



**Lucas Yuzo Kakumoto de Melo**

**Avaliação numérica de uma viga biapoiada  
obtida pelo método de otimização topológica**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador: Anderson Pereira

Rio de Janeiro  
Julho de 2019

## Agradecimentos

Eu gostaria de expressar minha gratidão aos meus pais, Orion e Alice, e ao meu irmão, Daniel, que sempre me apoiaram e estiveram do meu lado em todos os momentos. Muito obrigado pela ajuda, incentivo e investimesto durante todos estes anos. Espero um dia poder proporcionar o mesmo para meus filhos.

Agradeço ao professor Anderson Pereira, pela orientação sem a qual este trabalho não teria sido possível. Eu tive flexibilidade para seguir meus interesses e ele sempre me manteve na direção correta.

Por fim, agradeço ao Thiago Lopes que se disponibilizou a me ajudar durante as análises numéricas, e agradeço a Mariana que juntamente com o Renan me ajudaram a imprimir o modelo.

## **Resumo**

### **Avaliação numérica de uma viga biapoiada obtida pelo método de otimização topológica**

A manufatura aditiva aliada à otimização topológica contribui positivamente para o desenvolvimento de estruturas com design inovador e com peso reduzido. No entanto, algumas características deste processo, como por exemplo, a necessidade de material de suporte, podem comprometer o comportamento mecânico da estrutura final. Neste trabalho, o Método de Otimização Topológica será aplicado ao projeto de uma viga com o objetivo de obter a máxima rigidez para um dado volume de material. Além disso, a estrutura será avaliada numericamente utilizando um modelo em elementos finitos através do programa ANSYS, incorporando não linearidades físicas e geométricas.

### **Palavras-chave**

Otimização topológica; Manufatura aditiva; Estruturas lattice.

## **Abstract**

### **Numerical evaluation of a simple supported beam obtained by the topology optimization method**

The additive manufacturing coupled with topology optimization contributes positively to the development of lightweight structures and innovative design. However, some features of this process, such as the necessity of support material, may compromise the behaviour of the final structure. In this work, the Topology Optimization Method will be applied to the design of a beam with the objective of obtaining the maximum stiffness for a given volume of material. In addition, the structure will be evaluated numerically using a finite element model through the ANSYS program, incorporating physical and geometric nonlinearities.

## **Keywords**

Topology optimization; Additive manufacturing; Lattice structures.



## Sumário

1	Introdução	8
2	Otimização Topológica	9
2.1	Solidthinking Inspire	11
2.2	Estruturas Lattice	12
2.3	Manufatura aditiva	13
3	Estudo de Caso	16
3.1	Modelagem	16
3.2	Materialise Magics	20
3.3	Fabricação do modelo com otimização topológica	21
4	Resultados e análises	23
4.1	Resultados do <i>software</i> Inspire	23
4.2	Resultados do <i>software</i> ANSYS	26
5	Conclusão	34
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	34

## Lista de figuras

2.1	(a) Otimização paramétrica. (b) Otimização de forma. (c) Otimização topológica. [1]	9
2.2	Metodologia do <i>software</i> Inspire. [2]	11
2.3	Braço de suspensão de um veículo com estruturas lattice. [3]	12
2.4	Letra "T" impressa com e sem material de suporte. [4]	13
2.5	Otimização com restrição de manufatura <i>Overhang</i> 45°. [5]	14
2.6	Impressora Cliever CL2 Pro.	14
2.7	Impressora EOS M 280. [6]	15
3.1	Definição do modelo (dimensões em mm). [7]	16
3.2	Modelo 1/4 de simetria.	17
3.3	Resultado da otimização topológica	18
3.4	Modelo completo.	18
3.5	Resultado da otimização topológica com restrição geométrica.	19
3.6	Modelo com otimização lattice.	19
3.7	Componentes no painel de construção do <i>software</i> Magics.	20
3.8	Componente com material de suporte.	22
3.9	Modelo impresso com material de suporte, e modelo final.	22
4.1	Fator de segurança.	23
4.2	Tensão e compressão.	24
4.3	Deslocamento total.	24
4.4	Tensões pelo critério de falha de von Mises.	24
4.5	Fator de segurança.	25
4.6	Deslocamento total.	25
4.7	Tensões pelo critério de falha de von Mises.	26
4.8	Variação do diâmetro do lattice.	26
4.9	Curva real Tensão x Deformação.	27
4.10	Malha utilizada no modelo.	28
4.11	Tensões pelo critério de von Mises.	28
4.12	Deformações pelo critério de von Mises.	29
4.13	Deslocamento total.	29
4.14	Tensões pelo critério de von Mises.	29
4.15	Regiões com tensões abaixo do limite de escoamento.	30
4.16	Regiões com tensões acima do limite de escoamento.	30
4.17	Deslocamento total no instante anterior ao colapso.	30
4.18	Deslocamento total após a falha.	31
4.19	Tensão x Deformação.	31
4.20	Força x Deslocamento.	32
4.21	Carga de flambagem linearizada.	32
4.22	Instabilidade estrutural.	33
4.23	Deslocamento total para a carga de 100 kN.	33

## Lista de tabelas

3.1	Propriedades do Marage 300 (CL 50WS). [8]	16
3.2	Parâmetros da otimização lattice.	19
3.3	Resultados normalizados.	21
3.4	Parâmetros de impressão.	21

# 1

## Introdução

A otimização de estruturas apresenta grande importância na Engenharia Mecânica. Tal fato é reforçado pelos expressivos requisitos estruturais em diversas indústrias, como na aeronáutica, automobilística e biomédica. Assim, a necessidade de componentes com propriedades ótimas e estruturalmente eficientes se torna fundamental.

Nesse cenário, programas de projeto assistido por computador (CAD) e manufatura assistida por computador (CAM) se apresentam como ferramentas muito atrativas no desenvolvimento de peças otimizadas. Porém, em muitos casos, a otimização gera geometrias complexas ou cavidades internas que são difíceis de serem fabricadas através de métodos tradicionais de manufatura, como usinagem ou moldes de injeção. A não ser que o componente seja montado a partir de várias partes, consumindo muito trabalho e tempo. Devido a isso, com o advento da manufatura aditiva e sua contínua melhoria tecnológica, foi apresentado um método de manufatura capaz de solucionar inovar a fabricação de estruturas. Entretanto, para assegurar o sucesso da fabricação, esta técnica de manufatura possui algumas restrições que podem impedir a elaboração da geometria ideal, como por exemplo a necessidade de material de suporte acima de um certo ângulo definido pela impressora 3D.

A fim de otimizar o componente, inicialmente será apresentado a otimização topológica pois este é o tema central deste projeto, que possibilita projetar peças leves e estruturalmente eficientes. Esta ferramenta beneficia indústrias de diversos setores, ao considerar que projetar componentes que atendam os requisitos de projeto com o menor custo possível é cada vez mais necessário.

Posteriormente, será feito uma introdução, na seção 2.1, do *software* Inspire [5], uma ferramenta para a elaboração de componentes otimizados.

Em seguida, será exibida a estrutura lattice que associada à otimização colabora para a criação de peças com menor peso, boa capacidade de dissipação de energia e bom isolamento térmico. [9]. Logo após será mostrado alguns métodos de impressão 3D utilizados pela indústria.

A modelagem do problema estudado será descrita no capítulo 3, e seguidamente será mostrado o *software* Magics juntamente com o modelo impresso.

Por fim, a seção 4 contém a análise dos resultados obtidos nos *softwares* comerciais Inspire e ANSYS, e em seguida na seção 5 será apresentado a conclusão e indicações de possíveis sugestões para o trabalho realizado.

## 2

### Otimização Topológica

Dentro da otimização estrutural, temos a otimização de forma, a otimização paramétrica e a otimização topológica, em que cada uma possui um foco em diferentes aspectos da estrutura respeitando uma função objetivo, restrições e variáveis de projeto. A otimização paramétrica busca alterar as dimensões do componente. A otimização de forma altera os contornos da peça a fim de encontrar a melhor solução. Comparada com as outras, a otimização topológica fundamenta-se em obter a distribuição de material mais adequada dentro de uma determinada região. Esses tres métodos de otimização podem ser visualizados na Figura 2.1.

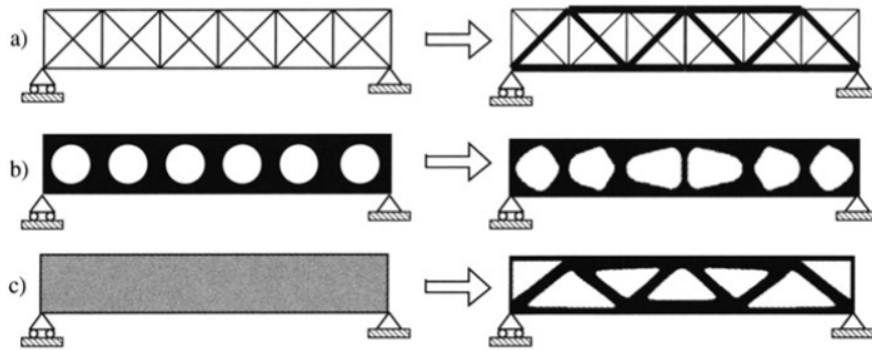


Figura 2.1: (a) Otimização paramétrica. (b) Otimização de forma. (c) Otimização topológica. [1]

De acordo com Bendsøe e Sigmund (2003) [1], durante o *design* da topologia de uma estrutura, é interessante determinar a melhor distribuição de material de acordo com um espaço de projeto, ou seja, avaliar se em determinado ponto deve ter material ou deve permanecer vazio. A estrutura consistirá em regiões com material e regiões sem material, em que os valores intermediários da função densidade serão penalizados. Resumidamente, o material é removido de locais de menor solicitação até ser alcançado uma topologia ideal para suportar a carga. Um modelo popular e muito eficiente é o SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*), em que é utilizado um modelo de rigidez penalizada para interpolar o módulo de elasticidade do material e a equação constitutiva homogenizada é função somente da densidade relativa do material. Além disso, este método foi incorporado em diversos *softwares* comerciais e no programa que será utilizado neste trabalho, que é o Inspire da Altair Engineering Inc. [5]. Um dos problemas que influenciam

significativamente o resultado computacional é o aparecimento de *checkboards* ou tabuleiro de xadrez, que está relacionado com instabilidades numéricas. Um método para contornar esta instabilidade na solução é aumentar a ordem do elemento ou aplicar um filtro que controle a variação das densidades [10].

