



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA APLICADA À ANÁLISE DE MÚLTIPLOS CORPOS
CONECTADOS**
GABRIEL DE AGUIAR MORAES REGO

SÃO LUÍS/MA

2021

GABRIEL DE AGUIAR MORAES REGO

**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA APLICADA À ANÁLISE DE MÚLTIPLOS CORPOS
CONECTADOS**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia Campos

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO ALUNO **GABRIEL DE AGUIAR MORAES REGO.** E ORIENTADA PELO **PROF. ME. ANTÔNIO VINÍCIUS GARCIA CAMPOS.**


ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

SÃO LUÍS

2021

Rego, Gabriel de Aguiar Moraes.

Otimização topológica aplicada à análise de múltiplos corpos conectados /
Gabriel de Aguiar Moraes Rego. – São Luís, 2021.

53 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade
Estadual do Maranhão, 2021.

Orientador: Prof. Me. Antônio Vinícius Garcia Campos.

1.Otimização. 2.Rígidez. 3.Simulação. 4.Topologia. 5.Elementos finitos.

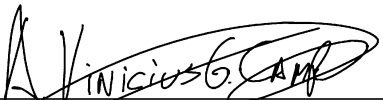
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA APLICADA À ANÁLISE DE MÚLTIPLOS CORPOS
CONECTADOS**


Autor: Gabriel de Aguiar Moraes Rego

Orientador: Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia Campos

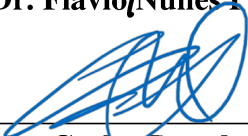
A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta monografia:



Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia Campos
Presidente



Prof. Dr. Flavio Nunes Pereira



Prof. Me. Carlos Ronyhelton Santana de Oliveira

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, 28 de dezembro de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, assim como o final deste ciclo em minha vida, a minha mãe, meu maior exemplo, que sempre me apoia e luta para que seus filhos e as pessoas a quem ela ama estejam bem.

Dedico a minha avó, mãe de minha mãe, que é a pessoa mais gentil e amável que conheço e sempre se doa para ajudar ao próximo.

Dedico a minha futura esposa, que divide minhas alegrias, dores, brigas, medos e que é responsável por quem sou e quem estou me tornando.

Dedico aos meus irmãos e amigos, cujo apoio, presença e convívio me ajudaram a suportar esta árdua jornada.

Dedico a todos que de alguma forma fizeram parte da minha história, seja da forma mais impactante até a minimalista, pois cada variável presente na minha trajetória me trouxe até aqui.

Dedico a mim, que por mais que tenha passado por frustrações, inseguranças, dificuldades, problemas de saúde, e outras complicações, nunca desistiu e continuou até o fim deste ciclo.

Dedico em especial ao meu falecido avô, que ficou imensamente feliz quando entrei no curso de engenharia mecânica, e sempre foi uma referência de dedicação, ombridade e honestidade para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à benção da vida e ao fato de poder ter acesso, a uma educação de qualidade, um lar, uma família unida e a pessoas boas e positivas em meu convívio.

Agradeço a Universidade Estadual do Maranhão por me permitir ter a oportunidade de aprender, crescer e ir em busca de meus sonhos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia Campos por toda a paciência, atenção, apoio, compreensão e disposição para me ajudar nas questões do trabalho.

Agradeço a minha família e amigos que me deram suporte, espaço e tempo durante a produção desse trabalho.

Agradeço à equipe da Excelência Operacional Técnica Ferroviária da VALE, por serem compreensivos e sempre me apoiarem nas questões ligadas a universidade.

RESUMO

A otimização topológica, quando descrita de maneira breve, se consiste em realizar alterações de formas, geometrias e volume em benefício da maximização de uma determinada função dentro de uma estrutura, proporcionando a formação de um novo design topológico para a mesma. O presente trabalho consiste em analisar o método de otimização topológica e suas diferenças, quando aplicado a uma estrutura com multipartes conectadas em prol de maximizar sua rigidez enquanto que seu volume é reduzido consideravelmente. O trabalho busca também entender a importância e aplicação do método dos elementos finitos para a otimização topológica. O trabalho foi executado através de um pacote de software comercial denominado Ansys R2 2021 Student, muito utilizado para simulações e análises estruturais. Dentro do programa foram realizadas mudanças na malha do domínio de elementos finitos de duas estruturas iguais, criada uma nova estrutura e aplicada uma condição de contorno diferente, a fim de se observar e analisar a variação nos resultados.

Palavras-chave: Otimização; Rigidez; Simulação; Topologia; Elementos finitos.

ABSTRACT

Topological optimization, when described briefly, consists of making changes to shapes, geometries, and volume for the benefit of maximizing a given function within a structure, providing the formation of a new topological design for it. The present work consists in analyzing the topology optimization method and its differences, when applied to a structure with connected multiparts, in order to maximize its stiffness while its volume is considerably reduced. The work also seeks to understand the importance and application of the finite element method for topological optimization. The work was performed using a commercial software package called Ansys R2 2021 Student, widely used for simulations and structural analysis. Within the software, changes were made in the mesh of the finite element domain of two equal structures, a new structure was created and a different boundary condition was applied, in order to observe and analyze the variation in the results.

Keywords: Optimization; Stiffness; Simulation; Topology; Finite Elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Representação das três categorias de otimização estrutural: (a) paramétrica, (b) forma, e (c) topológica. (Bendsoe e Sigmund, 2003).	17
Figura 4.2- Nós, elementos e malha de um domínio. (Mirlisenna, 2021).....	18
Figura 5.1 - Fluxograma das etapas do projeto. Autor (2021)	24
Figura 5.2 – Modelo aplicado na análise. (Autor,2021)	25
Figura 5.3 – Cotas de comprimento da estrutura. (Autor, 2021).....	26
Figura 5.4 – Cotas das chapas de ângulo reto em milímetros. (Autor,2021)	26
Figura 5.5 – Cotas das chapas do ângulo agudo em milímetros. (Autor,2021)	26
Figura 5.6 – Disposição dos furos na chapa do ângulo reto em milímetros. (Autor,2021)	27
Figura 5.7 – Disposição dos furos na chapa do ângulo agudo em milímetros. (Autor, 2021) .	27
Figura 5.8 - Fixações da estrutura da mão francesa. (Autor, 2021).....	28
Figura 5.9 – Condições de contorno: mão francesa. (Autor, 2021).....	28
Figura 5.10 – Vista frontal: Cotas de comprimento das barras. (Autor, 2021)	29
Figura 5.11 – Vista frontal: Cotas das chapas do ângulo reto em milímetros. (Autor, 2021)..	29
Figura 5.12 – Vista frontal: Cotas chapas dos ângulos agudos em milímetros. (Autor, 2021)	29
Figura 5.13 – Posições dos furos nas chapas do ângulo reto em milímetros. (Autor, 2021) ...	30
Figura 5.14 – Posições dos furos nas chapas dos ângulos agudos. (Autor, 2021)	30
Figura 5.15 – Propriedades do material aplicado. (Autor, 2021)	30
Figura 5.16 - Malha Refinada. (Autor,2021).....	32
Figura 5.17 - Malha básica. (Autor,2021).....	32
Figura 5.18– Vista frontal: Modelo de estudo cantilever-beam. (HUANG e XIE, 2010)	33
Figura 5.19– Vista frontal: Deformação na cantilever-beam. (Autor, 2021)	34
Figura 5.20 – Vista frontal: Topologia final cantilever-beam. (Autor, 2021).....	34
Figura 5.21 – Legenda de classificação dos elementos dentro da análise topológica no Ansys. (Autor, 2021)	35
Figura 5.22 – Painel de pré-processamento para OT no Ansys. (Autor, 2021)	36
Figura 5.23 – Aba com detalhes das configurações da análise do Ansys. (Autor, 2021)	36
Figura 5.24 – Aba da região de otimização. (Autor, 2021).....	37
Figura 5.25 – Objetivo da OT. (Autor, 2021).....	37
Figura 5.26 – Aba de restrição de resposta. (Autor, 2021)	37
Figura 6.1 – Vista frontal: Tensões na estrutura com malha refinada. (Autor, 2021)	38
Figura 6.2 – Vista frontal: Deformação na estrutura com malha refinada. (Autor, 2021).....	39

Figura 6.3 – Vista frontal: Tensões na estrutura com malha básica. (Autor, 2021)	39
Figura 6.4 – Vista frontal: Deformação na estrutura com malha refinada. (Autor, 2021).....	40
Figura 6.5 – Valor mínimo na escala de otimização topológica dos elementos a serem mantidos. (Autor, 2021)	40
Figura 6.6 – Porcentagem de volume final da estrutura com malha refinada. (Autor, 2021)..	41
Figura 6.7 – Porcentagem de volume final da estrutura com malha básica. (Autor, 2021)	41
Figura 6.8 – Vista frontal: Zoom na parte superior do domínio com malha básica após otimização. (Autor, 2021)	41
Figura 6.9 – Vista frontal: Zoom na parte intermediária do domínio com a malha básica após otimização. (Autor, 2021)	42
Figura 6.10 – Vista frontal: Zoom na parte inferior do domínio com a malha básica após otimização. (Autor, 2021)	42
Figura 6.11 -Vista frontal: Zoom na parte superior do domínio com malha refinada após otimização. (Autor, 2021)	43
Figura 6.12 – Vista frontal: Zoom na parte intermediária do domínio com malha refinada após otimização. (Autor, 2021)	43
Figura 6.13- Vista frontal: Zoom na parte inferior do domínio com malha refinada após otimização. (Autor, 2021)	43
Figura 6.14 - Conexões inferiores pós-otimização. a. Malha básica ; b. Malha refinada . (Autor, 2021)	44
Figura 6.15 - Conexões do angulo reto pós-otimização. a. Malha básica; b. Malha refinada. (Autor, 2021)	45
Figura 6.16 - Conexões do angulo agudo superior pós-otimização. a. Malha básica; b. Malha refinada. (Autor, 2021).....	45
Figura 6.17 – Vista frontal: Deformação estrutural da mão francesa aumentada 1,5x. (Autor, 2021)	46
Figura 6.18 – Vista frontal: Tensões na estrutura da mão francesa. (Autor, 2021).....	47
Figura 6.19 – Parte superior da vista frontal: mão francesa após a OT. (Autor, 2021).....	48
Figura 6.20 – Parte intermediária da vista frontal: mão francesa após a OT. (Autor, 2021) ...	48
Figura 6.21 – Parte inferior da vista frontal: mão francesa após a OT. (Autor, 2021)	48
Figura 6.22 – Resultados da OT da mão francesa. (Autor, 2021)	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Bidimensional

