

***OTIMIZAÇÃO DE SUPORTES NA PRODUÇÃO  
DE COMPONENTES METÁLICOS POR  
PROCESSOS ADITIVOS***

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Ricardo da Silva Simões Lopes

Leiria, Setembro de 2019

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



***OTIMIZAÇÃO DE SUPORTES NA PRODUÇÃO  
DE COMPONENTES METÁLICOS POR  
PROCESSOS ADITIVOS***

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Ricardo da Silva Simões Lopes

Trabalho de Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco e coorientação do Professor Doutor Rui Miguel Barreiros Rúben.

Leiria, *Setembro* de 2019

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

*"Enquanto houver vontade de lutar haverá esperança de vencer."*

***Santo Agostinho***

*"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes."*

***Citado por Isaac Newton***

*"Querer é Poder"*

***Lema do Instituto Militar Pupilos do Exército***

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimentos

*“Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.” Antoine de Saint-Exupéry*

Este Projeto não seria possível de realizar sem a ajuda e colaboração de muita gente que diretamente ou indiretamente me ajudou a crescer e a desenvolver os dons, as aptidões, o conhecimento, e o saber. Sou grato à vida, essencialmente por me pôr pessoas tão importantes e especiais no meu caminho...

Não poderei deixar de agradecer e referir a Entidades/pessoas que muito contribuíram para a realização deste Projeto, tais como:

Aos Professores Doutor Joel Vasco e Doutor Rui Ruben pela orientação, disponibilidade, apoio e partilha de conhecimentos ao longo deste percurso e vida Académica.

À Sara Faustino, mulher da minha vida, este trabalho é tanto meu como teu...Porque me acompanhaste sem desistires de mim ou desanimares por nós... Por estares sempre presente em todos os momentos... Pelo nosso futuro, pelo nosso projeto de vida, e pelo dom da vida que nos espera, esta vitória é nossa.

A toda a nossa família, porque a nossa regra de ouro é para cumprir: *“a família vem sempre em primeiro lugar”*. Sou grato por tudo... Pelo amor, respeito, dedicação, preocupação, e por todo o apoio.

Aos meus colegas de Mestrado, pelo companheirismo, entreaajuda, cooperação e partilha de vivências pessoais e profissionais.

Aos meus amigos, pela amizade, e motivação que me deram porque às vezes é preciso pouco para fazer muito. Pedro Pinto, os gestos ficam para sempre guardados no coração...

Um agradecimento especial ao Ricardo Ramos e à Joana Gaspar pela amizade, pelo apoio, compreensão, paciência, por partilharem o vosso conhecimento, por serem excelentes colegas e profissionais com brio, conhecimento e generosidade, mas principalmente por serem excelentes pessoas. Obrigado por me inspirarem todos os dias.

À Distrim Sistemas, na pessoa do Eng<sup>o</sup> João Medeiros pelo apoio, motivação, disponibilidade e ajuda na realização deste Projeto final de curso.

# Resumo

A Impressão 3D está a revolucionar a Fabricação Aditiva na conceção e desenvolvimento de produtos em inúmeras Indústrias. Para se acompanhar neste crescimento são necessários *softwares* de CAD (Projeto assistido por computador) para modelar o produto em estudo e *softwares* de análise de elementos finitos (FEA) para analisar, simular e otimizar todo o processo de impressão 3D.

No presente projeto, o objetivo será de otimizar os suportes na produção de componentes metálicos por processos aditivos, nomeadamente na tecnologia *SLM*.

O objetivo é reduzir custos nos suportes e obter peças corretas na primeira tentativa com a melhor qualidade possível (calcular a sua deformação, tensões residuais, etc.), minimizar o material desperdiçado (com a otimização da sua geometria e dos seus suportes).

Os resultados mostram que das duas peças que se analisou, a primeira peça apenas é necessário mudar a posição de impressão para diminuir o número de suportes mas a segunda peça analisada, já é preciso fazer a otimização dos suportes a partir do *software Simufact Additive*.

Na produção aditiva, o material de suporte gerado para suportar a construção tem elevada importância no tempo e custo do processo. Neste contexto, torna-se cada vez mais evidente que é necessário entender o comportamento mecânico desta estrutura de modo a tornar o processo mais rápido e com menores custos sem comprometer a resistência das peças produzidas por este.

**Palavras-chave:** *Fabricação Aditiva, SLM, Simulação, Otimização, análise; SolidEdge, Simufact Additive;*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Abstract

3D Printing is revolutionizing Additive Manufacturing in product design and development across industries. To keep up with this growth, computer-aided design (CAD) software is required to model, study products and finite element analysis (FEA) software to analyze, simulate and optimize the entire 3D printing process. In the present project, the main purpose will be the need to optimize the production supports of metal components for additive processes, including *SLM* technology. To the realization of a case study, a first phase will be used or *SolidEdge* software to do a two topological part analysis and a second phase will be used the Finite Element Analysis Simulation (FEA) Fabrication Additive and thus the creator and developers of chemical equipment to use the products in 3D printing. The goal is to reduce supports costs by finding the right parts at the first attempt with the best possible quality (calculate their deformation, residential stresses, etc.), by reducing material waste (by optimizing their geometry and their sports). The results use or *Simufact Additive* software show the two pieces that analyze, the first piece is only needed to change the print position to decrease the number of sports, but the second piece analyzed, it is already necessary to optimize the sports from the manufacturing additive.

**Keywords:** *Additive Manufacturing, SLM, Simulation, Optimization, analysis; SolidEdge, Simufact Additive;*

# Índice

Agradecimentos .....	VII
Resumo .....	VIII
Abstract .....	X
Lista de Figuras .....	XIII
Lista de Tabelas .....	XVI
Lista de Siglas .....	XVIII
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Estado Da Arte.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Processos Aditivos.....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Características dos Processos Aditivos.....	7
2.1.2. Prototipagem Rápida .....	8
2.1.3. Parâmetros inerentes ao processo de Prototipagem Rápida .....	11
2.1.4. Ferramentas CAD/CAM/CAE.....	13
<b>2.2. Tecnologia de Processos Aditivos.....</b>	<b>14</b>
2.2.1. SLS – Sinterização seletiva em laser .....	15
2.2.2. DMLS – Sinterização a laser direta em metal .....	16
2.2.3. EBM – Fusão por feixe e elétrons .....	17
2.2.4. SLA – Estereolitografia .....	17
2.2.5. LOM – Fabricação de objetos laminados .....	17
2.2.6. LENS – Deposição direta de Energia .....	18
2.2.7. SLM – Fusão seletiva por laser .....	18
<b>3. Softwares .....</b>	<b>20</b>
<b>4. Caso De Estudo .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1. Análise Topológica.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2. Análise da Prototipagem .....</b>	<b>29</b>
<b>5. Procedimento Experimental .....</b>	<b>39</b>
<b>6. Resultados .....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusões.....</b>	<b>77</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>80</b>

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Diagrama com comparação em Processos Convencionais Vs Processos Aditivos [19] .....	6
Figura 2.2 - Exemplo de uma Impressora 3D [20] .....	7
Figura 2.3 - Descrição de Processos Aditivos [42] .....	8
Figura 2.2.1 - Processos com material de pó metálico [22] .....	15
Figura 2.2.2 - Impressora 3D na tecnologia SLS; [24, 25].....	16
Figura 2.2.3 - Impressora 3D na tecnologia DMLS [26, 27] .....	16
Figura 2.2.4 - Impressora 3D na tecnologia EBM [28].....	17
Figura 2.2.5 - Impressora 3D na tecnologia SLA [31] .....	17
Figura 2.2.6 - Impressora 3D na tecnologia LOM [29].....	18
Figura 2.2.7 - Impressora 3D na tecnologia LENS [30].....	18
Figura 2.2.8 - Impressora 3D na tecnologia SLM [32] .....	19
Figura 3.1 - Menu gráfico do Processo no software Simufact Additive .....	22
Figura 4.1 - Análise da Orientação e Forças em toda a Peça 1 no Software SolidEdge; ....	26
Figura 4.2 - Análise redução a 80% da Peça 1 e resultado final no Software SolidEdge; ..	27
Figura 4.3 - Análise da Orientação e Forças em toda a Peça 2 no Software SolidEdge; ....	27
Figura 4.4 - Análise com Redução a 80% da Peça 2 no Software SolidEdge.....	28
Figura 4.5 - Máquina 500 HL Quad Laser no Software Simufact Additive; [37].....	30
Figura 4.6 - Propriedades do Processo no Software Simufact Additive .....	31
Figura 4.7 – Propriedades dos suportes no Software Simufact Additive; .....	32
Figura 4.8 - Peça 1 no Software SolidEdge e posteriormente no Software Simufact Additive; .....	33
Figura 4.9 - Informação da geometria da Peça 1 no software Simufact Additive.....	33
Figura 4.10 - Malha da peça 1 a 0°, no software Simufact Additive;.....	34
Figura 4.11 - Malha e Suportes da peça 1 a 180°, no software Simufact Additive; .....	35
Figura 4.12 - Peça 2 no Software SolidEdge e posteriormente no Software Simufact Additive; .....	35
Figura 4.13 - Informação da geometria da Peça 2, no software Simufact Additive.....	36
Figura 4.14 - Malha da Peça 2 a 90°, no software Simufact Additive.....	36
Figura 4.15 - Suportes da Peça 2 original a 0°, no Software Simufact Additive;.....	37
Figura 5.1 - Estudo da Peça 1 no software Solid Edge.....	41

Figura 5.2 - Estudo e análises de Redução a 80% da Peça 1 no software Solid Edge; .....	41
Figura 5.3 - Propriedades da Peça 2 no software Solid Edge.....	42
Figura 5.4 - Análises de Redução a 80% da Peça 2 no software Solid Edge;.....	42
Figura 5.5 - Informação da geometria da Peça 1, no software Simufact Additive.....	43
Figura 5.6 - Propriedades e informações da Peça 2 no software Simufact Additive; .....	43
Figura 5.7 - Suportes da Peça 2 a 90° deitado, no software Simufact Additive;.....	44
Figura 5.8 - Peça 2 a 90° no software Simufact Additive; .....	47
Figura 5.9 - Resultados e Propriedades da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive; ...	48
Figura 5.10 - Peça 2 original a 0° no Software Simufact Additive; .....	49
Figura 6.1 - Peça a 0° com os Suportes, no software Simufact Additive;.....	51
Figura 6.2 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 1ª iteração da Peça a 0°, no software Simufact Additive;.....	52
Figura 6.3 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 2ª iteração da Peça a 0°, no software Simufact Additive;.....	53
Figura 6.4 - Resultados de distorção e compensação e a Geometria da Peça a 0°, no software Simufact Additive;.....	54
Figura 6.5 - Desvio da Peça a 0° na 1ª iteração, no software Simufact Additive;.....	54
Figura 6.6 - Desvio da Peça a 0° na 2ª iteração, no software Simufact Additive .....	55
Figura 6.7 - Peça 1 a 180° com os suportes, no software Simufact Additive;.....	55
Figura 6.8 - Peça 1 a 180° com os Suportes, no software Simufact Additive; .....	56
Figura 6.9 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 1ª iteração da Peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;.....	57
Figura 6.10 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 2ª iteração da Peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;.....	58
Figura 6.11 - Resultados de distorção e compensação da Peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;.....	59
Figura 6.12 - Desvio de Superfície [mm] na 1ª iteração e 2ª iteração da Peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;.....	60
Figura 6.13 - Peça 2 a 0° no software Simufact Additive; .....	61
Figura 6.14 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 1ª iteração da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;.....	63
Figura 6.15 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 2ª iteração da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;.....	64

Figura 6.16 - Resultados de distorção e compensação da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;.....	65
Figura 6.17 - Geometria da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;.....	66
Figura 6.18 - Desvio de superfície [mm] da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;..	66
Figura 6.19 - Otimização dos suportes da Peça 2 a 0° no software Simufact Additive; .....	67
Figura 6.20 - Peça 2 a 90° no software Simufact Additive; .....	68
Figura 6.21 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 1ª iteração da Peça 2 a 90°, no software Simufact Additive;.....	70
Figura 6.22 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 2ª iteração da Peça 2 a 90°, no software Simufact Additive;.....	71
Figura 6.23 - Resultados de distorção e compensação da Peça 2 a 90° e da sua geometria, no software Simufact Additive;.....	72
Figura 6.24 - Desvio de Superfície [mm] na 1ª iteração e 2ª iteração da Peça 2 a 90°, no software Simufact Additive;.....	73

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Processos aditivos que processam metais [19].....	4
Tabela 2.2 - Tabela de classificações das Tecnologias de Fabricação aditiva (b) [9, 20, 21]9	
Tabela 2.3 - Etapas da Prototipagem Rápida [9] .....	10
Tabela 4.1 - Propriedades da Peça 1 no Software SolidEdge.....	26
Tabela 4.2 - Propriedades Físicas da Peça 2 no Software SolidEdge .....	28
Tabela 4.3 - Propriedades da Máquina no Software Simufact Additive .....	30
Tabela 4.4 - Características do Material – Propriedades Mecânicas no Software Simufact Additive .....	32
Tabela 5.1 - Análises da Peça 1 e Peça 2 no Software Solid Edge .....	40
Tabela 6.1 - Propriedades gerais da Peça 1 e Peça 2 no Software Solid Edge.....	50

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de Siglas

ABS – *acrylonitrile butadiene styrene (Acrilonitrila butadieno estireno)*  
AM – *Additive Manufacturing (Fabricação Aditiva)*  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
CAD – *Computer aided Design (Projeto Assistido por Computador)*  
CAE – *Computer Aided Engineering – Engenharia Assistida por Computador*  
CAM – *Computer-aided Manufacturing (Projeto Assistida por Computador)*  
CNC – *Computer Numeric Control (Controlo Numérico Computorizado)*  
DED – *Direct Energy Deposition (Deposição Direta de Energia)*  
DLP – *Processamento Digital de Luz*  
DMD – *Direct Metal Deposition (Deposição Directa de Metal)*  
DMLS – *Direct Metal Laser Sintering (Sinterização a Laser Directa em Metal)*  
DOE – *Design of experiments*  
EBM – *Electron Beem Melting (Fusão por Feixe e Electrões)*  
EUA – *Estados Unidos da América*  
FDM – *Fused Deposition Modeling (Deposição de Material Fundido)*  
FEA – *Finite Element Analysis (Análise de Elementos Finitos)*  
FGMC – *Materiais Funcionalmente Classificados*  
LAM – *Laser Additive Manufacturing*  
LENS – *Laser Engineered Net Shaping (Modelagem de Rede Projetada por Laser)*  
LMD – *Laser Metal Deposition (Deposição de Metal a Laser)*  
LOM – *Laminated Object Manufacturing*  
LSF – *Laser Solid Forming (Formação Sólida a Laser)*  
MEF – *Método de Elementos Finitos*  
MJM – *Multi-Jet-Modeling Systems*  
MSC – *MacNeal-Schwendler Corporation*  
NASA – *National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço)*  
NX – *Unigraphics NX*  
PLA – *Polylactic acid (ácido poliláctico)*  
PLM – *Product Lifecycle Management*  
PR – *Prototipagem Rápida*  
RGB – *Red, Green, Blue*  
RP – *Rapid Prototyping*  
RT – *Rapid Tooling*  
SDL – *Selective Deposition Lamination (Deposição Selectiva de Laminados)*  
SLA – *Stereolithography (Estereolitografia)*  
SLM – *Selective Laser Melting (Fusão Selectiva por Laser)*  
SLS – *Selective Laser Syntering (Sinterização Selectiva por Laser)*  
STL – *Standard Triangle Language*  
VRML – *Virtual Reality Modeling Language*  
UV – *Ultraviolet*  
3D – *Three Dimensional*  
3DP – *Tree Dimensional Printing*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# 1. Introdução

Os grandes desafios das empresas passam por serem cada vez mais competitivas devido à concorrência global que existe. A Indústria em particular deve-se focar na redução de desperdício, nomeadamente reduzir as matérias-primas, o consumo energético e aumentar a produtividade. E para se focar na redução de desperdício, justifica-se e é pertinente abordar esta área, analisar e tirar ilações sobre a importância que a Fabricação Aditiva pode vir a ter na Indústria. Não se trata de substituir os Processos convencionais mas de complementar na área de fabrico, e também de melhorar a fase inicial de projeto, desenvolvendo protótipos do produto em questão para uma melhor análise e desenvolvimento de *software* onde de resto, esta última, é uma realidade de algumas empresas que estão a antecipar e a preparar-se da melhor maneira possível a indústria 4.0 e estão a reestruturar-se internamente desde a área do projeto, área de produção e a área da logística.

Abordar a fabricação aditiva (FA), é falar da Impressão 3D, um tema muito atual e que se desenvolveu muito nos últimos anos mas que não é assim tão recente pois o aparecimento das primeiras Impressoras 3D remonta o início da década 80, nos EUA e este processo de fabrico evoluiu muito até aos dias de hoje, com inúmeras vantagens tais como o tempo, custos de produção, desempenho funcional e durabilidade, forma de construção e geometria do produto, quantidade de material, tipo de material, utilização ou não de suportes. E porque é importante a utilização de suportes que o tema deste projeto é precisamente a otimização de suportes na produção de componentes metálicos por processos aditivos (tecnologia SLM).

Fazendo uma base de comparação entre os vários processos de fabrico para se compreender melhor as diferenças e semelhanças e saber tirar partido de ambos os processos, pode-se comparar e analisar os Processos Convencionais, mais especificamente as Máquinas de CNC com os Processos Aditivos, ou seja, as Impressoras 3D e as suas diversas tecnologias e características como a forma de construção e geometria do produto, o próprio material, utilização ou não de suportes.

Enquanto as impressoras 3D são um processo de fabricação aditiva, onde o material é depositado e adicionado numa base, em sucessivas camadas, até formar o produto, as Máquinas de CNC um processo subtrativo onde o produto é construído através de cortes e desbastes. A velocidade na conceção do Produto nas máquinas CNC e Impressora 3D vai

variar consoante a complexidade da peça e os materiais utilizados. Muitas vezes a Impressão 3D demora horas até produzir uma peça enquanto uma máquina CNC pode não demorar mais do que uma hora. As máquinas CNC normalmente são mais rápidas enquanto as impressoras 3D muitas vezes têm de diminuir a velocidade para evitar falhas de impressão [39].

Neste estudo vão ser avaliadas as estruturas de suporte com diferentes geometrias e posições e otimizar esses mesmos suportes. Para este estudo será utilizado o *software SolidEdge* e o *Simufact Additive* para simular e concluir os resultados obtidos.

Neste sentido, os métodos e técnicas utilizadas neste projeto pretendem analisar o processo de conceção e desenvolvimento de dois produtos metálicos por processos aditivos, mais precisamente uma impressora 3D na tecnologia SLM, e posteriormente à sua análise, otimizar os suportes com o objetivo de diminuir o material desperdiçado e ganhando produtividade e competitividade [40].

No caso de estudo, primeiro será utilizado o *SolidEdge* para fazer um estudo generativo de duas peças e a remoção de material para se poder analisar o resultado destas duas peças. Só depois, e a partir da análise dos dois produtos, será utilizado o *software Simufact Additive*, um software de simulação de análise de elementos finitos (FEA) para *metal forming*, soldadura e tratamento térmico que analisa, simula e otimiza todo o processo de impressão 3D.

O objetivo do trabalho visa o estudo da otimização dos processos de conceção de uma peça de metal na fabricação aditiva e estudar o contributo das estruturas de suporte nos componentes produzidos pela tecnologia SLM.

Em algumas situações de fabricação de componentes recorrendo à tecnologia SLM não é possível eliminar nem retirar as estruturas de suporte que são geradas para auxiliar na fabricação do modelo. Assim estas estruturas ficam integradas no próprio componente.

A estrutura deste projeto divide-se em duas fases:

- Numa primeira fase é descrito a história de arte dos processos aditivos e equipamentos (Impressoras 3D de metais);
- Numa segunda fase é descrito um caso de estudo, a análise topológica de duas peças no *SolidEdge* e posteriormente a análise de prototipagem no software *Simufact Additive* para otimizar os suportes.

## 2. Estado Da Arte

No presente capítulo são identificados e descritos os processos aditivos para metais, uma vez que no caso de estudo deste projeto vão ser analisados dois componentes metálicos e as respetivas estruturas de suporte, e por isso mesmo terá maior importância esta tecnologia, em relação às demais. Será destacada a tecnologia de fabrico aditivo de SLM, uma vez que será esta a tecnologia que será utilizada no *Simufact Additive*.

Vai ser descrito também a importância da Prototipagem Rápida, o seu conceito, classificações e etapas para se notar a importância desta área neste projeto, mas também na indústria em geral.

Em relação ao desperdício, e porque na segunda fase deste projeto serão analisados os suportes e a otimização dos mesmos para evitar perdas de material, a Impressora 3D sendo um processo aditivo vai gerar menos desperdício em relação às máquinas de CNC que são um processo subtrativo cujo processo é simplesmente a remoção de material de um bloco de material até conceber o produto. O material removido deixa de ter qualquer valor e é desperdiçado ao contrário da Impressão 3D.

### 2.1. Processos Aditivos

Os processos aditivos, fabricação aditiva (FA), ou Impressão 3D consiste na conceção de produtos tridimensionais com sobreposição de material, camada a camada, utilizando a Impressoras 3D que surgiu no início da década de 80 com a produção de máquinas de Prototipagem Rápida (PR) nos EUA. Demorando muito menos tempo, economizando os custos de produção tornando as Empresas muito mais competitivas. Este processo de fabrico continuou a evoluir até aos dias de hoje, quer em termos de valor, desempenho funcional e durabilidade.

Com o aparecimento das Impressoras 3D, a tecnologia digital ganhou uma nova dimensão e espaço com vista a produzir produtos tridimensionais com diferentes capacidades de configurações, resistência, funcionalidade, variedade de materiais, mas também podem ser criados protótipos que previnam eventuais erros.

A Impressão 3D é um processo de Prototipagem Rápida que permite conceber um Produto através de um modelo CAD. A partir do ficheiro CAD, a informação é convertida num

ficheiro que vai ser enviado para o equipamento que por sua vez este adiciona material camada por camada com uma espessura variável, mas que pode chegar ao tamanho de “um cabelo”. Em relação aos materiais, as impressoras 3D, produzem produtos com diversos materiais desde os termoplásticos, pó cerâmico, resinas ou metais. As classificações das impressoras 3D podem ser consoante o tipo de materiais usados como o pó, gesso, foto polímero, cera, a forma de conseguir cor.

A Impressão 3D pode desenvolver produtos para várias indústrias dentro das quais se pode destacar a arquitetura (para desenvolver maquetes), *design* do produto (para desenvolver protótipos e modelos do produto), indústria dos moldes (na gestão de projeto: protótipos do produto para apresentar ao cliente; na produção: alternativa para os processos convencionais e tornar assim os moldes com custos mais baixos), medicina (desenvolver próteses médicas, reprodução de uma parte do corpo para auxiliar no processo cirúrgico ou detetar problemas, conceber protótipos com funcionalidade mecânica com o fim de realizar estudos e testes reais), entretenimento (desenvolver brinquedos e personagens) [1, 2].

Tabela 2.1 - Processos aditivos que processam metais [19]

<b>Processos Aditivos</b>		
<b>Sem suportes</b>	<b>Com suportes (material solúvel)</b>	<b>Com suportes (material igual à peça)</b>
SLS	FDM	SLA
3DP / ligante impressão sobre pó	3DP	LENS (a 3 eixos)
LENS (a 5 eixos)	-	SLM

### **Processos aditivos**

Em 2010 a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) criou a norma F42 que formula um conjunto de diretivas que classificam a gama de processos aditivos em sete categorias (ISO TC 261) [19]:

1. *VAT Photopolymerisation* (Fotopolimerização);
2. *Material Jetting* (Impressão 3D por Jato de material);
3. *Binder Jetting* (Impressão 3D de Aglomerante);

4. *Material Extrusion* (Deposição de material fundido);
5. *Power Bed Fusion* (Fusão em camada de pó);
6. *Sheet Lamination* (Laminação de folhas);
7. *Directed Energy Deposition* (Deposição direta de energia) [1].

Nos processos aditivos vai ser analisado o gasto do material nomeadamente nos suportes, mas para se analisar os custos totais da conceção do produto, tem que se analisar o material total do produto, o material total dos suportes e do seu desperdício, os custos de manutenção e de utilização da Impressora 3D (a tecnologia utilizada é SLM), os custos de energia nas instalações utilizadas e os custos humanos nomeadamente do Técnico e restante equipa.

Fazendo uma comparação com os processos convencionais, como mostra na Figura 1, o custo do material será bastante maior porque os processos convencionais são processos que subtraem material, e por isso quando a peça é maquinada, tem de ter um grande volume de material. No entanto, não há desperdício de material em relação aos suportes, uma vez que não são necessários suportes por este processo.

Outros dois fatores importantes para se analisar a comparação de custos entre os processos convencionais e os processos aditivos são além dos custos reais já abordados, o tempo de maquinação que por Processos aditivos é bastante menor, e os custos energéticos da tecnologia em comparação com os custos de uma Impressora 3D e uma Máquina CNC.