Assim, torna-se necessário a utilização de métodos numéricos devido à dificuldade de solucionar problemas com relações complexas de tensões e deformações analiticamente e principalmente, quando a geometria, as condições de contorno ou o carregamento não são triviais. Um método renomado e amplamente utilizado para diversos problemas de engenharia é o Método dos Elementos Finitos.

Neste método, um domínio é discretizado em várias partes menores, denominadas de elementos finitos. O conjunto desses elementos é chamado de malha e eles são conectados por nós. Cada elemento possui uma matriz de rigidez e um vetor de forças aplicadas, que são determinadas com base na geometria, no material e nas forças externas. As matrizes de cada elemento são somadas gerando uma matriz de rigidez global e um vetor de forças global, e em seguida, essa matriz é modificada para levar em consideração as condições de contorno previamente definidas. Por fim, um algoritmo numérico resolve um sistema de equações em que os deslocamentos dos nós são as incógnitas. As deformações são calculadas a partir dos deslocamentos, e as tensões são calculadas a partir das deformações. Este método numérico armazena uma grande quantidade de dados, portanto quanto maior a malha, mais tempo será necessário para a solução ser apresentada.

## 2.1

### Solidthinking Inspire

Inspire é uma plataforma de projeto desenvolvida pela Altair Hyperworks, que permite engenheiros criarem componentes estruturalmente eficientes de forma rápida, inteligente e com facilidade [5].

Neste *software*, é definido a geometria do problema através dos recursos CAD, condições de contorno, carregamentos e propriedades do material, com o intuito de ser gerado um modelo em elementos finitos para a otimização do componente. É calculado, mesmo para diversos casos de carga, uma relação de tensões e deformações que possibilita a redução de massa sem comprometer a rigidez através da convergência para uma geometria com a topologia ideal.

De acordo com a Figura 2.2, observa-se a metodologia utilizada pelo *software*. Com o Inspire no início do processo de projeto, levando em consideração as condições descritas anteriormente, já é gerado a estrutura com a topologia mais eficiente. Isso permite uma economia de tempo significativa nas próximas etapas de processamento de uma peça até a manufatura do componente.

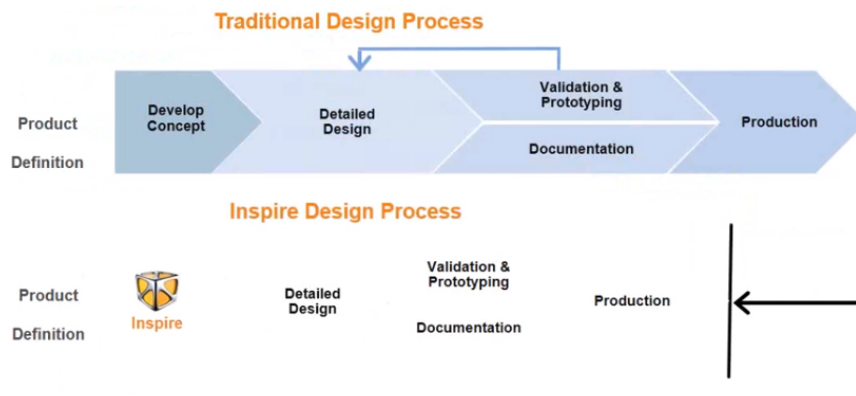


Figura 2.2: Metodologia do *software* Inspire. [2]

Um dos motivos pelo qual este *software* foi escolhido, foi pela capacidade de gerar automaticamente a estrutura lattice dentro de uma região específica. Além disso, um fator relevante é que o programa organiza e dimensiona automaticamente as células lattice de forma inteligente, baseado nas restrições, no material e nas tensões que determinados locais estão recebendo. Esta operação é realizada através de um algoritmo computacional juntamente com o Método dos Elementos Finitos.

Infelizmente, este programa não permite restringir a geometria das estruturas lattice no espaço de projeto, desse modo, não será possível avaliar a necessidade de material de suporte nas regiões que contém lattice pelo *software* comercial Materialise Magics apresentado posteriormente.

## 2.2

### Estruturas Lattice

Estruturas lattice são compostas por mini vigas interligadas estão ficando cada vez mais populares na engenharia, pois associam propriedades mecânicas com orientações geométricas inteligentes para proporcionar maior rigidez, menor peso e boa capacidade de absorção de energia [11]. O preenchimento pode ser variável, ou seja, essas "micro"estruturas metálicas podem ter diferentes diâmetros e a maior parte do volume é ocupado por vazios de ar. No entanto, para que a impressora consiga imprimir sem a necessidade de material de suporte, o *software* deve ser capaz de restringir geometricamente as estruturas lattice de acordo com um certo ângulo máximo definido pela impressora. Na seção 2.3, será descrito melhor essas restrições de manufatura manifestadas pelas impressoras 3D.

De acordo com a Figura 2.3, é apresentado um exemplo de um braço de suspensão de um veículo com preenchimento interno variável.

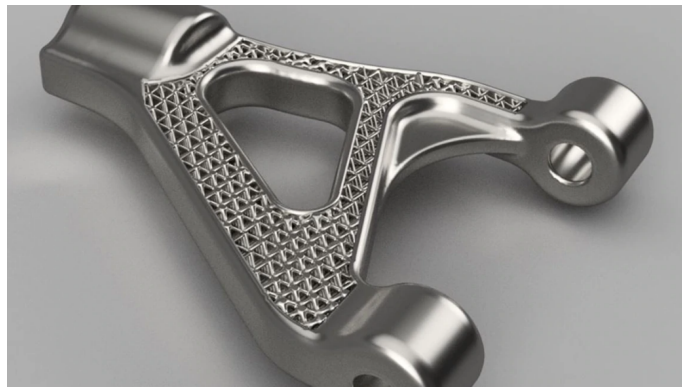


Figura 2.3: Braço de suspensão de um veículo com estruturas lattice. [3]

Uma outra aplicação de lattice que está se tornando bastante popular é no núcleo de estruturas sanduíches. Essas estruturas são compostas pela combinação de um par de faces finas e rígidas com um núcleo leve entre as faces, capaz de transmitir forças axiais e cisalhantes [12].



### 2.3

#### Manufatura aditiva

Desde que a impressora 3D foi inventada no *Massachusetts Institute of Technology* em 1995, diversas pesquisas e estudos foram realizados para aprimorar esta tecnologia que permite a manufatura de estruturas jamais imaginadas. Os processos mais comuns de impressão 3D são: modelagem por fusão e deposição (FDM), estereolitografia (SLA) e a sinterização direta de metal a laser (DMLS). Neste trabalho, será apresentado somente os conceitos da FDM e DMLS.

Ao ser fabricado um componente que possui alguma saliência ou alguma parte projetada para fora com certo ângulo, normalmente de  $45^\circ$  com a base, sem nenhum material estrutural abaixo, é necessário a inclusão de material de suporte nessa região para manter uma boa qualidade de impressão do componente e principalmente evitar o colapso do mesmo. Esta restrição de manufatura aumenta o tempo de produção da peça, prejudica o acabamento superficial do local em que o suporte será removido na etapa de pós-processamento, e gera um gasto significativo de matéria prima. Observa-se na Figura 2.4, a necessidade de material de suporte para garantir a qualidade de impressão.



Figura 2.4: Letra "T" impressa com e sem material de suporte. [4]

Deste modo, para resolver as questões mencionadas acima, vários métodos numéricos foram apresentados para assegurar a fabricação do componente. Uma proposta, seria realizar uma otimização, de forma a eliminar os impactos negativos referentes às transformações no campo de densidade [13]. Uma outra alternativa, seria utilizar a ferramenta *Overhang* do *software* Inspire com o objetivo de restringir a inclinação do ângulo de saliência, limitando a geometria durante a otimização topológica para minimizar a necessidade de material de suporte. Este recurso é apresentado na Figura 2.5 aliado à otimização.

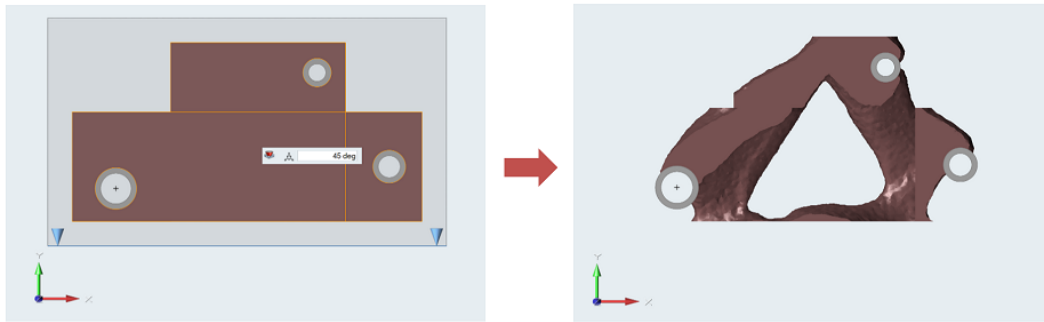


Figura 2.5: Otimização com restrição de manufatura *Overhang* 45°. [5]

### 2.3.1

#### Modelagem por fusão e deposição (FDM)

A tecnologia de modelagem por fusão e deposição ou fabricação de filamentos fundidos (FFF), é o processo industrial mais comum, pois é a tecnologia mais acessível com menor custo e condições de operação mais simples. Neste processo é utilizado a extrusão de um termoplástico em uma temperatura elevada, tipicamente no formato de um filamento, e depositado em uma plataforma em camada por camada.

