

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Bruno de Castro Manna

**Projeto de estruturas porosas usando o 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
Fevereiro de 2023

Resumo

Visto que a técnica de otimização topológica tem ganhado um grande espaço nos dias de hoje, principalmente pelo fato de ser possível a obtenção de estruturas mais leves e, ainda assim, manter suas funções estruturais, novos métodos envolvendo a otimização topológica têm sido desenvolvidos, os quais envolvem tanto as modificações da microestrutura do material quanto da sua estrutura global. Enquanto a otimização topológica clássica tem sido aplicada para obter a densidade ótima na macroescala de um determinado domínio, a otimização topológica do tipo *lattice* busca obter diâmetros ótimos para as microestruturas utilizadas. Dessa forma, nesse trabalho, o método da otimização topológica será aplicado nas duas diferentes escalas – a primeira delas na macroescala, a qual será utilizará o método de otimização topológica clássico, enquanto a segunda na microescala, a qual empregará o método de otimização topológica do tipo *lattice*. Além disso, será obtido uma terceira geometria utilizando apenas a microestrutura *lattice*. Posteriormente, as três geometrias obtidas serão avaliadas numericamente pelo *software Ansys* para que a comparação entre os diferentes métodos utilizados seja realizada.

Palavras-chave: Otimização topológica, otimização topológica do tipo *lattice*, *Ansys*

Abstract

Since the topology optimization technique has been gaining a large space nowadays, mainly due to the fact that it is possible to obtain lighter structures and still maintain their structural functions, new methods involving topology optimization have been developed, which involve both modifications of the microstructure of the material and its global structure. While the classical topology optimization has been applied to obtain the optimal density at the macro scale of a given domain, the lattice optimization seeks to obtain optimal diameters for the microstructures used. Thus, in this work, the topology optimization method will be applied at two different scales - the first one at the macro scale, which will use the classical topology optimization method, while the second one at the micro scale, which will employ the lattice optimization method. In addition, a third geometry will be obtained using only the lattice microstructure. Subsequently, the three geometries obtained will be evaluated numerically by Ansys software so that a comparison between the different methods used can be performed.

Keywords: Topology optimization, lattice optimization, Ansys

Sumário

Sumário.....	4
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Estrutura do texto	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Otimização estrutural.....	3
2.2 Otimização topológica <i>lattice</i>	7
2.3 Ansys.....	9
2.3.1 Módulos do Ansys.....	10
2.4 Método dos elementos finitos	11
3. METODOLOGIA	13
3.1 Pré-processamento	13
3.1.1 Geração de malha	14
3.1.2 Condições de contorno.....	17
3.2 Otimização topológica	17
3.3 Otimização <i>Lattice</i>	21
3.4 Estrutura <i>lattice</i>	23
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	25
4.1 Resultados da otimização topológica clássica.....	25
4.2 Resultados da otimização <i>lattice</i>	27
4.3 Resultados com a geometria <i>lattice</i>	28
5. CONCLUSÕES	31
5.1 Sugestões para futuros trabalhos.....	31
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	32

Lista de figuras

Figura 2.1-1 Exemplo de otimização paramétrica (Olason e Tidman, 2010).	4
Figura 2.1-2 Exemplo de otimização de forma (Olason e Tidman, 2010). .	4
Figura 2.1-3 Exemplo de otimização topológica (Olason e Tidman, 2010).	5
Figura 2.1-4 Gráfico da densidade x rigidez relativa (Olason e Tidman, 2010).	6
Figura 2.2-1 Exemplos de estruturas lattice criadas por diferentes processos de manufatura aditiva (Son, 2019).	8
Figura 2.2-2 Exemplo de uma estrutura lattice baseada na densidade (Tao e Leu, 2016).	9
Figura 2.2-3 Project Schematic	10
Figura 2.2-4 SpaceClaim.....	11
Figura 2.4-1 Representação dos nós e elementos em uma malha (Mirlisenna, 2016).	12
Figura 3.1.1-1 Tipos de elementos (Gil, 2015).	15
Figura 3.1.1-2 Exemplo do gráfico gerado (Ansys academic support, 2022)	15
Figura 3.1.1-3 Exemplo de um gráfico de convergência de malha do n° de elementos x deflexão (Gil, 2015).....	16
Figura 3.1.1-4 Qualidade do elemento gerado para a geometria de estudo	16
Figura 0-1 Condições de contorno	17
Figura 3.2-1 Parâmetros da otimização topológica	19
Figura 3.2-2 Geometria otimizada com a a) vista isométrica, b) vista lateral, c) vista superior e d) vista frontal.....	20
Figura 3.2-3 Modelo completo.....	20
Figura 3.3-1 Detalhe dos parâmetros da otimização lattice	21
Figura 3.3-2 Microestrutura a) cúbica, b) cruzada e c) ponto médio (Ansys academic support).....	21

Figura 3.3-3 Microestrutura d) octaédrica 1, e) octeto e f) octaédrica 2 (Ansys academic support)	22
Figura 3.3-4 Microestrutura diagonal (Ansys academic support)	22
Figura 3.3-5 parâmetros utilizados no estudo	22
Figura 3.3-6 Geometria otimizada com estruturas lattice com a vista a) isométrica, b) frontal, c) lateral	23
Figura 3.4-1 Parâmetros utilizados.....	23
Figura 3.4-2 Geometria com estruturas lattice com a vista a) isométrica, b) frontal, c) lateral.....	24
Figura 4.1-1 Convergência de malha utilizando o n° de nós x deslocamento total	26
Figura 4.1-2 Deslocamento total de geometria otimizada	26
Figura 4.2-1 Distribuição da densidade.....	27
Figura 4.2-2 Malha final da geometria otimizada com estruturas lattice...	28
Figura 4.2-3 Deslocamento total da geometria otimizada com estruturas lattice	28
Figura 4.3-1 Deslocamento total da geometria com estruturas lattice.....	29

Lista de tabelas

Tabela 4.3-1 Comparação entre os resultados obtidos.....	29
--	----

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O campo da engenharia, como um todo, busca sempre encontrar melhores soluções para diversos tipos de problemas, seja para a definição de um novo *design* de um produto ou até mesmo visando uma minimização de custo de um determinado processo.

Sendo assim, com a crescente demanda de maximizar o desempenho de diferentes estruturas em diversos campos da engenharia, como na indústria aeronáutica e automobilística, novas linhas de pesquisa envolvendo a otimização estão sendo desenvolvidas.

Um exemplo a ser citado é a otimização topológica multiescala. Nela, a otimização ocorre em 2 escalas, sendo elas: a macroescala, a qual a estrutura é otimizada; e na microescala, sendo esta realizada na microestrutura do material.

No que se refere a macroescala, a macroestrutura ótima é definida a partir da variação da densidade do material no domínio pré-definido, que, por sua vez, pode assumir valores de 0 (vazio) e 1 (sólido), o qual varia de acordo com as condições de contorno aplicadas no problema.

Já na microescala, a microestrutura *lattice* é composta por mini vigas interligas entre si (Melo, 2019), sendo possível ter a variação de seu diâmetro de acordo com os esforços presentes no problema (Melo, 2019). Alguns tipos de microestruturas mais comuns são encontrados no *software Ansys*, como as do tipo *cubic*, *diagonal*, *diamond*, *octec*, *etc.*

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho consiste na modelagem de uma viga, e a partir dela, definidas as condições de contorno a serem utilizadas no problema, obter três estruturas distintas. Tais estruturas serão obtidas a partir das microestruturas disponibilizada pelo *software Ansys*, e também

através da otimização topológica, sendo uma aplicada na macroescala (clássica) e a outra aplicada na microescala (*lattice*). Posteriormente, será analisado a influência da geometria com relação à rigidez, tornando possível a comparação entre os resultados.

1.3 Estrutura do texto

Esse tópico apresenta um sumário do conteúdo que foi abordado ao longo do documento, o qual se dividiu em 5 capítulos. No capítulo 2 apresenta-se uma revisão dos tópicos que envolve a otimização topológica, ponto focal desse estudo, e também, a apresentação do *software* utilizado para as simulações. O capítulo 3 apresenta toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo, a qual consiste em mostrar todo o passo a passo até a realização das simulações. Já no capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos para as diferentes otimizações utilizadas e, por fim, o capítulo 5 contém as conclusões obtidas perante os resultados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Otimização estrutural

Os primeiros estudos envolvendo a otimização estrutural foram iniciados por Maxwell em 1872, os quais propunham a redução de volume de estruturas uniaxiais sujeitas a carregamentos (Nascimento, 2019) e, ao longo dos anos, diferentes estudos envolvendo a otimização estrutural foram sendo aprimorados para se obter designs inovadores de peças utilizadas nas mais diversas indústrias, assim como para encontrar a melhor forma e tamanho de estruturas utilizadas na engenharia (treliças, vigas, etc.).

Sendo assim, o campo de estudo que envolve a otimização pode ser resumido a encontrar a distribuição ótima do material em uma estrutura quando esta está submetido a determinadas solicitações (Olason e Tidman, 2010).

De maneira geral, o problema envolvendo o conceito de otimização pode ser expresso matematicamente da seguinte forma (Moreira, 2018):

$$\begin{cases} \text{minimizar } f(\bar{x}) \\ \text{sujeito a } g_i(\bar{x}) \leq 0, & i = 1, \dots, m \\ h_j(\bar{x}) = 0, & j = 1, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

A descrição do problema inclui os seguintes termos:

- Função objetivo ($f(\bar{x})$): Essa é função que se quer otimizar. Ela pode variar de acordo com o objetivo atribuído ao projeto, geralmente, as mais utilizadas são: peso, deslocamento ou tensão (Moreira, 2018).
- Variável de projeto ($f(\bar{x})$): São os elementos que se alteram durante o processo de otimização, por exemplo: a geometria (Moreira, 2018).
- Variável de estado ($f(\bar{x})$): Ela representa a resposta do sistema de acordo com as condições adotadas inicialmente, podendo ser

os parâmetros mecânicos usais, como: deslocamento e tensão (Moreira, 2018).

- Restrições (g_i, h_j): São funções quaisquer que representam restrições de projeto (Moreira, 2018).

De acordo com Olason e Tidman (Olason e Tidman, 2010), a otimização estrutural pode ser dividida em três categorias distintas, sendo elas: otimização paramétrica, otimização de forma e otimização topológica.

2.1.1 Otimização paramétrica

A otimização paramétrica - a mais simples entre elas - busca encontrar, a partir da geometria conhecida, uma estrutura ótima por meio de alterações nas dimensões dos elementos estruturais, podendo ser: o diâmetro ou a espessura (Olason e Tidman, 2010). Na Figura 2.1 – 1, podemos ver um exemplo em que o diâmetro da estrutura foi alterado.

