(8)$$

$$F_2 = 0 \quad \& \quad F_{22} = \frac{1}{Y^2} \quad (9)(10)$$

$$F_6 = 0 \quad \& \quad F_{66} = -\frac{1}{S^2} \quad (11)(12)$$

Finalizando assim a equação geral como:

$$\frac{1}{X^2}\sigma_1^2 + \frac{1}{Y^2}\sigma_2^2 + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (13)$$

Onde o termo F_{12} , pode ser encontrado a partir do teste biaxial do material, ou pela conexão do método de Tsai-Wu com o método de von-Mises, finalizando a fórmula:

$$F_{12} = \frac{1}{2S_Y^2} \quad (14)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2}F_{11} \quad (15)$$

Finalmente, de modo a encontrar o coeficiente de segurança, utiliza-se a fórmula quadrática, sendo uma das raízes o coeficiente na direção selecionada e a raiz negativa demonstrando os esforços contrários (tração para deformação, cisalhamento positivo para negativo). Da qual é usualmente utilizada por meio da fórmula do fator de segurança (FS) (JONES, 1999):

$$A(FS)^2 + B(FS) + C = 0 \quad (16)$$

Onde:

$$A = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 - F_{11}\sigma_1\sigma_2 \quad (17)$$

$$B = F_1\sigma_1 + F_1\sigma_1 \quad (18)$$

$$C = -1 \quad (19)$$

Resolvendo para o fator de segurança:

$$FS = \frac{\pm\sqrt{B^2-4ac}-B}{2A} \quad (\text{apenas a maior raiz importa}) \quad (20)$$

2.6 Análise estrutural estática

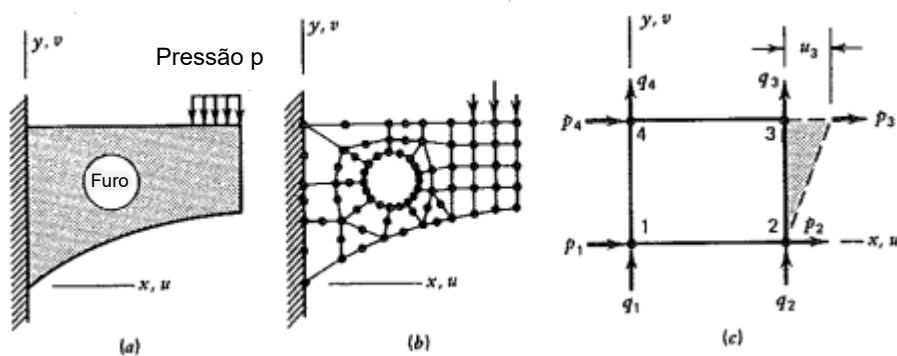
A análise estrutural estática pode ser descrita como a identificação das cargas aplicadas sobre um corpo, tensões, reações de apoio, forças internas, deformações e suas implicações sobre o corpo de estudo, segundo as equações analíticas de equilíbrio de acordo com Rizzoto (2019). A análise estrutural estática se faz útil na previsão das condições e comportamentos de estruturas de acordo com sua aplicação. Porém, dependendo da complexidade de forma e das forças aplicadas no elemento, as equações analíticas se tornam inapropriadas para a realização da análise, portanto métodos numéricos recorrem à discretização do corpo para permitir a viabilidade do cálculo estrutural (RIZZOTTO, 2019).

2.7 Análise de Elementos Finitos

De acordo com Cook et al. (1988), a Análise de Elementos Finitos (FEA), é um processo numérico de análise estrutural onde o problema em questão é muito complexo para ser solucionado por métodos fatoriais de análise clássica. O procedimento de elementos finitos resolve múltiplas equações algébricas em simultâneo, em uma máquina de cálculo digital para situações que envolvem transferência de calor, fluidos, acústica, lubrificação e distribuição de tensões devido à aplicação de forças externas.

Para que o computador consiga processar a análise, o corpo precisa ser discretizado em pequenos elementos de geometria simples como triângulos ou quadrados. Conforme ilustrado na Figura 7a um corpo bidimensional é submetido a pressão “ p ”, na Figura 7b o corpo é discretizado em pequenos elementos aproximando a geometria original do mesmo, caracterizando uma malha, com “ p ” sendo aplicada nos nós correspondentes à sua posição. Já a Figura 7c ilustra um elemento retangular submetido às forças “ p_i ” e “ q_i ”, onde a linha pontilhada indica a deformação causada no nó 3 em resposta às forças aplicadas. Apesar do exemplo descrito possuir apenas 2 dimensões para simplificar o entendimento do processo, a discretização é principalmente aplicada em sistemas tridimensionais para realização da Análise de Elementos Finitos.

Figura 7 - Exemplo de discretização de um corpo em elementos finitos



Fonte – adaptado de COOK et al. (1988)

2.7.1 Procedimentos da Análise de Elementos Finitos

Segundo Roylace (2001), os *softwares* responsáveis por realizar uma análise de elementos finitos geralmente exercem 3 funções principais:

- Pré-processamento: um modelo do objeto à ser estudado é construído a partir de um arquivo CAD e dividido em pequenos elementos conectados por nós, ou *nodes*. Alguns nós possuem forças ou deslocamentos aplicados sobre eles.
- Análise: o conjunto de dados preparado na etapa anterior é usado como entrada para o *software* construir e resolver um sistema de equações algébricas lineares e não lineares como a Equação 21. Onde “u” e “f” são os deslocamentos e as forças externas aplicadas aos nós formando a matriz “K”, dependente do problema a ser resolvido.

$$K_{ij}u_j = f_i \quad (21)$$

- Pós-processamento: antigamente os resultados da análise eram apresentados pelo *software* apenas como números, deixando a sua compreensão muito difícil e mais suscetível a erros de interpretação. Enquanto atualmente o pós processador ilustra a variação das tensões e deslocamento de forma gráfica através da mudança de cores e deslocamento da geometria.

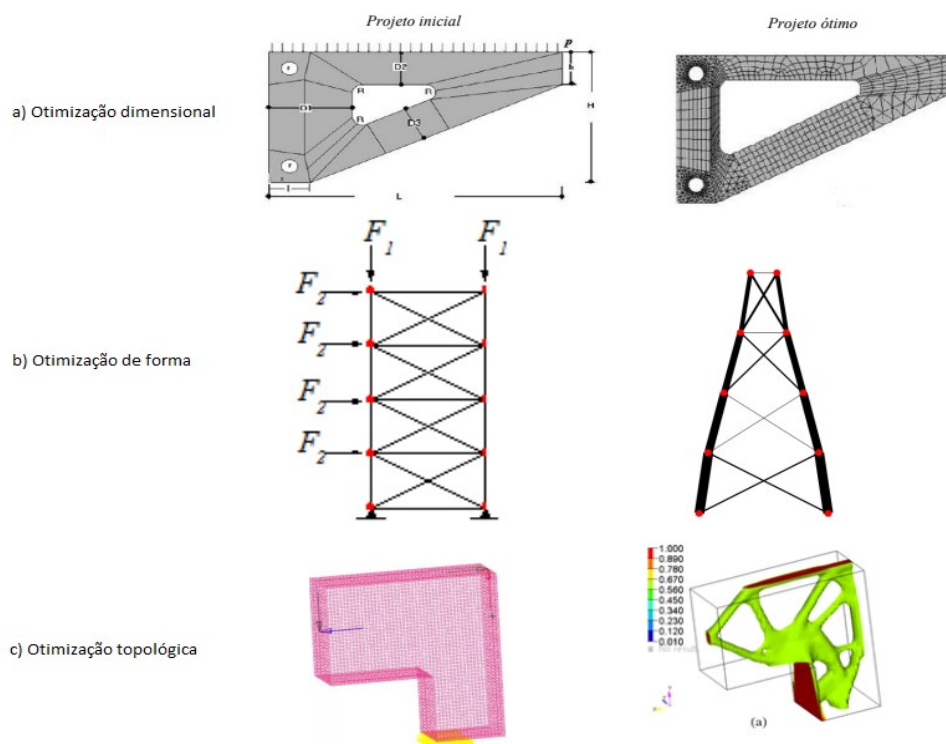
2.8 Otimização estrutural

Os processos de otimização estrutural visam encontrar soluções adequadas por formulações matemáticas restritas pelas condições do problema de forma sistematizada, garantindo a integridade mecânica necessária da estrutura e minimizando custo financeiro e quantidade de material envolvidos (CHRISTENSEN et al., 2009).

De acordo com Lopez et al. (2013), a otimização estrutural procura alcançar a performance ótima de uma determinada estrutura através de processos matemáticos ou numéricos considerando alguma propriedade mecânica para avaliar o seu desempenho. Também são definidas condições de contorno a respeito das demais variáveis relevantes ao projeto, como possíveis desencadeadores de falha. Basicamente, esse método procura atingir dois principais objetivos: minimizar custo considerando as restrições do sistema e minimizar a necessidade de um projetista com alta experiência envolvido no assunto (LOPEZ et al., 2013).

A otimização estrutural é dividida em 3 principais categorias: a otimização de forma, otimização dimensional e a otimização topológica, como exemplificado na Figura 8. A última destas foi considerada para o procedimento deste trabalho.

Figura 8 - Diferentes métodos de otimização



Fonte – LOPEZ et al. (2013)

2.9 Otimização Topológica

Segundo Lopez et al. (2013), a otimização topológica estrutural busca atingir a forma ótima de um determinado corpo através da variação dos seus elementos ou padrões de conectividade em um domínio pré-determinado. A limitação do domínio de atuação do algoritmo tem como função reduzir a uma quantidade finita as possíveis configurações de pontos de forma calculável. Pela combinação de um método numérico de análise como o FEA e um algoritmo de otimização, é possível através de diversas iterações, convergir o modelo a uma aproximação ótima do resultado esperado (LOPEZ et al. 2013).

A otimização de forma trabalha apenas modificando a forma pré-definida do corpo sem se preocupar com a reorganização da malha, movimentando os pontos de elementos finitos para atingir os objetivos requisitados. Já a otimização dimensional apenas encontra as condições ótimas para medidas determinadas antes da análise, limitando grandemente o potencial de melhoria. E o método de otimização topológica trabalha diretamente alterando a malha do domínio livremente durante o processo de otimização.

Segundo Muñoz (2017), na otimização topológica é definido o objetivo, como a maximização da rigidez, e seus parâmetros de construção, como número de iterações.

Para Morishita (2015), dois elementos são essenciais para desenvolver a otimização topológica eficientemente e com bons resultados. As condições de contorno não devem ser muito exigentes de forma a evitar que apenas soluções impossíveis sejam geradas, e a dimensão dos elementos finitos precisa ser pequena o suficiente para garantir a acuracidade, mas também não tão pequena a ponto de demandar processamento computacional demais (MORISHITA, 2015).

2.10 Procedimentos de uma Otimização Topológica

Segundo o manual *Ansys Theory Reference* (ANSYS, 1999), o procedimento para uma otimização topológica é dividido em pré-processamento, análise e pós-processamento. Essa estrutura é utilizada por todos os demais processos de otimização.

- Pré-processamento: é descrito pela formulação da ideia a ser empregada no *software*, definindo os campos a serem estudados, como análise estrutural, térmico, vibracional ou até mesmo acústico, e cada campo de análise possui suas características e desenvolvimentos próprios. A partir disso há a necessidade de seleção dos bancos de dados de engenharia, sendo por meio de materiais, constantes relevantes e procedimentos padronizados dentro da mesma análise. Em seguida pode-se definir o campo de trabalho com a geometria a ser estudada, seus componentes e dispositivos, volumes de controle e áreas de interferência. Possivelmente, o campo mais importante segundo o *Structural Analysis Guide* (ANSYS, 2004) para o desenvolvimento de um modelo FEA confiável é a entrada de dados de esforços, condições de contorno e de comportamento. Nessa etapa é definida a verdadeira semelhança entre o modelo real e o simulado, quanto maior o número de dados adicionados nessa etapa mais precisa e demonstrativa a análise será.
- Análise: é realizada a leitura de todos os dados introduzidos na etapa anterior e adiciona o método de elementos finitos. Gerada então a malha, composta da discretização do modelo total, também nesse momento são definidos os objetivos da análise e quais serão os resultados esperados. Os objetivos de uma análise podem variar como de otimização topológica por volume ou por massa, demonstrativos de esforços, deslocamento e coeficientes de segurança. Resolvendo enfim o sistema de equações gerado pelo *software* de modo a encontrar os objetivos descritos.
- Pós-processamento: obtêm-se os resultados dos estágios anteriores, tem-se a demonstração por meio de gráficos e relatórios, principal resultado refere-se ao modelo CAD otimizado, que é normalmente disponibilizado como conjunto de superfícies, também podem demonstrar vídeos do histórico de iterações, juntamente com a possibilidade de preparar uma nova análise, para servir como validação do modelo encontrado.

Todas essas etapas são realizadas através da plataforma de análises do *software* Ansys Workbench e pela obtenção de dados relevantes para o projeto. São de extrema importância o conhecimento de dados confiáveis do material e do método de fabricação do objeto de teste, suas propriedades mecânicas e particularidades. Os

componentes de montagem ou interferência que complementam seu uso real, os parâmetros necessários para a construção de um modelo otimizado e suas limitações conforme a Figura 9.

Figura 9 - Definições de pré-processamento, análise e pós-processamento no Ansys



Fonte - AZEVEDO (2019)

Dentro do Ansys Workbench realiza-se uma simulação e um novo método para a análise desses dados. Como exemplifica Harris (2017) na Figura 10, o “Bloco A” indica a análise estrutural estática na geometria inicial, incluindo todas as tensões envolvidas que descrevem as suas condições reais, enquanto o “Bloco B” efetua a otimização topológica e o “Bloco C” configura a validação da geometria otimizada, garantindo que o design gerado atenda os parâmetros de projeto.