O Laboratório de Fabricação Digital no Tecgraf/PUC-Rio possui uma impressora 3D com esta tecnologia, conforme a Figura 2.6.

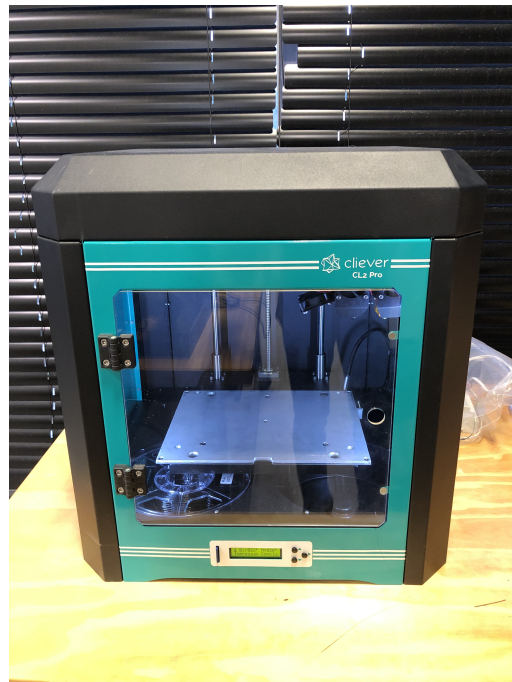


Figura 2.6: Impressora Cliever CL2 Pro.

### 2.3.2

#### Sinterização direta de metal a laser (DMLS)

Uma das impressoras 3D capaz de produzir modelos em metal possui a tecnologia DMLS, muito popular nos dias atuais pela fácil prototipagem. É utilizado um laser que seletivamente derrete a matéria-prima, pó tipicamente na ordem de 40 micrometros, de acordo com a geometria da peça previamente definida, e pela estratégia de varredura específica da máquina. Uma vez que uma camada de pó é fundida, a mesa de impressão se move para baixo, e uma nova camada de matéria prima é depositada para então o processo se repetir. Um fator relevante, são as restrições de manufatura como a necessidade de suportes devido à certos ângulos inclinados, normalmente de  $45^\circ$  (com o plano da base de impressão) como foi apresentado anteriormente. Além disso, este método de manufatura pode gerar gradientes térmicos significativos podendo ocasionar distorções como ondulações ou deformações, e até mesmo rachaduras na peça em regiões do componente com baixa rigidez. [14]. Por isso, é necessário um profundo conhecimento dos parâmetros de impressão para que os componentes finais não sejam danificados.

A Figura 2.7 representa um impressora 3D com tecnologia DMLS disponível na PUC-Rio.



Figura 2.7: Impressora EOS M 280. [6]

### 3

## Estudo de Caso

Neste capítulo, serão descritos todos os procedimentos utilizados para a modelagem do problema proposto neste trabalho.

### 3.1

#### Modelagem

A peça utilizada para o processo de otimização será uma viga biapoiada com uma carga de 100 kN centrada, conforme a Figura 3.1.

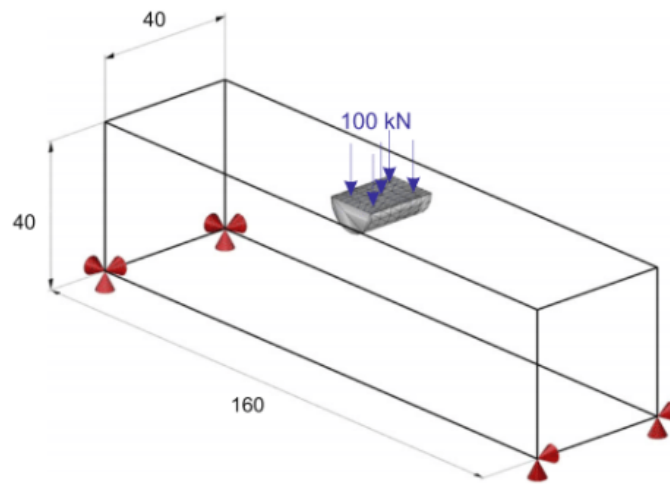


Figura 3.1: Definição do modelo (dimensões em mm). [7]

Este componente possui a massa de 2,058 kg, em que o material usado é o Marage 300 (CL 50WS) cujas propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades do Marage 300 (CL 50WS). [8]

Propriedades	Valor
Tensão de ruptura	1650 MPa
Limite de escoamento	1550 MPa
Módulo de Young	200 GPa
Densidade	8024 kg/m <sup>3</sup>
Coeficiente de Poisson	0,25
Condutividade térmica	20 W/mK

Para realizar as devidas simulações e reduzir o tempo computacional, o componente foi simplificado para um modelo de 1/4 de simetria e então

inserido as condições de contorno e um força de 25 kN, conforme pode ser verificado na Figura 3.2.

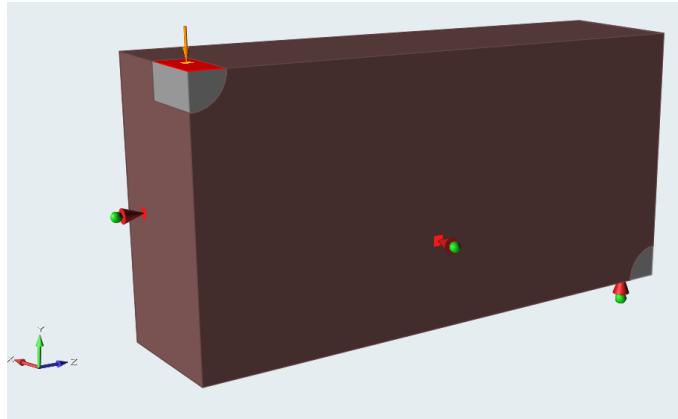
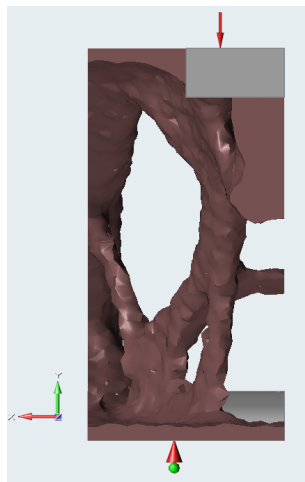


Figura 3.2: Modelo 1/4 de simetria.

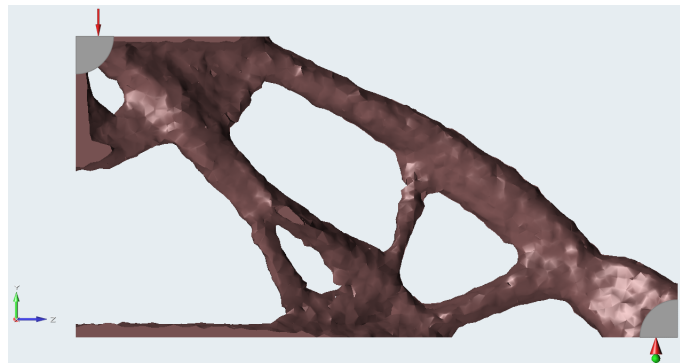
### 3.1.1

#### Otimização topológica

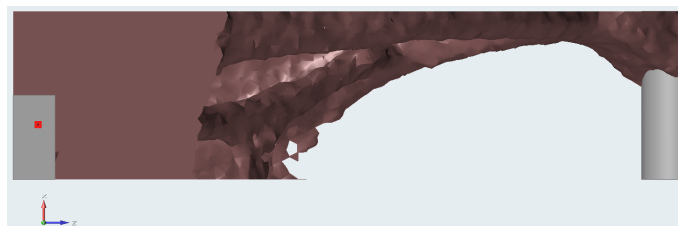
A seguir, iniciou-se o processo de otimização topológica neste modelo para a obtenção da geometria estruturalmente mais eficiente para as condições de contorno e carregamentos previamente definidos. O objetivo foi maximizar a rigidez sujeito à uma restrição de 14% de fração de volume final. O resultado desta otimização pode ser visualizado na Figura 3.3.



3.3(a): Vista frontal.



3.3(b): Vista lateral.



3.3(c): Vista superior.

Figura 3.3: Resultado da otimização topológica

Em seguida, aplicou-se as ferramentas *Polynurbs* e *Mirror* do programa Inspire para suavizar e gerar o modelo completo, tendo como resultado aproximadamente 271 gramas de massa final.

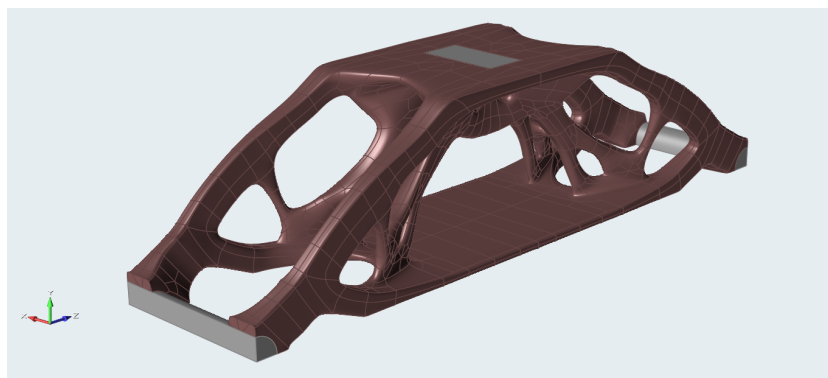


Figura 3.4: Modelo completo.