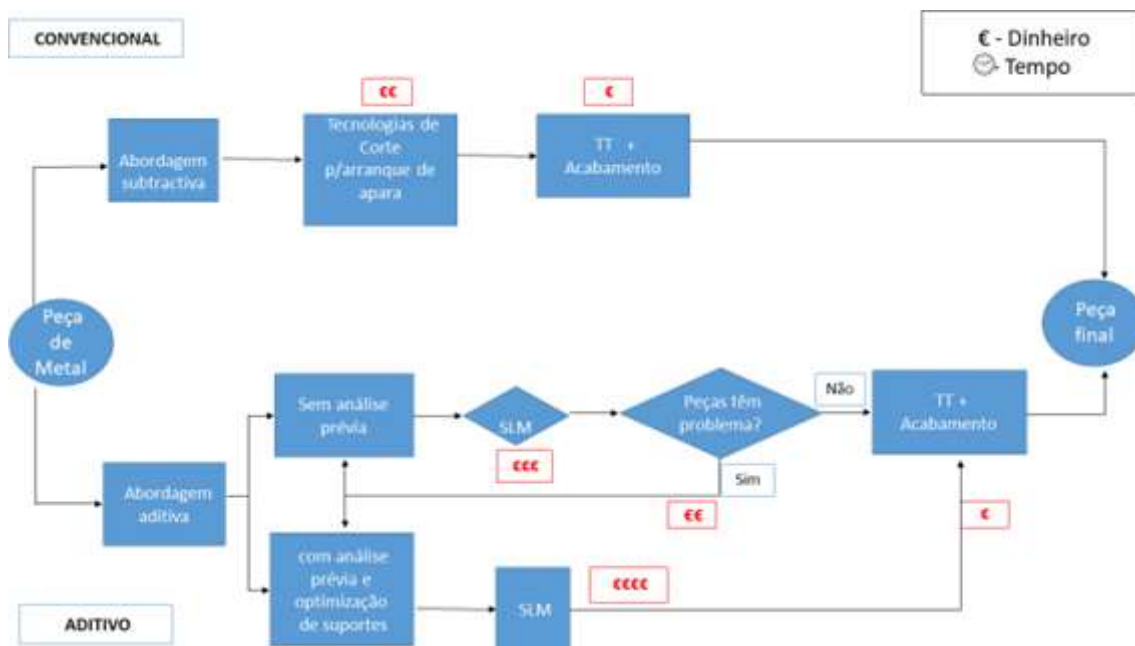
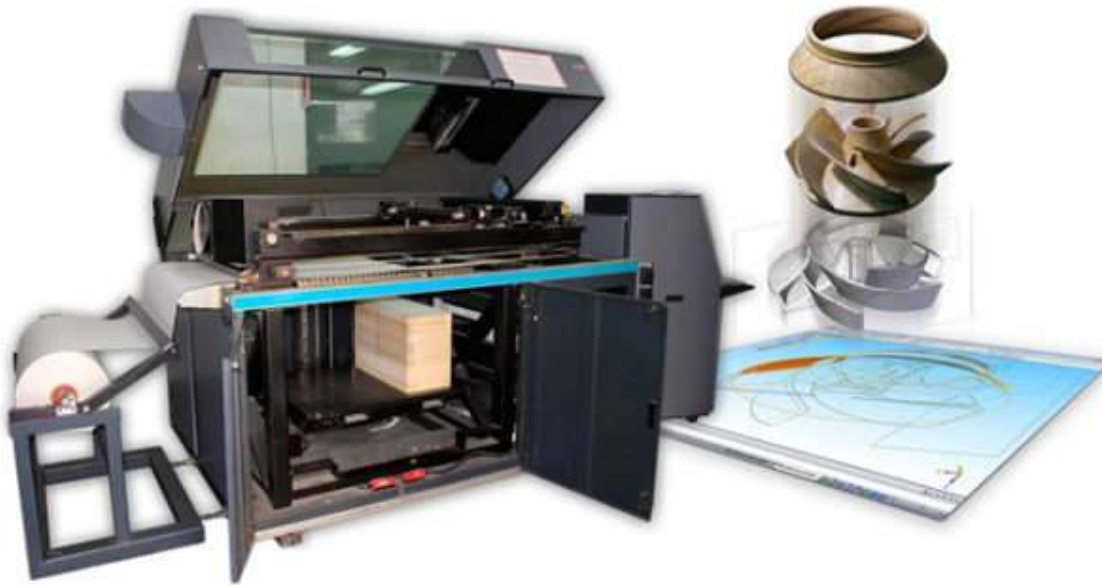


Figura 2.1 - Diagrama com comparação em Processos Convencionais Vs Processos Aditivos [19]

### Modelos/Protótipos

A função principal de um modelo ou protótipo é de contruir e validar o desenvolvimento final de um determinado produto. Desde a área do marketing ao reduzir o tempo de execução e inserir um determinado produto no mercado, ou na produção de ferramentas para pequenas séries de peças, mas também numa área mais conceptual para validação de geometrias CAD 3D e em testes de funcionalidades.



*Figura 2.2 - Exemplo de uma Impressora 3D [20]*

### **2.1.1. Características dos Processos Aditivos**

#### **Formatos de Ficheiros CAD**

Normalmente os formatos de ficheiros CAD mais indicados são extensões - STL ou VRML 2.0, onde muitos dos Softwares de CAD permitem exportar estes ficheiros.

A diferença entre estas duas extensões está na cor, onde a extensão - STL imprime o produto em monocromático, ou seja, apenas de uma única cor e sem qualquer textura, enquanto a extensão - VRML permite imprimir o produto em policromático, com diversas cores em código RGB, bitmaps, fotos e texturas tornando o produto muito mais real.

#### **Escolha do material**

A escolha do material vai depender do objetivo do Produto final, e das tecnologias de Impressão 3D em questão. Desde a precisão, forma, tolerâncias, detalhes da peça, nível de acabamento, dureza, resistência podem condicionar ou selecionar entre uma tecnologia ou outra, e conseqüentemente entre um material ou outro. O objetivo do produto também pode variar desde testes mecânicos, térmicos, montagem, ergonomia ou somente a validação visual e geométrica. Assim, e posteriormente à escolha de material, é necessário criar um modelo 3D.

Terminado o modelo 3D, segue-se a exportação para o formato STL ou VRML que vai transformar o modelo 3D CAD em malha triangular (Mesh), com a informação de todos os vértices. Nesta fase recomenda-se uma tolerância de 0.01mm e exportar como parâmetro binário.

O ficheiro é exportado para o software do equipamento onde se pode verificar uma última vez a geometria do modelo e os parâmetros antes de começar a imprimir.

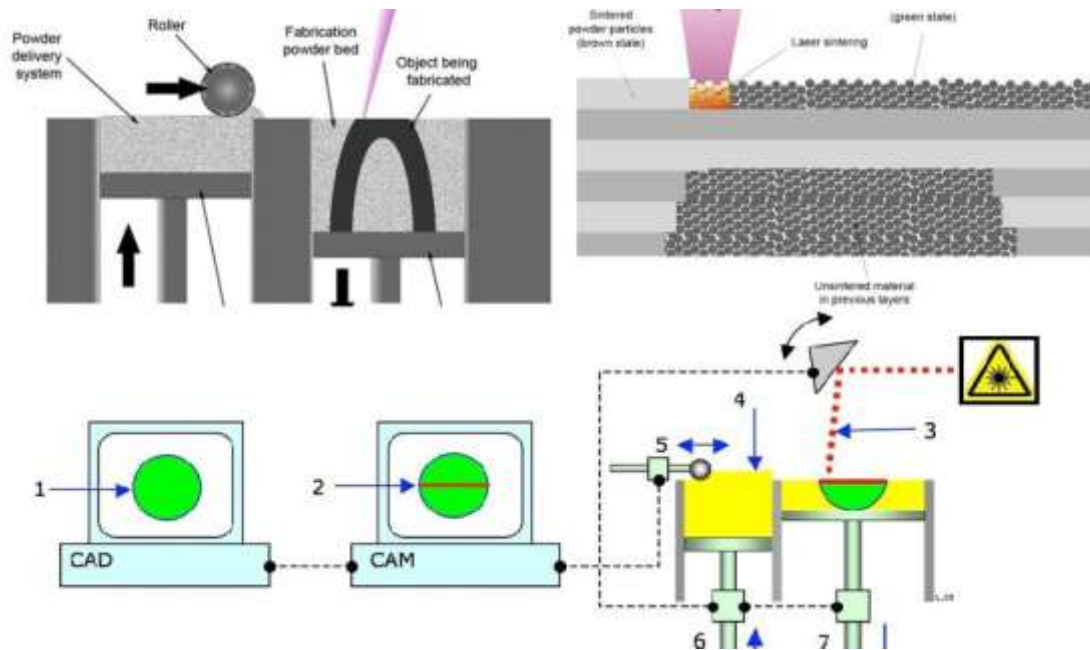


Figura 2.3 - Descrição de Processos Aditivos [42]

### 2.1.2. Prototipagem Rápida

É designado de Prototipagem Rápida um conjunto de tecnologias cujo objetivo é fabricar protótipos nas quais as dimensões, geometria e acabamento superficiais semelhantes aos futuros componentes a partir da conversão direta de um ficheiro CAD (Computer Aided Design - Projeto assistido por Computador) em formato STL. O uso destas tecnologias pode trazer uma redução significativa do tempo de ciclo do desenvolvimento do Produto e melhorar a qualidade final.

O processo de fabrico é feito através da ligação dos materiais (papel, cera, plástico ou metal) camada por camada (camadas finas de corte transversal) até à construção do produto e por isso a sua conceção baseia-se na adição de material e não na remoção de material a partir de um bloco sólido como é nos métodos convencionais nomeadamente no fresamento,

torneamento ou nas Máquinas de CNC (Controlo numérico Computorizado = Computer Numeric Control)

A classificação das tecnologias de Prototipagem Rápida em relação ao estado do material pode ser dividida em:

- Processos de base líquida: o material encontra-se no estado líquido, sendo convertido em estado sólido através de um laser ou luz UV;
- Processos de base sólida: o material encontra-se no estado sólido, em forma de: fio, rolo, laminado ou grânulos;
- Processos de base pó: o material encontra-se no estado sólido, mas em forma de pó.

O processo que será estudado neste projeto será o processo de base pó metálico em que o princípio de funcionamento do processo é o seguinte:

- com base no modelo CAD fornecido, a cabeça de impressão começa a aplicar um ficheiro especial a determinados locais;
- um rolo fino será aplicado ao pó, que é sintetizado com a substância.
- Outras repetições do processo [2, 4, 5, 16, 17, 27].

A RP com base em pó metálico permite produzir Peças finais e não apenas Protótipos não funcionais.

Tabela 2.2 - Tabela de classificações das Tecnologias de Fabricação aditiva (b) [9, 20, 21]

<b>Tipo</b>	<b>Tecnologias</b>	<b>Materiais</b>
Extrusão	Modelagem por deposição fundida (FDM)	Termoplásticos (por exemplo, PLA, ABS, HDPE, poliuretano termoplástico   TPU) metais eutéticos, materiais comestíveis
Fio	Fabricação de feixe de electrões (EBF)	Quase qualquer liga
Granulado	Sinterização direta por laser a laser (DMLS)	Quase qualquer liga
	Fusão de feixe de electrões (EBM)	Ligas de titânio, Ligas de cromo-cobalto
	Sinterização seletiva por calor (SHS)	Pó termoplástico

	Sinterização seletiva a laser (SLS)	Termoplásticos, pós metálicos, pós cerâmicos
	Projeção de encadernação (DSPC)	Fundida
Laminado	Laminado de camadas (LOM)	Papel, folha de alumínio, revestimento de plástico
Fotoquímico	Estereolitografia (SLA)	Foto polímero
	Fotopolimerização por luz ultravioleta (SGC)	Foto polímero

Os Processos de Fabrico na Prototipagem Rápida existentes são constituídos por cinco etapas básicas:

Tabela 2.3 - Etapas da Prototipagem Rápida [9]

<b>Etapas da Prototipagem Rápida:</b>	<b>Descrição:</b>
1. Criação de um modelo CAD da peça que está sendo projetada;	Modelo sólido é convertido numa representação em triângulos semelhante a uma malha de arame (wire frame).
2. Conversão do arquivo CAD em formato STL, próprio para estere litografia;	O arquivo construído recebe a extensão .STL (stereolithography file).
3. Fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais;	O software da impressora transforma esse arquivo 3D numa serie de camadas paralelas ( <i>slicing</i> ) que se constituem em arquivos 2D.
4. Construção física do modelo, camada por camada, uma sobre a outra;	A distância entre essas camadas corresponde à espessura da camada a ser depositada pela impressora (VASCONCELOS, 2014).
5. Limpeza e acabamento do protótipo.	Acabamento da superfície e se necessário polimento do Produto final.

### **2.1.3. Parâmetros inerentes ao processo de Prototipagem Rápida**

Na concepção e produção de uma peça, deve-se dar importância aos parâmetros inerentes ao Processo de Prototipagem Rápida (RP). Todo o processo de RP baseia-se na qualidade do ficheiro STL e nos parâmetros do processo. Assim sendo deve-se ter consideração nos seguintes parâmetros:

#### **Orientação da peça**

Para a concepção de um produto, é necessário definir a orientação da peça, na sua construção ou impressão para evitar erros e falhas na adição de camadas, como por exemplo, a anisotropia da peça, a má utilização de suportes e o efeito degrau.

#### **A anisotropia**

A anisotropia é definida como sendo a desigualdade de propriedades mecânicas, em cada eixo, no protótipo.

Normalmente é habitual construir uma peça a partir da direção Z - ou seja na direção vertical à impressão da Peça; assim, a peça vai apresentar fragilidade nos eixos XY – ou seja, na direção horizontal da impressão da Peça, devido ao processo de adição do material.

Ao contrário da maquinação convencional, na RP a peça possui características anisotrópicas nas três direções. Para diminuir a anisotropia, é necessário ajustar parâmetros do processo, tais como, a forma de preenchimento da camada, a potência do laser e ajustes de temperatura, de forma a promover uma melhor agregação entre camadas [12].

#### **Efeito degrau**

O efeito degrau, cuja definição consiste no resultado da construção em camadas, está presente em todas as superfícies inclinadas em relação ao eixo de construção.

Para minimizar o efeito degrau, diminuindo a espessura da camada, contudo pode ser insuficiente e ser considerado o efeito degrau demasiado grande. Outro fator prende-se com o facto de diminuir a espessura de cada camada, aumenta o tempo de produção. Alterando a posição, diminui o efeito de degrau, portanto a orientação vai influenciar no tempo de processo, complexidade dos suportes, empenamento, volumes, etc. [10,11].

#### **Construção de suportes**

Algumas das tecnologias de RP precisam de utilizar suportes para auxiliar a sua construção. Para estabilizar as peças é importante minimizar o número de suportes e para isso deve-se escolher bem a orientação e construção da peça.

Para remover os suportes pode ser uma das seguintes opções:

- Mecanicamente, em situações onde a interface com o protótipo é mais frágil;
- Agentes corrosivos, onde a estrutura é dissolvida em contato com substâncias corrosivas;
- Por fusão, onde a estrutura é submetida a altas temperaturas o que provoca a sua fusão.

## **Remoção de Suportes**

A remoção dos suportes deve ter em conta as características do material, de forma a não danificar a peça. Quanto à inclinação máxima possível na construção da peça depende da tecnologia utilizada.

Para reduzir o número de suportes, e assim reduzir o tempo de processamento, é importante uma boa definição da posição da peça, com um menor número de estruturas instáveis [10,11,12].

## **Pós-processamento e acabamento**

O pós-processamento consiste na finalização de um processo já iniciado na RP (Prototipagem Rápida), nomeadamente, na cura de resinas com luz ultravioleta (UV), na limpeza e remoção de material. Depois do Pós-processamento, segue-se o acabamento com o objetivo de dar características estéticas ao protótipo (processos convencionais como a pintura, revestimento, polimento, maquinação ou outro processo específico) [10,11].

### **2.1.4. Ferramentas CAD/CAM/CAE**

As Ferramentas CAD (Computer-aided design – Projeto assistido por Computador), CAE (Computer Aided Engineering - Engenharia auxiliada por computador) e CAM (Computer-aided manufacturing – Fabricação assistida por Computador) são *softwares* que se tornaram essências na Indústria nomeadamente na enorme importância de projetar, simular, otimizar e fabricar o produto.

O *software* CAD é um software usado para desenhar e modelar o desenho técnico na fase do projeto. São ferramentas de análise e simulações que minimizam as falhas no processo.

Os softwares CAM são programas que ligam e facilitam o computador ao processo de programação CNC. Esses programas interpretam o modelo da peça através de modelos matemáticos, calculam os pontos de trajetória da ferramenta, e digitam os comandos diretamente na Máquina CNC.

O *software* CAE, é uma ferramenta de simulação de desempenho, para melhorar o desenvolvimento do produto. Desde a simulação, validação, otimização de produto, processos e ferramentas de fabricação. O *software* CAE requer a fase de pré-processamento onde se inclui a modelação e geometria e as propriedades físicas do projeto, mas também as forças, cargas e restrições e posteriormente a fase de pós-processamento dos resultados,

usando ferramentas de visualização. O *software* CAE usa as ferramentas CAD para definir as dimensões do produto concebido, mas também materiais, acabamentos, processos de fabrico e de montagem, forças aplicadas, entre outras características. Também são utilizados os métodos de elementos finitos (MEF), nomeadamente para a análise da malha (forma, densidade), propriedades do material e propriedades estruturais do modelo, entre muitas outras análises possíveis [17].

## **2.2. Tecnologia de Processos Aditivos**

As tecnologias de Impressão 3D mais comuns são a Sinterização Selectiva a Laser (SLS), A Esteriolitografia (SLA), ou mais recentemente a 3D Printing (3DP) de impressão a jato de tinta a cores, Sinterização Direta por Laser de Metais (DMLS), Deposição de Material Fundido (FMD). Os principais fornecedores de Impressão 3D em metal são a 3D Systems (Z Corporation), Stratasys e a Object.

Estas tecnologias são utilizadas em diversas áreas tais como Arquitetura (na elaboração de maquetes em 3D), Design de produtos (criando protótipos a curto prazo) como a indústria do calçado, indústria dos Moldes (substituindo a maquinaria convencional como as máquinas CNC e a estereotipagem com elevado custo, e potência) pode vir a baixar significativamente o custo da conceção do Molde; Medicina na simulação e replicação de partes do corpo que permitem identificar anomalias e problemas – exemplo disso é o Bio Print; Engenharia mecânica na conceção de protótipos de produtos que possam testar a sua funcionalidade, Entretenimento ao conceber brinquedos e personagens para jogos, cinema, televisão como por exemplo personagens de filmes de animação.

A utilização da Impressão 3D pode dar maior produtividade, rapidez na conceção do produto e competitividade às empresas num mercado cada vez mais exigente, global e competitivo.

Para escolher qual a melhor tecnologia a utilizar, convém ter em conta a qualidade superficial do produto, a complexidade, tamanho e material.

A impressão 3D é um processo aditivo que produz uma peça a partir de camada sobre camada de uma forma sequencial de baixo para cima. Das muitas tecnologias existentes, a escolha deve recair consoante a necessidade do Produto e as suas características, nomeadamente requisitos de materiais, requisitos estéticos, propriedades mecânicas, desempenho, etc.

Como os processos aditivos adicionam material camada por camada, eliminam uma parte dos desperdícios de material, mas também existe muitas outras vantagens como o facto de facilitarem toda a logística e organização do produto desde o transporte, armazenamento, e a própria produção. Há uma redução da poluição, diminuição de desperdício na produção, minimização de energia gasta, diminuição do custo do produto, diminuição do tempo de produção, aumento da capacidade de impressão de peças de grande dimensão, utilização de materiais biodegradáveis [16, 19, 40].

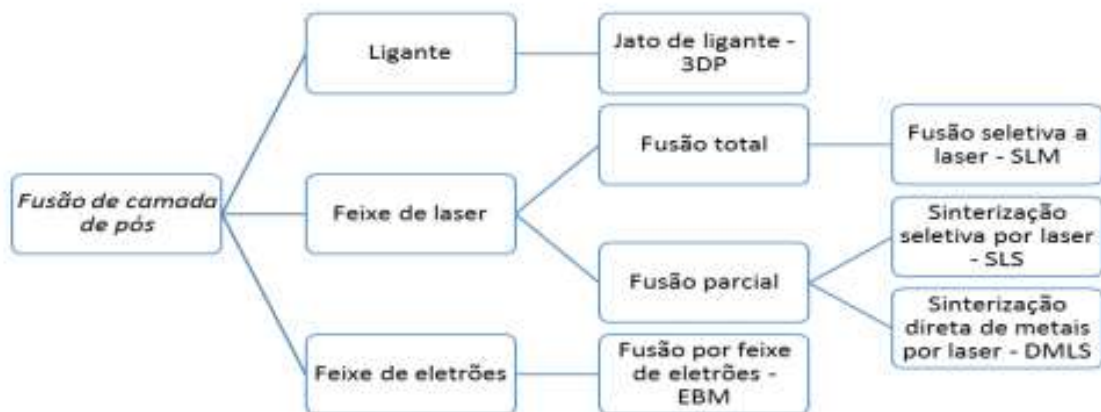


Figura 2.2.1 - Processos com material de pó metálico [22]

### 2.2.1. SLS – Sinterização seletiva em laser

SLS é uma tecnologia da Impressão 3D que pode ser utilizada com diferentes materiais em pó como o plástico, metais, ligas, borrachas, cerâmicas e produzir peças com formas muito complexas e partes suspensas sem necessitar de suportes.

O seu processo de fabrico consiste em incidir um laser sobre um pó de material espalhado uniformemente sobre uma base e assim essas zonas solidificam devido ao facto de as moléculas fundirem umas com as outras. Nas zonas onde o laser não passou, simplesmente não há solidificação mantendo-se o pó para depois poder efetuar uma limpeza nesse mesmo pó pode ser removido. A produção da peça é feita camada por camada, descendo a base para poder aplicar uma nova camada, assim sucessivamente até produzir a peça final. O pó que não é fundido serve de suporte às camadas seguintes e pode ser reutilizado.

As peças que são produzidas com o SLS tem uma densidade muito elevada, um comportamento mecânico, acabamento e desempenho muito semelhante a peças produzidas por injeção ou termoformagem ou a outros processos industriais convencionais.

Em relação aos custos o SLS é mais caro e mais complexo que o FDM, mas em relação ao seu custo unitário, é baixo.

Com um baixo custo unitário, alta produtividade e materiais estabelecidos tornam esta tecnologia ideal para uma grande variedade de aplicações – desde prototipagem funcional até à manufatura de pequenos lotes e pontes.

Quando o rigor, comportamento mecânico e desempenho da peça são muito importantes, o Processo de SLS pode ser ideal para a conceção da Peça apesar de ter desvantagens em relação à textura, um pouco porosa, e de não ser possível adicionar várias cores numa só peça.

Tem sido utilizado no fabrico de certos moldes onde essa textura não é relevante [16, 25, 43].



*Figura 2.2.2 - Impressora 3D na tecnologia SLS; [24, 25]*

### **2.2.2. DMLS – Sinterização a laser direta em metal**

DMLS é um processo do sistema da Impressão 3D que funde metal e ligas metálicas em pó a partir de um laser de alta potência. Esta tecnologia produz peças robustas e consistentes e por isso é usado em diversas indústrias nomeadamente na produção de ferramentas e peças [16].



*Figura 2.2.3 - Impressora 3D na tecnologia DMLS [26, 27]*

### 2.2.3. EBM – Fusão por feixe e eletrões

EBM é uma tecnologia que produz peças de metal densas com propriedades mecânicas semelhantes ao metal no seu estado forjado [19, 22]. Esta tecnologia consiste em usar um feixe de eletrões, a partir do aquecimento de um filamento de tungsténio a altas temperaturas, que vai criar o produto com a fusão total dos pós metálicos. Por o processo ser em vácuo impede o contacto com oxigénio o que dá uma maior pureza do material utilizado assim como um bom isolamento térmico garantindo a precisão do feixe de eletrões [16, 19, 22].



*Figura 2.2.4 - Impressora 3D na tecnologia EBM [28]*

### 2.2.4. SLA – Estereolitografia

O SLA é utilizado em muitas áreas da indústria devido à sua velocidade, e boas propriedades mecânicas, mas depende muito da sua qualidade de impressora que podem originar peças funcionais e de elevados graus de liberdade [16].



*Figura 2.2.5 - Impressora 3D na tecnologia SLA [31]*

### 2.2.5. LOM – Fabricação de objetos laminados

LOM é um processo do sistema da Impressão 3D que pode ser utilizado com diferentes materiais.

A fabricação de objetos laminados é um sistema de prototipagem rápida desenvolvido pela Helisys Inc. Nele, camadas de papel revestido com adesivo, plástico ou laminados de metal são coladas sucessivamente e cortadas com uma faca ou um cortador a laser [16].



*Figura 2.2.6 - Impressora 3D na tecnologia LOM [29]*

### **2.2.6. LENS – Deposição direta de Energia**

LENS é uma tecnologia da Impressão 3D bastante similar ao SLM nomeadamente a produzir protótipos de metal denso, com uma boa velocidade de construção. Estas tecnologias acumulam camadas finas e sucessivas de metal [16, 26].



*Figura 2.2.7 - Impressora 3D na tecnologia LENS [30]*

### **2.2.7. SLM – Fusão seletiva por laser**

A SLM é uma tecnologia cujo material utilizado é o pó metálico processado por um ou vários lasers, existe uma fusão total dos pós no momento da construção da peça que assim reduz o tempo de produção.

O seu processo de fabrico começa na colocação do pó metálico numa plataforma que será a base da peça. O laser faz uma passagem pela plataforma ainda antes de esta ter o pó.

Valores como a precisão dimensional podem ser otimizados pela maquinação e acabamentos finais ao processamento além das geometrias e estruturas complexas, podem ter espessuras finas, e peças leves.

Das aplicações industriais, pode-se destacar a indústria aeroespacial, fabricação, indústria médica, ferramentas entre muitas outras [16, 19, 32].



*Figura 2.2.8 - Impressora 3D na tecnologia SLM [32]*

### 3. Softwares

Os *softwares* que foram utilizados para a realização deste Projeto foram: o *SolidEdge* para fazer a otimização de topologia das duas Peças metálicas e o *software Simufact Additive* para fazer a análise de Prototipagem com o estudo de otimização dos suportes.

O *SolidEdge* é um *software* que pertence à *Siemens AG*, um grupo industrial alemão, onde atuam principalmente na área da automação, digitalização e eletrificação, mas também em áreas como: a aeroespacial, automóvel, Produção de baterias, energia, indústria (química, farmacêutica, alimentar), mobilidade e tecnologias para edifícios, saúde, com serviços, produtos e soluções como material elétrico, sistemas de vigilância, motores e acionamentos, *softwares*, infraestruturas do sector energético, transportes públicos, equipamentos hospitalares, automação industrial, eletrodomésticos, tecnologias de informação entre outras.

É uma marca conhecida mundialmente e com uma história riquíssima pois começou a sua atividade a 12 de outubro de 1847 em Berlim e começaram por fabricar equipamentos de telecomunicações (telégrafos), diversificando e evoluindo ao longo dos anos ganhando reputação e nome a nível mundial estando atualmente presente em 190 países.

Dentro da área do Software PLM (*product lifecycle management*) e CAE (*Computer Aided Engineering*), além do *SolidEdge*, a Siemens tem o *NX*, o *Teamcenter*, *Simcenter*, *Tecnomatix*. [33].

O *Simufact Additive* é um *software* que pertence à MSC Software.

A MSC Software Corporation é uma empresa Americana com sede em Newport Beach, California, em que a área de negócio baseia-se no *software* de engenharia assistida por computador (CAE) e software de simulação. Fundada em 1963, a empresa começou por ser direcionada para a indústria aeroespacial para melhorar a tecnologia de análise de elementos finitos (*Finite Element Analysis - FEA*). Em 1965, e ao serviço da NASA (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço), a MSC Software desenvolveu um programa de análise estrutural que se tornaria no Software *Nastran* (*NASA Structural Analysis*) e assim como este *software*, a empresa foi pioneira em outros softwares e tecnologias para analisar, prever e otimizar a tensão, vibração, dinâmica, acústica, análise térmica.