Figura 10 - Ansys Workbench Workflow



Fonte - HARRIS (2017)

Como demonstrado nas Justificativas inseridas no Capítulo 1, na Figura 2 o Método de simulação virtual de otimização topológica utilizado hoje na equipe de Manufatura Virtual da Volvo, esse procedimento consiste em uma diretriz padronizada para o procedimento de novas propostas de otimização topológica. Cada passo pode ser realizado e modificado caso exista necessidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Método de simulação virtual de otimização topológica (MSVOT)

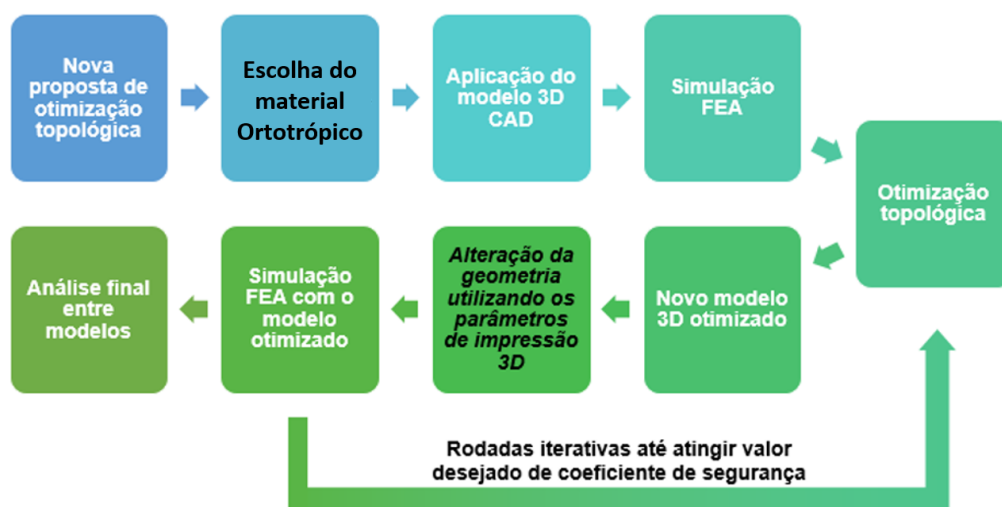
Como demonstrado na Figura 2 no Capítulo 1, o Método de simulação virtual de otimização topológica usado hoje pela equipe de Manufatura Virtual da Volvo Curitiba consiste em uma diretriz padronizada de procedimentos para novas propostas de otimização topológica. Cada passo pode ser realizado e modificado caso exista necessidade.

1. O primeiro passo a ser realizado no procedimento de otimização topológica é o estudo da proposta. Onde o projeto de peça e seus impactos em relação aos demais componentes de montagem são selecionados, analisando também os objetivos e informações necessárias para o processo de otimização.
2. Em seguida, recorre-se ao *software* Ansys AIM e suas bibliotecas internas de propriedades físicas de materiais. Normalmente seleciona-se o ABS (acrilonitrila butadieno estireno), pois é o material do filamento usado para a produção das peças impressas pela equipe de Manufatura Virtual.
3. Integração do modelo CAD da peça inicial, e serve de ponto de partida para a atribuição de restrições geométricas e de pontos de interesse. Podendo ser remodelado dentro da plataforma do Ansys, ou importados de outro *software* CAD.
4. Aplicação de todos os esforços do estudo e suas mudanças ao longo do tempo, as áreas de suporte e fixação da peça com outros componentes e os detalhes do estudo FEA, como método de discretização da peça, tamanho da malha do estudo, critério de falha, formatos das saídas de dados, etc.
5. Otimização topológica da peça propriamente dita, com a definição dos parâmetros do processo, como número de iterações, pontos iniciais e finais, áreas de atuação e de exclusão da otimização. Também são definidos os objetivos da otimização, como redução de massa, maximização de propriedades específicas, cálculo de coeficientes de segurança.

6. Entrega do modelo final utilizado normalmente em geometria generativa, da qual passa por várias iterações de análises estruturais, tornando muito difícil sua fabricação. Pois, muitas vezes se trata de uma geometria complexa até para os padrões da AM, por isso normalmente o novo modelo otimizado passa por um reprojeto onde a peça é redesenhada para melhorar a possibilidade de manufatura da nova peça.
7. Realização de um novo estudo em FEA com as mesmas configurações e restrições do estudo anterior, de modo a simular o novo design em condições finais da peça.
8. Finalmente, o último estágio é a comparação entre os resultados em FEA quanto a tensão, deslocamento máximo e se atende o fator de segurança necessário.

Este trabalho propõe aumentar a confiabilidade do atual MSVOT através de duas etapas adicionais, como ilustrado com o texto destacado na Figura 11. Pretende-se fazer uma análise das diferenças entre o procedimento existente e o proposto.

Figura 11 - Proposta de novo procedimento para otimização topológica



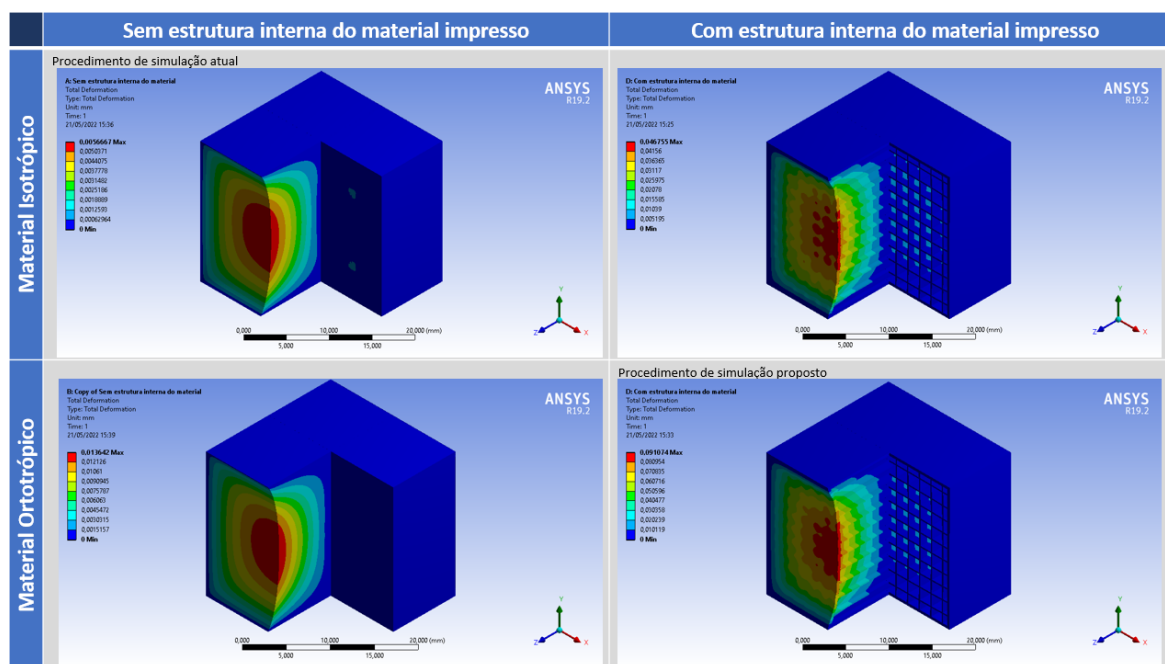
Fonte - Os Autores (2022)

Para a agregação dos passos propostos para o novo MSVOT, foi necessário separar a abordagem em dois passos diferentes. O primeiro é destinado à categorização do material ABS apresentando ortotropia característica de peças impressas, com o intuito de simular a existência dos parâmetros físicos da aderência entre camadas e da direção de impressão decorrente do parâmetro de impressão 3D de orientação da peça na mesa de impressão. O segundo destinado a introduzir as

geometrias decorrentes dos parâmetros de impressão de espessura de parede, padrão de preenchimento e porcentagem de preenchimento, também implicando na rotina iterativa de aplicações de análises usando coeficientes de segurança. Para a determinação da existência dessa diferença entre os procedimentos foram simulados testes a fim de notar a discrepância entre modelos utilizando características isotrópicas e outros ortotrópicas, com a existência ou não de estrutura interna decorrente da AM.

Essas diferenças ilustradas numa peça teste na Figura 12, já demonstram uma grande distinção entre os métodos, que apresentou dezesseis vezes mais deslocamento da peça sob as mesmas condições arbitrárias, sendo elas forças compressivas de 1000 N, nas faces de um cubo de arestas de 20 mm, na direção Z que é a mesma em que apresenta o eixo não simétrico da ortotropia, representando o eixo de aderência das camadas impressas. Já apoios fixos nas demais faces, apenas variando o material e estrutura interna. Esses testes foram utilizados como referência para propor o novo procedimento em sua totalidade.

Figura 12 - Quadro de resultados das simulações de teste quanto ao deslocamento total



Fonte - Os Autores (2022)

Considerando a nova proposta de procedimento pode-se descrever os passos em pré-processamento e análise, otimização topológica e pós-processamento. Os Métodos então foram examinados por seus resultados, mas também pelos passos intermediários

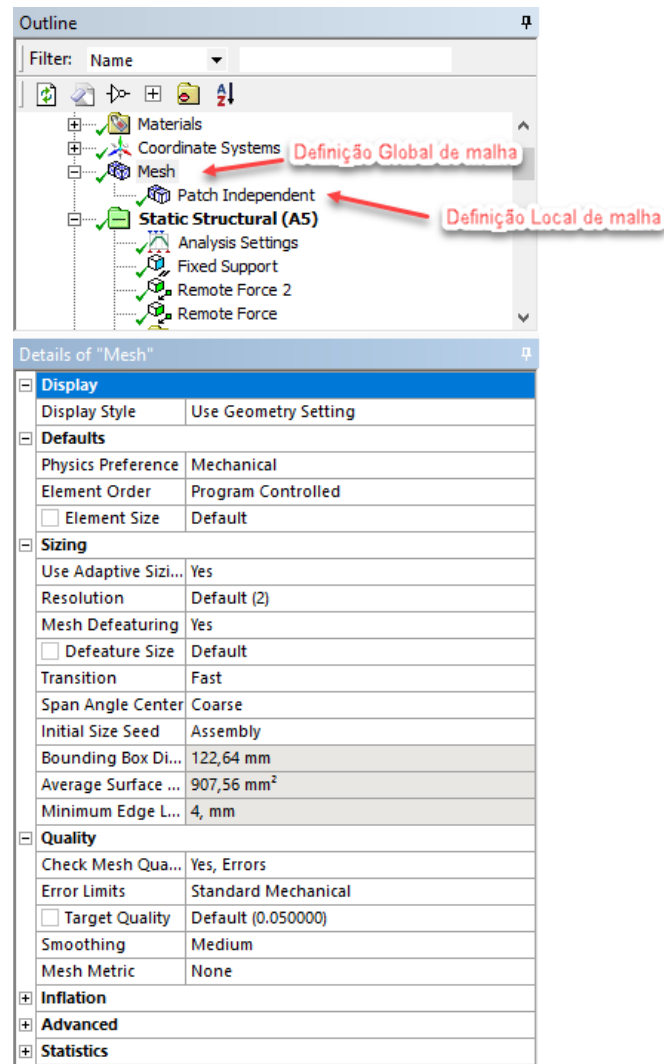
3.2 Pré-processamento e análise

Como relatado anteriormente, os passos iniciais do MSVOT consistem na definição de escopo e foco do trabalho, o procedimento deve ser estudado com a finalidade de gerar um processo útil, implementável e com resultados claros. Para isso, são analisados previamente as fontes de dados disponíveis para o estudo, como dados de materiais, dados de esforços, requerimentos, geometria e complexidade. Após a pré-análise, inicia-se o passo dois que consiste na definição do material de estudo atribuindo as principais características do material a ser estudado. Como o MSVOT atual usa a plataforma de dados de engenharia presentes no *software* de análise Ansys AIM 19.2, também deve-se ser usado nesse passo do MSVOT proposto. Esses dados normalmente são constantes típicas do material, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade, etc. Nos materiais anisotrópicos essas entradas de dados são conduzidas através da matriz constitutiva.

A construção do modelo de estudo pela importação do modelo CAD tanto da peça em estudo, quanto dos componentes que fazem parte da sua montagem precede o estudo FEA. Esse processo pode ser feito em qualquer peça ou conjunto que necessite passar pelo MSVOT. Também procura-se otimizar o processo de análises simplificando o modelo à fim de tornar o tempo de processamento menor, através da simplificação de contatos e fontes de tensão. Ainda na fase de pré-processamento são atribuídos aos modelos seus respectivos materiais.

O passo de pré-processamento também define o modo de utilização das definições dos valores e posições de montagem dos componentes, suas propriedades físicas de aplicação e requerimentos. Nesse passo são definidos os planos e métodos da análise, objetivos a serem atingidos e propriedades a serem observadas. Para a realização da malha (*mesh*) de todo o conjunto são atribuídos valores globais e locais, as definições globais demonstram características em comum que todos os componentes, já as definições locais são delimitados apenas a uma região, face ou componente como demonstrado na Figura 13.