### 3.1.2

#### Otimização topológica com restrição de manufatura e otimização lattice

A fim de minimizar a necessidade de material de suporte, foi realizada uma nova simulação em que a viga inicial foi otimizada novamente pelo *software*

Inspire. Entretanto, foi incluído um controle de manufatura de  $45^\circ$  denominado *Overhang* descrito anteriormente na seção 2.3. O resultado pode ser visualizado na Figura 3.5.

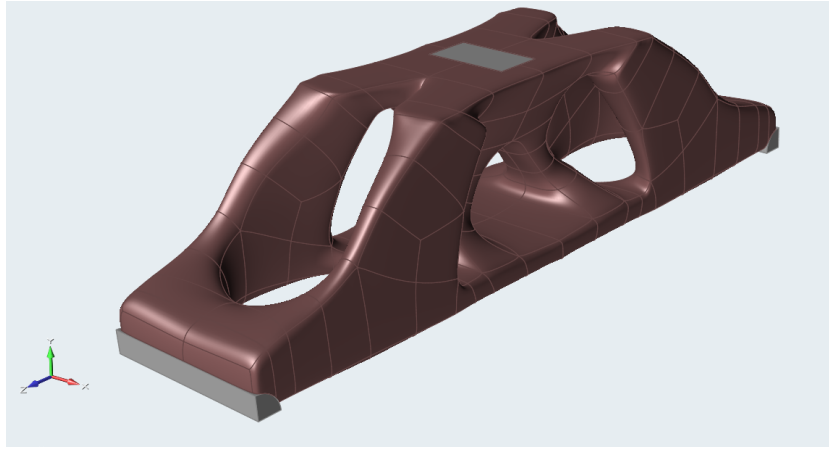


Figura 3.5: Resultado da otimização topológica com restrição geométrica.

A massa da peça descrita acima é de 657,36 gramas. Para uma comparação coerente entre o comportamento mecânico dos dois modelos, deve-se gerar geometrias com massas próximas entre si. Com este intuito, foi utilizado neste componente uma otimização lattice com o objetivo de maximizar a rigidez, e foram empregados os parâmetros de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros da otimização lattice.

Parâmetros	Valor
Comprimento do lattice	6 mm
Diâmetro mínimo	1 mm
Diâmetro máximo	2 mm
Preenchimento	60 %
Alvo de massa	271 g

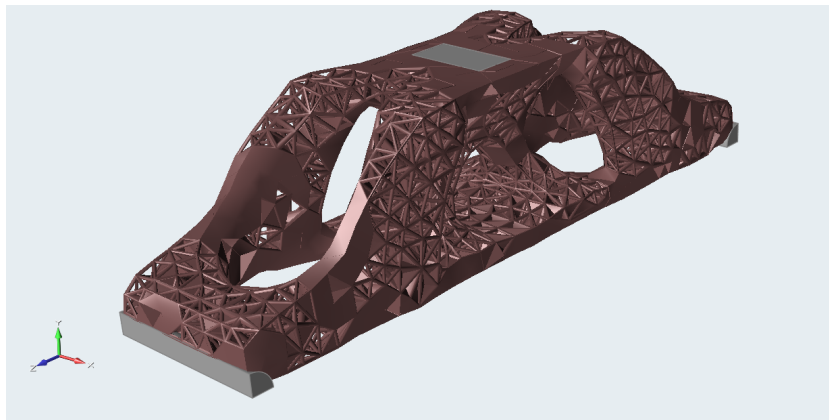


Figura 3.6: Modelo com otimização lattice.

Observa-se que não foi possível alcançar a massa final desejada, porém ela ficou próxima em relação ao outro modelo no valor de 275 gramas. Devido às limitações de espaço de projeto, este componente possui um desempenho pior quando comparado com a outra peça otimizada livremente.

## 3.2

### Materialise Magics

O *software* CAM utilizado para analisar as peças para serem fabricadas, foi o Materialise Magics [15]. Primeiramente os arquivos CAD foram convertidos para o formato *Standard Triangle Language* (STL) e então importados no programa. O próximo passo foi corrigir erros nesses arquivos STL, tais como impurezas geométricas ou defeitos durante a conversão. Esta etapa é muito importante para evitar falhas durante a manufatura e manter uma boa qualidade de impressão. Em seguida, os componentes foram apropriadamente orientados numa representação da plataforma de impressão da impressora 3D, e gerados os devidos materiais de suporte para ambos os componentes otimizados. Por fim, caso haja a intenção de fabricar as peças, essas informações devem ser convertidas em fatias e contornos para que a impressora consiga ler e verificar o êxito do processo. [16].

Para realizar as análises, foi inserido no *software* o cenário da impressora EOS M 280, que possui as seguintes dimensões de bancada de impressão: 250 x 250 x 325 mm. As peças possuem dimensões suficientes para que a impressão desses componentes fosse realizada simultaneamente. Além disso, gerou-se a quantidade necessária de material de suporte recomendado pelo *software* Magics, para que durante a construção não ocorra o colapso dos componentes e que o calor consiga ser dissipado para evitar deformações. Através da Figura 3.7, pode-se constatar visualmente a grande diferença da quantidade de material de suporte gerado automaticamente para os dois modelos propostos.

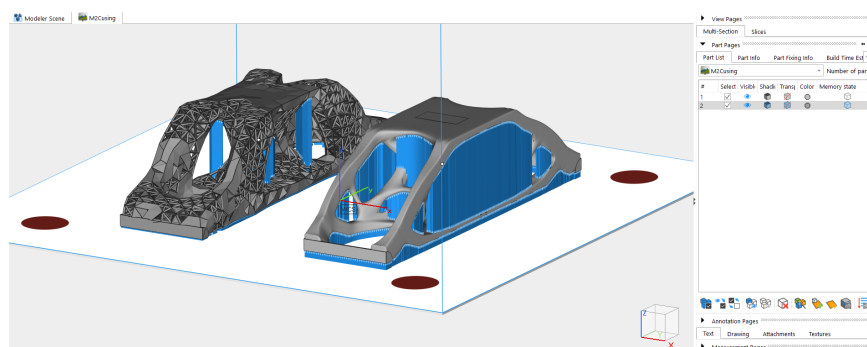


Figura 3.7: Componentes no painel de construção do *software* Magics.



Configurou-se no programa Magics a impressora de sinterização a laser (EOS M 280) para gerar os modelos de impressão. O tempo de impressão e a quantidade de material são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Resultados normalizados.

	Otimização Topológica	Otimização Lattice
Massa	1	1,01
Material de suporte	1	0,12
Tempo estimado de impressão	1	1,28
<i>Compliance</i>	1	1,43

Apesar da enorme quantidade de material de suporte do modelo com otimização topológica sem restrição de manufatura, o tempo de digitalização deste componente é bem menor do que o da outra peça, ocasionando em um menor tempo de impressão.

### 3.3

#### Fabricação do modelo com otimização topológica

Através da tecnologia de impressão 3D FDM, foi possível imprimir um dos modelos que será avaliado numericamente neste trabalho. O componente foi impresso utilizando o material poliácido láctico (PLA) pela impressora apresentada na subseção 2.3.1. Os parâmetros de impressão foram definidos pelo *software* Cliever Studio [17] e estão presentes na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros de impressão.

Propriedades	Valor
Quantidade de preenchimento	50 %
Espessura das paredes	2 mm
Altura entre camadas	0,15 mm
Ângulo de ativação do suporte	15°

Neste programa, é possível obter uma visualização completa do modelo na bancada de impressão e então gerar automaticamente o material de suporte, segundo a Figura 3.8.

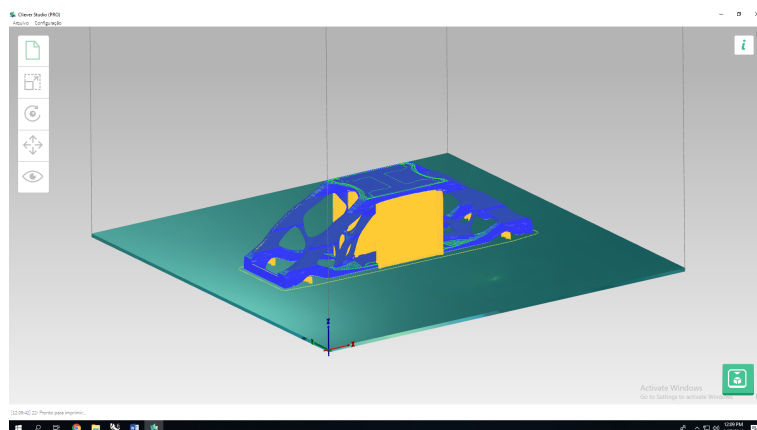


Figura 3.8: Componente com material de suporte.

Para produzir o modelo otimizado topologicamente, foi utilizado 19,7 metros de filamento de PLA, e a impressão durou aproximadamente 12 horas. De acordo com a Figura 3.9, o componente com a massa final de 40 gramas será apresentado.