Em fevereiro de 2017, a empresa foi adquirida pela empresa de tecnologia sueca *Hexagon AB*. De referir ainda, que esta empresa está presente na América, Europa, Ásia, sendo uma das referências na área do Software de Elementos Finitos

Dos vários Produtos da MSC Software, destaca-se: *MSC Apex, Actram, Adams, Digimat, MSC Nastran, Patran, SimDesigner, SimManager, SimXpert, Sinda*.

Os *softwares* da *MSC Software* têm a capacidade de verificar, analisar e otimizar, vários parâmetros como: a modelação e análise de engrenagens, rolamentos, correias e correntes, análise de durabilidade e fadiga, simulação hidráulica e pneumática, Modelação e análise de sistemas de controlo, Análise estrutural, análise de ruído e vibração, análise térmica, otimização do peso e forma, simulação do manuseamento de materiais, análise rotacional e estabilidade, simulação da peça, do componente e do sistema.

São várias as indústrias que trabalham com os *softwares* da *MSC Software*, e vão desde a Indústria: Aeroespacial e Defesa (por exemplo: estrutura de asa, leme, pás de rotor), automotivo (robôs industriais, chassis, rotores do freio, cockpit), produtos de consumo (artigos desportivos, embalagens, materiais de construção), energia (painéis solares, lâminas de turbinas eólicas), medico (próteses, órteses, implantes, equipamentos cirúrgicos), equipamento industrial, equipamento agrícola, eletrodomésticos.

Fabricação aditiva, só por si tem este desafio de desenvolver e conceber um produto final e em conformidade à primeira tentativa, e assim os parâmetros de processo têm de estar bem definidos e controlados, para assim poupar no tempo de desenvolvimento do processo, e assim ter menos quantidades de desperdício de material, e não ter desperdício de tempo na impressão de peças impróprias para manutenção.

O principal objetivo dos *softwares* de Fabricação Aditiva (AM) para metais, serve para otimizar o processo de impressão 3D, incluindo CAE, seleção de matérias-primas, fabricação e garantia de qualidade a fim de:

- Reduzir os custos de produção;
- Aumentar a robustez / confiabilidade;
- Melhorar o desempenho de otimização dos parâmetros de *design* e impressão;

As áreas que abrangem o Additive Manufacturing (AM) usando metais ou plásticos, vão desde a indústria/área aeroespacial, automóvel, biomédica, ferramental e outras [34, 35].

## ***SolidEdge***

O *software* CAD 3D *Solid Edge* para além de conceber e modelar serve para fazer várias análises para o desenvolvimento do produto. Foi criado no ano de 1995 e atualmente é um *software* desenvolvido pela *Siemens PLM Software* com várias funcionalidades desde a modelação sólida de tecnologia síncrona, modelação de montagem, visualização ortográfica 2D, além das tecnologias de gestão de ciclo de vida de produtos (PLM). É executado pelo sistema operativo da Microsoft Windows 7/8/10.

Existem 5 ambientes de edição de peças no SolidEdge: Peça, Desenho 2D, Montagem, Soldadura, e Chapa Metálica [36].

## ***Simufact Additive***

O *software Simufact Additive* é um software que é utilizado para simular, analisar e otimizar peças desenvolvidas a partir da Fabricação aditiva. Analisa os seguintes parâmetros; tempo de impressão; otimização dos suportes; quantidade de material; otimização de suportes das 3 análises; estrangimentos; cargas; topologia das cargas;

No caso de estudo, vai ser analisado nas iterações os empenos, distorção, mas o objetivo principal é de facto analisar e otimizar os suportes de maneira a gastarmos material o menos possível.

## **Informações gerais**



Figura 3.1 - Menu gráfico do Processo no software Simufact Additive

O *Simufact Adittive* é um software de simulação e otimização dos processos da fabricação aditiva de leito em pó (SLS, SLM, LBM, DMLS, EBM). A partir da construção de um Part por ADDING Material usando o Layer-by-Layer.

O *software* prevê a distorção, as tensões residuais na peça, e compensações da peça e orienta o utilizador para desenvolver e conceber uma peça de qualidade logo à primeira tentativa. Variáveis de controlo de processo podem ser seleccionadas para otimizar o processo de impressão 3D e assim conseguir reduzir o tempo e o desperdício.

Este *software* tem por base simular a Fabricação Aditiva (AM – Additive Manufacturing) e consiste em construir um Part por ADDING Material usando a camada por camada (Layer-by-Layer). A fabricação aditiva consiste na moagem, perfuração, moagem, corte [*milling, drilling, grinding, cutting*], e os materiais utilizados podem ser metais, plásticos, compósitos ou cerâmicos.

Análises e estudos que o *software Simufact Additive* consegue desempenhar são: Forma final / distorção; Tensões Residuais; Qualidade Estrutural Homogeneidade / Densidade Fratura / Fadiga; Alta curva de aprendizagem (orientação, estrutura de apoio, projeto de montagens); Construa velocidade - baixas taxas de produção; Controle de Qualidade; Custos mais altos de materiais - materiais especializados; Limitações de tamanho; Não conseguir a plena utilização de máquinas; Rigidez de superfície; Evolução da Microestrutura; Exemplos do que pode ser previsto /otimizado.

As tecnologias utilizadas no *Simufact Additive* são: Powder Bed Methods (Metal); LBM; SLS; SLM; DMLS; EBM.

As Variáveis de processo que o utilizador do *Simufact Additive* deve ter em conta são: Seleção de máquinas, Seleção de materiais, Poder, Rapidez, características do pó, construir caminho / padrão de eclosão, Suporte / Estruturas Internas, Tratamento térmico (pré-aquecimento e pós-tratamento térmico).

O *Simufact Additive* é um *software* que simula os processos de fabricação aditiva em metal. Este *software* tem a capacidade de calcular a deformação da parte final incluindo a placa de base, compensar distorções por pré-deformação da peça, calcular e minimizar o stress residual, simulação térmica/termodinâmica, identificar problemas de fabricação, determinar a melhor orientação de construção, gerar e otimizar suportes (a partir da tecnologia Materialize), Processos HIP (condições de temperaturas e pressões elevadas), condições da peça após tratamento térmico, placa base e remoção da estrutura de suporte, execução e simulação no ambiente Windows e Linux.

O principal objetivo acaba por ser em reduzir os custos de consumo de material e energia economizando tempo e dinheiro.

### **Análise de Topologia**

A análise topológica torna-se essencial na realização deste estudo, por se analisar uma determinada peça com o objetivo de minimizar a sua massa. Tem que se ter em conta as várias restrições na Peça como a deflexão máxima admissível e quaisquer processos de fabricação.

### **Análise do Processo de Fabrico**

A análise do Processo de Fabrico também tem de ser levada em conta pois só assim se pode ter uma análise crítica dos resultados obtidos e se pode tirar ilações quanto à otimização de todo o processo, uma vez que cada Processo de Fabrico tem as suas especificidades e características.

## 4. Caso De Estudo

Este caso de estudo, numa primeira fase vai ser utilizado o *Solid Edge* para se fazer o Estudo Generativo e a sua análise de malha, análise estrutural e topológica da Peça1 e da Peça2 de modo a obter um resultado diferente da peça original.

Numa segunda fase, o *software* que vai ser utilizado é o *Simufact Additive*, para simular, analisar e otimizar peças desenvolvidas a partir da Fabricação aditiva – tecnologia SLM. O *software* analisa os seguintes parâmetros; tempo de impressão; otimização dos suportes; quantidade de material; otimização de suportes de 2 análises da peça2; constrangimentos; cargas; topologia das cargas.

### 4.1. Análise Topológica

#### Análise no *Solid Edge*

No *software SolidEdge* vai se realizar a análise topológica que consiste em desenvolver componentes com a massa mínima selecionando cargas estáticas lineares e restrições na Peça para a análise topológica “remove” os elementos da malha de elementos finitos até ter a melhor relação rigidez-peso [45]. Para isso vai se fazer o Estudo Generativo e o *Manufacturing settings* que basicamente consiste na configuração da Fabricação, ou seja, um estudo para uma melhor otimização de todo o processo de desenvolvimento do produto e da fabricação do mesmo. Assim o material é distribuído por toda a peça e evita o excesso de material ou a criação de áreas internas vazias, torna a peça estruturalmente sólida e resistente. No comando Propagação do material (*Material spread*) tem várias percentagens para realizar o estudo, consoante o fim a que se destina:


- 0% - Sem qualquer alteração;
- 30% - É alterado e criado áreas vazias e ignora as áreas de maior espessura e sólidas;
- 60% - Produz estruturas com espessuras de pequenas dimensões;
- 100% - Produz estruturas com espessuras mínimas com muitas falhas; [46].

Com as respetivas restrições, constrangimentos e forças será obtido duas peças diferentes das peças originais com remoção de material, tal como se pretende.

- PEÇA 1

Tabela 4.1 - Propriedades da Peça 1 no Software SolidEdge

### PROPRIEDADES DA PEÇA 1

Propriedades	Valor
Material	 Ferro ANSI32
Densidade	7833.000 Kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de Dilatação Térmica	0.0000 /C
Condutividade térmica	0.032 KW/m.C
Calor Específico	481.000 J/Kg.C
Módulo de Elasticidade	199947.953 MPa
Coefficiente De Poisson	0.290
Tensão de cedência	262001 MPa
Tensão Máxima	358.527 MPa
Alongamento	0.000%

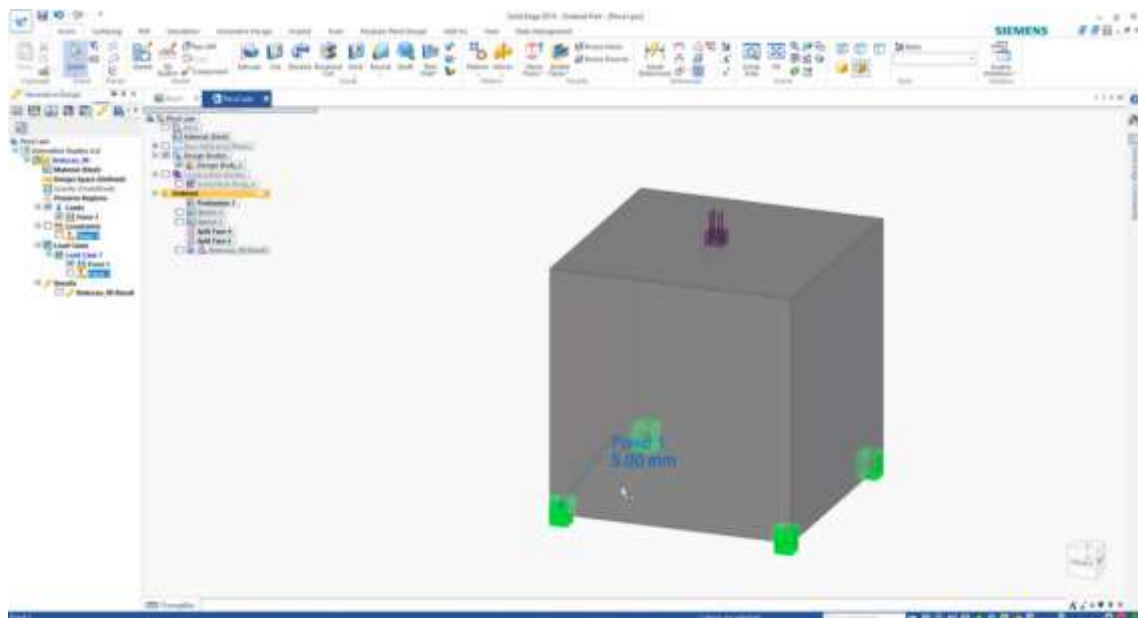


Figura 4.1 - Análise da Orientação e Forças em toda a Peça 1 no Software SolidEdge;

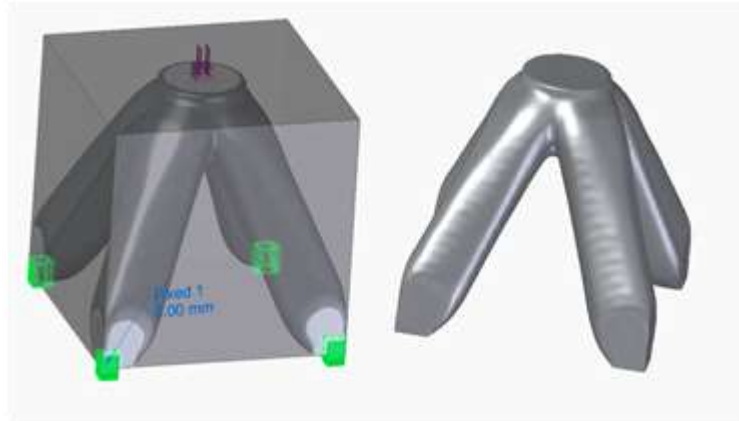


Figura 4.2 - Análise redução a 80% da Peça 1 e resultado final no Software SolidEdge;

Analisou-se o Estudo Generativo (*Generate Study*) da Peça 1 no qual a qualidade de estudo é de 200 e a redução da massa é de 80%.

A sua Tensão de cedência é de 262.001 MPa, o fator de segurança é de 1.000 e a tensão admissível *stress* é de 262.001 MPa.

Utilizando no *Manufacturing settings*, o comando Propagação do material (*Material spread*) a percentagem utilizada foi de 30 %.

- PEÇA 2

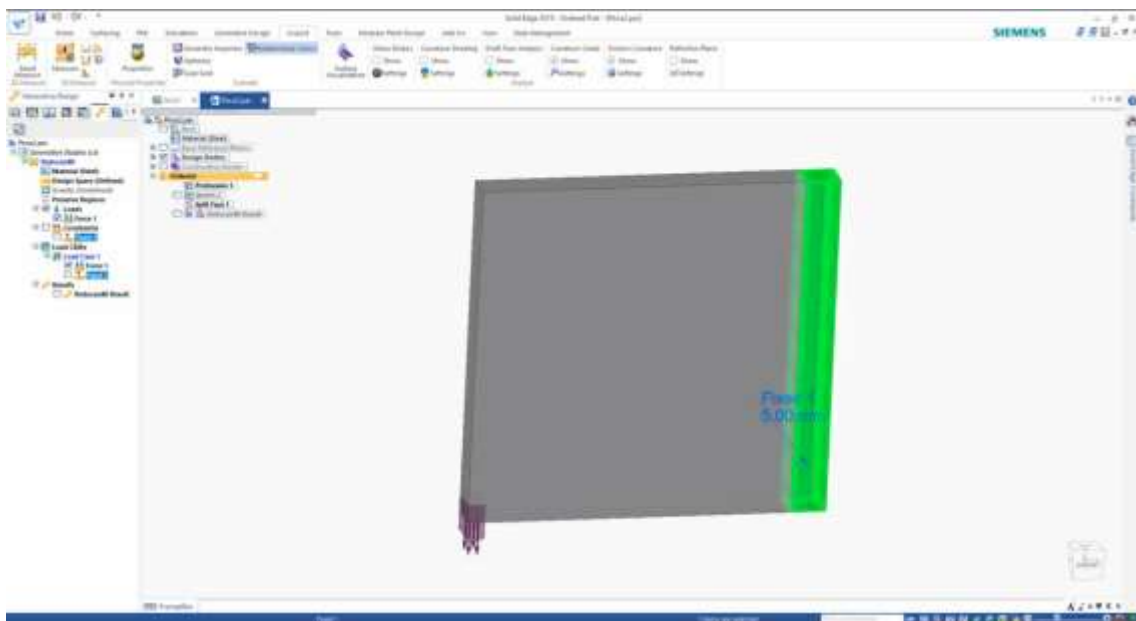


Figura 4.3 - Análise da Orientação e Forças em toda a Peça 2 no Software SolidEdge;

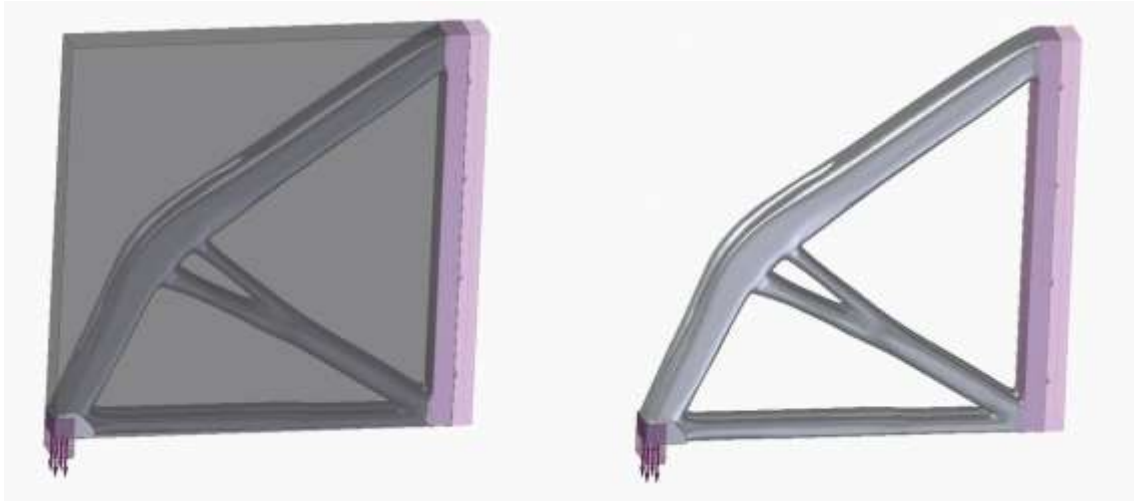


Figura 4.4 - Análise com Redução a 80% da Peça 2 no Software SolidEdge

Analisou-se o Estudo Generativo (*Generate Study*) da Peça 1 no qual a qualidade de estudo é de 150 e a redução da massa é de 80%. A Massa original é de 0.785 Kg e a Massa alvo (*Target Mass*) é de 0.157Kg.

A Tensão de cedência é de 262.001 MPa, o fator de segurança é de 1.000 e a tensão admissível é de 262.001 MPa.

Quanto ao *Manufacturing Settings*, a propagação do Material (*Material spread*) utilizada foi de 15 %.

Tabela 4.2 - Propriedades Físicas da Peça 2 no Software SolidEdge

### PROPRIEDADES DA PEÇA 2

Propriedades	Valor
Material	 Ferro ( <i>Steel</i> )
Massa	0.783 Kg
Volume	100000.000mm <sup>3</sup>
Área de superfície	24000.00 mm <sup>2</sup>
Densidade	7833.000 Kg/m <sup>3</sup>
Precisão	0.99

## 4.2. Análise da Prototipagem

Em relação às características da Processo, o *software Simufact Additive* divide-se em: 1. *Build* (construção); 2. *Cutting* (corte); 3. *Support removal* (remoção do suporte) sempre com os objetivos de otimizar e uniformizar os vários passos e processos (impressão 3D para metal, soldadura, estampagem, simulação do empeno). Depois há informações de geometria; propriedades do material (*Sainless Steel*); propriedades mecânicas; propriedades da base (placa) para analisar e poder concluir qual a melhor maneira de desenvolver o produto.

É preciso também definir os conceitos de faces e facetas para entender melhor os dados que vão ser analisados no Caso de Estudo e nos Resultados. Assim a definição de face é a seguinte:

*“As faces são unidade não sobrepostas que — junto com suas arestas e vértices — formam as unidades editáveis básicas de um objeto de malha”*. Se rodar, mover, dimensionar as faces, estas podem ser deformadas para evitar formações de intervalos. É possível suavizar ou ajustar as faces individuais [38].

Enquanto a definição de Faceta é: um conjunto de estruturas subjacentes (facetadas) que formam uma face. Para editar a malha para uma área menor, pode-se converter as facetadas para faces editáveis ao utilizar o ajuste fino. De referir ainda que as facetadas não podem ser individualmente modificadas, mas pode-se tornar mais visíveis ao modificar a variável do sistema [38].

### **Análise no *Simufact Additive***

O *Simufact Additive* é um *software* que proporciona a análise de um componente, mas também analisa as várias propriedades da máquina em estudo e do próprio componente, nomeadamente as propriedades gerais; composição química, caracterização do pó; propriedades térmicas; propriedades mecânicas; curvas de fluxo; anisotropia; danificar; propriedades eletromagnéticas; microestruturas; difusão; fluência; ficha de dados.

- **Informação Geral para todas as Simulações;**
- **Características da Máquina:**

*Tabela 4.3 - Propriedades da Máquina no Software Simufact Additive*

### PROPRIEDADES DA MÁQUINA

Propriedades	Valor
Tecnologia	SLM Solutions
Tipo de Máquina	500 HL Quad Laser
Construção da dimensão do espaço em X	500mm;
Construção da dimensão do espaço em Y	280mm;
Construção da dimensão do espaço em Z	325mm
Raio da Placa	24mm
Número de Lasers	4
Poder máximo do Laser	1000.0W



*Figura 4.5 - Máquina 500 HL Quad Laser no Software Simufact Additive; [37]*

Nas propriedades do processo do *software Simufact Additive*, como mostra na figura de baixo, pode-se escolher o tipo de máquina *Additive Manufacturing* – Fabricação aditiva (AM) e que neste caso é a 500 HL *Quad Laser*, a configuração da simulação e pode ser dentro destas três opções: mecânica, térmica ou termomecânica no qual foi selecionado a opção mecânica; tem que se escolher também o tipo de simulação, se Fabricação ou calibração, neste caso é escolhido a fabricação e por último há a ordenação das etapas do processo de fabricação do seguinte modo: 1. Construção; 2. Corte; 3. Remoção dos Suportes.

#### - Características do Processo:

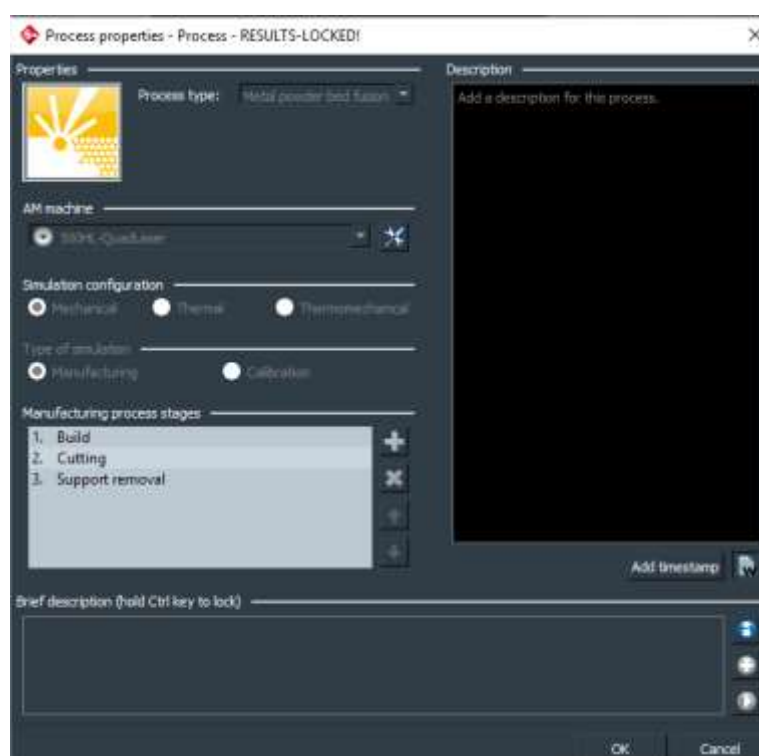


Figura 4.6 - Propriedades do Processo no Software Simufact Additive

Em relação às Propriedades e características do Processo, o nome do material é o seguinte: 17-4PH\_powder; em relação aos tratamentos são utilizados os seguintes: DIN 1.452; JIS-SUS630; AISI 630; AWS é Define AWS; Área de aplicação é em Pó; Grupo pertence ao Aço inoxidável; temperatura mínima é de 20.0°C e a temperatura máxima é 20.0 °C, Tensão Efetiva o valor mínimo é 0.0°C e o valor máximo é de 0.100416 °C; A velocidade de Deformação, os valores mínimos são 0.001 1/s; enquanto os valores máximos são 0.001 1/s.

### PROPRIEDADES DO MATERIAL

Propriedades	Valor
Módulo de Elasticidade	190000.0Mpa
Coefficiente de Poisson	0.285
Densidade	7770.0 Kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de Dilatação Térmica	1.94x10-5 °C <sup>-1</sup>
Limite de elasticidade	720.0Mpa
Resistência à Tração	770.0Mpa
Limite de Resistência à Tração	0.21
Densidade Relativa do Material	99.0%

#### - Características da Base Plate:

O *Simufact Additive* consegue dar informações importantes e resultados em relação à espessura, que neste caso de estudo é de 30mm e em relação à geometria da placa os parâmetros correspondem ao X=500mm e Y=280mm. O material da placa é 17-4PH\_baseplate, e as fixações tem um diâmetro de 10.0mm, distância de X=180mm e distância Y=18.0mm.

#### - Características dos Suporte:

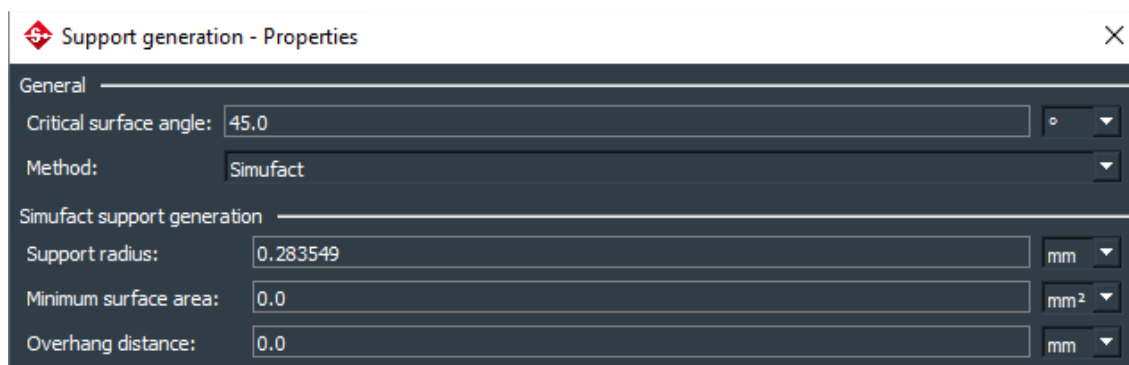


Figura 4.7 – Propriedades dos suportes no Software Simufact Additive;

As características dos suportes e as suas propriedades podem ser descritas no *software Simufact Additive*, com características gerais de ângulo de superfície crítica de 45.0°, no Método de *Simufact*. Em relação aos suportes gerais no *Simufact*, o raio de suportes são 0.283549 mm.