ESO – Evolutionary Structural Optimization

MEF – Método dos Elementos Finitos

BESO – Bi-directional Evolutionary Structural Optimization

OT – Otimização Topológica

SIMP – Solid Isotropic Material with Penalization

LISTA DE SIMBOLOS

F - Força

k - Módulo de elasticidade

u - Vetor de deslocamento

C - Compliance

F^T - Transposta da força

V^* - Volume inicial

V_i - Volume i -ésimo elemento

X_{min} - Valor minimo para presença do elemento na malha pós-otimização

α - Número de sensibilidade de cada elemento

i - Numeração do elemento

K - Matriz de rigidez

p - Fator de penalização

ρ_i - Caracterização de densidade do material

E_{ρ_e} - Novo modulo de Young em função da densidade relativa do elemento

ρ_e^p - Densidade relativa do elemento

E_0 - Valor inicial do módulo de young do elemento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral:	14
2.2. Objetivos específicos:	14
3. JUSTIFICATIVA	15
4. REVISÃO TEÓRICA	17
4.1. Método dos Elementos Finitos.....	17
4.2. Otimização topológica	19
4.2.1. Método ESO.....	20
4.2.2. Método BESO.....	22
4.2.3. Método SIMP	22
5. METODOLOGIA.....	24
5.1. Modelos aplicados.....	24
5.2. Método dos elementos finitos aplicado no trabalho	31
5.3. Otimização Topológica.....	33
5.4. Pré-processamento	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
7. CONCLUSÃO.....	50
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

Os projetos de engenharia estão se tornando cada vez mais desafiadores e complexos, tudo isso se deve aos avanços tecnológicos e aumento da capacidade de manufatura, principalmente dentro da produção de componentes mais complexos.

No método dos elementos finitos, um determinado domínio é visto como uma coleção de subdomínios, e sobre cada subdomínio a equação governante é aproximada por qualquer um dos métodos tradicionais de variação ou qualquer método que seja adequado. A principal razão por trás da busca de soluções aproximadas em um conjunto de subdomínios é o fato de que é mais fácil representar uma função complexa como uma coleção de polinômios simples. (REDDY, 2019). Desde o desenvolvimento do método de elementos finitos, várias formas de análises puderam ser possíveis, como por exemplo, análise estrutural, análise dinâmica, multi-físicas, entre outras. Com a facilitação e a capacidade de resolver problemas mais complexos, o FEM possibilitou aos engenheiros e projetistas a integração das técnicas numéricas juntamente com técnicas de otimização de projeto, a fim de buscar dimensões mais eficientes e otimizadas.

Ao longo dos anos vários tipos de otimização foram desenvolvidos, como a otimização de forma, que lida com as alterações nas formas dos objetos vazios sem alterar volume ou massa da estrutura, a otimização paramétrica que trabalha com a alteração das secções transversais, geometrias e dimensões da estrutura, e a otimização topológica que engloba as duas anteriores e ainda trabalha com a possibilidade de alteração da massa e volume do item de projeto (CAMPOS, 2018), esta que será aplicada e discutida neste trabalho.

A otimização topológica visa obter a forma ou design mais eficiente dentre uma determinada função da estrutura, considerando algumas limitações de projeto, como força aplicada, volume e orçamento (HUANG; XIE, 2010). Atualmente a OT está cada vez mais integrada a pacotes computacionais de análise estruturais, isso possibilita que os projetistas tenham acesso a esta ferramenta de otimização, possibilitando uma aplicação mais geral e a diversos problemas e projetos, com destaque à impressão 3D.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral:

O trabalho tem como objetivo principal a análise e o desenvolvimento de uma estrutura com base na aplicação dos elementos finitos e da otimização topológica, visa também entender as nuances do MEF e da OT, perceber as diferenças entre as análises quando se há uma distinção entre as qualidades das malhas e analisar a OT aplicada em diferentes condições de contornos e estruturas.

2.2. Objetivos específicos:

- Levantamento do referencial teórico;
- Entender aspectos da análise por elementos finitos e otimização topológica;
- Entender os aspectos da OT dentro do pacote comercial utilizado (Ansys R2 2021 Student);
- Comprovar computacionalmente a eficiência da ferramenta;

3. JUSTIFICATIVA

A otimização estrutural busca alcançar a melhor performance para uma característica da estrutura enquanto satisfaz diferentes condições de projeto, como por exemplo um volume de estrutura pré-estabelecido. (HUANG; XIE ,2010)

A engenharia existe em prol de se estudar situações e desenvolver, da maneira mais inteligente, uma solução para determinado problema ou projeto. Ao longo dos anos, vários métodos e ferramentas são desenvolvidos ou atualizados para facilitar ou possibilitar a resolução de problemas mais complexos, um destes métodos foi o de análise através de elementos finitos.

Métodos numéricos como o MEF são baseados na discretização da forma integral da equação. O tema base de todos os métodos numéricos é realizar cálculos apenas para um número limitado de pontos e então interpolar os resultados para o domínio completo (superfície ou volume), (GOKHALE et al., 2008). O MEF trata uma estrutura de maneira muito mais simplista e inteligente quando se busca analisá-la, é um método que divide um domínio em vários elementos geométricos, transformando um problema complexo em vários problemas mais simples. A otimização topológica se aproveita muito do método de elementos finitos, pois é através dele que ela analisa cada elemento e determina sua característica dentro do domínio (cheio, vazio ou intermediário).

Atualmente a otimização topológica se tornou um tópico cada vez mais popular entre os engenheiros devido a sua aplicabilidade e acessibilidade, isto de acordo com GARCIA (2018), se deve ao avanço das novas técnicas de manufatura, como por exemplo a manufatura aditiva, a necessidade da utilização de pouco material e o desenvolvimento acelerado na área de ferramentas computacionais, uma destas sendo o Ansys, um pacote comercial muito utilizado na indústria, com ferramentas muito úteis a engenharia.

O pacote comercial Ansys atua como um excelente aliado ao design eficiente e mais complexo da otimização topológica, visto que ele pode realizar inúmeros testes antes da fabricação da estrutura, evitando assim grandes desperdícios, acelerando o processo de adaptação e melhoria contínua, e até possibilitando outros projetos devido a economia gerada por sua aplicação antes da produção do projeto.

A otimização topológica já produz resultados significativos quando aplicada em projetos mais dispendiosos, gerando uma economia relevante no processo de fabricação de algumas estruturas sem afetar o desempenho da mesma.

A possibilidade de se fabricar algo utilizando menos material inflige não apenas na questão econômica, mas também na questão do impacto ambiental, visto que o fato de se usar menos material, causa uma redução na necessidade de extração da natureza, de mesmo modo, há redução de resíduos de fabricação, o que reduz a agressão e o impacto ao meio ambiente.

A otimização topológica é uma ferramenta promissora que já faz parte e será ainda mais presente em inúmeros projetos de engenharia no futuro, portanto, é necessário estudá-la e dominá-la a fim de se manter competitivo dentro do mercado.

4. REVISÃO TEÓRICA

Pode-se dizer que a otimização topológica teve início através de métodos intuitivos e discretos, estes sendo: o método da otimização paramétrica e otimização de forma. O método da otimização paramétrica, de acordo com Huang e Xie (2010), busca a otimização estrutural em função da alteração das variáveis de tamanho ou geométricas como, a dimensão da seção transversal em treliças ou a espessura em placas, enquanto que a otimização de forma buscava somente variar o formato de elementos vazios dentro da estrutura, sem alteração de peso ou volume da estrutura em geral, figura 4.1(a) e 4.1(b).