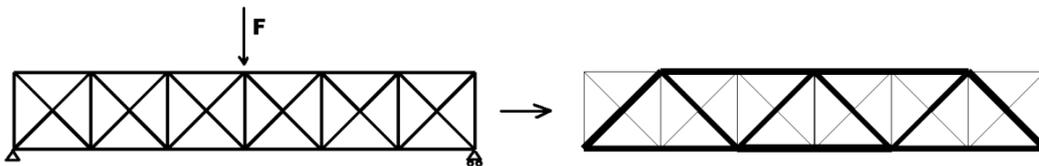


Figura 2.1-1 Exemplo de otimização paramétrica (Olason e Tidman, 2010).

2.1.2 Otimização de forma

A otimização de forma, assim como na otimização paramétrica, não resulta em novos furos ou corpos separados (Olason e Tidman, 2010). Nela, as variáveis que se alteram são, por exemplo, a geometria ótima para os contornos tanto internos quanto externos da estrutura. A Figura 2.1 – 2 representa o exemplo de uma otimização de forma.



Figura 2.1-2 Exemplo de otimização de forma (Olason e Tidman, 2010).

2.1.3 Otimização topológica

Por fim, a otimização topológica, o tipo mais usual das otimizações. Tal otimização surge com o artigo “*Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method*” publicado pelos autores Martin P. Bendsoe e Noboru Kikuchi em 1988 (Silva, 2009) e, desde então, esse assunto tem se desenvolvido tanto academicamente quanto para aplicações nas indústrias (Liang Xia, 2016).

Diferentemente das anteriores, o *design* otimizado não fica restrito a topologia inicial, já que seu intuito é definir a distribuição ótima do material ao longo do domínio, a qual pode ser feita por meio da adição de furos/vazios ou material (Olason e Tidman, 2010). E, para a resolução desse problema, utiliza-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual será descrito em um tópico posteriormente. A Figura 2.1 – 3 representa a otimização topológica.



Figura 2.1-3 Exemplo de otimização topológica (Olason e Tidman, 2010).

Vale ressaltar que existem diferentes estratégias utilizadas para solucionar um problema envolvendo a otimização topológica. Alguns dos métodos mais utilizados são: *density-based*, *evolutionary procedures* e *level set* (Liang Xia, 2016). Nesse estudo, o *software* utilizado – *Ansys* – adota um tipo de método *density-based*, conhecido como “*Solid Isotropic Material with Penalty*” (SIMP) (*Ansys academic support*, 2022).

Esse método propõe o relaxamento do problema, deixando a densidade do material variar entre 0 e 1, sendo 0 a ausência de material e 1 o elemento sólido (Olason e Tidman, 2010) e, por consequência, a presença de elementos com densidades intermediárias – diferentes de 0 e 1 – é inevitável.

Contudo, para que se obtenha um resultado fabricável é necessário que a solução do problema seja representada apenas por sólidos ou vazios (Olason e Tidman, 2010). Para isso, as densidades intermediárias são penalizadas seguindo uma lei de potência, fazendo com que a solução convirja para 0 ou 1 (Maia, 2021). Posto isto, a representação do módulo de elasticidade efetivo do elemento e a lei de potência é dado – respectivamente – por (Maia, 2021):

$$E = \rho E_o \quad (2)$$

$$\rho = x_e^p \quad (3)$$

onde, ρ é a densidade; E_o é o módulo de elasticidade do material sólido; p é a potência de penalização, que usualmente varia entre 2 – 5 (Olason e Tidman, 2010); por fim, x_e é a variável de projeto associada à densidade do elemento e (Maia, 2021). Na Figura, 2.1 – 4 podemos ver o gráfico que relaciona a rigidez relativa como função da densidade para diferentes fatores de penalização.

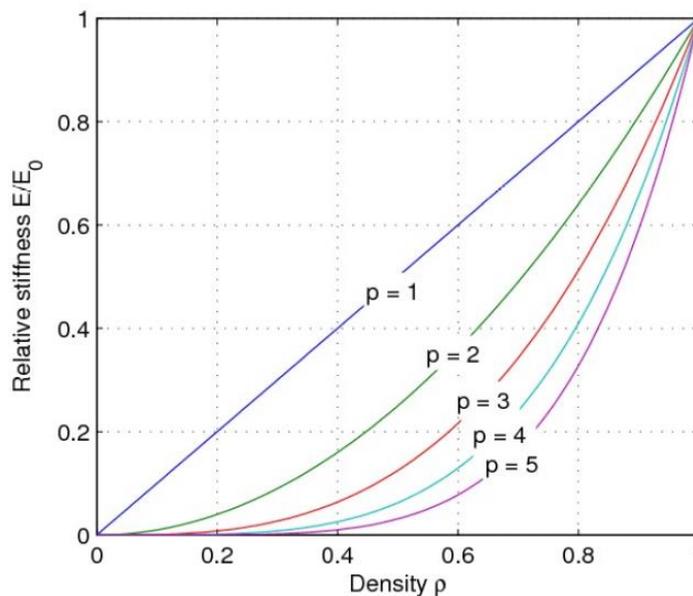


Figura 2.1-4 Gráfico da densidade x rigidez relativa (Olason e Tidman, 2010).

2.2 Otimização topológica *lattice*

A manufatura aditiva vem ganhando espaço ao longo dos anos, já que com ela geometrias que antes eram complexas de serem fabricadas por meios convencionais - usinagem e forjamento - se tornaram fabricáveis com o uso dessa tecnologia (Son, 2016). Sua criação teve início em 1980 e, desde então, diferentes processos envolvendo a manufatura aditiva foram desenvolvidos, porém a metodologia utilizada na criação das geometrias tem o mesmo fundamento, o qual consiste em empilhar camadas de material umas sobre as outras até a formação do modelo desenvolvido (Son, 2016).

Posto isto, a manufatura aditiva possibilitou o avanço de estudos envolvendo meios alternativos a materiais sólidos e estruturas convencionais, já que as limitações para a produção de geometrias complexas não é mais problema (Tao e Leu, 2016). Um exemplo a ser citado são as estruturas *lattice*.

A estrutura *lattice* consiste em uma arquitetura formada por um conjunto de células unitárias periódicas espaciais que contém arestas e faces (Tao e Leu, 2016). Tipicamente, elas podem ser divididas em 2 topologias, sendo: periódica e não periódica (Son, 2019). A primeira delas é criada por um conjunto de células unitárias, as quais se repetem por todas as direções (Son, 2019). Já na segunda, as barras e as respectivas formas são distribuídas de forma aleatória no domínio, possibilitando a variação do raio e comprimento para diferentes barras (Son, 2019). Na Figura 2.2 – 1 podemos ver exemplos de estruturas *lattice*.

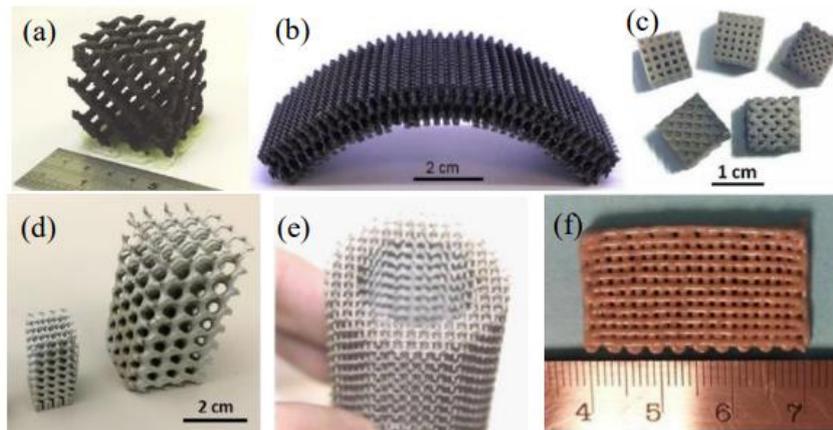


Figura 2.2-1 Exemplos de estruturas *lattice* criadas por diferentes processos de manufatura aditiva (Son, 2019).

Dentre os pontos que tornam essa estrutura promissora para diversas aplicações, podemos citar: a obtenção estrutura mais leve, proveniente da sua alta rigidez específica e resistência; sua troca de calor devido uma grande área de superfície; a absorção de energia, pelo fato de sofrer grandes deformações à uma tensão baixa; e, por fim, ser um bom isolante acústico por conta do grande número de poros internos (Tao e Leu, 2016). E tais comportamentos mecânicos dependem do material utilizado, da sua arquitetura organizada pela distribuição do material e sua porosidade (Tao e Leu, 2016).

As três formas como as células unitárias estão distribuídas no espaço tridimensional são: padronização direta; padronização conforme; e por meio da otimização topológica, que pode ser utilizada tanto para a distribuição do material em uma célula unitária quanto para a organização espacial da mesma replicada em todo o domínio (Tao e Leu, 2016). Nesse estudo, será utilizado o método da otimização topológica.

Pelo fato dessas estruturas possibilitarem o controle de sua densidade, os pesquisadores puderam integrar a otimização topológica com as estruturas *lattice*. Sendo assim, as estruturas com densidades intermediárias antes penalizadas pelo método SIMP, como visto no tópico 2.1.3, passaram a serem substituídas por estruturas *lattice*, nas quais a sua densidade varia de acordo com as condições de contorno do problema, podendo assim alcançar um melhor desempenho (Tao e Leu, 2016). Na

Figura 2.2 – 2 podemos ver uma otimização topológica do tipo *lattice* com base na densidade variável.

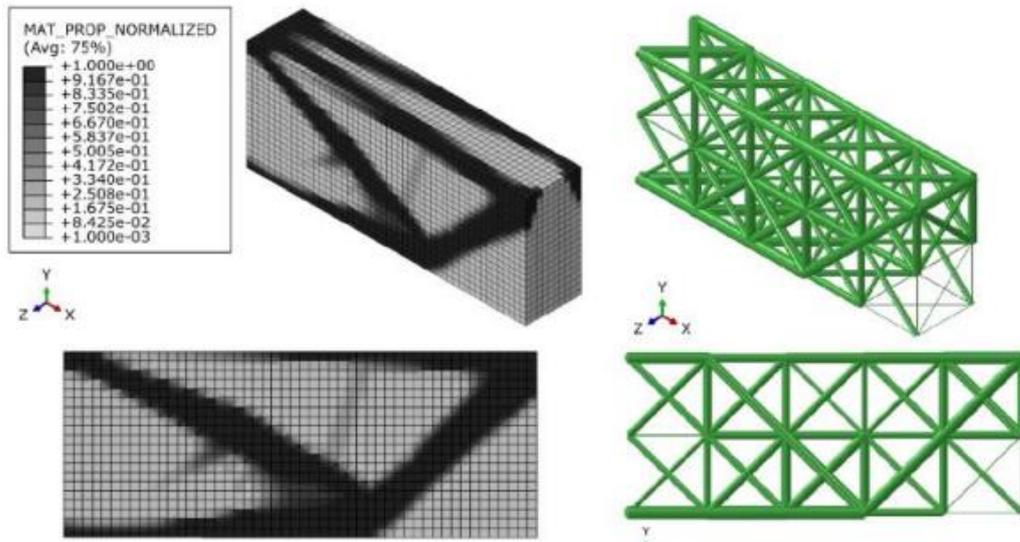


Figura 2.2-2 Exemplo de uma estrutura lattice baseada na densidade (Tao e Leu, 2016).