#### - Propriedades do material nos suportes:

Quanto às Propriedades Mecânicas do Material, a sua densidade é de 80.0% e as propriedades elásticas *isotropic* (isotrópico).

- PEÇA 1

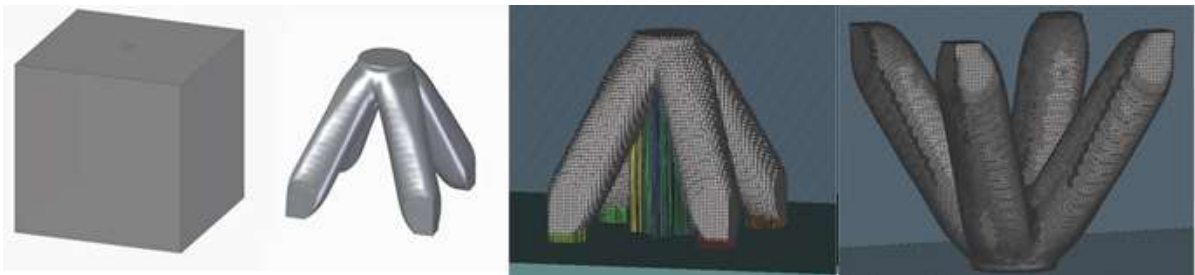


Figura 4.8 - Peça 1 no Software SolidEdge e posteriormente no Software Simufact Additive;

#### - Tamanho da Peça 1:

O volume da Peça 1 a 0° é de 236505.0mm<sup>3</sup>, as facetas são de 138374mm<sup>2</sup>, e a superfície é de 35556.9mm<sup>2</sup>. como pode ser demonstrado na Figura 4.9.

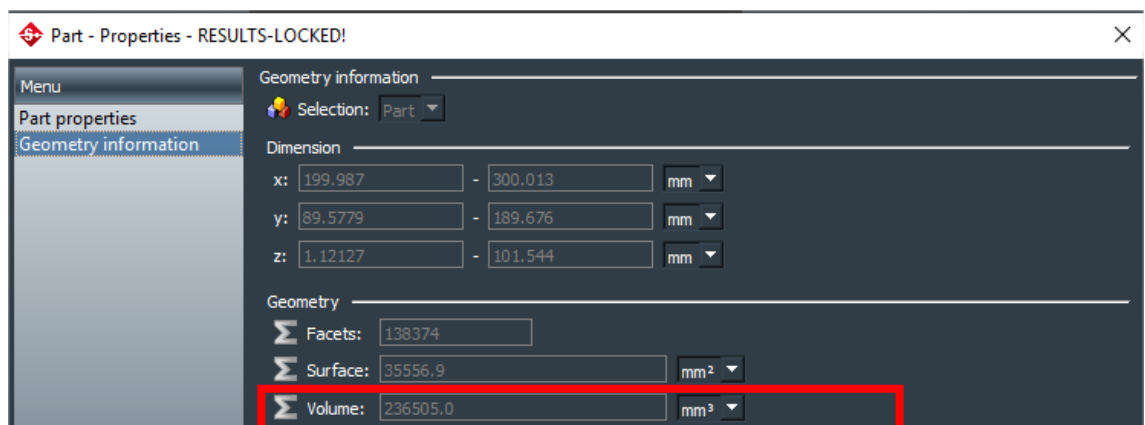


Figura 4.9 - Informação da geometria da Peça 1 no software Simufact Additive.

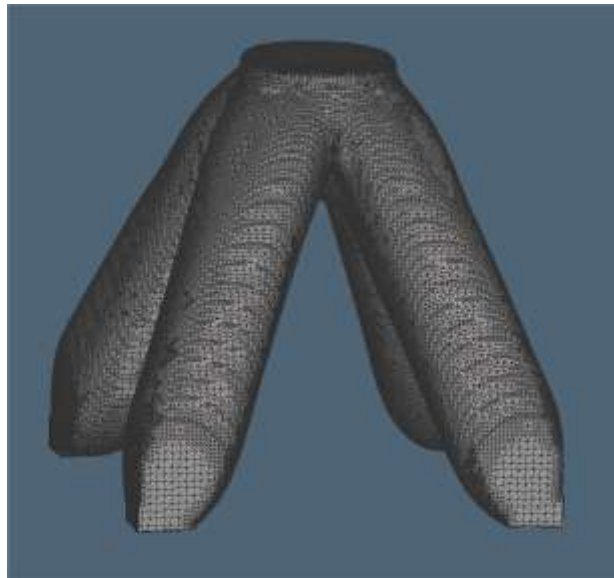
### PEÇA 1 a 0°

Quanto às propriedades da malha da peça 1 a 0°, o tamanho dos elementos é de 2.88525mm, o número de elementos é de 151146 enquanto o número de nós é de 75577.

Tipo de Malha é uniforme, tamanho do *voxel* x/y/z é 1.74172mm, fração mínima para as peças é de 5.0%, enquanto a fração mínima para os suportes é de 1.0%

Em relação aos parâmetros da malha da placa, o tamanho do *voxel* é de 5.73062mm, e o número de camadas são 3. Nas estatísticas da Malha o *voxel* é de 69991, os nós são 87513 e as camadas são 61.

A Peça1 original a 0°, tem um total de 9 suportes.



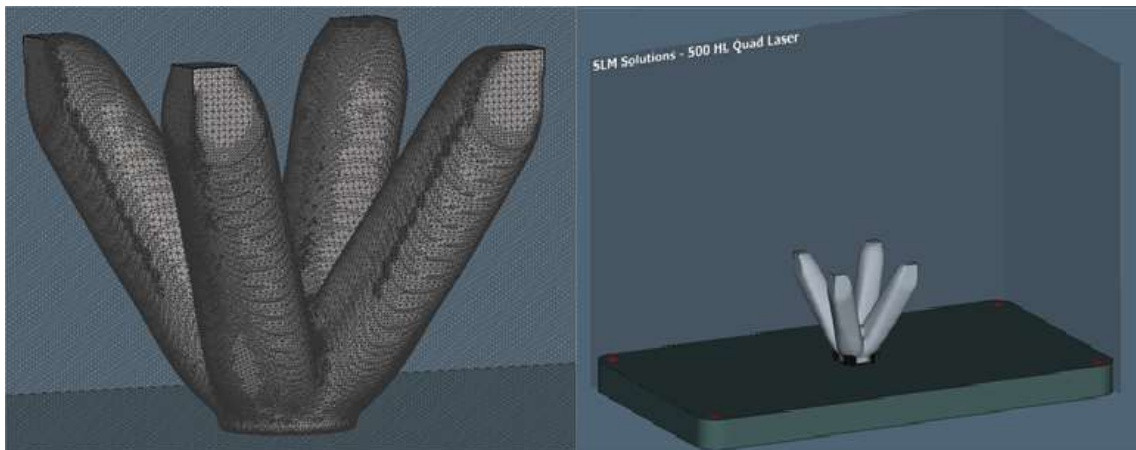
- **PEÇA 1 a 180°**

Quanto às propriedades da malha da peça 1 a 180°, o tamanho dos elementos é de 2.87043mm, o número de elementos é de 151146 enquanto o número de nós é de 75577.

Tipo de Malha é uniforme, tamanho do *voxel* x/y/z é 1.74172mm, fração mínima para as peças é de 5.0%, enquanto a fração mínima para os suportes é de 1.0%.

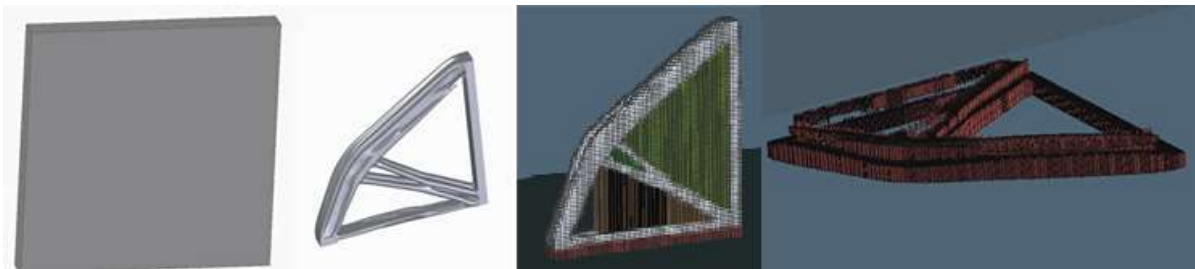
Em relação aos parâmetros da malha da placa, o tamanho do *voxel* é de 5.73062mm, e o número de camadas são 3. Nas estatísticas da Malha o *voxel* é de 63354, os nós são 78042 e as camadas são 59.

A peça 1 a 180° tem um total de 5 suportes.



*Figura 4.11 - Malha e Suportes da peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;*

- **PEÇA 2**



*Figura 4.12 - Peça 2 no Software SolidEdge e posteriormente no Software Simufact Additive;*

**- Tamanho da Peça 2:**

As propriedades da geometria da Peça 2 A 0° são: número de facetas é de 375380mm<sup>2</sup>, a superfície é de 14918.1mm<sup>2</sup> e o volume é de 20448.8 mm<sup>3</sup>, como pode ser demonstrado na Figura.

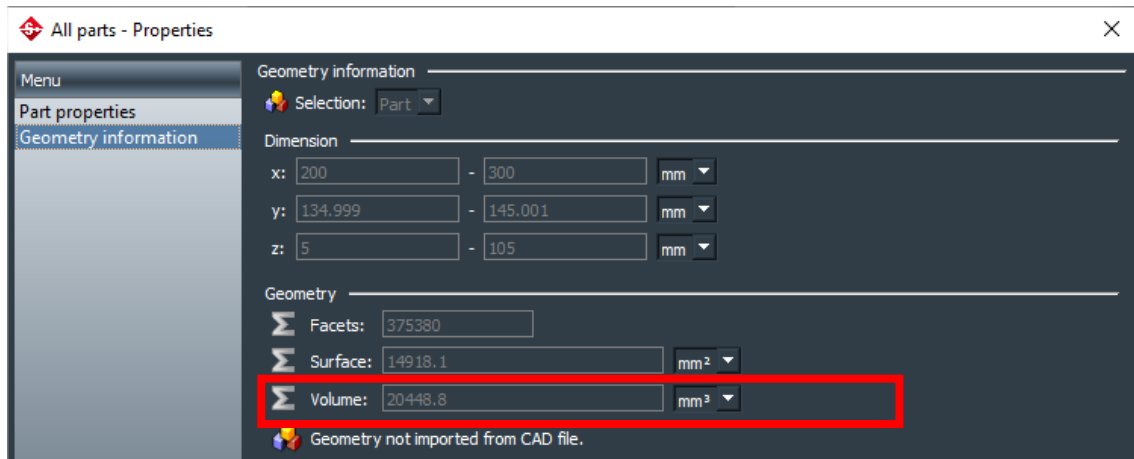


Figura 4.13 - Informação da geometria da Peça 2, no software Simufact Additive.

- **PEÇA 2 a 90°**

As propriedades da malha da peça 2 a 90° o tamanho dos elementos é de 1.26927mm, o número de elementos é de 388152 enquanto o número de nós é de 194062.

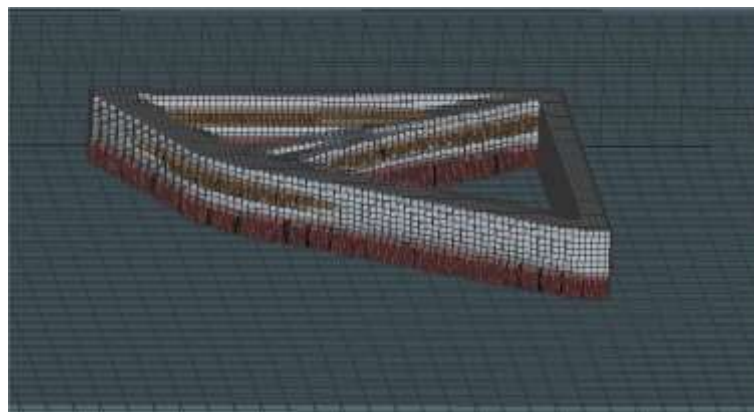


Figura 4.14 - Malha da Peça 2 a 90°, no software Simufact Additive

Tipo de Malha é uniforme, tamanho do *voxel* x/y/z é 1.4mm, fração mínima para as peças é de 5.0%, enquanto a fração mínima para os suportes é de 1.0%. Em relação aos parâmetros da malha da placa, o tamanho do *voxel* é de 5.73062mm, e o número de camadas são 3.

Nas estatísticas da Malha o *voxel* é 0, os nós são 0 e as camadas são 0.

Os Resultados das Propriedades mecânicas da Peça 2 a 90° no software Simufact Additive indicam que a Densidade relativa de material de 100.0%, enquanto as Propriedades elásticas: isotrópica.

- **PEÇA 2 original a 0°**

Quanto às propriedades da malha da peça 2 original a 0°, o tamanho dos elementos é de 1.26262mm, o número de elementos é de 388152 enquanto o número de nós é de 194062.

Tipo de Malha é uniforme, tamanho do *voxel* x/y/z é 1.4mm, fração mínima para as peças é de 5.0%, enquanto a fração mínima para os suportes é de 1.0%. Nas estatísticas da Malha o *voxel* é de 23179, os nós são 36328 e as camadas são 75.

Os parâmetros de otimização dos Suportes, o raio mínimo de suportes é de 0.1mm, enquanto o volume mínimo de fração é de 10%.

A Peça 2 original a 0° tem no total 6 suportes.

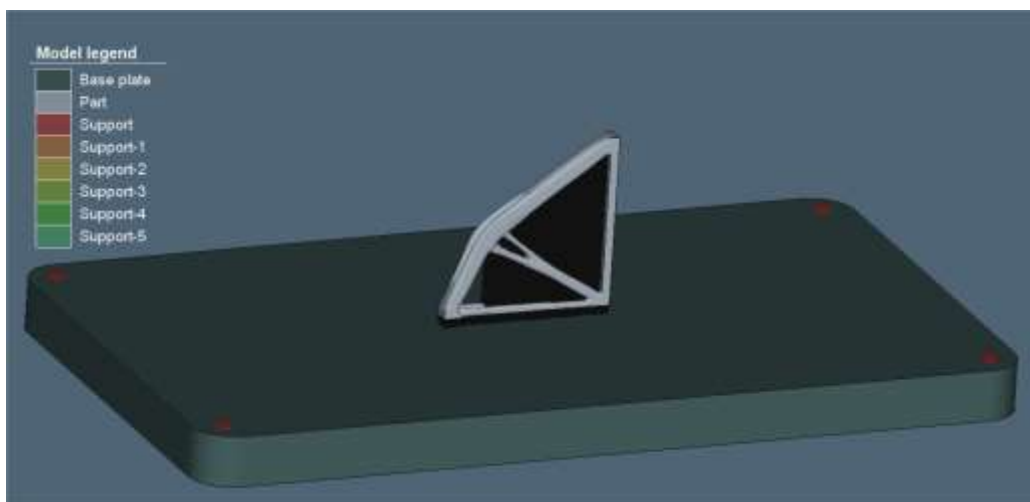


Figura 4.15 - Suportes da Peça 2 original a 0°, no Software Simufact Additive;

- **PEÇA 2 a 90°**

Quanto às propriedades da malha da peça 2 a 90°, o tamanho dos elementos é de 1.26262mm, o número de elementos é de 388152 enquanto o número de nós é de 194062.

Tipo de Malha é uniforme, tamanho do *voxel* x/y/z é 1.4mm, fração mínima para as peças é de 5.0%, enquanto a fração mínima para os suportes é de 1.0%. Nas estatísticas da Malha o *voxel* é de 10682, os nós são 16109 e as camadas são 72.

O volume da peça será sempre o mesmo, o volume dos suportes é que vai variar, e por isso vai ser analisado este parâmetro, para se poder otimizar os suportes.

- **PEÇA 2 a 90° - otimização dos suportes**

Quanto às propriedades da malha da peça 2 a 90° o tamanho dos elementos é de 1.26262mm, o número de elementos é de 388152 enquanto o número de nós é de 194062.







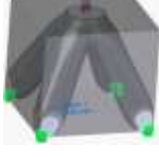







## 5. Procedimento Experimental

### SolidEdge

Ao fazer as análises das duas peças da análise topológica e o *Manufacturing settings* (configurações da fabricação para uma melhor qualidade de estudo) no *software Solid Edge*, foi impossível passar dos 30% para os 50%, pois a peça deixa de ser compacta e ganha falhas na sua estrutura (fica “ramificada”). Assim deixa de ser possível calcular o volume, a massa, e outras propriedades. Assim sendo o *software Solid Edge* não consegue exportar o ficheiro com estas características. Uma possível solução para alcançar a solução inicial: aumentar a qualidade do estudo e / ou reduzir a meta de redução de massa pode produzir um melhor resultado e também dá a informação de aumentar a qualidade da otimização ou os valores de deslocamento do material para regiões, cargas ou restrições.

A Malha (*mesh*) é tetraédrica mas o número de elementos iniciais da Malha de cada uma das Peças não podem ser analisadas no *software Solid Edge*. Assim sendo as análises da Malha de cada uma das Peças serão analisadas no *software Simufact Additive*, pois este software tem essa possibilidade. Estas *analyses* estão descritas nos Resultados.

Tabela 5.1 - Análises da Peça 1 e Peça 2 no Software Solid Edge

Peça 1	Propriedade	Peça 2
	Imagem original	
	Imagem com análise	
	Massa	
 Forma quadrada nos 4 vértices da base e no centro do topo;	Constrangimentos	 Fixo na lateral e constrangimento na base oposta;
	Manufacturing Settings= 50%	
	Fixo apenas na Face Lateral (Ofset=0mm)	
	Fixo apenas na Face Lateral (Ofset=1mm)	

## Peça 1:

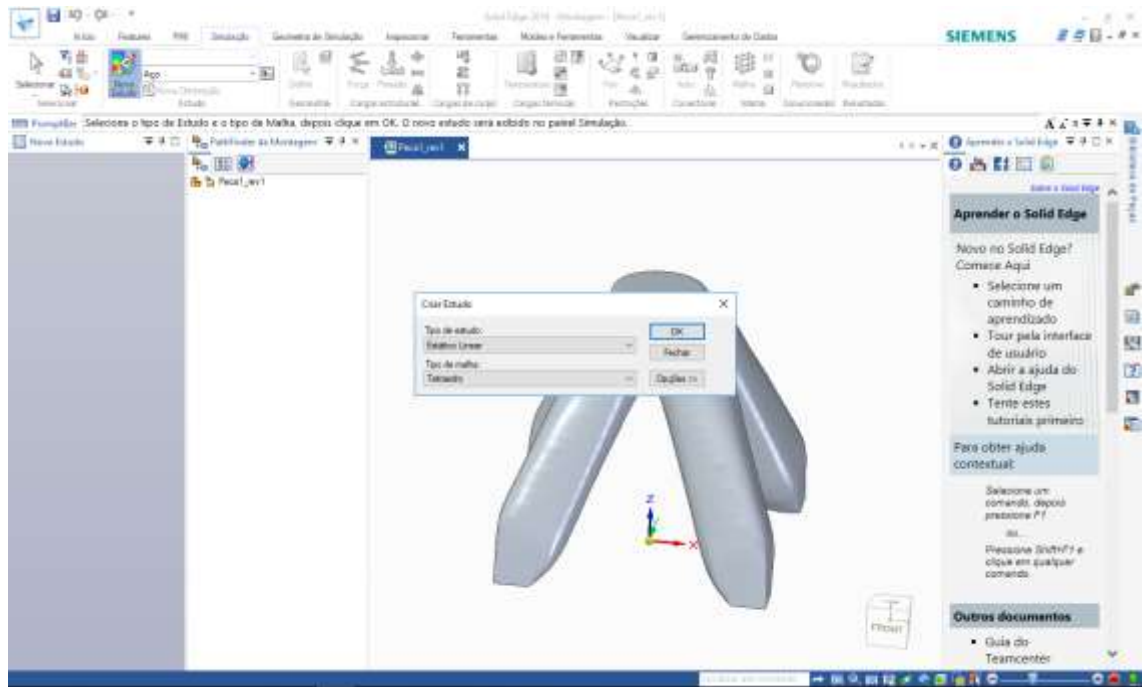


Figura 5.1 - Estudo da Peça 1 no software Solid Edge



Figura 5.2 - Estudo e análises de Redução a 80% da Peça 1 no software Solid Edge;

## Peça 2

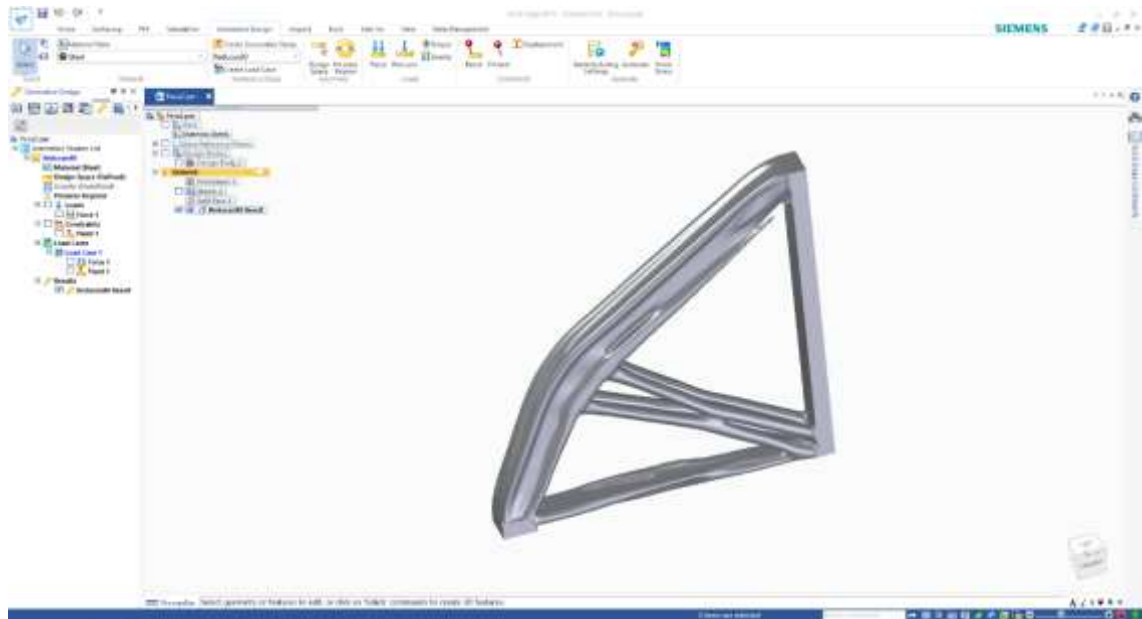


Figura 5.3 - Propriedades da Peça 2 no software Solid Edge

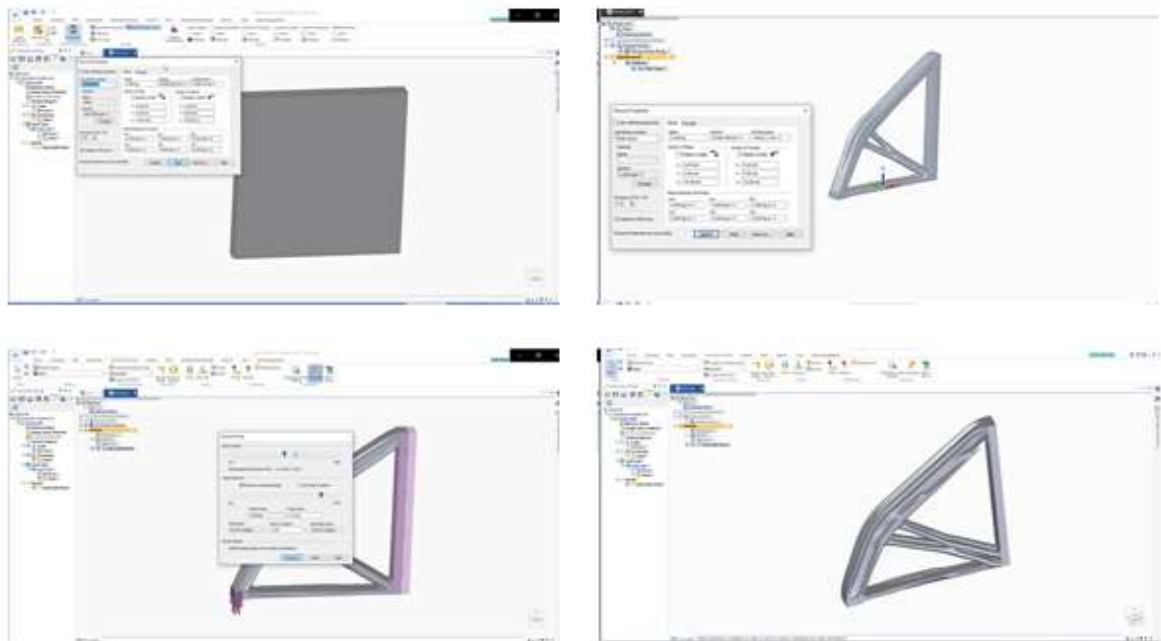


Figura 5.4 - Análises de Redução a 80% da Peça 2 no software Solid Edge;

O parâmetro da otimização dos suportes tem o raio de suporte mínimo de 0.1mm e a fração mínima de volume de 10.0%.

## Simufact Additive

- PEÇA 2

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça2, e selecionando apenas a Peça, os valores das facetas são de 138374, a superfície é de 35556.9mm<sup>2</sup> e o volume é de 236505.0mm<sup>3</sup>.

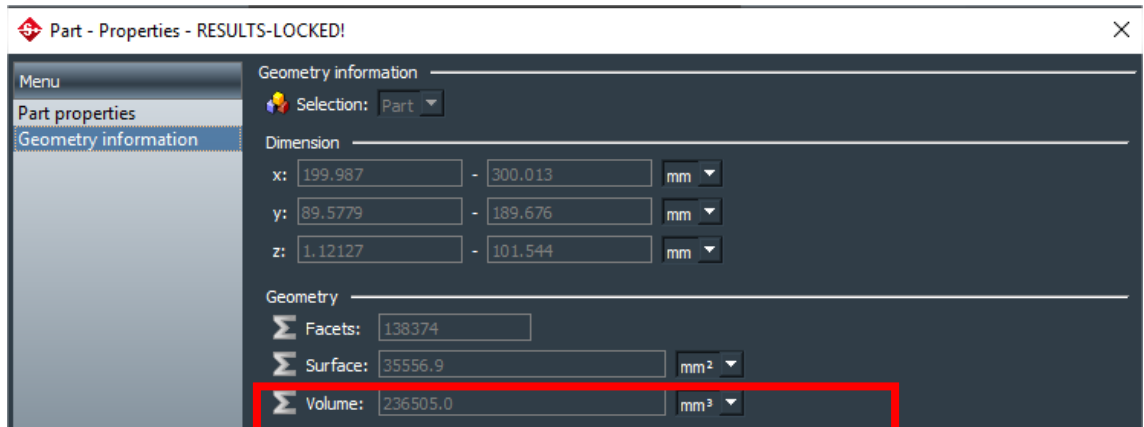


Figura 5.5 - Informação da geometria da Peça 1, no software Simufact Additive.