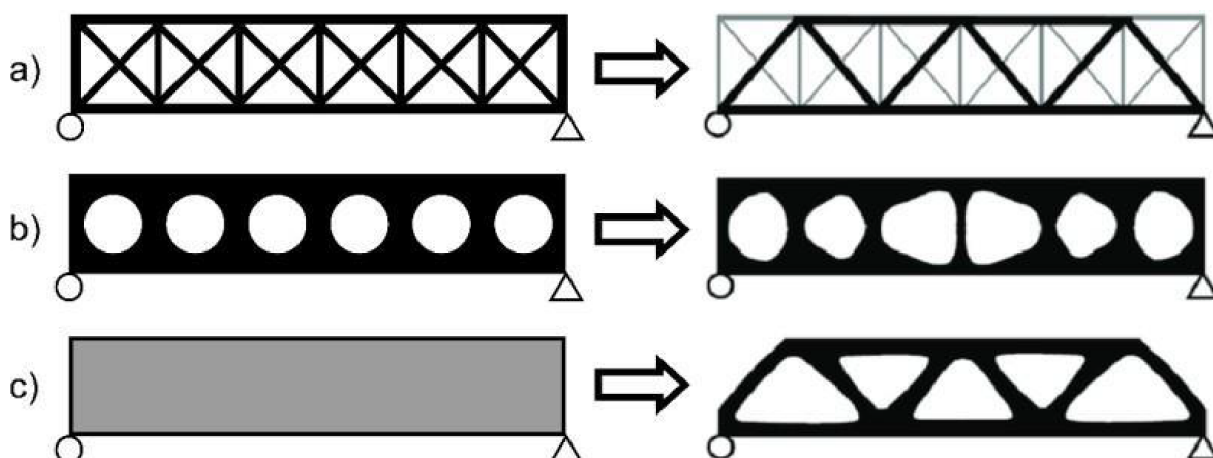


Figura 4.1 - Representação das três categorias de otimização estrutural: (a) paramétrica, (b) forma, e (c) topológica. (Bendsoe e Sigmund, 2003).

Como uma forma evolutiva de ambos os processos, a otimização topológica surgiu através do trabalho de Bendsoe e Kikuchi (1988), desde então foi desenvolvida, adaptada e mesclada às ferramentas modernas.

A otimização topológica é a mais complexa, porém a mais recompensadora se comparada às outras, pois trabalha tanto com variações de geometria, quanto com variações de forma dentro do projeto, enquanto têm diversas condições ou limites estruturais pré-estabelecidos, observe a figura 4.1(c).

4.1. Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos foi criado para simplificar a complexidade dos cálculos em um domínio, ele determina soluções aproximadas de problemas de contorno sobre equações diferenciais conhecidas.

O MEF, ou, método dos elementos finitos discretiza o problema dividindo o domínio em diversos elementos, cada elemento vai ter uma reação diferente ao estímulo aplicado na estrutura, portanto, cada elemento é analisado individualmente, e possui seu conjunto de equações baseadas na equação do problema geral, e no final estes conjuntos de equações são recombinados sistematicamente em um conjunto global de equações, (GOKHALE et al., 2008).

Os elementos são formados por nós, estes que são pontos de intersecção entre dois ou mais elementos, eles são a base de referência para as coordenadas aplicadas ao problema, ou seja, são parte fundamental para realização dos cálculos se utilizando o método dos elementos finitos.

O conjunto de nós e elementos formam uma malha, figura 4.2, esta malha é a representação do domínio da estrutura. A malha depende diretamente da geometria, tamanho e número de elementos aplicados no domínio (MIRLISSENA,2016), por exemplo, em uma seção retangular do domínio se faz melhor utilizar elementos quadrados, pois mesmo que se utilizando de elementos triangulares o número de elementos poderia ser maior, a simetria da malha seria prejudicada. A ideia é que a malha tenha o maior número de elementos possíveis, com menor tamanho e mantenha a simetria do domínio.

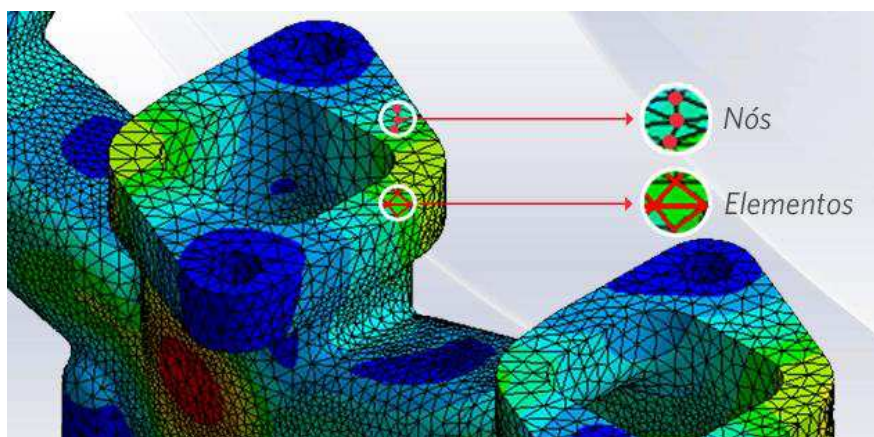


Figura 4.2- Nós, elementos e malha de um domínio. (Mirlisenna, 2021)

A malha é de extrema importância para o problema, visto que a partir dela todas as caracterizações dos problemas serão desenvolvidas, ou seja, uma malha bem definida

representa resultados mais próximos dos reais, isto ocorre porque quanto maior o elemento, mais imprecisos serão os cálculos e maiores os erros de projeto.

Os softwares de simulação vêm evoluindo cada vez mais para produção dessa malha, buscando sempre melhorar a criação da mesma, através de uma escolha de geometria melhor para os elementos e uma otimização no processamento de dados para os cálculos, permitindo assim que computadores menos potentes possam realizar ensaios com um número decente de elementos e computadores mais potentes possam realizar ensaios com um número muito maior de elementos.

4.2. Otimização topológica

A otimização topológica é um método comumente baseado e aplicado utilizando-se o método de elementos finitos, onde, através do MEF é criada uma malha refinada caracterizando a estrutura e seu domínio. A otimização busca determinar quais elementos serão classificados como vazios e quais serão caracterizados como cheios, isso ocorre através da aplicação de três tipos básicos de métodos: *Evolutionary Structural Optimization* (ESO) por Xie e Steven (1993), *Bi-directional Evolutionary Structural Optimization* (BESO) apresentado por Querin, Steven e Xie (1998), e *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP) por Bendose e Sigmund (1999).

Para a maioria das funções matemáticas a maximização das mesmas se torna um problema muito complexo, visto que o critério de convergência se torna muito mais difícil de ser identificado, pensando nisso, foram desenvolvidos métodos como por exemplo, se utilizar a função negativa da função que se busca, assim utilizando um critério de minimização da função contraria a fim de se maximizar a função desejada. Para a função da rigidez, temos a equação 4.1 que representa a lei de Hook, e a sua função inversa se mostra como compliance, equação 4.2, que determina a energia total de deformação de uma estrutura ou algo como a flexibilidade do material.

$$F = K * u \quad (4.1)$$

$$C = \left(\frac{1}{2}\right) F^T * u \quad (4.2)$$

De acordo com CAMPOS (2018), após adotar a função de compliance como função a ser minimizada, o problema pode ser caracterizado logicamente como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} \quad C = \left(\frac{1}{2}\right) F^T * u \quad (\text{Função Objetivo}) \\
 & \text{Sujeito a} \quad V^* - \sum_{i=1}^n V_i X_i = 0 \quad (\text{Restrição de Volume}) \\
 & \quad \quad \quad e \quad K * u = F \quad (\text{Equação de equilíbrio}) \\
 & \text{onde, } 0 < X_{min} \leq X_i \leq 1 \quad (\text{Variável de projeto})
 \end{aligned}$$

A restrição de volume é a nossa condição de projeto, onde, V^* é o volume inicial do projeto, V_i é o volume do i -ésimo elemento, n é o número total de elementos dentro do domínio de otimização, X_i é a variável de projeto responsável por caracterizar o elemento, ou seja, se o elemento deve ser considerado presente ou removido do domínio seguindo o critério da função objetivo.

Para realizar essa caracterização de elementos entre “sólidos” ou “vazios”, presentes ou removidos, são utilizados, principalmente, três métodos numéricos, sendo eles: ESO, BESO e SIMP.

4.2.1. Método ESO

O método *Evolutionary Structural Optimization* ou ESO, foi desenvolvido por XIE e Steven em 1993, ele utiliza a análise numérica para produção de uma malha da estrutura, onde ocorre a remoção gradual de material ou, no caso do MEF, remoção gradual de elementos da malha, gerando uma nova malha e conseqüentemente uma nova topologia a cada iteração, a figura 4.3 mostra uma estrutural inicial que foi otimizada por Huang e Xie (2010), e a figura 4.4 mostra parte da evolução do processo e de cada iteração até a estrutura e volume finais, onde RR significa “rejection ratio” ou índice de rejeição de material.