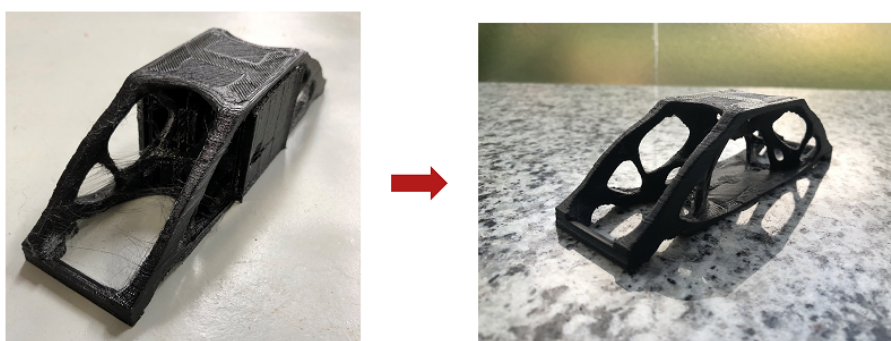


Figura 3.9: Modelo impresso com material de suporte, e modelo final.

É interessante ressaltar um malefício, apresentado na seção 2.3, na impressão da peça com material de suporte. Contata-se o consumo adicional de material e tempo para fabricar os devidos suportes, a não uniformidade do acabamento superficial do componente após a retirada do suporte e consequentemente, a necessidade de um pós processamento do modelo.

## 4

### Resultados e análises

Primeiramente, serão apresentadas as análises realizadas no programa Inspire para os dois modelos. Porém, para realizar uma análise mais completa e exata das tensões e defomações será utilizado o *software* comercial ANSYS para elaborar às devidas simulações.

#### 4.1

##### Resultados do *software* Inspire

Por meio deste programa, é possível obter diversos tipos de resultados como por exemplo: deslocamento, fator de segurança, tensões de von Mises e quando utilizado a otimização lattice, pode-se ter uma interessante visualização do diâmetro do lattice constituído em cada região do componente. É válido ressaltar, que este *software* realiza análises somente dentro do regime elástico linear.

##### 4.1.1

##### Modelo com otimização topológica

É exibido na Figura 4.1 o fator de segurança em diversas regiões da peça. As áreas mais vermelhas possuem tensões mais elevadas e indicam uma provável fratura nessa regiões de acordo com a atuação da carga.

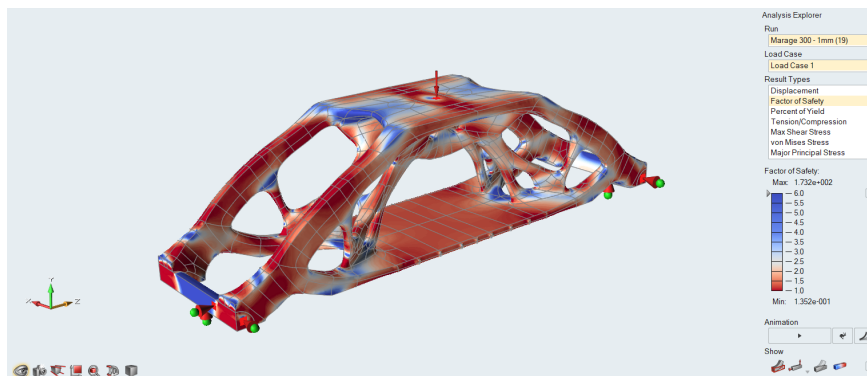


Figura 4.1: Fator de segurança.

A Figura 4.2 retrata as regiões da peça que foram tracionadas e comprimidas durante a simulação.

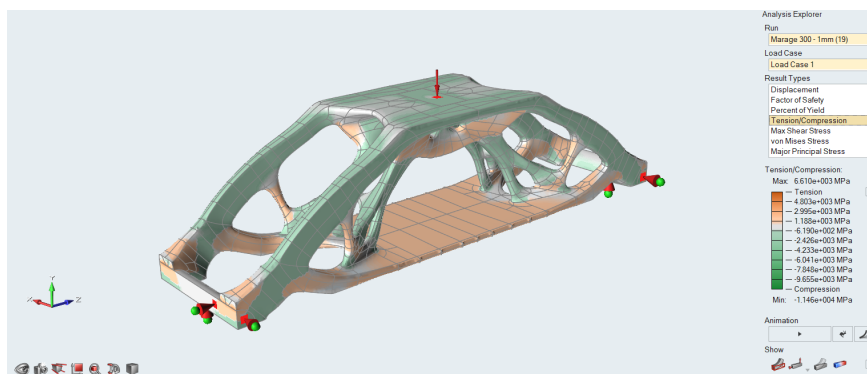


Figura 4.2: Tensão e compressão.

É ilustrado a seguir na Figura 4.3 os deslocamentos da peça. Como previsto, o maior deslocamento é na região central da peça devido à localidade na qual a força está sendo aplicada, com o valor de 1,54 mm.

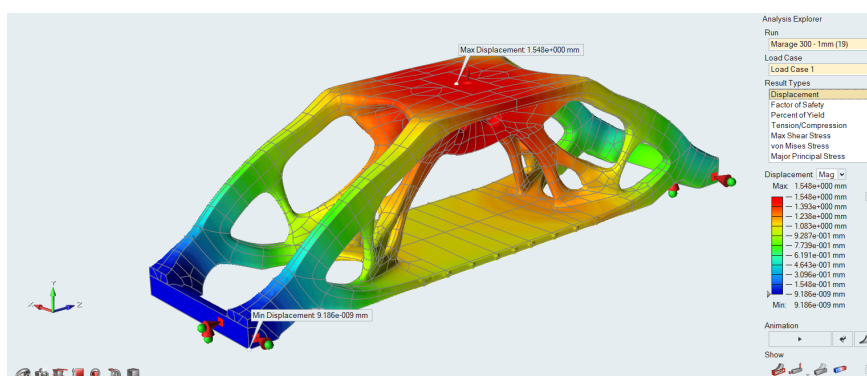


Figura 4.3: Deslocamento total.

Através da Figura 4.4, pode-se observar as tensões na teoria de falha de von Mises. As regiões que apresentariam uma possível falha estrutural, são os locais cujas seções de área transversal estão na maior parte cobertas por altas tensões.

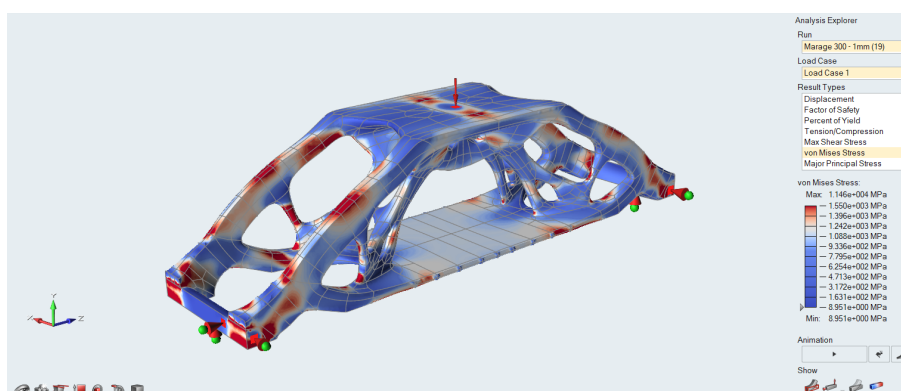


Figura 4.4: Tensões pelo critério de falha de von Mises.

### 4.1.2

#### Modelo com otimização lattice

A seguir, será apresentado os resultados do modelo com otimização lattice.

Na Figura 4.5, é mostrado os diversos valores de fator de segurança no componente.

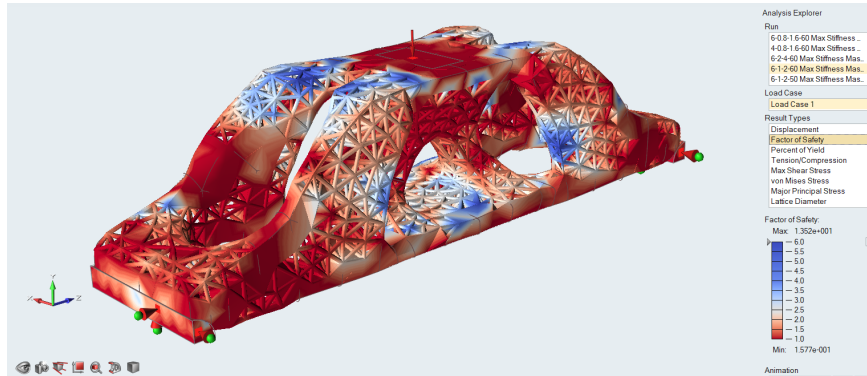


Figura 4.5: Fator de segurança.

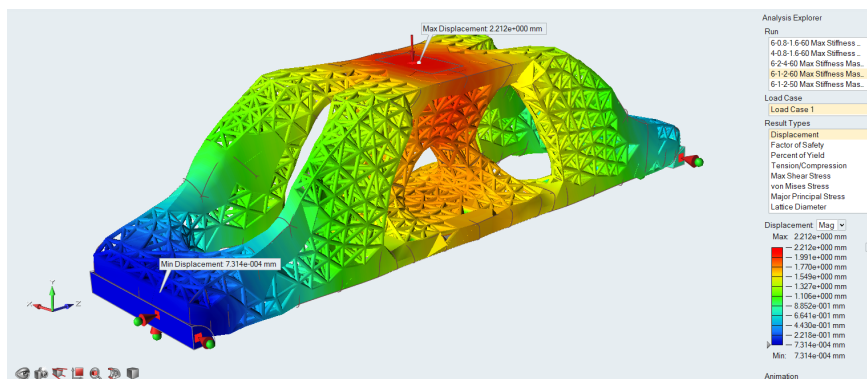


Figura 4.6: Deslocamento total.

Verifica-se através da Figura 4.6, que o componente com estrutura lattice possui maior deslocamento do que o outro modelo, 4.3, no mesmo local com o valor de 2,21 mm. Para atender a restrição de manufatura da impressora, a função objetivo foi prejudicada e consequentemente foi comprometido o comportamento mecânico da peça ao delimitar a geometria durante o processo de otimização topológica.