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça2, e selecionando apenas a Peça, os valores das facetas são de 375380, a superfície é de 14918.1 mm<sup>2</sup> e o volume é de 20448.8 mm<sup>3</sup>.

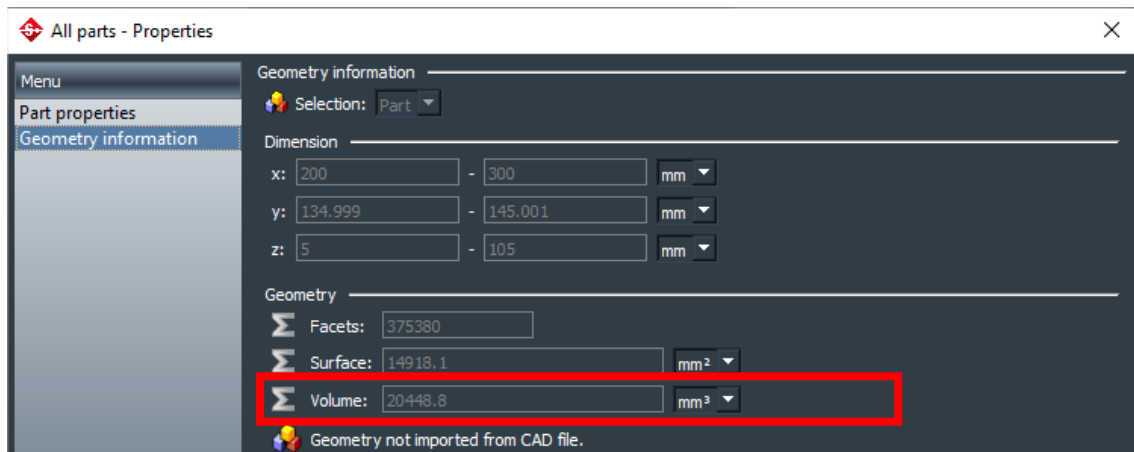
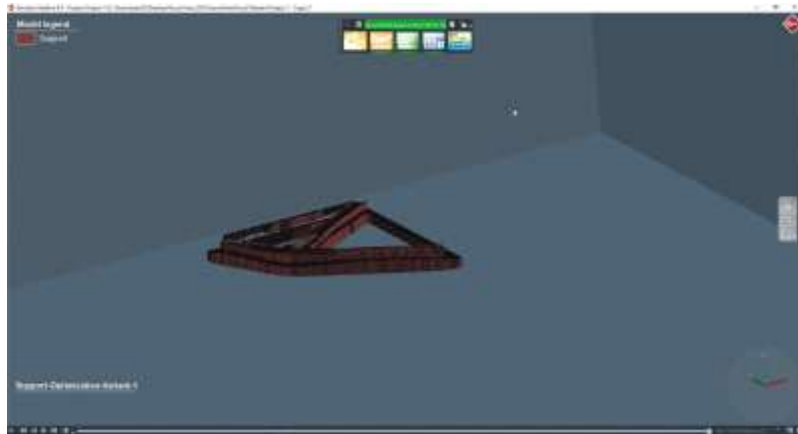


Figura 5.6 - Propriedades e informações da Peça 2 no software Simufact Additive;

- **Peça 2 a 90° Vs Peça 2 a 90° com Suportes**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2 a 90°, os valores das facetas são de 225620, a superfície é de 91698.3 mm<sup>2</sup> e o volume é de 10644.9 mm<sup>3</sup>.

Em relação às propriedades e informações da geometria dos Suportes da Peça 2 a 90°, os valores das facetas são de 258260, a superfície é de 91051.6 mm<sup>2</sup> e o volume é de 10276.1 mm<sup>3</sup>.



*Figura 5.7 - Suportes da Peça 2 a 90° deitado, no software Simufact Additive;*

Volume dos suportes iniciais é de 10644.9mm<sup>3</sup>

Suportes otimizados é de 10276.1mm<sup>3</sup>

Densidade relativa do material é de 100.0%;

Propriedades elásticas é isotrópica

Tipo de Malha é uniforme, tamanho do *voxel* x/y/z é 1.4mm, fração mínima para as peças é de 5.0%, enquanto a fração mínima para os suportes é de 1.0%. Nas estatísticas da Malha o *voxel* é de 10682, os nós são 16109 e as camadas são 72.

- **Otimização da Peça 2 a 0°**

Em relação às propriedades e informações da geometria dos Suportes da Peça 2 a 0°, os valores das facetas são de 258260, a superfície é de 91051.6 mm<sup>2</sup> e o volume é de 10276.1 mm<sup>3</sup>.

Em relação à densidade relativa do material é de 100.0% enquanto a propriedade elástica é isotrópica.

- **Otimização da Peça 2 – original – 1 iteração**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2\_original, os valores das facetas são de 61400, a superfície é de 103204.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 12214.5 mm<sup>3</sup>.

No total a peça 2 tem 6 Suportes.

Volume dos suportes iniciais é de 10644.9mm<sup>3</sup>

Suportes otimizados é de 10276.1mm<sup>3</sup>

Volume da 1 iteração é de 12214.5mm<sup>3</sup>.

Caso de estudo 2 – O volume é de 13722.8mm<sup>3</sup>

- **Otimização da Peça 2 – original – 2 iteração**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2\_original, os valores das facetas são de 58960, a superfície é de 116841.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 13722.8 mm<sup>3</sup>.

No total a peça 2 tem 7 Suportes.

Volume da 2 iteração é de 13722.8mm<sup>3</sup>.

- **Volume dos suportes – 1 iteração (análise inicial)**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2\_original, os valores das facetas são de 61400, a superfície é de 103204.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 12214.5 mm<sup>3</sup>.

No total a peça 2 tem 6 Suportes.

Volume da 1 iteração é de 12214.5mm<sup>3</sup>.

- **Otimização da Peça 2 – original**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2\_original, os valores das facetas são de 58960, a superfície é de 116841.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 13722.8 mm<sup>3</sup>.

No total a peça 2 tem 7 Suportes.

Volume da 2 iteração é de 13751.9mm<sup>3</sup>.

- **Otimização da Peça 2 – original – 1 iteração**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2\_original, os valores das facetas são de 59900, a superfície é de 114824.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 13751.9 mm<sup>3</sup>.

No total a peça 2 tem 7 Suportes.

Volume da 2 iteração é de 13751.9mm<sup>3</sup>.

- **Otimização da Peça 2 – original – 2 iteração**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2\_original, os valores das facetas são de 58960, a superfície é de 116841.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 13722.8 mm<sup>3</sup>.

No total a peça 2 tem 7 Suportes.

Volume da 3 iteração é de 13751.9 mm<sup>3</sup>.

- **Otimização da Peça 2 – original – 3 iteração**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2\_original, os valores das facetas são de 784620, a superfície é de 691911.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 34212.4 mm<sup>3</sup>.

No total a peça 2 tem 5 Suportes.

Volume da 3 iteração é de 34212.4 mm<sup>3</sup>.

- **Otimização da Peça 2 - original**

Em relação às propriedades e informações da geometria dos suportes da peça 2 a 90° deitada, os valores das facetas são de 258260, a superfície é de 91051.6 mm<sup>2</sup> e o volume é de 10276.1 mm<sup>3</sup>.

Volume dos suportes iniciais é de 10644.9mm<sup>3</sup>

Suportes otimizados é de 10276.1mm<sup>3</sup>

Densidade relativa do material é de 100.0%;

Propriedades elásticas é isotrópica

Tipo de Malha é uniforme, tamanho do *voxel* x/y/z é 1.4mm, fração mínima para as peças é de 5.0%, enquanto a fração mínima para os suportes é de 1.0%. Nas estatísticas da Malha o *voxel* é de 10682, os nós são 16109 e as camadas são 72.

### **Volume dos suportes iniciais Vs Otimizada**

Em relação às propriedades e informações da geometria da peça 2 e respectivos suportes, os valores das facetas são de 225620, a superfície é de 91698.3 mm<sup>2</sup> e o volume é de 10644.9 mm<sup>3</sup>.

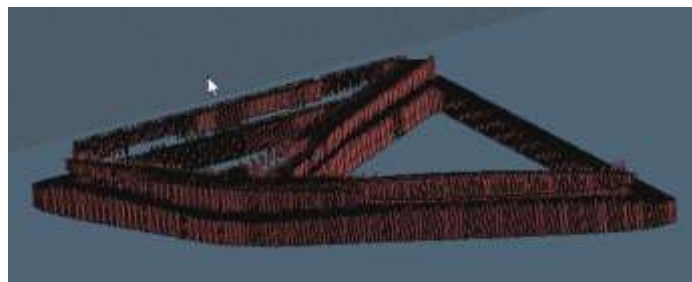
Em relação às propriedades e informações da geometria dos suportes da peça 2, os valores das faces são de 258260, a superfície é de 91051.6 mm<sup>2</sup> e o volume é de 10276.1 mm<sup>3</sup>.

Volume dos suportes iniciais a 1ª iteração é de 10644.9mm<sup>3</sup>

Suportes otimizados é de 10276.1mm<sup>3</sup>

### **Otimização da Peça 2 a 90°**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2 a 90° e respectivos suportes, os valores das facetas são de 258260, a superfície é de 91051.6 mm<sup>2</sup> e o volume é de 10276.1 mm<sup>3</sup>.



*Figura 5.8 - Peça 2 a 90° no software Simufact Additive;*

### **Otimização da Peça 2 a 90°**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2 a 90° e respectivos suportes, os valores das facetas são de 258260, a superfície é de 91051.6 mm<sup>2</sup> e o volume é de 10276.1 mm<sup>3</sup>.

### **Peça 2 original a 0°**

#### **Volume dos suportes – 1 iteração (análise inicial)**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2 original a 0° e respectivos suportes, os valores das facetas são de 61400, a superfície é de 103204.0mm<sup>2</sup> e o volume é de 12214.5 mm<sup>3</sup>.

No total são utilizados 6 Suportes

O Volume da 1ª iteração é de 12214.5mm<sup>3</sup>

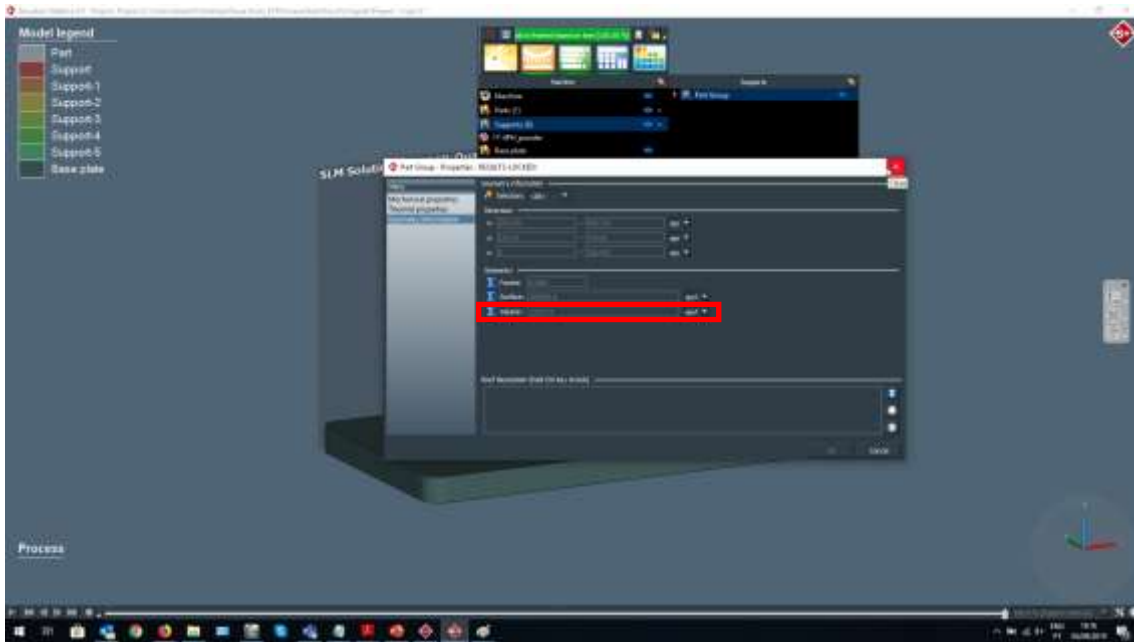


Figura 5.9 - Resultados e Propriedades da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;

### Otimização da Peça 2 original a 0° na 2ª iteração

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2 original a 0° e respectivos suportes, os valores das facetas são de 59900, a superfície é de 114824.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 13751.9 mm<sup>3</sup>.

Na 2ª iteração no total utilizam 7 Suportes.

O Volume da 2ª iteração é de 13751.9mm<sup>3</sup>

O Volume dos suportes iniciais é de 10644.9mm<sup>3</sup>

Os Suportes otimizados é de 10276.1mm<sup>3</sup>

### Otimização da Peça 2 original a 0° na 2ª iteração

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2 original a 0° e respectivos suportes, os valores das facetas são de 58960, a superfície é de 116841.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 13722.8 mm<sup>3</sup>.

No total, são utilizados sete Suportes.

O Volume da Peça dos Suportes na 2ª iteração é de 13722.8mm<sup>3</sup>

O Volume da Peça e dos suportes iniciais é de 10644.9mm<sup>3</sup>

O Volume dos Suportes otimizados é de 10276.1mm<sup>3</sup>

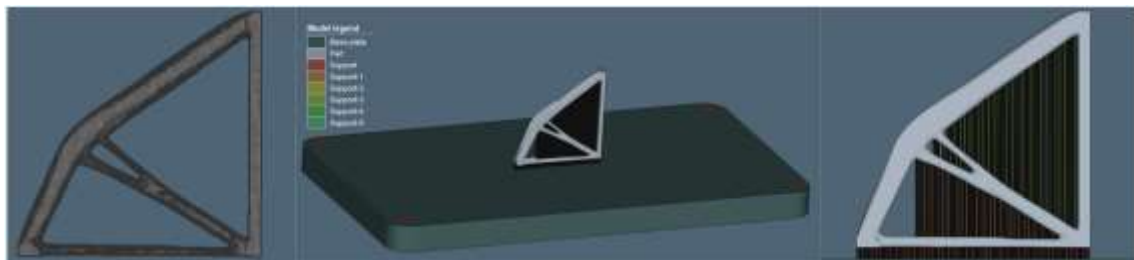
Volume é de 13751.9 mm<sup>3</sup>.

### **Otimização da Peça 2 original a 0º na 3ª iteração**

Em relação às propriedades e informações da geometria da Peça 2 original a 0º e respectivos suportes, os valores das facetas são de 784620, a superfície é de 691911.0 mm<sup>2</sup> e o volume é de 34212.4 mm<sup>3</sup>.

Volume da Peça e dos Suportes é de 34212.4 mm<sup>3</sup>.

Na 1ª iteração são usados 6 suportes enquanto na 2ª iteração são usados 7 suportes.



*Figura 5.10 - Peça 2 original a 0º no Software Simufact Additive;*

## 6. Resultados

### Topologia

	 Peça 1	 Peça 2
Volume	1 000 000 mm <sup>3</sup>	100 000mm <sup>3</sup>
Surface área	60 000 mm <sup>3</sup>	24 000mm <sup>2</sup>
Carga	100N	100N
Malha	Tetraédrica	Tetraédrica
Material	Ferro	Ferro
Remoção de Material	80%	80%
Massa original	7.833Kg	0.783Kg
Target Mass (Massa Final da Peça)	5.483Kg	0.157Kg
Densidade	7833kg/m <sup>3</sup>	7833Kg/m <sup>3</sup>
Condutividade	0.032KW/m <sup>-C</sup>	
Módulo de Elasticidade	199947.953MPa	
Coeficiente de Poisson	0.290	
Tensão de Cedência	262.001MPa	262.001MPa
Ultimate Stress	358.527 MPa	358.527 MPa
Calor específico	481.000 J/Kg <sup>-C</sup>	
Manufacturing settings	30%	30%
Distancia constrangimento (Ofset)	5mm	5mm
Força do constrangimento	50 000N	100 000mN
Constrangimento fixo		5mm
Fator de segurança	1	1
Qualidade do estudo no SolidEdge	200	150
Remoção do Material	80%	80%
Material spread		15
Volume	100x100x100=1 000 000mm <sup>3</sup>	100 000mm <sup>3</sup>

Tabela 6.1 - Propriedades gerais da Peça 1 e Peça 2 no Software Solid Edge

## Simufact Additive

- PEÇA 1 original a 0°

Peça 1 a 0° tem no total 8 suportes.

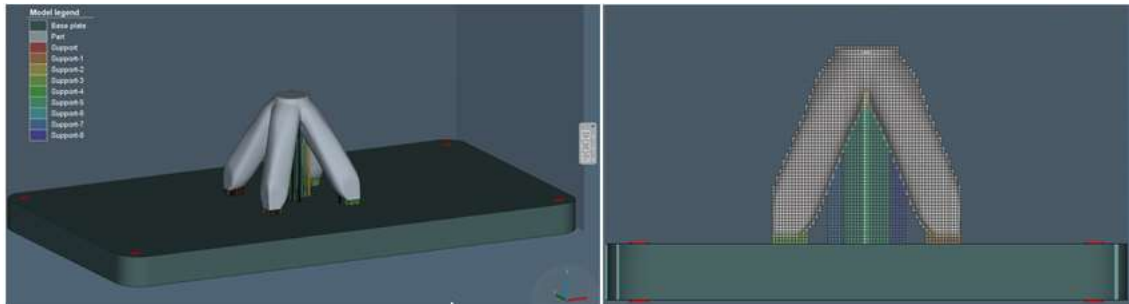


Figura 6.1 - Peça a 0° com os Suportes, no software Simufact Additive;

- Quantidade de material utilizado:

$$d = \frac{m}{V}$$

$$\Leftrightarrow (7770 * 0.99) = \frac{m}{236505,0 + 17450,7}$$

$$m = 253955,7 * 0,007692 = 1953g$$

- Tempo de impressão: 1m 16 seg

$$236505mm^3 = \text{Volume da peça}$$

$$17450.7mm^3 = \text{Volume dos suportes}$$

### Resultados – 1ª iteração

Em relação ao Deslocamento total da primeira iteração os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 ao valor máximo de 1.04mm. A tensão efetiva da primeira iteração, o valor mínimo é 0.0 MPa e o valor máximo é 1048.74 MPa. Quanto ao desvio de superfície da primeira iteração, o valor mínimo é de -0.75mm; o máximo é de 0.75mm.

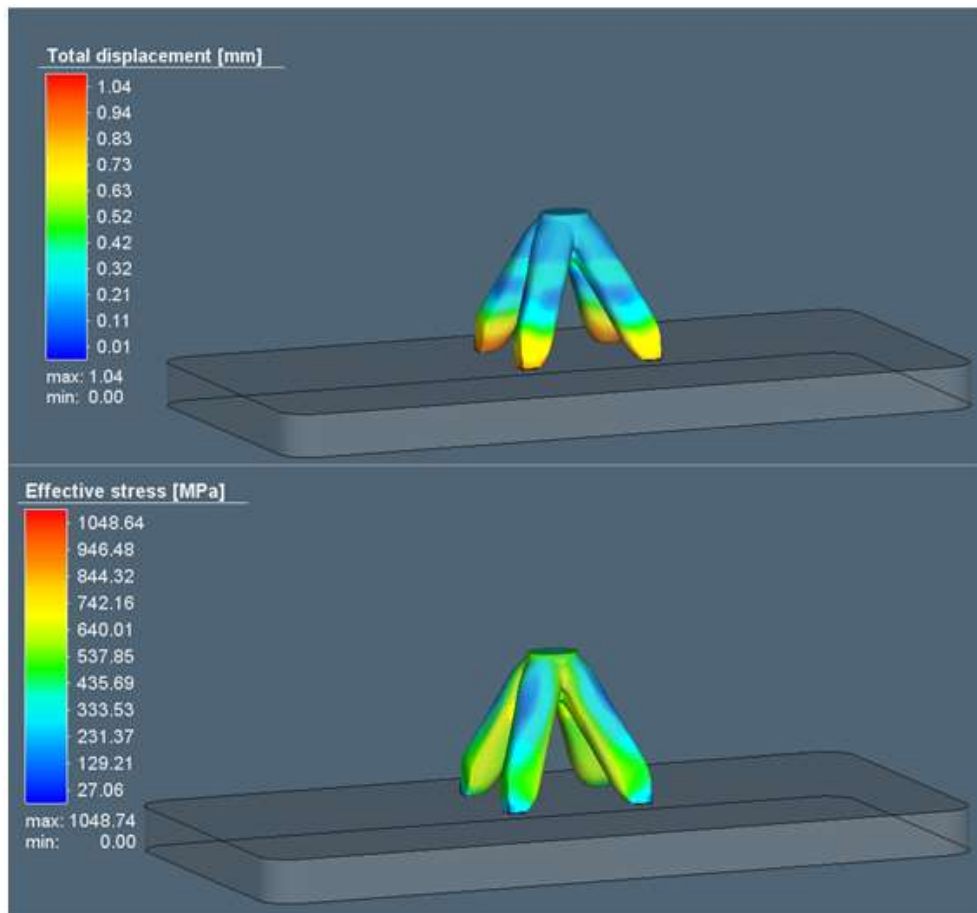


Figura 6.2 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 1ª iteração da Peça a 0°, no software Simufact Additive;

### Resultados – 2ª iteração

Em relação ao Deslocamento total da segunda iteração os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 ao valor máximo de 1.28mm. A tensão efetiva da segunda iteração, o valor mínimo é 0.0 MPa e o valor máximo é 1048.72 MPa.

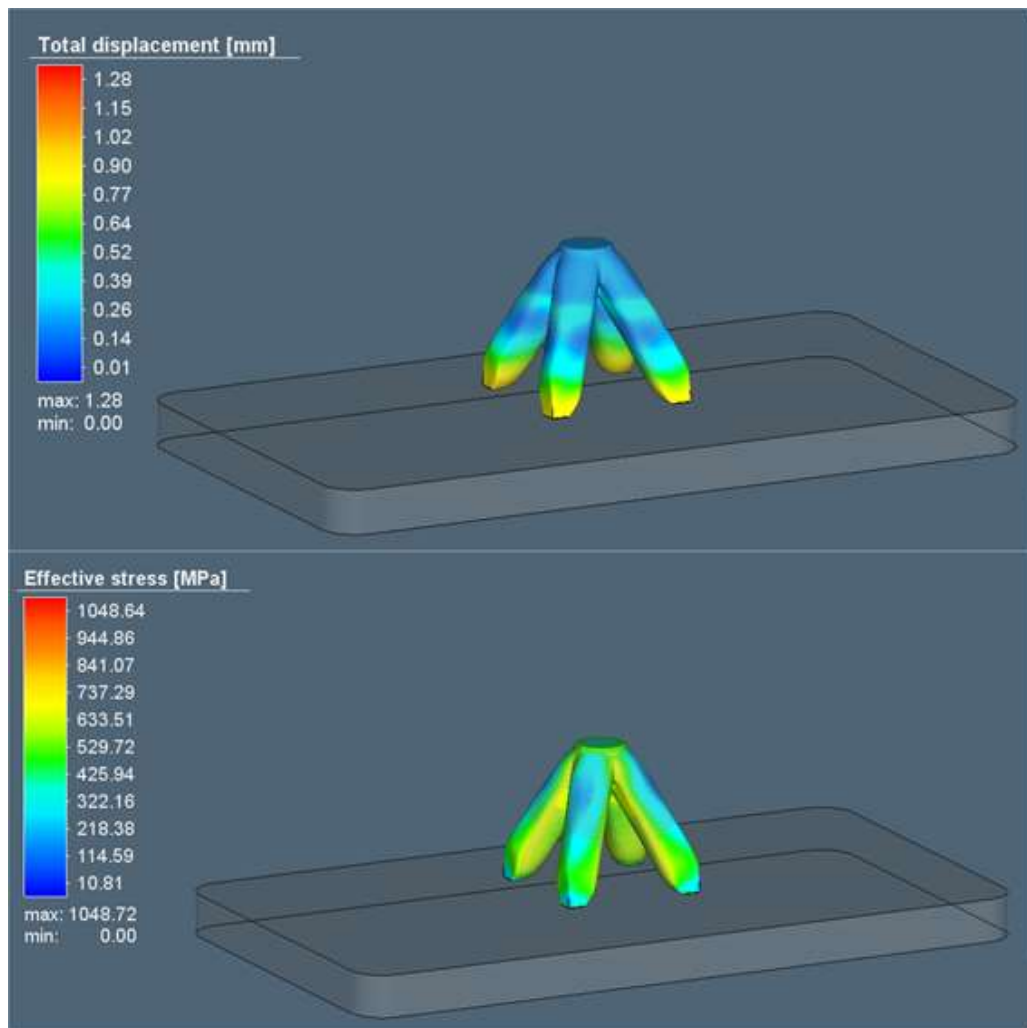


Figura 6.3 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 2ª iteração da Peça a 0°, no software Simufact Additive;

### Resultados – 2 iterações com distorção de 0.1 mm

Em relação aos Resultados de distorção e compensação, os valores máximos de distorção são de 0.0959644mm, os valores aceitáveis são de 0.1mm e o efeito degrau máximo são de 10.