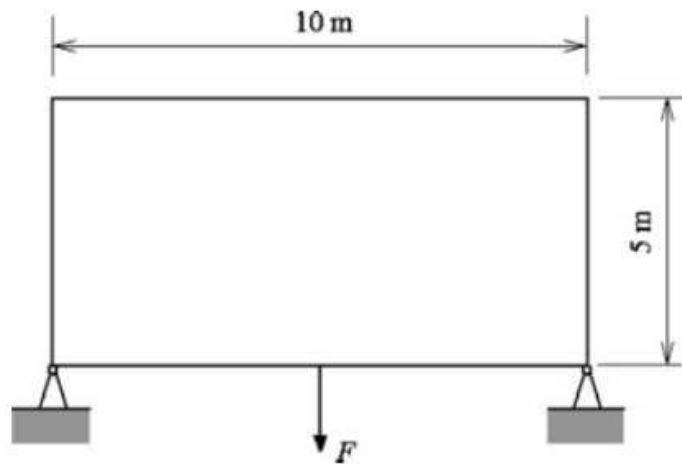


Figura 4.3 - Design de um domínio de uma estrutura do tipo Michell com dois suportes simples. (Huang e XIE, 2010)

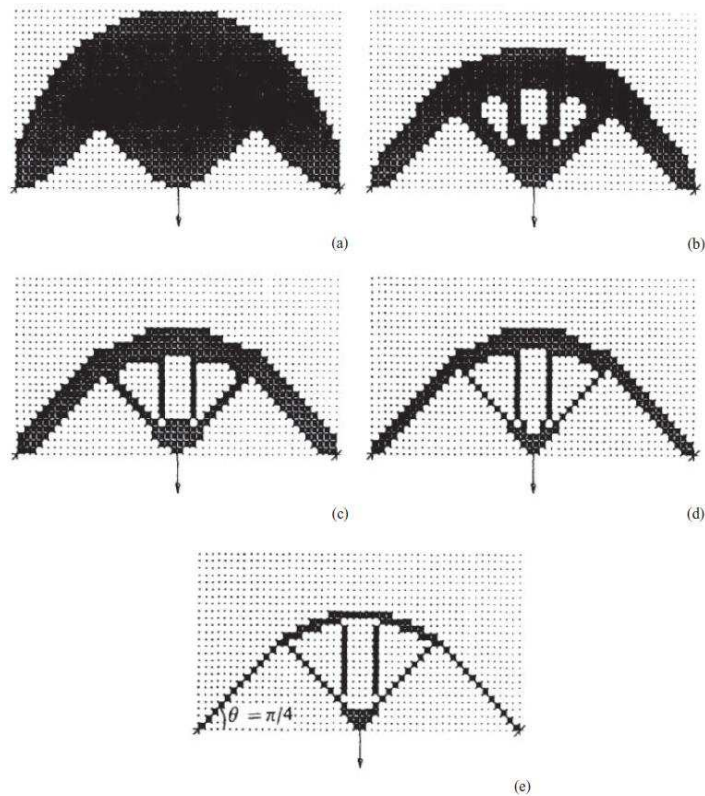


Figura 4.4 - Topologia ESO para uma uma estrutura do tipo Michell com dois suportes simples. (Xie and Steven, 1993): (a) RR = 5%; (b) RR = 10 %; (c) RR = 15 %; (d) RR = 20 %; (e) RR = 25 %.

O método segue um critério de análise completa do domínio baseando-se em um fator de sensibilidade de cada elemento, onde, cada elemento possui uma sensibilidade específica em relação a função objetivo, o método é aplicado até que as condições ou restrições estruturais sejam atingidas.

4.2.2. Método BESO

O *Bi-directional Evolutionary Structural Optimization* ou BESO, é a evolução direta do método ESO, ele permite a remoção e adição de material simultaneamente Huang, Xie (2010). De acordo com Huang e Xie (2010), para a definição do domínio estrutural e construção do design topológico é necessário a interpolação de elementos entre as regiões de sólido e vazio, essa interpolação ocorre baseada no número de sensibilidade de cada elemento.

O número de sensibilidade é que determina como cada elemento deve ser caracterizado, por exemplo, o elemento é caracterizado e caso o elemento presente tenha uma sensibilidade baixa, ele é removido da estrutura. Os elementos não presentes ou vazios, são calculados através de uma extrapolação linear do campo de deslocamento após a análise de elementos finitos, Huang, Xie (2010), caso seus elementos tenham um valor de sensibilidade relevante, eles são adicionados ao domínio da estrutura.

De acordo com Huang, Xie (2010), número de sensibilidade para a maximização da rigidez estrutural é dado pela equação 4.3:

$$\alpha_i^c = \left[\frac{1}{2} x_i^{p-1} u_i^T K_i u_i \right] \quad (4.3)$$

Onde, α é o número de sensibilidade, i é o elemento sendo calculado, u é o vetor de deslocamento, K a rigidez de cada elemento e X_i é a lista de elementos elevado ao p que é uma variável de penalização.

4.2.3. Método SIMP

O *Solid Isotropic Material with Penalization* ou SIMP, Bendsoe e Kikuchi (1988) e Rozvany e Zhou (1992), inicialmente o método SIMP tinha uma abordagem discreta e binária da caracterização do elemento, onde o valor de densidade do material era representada por ρ e era descrito como:

- $\rho_i = 1$; Para elementos onde há necessidade de material
- $\rho_i = 0$; Para elementos onde não há necessidade de material

Com o desenvolvimento do método, foi observado que o método SIMP deveria ser aplicado a problemas de natureza não-binária, onde cada elemento teria uma densidade relativa de material, e assim ocorreu a introdução de um conceito que descreve ρ como um valor entre um ρ_{min} e 1, o que permitia a atribuição de densidades intermediárias para os elementos.

$$0 < \rho_{min} \leq \rho \leq 1 \text{ ; (enumeração da densidade – SIMP)}$$

Visto que a variação de densidade de material em cada elemento causa uma variação no módulo de Young do mesmo, foi desenvolvido uma relação para o novo módulo de Young daquele elemento em função da sua densidade relativa, equação 4.4, esta relação teve como base a lei da potência.

$$E_{\rho e} = \rho_e^p E_0 \tag{4.4}$$

Onde, $E_{\rho e}$ é o módulo de Young para aquele elemento, ρ_e^p é a densidade relativa daquele elemento, a variável p representa um fator de penalidade de material, e E_0 é o módulo de Young inicial.

O fator de penalidade do material ocorre devido ao fato de que estas densidades intermediárias afetam diretamente a rigidez da estrutura, portanto, ele caracteriza essa variação de rigidez. O Ansys, pacote comercial de programas, onde as simulações serão realizadas, adota um método muito similar ao SIMP e aplica um fator de penalização padrão como 3.

5. METODOLOGIA

O trabalho busca analisar e entender melhor a otimização topológica e suas características, ela é um método cada vez mais presente nas engenharias e um grande aliado no quesito de economia e, pode vir a se tornar também um grande aliado a sustentabilidade.

O projeto vai seguir a metodologia apresentada no fluxograma abaixo:

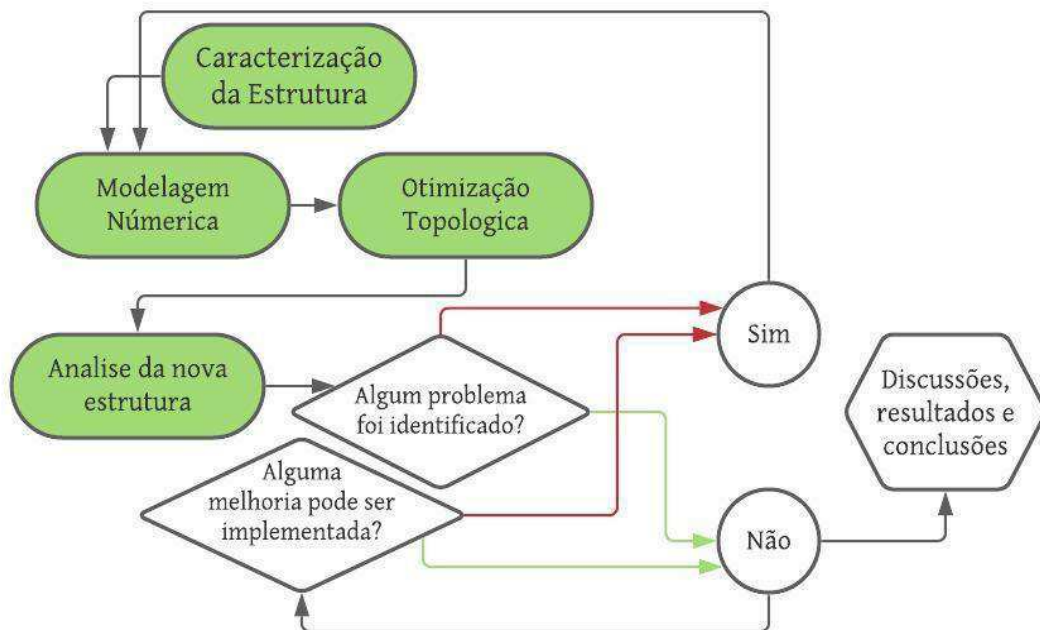


Figura 5.1 - Fluxograma das etapas do projeto. Autor (2021)

Neste trabalho, utilizou-se o pacote comercial Ansys R2 2021 Student, ele engloba a parte de projeto da estrutura, modelagem numérica, testes de esforços estruturais, e também a parte da otimização topológica da estrutura. As configurações do computador que foi utilizado para o desenvolvimento do trabalho são: Processador Intel Core i5 9300H @2,40Ghz, 16Gb de memória RAM Dual Channel, SSD M2 128gb e placa gráfica GeForce GTX 1650.

5.1. Modelos aplicados

Para o desenvolvimento do trabalho se foi utilizado duas estruturas, a primeira de vigas com forças sendo aplicadas nas superfícies externas de cada barra, como mostra a figura 5.2.