Figura 13 - Parâmetros de malha indicados no Ansys



Fonte - Os Autores (2022)

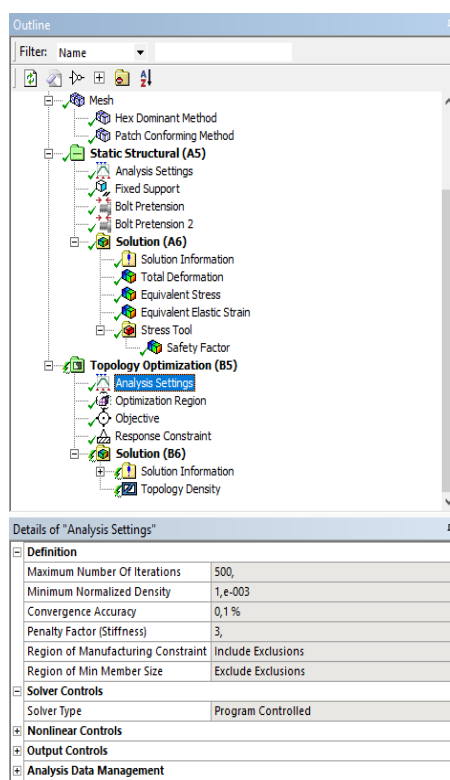
Para a fase de análise são entregues os resultados e dados, sendo então levados para os próximos passos. Estes resultados, quando se tratam de componentes mecânicos normalmente acompanham a tensão equivalente, a deslocamento total e o fator de segurança.

3.3 Otimização topológica e pós-processamento

Os resultados obtidos a partir das análises servem como fonte de dados para os passos de pós-processamento, ou seja, são utilizados como ponto de partida para a otimização topológica dedicada aos esforços apresentados no estágio das análises. Assim é possível analisar em que regiões a peça apresenta maior tensão e onde há material que não contribui para a resistência mecânica contra as forças aplicadas.

Para os passos subsequentes são definidos os parâmetros de otimização topológica, como o número máximo de iterações caso a otimização não atenda a convergência, o valor relativo de precisão de convergência, o algoritmo de iterações, as áreas possíveis de otimização, as áreas excluídas de otimização e por fim, o objetivo de convergência da otimização, sendo ela por volume, massa ou tensão equivalente máxima. Para a parametrização da análise de otimização são utilizados valores padrões para iterações e convergência como demonstrado na Figura 14. E as áreas de exclusão foram feitas a partir dos valores de conexões com os outros componentes, ou definida manualmente conforme necessário.

Figura 14 - Parâmetros de convergência de otimização indicados no Ansys



Fonte - Os Autores (2022)

O objetivo mais comumente aplicado na otimização topológica é o de minimizar a energia de deslocamento. Também são atribuídos objetivos secundários de redução de até 40% da massa, e limitação da tensão equivalente de von-Mises, pois este último foi usado no coeficiente de segurança para comparar o MSVOT atual com o proposto por este estudo.

Assim que a otimização topológica foi realizada e a nova geometria gerada, no estágio de pós-processamento, essa geometria servirá de ponto de início para o redesenho da peça, melhorando as características aparentes do dispositivo. Esse reprojeto pode ser realizado na própria plataforma do Ansys *Workbench*, pelo software *SpaceClaim*. Como o reprojeto muda as características físicas da peça otimizada, ele não foi realizado no caso de estudo, pois poderia interferir na comparação do MSVOT atual e do proposto e comprometer a análise. Geralmente num procedimento padrão essa última etapa é realizada e recomendada.

Para a realização da penúltima etapa do MSVOT proposto, a peça CAD tem a sua geometria interna alterada conforme os parâmetros físicos existentes na fabricação por impressão 3D, por meio da ferramenta 3D de casca e preenchimento em forma de padrão "*lattice*". Da mesma forma que a peça será impressa realmente, assim, a peça pode ser finalmente submetida a etapa final do MSVOT, onde é avaliada a nova geometria otimizada nas situações de carregamento e condições de contorno propostas no pré-processo. Assim, pode-se simular como a peça otimizada se comporta em suas condições reais de uso. Nesse momento, são analisadas as diferenças de massa, tempo de impressão 3D, tempo de processamento pelo Ansys, tensão e deslocamento máximos entre os modelos gerados por ambos procedimentos.

3.4 Categorização do material ABS ortotrópico gerado pela impressão 3D

Para categorização do material no software Ansys, focando no material ABS por se tratar do material de produção atual da peça, foi usado como referência um estudo com condições semelhantes, onde se obteve dados por ensaios em corpos de prova impressos por extrusão de material em ABS, de modo a gerar a matriz constituinte de rigidez do material considerando os efeitos ortotrópicos característicos da AM. O trabalho de Mamadapur (2007) se adéqua completamente à esses critérios, por isso seus dados servem de base para montar o modelo de material utilizado conforme a Equação 22.

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} 6,1125 & -2,3839 & -3,0911 & 0 & 0 & 0 \\ -2,3839 & 6,1125 & -3,0911 & 0 & 0 & 0 \\ -3,0911 & -3,0911 & 8,3542 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 15,5039 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 15,5039 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 14,7929 \end{bmatrix} * 10^{-10} Pa^{-1} (22)$$

Com base nos dados experimentais, é possível utilizar a matriz constituinte de materiais, encontrando as componentes constituintes: $E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}, G_{12}, G_{23}, G_{13}$. Sendo 1 e 2 as direções simétricas ortotrópicas.

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

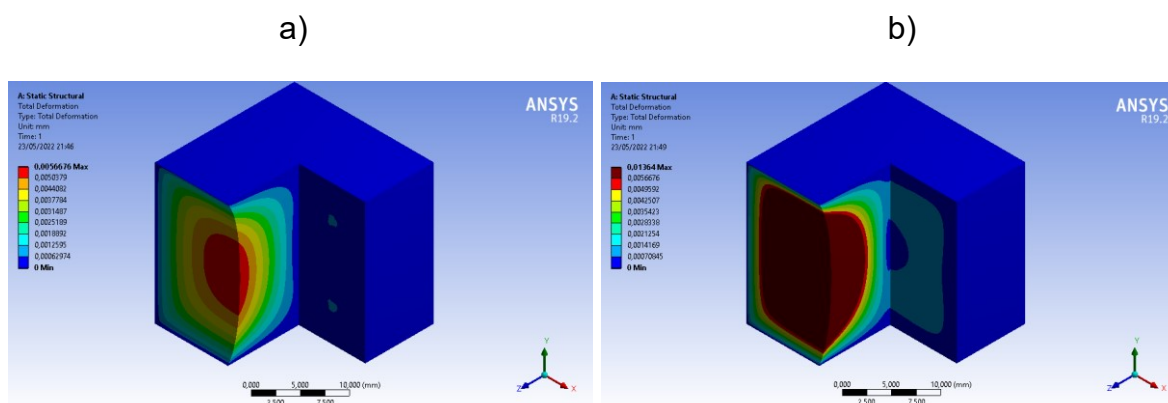
Sendo:

$$\begin{aligned} E_1 &= 1636 \text{ MPa} & \nu_{12} &= 0,39 & G_{12} &= 676 \text{ MPa} \\ E_2 &= 1636 \text{ MPa} & \nu_{23} &= 0,37 & G_{23} &= 645 \text{ MPa} \\ E_3 &= 1197 \text{ MPa} & \nu_{13} &= 0,37 & G_{13} &= 645 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Onde E_i é a módulo de elasticidade ou módulo de Young na direção “i”, ν_{ij} é o Coeficiente de Poisson das direções “i” e “j”, e G_{ij} é o módulo de cisalhamento ou de rigidez no plano “ij”.

Dessa forma, é possível fornecer dados suficientes para o *software* Ansys AIM e prosseguir com o processo de análise estrutural. A Figura 15 ilustra a diferença que as propriedades do material têm sobre a simulação. Na primeira imagem uma força compressiva é aplicada sobre um material isotrópico, enquanto na segunda, a mesma força é aplicada sobre um material ortotrópico, gerado pelo estudo de Mamadapur (2007), na direção em que suas propriedades mecânicas são menores, exemplificando a maior diferença entre a resistencia do material isotropico e do material ortotrópico.

Figura 15 - Estudo comparativo em FEA utilizando ABS isotrópico (a) e ABS ortotrópico (b) submetidos às mesmas condições.



Fonte: Os autores (2022)

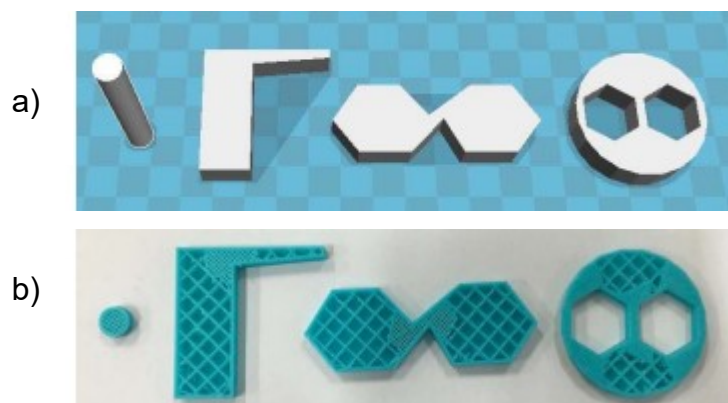
Segundo os dados experimentais de Mamadapur (2007), o limite de escoamento do ABS impresso em 3D atingido em média é de 14,0 MPa e, portanto, esse valor servirá de base para as análises dos modelos gerados por FEA.

3.5 Considerações dos parâmetros de impressão no modelo CAE

Para considerar as diferenças geométricas geradas por conta da impressão 3D no modelo, é necessário considerar os parâmetros de impressão que alteram a composição geométrica da peça após ser impressa.

Analisando a peça real após o processo de fabricação, pode-se notar que ela se difere do modelo CAD principalmente pela atribuição de parâmetros de impressão 3D. Esses parâmetros são fundamentais para a construção nesse método de fabricação, pois são responsáveis por transformar as superfícies do modelo 3D em rotas de impressão que serão interpretadas pelo equipamento. Como é possível constatar na Figura 16, modelo maciço do CAD se difere do impresso em 3D, seja por padrão de preenchimento, percentual de preenchimento, espessura de parede e das camadas superiores e inferiores. Esses parâmetros podem ser configurados de forma a atribuir o máximo de preenchimento e padrões específicos de modo a aproximar o modelo impresso do modelo CAD, mas isso não é aplicável na realidade, visto que a impressão 3D dificilmente produz peças maciças (PARPALA et al., 2021).

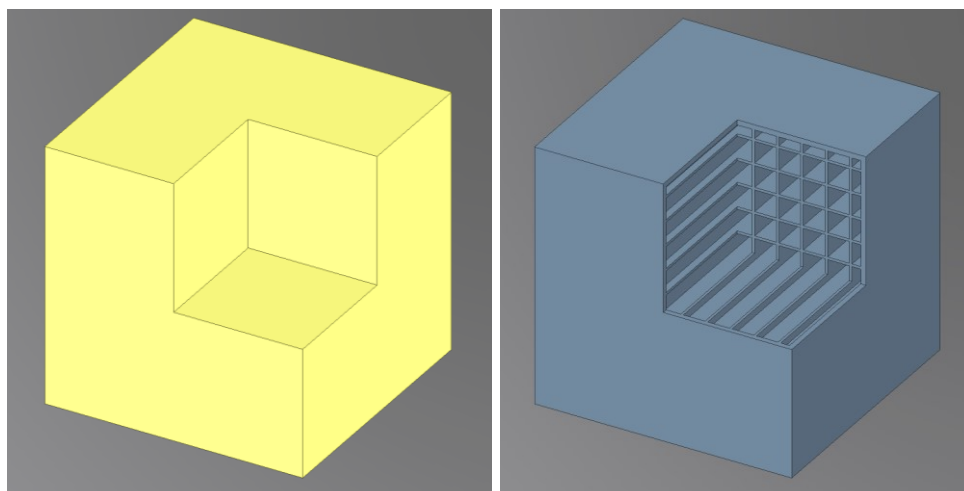
Figura 16 - (a) Geometria em CAD, (b) Geometria real impressa



Fonte: HU et al (2016)

Essas características são definidas pela etapa de preparação de impressão e levadas ao simulador, para mais exatidão da peça simulada da peça real, melhorando assim os resultados da otimização. Portanto, são atribuídas ferramentas de casca, representando o parâmetro de espessura de parede e o preenchimento por padrão linear, representando o parâmetro de padrão e percentual de preenchimento. Ambas as ferramentas são atribuídas por meio da modelagem geométrica do *software* SpaceClaim. Esse processo certamente reduziria as propriedades mecânicas das peças otimizadas, portanto, é necessária a atribuição de um processo iterativo considerando as resistências da peça otimizada topologicamente como ponto de partida. A aplicação dos parâmetros de impressão no CAD, como casca e preenchimento e pôr fim a análise FEA do novo componente utilizando os mesmos carregamentos e pontos de apoio do uso real da peça, como exemplificado pela Figura 17.

Figura 17 - Exemplificação dos parâmetros de impressão 3D atribuídos a uma peça exemplo.



Fonte: Os Autores (2022)

O resultado desse novo estudo de FEA é analisado considerando o fator de segurança escolhido e calculado por meio do critério de falha de Tsai-Wu. Caso o critério de falha apontar um fator de segurança menor do que o necessário, é realizada uma nova otimização topológica com diminuição do valor máximo de tensão, de forma a tornar a otimização topológica mais controlada. E na próxima iteração, menos material seria retirado do que da última objetivando um novo valor de tensão máxima. Desta forma, origina-se um novo modelo otimizado topologicamente, que deve passar pelos mesmos processos do anterior, sendo: aplicação de casca e padrão de preenchimento; análise estrutural; validação do fator de segurança. Se o fator de segurança não seja atingido, a peça iniciará um novo processo iterativo. Caso contrário, pode-se terminar o passo de aplicação da variação geométrica decorrente da impressão 3D.