A Figura 4.7 apresenta as tensões de von Mises do componente.

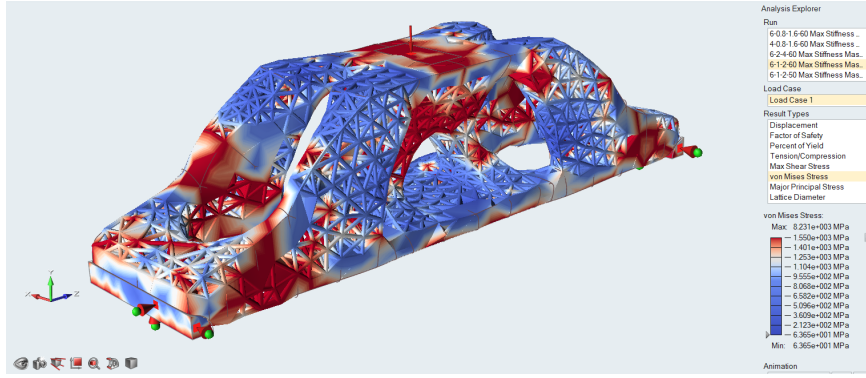
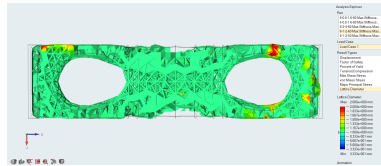
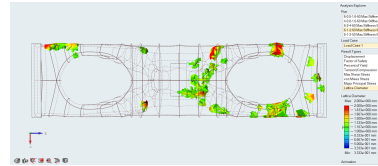


Figura 4.7: Tensões pelo critério de falha de von Mises.

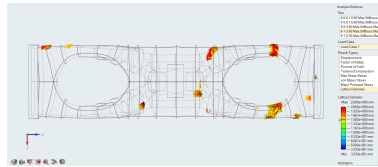
De acordo com a Figura 4.8, percebe-se o preenchimento interno variável efetuado pelo *software*. O diâmetro do lattice é maior nas nas regiões que o componente possui maior liberdade de movimento, indicando que esses locais necessitam de uma rigidez mais elevada.



4.8(a): Diâmetro  $\geq 1$  mm.



4.8(b): Diâmetro  $\geq 1.1$  mm.



4.8(c): Diâmetro  $\geq 1.5$  mm.

Figura 4.8: Variação do diâmetro do lattice.

## 4.2

### Resultados do *software* ANSYS

No *software* comercial ANSYS [18], foi realizado uma análise não linear estática para verificar as tensões e deformações atuantes no modelo somente otimizado topologicamente. Foram consideradas a não linearidade geométrica e do material, modelo de Ramberg e Osgood [19, 20].

Primeiramente foi calculado o coeficiente  $\eta$  de acordo com os dados do material:

$$\eta = \frac{\log(\varepsilon_u/\varepsilon_y)}{\log(S_u/S_y)} \quad (4-1)$$

Onde:

- $\varepsilon_u$ : Deformação na ruptura
- $\varepsilon_y$ : Deformação no escoamento
- $S_u$ : Tensão de ruptura
- $S_y$ : Tensão de escoamento

Para determinar valores acima do limite de escoamento do material, Ramberg e Osgood utilizaram a equação abaixo.

$$\varepsilon = \frac{S}{E} + 0,002 \left( \frac{S}{S_y} \right)^\eta \quad (4-2)$$

Onde:

- $\varepsilon$ : Unidade de deformação
- $S$ : Unidade de tensão
- $E$  : Módulo de Young

Por fim, para calcular os valores de tensões e deformações reais foram utilizados as seguintes equações:

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad \sigma_{true} = S(1 + \varepsilon) \quad (4-3)$$

Desse modo, foi obtido a curva real do material:

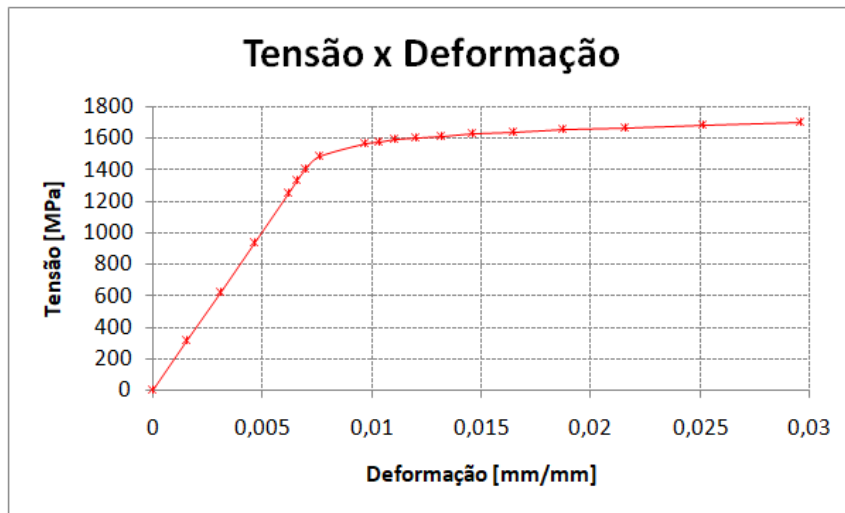


Figura 4.9: Curva real Tensão x Deformação.

#### 4.2.1

##### Modelo com otimização topológica

Em relação à malha, foi definida uma malha não-estruturada com o método tetraédrico em que o tamanho do elemento finito aplicado foi de 1 milímetro. Desse modo, a malha consiste em 478913 nós e 311058 elementos de acordo com a Figura 4.10.

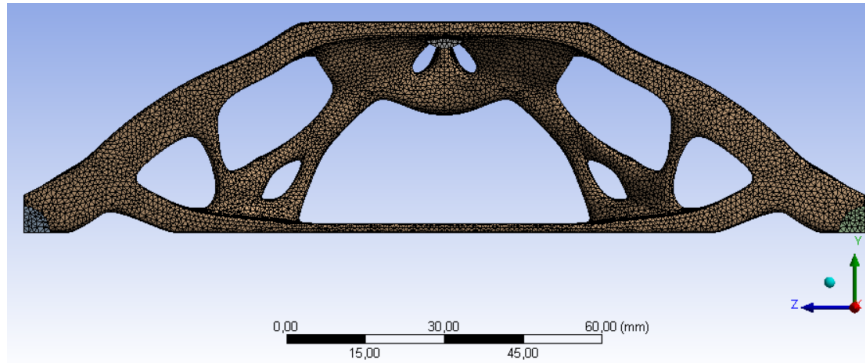


Figura 4.10: Malha utilizada no modelo.

A análise foi dividida em 600 *substeps* para a carga de 120 kN, ou seja, o incremento de carga foi de 200 N. Além disso, o método de solução utilizado foi o *sparse direct solver*, e os controles de não linearidade foram habilitados como *program-chosen*, sugeridos pelo *software* de acordo com o modelo.

As duas Figuras a seguir, 4.11 e 4.12, apresentam as tensões e deformações pelo critério de von Mises para a carga de 100 kN.

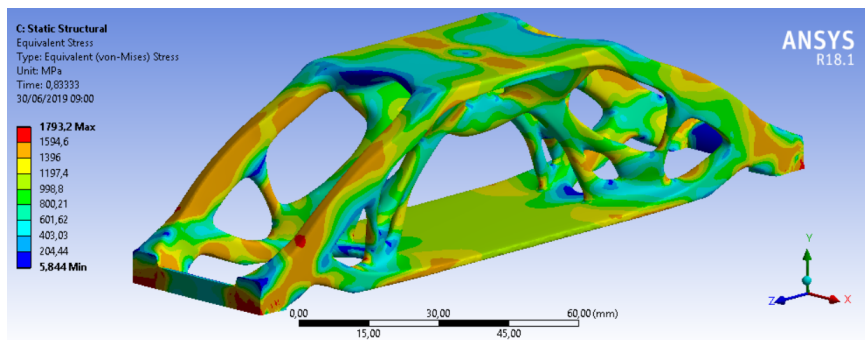


Figura 4.11: Tensões pelo critério de von Mises.



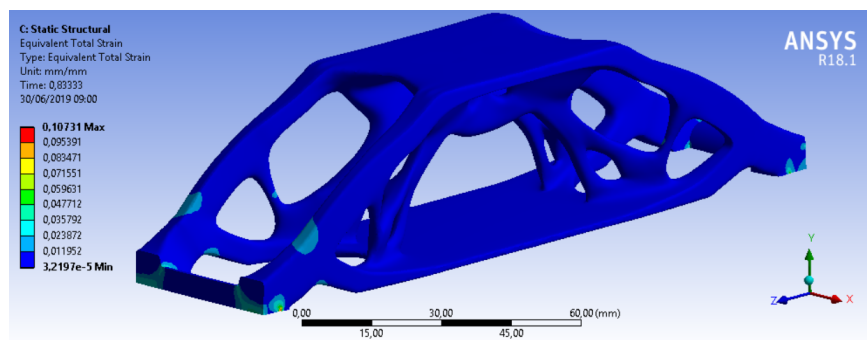


Figura 4.12: Deformações pelo critério de von Mises.

O maior deslocamento causado pela carga de 100 kN é no próprio local onde a força é aplicada, com o valor de aproximadamente 1,74 mm de acordo com a Figura 4.13.