2.3 Ansys

O *Ansys* é um *software* de engenharia que utiliza o método dos elementos finitos para a resolução dos diferentes problemas contidos nessa área. Tal *software* engloba sete tipos de análises estruturais, tornando possível o cálculo de parâmetros como deslocamentos e rotações e, além delas, outras medidas como deformações, tensões e força de reação, já que são derivadas dos deslocamentos nodais (Fernandes, 2019).

Dentre as análises de estruturas disponíveis, podemos citar: análise estática; análise modal; análise harmônica; análise dinâmica transiente; análise espectral; análise de flambagem e, por fim, análise dinâmica explícita.

Nesse estudo, será utilizado a análise estática, a qual tem como resposta o deslocamento, a deformação e tensões sob a condição de carga estática. Além disso, podemos citar que a análise estática é dividida em linear e não linear, sendo que as não-lineares podem incluir outros

parâmetros como: plasticidade, rigidez, grandes deformações e tensões, superfície de contato, e fissuração (Fernandes, 2019).

2.3.1 Módulos do Ansys

Os módulos que governam o *software Ansys* são: *Project Schematic*, o *SpaceClaim* e o *Ansys Mechanical*.

O *Project Schematic* é o local em que são administradas todas as análises realizadas pelo usuário, ademais é possível realizar a interligação entre as diferentes análises. Na Figura 2.3 – 1 é mostrado essa interface.

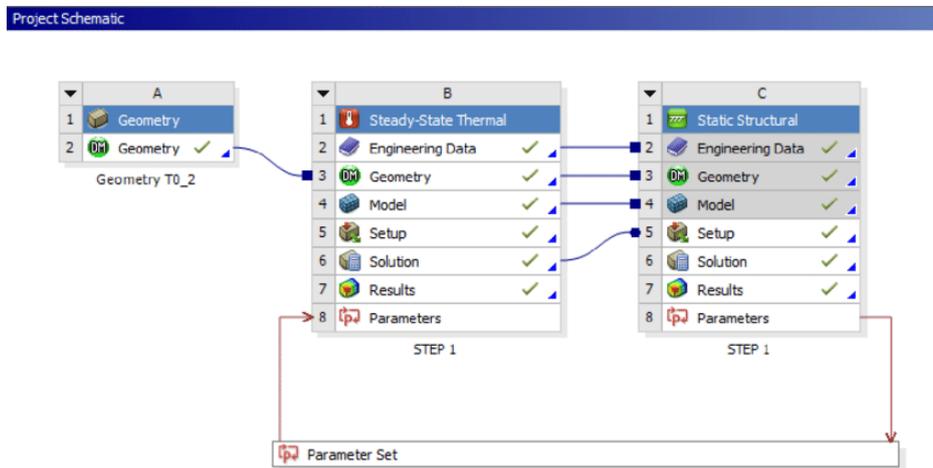


Figura 2.3.1-1 *Project Schematic*

Já o *SpaceClaim* é o local em que é feita a modelagem 3D, sendo esse o *Computer Aided Design* (CAD) do Ansys. Nele é possível criar diferentes geometrias, além de manipular as geometrias obtidas pós otimização, por exemplo.

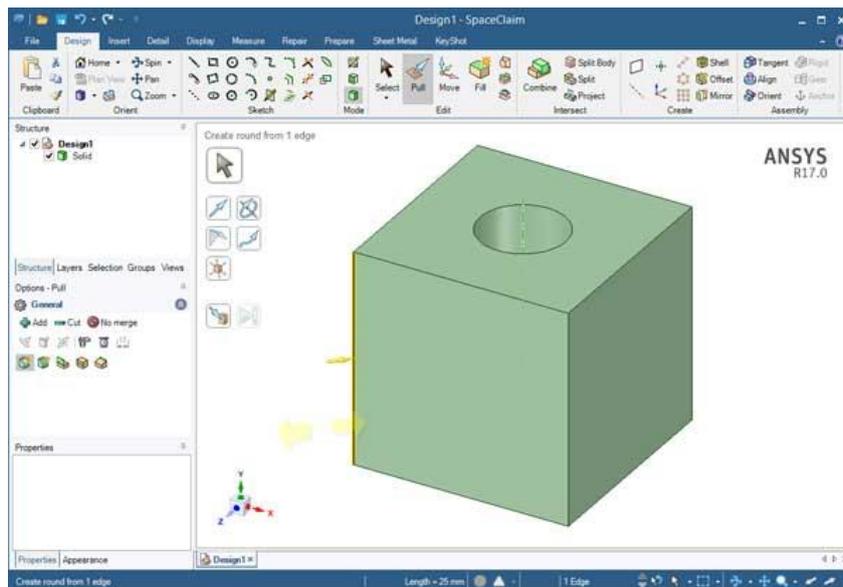


Figura 2.3.1-2 *SpaceClaim*

Por fim, temos o *Ansys Mechanical*, que é o módulo que utiliza o método dos elementos finitos para realizar as diversas análises estruturais.

2.4 Método dos elementos finitos

Existem vários métodos analíticos diferentes que os engenheiros podem utilizar para resolver problemas relacionados à mecânica estrutural, um exemplo a ser citado são as modelagens realizadas pelas equações diferenciais ordinárias (EDOs) e as equações diferenciais parciais (EDPs) (Fernandes, 2019). Contudo, muitas vezes, as geometrias de estudo e suas respectivas condições de contorno são complexas, o que dificulta alcançar uma solução analítica conhecida. Sendo assim, é inevitável a utilização de métodos numéricos para se obter resultados próximos às soluções analíticas.

O método dos elementos finitos, o qual teve origem a partir do trabalho realizado pelo matemático Richard Courant em que ele aproxima linearmente problemas de torção (Porcher, 2016), é uma poderosa técnica numérica que usa poder computacional para calcular soluções aproximadas para problemas desse tipo e é amplamente utilizada nas mais diversas áreas de engenharia.

A abordagem de um problema envolvendo o MEF é dividir o corpo/geometria em um número pequeno de elementos, que são conectados entre si por nós. Esse processo é chamado de discretização e, o conjunto de nós e elementos é chamado de malha (Mirlisenna, 2016). A discretização é útil porque o requisito de equilíbrio agora precisa apenas satisfazer um número finito de elementos discretizados ao invés de continuamente sobre todo o corpo, ou seja, um problema originalmente complexo torna-se mais simples de ser solucionado (Mirlisenna, 2016). Na Figura 2.4 – 1 temos a representação dos nós e elementos.

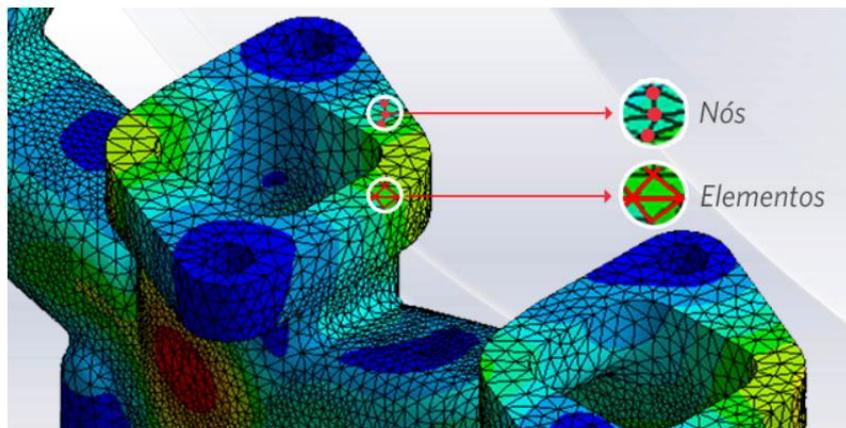


Figura 2.4-1 Representação dos nós e elementos em uma malha (Mirlisenna, 2016).

Dito isso, a malha é um dos principais parâmetros que influenciam diretamente na precisão dos resultados, e também, nas novas geometrias provindas da otimização. Portanto, à medida que a malha se torna mais refinada, as soluções desenvolvidas se tornam mais detalhadas, demonstrando a dependência desse parâmetro (Maia, 2021).

3. METODOLOGIA

A metodologia a ser seguida durante o desenvolvimento do trabalho consiste na resolução dos problemas abordados por meio de métodos numéricos. Nesse caso, será utilizado o *software Ansys*, o qual se baseia no método dos elementos finitos. E, para isso, serão realizadas três etapas distintas.

Primeiramente, será desenvolvida a parte de pré-processamento, que consiste na preparação, organização e estruturação dos dados. Nela, serão desenvolvidas as seguintes etapas: a geometria de estudo no *SpaceClaim*; a definição do material a ser utilizado; a geração da malha em conjunto com seu refinamento para garantir a confiabilidade dos resultados; a definição das condições de contorno, que consiste na aplicação das restrições de movimento, e também os esforços que atuam no modelo; e o tipo de análise, que nesse caso, como visto, será a estática estrutural.

Posteriormente, na etapa de processamento, serão definidas as soluções a serem avaliadas, como: o deslocamento total e as tensões de *von-Mises*. Desse modo, torna-se possível a realização da simulação; após esta ser concluída, entra-se na última etapa, o pós-processamento. Nele, serão interpretados os resultados obtidos nas análises.

Tal metodologia será a mesma aplicada para a realização das otimizações; todavia, além dos parâmetros citados, outros devem ser levados em consideração, tais como: o objetivo da otimização; as regiões da geometria que podem ser otimizadas; e a definição da microestrutura a ser utilizada na otimização *lattice*. Com isso, torna-se possível a obtenção dos novos resultados referentes às otimizações.

3.1 Pré-processamento

Para a realização desse estudo, será modelado uma viga com as dimensões que estão representadas pela Figura 3.1.