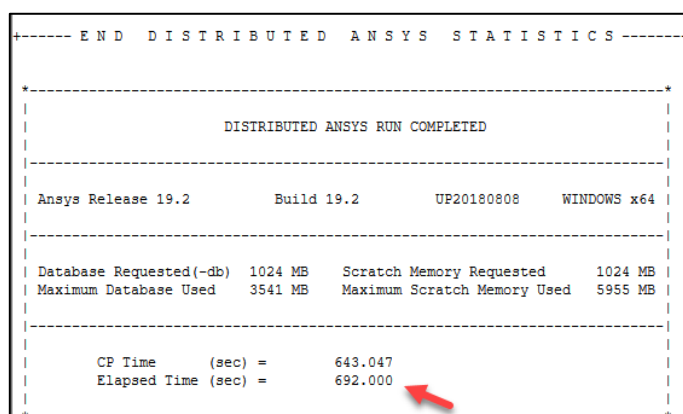
3.6 Análises de tempo de processamento

Para a comparação do tempo necessário para cada etapa da análise na plataforma Ansys AIM, deve-se examinar o tempo de processamento de FEA e da otimização topológica através de relatórios gerados automaticamente pelo *software*, como é possível observar na Figura 18. Esses dados são contabilizados incluindo o decorrer das etapas iterativas, somando a cada etapa realizada. Os tempos de redesenho e reestruturação do modelo CAD não foram contabilizados no estudo, pois podem mudar em virtude das características geométricas da peça e da habilidade de modelagem em CAD do projetista. Portanto, o tempo de processamento computacional será a soma dos tempos de geração de malha, análise de FEA e otimização topológica do procedimento atual e proposto.

Figura 18 - Relatório de resultado de solução no Ansys AIM, totalizando tempo

```

+----- END DISTRIBUTED ANSYS STATISTICS -----+
|
|-----+
|          DISTRIBUTED ANSYS RUN COMPLETED          |
|-----+
| Ansys Release 19.2      Build 19.2      UP20180808      WINDOWS x64 |
|-----+
| Database Requested(-db) 1024 MB  Scratch Memory Requested 1024 MB |
| Maximum Database Used   3541 MB  Maximum Scratch Memory Used 5955 MB |
|-----+
| CP Time      (sec) =      643.047 |
| Elapsed Time (sec) =      692.000 |
|-----+
  
```



Fonte: Os Autores (2022)

3.7 Caso de estudo

Atualmente apenas um veículo da Volvo do Brasil possui um componente que utiliza a AM como meio de produção, um caminhão da linha F com conversor de tensão para 12V destinado ao acoplamento de trailer. Um de seus componentes é o espaçador de engate de cabos elétricos, do qual foi denominado para o caso de estudo desse trabalho de “PN22”, visto na Figura 19.

Figura 19 - Aplicação real da peça PN22



Fonte – Os Autores (2022)

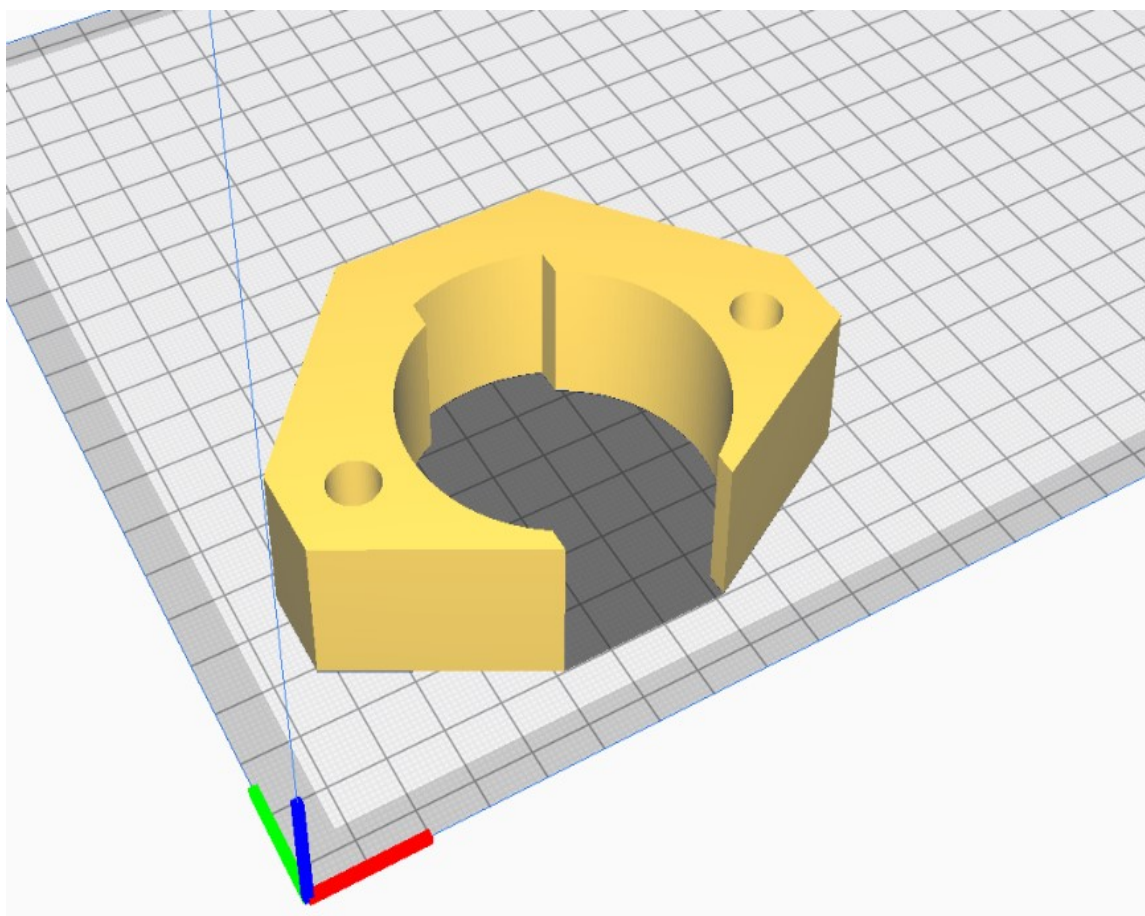
A introdução desta nova forma de fabricação para o componente foi realizada ao longo do ano 2018 e o projeto foi tido como sucesso, à medida que a peça foi implementada como parte do produto final. O procedimento utilizou a geometria original da peça apenas nacionalizando sua produção, e assim utilizando a tecnologia de AM como processo de fabricação. O projeto analisou seu consumo anual de produção, seus pré-requisitos mínimos para entregar o produto com qualidade, esforços e requerimentos mecânicos.

O modelo CAD da peça PN22 foi disponibilizado pela engenharia de manufatura responsável por *Customer Adaptation* da Volvo do Brasil, fornecido na plataforma *SpaceClaim*. Esse modelo serviu de ponto de partida para o estudo, sendo a

geometria mais importante para a etapa de FEA e otimização topológica, mas uma vez otimizada topologicamente perderá sua semelhança geométrica com a peça original.

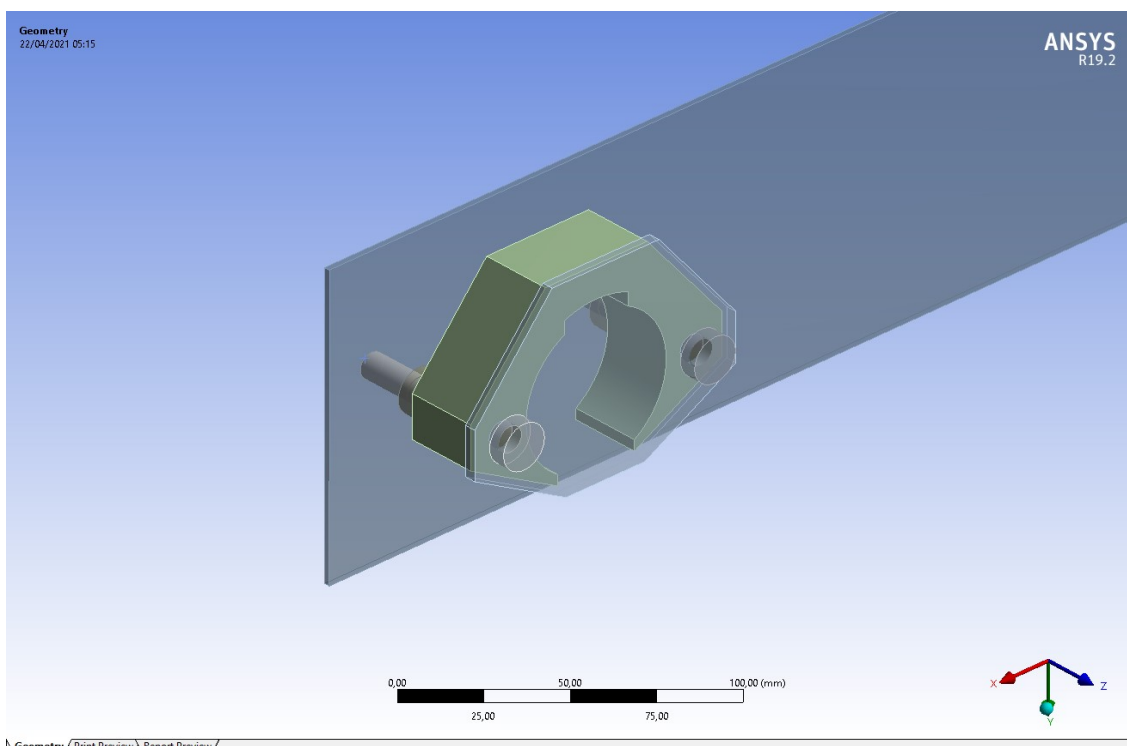
Como mencionado anteriormente, o processo de fabricação atual da peça PN22 é a AM por extrusão de material, por meio da impressora 3D “3D Cloner DH g3”. O material usado é o ABS *Premium* do fabricante 3DFila, nos parâmetros de 0,2 mm de altura de camada e preenchimento interno de 60%, orientada com a face maior no eixo Z, como demonstrado na Figura 20, para evitar o uso de suportes.

Figura 20 - Representação em CAD da peça PN22 do caminhão da linha F



Fonte - Os Autores (2022)

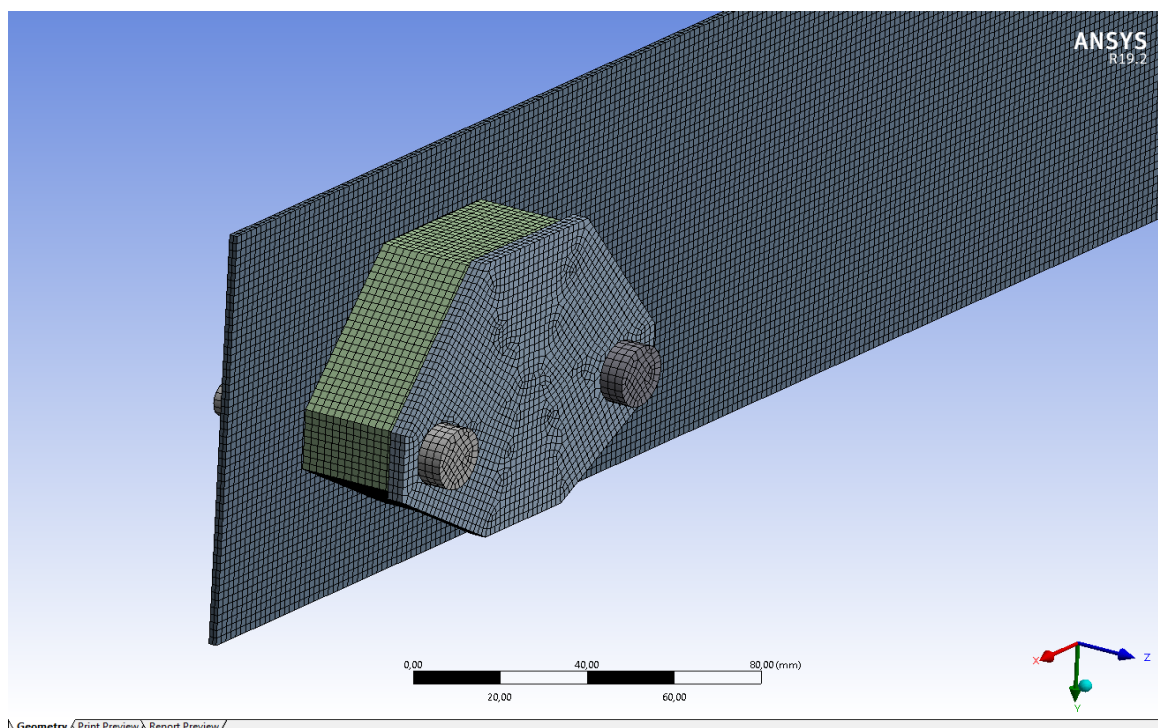
Para a análise do comportamento da peça por elementos finitos, é necessária a modelagem dos componentes adjacentes simulando sua montagem, e assim permitindo a avaliação dos impactos da montagem na aplicação real da peça PN22 na simulação. É possível ver na Figura 21 a versão simplificada da tampa do conector, parafusos e porcas de fixação e o modelo simplificado da chapa do chassi.