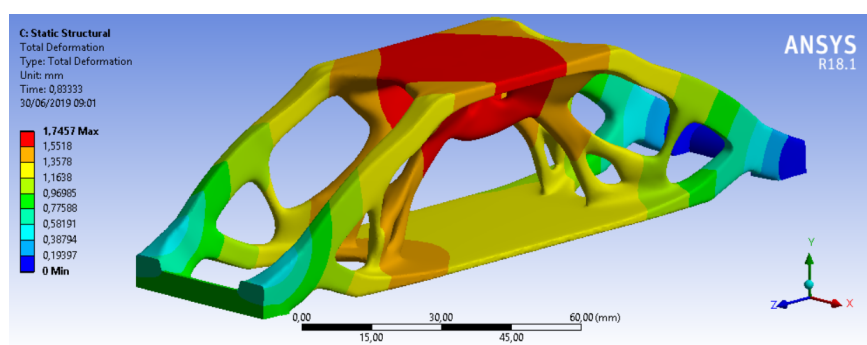


Figura 4.13: Deslocamento total.

As três Figuras abaixo, 4.14, 4.15 e 4.16, apresentam as tensões de von Mises no instante anterior ao colapso.

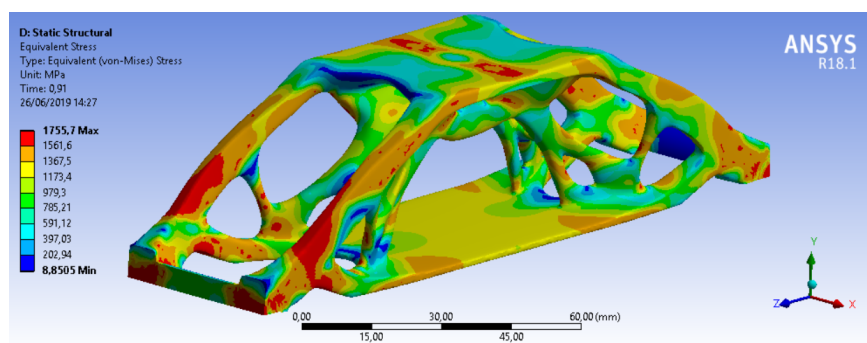


Figura 4.14: Tensões pelo critério de von Mises.

Através da Figura 4.15, é possível visualizar somente as regiões que estão abaixo do limite de escoamento do material. Nota-se que grande parte dos elementos dos reforços laterais da peça foram plastificados devido às altas tensões acima da carga de projeto.

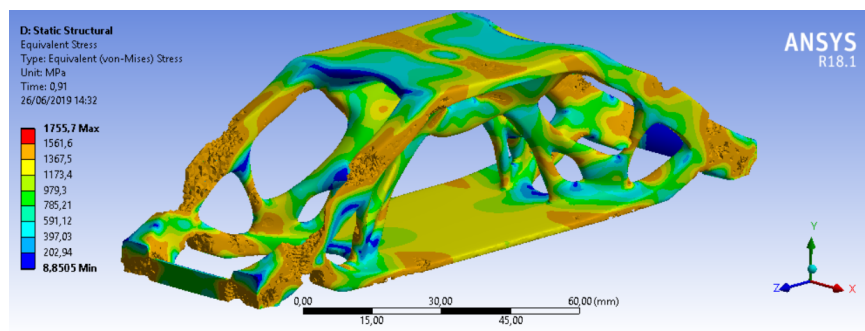


Figura 4.15: Regiões com tensões abaixo do limite de escoamento.

Na Figura 4.16, pode-se verificar somente as regiões com tensões acima do limite de escoamento. Além disso, observa-se uma região indicada nesta Figura em que grande parte dos elementos desta seção de área foram plastificados, afetando a rigidez do sistema e provocando o colapso da peça. Este mecanismo de falha é denominado esmagamento.

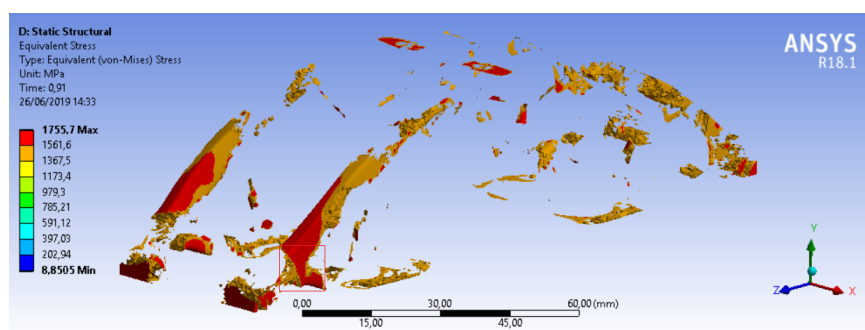


Figura 4.16: Regiões com tensões acima do limite de escoamento.

Por meio da Figura 4.17, é mostrado o deslocamento do componente no instante anterior à falha. Neste *substep*, observa-se regiões além do vão da peça que estão sofrendo grandes deslocamentos, porém o maior valor continua sendo no local de aplicação da carga, com o valor de 2,3 mm.

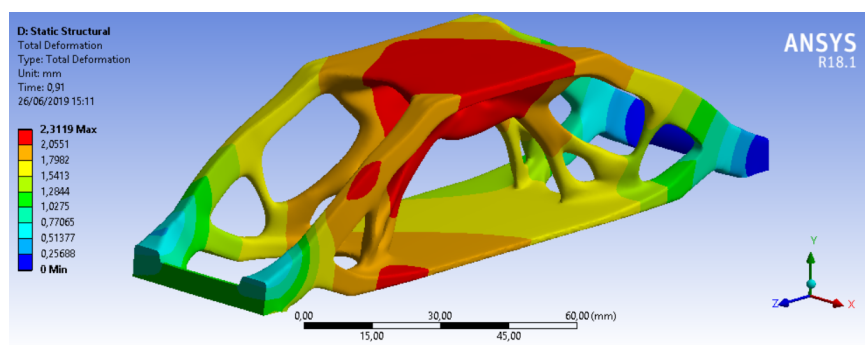


Figura 4.17: Deslocamento total no instante anterior ao colapso.

Na Figura 4.18, observa-se o deslocamento do componente após o colapso plástico. Os valores de deslocamento não são simétricos, o que facilita a descoberta do local que ocorre a falha. O maior valor de deslocamento é no reforço lateral indicando em vermelho, com o valor de 2,45 mm.

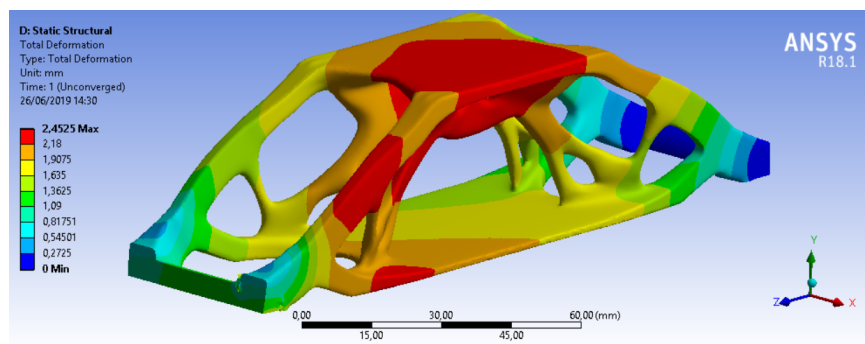


Figura 4.18: Deslocamento total após a falha.

As seguintes Figuras, 4.19 e 4.20, foram reproduzidos a partir do monitoramento de um nó na região do colapso. Constata-se que os resultados respeitam o modelo não linear do material definido previamente, em que é possível notar a zona elástica e plástica de acordo com a Figura 4.19. Além disso, constata-se pela Figura 4.20 que de acordo com o incremento de carga, a tangente da curva vai perdendo estabilidade, e quando ela atinge o valor zero é ocasionado o colapso plástico do componente, com a carga de 109,2 kN.

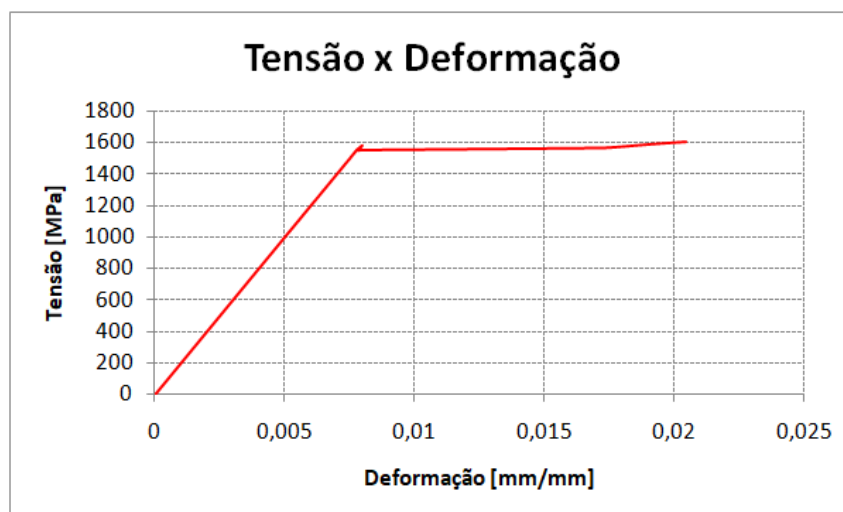


Figura 4.19: Tensão x Deformação.