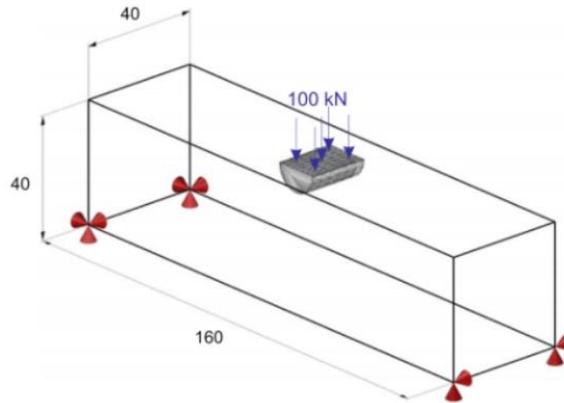


Figura 3.1 – Modelagem utilizada por Melo (2019)

Além disso, o material utilizado nas simulações foi o Marage 300 (CL 50 WS), cujas propriedades podem ser vistas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas do Marage 300 (CL 50 WS) (Melo, 2019)

Propriedades	Valor
Densidade	8024 kg/m ³
Modulo de Elasticidade	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,25
Limite de Escoamento	1550 MPa
Tensão de Ruptura	1650 MPa

Com o intuito de diminuir o tempo computacional, utilizou-se $\frac{1}{4}$ do modelo para as análises, devido à simetria do problema. Tendo todos esses parâmetros estabelecidos, iniciou-se a etapa de geração de malha do modelo idealizado.

3.1.1 Geração de malha

Como visto no tópico 2.4, a geração de malha é uma etapa da simulação de extrema importância, já que ela é um dos parâmetros que ditam a confiabilidade dos resultados de uma simulação. Desse modo, alguns parâmetros, como o formato da malha, devem ser escolhidos de acordo com o modelo a ser estudado.

O formato dos elementos – mais usuais – que compõe a malha pode ser dividido em dois grupos: triangulares e tetraédricos; quadriláteros e

hexaédricos (Gil, 2015). Na Figura 3.1.1 - 1 temos a representação desses formatos.

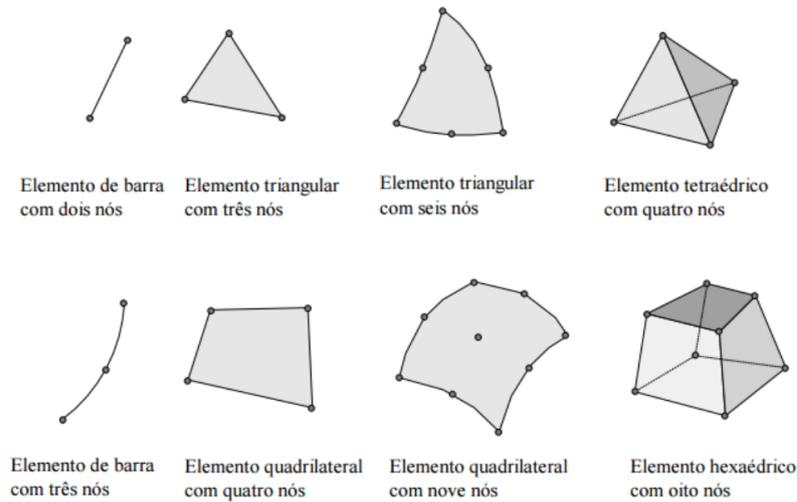


Figura 3.1.1-1 Tipos de elementos (Gil, 2015).

Além disso, o Ansys disponibiliza alguns recursos capazes de avaliar a qualidade da malha gerada. Dentre eles, podemos citar o *mesh metrics* e a convergência de malha.

No que se refere ao *mesh metrics*, temos as seguintes métricas: *Element Quality*, *Aspect Ratio*, *Jacobian*, entre outras (Ansys academic support). A mais usual é a *element quality*, nela, a qualidade do elemento de malha é uma quantidade adimensional que varia entre 0 e 1, sendo 1 um elemento perfeitamente regular, na métrica escolhida, e 0 representa um elemento degenerado (Ansys academic support). Após gerada a malha um gráfico é criado mostrando a qualidade de cada elemento. Tal gráfico pode ser visualizado na Figura 3.1.1 – 2.

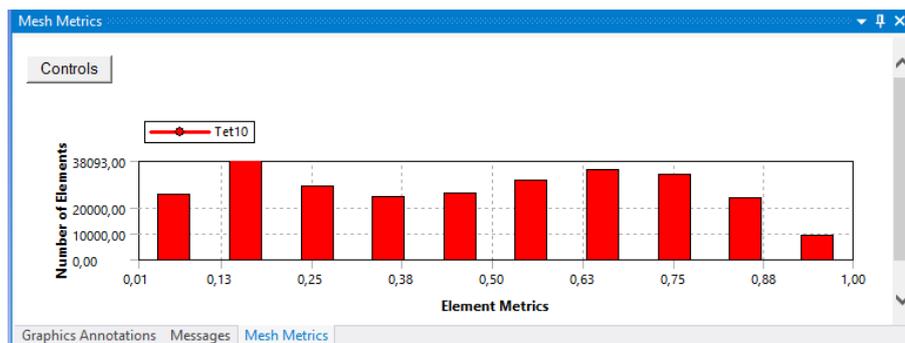


Figura 3.1.1-2 Exemplo do gráfico gerado (Ansys academic support, 2022)

Já a convergência de malha dá-se pelo refinamento dos elementos contidos na malha e, por meio dessa discretização dos elementos, a tendência é que o resultado de interesse convirja para um determinado valor, sendo esse a solução do problema. Na Figura 3.1.1 – 3 temos a representação típica de um gráfico de convergência de malha.

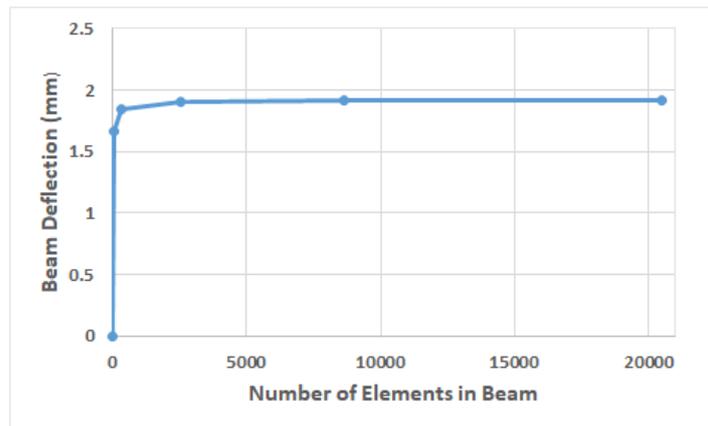


Figura 3.1.1-3 Exemplo de um gráfico de convergência de malha do nº de elementos x deflexão (Gil, 2015)

Sendo assim, por se tratar de uma viga com uma seção transversal quadrada, optou-se pela utilização de um elemento hexaédrico. Além disso, com o intuito de avaliar os elementos contidos na malha para que os resultados das simulações não fossem afetados, utilizou-se a métrica de malha *element quality*. Na Figura 3.1.1 – 4, podemos observar que todos os elementos estão perfeitamente regulares, garantindo assim, a confiabilidade das simulações.

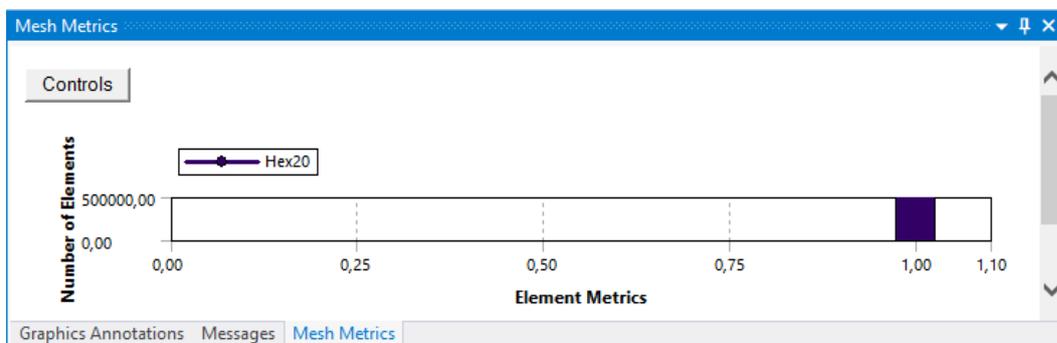


Figura 3.1.1-4 Qualidade do elemento gerado para a geometria de estudo

3.1.2 Condições de contorno

Após gerada a malha do modelo, definiu-se quais seriam as condições de contorno utilizadas. No que se refere as restrições de movimento, utilizou-se o *displacement* em 2 faces e 1 aresta, sendo elas: a face lateral, restringindo o movimento no eixo x; a face frontal, restringindo o movimento no eixo y; e a aresta, restringindo o movimento no eixo y. Em relação aos esforços, aplicou-se uma pressão de 333,33 MPa, equivalente a 25kN. A Figura 3.1.2 – 1 representa o modelo descrito.

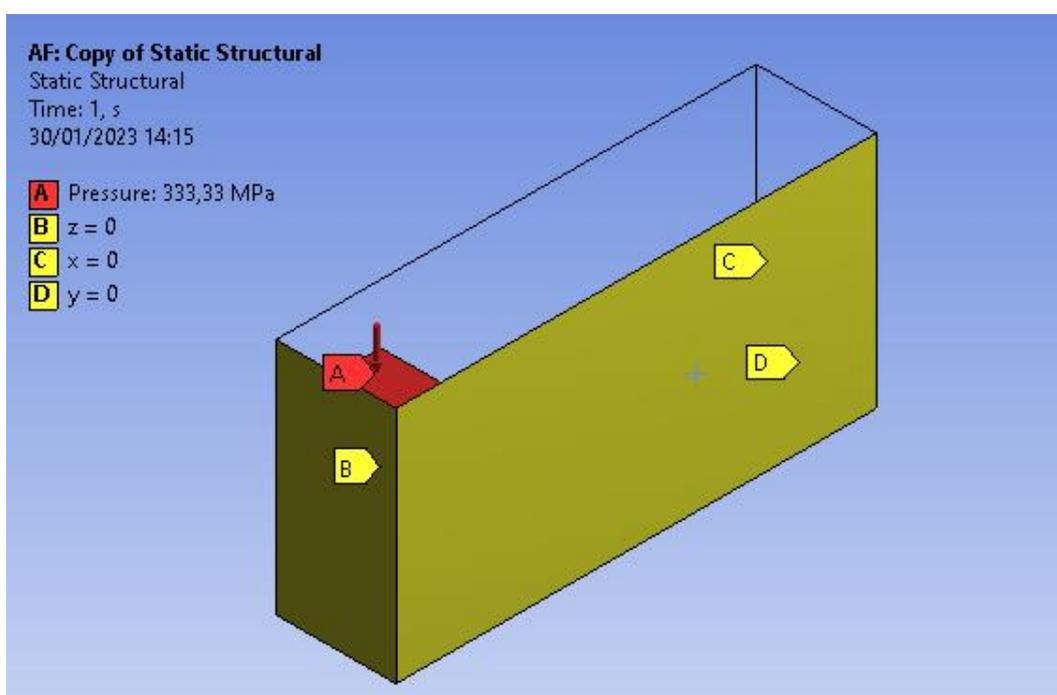


Figura 0-1 Condições de contorno

Posteriormente, as soluções a serem avaliadas foram adicionadas, sendo elas: deformação total e a tensão de *von-Mises*. Dessa forma, iniciou-se a simulação.