Figura 21 - Modelo CAD da montagem da PN22 para análise de elementos finitos

Fonte - Os Autores (2022)

Na etapa de geração da malha de elementos finitos são consideradas as necessidades específicas do modelo. Nesse caso, foi apenas realizada uma modificação local para duas malhas, dos dois parafusos de fixação que utilizaram o método de construção de malha “*Hex Dominant*” com categoria de face triangular e quadrada. Assim suas malhas podem ser geradas com maior precisão nesse tipo de perfil. Para os demais sólidos, foi utilizado o tipo de malha tetraédrica de tamanho máximo de elemento de malha de 0,4 mm e mínimo de 0,2 mm, apenas utilizando o método de malha tetraédrica “*Patch Independent*”, pois se enquadra melhor na proposta de que futuramente a peça será otimizada topologicamente e reavaliada com os parâmetros de impressão 3D. A montagem e a malha correspondente podem ser observadas na Figura 22.

Figura 22 - Malha da montagem



Fonte - Os Autores (2022)

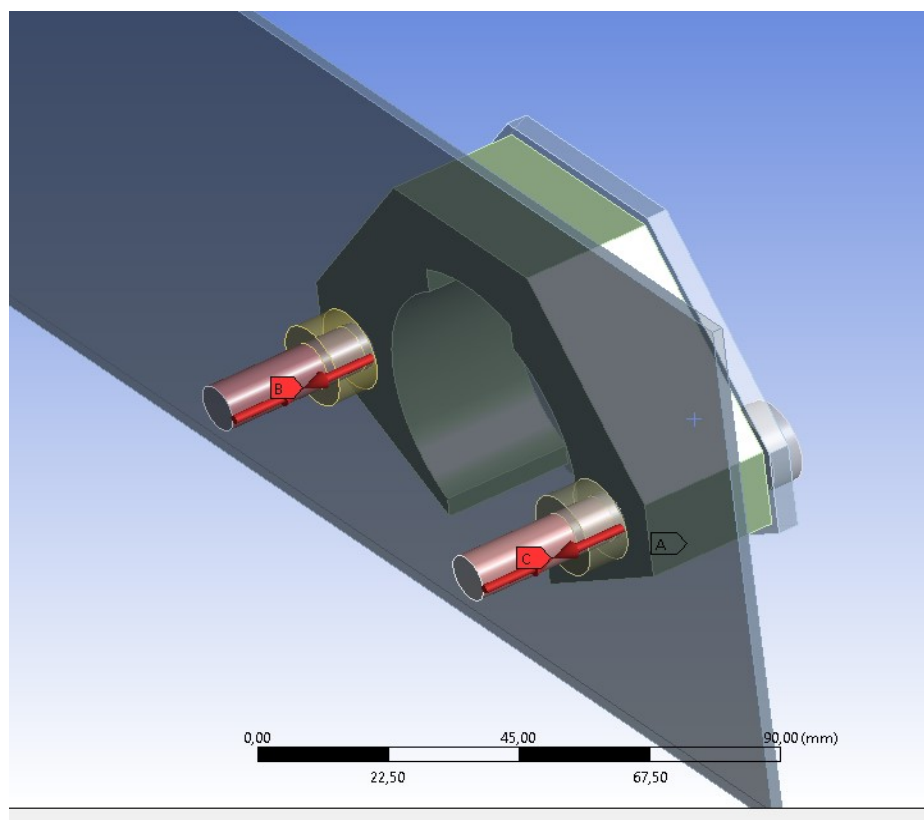
O próximo passo é a introdução das condições de contorno e dos carregamentos sobre a peça. Conforme o setor de *Customer Adaptation* da Volvo do Brasil, os parafusos empregados na fixação dessa peça exercem 2,4 Nm de torque máximo em cada parafuso. Cada parafuso foi representado pelo esforço “*Bolt Pretension*” que se enquadra perfeitamente na necessidade do conjunto. A entrada de valores no Ansys em forma de força é mais usual para a resolução do modelo, por esse motivo foi utilizada a Equação 24 relacionando do torque e pré carga. Assim, a carga de força máxima é de 1 333,33 N em “*Bolt Pretension*”. Já a superfície do chassi foi tida como suporte fixo, como pode ser visto na Figura 23, pois no componente real, nenhum deslocamento provém deste componente.

$$T = F(KD) \quad (24)$$

T = Torque (Nmm) / F = Força de pré carga (N)

K = Coeficiente de atrito / D = diâmetro máximo do parafuso (mm)

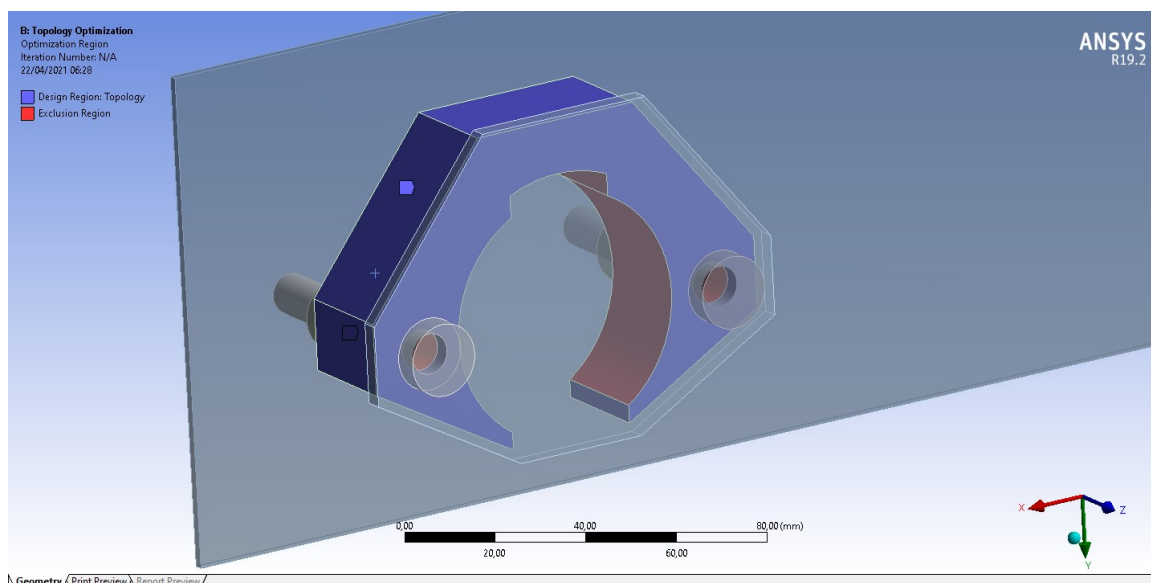
Figura 23 - Vetores de carregamento e fixação



Fonte - Os Autores (2022)

Para a determinação dos processos de otimização topológica, foram utilizados os dados vindos da análise preliminar. A Figura 24 , demonstra como foi tratada a região de exclusão, da qual não foi otimizada, pois, são áreas de contato com outros componentes, destacadas em vermelho. Já as regiões de otimização em azul são volumes livres para serem otimizados. Também foram definidos os parâmetros e objetivos da otimização topológica, como a restrição constitutiva de possuir um mínimo de 25% da massa original, apenas como ponto inicial, ou seja, a peça não pode sofrer uma redução de massa maior do que 75%. Esta decisão decorreu do fato de ser uma redução extrapolada necessária para a peça. Também realizada a restrição constitutiva de limite de tensão máxima de 41,4 MPa, que normalmente é aplicado no procedimento atual do MSVOT, considerando um material isotrópico, que segue a biblioteca de engenharia do *software* Ansys. O último ponto é a restrição de fabricação que limita a espessura mínima para 1,6 mm, ou dois perímetros da casca impressa, pois elementos menores do que isso não poderiam ser fabricados pelos parâmetros de impressão atuais da peça.

Figura 24 - Ilustração das áreas de exclusão e de otimização



Fonte - Os Autores (2022)

Como atualmente a peça PN22 é produzida por impressão 3D, não existe limitação geométrica imposta por métodos tradicionais de fabricação. E por sua forma ainda não ser otimizada, existe potencial de redução de peso e tempo de fabricação. Dessa forma, pode-se aplicar o procedimento MSVOT considerando seus parâmetros de fabricação utilizados na produção da PN22, conforme a Tabela 2.

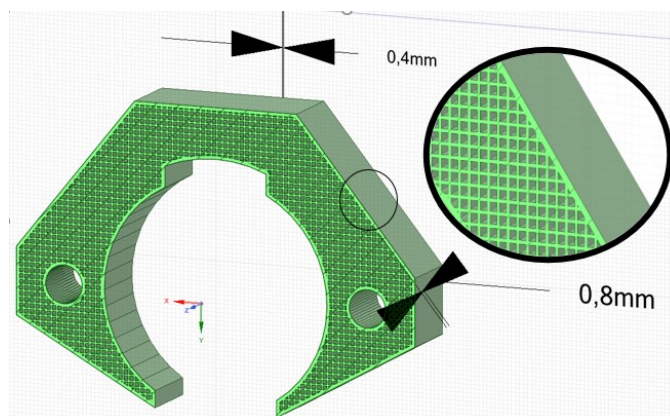
Tabela 1 - Configurações de impressão

Parâmetro	Valor
Template de máquina	3D Cloner DH g3
Altura de camada (<i>Layer height</i>)	0,20 mm
Espessura da casca 3D (<i>Wall thickness</i>)	2 perímetros (0,80 mm)
Espessura de teto e base (<i>Top & Botton thickness</i>)	2 perímetros (0,80 mm)
Preenchimento (<i>Infill</i>)	50%
Tipo de preenchimento	Raster
Espessura do preenchimento	0,40 mm
Inclinação em relação a mesa de impressão	90°

Fonte: Os Autores (2022)

Gerou-se assim, o modelo 3D similar ao retirado do processo de fabricação. Como pode ser constatado na Figura 25, onde a espessura da casca 3D e preenchimento em Raster são ilustrados pela vista em detalhe da seção da peça.

Figura 25 - Exemplificação dos parâmetros de impressão na PN22



Fonte - Os Autores (2022)

3.8 Pré-processamento e análise do estudo de caso

O estudo da otimização topológica da peça PN22 teve início com a definição dos dois materiais utilizados na comparação dos dois procedimentos de simulação virtual. O primeiro sendo o material atual, apresentado na biblioteca do *software* ANSYS como *ABS Plastic*, que possui características isotrópicas como descreve a Figura 26. O segundo sendo o material proposto pelo estudo de categorização do material ABS impresso por extrusão de material, descrito na subseção 3.3. Considerando o material ortotrópico ABS impresso em 3D, também descrito pela Figura 26.

Figura 26 - Comparação da entrada de informações de materiais no software ANSYS

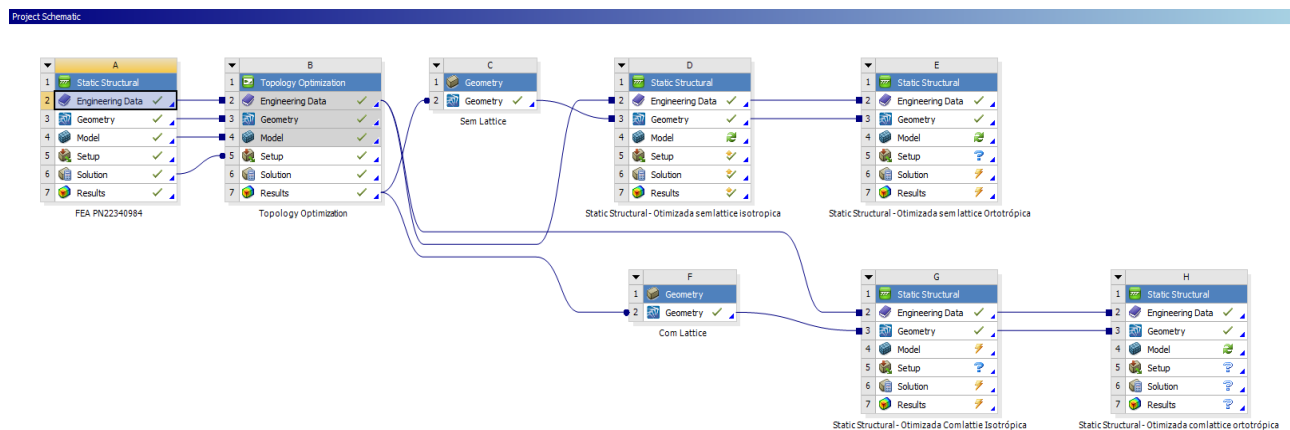
Properties of Outline Row 3: ABS plastic			
A	B	C	D E
Property	Value	Unit	
Density	1040	kg m ⁻³	
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
Coefficient of Thermal Expansion	9,54E-05	C ⁻¹	
Isotropic Elasticity			
Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
Young's Modulus	2,39E+09	Pa	
Poisson's Ratio	0,399		
Bulk Modulus	3,9439E+09	Pa	
Shear Modulus	8,5418E+08	Pa	
Tensile Yield Strength	4,1E+07	Pa	
Tensile Ultimate Strength	4,43E+07	Pa	

Properties of Outline Row 3: ABS Ortotropico			
A	B	C	D E
Property	Value	Unit	
Material Field Variables	Table		
Density	1040	kg m ⁻³	
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
Coefficient of Thermal Expansion	9,54E-05	C ⁻¹	
Orthotropic Elasticity			
Young's Modulus X direction	1,636E+09	Pa	
Young's Modulus Y direction	1,636E+09	Pa	
Young's Modulus Z direction	1,197E+09	Pa	
Poisson's Ratio XY	0,39		
Poisson's Ratio YZ	0,37		
Poisson's Ratio XZ	0,37		
Shear Modulus XY	6,76E+08	Pa	
Shear Modulus YZ	6,54E+08	Pa	
Shear Modulus XZ	6,54E+08	Pa	
Tensile Yield Strength	1,28E+07	Pa	
Tensile Ultimate Strength	1,4E+07	Pa	

Fonte: Os Autores (2022)

A fim de exemplificar o uso e o procedimento utilizado, foi descrito na plataforma ANSYS Workbench um fluxo demonstrando o uso da análise estrutural mecânica para as análises de elementos finitos, otimização topológica e aplicação das mudanças de geometria e por fim suas análises finais. Esse fluxo pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 - Fluxo de operações ANSYS Workbench



Fonte: Os Autores (2022)

Sendo o passo “A” a primeira análise estrutural que gera dados para a otimização topológica. Nelas são colocados os dados de uso da peça PN22 e realizada a análise preliminar de elementos finitos, que serviu como base para o passo “B”, onde ocorreu a otimização topológica. No passo “C” o modelo gerado pela otimização topológica passa por um tratamento de superfície e malha, ajustando o número de faces, o modelo não teve alteração geométrica, apenas de complexidade da superfície. No caso do item “F” além das simplificações de faces, também é aplicado os parâmetros de impressão 3D, alterando o volume interno da peça. Nos passos “D” e “G” é aplicado um novo estudo de validação do novo design para o material isotrópico padrão, apenas por caráter comparativo, considerando o que essas diferenças impactam no resultado. No passo “E” é atribuído o mesmo estudo para os materiais ortotrópico, novamente apenas usado como comparação entre procedimentos. Finalmente, no passo “H” é realizada a última análise estrutural utilizando a nova geometria.