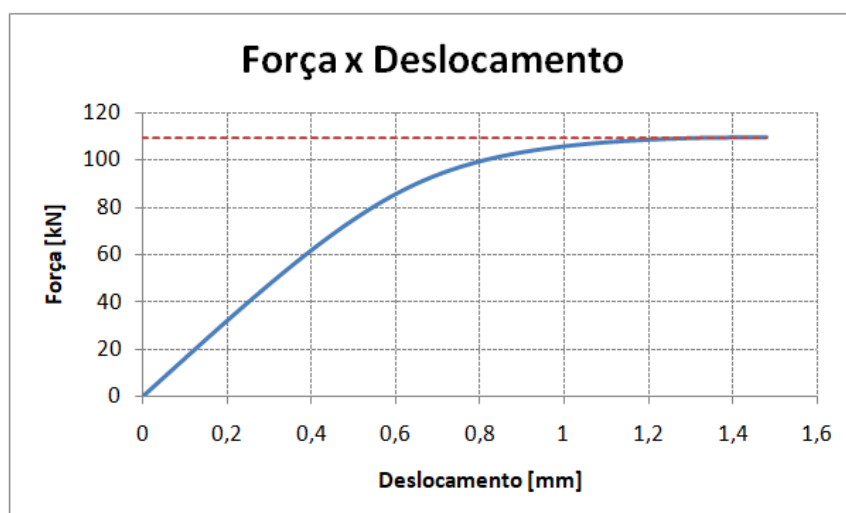


Figura 4.20: Força x Deslocamento.

Elaborou-se uma análise de autovalor para determinar a carga de flambagem linearizada. Pode-se verificar na Figura 4.21, que no primeiro modo positivo ocorre a instabilidade estrutural com a carga crítica de 282 kN.

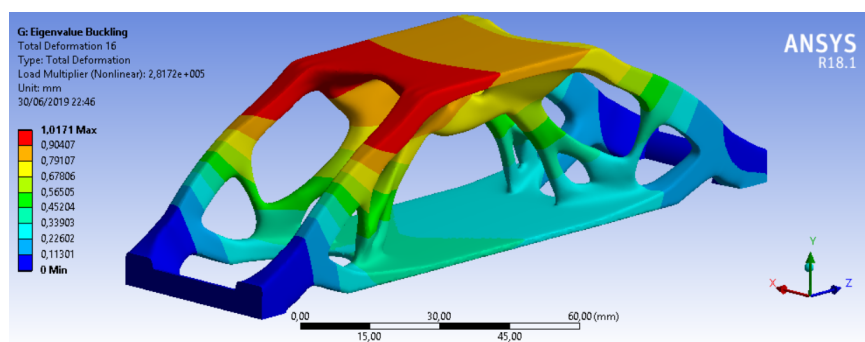


Figura 4.21: Carga de flambagem linearizada.

Realizou-se uma outra simulação adotando somente a não linearidade geométrica para verificar a carga que o componente falharia por instabilidade estrutural. Constata-se que a carga que ocorre a flambagem é de aproximadamente 282 kN, de acordo com a Figura 4.22, valor próximo ao obtido pela análise de autovalor. Esta força é mais do que o dobro da carga que provoca o esmagamento no modelo, confirmando que este componente é altamente seguro à flambagem.

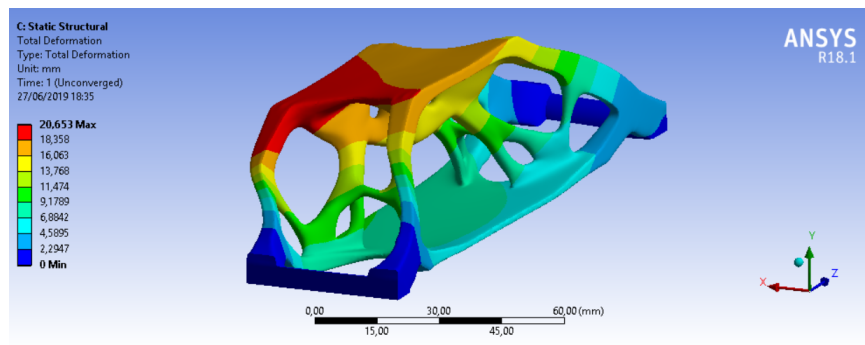


Figura 4.22: Instabilidade estrutural.

Além disso, a partir desta análise de instabilidade estrutural, foi avaliado o deslocamento máximo do modelo com a carga de 100 kN e este resultado foi comparado com o obtido pelo *software* Inspire. Constata-se pela Figura 4.23, o mesmo valor de 1,54 mm para o deslocamento máximo localizado vão central da peça, havendo uma convergência deste resultado entre os dois programas.

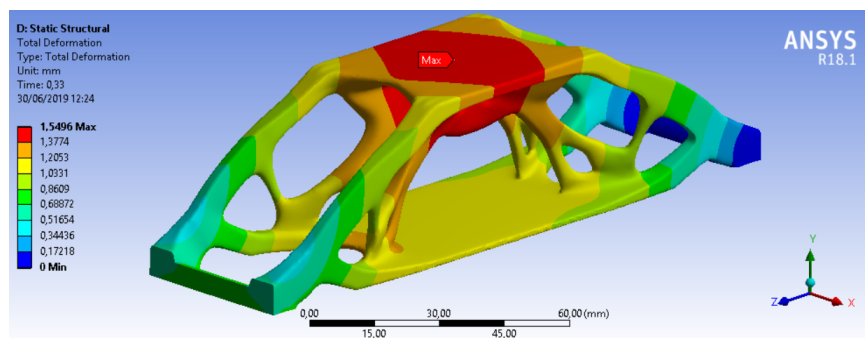


Figura 4.23: Deslocamento total para a carga de 100 kN.

## 5

### Conclusão

Foram apresentados, neste trabalho, os resultados obtidos para a otimização topológica de uma viga biapoada com uma carga concentrada no centro do vão. As topologias ótimas foram obtidas através do método SIMP de otimização, realizado no *software* Inspire, onde o objetivo foi a maximização da rigidez considerando uma restrição de volume. A viga foi avaliada numericamente no *software* ANSYS, onde o comportamento não linear geométrico e do material foi considerado.

A peça otimizada com preenchimento interno variável teve um desempenho mecânico pior devido à restrição de manufatura adotada, mas reduziu significativamente a quantidade de material de suporte. Isso é importante pois evita danificar a peça na etapa de pós-processamento, e economiza matéria-prima.

Em relação às análises numéricas apresentadas no *software* ANSYS, constatou-se que o mecanismo de falha deste modelo foi o esmagamento com a força de 109,2 kN devido à plastificação dos elementos, e quando adotado somente a não linearidade geométrica ocorre a instabilidade estrutural com a carga de 282 kN.

#### 5.1

##### Sugestões para trabalhos futuros

Seria interessante para trabalhos futuros otimizar o material de suporte utilizado nos modelos. É possível escolher diferentes tipos de suporte com por exemplo cones, teias, blocos e árvores [15]. Assim, o gasto de matéria-prima será menor, pois a impressão necessitará de uma quantidade inferior de material de suporte e o tempo de impressão será reduzido. Além disso, seria relevante a realização de uma análise em elementos finitos no *software* ANSYS do modelo com estrutura lattice para verificar o comportamento deste componente na região plástica, e então elaborar uma comparação mais completa entre os dois modelos estudados neste trabalho. Por fim, um ensaio experimental seria necessário para validar os resultados das análises numéricas presentes neste trabalho.

## Referências Bibliográficas

- [1] Martin P Bendsøe and Ole Sigmund. Topology optimization: theory, methods and applications. 2003, 2013.
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=yharhpF1yio&t=311s>. What's New in SolidThinking Inspire - Acessado: 04/02/2019.
- [3] <https://www.autodesk.com/products/netfabb/features/netfabb>. Autodesk - Acessado: 30/07/2019.
- [4] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview/>. 3D Hubs - Acessado: 13/05/2019.
- [5] <https://solidthinking.com/product/inspire/>. Altair Inspire - Acessado: 10/04/2019.
- [6] [https://webbuilder5.asiannet.com/ftp/2684/TD\\_M280\\_en\\_2011-03-29.pdf](https://webbuilder5.asiannet.com/ftp/2684/TD_M280_en_2011-03-29.pdf). Impressora Eosint M 280 - Acessado: 20/06/2019.
- [7] Christopher J Smith, Matthew Gilbert, Iain Todd, and Fatos Derguti. Application of layout optimization to the design of additively manufactured metallic components. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54(5):1297–1313, 2016.
- [8] <https://www.concept-laser.de/home.html>. Concept Laser - CL 50WS.
- [9] Lorna J Gibson and Michael F Ashby. *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge university press, 1999.
- [10] Ivan Fábio Mota de Menezes. *Otimização topológica com refinamento adaptativo de malhas poligonais*. PhD thesis, PUC-Rio, 2016.
- [11] MG Rashed, Mahmud Ashraf, RAW Mines, and Paul J Hazell. Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications. *Materials & Design*, 95:518–533, 2016.
- [12] Achilles Petras. *Design of sandwich structures*. PhD thesis, University of Cambridge, 1999.
- [13] Lin Cheng, Jikai Liu, Xuan Liang, and Albert C To. Coupling lattice structure topology optimization with design-dependent feature evolution for

- additive manufactured heat conduction design. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 332:408–439, 2018.
- [14] Andrew T Gaynor and James K Guest. Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54(5):1157–1172, 2016.
- [15] <https://www.materialise.com/en>. Materialise Magics - Acessado: 05/02/2019.
- [16] [https://www.youtube.com/watch?v=xepc5sbKMLI&index=2&list=PLq38gvIG9J\\_JDKgVjEHQZ1eDPT8voBPaq](https://www.youtube.com/watch?v=xepc5sbKMLI&index=2&list=PLq38gvIG9J_JDKgVjEHQZ1eDPT8voBPaq). Tutorial: The 3D printing workflow - Acessado: 13/02/2019.
- [17] <https://cliever.com/pt-br/cliever-studio>. Cliever Studio - Acessado: 14/05/2019.
- [18] <https://www.ansys.com/>. Ansys - Acessado: 20/04/2019.
- [19] HN Hill. Determination of stress-strain relations from. 1944.
- [20] Walter Ramberg and William R Osgood. Description of stress-strain curves by three parameters. 1943.