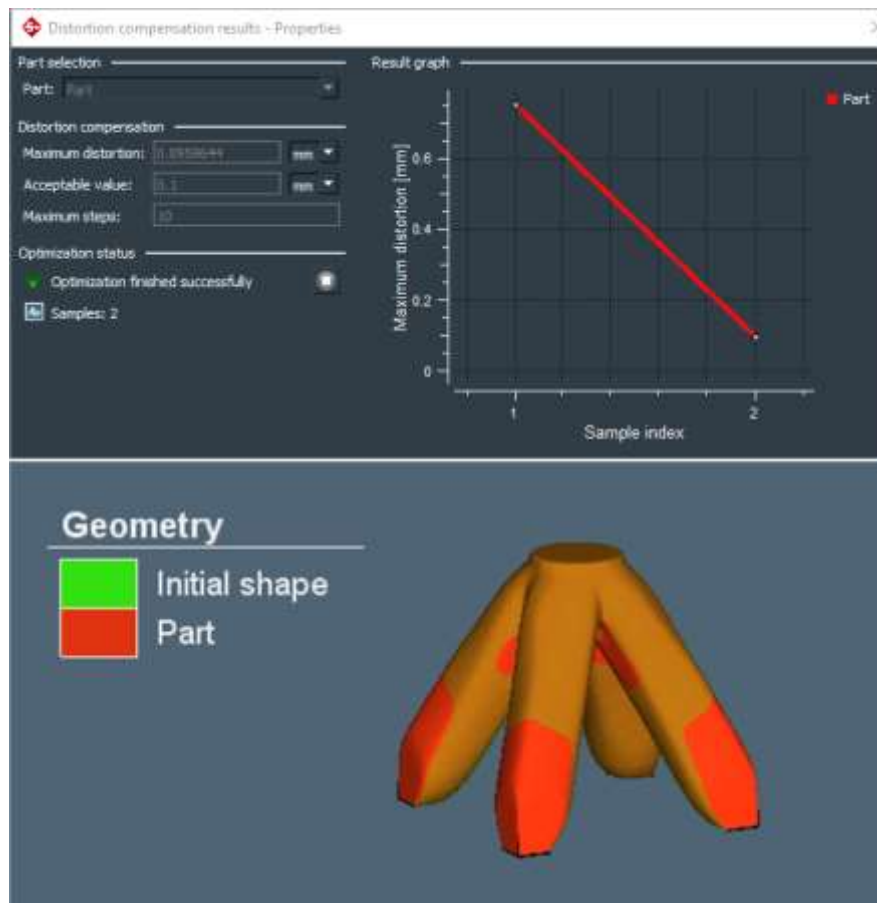


Figura 6.4 - Resultados de distorção e compensação e a Geometria da Peça a 0°, no software Simufact Additive;

### Resultados da 1ª iteração

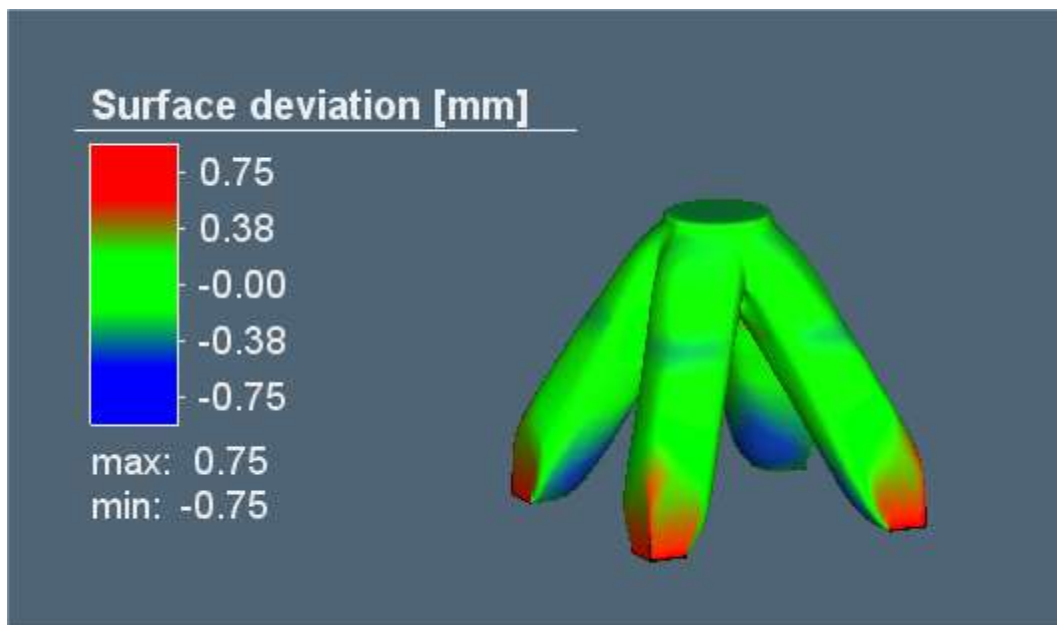


Figura 6.5 - Desvio da Peça a 0° na 1ª iteração, no software Simufact Additive;

Quanto ao desvio de superfície da primeira iteração, o valor mínimo é de -0.75mm; o máximo é de 0.75mm.

### Resultados - 2ª iteração com distorção de 0.1 mm

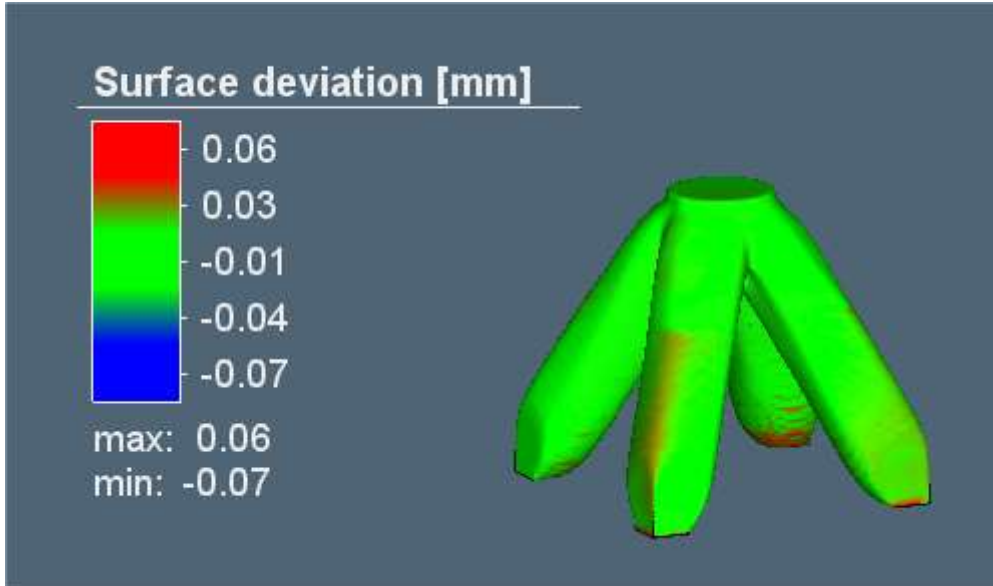


Figura 6.6 - Desvio da Peça a 0° na 2ª iteração, no software Simufact Additive

Quanto ao desvio de superfície da segunda iteração, o valor mínimo é de -0.07mm; o máximo é de 0.06mm.

- **PEÇA 1 a 180°**

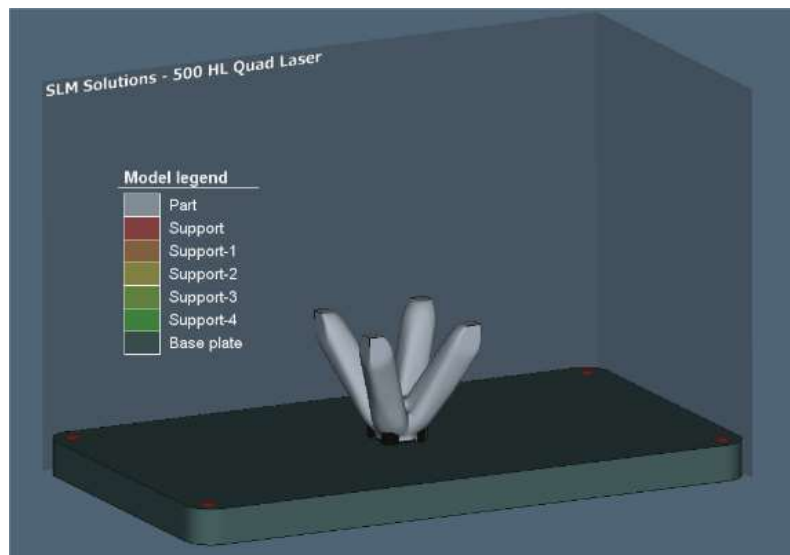


Figura 6.7 - Peça 1 a 180° com os suportes, no software Simufact Additive;

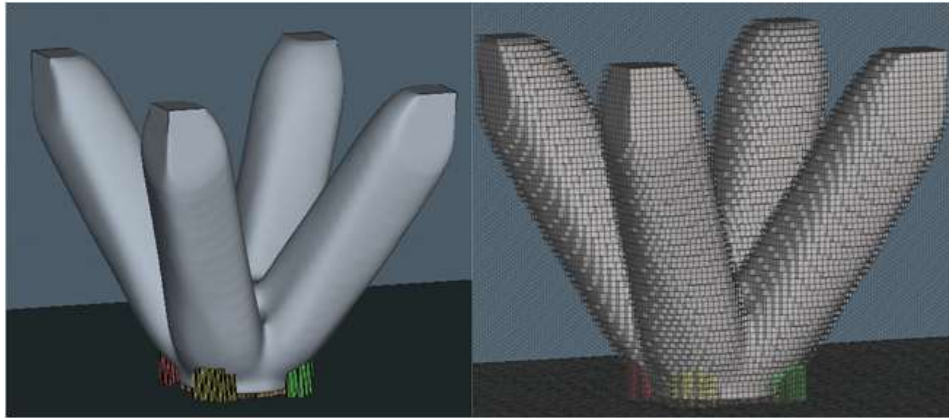


Figura 6.8 - Peça 1 a 180° com os Suportes, no software Simufact Additive;

- Quantidade de material utilizado:

$$d = \frac{m}{V}$$

$$\Leftrightarrow (7770 * 0.99) = \frac{m}{236505,0 + 1631,95}$$

$$m = 238136,95 * 0,007692 = 1831,7g$$

- Tempo de impressão: 1m14seg

$$236505mm^3 = \text{Volume da peça}$$

$$1631.95mm^3 = \text{Volume dos suportes}$$

Notas:

- Pode-se optar por exportar um resultado de malha de *voxel* como \* .arc ou \* .spr ou um resultado de superfície como \* .stl ou \* .arc.

## Resultados 1ª iteração

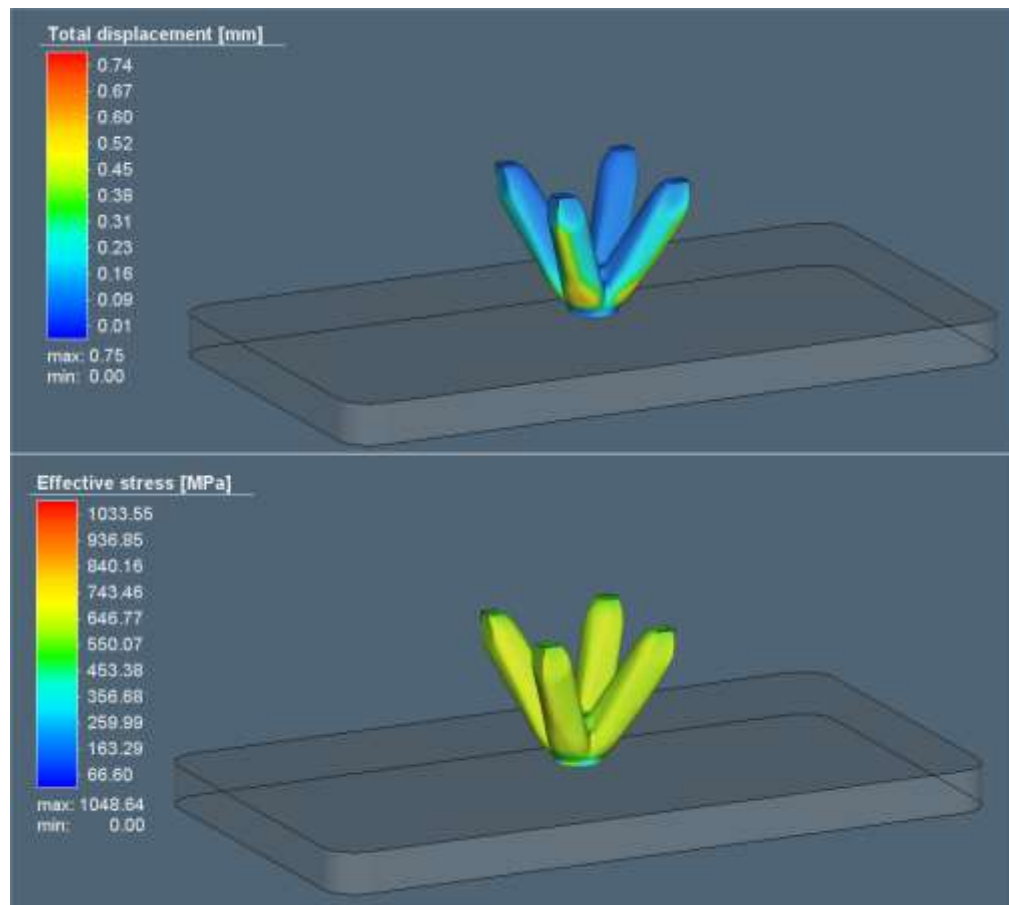


Figura 6.9 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 1ª iteração da Peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;

## Resultados – 1ª iteração

Em relação ao Deslocamento total da primeira iteração os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 ao valor máximo de 0.75mm. A tensão efetiva da primeira iteração, o valor mínimo é 0.0 MPa e o valor máximo é 1048.64 MPa. Quanto ao desvio de superfície da primeira iteração, o valor mínimo é de -0.75mm; o máximo é de 0.75mm.

## Resultados 2ª iteração

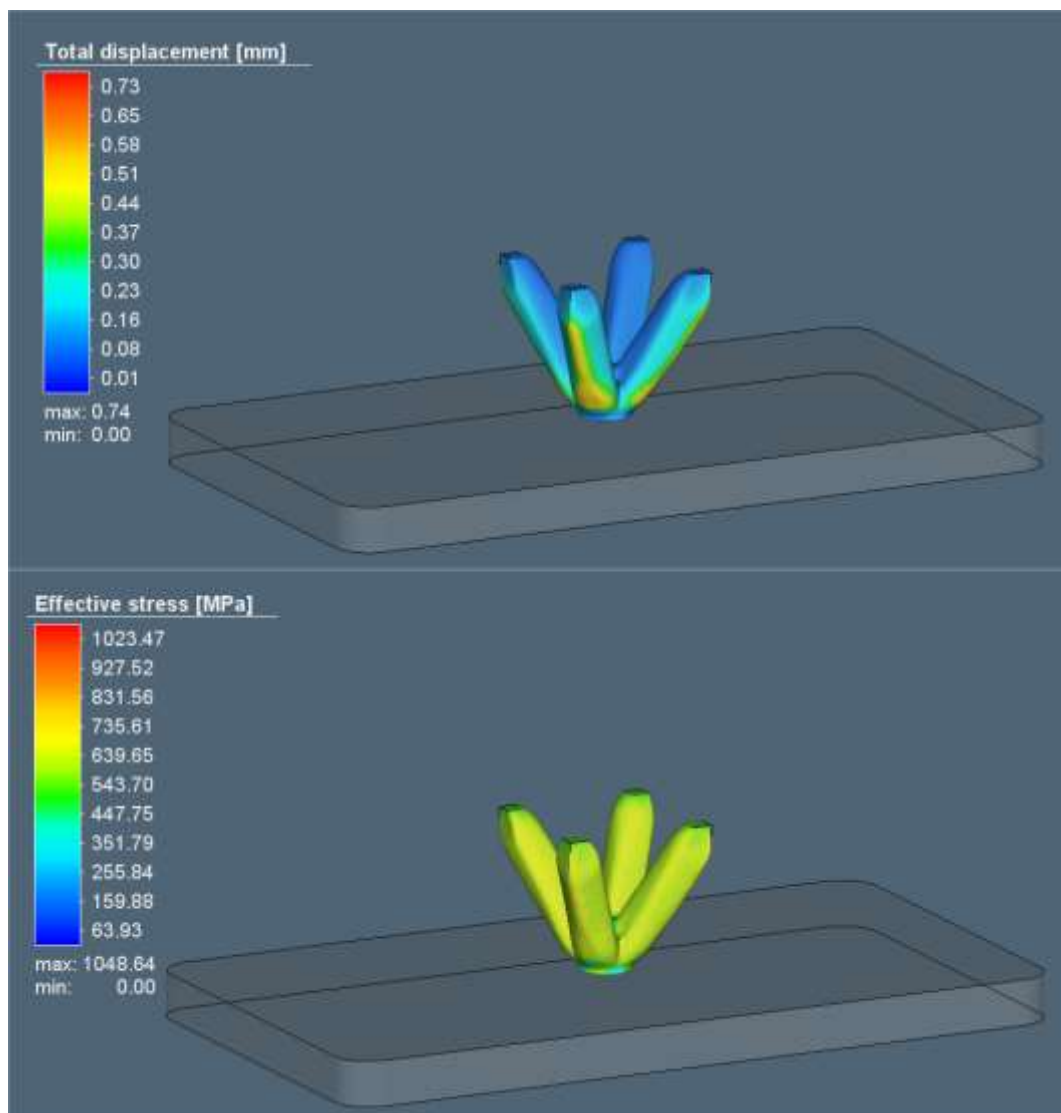


Figura 6.10 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 2ª iteração da Peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;

## Resultados – 2ª iteração

Em relação ao Deslocamento total da segunda iteração os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 ao valor máximo de 0.74mm. A tensão efetiva da segunda iteração, o valor mínimo é 0.0 MPa e o valor máximo é 1048.64 MPa.

## Resultados – 2 iterações com distorção de 0.1 mm

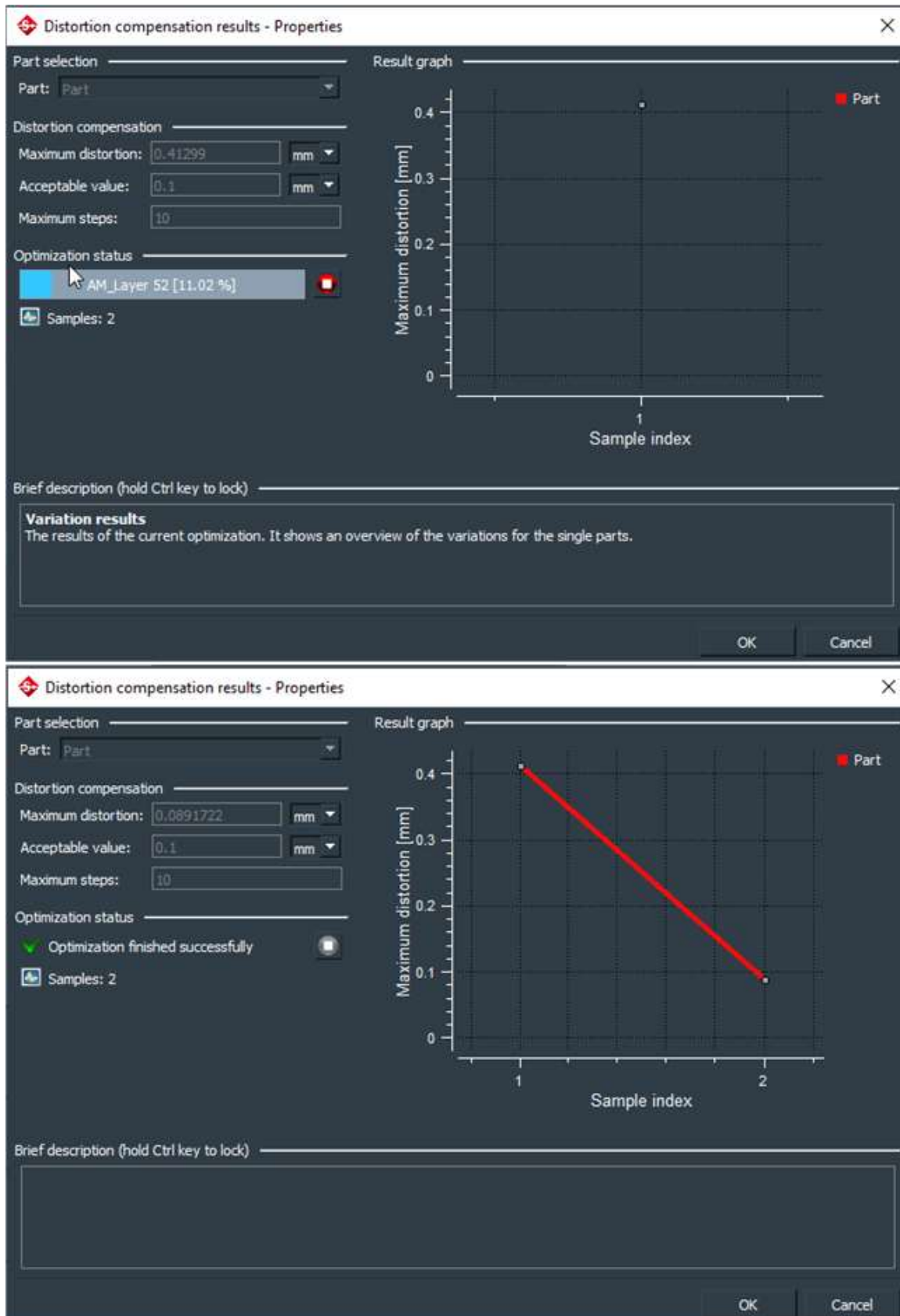


Figura 6.11 - Resultados de distorção e compensação da Peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;

Em relação à compensação da distorção, a primeira iteração, o máximo de distorção é de 0.41299mm, o valor aceitável é de 0.1mm e o efeito degrau máximo é de 10. Quanto à segunda iteração, a compensação da distorção, o máximo de distorção é de 0.0891722mm, o valor aceitável é de 0.1mm e o efeito degrau máximo é de 10.

### Resultados – 1ª iteração Vs 2ª iteração com distorção de 0.1 mm

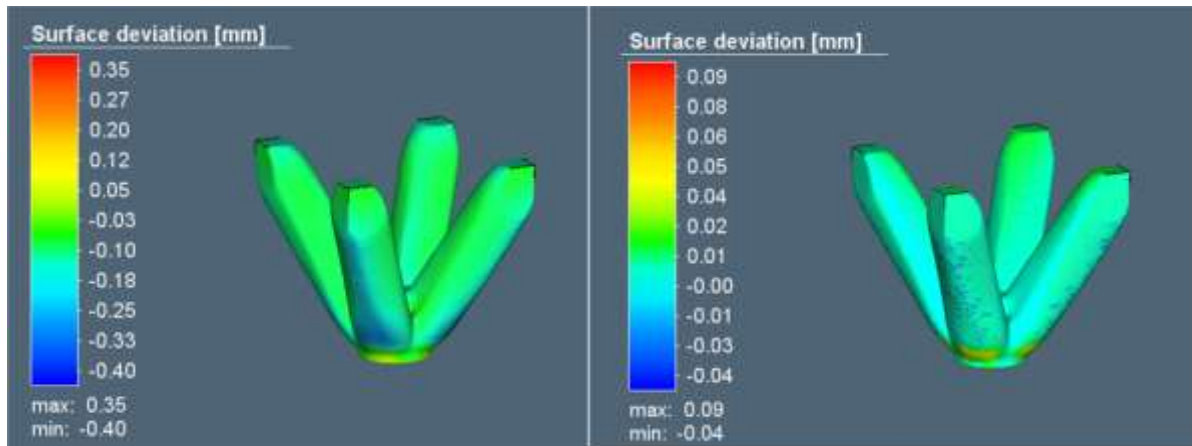
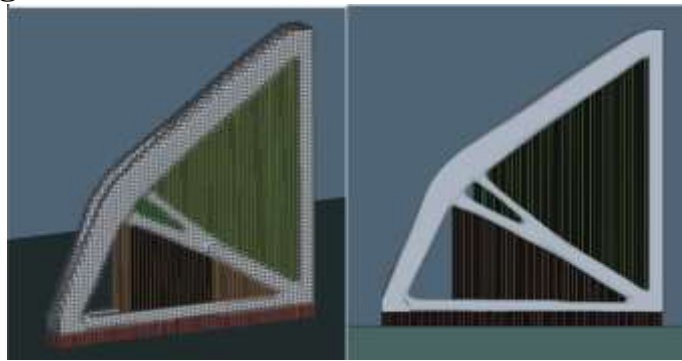


Figura 6.12 - Desvio de Superfície [mm] na 1ª iteração e 2ª iteração da Peça 1 a 180°, no software Simufact Additive;

Quanto ao desvio de superfície da primeira iteração, o valor mínimo é de -0.40mm; o máximo é de 0.35mm. Na segunda iteração, o valor mínimo é de -0.04mm; o máximo é de 0.09mm.

- **PEÇA 2 original a 0°**



*Figura 6.13 - Peça 2 a 0° no software Simufact Additive;*

Na primeira iteração os valores do deslocamento total mínimo é de 0.00mm e o valor máximo é de 0.71mm. Em relação aos valores da tensão efetiva, os valores mínimos são de 0.00MPa, enquanto o valor máximo é de 1021.26MPa.

Na segunda iteração, o deslocamento total vai desde o valor mínimo de 0.00mm e o valor máximo de 0.70mm. Na tensão efetiva, os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 MPa ao valor máximo de 987.12MPa.

Duas iterações para otimizar uma distorção igual a 0.1mm numa distorção máxima de 0.489806mm, valores aceitáveis de 0.1mm e o efeito degrau máximo são de 10. Uma segunda iteração onde a distorção máxima é 0.0715mm, valores aceitáveis de 0.1mm e os passos máximos são de 10.

O Desvio de superfície da primeira iteração tem valores mínimos de -0.41mm e valores máximos de 0.29mm. Na segunda iteração a otimização para uma distorção igual a 0.1mm tem valores mínimos de -0.05 e valores máximos de 0.08mm.

## **Resultados**

- Quantidade de material utilizado:

$$d = \frac{m}{V}$$

$$\Leftrightarrow (7770 * 0.99) = \frac{m}{20448.8 + 12214.5}$$

$$m = 32663.3 * 0.007692 = 251.24g$$

- Tempo de impressão: 1m 29seg

$$20448.8 \text{ mm}^3 = \text{Volume da peça}$$

12214.5  $mm^3$  = Volume dos suportes

Notas:

- Pode-se optar por exportar um resultado de malha de voxel como \*.arc ou \*.spr ou um resultado de superfície como \*.stl ou \*.arc.