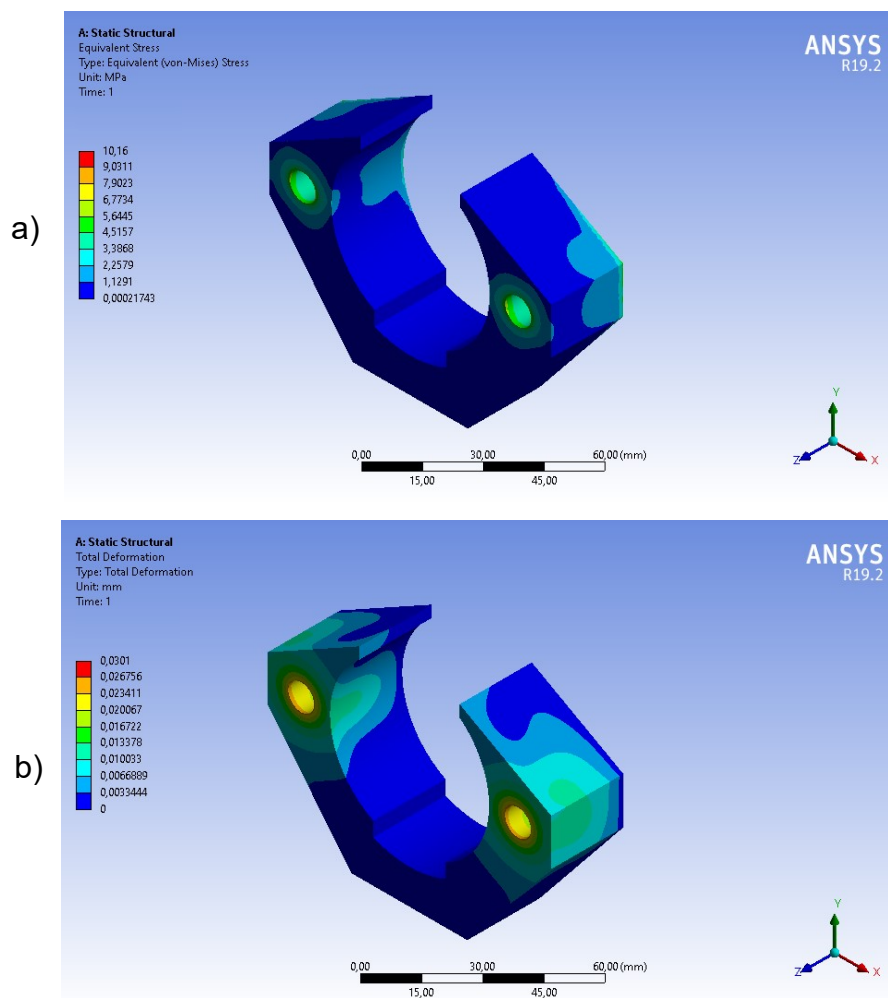
Após o fim das etapas de simulação, as peças resultantes do MSVOT atual e do MSVOT proposto devem ser impressas conforme os parâmetros da Tabela 2 com filamento de material ABS. Ambos componentes são montados no local em que a PN22 é fixada no caminhão, entre o chassi e o engate do conector de cabos elétricos. Os dois parafusos de fixação são fixados utilizando uma parafusadeira eletrônica com controle de torque, com o mesmo torque que é utilizado na PN22 em veículos de produção. Finalmente, após a montagem de ambas peças realiza-se uma inspeção visual para determinar a existência de falhas para comparar o desempenho de cada peça e conseqüentemente seu respectivo procedimento de otimização.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Otimização Topológica e pós processamento do estudo de caso

Para a análise de cada etapa do MSVOT atual e do proposto por este trabalho, foi definido um ponto inicial de otimização topológica comparativa, com base nos valores de tensões equivalentes de von-Mises de cada peça ao longo dos dois procedimentos. Inicialmente, na Figura 28, é possível observar o modelo inicial da PN22 sendo submetido ao estudo de elementos finitos nas condições reais da peça, foram notados o deslocamento total e tensão equivalente de von-Mises, das quais respectivamente, $N = 3,01 * 10^{-2} mm$ e $\sigma = 10,16 MPa$.

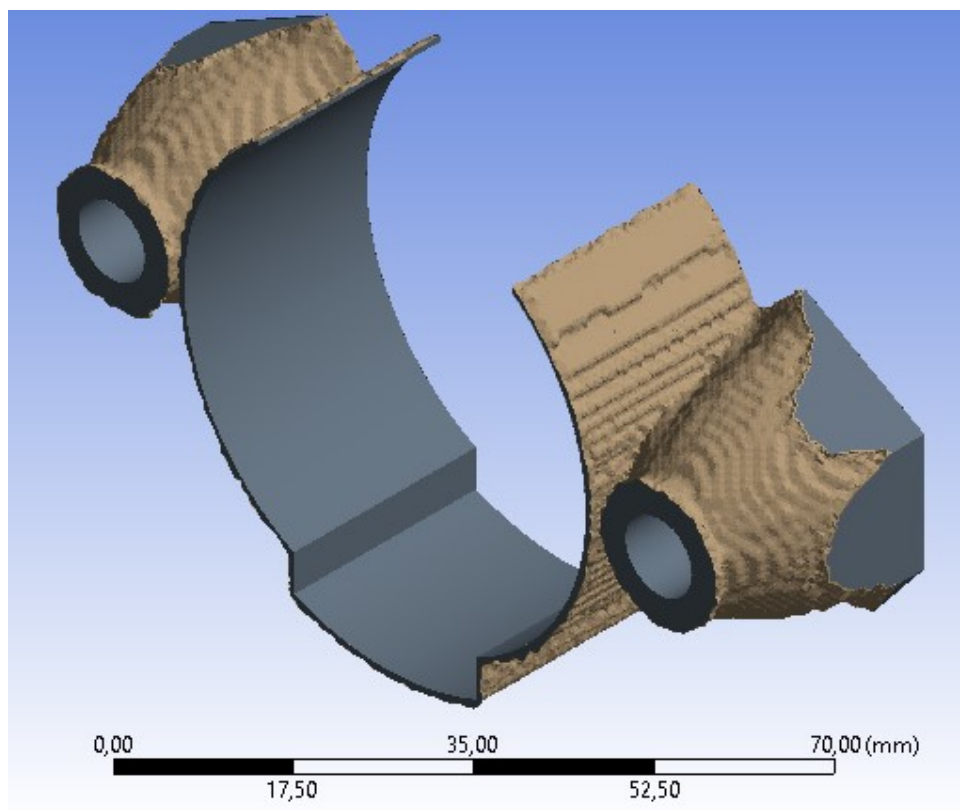
Figura 28 – Resultados iniciais da análise de elementos finitos na PN22 de tensão a), e deslocamento b).



Fonte: Os autores (2022)

Após os resultados obtidos, foi gerado o modelo otimizado topologicamente apresentado na Figura 29, esse modelo apresenta uma redução de massa de 70,52% do modelo original.

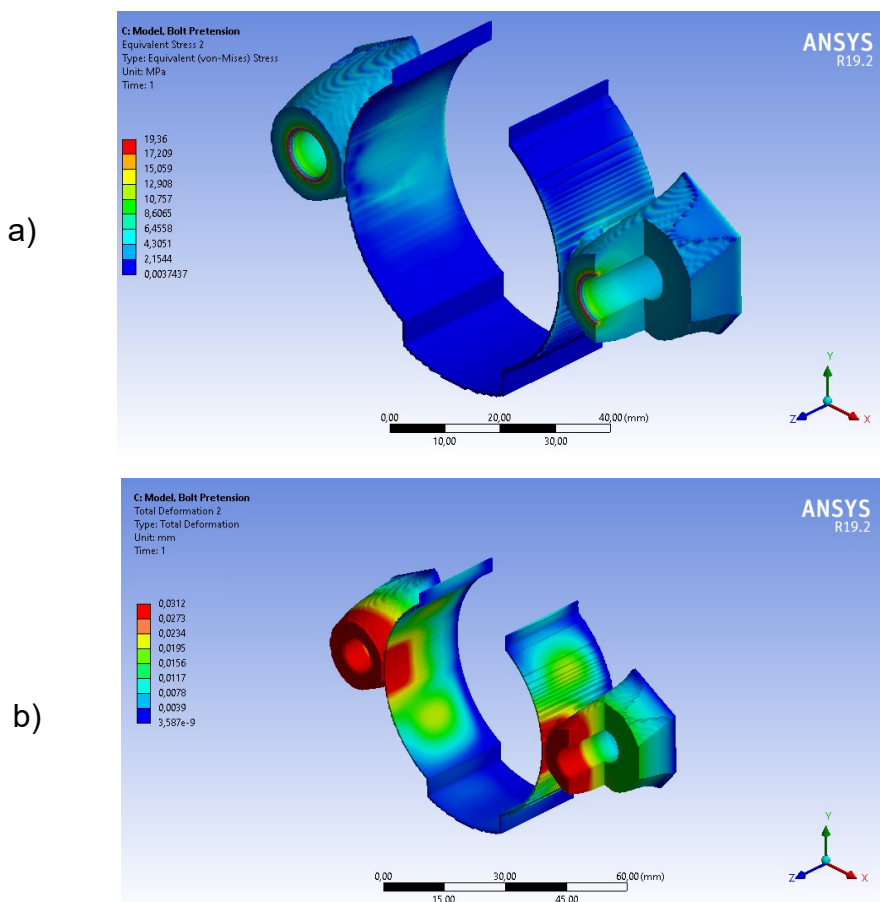
Figura 29 - Peça inicialmente otimizada pelo processo atual de MSVOT



Fonte: Os Autores (2022)

Esse novo modelo foi analisado nos mesmos requerimentos da peça original, permitindo analisar a efetividade da otimização topológica, como exemplificado pela Figura 30. Essa nova geometria apresentou deslocamento total de $N = 3,12 * 10^{-2} mm$ e tensão equivalente de von-Mises de $\sigma = 19,36 MPa$. O resultado demonstra que a peça sofreu uma tensão maior devido a nova geometria. Essa etapa sinaliza o fim do procedimento de MSVOT atual, onde foi realizado o primeiro ensaio, otimização topológica e validação da peça otimizada. Esse processo levou um total de 1 hora e 30 minutos para sua conclusão, servindo assim como base de comparação para os demais procedimentos.

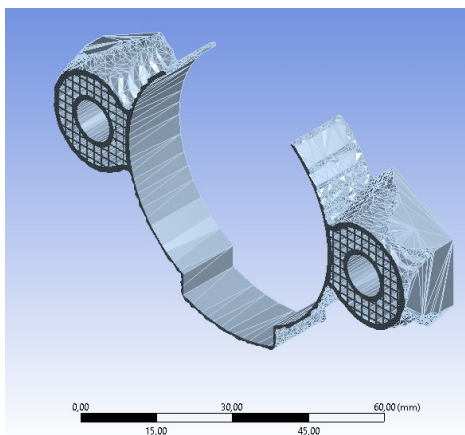
Figura 30 - Resultado de tensão (a) e deslocamento (b) do novo modelo otimizado topologicamente pelo MSVOT atual



Fonte: Os Autores (2022)

O resultado da etapa que correspondeu a aplicação dos efeitos da geometria referente ao processo de impressão 3D, alterando o modelo CAD, pode ser observado pela seção transversal da peça ilustrada pela Figura 31.