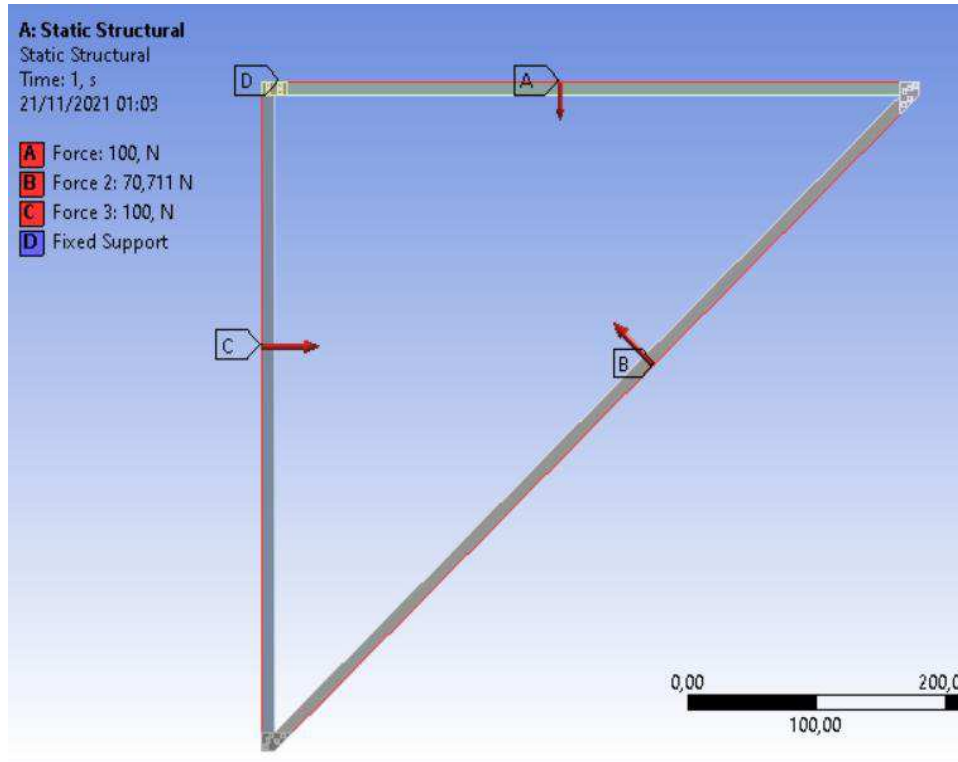


Figura 5.2 – Modelo aplicado na análise. (Autor,2021)

Dentro da caracterização do problema e condições de contorno no Ansys, o pacote comercial não apresentou as três conexões, que possuem as chapas como fixas, pois todas estavam dentro de apenas uma variável de suporte fixo, mas todas as 6 chapas são caracterizadas como suportes fixos. As forças aplicadas nas barras são de 100N nas barras vertical e horizontal e uma resultante de dois vetores de 50N, equivalente a 70,711N, na barra diagonal, todas as forças foram aplicadas de maneira distribuída.

As barras possuem uma secção transversal de 14,14mm ou 10mmx10mm, todas as chapas aplicadas possuem uma espessura de 1mm, sendo que as chapas dos ângulos agudos possuem 5 furos e a chapa do ângulo reto possui 4 furos, todos os furos possuem diâmetro igual a 3mm.

As medidas de comprimento da estrutura, assim como as medidas das chapas do ângulo reto e das chapas dos ângulos agudos são dadas, respectivamente, na: figura 5.3, figura 5.4 e figura 5.5, enquanto que as disposições dos furos nas chapas são dadas nas figuras 5.6 e 5.7.

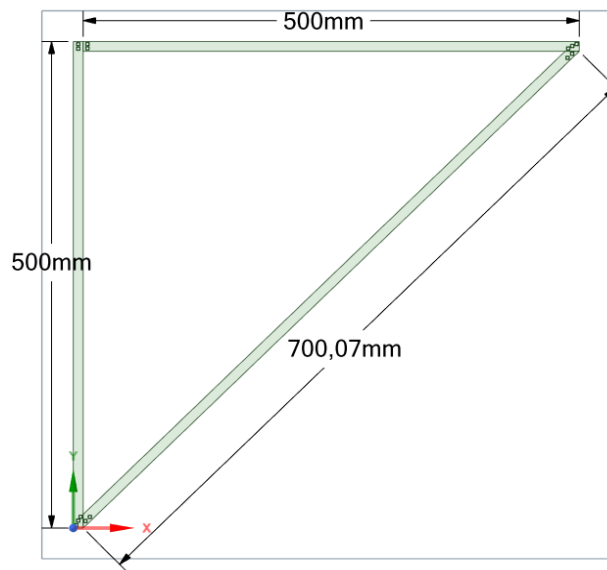


Figura 5.3 – Cotas de comprimento da estrutura. (Autor, 2021)

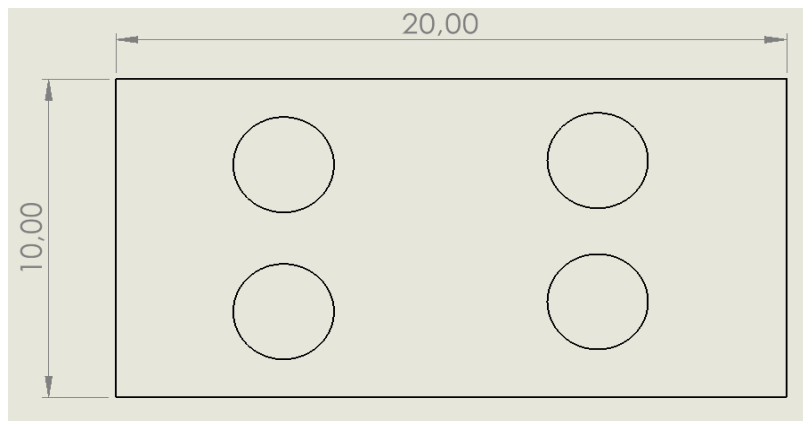


Figura 5.4 – Cotas das chapas de ângulo reto em milímetros. (Autor,2021)

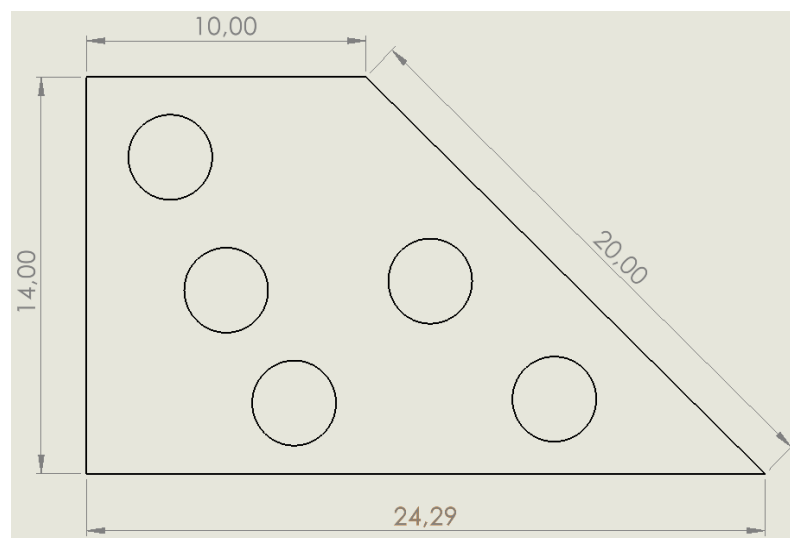


Figura 5.5 – Cotas das chapas do ângulo agudo em milímetros. (Autor,2021)

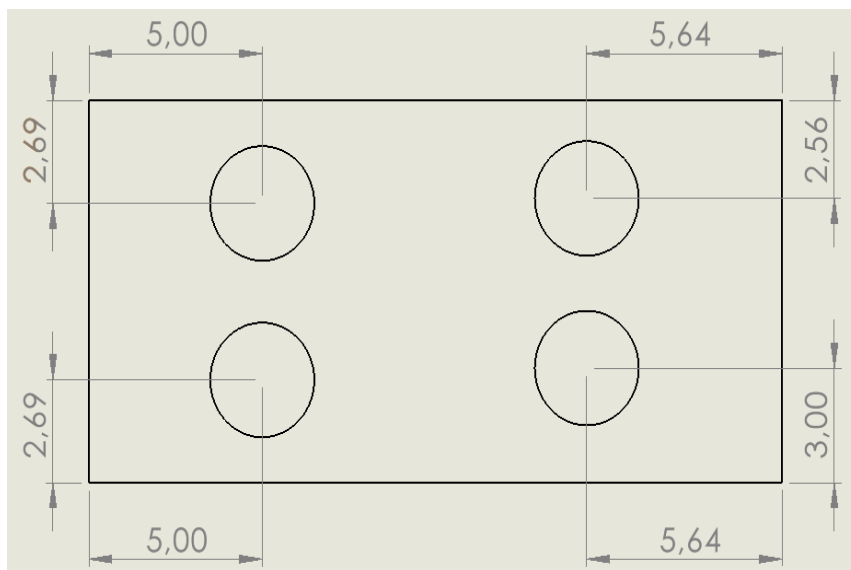


Figura 5.6 – Disposição dos furos na chapa do ângulo reto em milímetros. (Autor,2021)

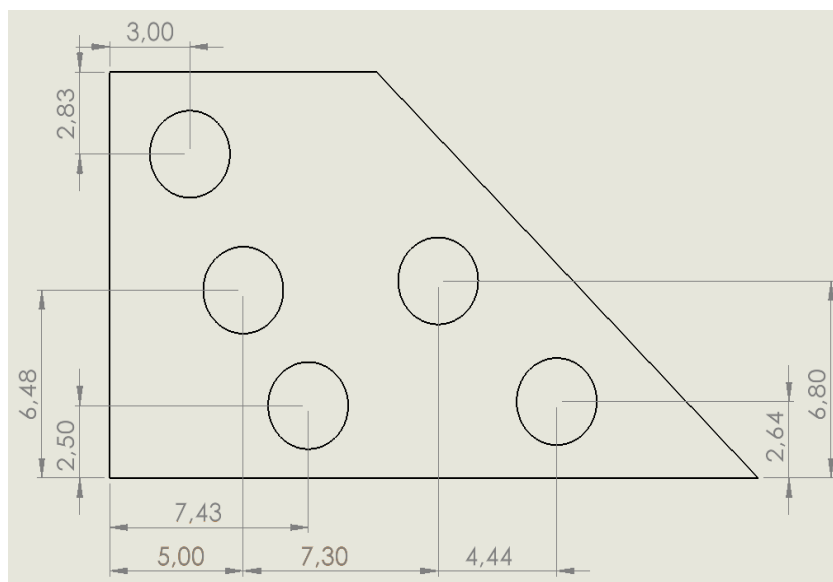


Figura 5.7 – Disposição dos furos na chapa do ângulo agudo em milímetros. (Autor, 2021)

A segunda estrutura foi baseada no modelo de uma mão-francesa com suportes fixos nos limites da esquerda da estrutura, como mostra a figura 5.8, e na sua barra vertical, como mostra a figura 5.9.