3.2 Otimização topológica

Após realizada a análise estrutural, deu-se início ao processo de otimização topológica do modelo e, para isso, foi necessário selecionar o tipo de otimização a ser aplicado.

O software Ansys disponibiliza diferentes métodos de otimização, sendo eles: *Density Based Optimization*, sendo esse tipo de otimização baseado na densidade de cada elemento do modelo, a qual é forçada a se aproximar de 0 ou 1 ao invés de variar continuamente (*Ansys academic support*); *Lattice Optimization*, nele é possível calcular a distribuição de rede de densidade variável ideal em sua geometria (*Ansys academic support*); e por fim, a *Morphing*, a qual otimiza a forma do modelo alterando a malha, sendo assim, nenhuma alteração de topologia é permitida (*Ansys academic support*). Posto isto, o primeiro tipo de otimização realizado foi a clássica, logo, utilizou-se o método *density based*. Posto isto, alguns parâmetros devem ser imputados, como: as regiões em que podem e não podem ser realizadas as otimizações, e também o objetivo da simulação, seja ele a redução de massa, a redução de volume, o aumento da rigidez, entre outros.

Para essa simulação, as regiões marcadas como de exclusão foram aonde estava sendo aplicada a força e as arestas da base do modelo. Como função objetivo, optou-se pela maximização da rigidez junto à uma restrição de resposta de redução de 14% do volume. Além disso, utilizou-se o parâmetro de restrição de manufatura *minimum member size*, que possibilita estabelecer a espessura mínima, a qual foi de 2mm. Na Figura 3.2.1 pode-se observar todas as métricas escolhidas para a realização da otimização topológica.

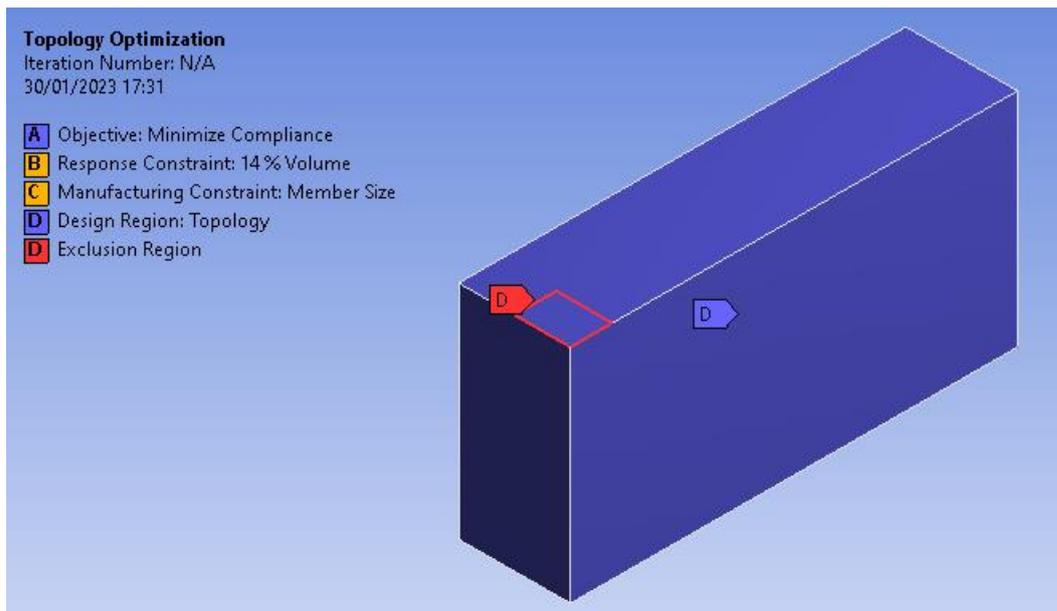


Figura 3.2-1 Parâmetros da otimização topológica

Após a realização da otimização topológica, uma nova geometria foi gerada. Contudo, a utilização da mesma traria certas dificuldades para a realização das simulações decorrentes, já que grande parte do modelo apresentava uma superfície irregular, o que geraria complicações na geração da nova malha e, por conseguinte, um tempo elevado para realizar as análises computacionais. Portanto, utilizou-se alguns recursos disponibilizados no *SpaceClaim*, como o *autofix*, *smooth* e *reduce*, os quais tem o intuito de suavizar a geometria para chegar em um modelo que fosse possível realizar as simulações necessárias. Tal geometria está representado pela Figura 3.2.2.

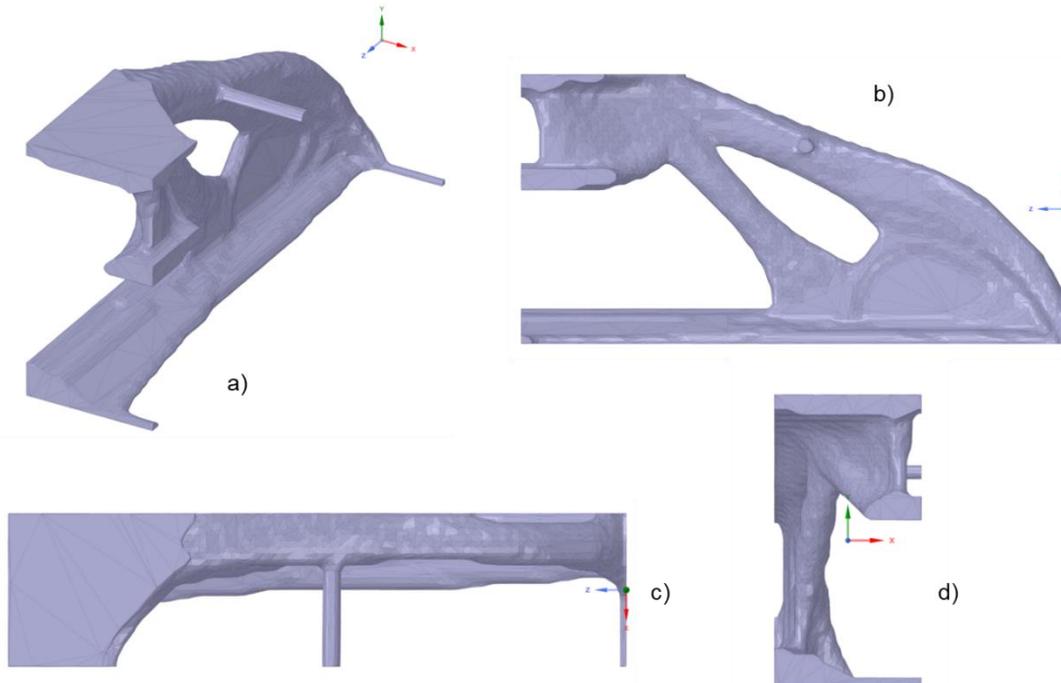


Figura 3.2-2 Geometria otimizada com a) vista isométrica, b) vista lateral, c) vista superior e d) vista frontal

A fim de demonstrar como seria a geometria completa, utilizou-se o recurso de espelho no SpaceClaim e projetou-se a geometria, a qual está representada pela Figura 3.2 – 3.

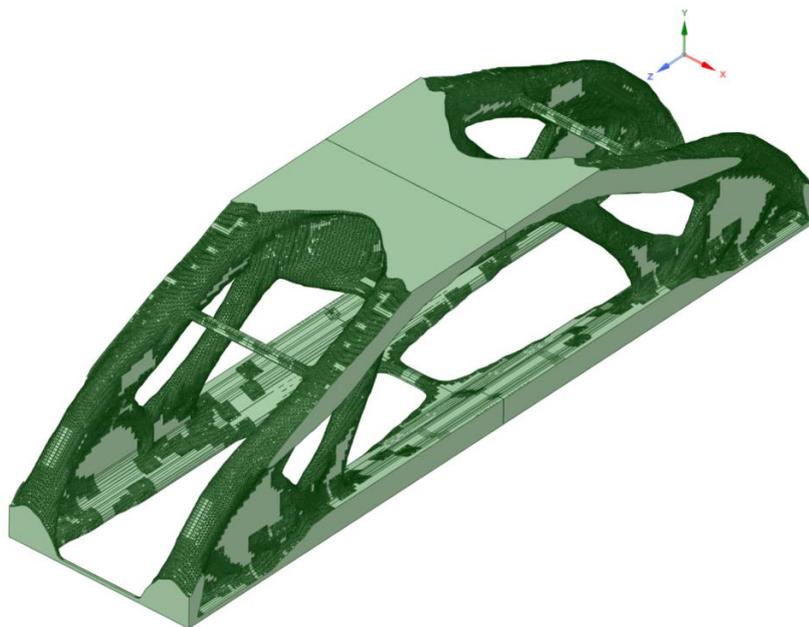
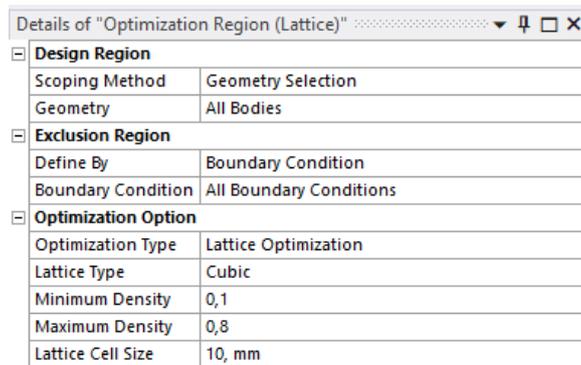


Figura 3.2-3 Modelo completo

3.3 Otimização *Lattice*

Dentro do pacote de otimização topológica do *software Ansys*, pode-se utilizar a otimização do tipo *lattice*. Nesse método, é possível calcular uma distribuição de densidade variável ideal para o seu modelo de acordo com as condições de contorno do problema (*Ansys academic support*).