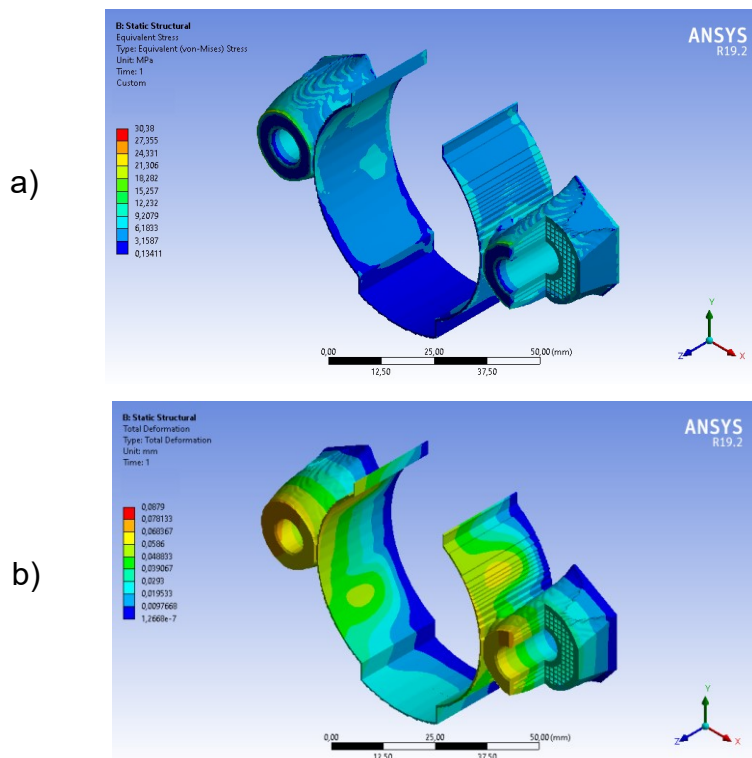
Figura 31 - Vista em corte do modelo CAD da PN22 otimizada pelo MSVOT atual após a aplicação da mudança de geometria decorrente da impressão 3D



Fonte: Os Autores (2022)

A partir dessa nova geometria, foi realizada a análise estrutural de elementos finitos como é demonstrado pela vista em corte na Figura 32.

Figura 32 - Vista em corte da análise FEA de tensão (a) e deslocamento (b) da PN22 utilizando a mudança de geometria



Fonte: Os Autores (2022)

Este último estudo foi realizado utilizando tanto o material isotrópico quanto ortotrópico, apenas para fim de comparação, pois no processo real do MSVOT proposto, não há necessidade de realizar análises isotrópicas. Ao fim dessa etapa a Tabela 3 foi preenchida com os deslocamentos e tensões equivalentes de cada estudo de FEA. Sendo o *lattice* a geometria interna gerada pela impressão 3D.

Tabela 2 - Resultados das análises de elementos finitos das diferentes propostas da peça PN22.

Estudo	Deslocamento (mm)	Tensão equivalente (MPa)	Redução da massa
Não otimizada isotrópico sem <i>lattice</i>	3,01E-02	10,16	0%
Otimizado isotrópico sem <i>lattice</i> (MSVOT atual)	3,12E-02	19,36	70,52%
Otimizado isotrópico com <i>lattice</i>	5,07E-02	26,36	70,52%
Otimizado ortotrópico com <i>lattice</i> (MSVOT proposto)	8,79E-02	30,38	70,52%
$\left(\frac{MSVOT\ proposto}{MSVOT\ atual} \right)$	282%	157%	

Fonte: Os autores (2022)

A primeira rotina do procedimento de MSVOT proposto levou um total de 11 horas e 20 minutos para sua conclusão. Se o critério de falha fosse atendido, esse seria o valor total do novo procedimento. Essa primeira rotina já conclui um procedimento 7,5 vezes mais demorado e mais custoso em processamento e de manipulação de modelos CAD.

Com o resultado obtido pelo método proposto, utilizando as propriedades ortotrópicas do material ABS e as diferenças presentes na geometria produzida por impressão 3D, é aplicado o método iterativo de adequação com o critério de falha de Tsai-Wu. Na Equação 26, é possível encontrar o limite de tensão possível para a peça.

$$E_1 = 1636 \text{ MPa}; \quad E_3 = 1197 \text{ MPa}; \quad \nu_{13} = 0,37; \quad G_{13} = 645 \text{ MPa}; \quad X_T = 14,0 \text{ MPa}; \\ X_C = -1,40 \text{ MPa}; \quad Y_T = 11,4 \text{ MPa}; \quad Y_C = -1,14 \text{ MPa}; \quad s = 3,6 \text{ MPa}; \quad \sigma_1 = 0; \quad \tau_{12} = 0; \\ \sigma_2 = 1,029 \text{ MPa}.$$

Sendo:

$$A = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 - F_{11}\sigma_1\sigma_2 = 0,021633$$

$$B = F_1\sigma_1 + F_1\sigma_1 = 0$$

$$C = -1$$

$$FS = \frac{\pm\sqrt{B^2-4ac}-B}{2A} = 10,703 \quad (25)$$

Assim, a tensão necessária para assegurar um coeficiente de segurança igual a 1, seria de 11,4MPa, assim se assemelhando ao procedimento atual que utiliza apenas a tensão limite de escoamento de 41,4MPa como valor a atingir, também utilizando o coeficiente de segurança igual a 1. Portanto, podemos utilizar a seguinte tensão como objetivo.

$$\sigma_{FS} = \sigma_2 * FS = 11,4 \text{ MPa} \quad (26)$$

4.2 Resultado do MSVOT proposto

Por meio do critério de falha de Tsai-Wu, foi possível demonstrar a necessidade de um limite de tensão máxima de 11,4 MPa, pois se trata de uma força compressiva na direção ortogonal ao plano ortotrópico. Dessa forma foi preenchida a Tabela 4, demonstrando os valores obtidos a partir da simulação de diversas etapas de otimização topológica até a convergencia do método.

Tabela 3 - Resultados obtidos pela simulação das diferentes versões da PN22 em elementos finitos

Estudo nº 01 – Redução de massa de 70,52%	Deslocamento (mm)	Tensão equivalente (MPa)
Não otimizado isotrópico sem <i>lattice</i>	3,01E-02	10,16
Otimizado isotrópico sem <i>lattice</i> (MSVOT atual)	3,12E-02	19,36
Otimizado isotrópico com <i>lattice</i>	5,07E-02	26,36
Otimizado ortotrópico com <i>lattice</i> (MSVOT proposto)	8,79E-02	30,38
Estudo nº 02 – Redução de massa de 47,12%	Deslocamento (mm)	Tensão equivalente (MPa)
Não otimizado isotrópico sem <i>lattice</i>	3,01E-02	10,16
Otimizado isotrópico sem <i>lattice</i> (MSVOT atual)	2,77E-02	11,68
Otimizado isotrópico com <i>lattice</i>	5,01E-02	17,33
Otimizado ortotrópico com <i>lattice</i> (MSVOT proposto)	6,01E-02	21,21
Estudo nº 03 – Redução de massa de 37,37%	Deslocamento (mm)	Tensão equivalente (MPa)
Não otimizado isotrópico sem <i>lattice</i>	3,01E-02	10,16
Otimizado isotrópico sem <i>lattice</i> (MSVOT atual)	3,12E-02	10,99
Otimizado isotrópico com <i>lattice</i>	4,88E-02	11,85
Otimizado ortotrópico com <i>lattice</i> (MSVOT proposto)	5,06E-02	12,50
Estudo nº 04 – Redução de massa de 28,10%	Deslocamento (mm)	Tensão equivalente (MPa)
Não otimizado isotrópico sem <i>lattice</i>	3,01E-02	10,16
Otimizado isotrópico sem <i>lattice</i> (MSVOT atual)	3,00E-02	10,90
Otimizado isotrópico com <i>lattice</i>	3,98E-02	10,90
Otimizado ortotrópico com <i>lattice</i> (MSVOT proposto)	4,02E-02	11,01

Fonte: Os autores (2022)

Notou-se que o estudo de número 4 atendeu o parâmetro do fator de segurança pré-definido na Equação 26. A Figura 33 ilustra as geometrias geradas pelas rotinas iterativas da peça PN22. Finalizando o método iterativo foi realizado o último passo do procedimento MSVOT proposto, comparando os modelos 3D, suas propriedades mecânicas e propriedades de fabricação.

Figura 33 - Resultados das rotinas iterativas



Fonte: Os Autores (2022)

Os modelos CAD otimizados resultantes dos dois procedimentos são comparados através do *software* Ultimaker Cura, aplicando assim os parâmetros de impressão 3D descritos na Tabela 2, durante a metodologia, assim é possível receber um valor de tempo de impressão e massa total da peça, foi utilizado o tempo de processamento expressos nos relatórios de solução do *software* Ansys a cada etapa de geração de malha, de análise e de otimização. A Tabela 5 demonstra um comparativo das peças iniciais e finais de ambos os procedimentos, o MSVOT atual e o proposto por este estudo. Com as rotinas do MSVOT proposto, decorreram 19 horas e 18 minutos, em tempo de processamento e desenvolvimento de todas as rotinas iterativas conjuntas para sua conclusão. Todos esses valores foram utilizados na comparação entre procedimentos da Tabela 5. Para os dados de tensão e deslocamento máximo, foi utilizado o material ortotrópico e a geometria interna de impressão 3D na peça não otimizada e na resultante do MSVOT atual durante o estudo FEA, permitindo uma comparação adequada com a peça que passou pelo MSVOT proposto.

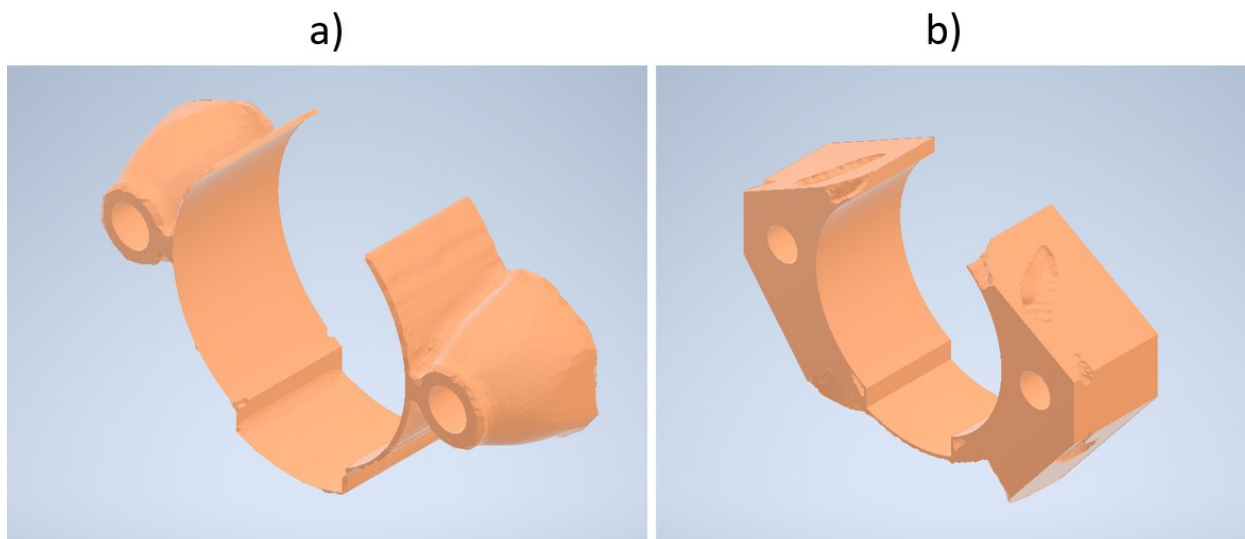
Tabela 4 - Resultados produtivos entre diferentes procedimentos de simulação virtual da PN22

	Não otimizada	MSVOT Atual	MSVOT Proposto
Tempo de impressão	3,25h	1,03h	3,12h
Massa da peça	45g	29g	39g
Tempo de processamento	0h	1,5h	19,3h
Tensão máxima	10,16 MPa	30,38 MPa	11,01 MPa
Deslocamento máximo	3,01E-02 mm	8,79E-02 mm	4,02E-02 mm

Fonte: Os Autores (2022)

Após a comparação, pode-se notar as diferenças geométricas finais entre os dois procedimentos. Na Figura 34 a e b ilustram a geometria resultante do MSVOT atual e a do MSVOT proposto respectivamente, que podem ser fabricadas e comparadas em testes físicos.

Figura 34 - Peças resultantes do MSVOT atual (redução de 70% de massa) a), e MSVOT proposto (redução de 28% de massa) b)

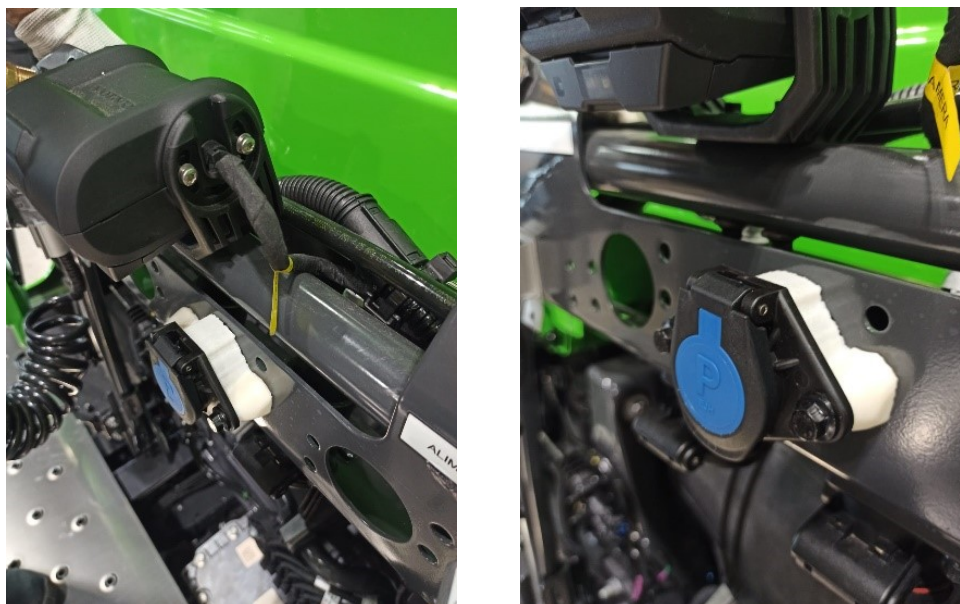


Fonte: Os Autores (2022)

Para os testes práticos foram utilizados os mesmos componentes da peça original PN22. Os componentes foram testados inicialmente como montagem apenas para apurar que a geometria não gerou nenhum conflito, como é possível observar na Figura 35 e 36.