## Resultados – 1ª iteração

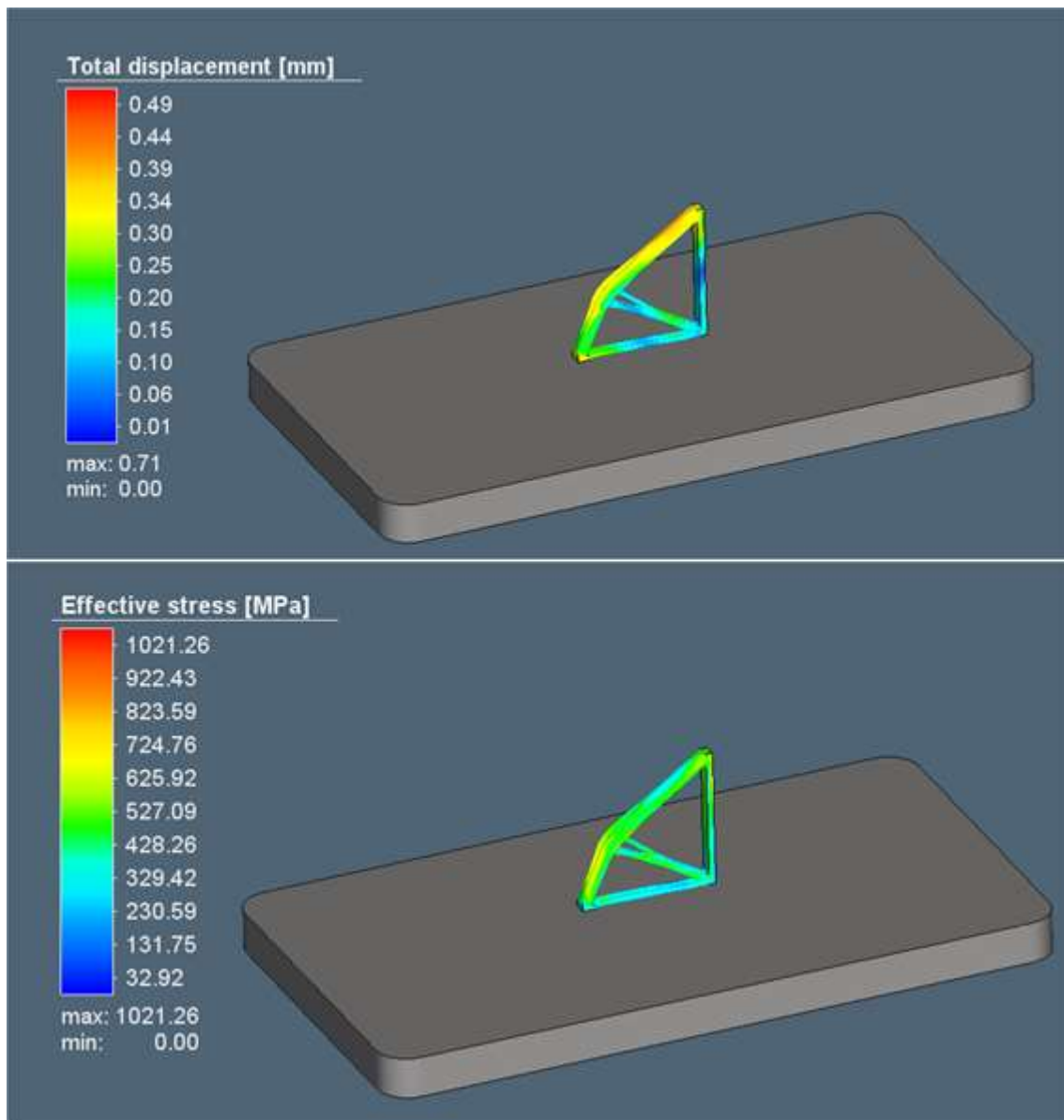


Figura 6.14 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 1ª iteração da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;

Em relação ao Deslocamento total da primeira iteração os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 ao valor máximo de 0.71mm. A tensão efetiva da primeira iteração, o valor mínimo é 0.0 MPa e o valor máximo é 1021.26 MPa.

## Resultados – 2ª iteração

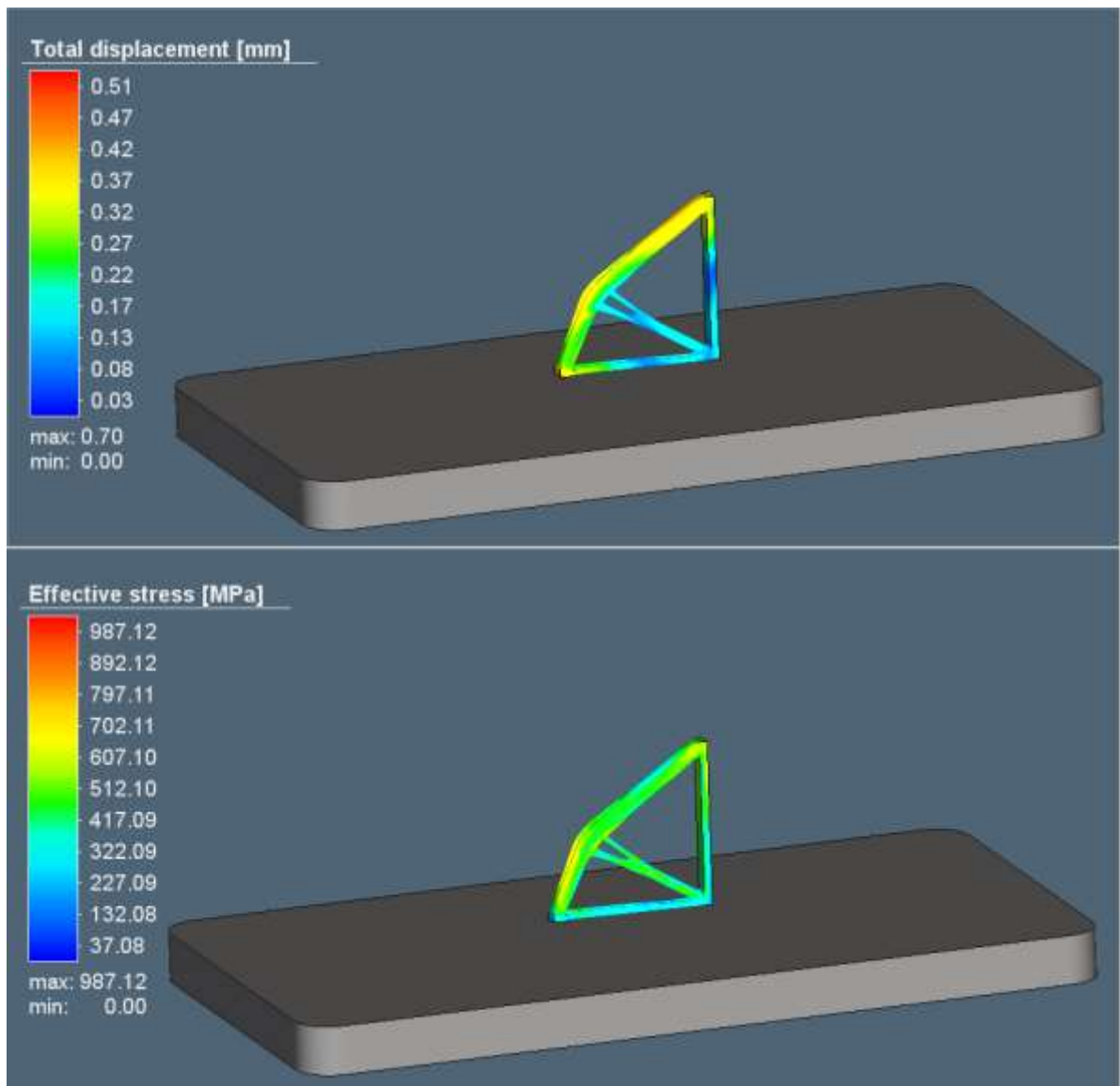


Figura 6.15 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 2ª iteração da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;

Em relação ao Deslocamento total da segunda iteração os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 ao valor máximo de 0.70mm. A tensão efetiva da segunda iteração, o valor mínimo é 0.0 MPa e o valor máximo é 987.12 MPa.

## Resultados – 2 iterações para otimizar para uma distorção igual a 0.1 mm

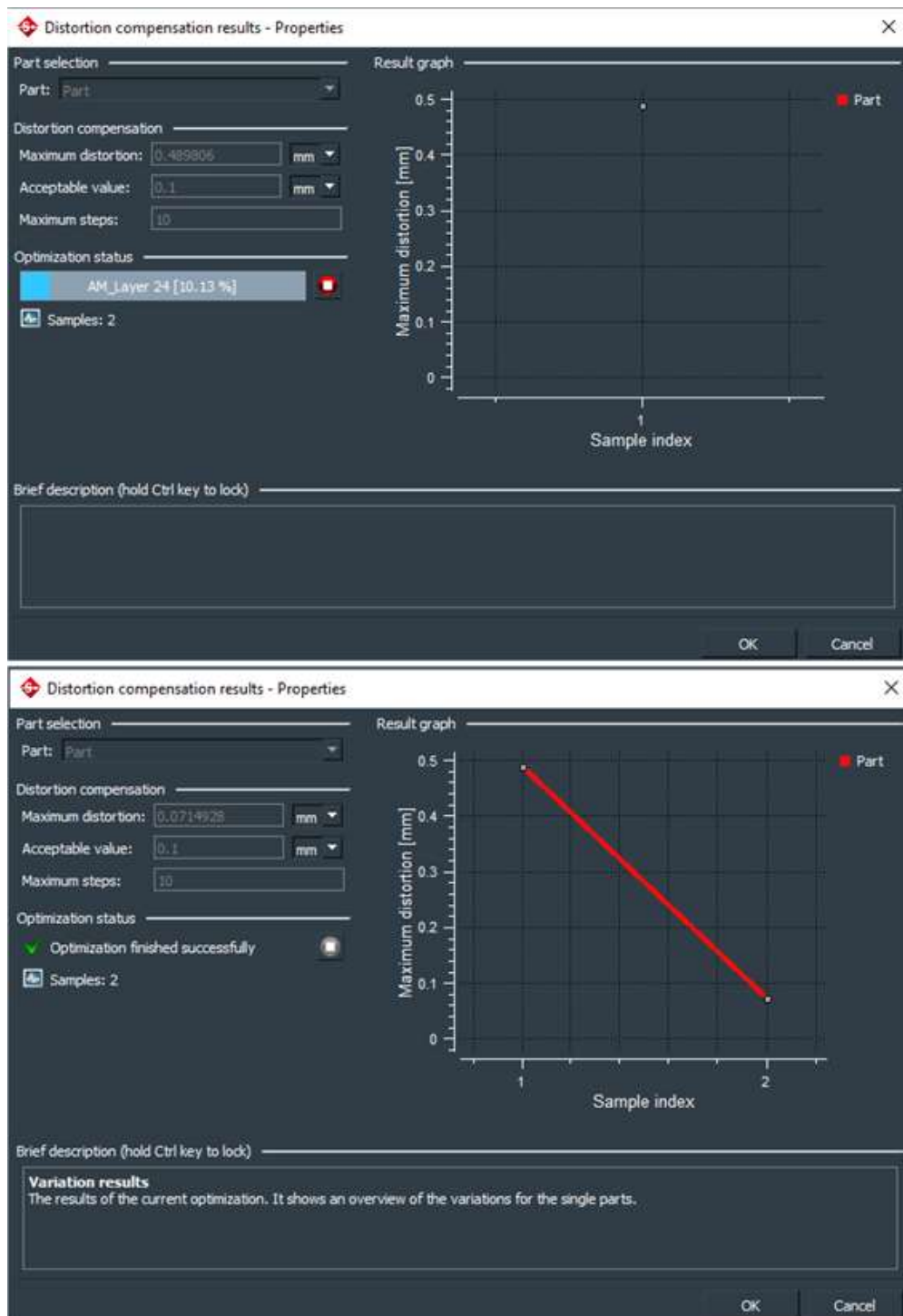


Figura 6.16 - Resultados de distorção e compensação da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;

Em relação à compensação da distorção, a primeira iteração, o máximo de distorção é de 0.489806mm, o valor aceitável é de 0.1mm e o efeito degrau máximo é de 10. Quanto à segunda iteração, a compensação da distorção, o máximo de distorção é de 0.0714928mm, o valor aceitável é de 0.1mm e o efeito degrau máximo é de 10.

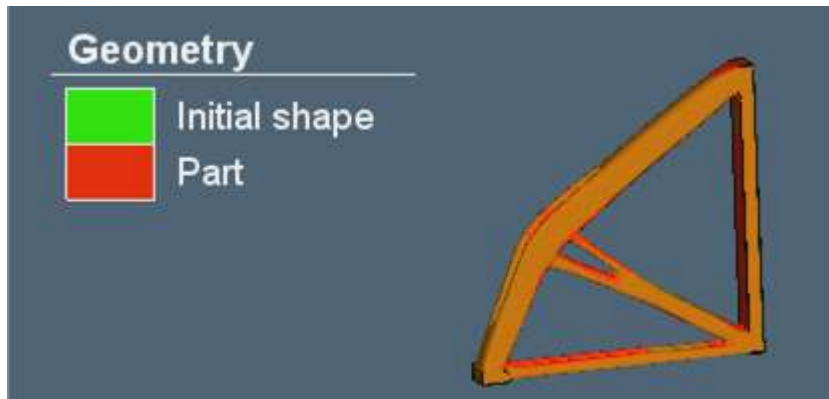


Figura 6.17 - Geometria da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;

### 1ª iteração Vs 2ª iteração com distorção de 0.1 mm

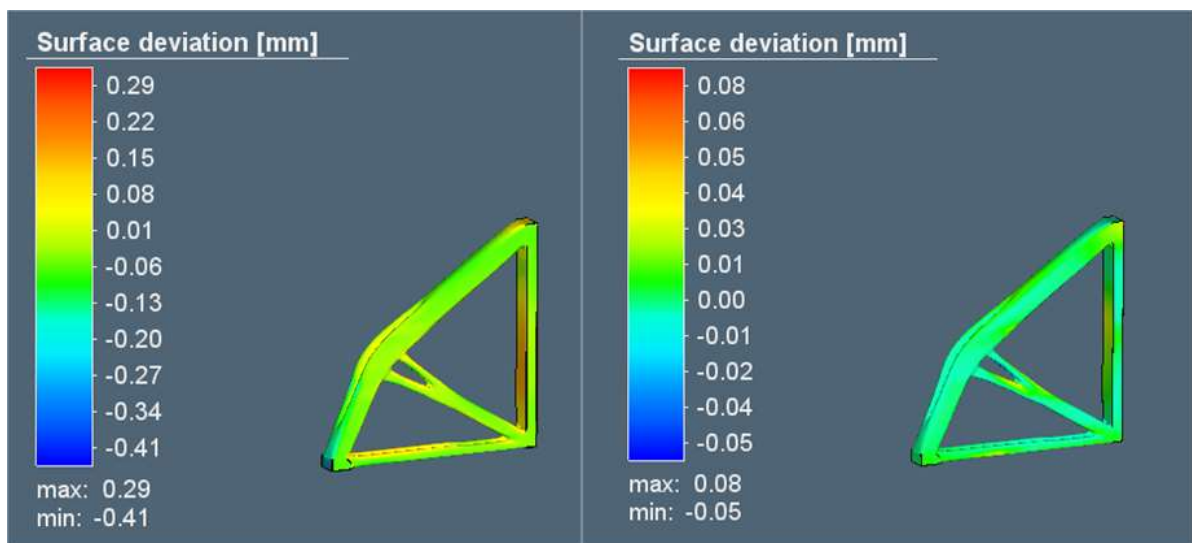


Figura 6.18 - Desvio de superfície [mm] da Peça 2 a 0°, no software Simufact Additive;

Quanto ao desvio de superfície da primeira iteração, o valor mínimo é -0.41mm e o valor máximo é de 0.29mm. Em relação à segunda iteração, o valor mínimo é de -0.05mm; o máximo é de 0.08mm.

- **PEÇA 2 a 0° - otimização dos suportes**

Na otimização de suportes, o raio mínimo de suportes é de 0.1mm, a fração mínima de volume é de 10.0%. Quanto às propriedades da malha, o tipo de Malha é uniforme, tamanho do voxel x/y/z é 1.4mm, fração mínima da peça é de 5.0%, enquanto a fração mínima para os suportes é de 1.0%.

Nas estatísticas da Malha o voxel é de 10682, os nós são 16109 e as camadas são 72.

As propriedades e informações da geometria da peça, as faces são 225620, a superfície é 91698.3mm<sup>2</sup>, o volume é de 10644.9mm<sup>3</sup>.

Em relação às propriedades e informações da geometria dos suportes, as facetas são 258260, a superfície é 91051.6mm<sup>2</sup>, o volume é de 10276.1mm<sup>3</sup>.

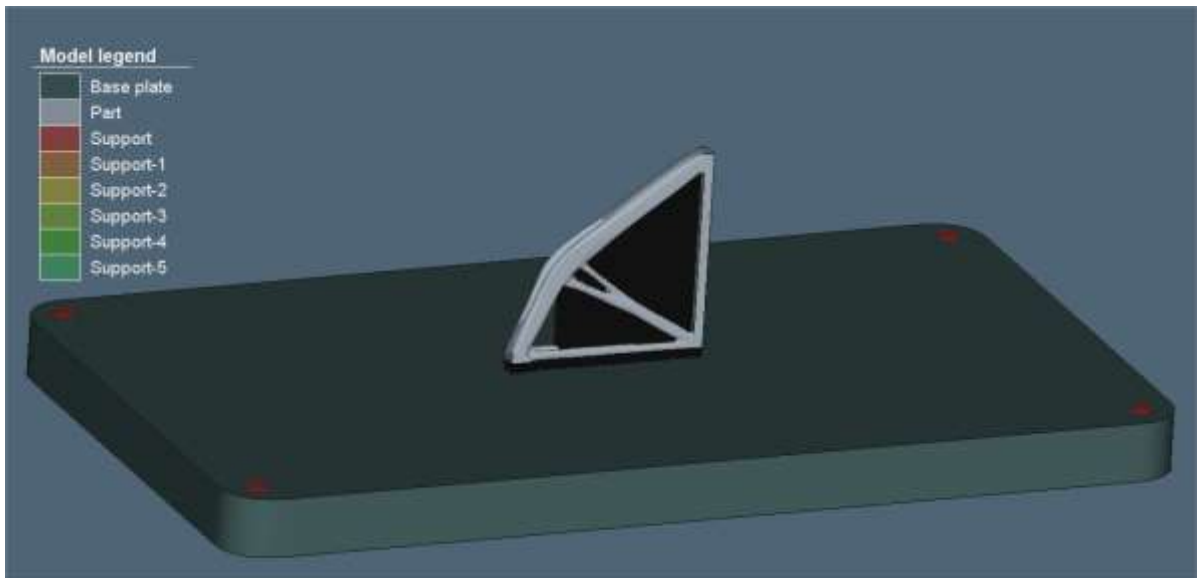


Figura 6.19 - Otimização dos suportes da Peça 2 a 0° no software Simufact Additive;

## Resultados

- Quantidade de material utilizado:

$$d = \frac{m}{V}$$

$$\Leftrightarrow (7770 * 0.99) = \frac{m}{20448.8 + 12214.5}$$

$$m = 32663.3 * 0.007692 = 251.24g$$

- Tempo de impressão: 1m 29seg

$$20448.8 \text{ mm}^3 = \text{Volume da peça}$$

$$12214.5 \text{ mm}^3 = \text{Volume dos suportes}$$

Notas:

- Pode-se optar por exportar um resultado de malha de voxel como \*.arc ou \*.spr ou um resultado de superfície como \*.stl ou \*.arc.

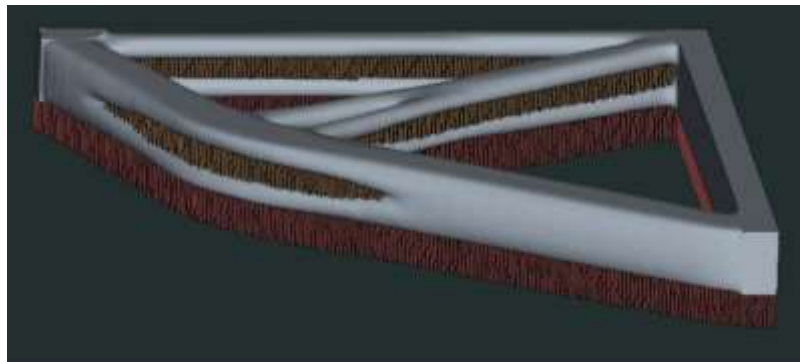
- **PEÇA 2 a 90°**

A segunda iteração a otimizar uma distorção igual a 0.0383349mm, numa distorção máxima é 0.0959644mm, e o efeito de grau máximo é de 10.

Quanto ao deslocamento total da primeira iteração, o valor mínimo é de 0.00mm; o valor máximo é de 0.79mm, enquanto a Tensão efetiva, o valor mínimo é 0.00 e o máximo é de 929.73 MPa. Na segunda iteração deslocamento total da primeira iteração, o valor mínimo é de 0.00mm; o valor máximo é de 0.82mm, enquanto a Tensão efetiva, o valor mínimo é de 0.00 enquanto o valor máximo é de 924.74MPa.

Quanto ao desvio de superfície da primeira iteração, o valor mínimo é de -0.56mm; o máximo é de 0.39mm. Na segunda iteração e com uma distorção igual a 0.1mm, o valor mínimo é de -0.02 e o máximo é de 0.05mm.

Em relação à compensação da distorção, o máximo de distorção é de 0.0383349mm, o valor aceitável é de 0.1mm e os máximos de degraus é de 10.



*Figura 6.20 - Peça 2 a 90° no software Simufact Additive;*

Ao contrário da Peça 1, em que as duas posições da Peça têm diferentes suportes onde se torna evidente a escolha da posição para desperdiçar o menor material possível, na Peça 2 vai ser analisada a otimização dos suportes de forma a concluir qual a posição onde se consegue otimizar e gastar o menos material possível.

## **Resultados**

- Quantidade de material utilizado:

$$d = \frac{m}{V}$$

$$\Leftrightarrow (7770 * 0.99) = \frac{m}{20448.8 + 10261.8}$$

$$m = 30710.6 * 0.007692 = 236.23g$$

- Tempo de impressão: 27seg

$$20448.8 \text{ mm}^3 = \text{Volume da peça}$$

$$10261.8 \text{ mm}^3 = \text{Volume dos suportes}$$

Notas:

- Pode-se optar por exportar um resultado de malha de voxel como \* .arc ou \* .spr ou um resultado de superfície como \* .stl ou \* .arc.

## Resultados – 1ª iteração

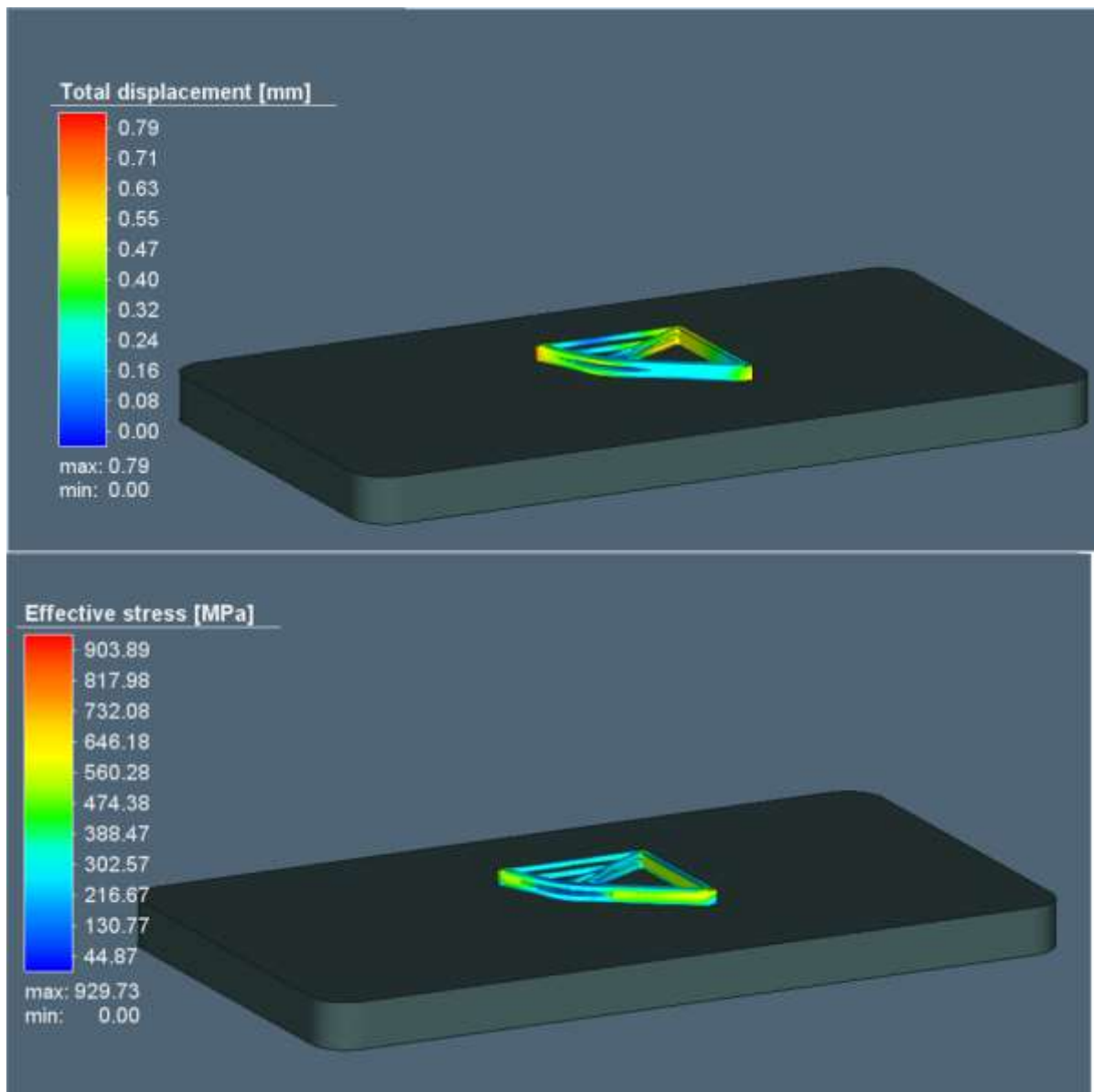


Figura 6.21 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 1ª iteração da Peça 2 a 90°, no software Simufact Additive;

Em relação ao Deslocamento total da primeira iteração os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 ao valor máximo de 0.79mm. A tensão efetiva da primeira iteração, o valor mínimo é 0.0 MPa e o valor máximo é 929.73 MPa.