Para isso, alguns parâmetros devem ser definidos para a realização dessa análise, sendo eles: o tipo de microestrutura *lattice*, a densidade mínima, a densidade máxima e, por fim, o tamanho da célula *lattice*. Tais parâmetros podem ser visto na Figura 3.3-1.



Details of "Optimization Region (Lattice)"	
[-] Design Region	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Exclusion Region	
Define By	Boundary Condition
Boundary Condition	All Boundary Conditions
[-] Optimization Option	
Optimization Type	Lattice Optimization
Lattice Type	Cubic
Minimum Density	0,1
Maximum Density	0,8
Lattice Cell Size	10, mm

Figura 3.3-1 Detalhe dos parâmetros da otimização *lattice*

No que se refere à microestrutura *lattice*, existem 7 tipos pré-definidas disponíveis no *software*. Tais tipos de microestruturas podem ser visualizadas nas Figuras 3.3-2 – 3.3-5.

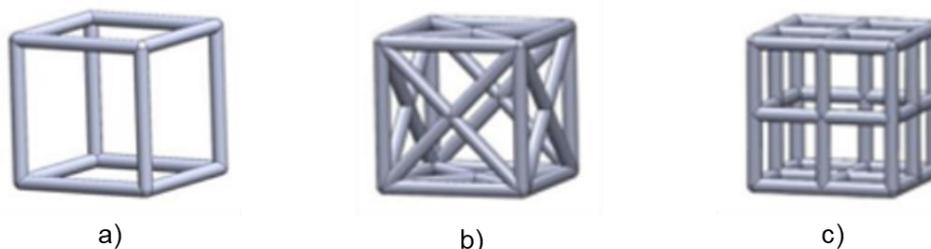


Figura 3.3-2 Microestrutura a) cúbica, b) cruzada e c) ponto médio (*Ansys academic support*)

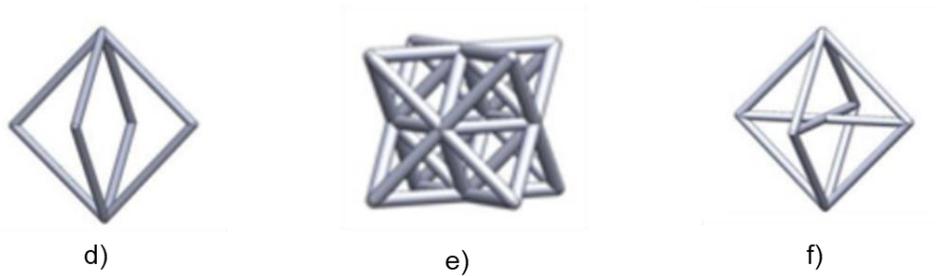


Figura 3.3-3 Microestrutura d) octaédrica 1, e) octeto e f) octaédrica 2 (Ansys academic support)

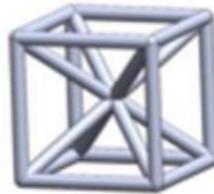


Figura 3.3-4 Microestrutura diagonal (Ansys academic support)

Para esse estudo, a microestrutura utilizada foi a cúbica. Além disso, os outros parâmetros estabelecidos podem ser vistos na Figura 3.3-6.

Optimization Option	
Optimization Type	Lattice Optimization
Lattice Type	Cubic
Minimum Density	0,1
Maximum Density	1,
Lattice Cell Size	4, mm

Figura 3.3-5 parâmetros utilizados no estudo

A densidade mínima, como o próprio nome diz, estabelece a densidade mínima da microestrutura *lattice* a fim de evitar microestruturas muito finas (*Ansys academic support*). Já a densidade máxima, define a máxima densidade a ser utilizada e, caso haja lugares em que a densidade seja maior do que a estabelecida, ela será considerada como 1 (*Ansys academic support*). Por fim, o valor da célula *lattice* é usado na reconstrução da geometria *lattice* para impressão (*Ansys academic support*). A Figura 3.3 – 6 representa a geometria obtida.

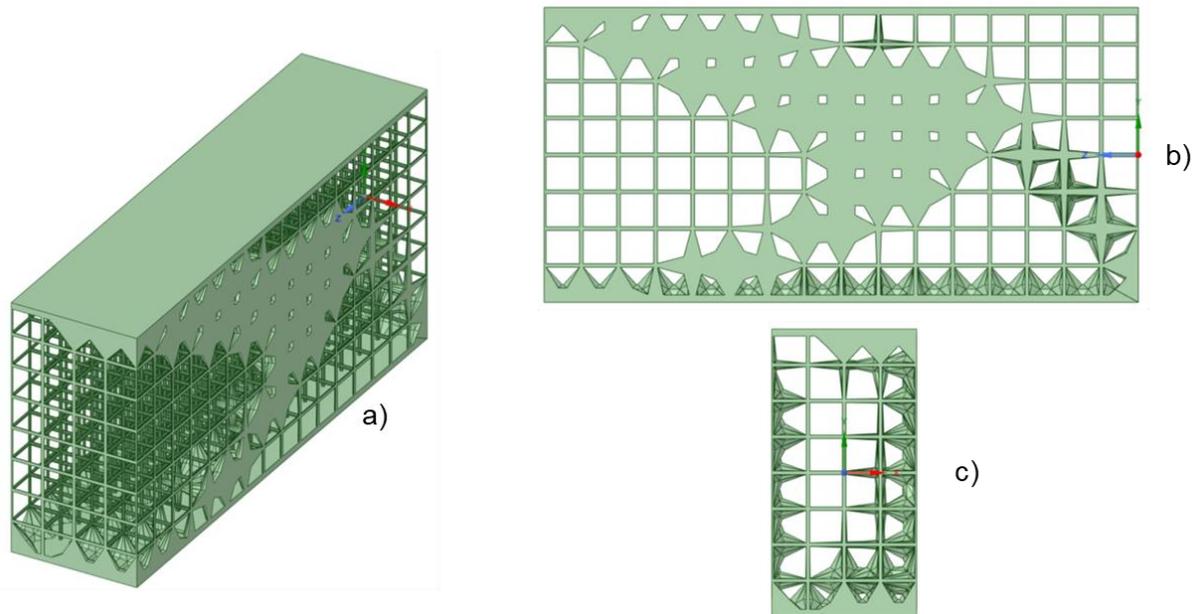


Figura 3.3-6 Geometria otimizada com estruturas *lattice* com a vista a) isométrica, b) frontal, c) lateral

3.4 Estrutura *lattice*

Para a obtenção da terceira estrutura, foi utilizado o *SpaceClaim*. Com ele, tornou-se possível transformar a geometria sólida utilizada em uma geometria porosa. Para fins de comparação, foi utilizada a mesma microestrutura na otimização *lattice (cubic)*. Além disso, para se obter a mesma massa e, conseqüentemente, o volume, os seguintes parâmetros de comprimento e espessura da microestrutura foram utilizados.

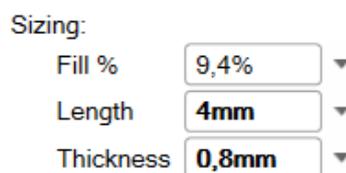


Figura 3.4-1 Parâmetros utilizados

Com isso, a geometria representada pela Figura 3.4 – 2 foi gerada.

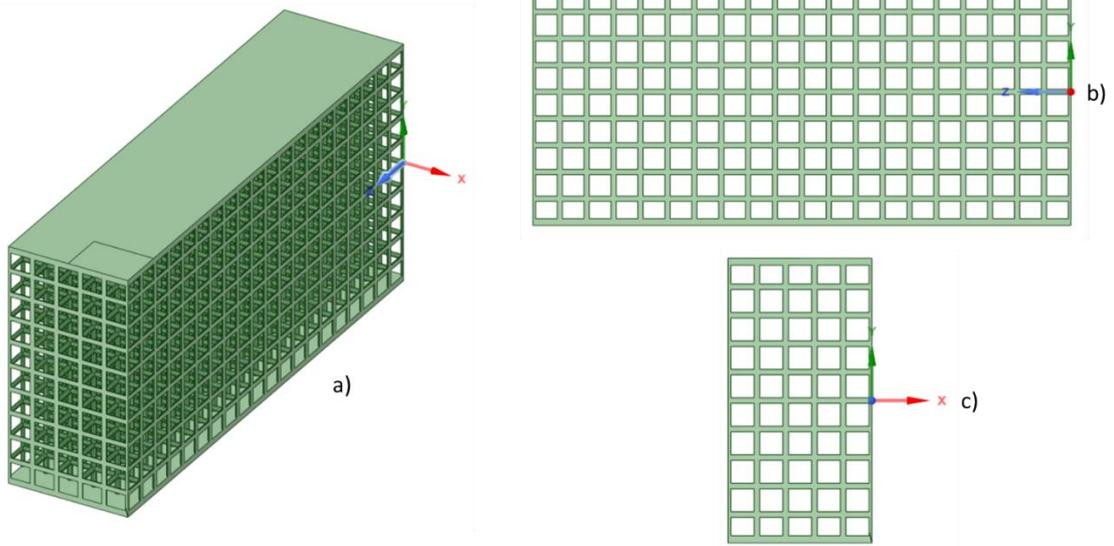


Figura 3.4-2 Geometria com estruturas *lattice* com a vista a) isométrica, b) frontal, c) lateral

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Após realizadas as etapas de pré-processamento e processamento descritas na seção 3, foi possível iniciar a etapa de pós-processamento, sendo ela a parte em que os resultados são obtidos.

4.1 Resultados da otimização topológica clássica

Depois de estabelecida os parâmetros para a otimização topológica, os quais foram descritos na seção 3.2, iniciou-se a simulação, que, após concluída, gerou uma geometria com uma nova topologia, a qual foi representada pela Figura 3.2 – 2.

Como resultado, obteve-se a massa final igual a $7,1559 \times 10^{-2}$ kg, sendo que a massa original era de 0,51354 kg, ou seja, ocorreu uma redução de 86,06 %, assim como no volume da estrutura, que passou a ser de 8918,1 mm³ ao invés de 64000 mm³.

Logo, uma nova análise estrutural foi realizada para a nova geometria, sendo mantidas as condições de contorno estabelecidas inicialmente.

No que se refere à malha, optou-se pelo o uso de elementos tetraédricos, os tamanhos dos elementos foram de 0,1mm aliados ao refinamento *patch conforming* disponibilizado pelo *Ansys*. Além disso, iniciou-se um estudo de convergência de malha para o refinamento dos resultados obtidos, o qual está representado pela Figura 4.2 – 1. Nele, foi feita a comparação entre o número de nós da malha x deslocamento total e, com isso, o número final de nós foi de 1.696.580 e 995.529 elementos.