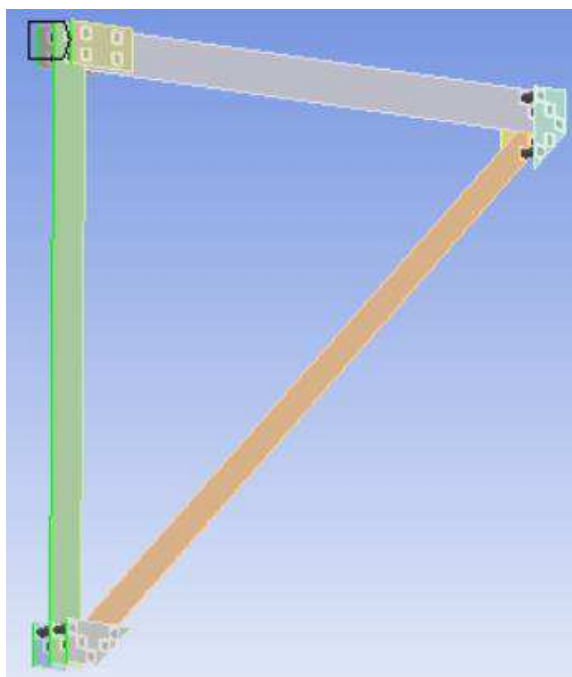


Figura 5.8 - Fixações da estrutura da mão francesa. (Autor, 2021)

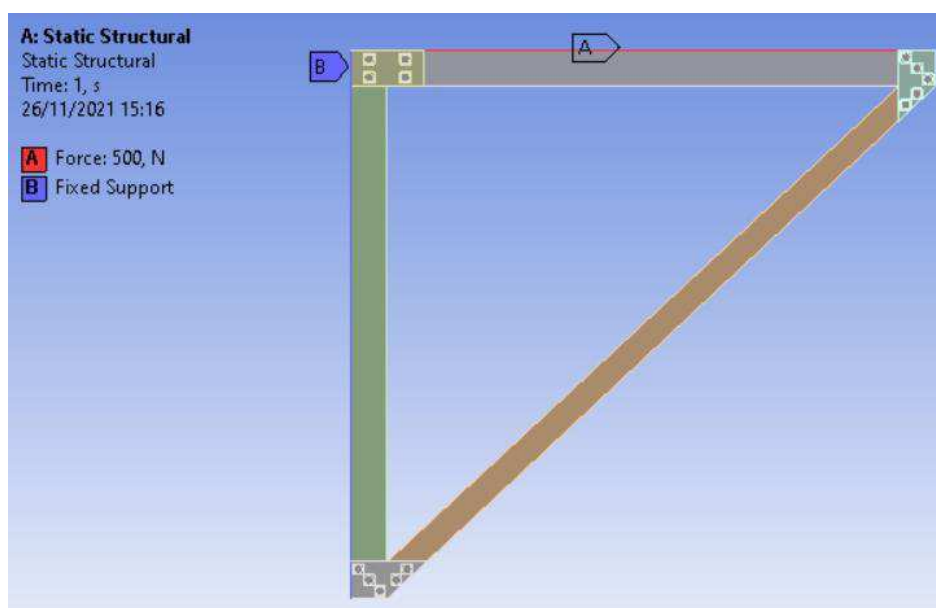


Figura 5.9 – Condições de contorno: mão francesa. (Autor, 2021)

A estrutura teve uma força de 500N aplicada no sentido negativo do eixo Y ou perpendicular a barra horizontal, teve como suporte fixo todas as bordas do seu canto esquerdo e as chapas e barras conectadas por pinos aplicados no pré-processamento da análise.

As barras possuem uma secção transversal de 28,28mm ou uma área de 20mmx20mm, as chapas possuem uma espessura de 2mm, as chapas do ângulo reto possuem 4 furos, as chapas do ângulo agudo possuem 5 furos e todos os furos tem o diâmetro de 5mm.

As medidas de comprimento da estrutura, assim como as medidas das chapas do ângulo reto e das chapas dos ângulos agudos são dadas, respectivamente, nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12, enquanto que as disposições dos furos nas chapas são dadas nas figuras 5.13 e 5.14.

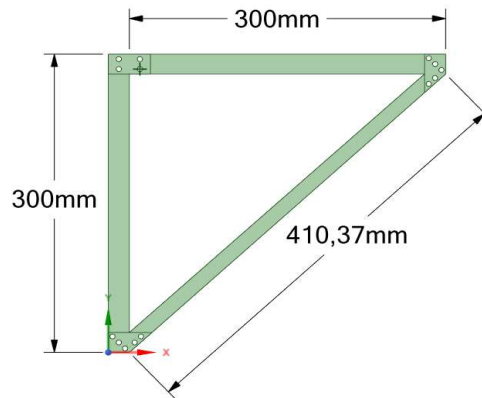


Figura 5.10 – Vista frontal: Cotas de comprimento das barras. (Autor, 2021)

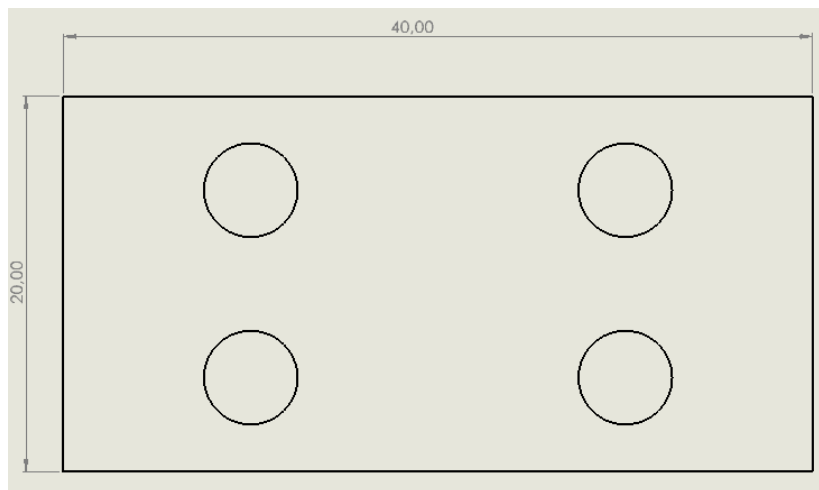


Figura 5.11 – Vista frontal: Cotas das chapas do ângulo reto em milímetros. (Autor, 2021)

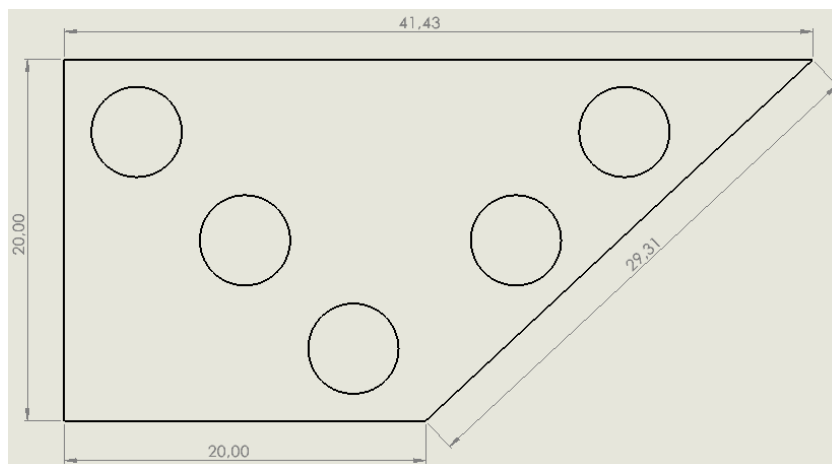


Figura 5.12 – Vista frontal: Cotas chapas dos ângulos agudos em milímetros. (Autor, 2021)

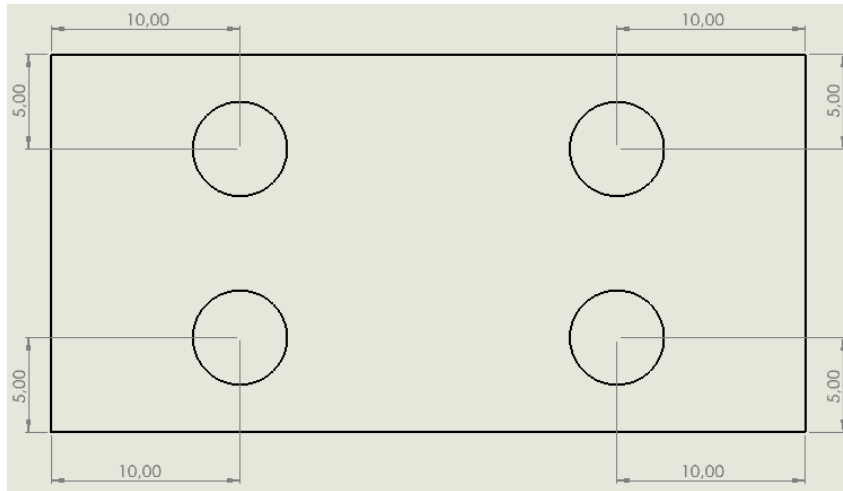


Figura 5.13 – Posições dos furos nas chapas do ângulo reto em milímetros. (Autor, 2021)