## Resultados – 2ª iteração

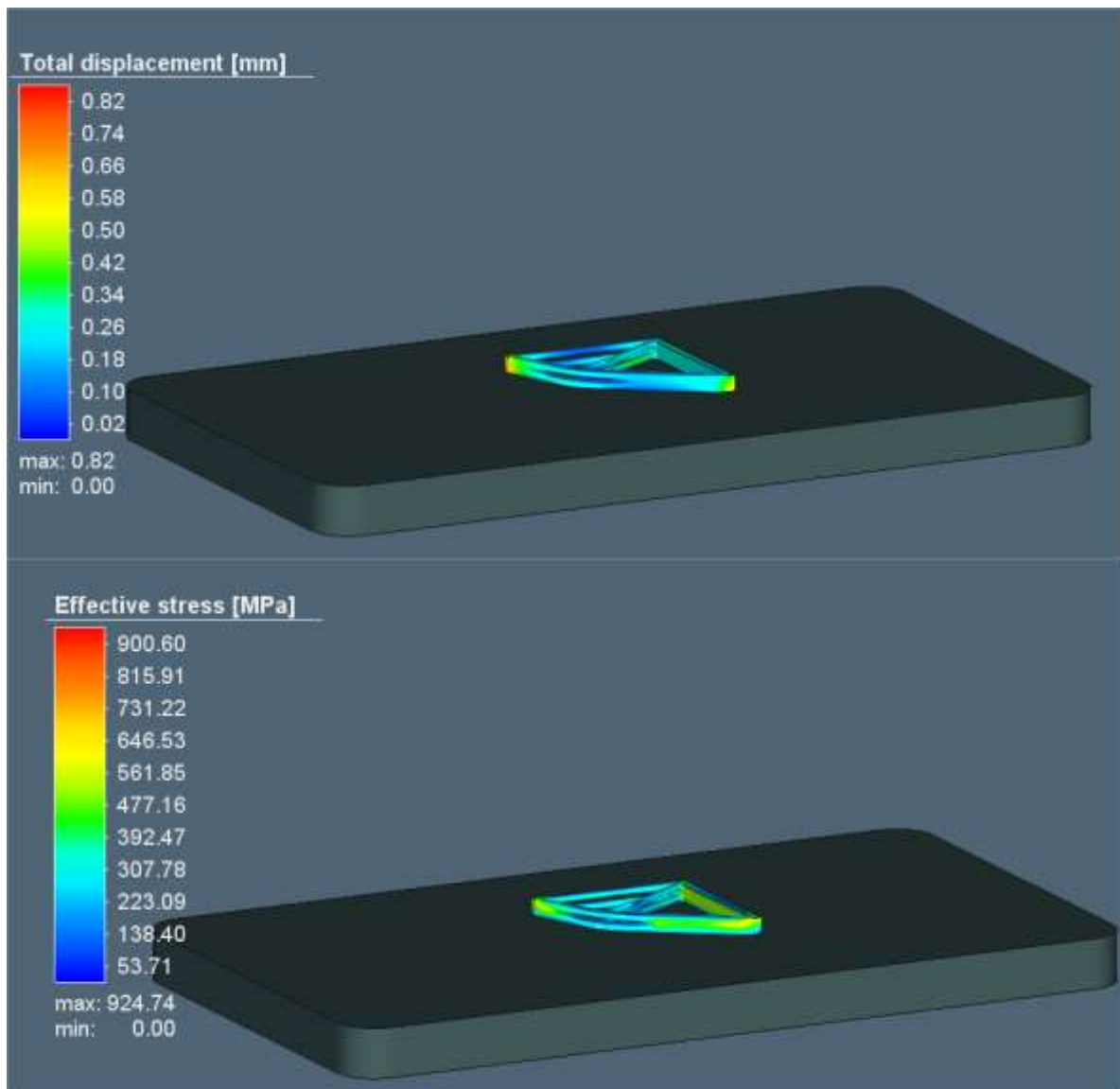


Figura 6.22 - Deslocamento total [mm] e Tensão efetiva [MPa] na 2ª iteração da Peça 2 a 90°, no software Simufact Additive;

Em relação ao Deslocamento total da segunda iteração os valores vão desde o valor mínimo de 0.00 ao valor máximo de 0.82mm. A tensão efetiva da segunda iteração, o valor mínimo é 0.0 MPa e o valor máximo é 924.74 MPa.

## Resultados – 2 iterações com distorção de 0.1 mm

Os resultados de distorção e compensação da Peça2 a 0° são: máxima distorção é de 0.0383349mm, valor aceitável é de 0.1mm e o efeito degrau máximo é de 10.

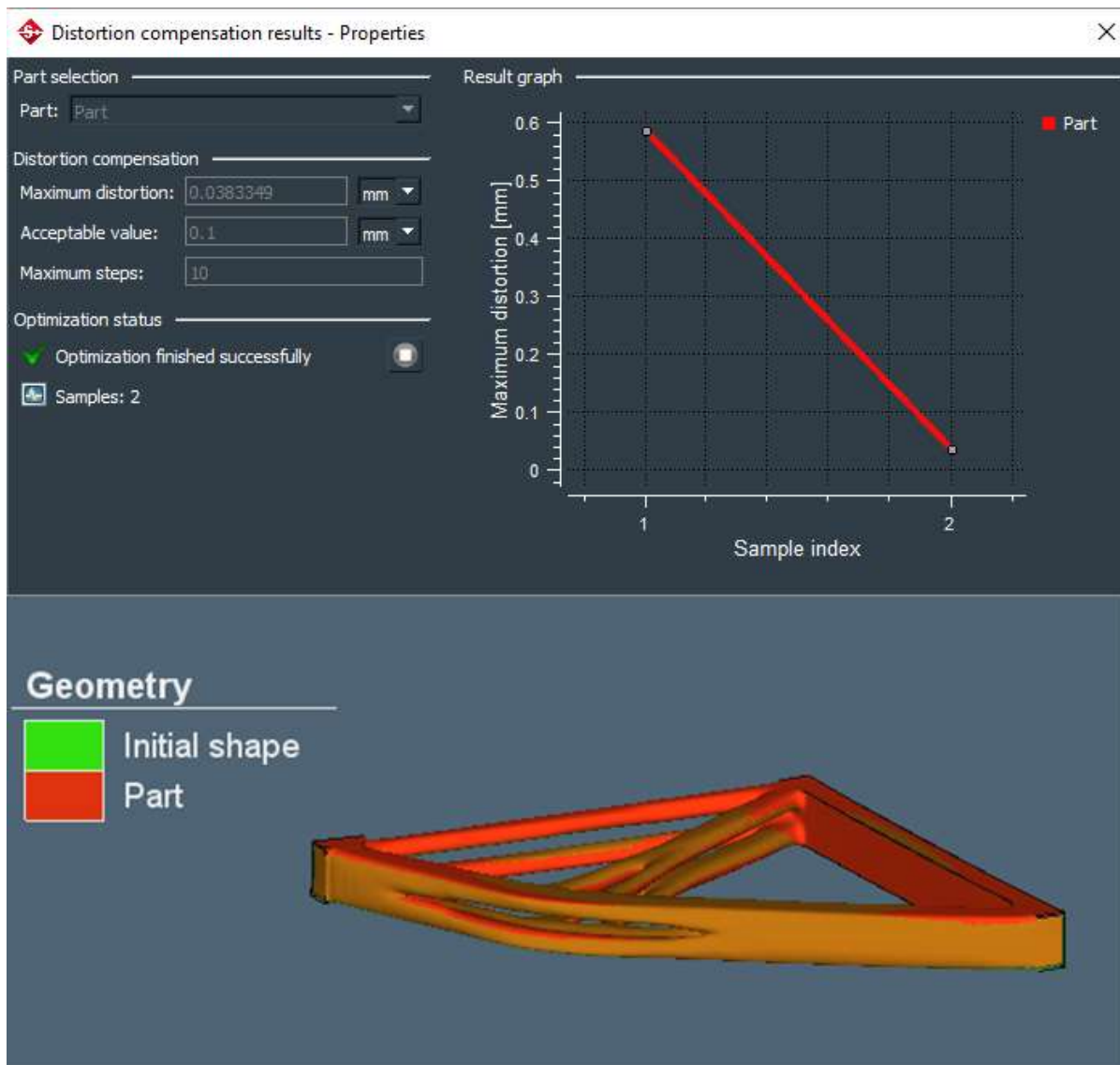


Figura 6.23 - Resultados de distorção e compensação da Peça 2 a 90° e da sua geometria, no software Simufact Additive;

## Resultados 1ª iteração Vs 2ª iteração com distorção de 0.1 mm

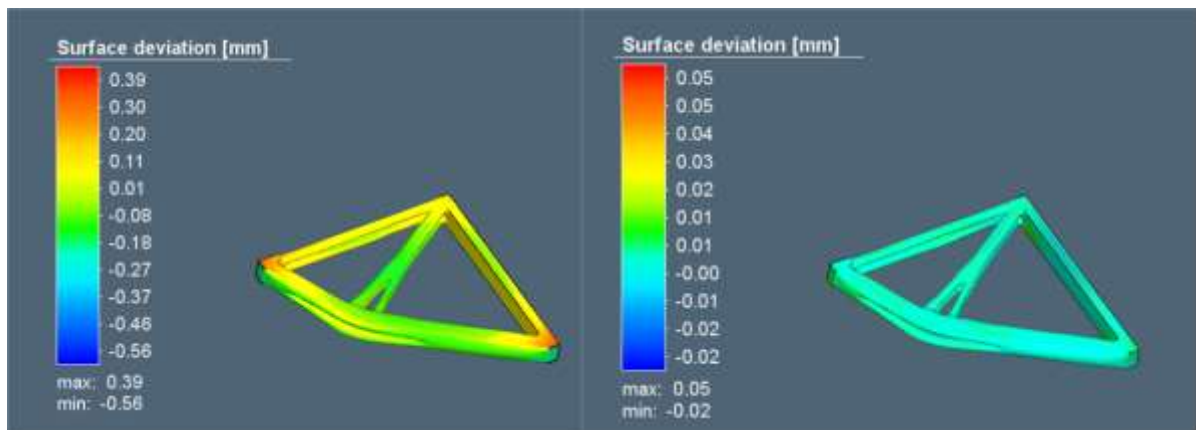


Figura 6.24 - Desvio de Superfície [mm] na 1ª iteração e 2ª iteração da Peça 2 a 90°, no software Simufact Additive;

Quanto ao desvio de superfície da primeira iteração, o valor mínimo é de -0.56mm; o máximo é de 0.39mm. Na segunda iteração, o valor mínimo é de -0.02mm; o máximo é de 0.05mm.

- **PEÇA 2 a 0° - otimização**

As propriedades e informações da geometria da peça, as faces são 258260, a superfície é 91051.6mm<sup>2</sup>, o volume é de 10276.1mm<sup>3</sup>.

O Volume de suportes iniciais é de 10644.9mm<sup>3</sup>

Os Suportes otimizados é de 10276.1mm<sup>3</sup>

Quanto às propriedades da malha da peça 2 a 90°, o tamanho dos elementos é de 1.26262mm, enquanto a estatística da superfície da malha, o número de elementos é de 388152 enquanto o número de nós são de 194062.

Em relação aos parâmetros da malha da placa, o tamanho do voxel é de 5.73062mm, e o número de camadas são 3.

A Peça2 a 90° tem um total de 6 suportes.

### **Análise dos Resultados no *Simufact Additive***

- **PEÇA 1**

A Peça 1 a 0° tem no total 9 suportes enquanto a Peça 1 a 180° tem no total 5 suportes e, portanto, não é necessário otimizar os suportes pois a Peça 1 a 180° vai gastar o menos material possível nos respectivos suportes.

- **PEÇA 2**

A Peça 2 terá de ser analisado o volume de cada posição para se concluir qual a posição em que se gasta o menos material possível nos respectivos suportes. Assim sendo vai se realizar a otimização dos suportes para se concluir qual a posição em que se gasta menos material possível.

### **Análise crítica dos Resultados no *Simufact Additive***

Na Peça 1, pode-se a analisar vários parâmetros em relação às análises efetuadas nas duas posições da Peça 1.

Em relação à Peça 1 original a 0° (posição original), foram utilizados 9 suportes, número de elementos de 151146 e número de nós 75577 enquanto a quantidade de material utilizado

foi de 1953g, com um tempo de impressão de 1 minuto e 16 segundos com um total de 236505mm<sup>3</sup> e volume de suportes de 17450.7 mm<sup>3</sup>.

Em relação ao deslocamento total da 1ª iteração, os valores mínimos são 0.00 e os valores máximos são de 1.28 mm, ou seja, o erro da peça tem valores mínimos e localizados na base onde foram inseridos os constrangimentos

Em relação à Peça 1 a 180° (posição inversa), foram utilizados 5 suportes, número de elementos de 151146 e número de nós 75577 enquanto a quantidade de material utilizado foi de 1831.7g, com um tempo de impressão de 1 minuto e 14 segundos com um total de 2365.05mm<sup>3</sup> e volume de suportes de 1631.95 mm<sup>3</sup>.

Em relação ao deslocamento total da 1ª iteração, os valores mínimos são 0.00 e os valores máximos são de 0.75 mm, ou seja, o erro da peça tem valores mínimos e localizados ao longo da Peça.

Pode-se concluir que a melhor posição para se imprimir é a Peça 1 a 180° , pois esta posição utiliza menos suportes, e o seu erro é menor em relação à posição a 0°(posição original).

Na Peça 2, pode-se analisar vários parâmetros em relação às análises efetuadas nas duas posições da Peça 2.

Em relação à Peça 2 a 90°, foram utilizados 9 suportes, número de elementos de 388152 e número de nós 194062 enquanto a quantidade de material utilizado foi de 236.23g, com um tempo de impressão de 27 segundos com um total de 20448.8mm<sup>3</sup> e volume de suportes de 10261.8 mm<sup>3</sup>.

Em relação ao deslocamento total da 1ª iteração, os valores mínimos são 0.00 e os valores máximos são de 0.79 mm, ou seja, o erro da peça tem valores mínimos e localizados na extremidade da Peça.

Em relação à Peça 2 original a 0°, foram utilizados 6 suportes, localizados no interior da peça, ou seja, são utilizados suportes complexos, número de elementos de 388152 e número de nós 194062 enquanto a quantidade de material utilizado foi de 251.24g, com um tempo de impressão de 1 minuto e 29 segundos com um total de 20448.8mm<sup>3</sup> e volume de suportes de 12214.5 mm<sup>3</sup>.

Em relação ao deslocamento total da 1ª iteração, os valores mínimos são 0.00 e os valores máximos são de 0.71 mm, ou seja, o erro da peça tem valores mínimos e localizados ao longo da peça.

Comparativamente às duas posições da Peça 2, a melhor peça para se imprimir é a Peça 2 original a 0°, apesar de alguma complexidade dos suportes. A Peça 2 original a 0° utiliza menos suportes e tem menor erro na sua impressão portanto é a melhor solução.

## Conclusões

O presente projeto consistiu na análise e otimização de suportes no *software Simufact Additive*, e assim reduzir custos nos suportes e obter peças corretas na primeira tentativa (calcular a deformação, tensões residuais, etc.), minimizar o material desperdiçado (com a otimização da sua geometria e dos seus suportes) e melhorar a qualidade do produto que permite calcular nas peças metálicas a deformação, tensões residuais e a qualidade das peças.

Numa primeira fase, fez-se a análise topológica no *SolidEdge*, com a realização do estudo generativo, sendo que para além deste último estudo, fez-se o *Manufacturing settings* para melhorar o estudo a nível de qualidade.

Posteriormente foi realizado a análise no *software Simufact Additive*, com as propriedades direcionais para depois decidir qual é a melhor posição, e onde se poupa mais material; quantos suportes vão ser utilizados em cada análise de cada peça, e por fim, fazer a otimização dos suportes e concluir mediante a análise do volume de cada suporte, em qual análise gasta o menos material possível.

Os resultados mostram que das duas peças que se analisou, a primeira peça apenas é necessária mudar a posição de impressão para diminuir o número de suportes, mas a segunda peça analisada, já é preciso fazer a otimização dos suportes a partir do *Simufact Additive*.

Em relação à Peça nº 1 a conclusão é óbvia, pois a Peça 1 a 180° precisa de muitos menos suportes, logo gasta menos material por utilizar menos suportes. Quanto à Peça 2, e dada a complexidade dos suportes, fez-se a sua otimização nas duas posições estudadas para se concluir qual a posição em que gasta menos material. Assim sendo pode-se concluir que a Peça 2 a 90° (ou seja na posição deitada), o volume da peça com os suportes iniciais é de 10644.9 mm<sup>3</sup> enquanto o volume da peça com os suportes otimizado é de 10276.1 mm<sup>3</sup> havendo de facto uma diminuição e uma otimização dos suportes. A melhor solução para a impressão da Peça 1 é a 180° (posição inversa), pois esta posição utiliza menos suportes, e o seu erro é menor em relação à posição a 0° (posição original).

Em relação à Peça 2 original o volume da 1ª iteração é 12214.5 mm<sup>3</sup> enquanto o volume da 2ª iteração é 13722.8mm<sup>3</sup>. Este aumento prende-se com o facto de os suportes serem muito complexos, e o *software* compensar a distorção que a peça está sujeita.

Como era de esperar, a melhor solução é a Peça 2 original a 0°, pois utiliza menos suportes, e tem um erro menor

Ao longo deste projeto além do objetivo de analisar e otimizar os suportes das duas peças, nas várias análises, são acompanhadas diversas propriedades (deslocamento total, tensão efetiva, desvio de superfície, resultados de distorção e compensação) para se poder retirar várias conclusões sobre cada Peça.

Em suma, este projeto demonstra a grande importância da fabricação aditiva nos dias de hoje, no qual esta evolução tem de ser acompanhada pelo rigor e exigência dos produtos e dos *softwares* envolventes. A indústria ao usufruir e recorrer à impressão 3D, pode permitir maior competitividade no mercado global que hoje existe, e pode assim evitar o desperdício de material nomeadamente nos suportes, tal como é estudado neste projeto.

Para uma melhor otimização de suportes na produção de componentes metálicos por processos aditivos, nomeadamente na tecnologia SLM, o *software Simufact Additive*, é um software que analisa em várias posições, as propriedades de dois componentes metálicos, analisa e otimiza os suportes utilizados com várias iterações com e sem distorções da peça, para compensar o empeno da peça.

A fabricação aditiva, nomeadamente a Impressão 3D, não tem apenas um impacto no futuro do quotidiano e da indústria pois já está presente nas indústrias e nas empresas. Na indústria não se pode olhar para a Fabricação aditiva como um produto acabado ou processos finais, mas um processo intermédio onde pode revolucionar a produção e o desenvolvimento do produto, mas que tem necessariamente de ter um acabamento final (por exemplo para cortar os suportes e retificar ou polir certas zonas funcionais).

Acompanhando esta transformação é preciso também que o *software* nomeadamente software CAD e FEA acompanhem essa evolução para projetar, analisar, simular e otimizar todo o processo de impressão 3D.

### **Trabalhos Futuros**

O objetivo deste projeto é analisar e otimizar os suportes, mas para trabalhos futuros pode-se abordar outros pontos de forma a melhorar a análise da fabricação aditiva, nomeadamente: analisar cada um dos suportes com e sem empenos e distorções com a possibilidade de mudar as posições, aumentar ou diminuir os suportes; analisar a gestão de Produção nomeadamente

os tempos de fabrico e comparar com os Processos convencionais; analisar o controlo de qualidade; qualidade Estrutural Homogeneidade/Densidade Fratura/Fadiga.

# Bibliografia

- [1] - H. & K. and Team. Additive Manufacturing Research Group. *University, Loughborough*, acessado a 28 de Agosto de 2019 e disponível em: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing>
- [2] - “Tutorial: Rapid Prototyping Technologies”, acessado a 26 de Agosto de 2019 e disponível em [https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/521-Tutorial\\_WeiRen\\_de\\_Agosto\\_de\\_.pdf](https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/521-Tutorial_WeiRen_de_Agosto_de_.pdf)
- [3] - H. & K. and Team. Additive Manufacturing Research Group. *University, Loughborough*, acessado a 20 de Setembro de 2019 e disponível em: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing>
- [4] - “Lecture Notes on Rapid Prototyping”, acessado a 26 de Agosto de 2019 e disponível em: [https://www.cet.edu.in/noticefiles/258\\_Lecture%20Notes%20on%20RP-ilovepdf-compressed.pdf](https://www.cet.edu.in/noticefiles/258_Lecture%20Notes%20on%20RP-ilovepdf-compressed.pdf)
- [5] - ESPERTO, L.; OSÓRIO, A Rapid Tooling: Sinterização Directa por Laser de Metais. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Lisboa, v. 15, p. 117-124, 2008.
- [6] - Disponível em <http://site.designoteca.com/2012/02/02/fabricacao-digital-processos-aditivos-ou-impresao-3d/>, acessado a 09 de Agosto de 2019
- [7] - Bauer, Joe; Malone, Patrick; “Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing”
- [8] - Herrera, Alejandro Cervantes; “Design to Cost for Additive Manufacturing – Optimizing added value on the whole process chain of AM”
- [9] - Hällgren, Sebastian; Pejryd, Lars; Ekengrenb, Jens; “Additive Manufacturing and High Speed Machining - Cost comparison of short lead time manufacturing methods”, 26th CIRP Design Conference
- [10] - Hotza, D., Prototipagem rápida de pilhas a combustível de óxido sólido, Artigo da revista Matéria v. 14, n. 4, pp. 1101 – 1113. Florianópolis, 2009.

- [11] - Jesus, M., Desenvolvimento de um compósito à polímero-metal à base de resina epóxi para aplicações em moldes rápidos, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Florianópolis, 2005.
- [12] - Bertol, L., Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no *design* de implantes personalizados, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Porto Alegre, 2008.
- [13] - Reimert, Michel; “The impact of Additive Manufacturing on the life cycle cost of one-off parts at Thales Hengelo”; University of Twente; May 26, 2017
- [14] - Neto, Rui; Alves, Jorge Lino; Duarte, Teresa; Gomes, Frederico; Utilização da impressão 3D na produção de peças metálicas; INEGI, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
- [15] - Mirzendehtel, Amir M; Suresh, Krishnan; Support structure constrained topology optimization for additive Manufacturing; Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin, Madison, WI 53706, USA
- [16] - Relvas, Carlos; “O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital”; Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda; 2018. Acedido a 23 de Setembro de 2019 e disponível em: <https://www.booki.pt/userfiles/files/loja/preview/9789898927026.pdf>;
- [17] - Kamrani & Nasr; “A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system”, Volume 51, Issue 3, November 2006;
- [18] - Machado, Ana Cláudia; “Influência das condições de processamento da fusão seletiva por laser (SLM) nas propriedades mecânicas do aço 316 L”; Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto; Coimbra, Julho, 2014
- [19] - “Parâmetros do processo de fabricação por fusão seletiva a Laser – Selective Laser Melting (SLM)”. , acedido a 23 de Setembro de 2019 e disponível em: [https://dadospdf.com/download/parametros-do-processo-de-fabricacao-por-fusao-seletiva-a-laser-selective-laser-melting-slm-5a4c31fcb7d7bcab670a373e\\_pdf](https://dadospdf.com/download/parametros-do-processo-de-fabricacao-por-fusao-seletiva-a-laser-selective-laser-melting-slm-5a4c31fcb7d7bcab670a373e_pdf).
- [20] - Disponível em <https://pt.techinfus.com/cifrovaya/printer/3d-vidy.html>, acedido a 23 de Setembro de 2019

- [21] - Disponível em <https://www.hisour.com/pt/3d-printing-40597/>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [22] - Disponível em [http://www.cenfim.pt/doc/eventos/2015/3d\\_pecas\\_metalicas\\_jorge\\_lino.pdf](http://www.cenfim.pt/doc/eventos/2015/3d_pecas_metalicas_jorge_lino.pdf), acessado a 23 de Setembro de 2019
- [23] - Karunakaran, A. B. K. P. ; Suryakumar, S.; Dembinski, Lucas; Taillandier, Georges; "Rapid manufacturing of metallic objects", Rapid Prototyping J., vol. 18 [4], pp. 264-80, 2012.
- [24] - Disponível em <https://br.3dsystems.com/3d-printers/prox-sls-6100>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [25] - Disponível em <http://3dcriar.com.br/v2/sls/>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [26] - Disponível em <https://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/imprensa-3d-dmls-185938.html>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [27] - Disponível em <https://codi.pt/recursos/>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [28] - Disponível em <https://www.directindustry.com/pt/prod/arcam/product-19734-1440499.html>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [29] - Disponível em <http://www.havetech.com.br/imprensa-3d-lom-laminated-object-manufacturing/>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [30] - Disponível em <http://mecatronicageral.blogspot.com/2014/09/avanco-da-tecnologia-industrial.html>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [31] - Disponível em <https://www.codi.pt/stratasys-lanca-imprensa-3d-sla/>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [32] - Disponível em <https://www.directindustry.com/prod/slm-solutions/product-114591-1184401.html>, acessado a 23 de Setembro de 2019
- [33] - Disponível em <https://www.siemens-home.bsh-group.com/pt/>, acessado a 24 de Agosto de 2019
- [34] - Disponível em <https://www.mssoftware.com/>, acessado a 24 de Agosto de 2019

- [35] - Disponível em <https://www.autodesk.com.br/solutions/finite-element-analysis>, acessado a 24 de Agosto de 2019
- [36] - Disponível em <https://solidedge.siemens.com/pt-br/free-software/overview/>, acessado a 24 de Agosto de 2019
- [37] - Disponível em <https://addit3d.bilbaoexhibitioncentre.com/eu/erakusketaria/COMHER/produktua/SLM-500-HL/15911/?idioma=ESA>, acessado a 27 de Setembro de 2019
- [38] - Disponível em <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/AutoCAD-Core/files/GUID-D9C3BFA6-C6F6-44B8-8BCC-8CB99A7C697B-htm.html>, acessado a 27 de Setembro de 2019
- [39] - Disponível em <https://sempreupdate.com.br/impressora-3d-vs-cnc-quais-as-diferencas/>, acessado a 24 de Agosto de 2019
- [40] - Disponível em <https://web.fe.up.pt/~falves/AM%20met%C3%A1lico.pdf>, acessado a 24 de Agosto de 2019
- [41] - Disponível em - <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>, acessado a 24 de Agosto de 2019
- [42] - Disponível em <https://i1.wp.com/www.hisour.com/wp-content/uploads/2018/10/Selective-laser-melting.jpg?fit=960%2C720&ssl=1&resize=1280%2C720>, acessado a 24 de Agosto de 2019
- [43] - Disponível em <http://3dlife.pt/impressao-3d/sla-stereolithography/> , acessado a 24 de Agosto de 2019
- [44] - Disponível em [https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Imagem-detalhada-do-material-metalico-utilizado-no-processo-SLM-MARQUES-2013\\_fig1\\_279886704](https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Imagem-detalhada-do-material-metalico-utilizado-no-processo-SLM-MARQUES-2013_fig1_279886704) , acessado a 24 de Agosto de 2019
- [45] - Disponível em <https://solidedge.siemens.com/pt-br/solutions/products/3d-design/next-generation-design/generative-design/>, acessado a 27 de Agosto de 2019
- [46] - Disponível em <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Solid-Edge-Knowledge-Base/Optimize-Your-Model-for-Casting-and-Milling-in-Solid-Edge/tab/511926>, acessado a 27 de Agosto de 2019