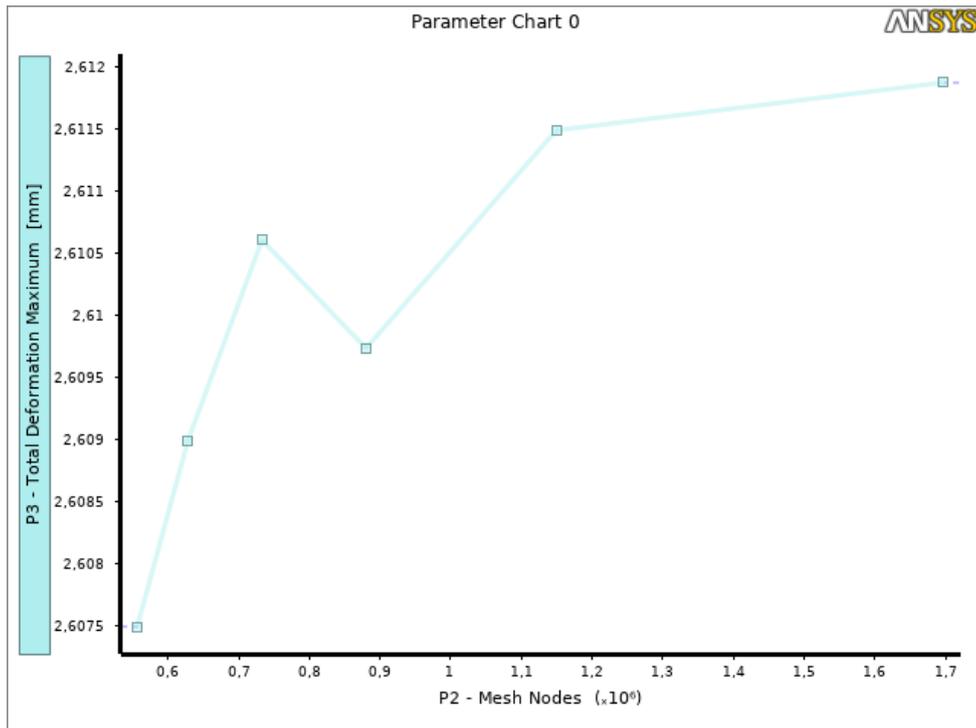


Figura 4.1-1 Convergência de malha utilizando o n° de nós x deslocamento total

Como resultado, obteve-se o deslocamento total máximo de 2,6119 mm, que ocorre no ponto mais abaixo em que a força é aplicada e o valor mínimo de 0,28724 mm. Na Figura 4.1 – 2 essa simulação é representada.

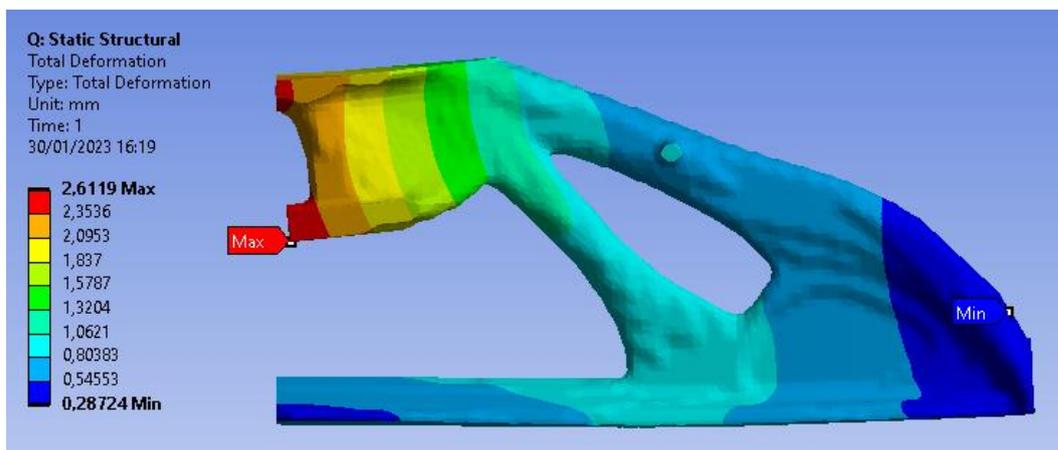


Figura 4.1-2 Deslocamento total de geometria otimizada

4.2 Resultados da otimização lattice

Como visto na seção 3.2, diferentemente do resultado que se obtém na otimização topológica, em que a densidade é forçada a variar entre 0 e 1 (*Ansys academic support*), a otimização *lattice* resulta em uma distribuição de rede de densidade variável (*Ansys academic support*). Sendo assim, após realizada a otimização do modelo, obteve-se tal distribuição, a qual pode ser visualizada pela Figura 4.3.1.

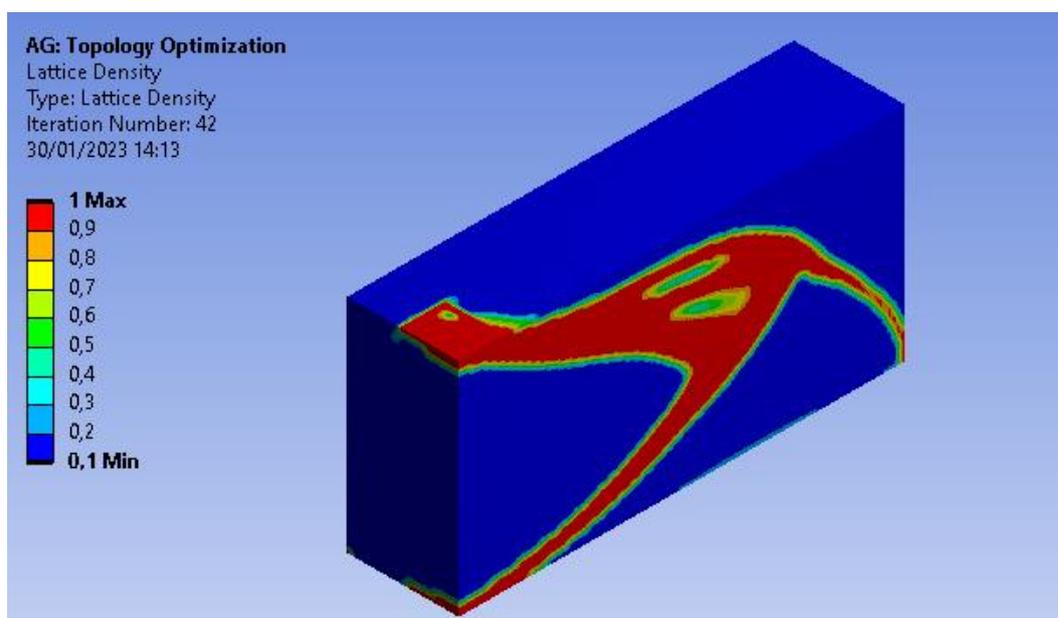


Figura 4.2-1 Distribuição da densidade

Como resultado, obteve-se a massa final igual a $6,3479 \times 10^{-2}$ kg, sendo que a massa original era de 0,51354 kg, ou seja, ocorreu uma redução de 87,64 %, assim como no volume da estrutura, que passou a ser de 7911,1 mm³ ao invés de 64000 mm³.

Após definida a distribuição de densidade ao longo do modelo, a geometria foi obtida, como foi representada pela Figura 3.3 – 6. Assim como realizado na geometria otimizada, utilizou-se elementos tetraédricos para a geração da malha e o *patch conforming*. Desta forma, o tamanho de cada elemento foi de 0,2mm, totalizando 2.916.433 nós e 1.516.095 elementos. Na Figura, 4.2 – 2 podemos ver o resultado da malha final.

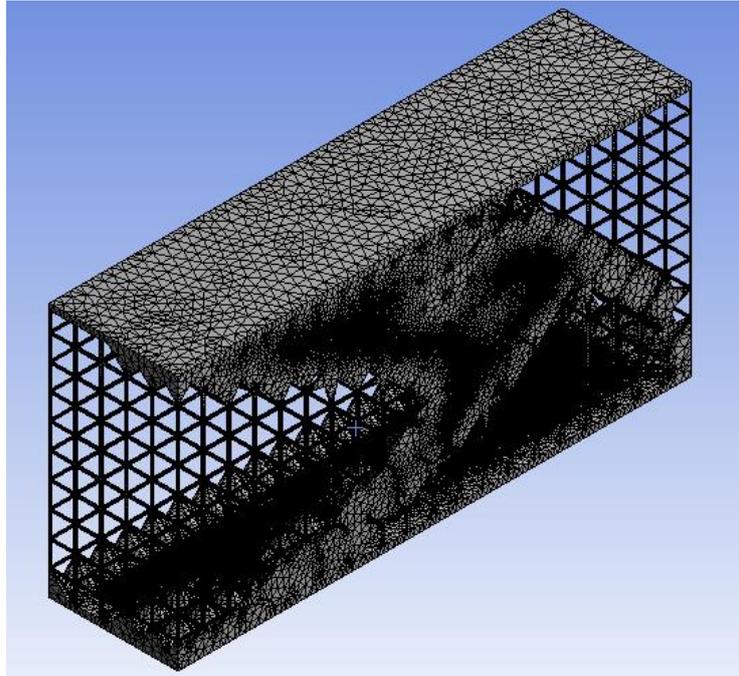


Figura 4.2-2 Malha final da geometria otimizada com estruturas lattice

Como resultado, obteve-se o deslocamento total máximo de 9,5117 mm no ponto em que a força é aplicada, e o mínimo de 0,028965 mm, a qual está representada pela Figura 4.2 – 3.