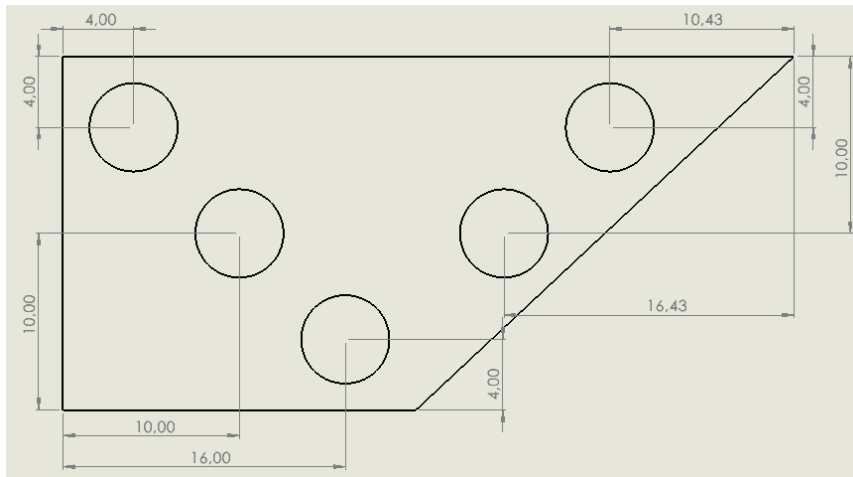


Figura 5.14 – Posições dos furos nas chapas dos ângulos agudos. (Autor, 2021)

O material aplicado na realização das simulações foi o Structural Steel, material básico para simulações estruturais do Ansys, ele tem suas propriedades listadas na figura 5.14.

Details of "Structural Steel"	
Common Material Properties	
Density	7,85e-06 kg/mm ³
Young's Modulus	2e+05 MPa
Thermal Conductivity	0,060500 W/mm·°C
Specific Heat	4,34e+05 mJ/kg·°C
Tensile Yield Strength	250,00 MPa
Tensile Ultimate Strength	460,00 MPa
Nonlinear Behavior	False

Figura 5.15 – Propriedades do material aplicado. (Autor, 2021)

5.2. Método dos elementos finitos aplicado no trabalho

De acordo com GOKHALE, et al. (2008), todos os objetos reais são contínuos, significa que não existe espaçamento físico entre duas partículas consecutivas, devido a isso, as resoluções matemáticas que levam em conta um objeto com comportamento contínuo entre suas partículas tem uma análise muito mais complexa e trabalhosa.

Perante o grande desafio de se analisar estruturas e corpos de maneira matemática e aproximada, foi-se desenvolvido o MEF (Método dos Elementos Finitos) que discretiza e permite se obter resultados matemáticos aproximados ao real. O MEF trabalha com nós, sendo eles como se fossem os “átomos” ou pequenos pontos da estrutura (GOKHALE et al.,2008), a forma que se estabelece entre eles é denominada de elemento, e o conjunto de nós e elementos formam a malha, que nada mais é que o domínio matemático da análise.

A importância de uma malha bem estabelecida reflete diretamente no resultado de qualquer ensaio matemático, pois ela determina como a estrutura vai se comportar ao receber os esforços. Durante vários anos, estudos foram desenvolvidos para se entender qual é a melhor geometria a ser aplicada em alguns elementos, dependendo do tipo de análise, por exemplo, de acordo com GOKHALE, et al. (2008) elementos puramente quadriláteros são melhores para análises 2D estruturais e não lineares, enquanto que para regiões críticas que são circulares ou de furos, elementos quadriláteros são mais indicados do que elementos triangulares, e dentro destes, os parabólicos quadriláteros (elemento quadrilátero composto por 8 nós) são mais preferíveis do que os quadriláteros lineares (elemento quadrilátero composto por 4 nós) por possuírem uma precisão maior.

O trabalho analisou as estruturas em 2D com diferentes composições de malha, uma com uma malha mais robusta e refinada, levando em consideração o tipo de análise e as geometrias presentes em cada área do domínio, figura 5.15, e outra mais básica, gerada automaticamente pelo próprio Ansys, figura 5.16.

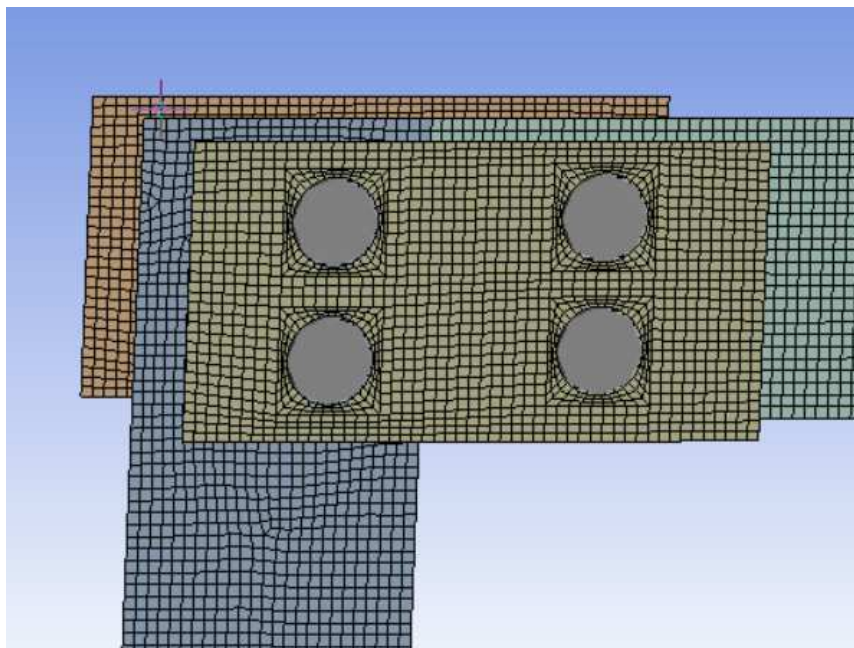


Figura 5.16 - Malha Refinada. (Autor,2021)

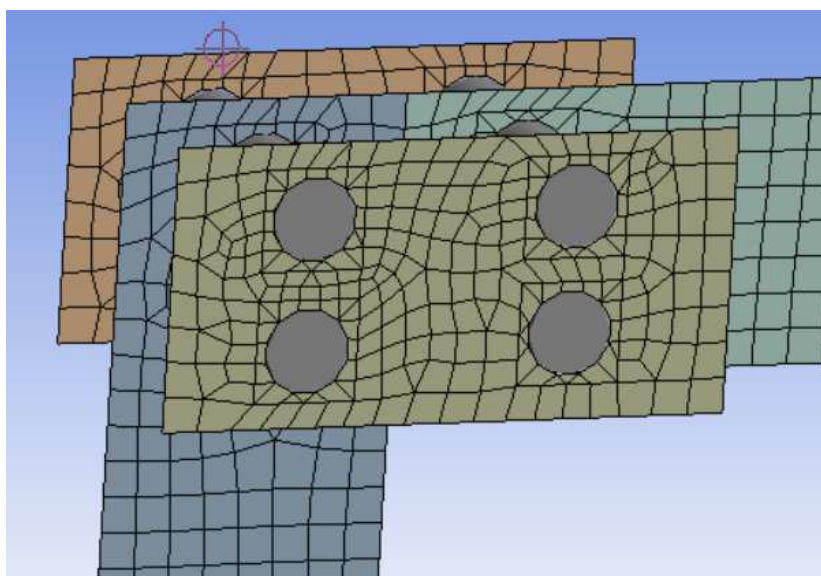


Figura 5.17 - Malha básica. (Autor,2021)

Os números de elementos e nós são essenciais para a aproximação do resultado, visto que quanto maior o número de nós, maior o número de elementos e mais próximo do modelo contínuo a análise se apresenta, por esse motivo a malha refinada teve o máximo de nós e elementos possíveis a serem aplicados na análise, de modo que ainda fosse viável o processamento da mesma pelo equipamento utilizado.

O trabalho foi realizado a fim de se entender e observar as diferenças na análise e na OT de uma estrutura, levando em consideração as diferenças entre as malhas definidas para uma

mesma estrutura, e para uma estrutura diferente e com condições de contorno diferentes, na tabela 5.1 é possível observar a diferença de refinamento e robustez entre as malhas através da diferença do número de nós e elementos entre elas.

Estrutura	Número de nós	Número de elementos
Treliça com malha refinada	125264	119628
Treliça com malha básica	14543	13028
Mão francesa	90584	87124

Tabela 5.1 - Número de nós e elementos em cada malha.

5.3. Otimização Topológica

A OT, é um procedimento que remove material de uma estrutura em função da maximização de uma outra propriedade da estrutura, comumente sendo a rigidez estrutural em busca de ser maximizada.

Para demonstração e ambientação com o programa, um modelo de referência teve sua topologia otimizada, sendo este modelo o modelo de cantilever-beam, que possui as medidas dadas na figura 5.17 com uma espessura de 1 mm.