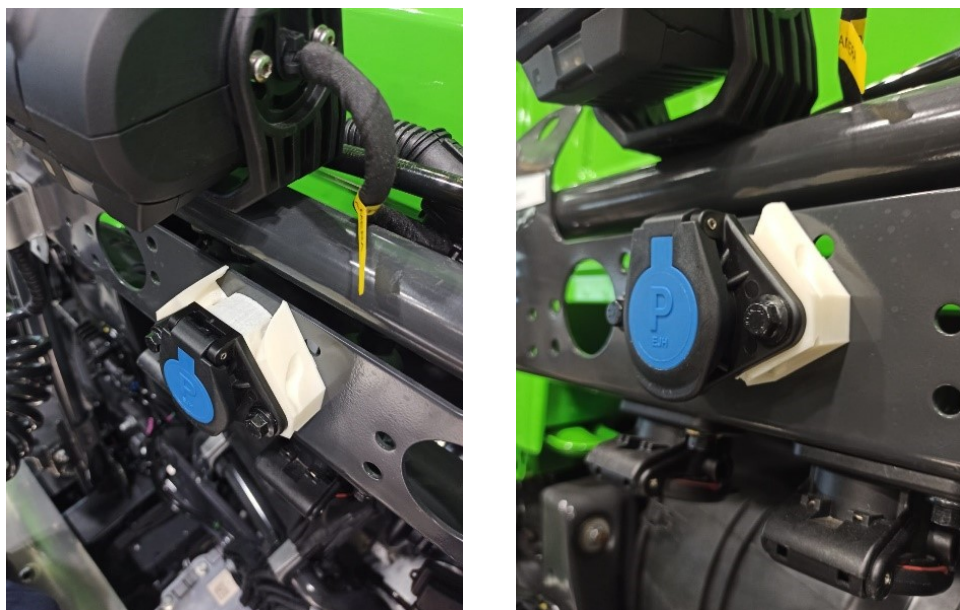
Outro ponto levantado na etapa dos testes práticos, foi a preocupação dos responsáveis da área em razão da geometria final da peça. Como não foi realizado nenhum redesenho após otimização, ambas as peças tiveram certas ressalvas que devem ser atendidas antes da utilização do modelo como peça produtiva do caminhão. A existência de paredes muito finas, fragilidade aparente em algumas regiões e a falta de simetria que dificulta a orientação correta na hora da montagem.

Figura 35 - Peça otimizada pelo MSVOT atual em montagem no caminhão



Fonte: Os Autores (2022)

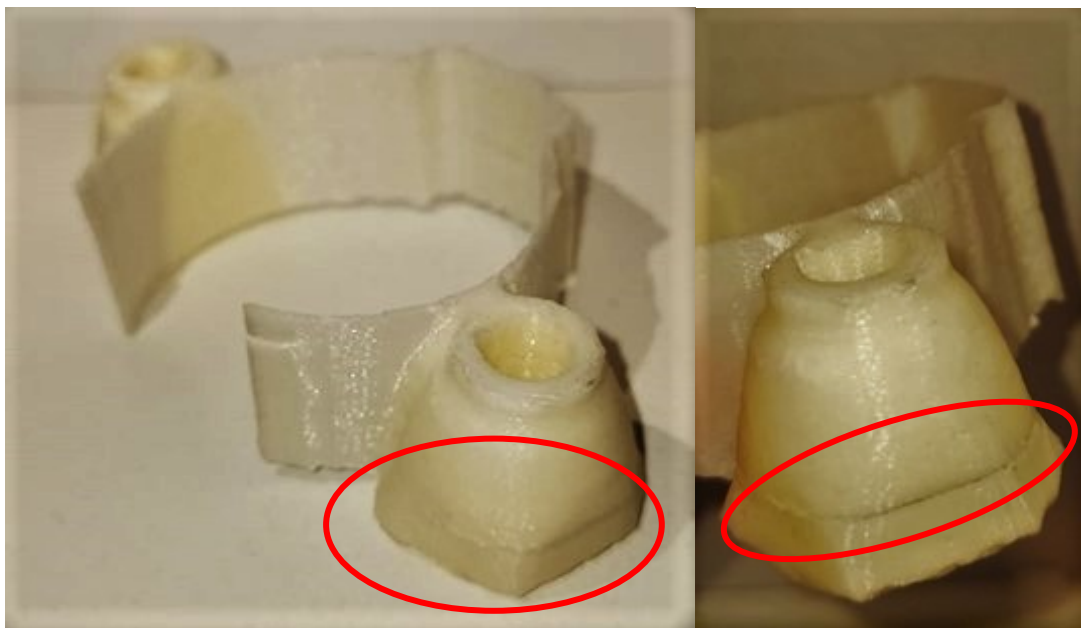
Figura 36 - Peça otimizada pelo MSVOT proposto em montagem no caminhão



Fonte: Os Autores (2022)

Ao realizar as montagens com o torque definido, apenas a peça otimizada pelo MSVOT proposto suportou os esforços sem falhar. Após análise foi possível observar que a peça otimizada pelo MSVOT atual apresentou um início de fratura, demonstrado por fissuras aparentes na lateral da peça, como mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Foto em detalhe da fratura da peça otimizada pelo MSVOT atual



Fonte: Os Autores (2022)

Conclui-se que a peça otimizada pelo MSVOT atual não seria suficiente para suportar o uso final como peça do caminhão. O que não é observado na peça otimizada pelo novo procedimento em estudo, assim, se provando mais seguro e confiável nesse caso de estudo. Também é possível dizer que com ambos os procedimentos de otimização, apenas o MSVOT proposto pelo trabalho foi suficiente para gerar um componente que atenda os requisitos de aplicação da peça final.

5 CONCLUSÕES

A partir das simulações geradas neste trabalho, foi possível demonstrar através dos testes práticos com o caso de estudo que o MSVOT atual gerou uma peça de baixa confiabilidade. O que demonstra que a utilização desse procedimento pode resultar em peças que não atendam às condições de uso finais do componente. Já a peça fabricada pelo procedimento proposto por esse trabalho, apresentou uma peça mais confiável com potencial para ser aplicada em condições reais.

Adicionalmente, foi observado que com a adição de geometria interna característica do preenchimento de uma peça impressa em 3D, foi possível alcançar uma maior proximidade com a peça real fabricada. Em contrapartida, a complexidade da malha provou ser excessiva e resultou no aumento significativo do tempo de simulação FEA pelo *software* Ansys. Tempo que pode ser ainda maior por conta de dois fatores, a quantidade de iterações necessárias para alcançar um modelo aceitável e a complexidade geométrica da peça.

Finalmente, foi concluído que o MSVOT proposto se mostrou muito complexo e demorado, porém retornou uma peça com mais confiabilidade que o MSVOT atual. Entretanto, se for possível otimizar a etapa de aplicação da geometria do material impresso de forma a diminuir seu tempo de simulação, se deduz que o estudo pode se aproximar ainda mais da situação real.

Para trabalhos futuros, é sugerido que se encontre uma forma de diminuir o tempo de simulação FEA considerando a geometria dos parâmetros de impressão, talvez pela simplificação do modelo 3D ou otimização do *software* de simulação. Outra possibilidade que poderia ser explorada é a simplificação para modelos de meios porosos. Também é recomendado realizar os próprios ensaios para obter um modelo de material mais aproximado ao seu caso específico. E por fim, a análise dos impactos do reprojeto durante os processo iterativos do novo MSVOT, para um fluxo mais completo e coerente com a realidade.

6. REFERÊNCIAS

- ANSYS. *Inc. Ansys Structural Analysis Guide*. Canonsburg: SAS IP, Inc, 2004.
- ANSYS, *Inc. ANSYS Theory Reference*. Canonsburg: SAS IP, Inc, 1999.
- ASTM International. *ASTM F2792 - 12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2012.
- AZEVEDO, F. M. **Estudos e projetos de melhoria em máquina de impressão 3D**. Universidade de São Paulo, 2013.
- BELLINI, A. e GÜÇERI, S. **Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling**. *Rapid Prototyping Journal*. 162, 2003, Vol. 9, 4.
- BROWN, D. **3D prototypes and models**. *3dprototypesandmo*. 2020. Disponível em: <http://3dprototypesandmo-dels.com.au/3d-printing-terminology-specifications>. Acesso em 10 nov. 2021.
- BUFFONI, S. **Crítérios de Falha**. 2017. Rio de Janeiro : UFF - Universidade Federal Fluminense.
- CARVALHO, J. de. **Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D**. VOLPATO, Neri. (Org.). *Manufatura aditiva: Tecnologia e Aplicações da Impressão 3D*. São Paulo: Blucher. 2017. cap. 1.
- CASAVOLA, C.; CAZZATO, A.; MORAMARCO, V., PAPALETTERE, C. **Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory**. 2016. Vol. 90.
- CHRISTENSEN, P. e KLARBRING, A. **An Introduction to Structural Optimization**. Linköping : Springer, 2009 . 1. ed., p. 1-3.
- COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E.; WITT, R. J. 1988. **Concepts and applications of Finite Element Analysis**. s.l. : Wiley, 1988. 3. Ed. p. 1-5.
- CUNICO, M. W. M. **Impressoras 3D: O novo meio Produtivo**. 2015. Curitiba : Concep3D Pesquisas Científicas Ltda, 2015. ISBN 10: 8567043107.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica Guanabara Dois**. RJ : s.n., 1981. 2. ed. p. 282-90, p. 62-4, p. 319.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. e STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. *Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York, NY : Springer, 2015.
- GRAND VIEW RESEARCH. **3D Printing Market Size**. San Francisco : GRAND VIEW RESEARCH, 2021.

GROSS, B. C.; ERKAL, J. L.; LOCKWOOD, Y. S.; SPENCE, D. M.; CHEN, C. **Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology**. *analytical chemistry*. 2014, pp. 3240-3253.

HARRIS, T. **Topology Optimization in Ansys 18.1 - Motorcycle Component Example**. Ansys. Disponível em: <https://www.Ansys.com/blog/topology-optimization-motorcycle>. Acessado em 23 nov. de 2021.

Hu, Y.; Dai, M.; Zhang, J.; Zhang, Z. **An algorithm of filling the mutational structure for FDM prototyping**. 2016, *23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*. pp. 1-4, 2016, doi: 10.1109/M2VIP.2016.7827326.

IBGE. **Pesquisa Industrial Anual - Produto: PIA Produto**. Governo Federal, 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-produto/quadros/brasil/2018>. Acessado em: 11 out. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary**. ISO/TC 261: ISO Org. , 2021.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. Ann Arbor : Edwards Brothers, 1999. 2nd ed.

LI, S.; YUAN, S.; ZHU, J; WANG, C.; LI, J.; ZHANG. W. **Additive manufacturing-driven design optimization: Building direction and structural topology**. 2020, Vol. Volume 36, 101406.

LOPEZ, R. H. e MIGUEL, L. F. F. 2013. **Introdução à otimização estrutural**. Universidade de Santa Catarina. 2013.

MAMADAPUR, M. S. **CONSTITUTIVE MODELING OF FUSED DEPOSITION MODELING (ABS)**. s.l. : Visvesvaraya Technological University, 2007.

MENDES, C. R.; SIEMON, F. B. e CAMPOS, M. M. **Estudos de caso da Indústria 4.0 aplicados em uma empresa automobilística**. *POSGERE*. ISSN 2526-4982, 2017, Vol. 1, 4.

MORISHITA, G. S. de L. **Otimização topológica de mecanismo de quatro barras**. UTFPR, 2015.

MUÑOZ, J. S. Q. **Engineering Optimization Showcase**. s.l. : THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND, 2017.

PARPALA, R.; POPESCU, D. e PUPAZA, C. **Infill parameters influence over the natural frequencies of ABS specimens obtained by extrusion-based 3D printing**. *Rapid Prototyping Journal*. 2021, 2021, Vol. 27, 6.

PORTAL DA INDÚSTRIA. 2018. **Portal da Indústria - composição setorial**. Governo Federal, 2018. Disponível em: <https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br>. Acessado em: 12 set. 2021.

RIZZOTTO, G. V. D. A. **Análise estrutural e otimização topológica de munhões de eixo traseiro tracionado para colheitadeiras.** UTFPR, 2019.

ROYLANCE, D. **Finite Element Analysis.** 2001.

SHAFFER, Steven; YANG, K.; VARGAS, J.; PRIMA, M. A. D., VOIT, W. **On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation.** *Polymer.* 55, 2014.

SOUZA, G. P.; TITA, V., SANTOS, N. C.; CARVALHO, J. . **Metodologia para aplicação de critérios de falhas em materiais compósitos laminados utilizando o método dos elementos finitos .** Natal : CBECIMAT, 2002.

STRATASYS. **Five Ways 3D Printing Is Transforming the Automotive Industry.** techdirections. 2018.

VOLPATO, N. **Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D.** VOLPATO, Neri. (Org.). *Manufatura aditiva: Tecnologia e Aplicações da Impressão 3D.* São Paulo: Blucher, 2017. cap 7.

VOLVO. **News & Media - 3D printing the future for lighter engines.** *Volvo Group.* Volvo, 05 de Março de 2018. Disponível em: <https://www.volvogroup.com/en/news-and-media/news/2018/mar/3d-printing-the-future-for-lighter-engines.html>. Acessado em: 17 abr. 2021.

WIKA, G., GRABOWIK, C., KALINOWSKI, K., OCIEPKA, P. **The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts.** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 277, 2017, Vol. 012033.