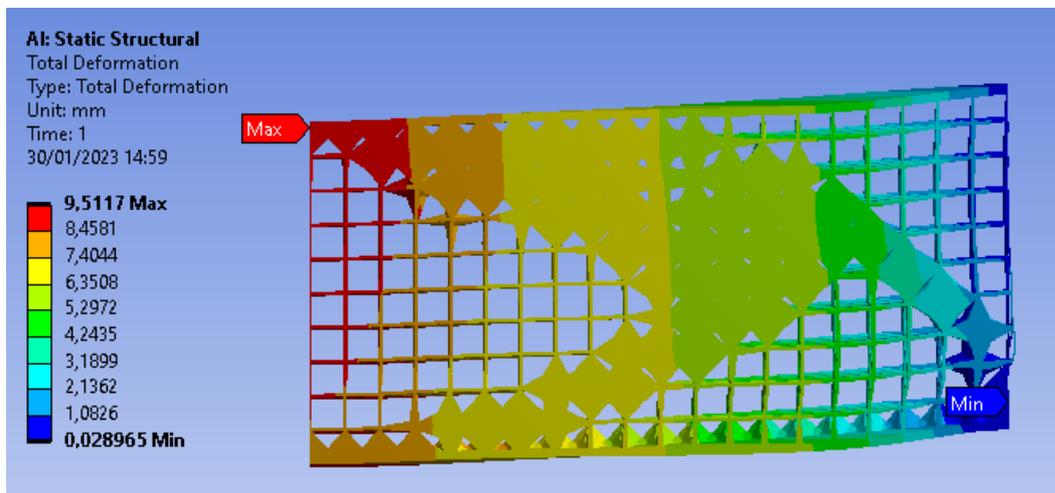


Figura 4.2-3 Deslocamento total da geometria otimizada com estruturas lattice

4.3 Resultados com a geometria *lattice*

Por fim, realizou-se também a análise estrutural da geometria utilizando as estruturas *lattice*. Com os parâmetros que foram utilizados, os

quais foram representados pela Figura 3.4 – 1, obteve-se a massa final igual a $6,2916 \times 10^{-2}$ kg, sendo que a massa original era de 0,51354 kg, ou seja, ocorreu uma redução de 87,74 %, assim como no volume da estrutura, que passou a ser de 7840,9 mm³ ao invés de 64000 mm³.

No que diz respeito a malha, foi utilizado um tamanho de elemento de 0,6mm, o qual gerou 1.641.852 nós e 812.210 nós.

Como resultado, obteve-se o deslocamento total máximo de 21,971 mm no ponto em que a força é aplicada, e o mínimo de 0,22233 mm, a qual está representada pela figura 4.1 – 3.

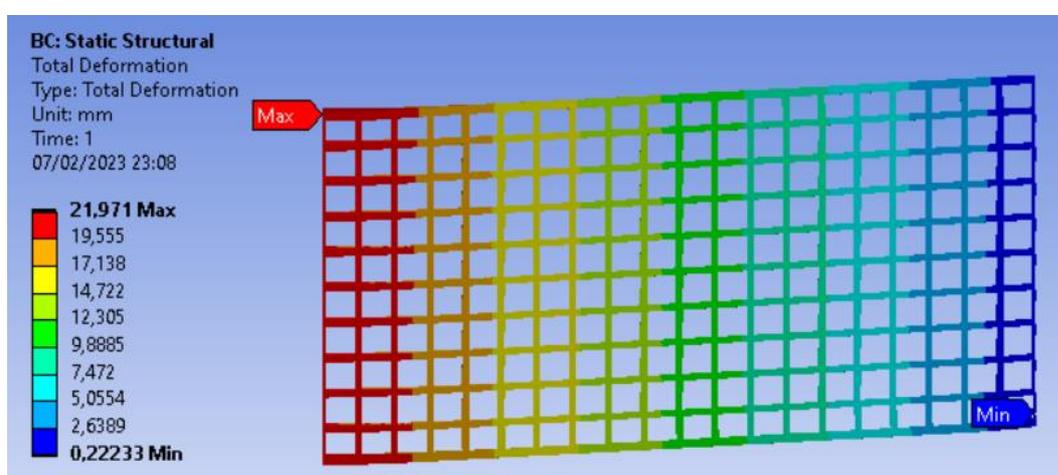


Figura 4.3-1 Deslocamento total da geometria com estruturas *lattice*

Com o intuito de comparar os resultados das diferentes simulações realizadas, foi gerada uma tabela com os parâmetros estudados.

Tabela 4.3-1 Comparação entre os resultados obtidos

Parâmetros	Otimização topológica clássica	Otimização topológica <i>lattice</i>	Geometria <i>lattice</i>
Massa [kg]	7,16E-02	6,35E-02	6,29E-02
Volume [mm ³]	8918,1	7911,1	7840,9
Máximo deslocamento total [mm]	2,6119	9,5117	21,971

Com base nos resultados obtidos das diferentes estruturas, percebe-se que a otimização topológica clássica se demonstra com um desempenho melhor quando comparado com as outras geometrias. Isso se dá pelo fato da otimização topológica clássica retirar material dos lugares

em que não há necessidade, o que não acontece na otimização topológica do tipo *lattice*, nela, todo domínio é preenchido, porém com densidades diferentes de acordo com as condições de contorno do problema. Em relação, as 2 geometrias *lattice*, era esperado que a obtida a partir da otimização tivesse um desempenho melhor, já que nela a densidade da microestrutura aumenta nos locais em que os esforços são maiores, enquanto na outra a densidade é a mesma para todo domínio.

5. CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível obter três geometrias distintas para o mesmo problema de uma viga apoiada com uma carga concentrada. As diferentes topologias foram obtidas por meio de dois tipos de otimização topológica, sendo elas a clássica e a *lattice*, e a outra apenas pela utilização da microestrutura *lattice*. Tal estudo tornou-se possível com ajuda do *software Ansys*, onde foram realizadas as análises numéricas.

No que se refere a comparação do comportamento mecânico entre as três topologias, foi possível concluir que a otimização topológica clássica teve um desempenho superior às demais. Além disso, uma vantagem que é importante ressaltar é que a utilização da geometria tipo *lattice* não necessita de material suporte, o que acarreta na diminuição da quantidade do material utilizado, e também, evita a danificação da peça na etapa de retirada do material suporte.

5.1 Sugestões para futuros trabalhos

Visto que existem outros tipos de microestruturas disponibilizadas pelo *software*, seria interessante para trabalhos futuros a utilização de outros além da estrutura cúbica, a qual foi utilizada e realizar uma comparação entre elas. Além disso, um ensaio experimental seria importante para que os resultados obtidos pudessem ser validados, podendo assim, realizar uma possível comprovação da hipótese apontada sobre a concentração de tensão na geometria.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

[1] “Ansys Academic Support | Tutorials & Training Materials.” www.ansys.com, www.ansys.com/academic/learning-resources. Acessado em 06 Jan. 2023

[2] “ANSYS Workbench - Lattice Optimization / Topology Optimization for Additive Manufacturing.” www.youtube.com, www.youtube.com/watch?v=sP0EHni7j0I&t=210s&ab_channel=YiNie. Acessado em 24 Jan. 2023.

[3] “ANSYS Workbench Tutorial - Simply Supported Beam - Center Load - PART 2.” www.youtube.com, www.youtube.com/watch?v=XECmd-BPKa8&ab_channel=DrDalyO. Acessado em 24 Jan. 2023.

[4] “ANSYS Workbench Tutorial - Simply Supported Beam - PART 1.” www.youtube.com, www.youtube.com/watch?v=CTi1rupfi0&ab_channel=DrDalyO. Acessado em 24 Jan. 2023.

[5] Arboleda, Giovanni. An Effective Compatibility Scheme in Multiscale Topology Optimization of Structures. 2020. Acessado em 15 Dez. 2022.

[6] Bendsoe, Martin Philip, and Ole Sigmund. Topology Optimization - Theory, Methods and Applications. 2003. Acessado em 24 Jan. 2023.

[7] Fernandes, Lucas Cintra. Técnicas de Otimização Utilizando O Ansys Workbench. 4 Dec. 2019. Acessado em 24 Jan. 2023.

[8] Gil, Felipe de Souza. Análise Da Qualidade de Malha de Elementos Finitos E Validação de Situação de Caso Real de Viga Biapoiada. 2015. Acessado em 10 Jan. 2023.

[9] How to Use Lattice Optimization in ANSYS Mechanical and ANSYS SpaceClaim 19.2 - PADT. 4 Dec. 2018, www.padtinc.com/2018/12/04/how-

to-use-lattice-optimization-in-ansys-mechanical-and-ansys-spaceclaim-19-2/. Acessado em 24 Jan. 2023.

[10] Kim, Jae-Eun, and Keun Park. "Multiscale Topology Optimization Combining Density-Based Optimization and Lattice Enhancement for Additive Manufacturing." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 8, no. 4, 14 Dec. 2020, pp. 1197–1208, 10.1007/s40684-020-00289-1. Acessado em 24 Jan. 2023.

[11] Maia, Sheyla. *Otimização Topológica Aplicada Ao Problema de Maximização Da Frequência Natural*. 2021. Acessado em Jan. 2023.

[12] "Mesh Element Quality and Size." *Doc.comsol.com*, doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/comsol_ref_mesh.15.18.html. 2018. Acessado em 12 Dez. 2023.

[13] MELO, L. Y. *Avaliação numéricas de uma viga biapoiada obtida pelo método de otimização topológica*. 2019. Acessado em 22 Nov. 2022.

[14] Mirlisenna, Giuseppe. "O Que é O Método Dos Elementos Finitos E Como Ele é Usado Na Simulação." *ESSS*, 2016, www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/. Acessado em 15 Jun. 2022.

[15] Moreira, João Baptista. *Otimização Topológica Multiescala Aplicada a Problemas Dinâmicos*. Aug. 2018. Acessado em 05 Jan. 2023.

[16] Nascimento, Higo Leonardo. *Método de Otimização Topológica Em Estruturas Contínuas Bidimensionais*. Dec. 2019. Accessed 24 Jan. 2023.
Olason, Anton, and Daniel Tidman. *Methodology for Topology and Shape Optimization in the Design Process*. 2010. Acessado em 24 Jan. 2023.

[17] Porcher, Felipe. *OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL PARAMÉTRICA COM RESTRIÇÕES POR CRITÉRIO de FALHA de TENSÃO ADMISSÍVEL E*

COLAPSO ATRAVÉS de ALGORITMOS GENÉTICOS. Nov. 2016.
Acessado em 24 Jan. 2023.

[18] Son, Dihn. “Design of Lattice Structure for Additive Manufacturing in CAD Environment.”
https://www.jstage.jst.go.jp/Article/Jamdsm/13/3/13_2019jamdsm0057/_article, July 2019. Acessado em 12 Out. 2022.

[19] Tao, Wenjin, and Ming C. Leu. “Design of Lattice Structure for Additive Manufacturing.”
https://www.researchgate.net/Publication/311756044_Design_of_lattice_structure_for_additive_manufacturing, Aug. 2016. Acessado em 24 Jan. 2023.

[20] Wu, Jun, et al. Topology Optimization of Multi-Scale Structures: A Review. 8 Mar. 2021, link.springer.com/article/10.1007/s00158-021-02881-8. Acessado em 25 Nov. 2022.

[21] ZHU, Jihong, et al. “A Review of Topology Optimization for Additive Manufacturing: Status and Challenges.” Chinese Journal of Aeronautics, vol. 34, no. 1, Jan. 2021, pp. 91–110, 10.1016/j.cja.2020.09.020. Acessado em 24 Jan. 2023.