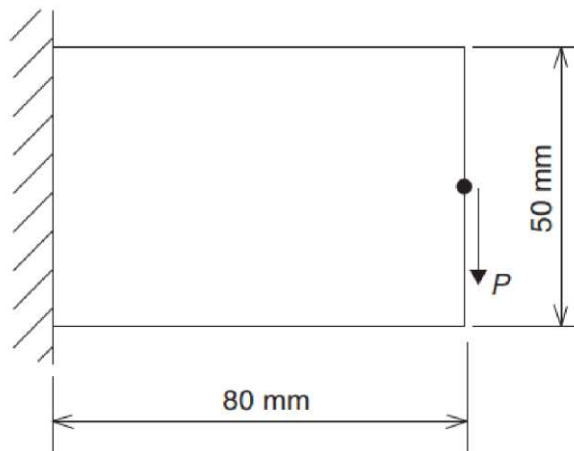


Figura 5.18– Vista frontal: Modelo de estudo cantilever-beam. (HUANG e XIE, 2010)

O modelo teve como condições de contorno uma fixação e uma força de 100N aplicada na extremidade perpendicular ao suporte fixo, como mostra a figura 5.17.

Fora aplicada uma malha simples, leve e com refinamento simples, apenas para objetivo de estudo. Após as simulações, o resultado da tensão equivalente máxima foi de 169,03 MPa, e da resultante de deformação total foi de 0,011862 mm, como mostra a figura 5.18.

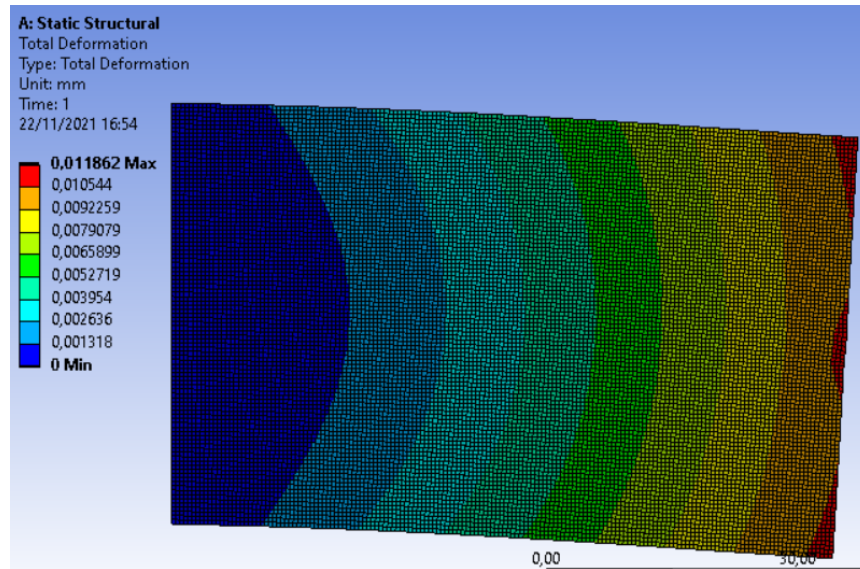


Figura 5.19– Vista frontal: Deformação na cantilever-beam. (Autor, 2021)

Após encontrar os valores máximos de tensão e deformação, a estrutura recebe a OT, buscando a maximização da rigidez e redução de seu volume, o fator de convergência estabelecido foi de um volume de 50% do volume original da estrutura, a topologia final encontrada está representada na figura 5.19.

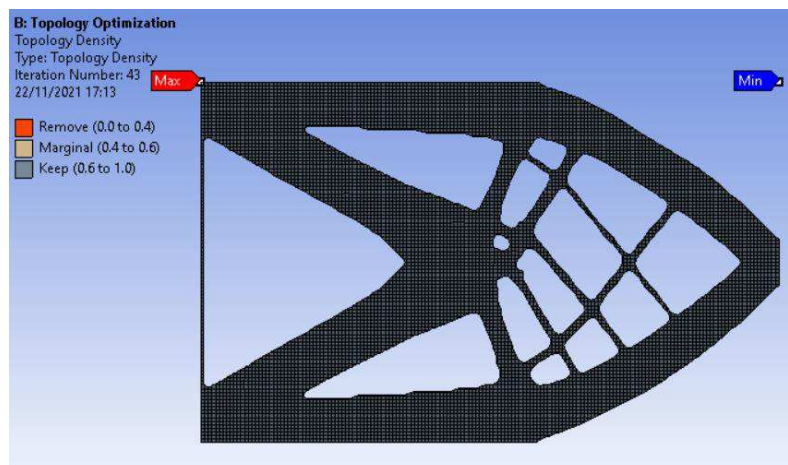


Figura 5.20 – Vista frontal: Topologia final cantilever-beam. (Autor, 2021)

Dentro do Ansys, a otimização topológica ocorre de uma maneira similar ao método SIMP. O Ansys realiza os cálculos levando em consideração as condições de contorno em função da minimização da compliance, e estabelece uma escala de valores para os elementos, variando de 0 até 1, onde elementos que possuem um valor de 0,0 até 0,4 são removíveis ou dispensáveis, elementos que possuem um valor de 0,4 até 0,6 são intermediários e elementos que possuem um valor de 0,6 até 1 são necessários para o domínio da estrutura, de acordo com a figura 5.20.

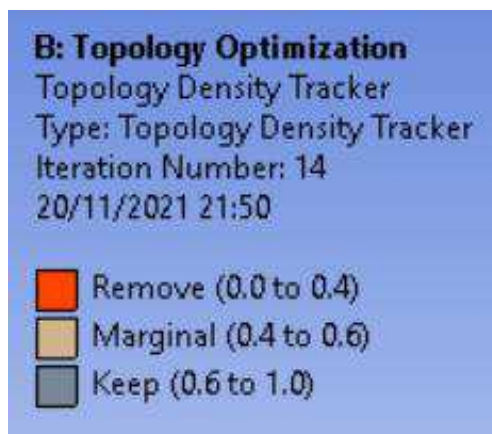


Figura 5.21 – Legenda de classificação dos elementos dentro da análise topológica no Ansys. (Autor, 2021)

No domínio da cantilever-beam determinou-se que apenas os elementos necessários deveriam permanecer na estrutura final, visto que somente com eles, ela já apresenta um design interessante e suficiente para a resolução do problema, observe na figura 5.19.

No problema abordado pelo trabalho buscou-se adotar a topologia mais interessante e vantajosa para uma possível fabricação, esta que poderia ser executada através de métodos de manufatura aditiva ou impressão 3D.

5.4. Pré-processamento

É importante apontar alguns detalhes no pré-processamento do MEF, além das condições de contorno que foram citadas anteriormente, foram aplicadas algumas condições de contato sem atrito, ou, “frictionless” entre as chapas e as barras das estruturas e também foram aplicadas conexões do tipo “beam-beam” entre os furos das barras e das chapas, simulando pinos conectando as estruturas.

O pré-processamento topológico é que vai determinar o que o usuário deseja da topologia, nessa etapa são determinadas as partes do domínio que devem receber a OT, quais partes devem ser excluídas da análise e, portanto, permanecerem na topologia final, qual vai ser o fator de convergência, qual equação vai reger o problema, que neste caso é a minimização da compliance, ele permite também que se altere o fator de penalização do material, mas que por convenção é aplicado como padrão o valor de 3, observe o painel de pré-processamento na figura 5.21.

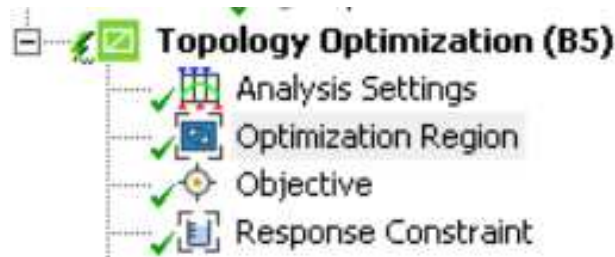


Figura 5.22 – Painel de pré-processamento para OT no Ansys. (Autor, 2021)

Na aba “Analysis Settings”, nada foi alterado, o fator de penalização, ou penalty factor, já estava por padrão definido como 3 e a maioria dos controles foi definido pelo próprio Ansys, como apresenta a figura 5.22.

Details of "Analysis Settings"	
Definition	
Maximum Number Of Iterations	500,
Minimum Normalized Density	1,e-003
Convergence Accuracy	0,1 %
Initial Volume Fraction (Beta)	Program Controll...
Penalty Factor (Stiffness)	3,
Region of Manufacturing Constraint	Include Exclusions
Region of Min Member Size	Exclude Exclusions
Region of AM Overhang Constraint	Exclude Exclusions
Filter (Beta)	Program Controll...
Solver Controls	
Solver Type	Program Controll...
Nonlinear Controls	
Nonlinear Contact (Beta)	Program Controll...

Figura 5.23 – Aba com detalhes das configurações da análise do Ansys. (Autor, 2021)

Em “Optimization Region” são definidas as regiões que devem ser otimizadas, as regiões que devem ser excluídas da otimização e o tipo de otimização a ser aplicada, no caso otimização baseada em densidade, de acordo com a figura 5.23.

Design Region	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Exclusion Region	
Define By	Geometry Selection
Geometry	456 Edges
Definition	
Suppressed	No
Optimization Option	
Optimization Type	Topology Optimization - Density Based

Figura 5.24 – Aba da região de otimização. (Autor, 2021)

Em “exclusion region”, o domínio teve todas as linhas externas das barras excluídas da análise, assim como linhas dos furos e linhas externas das chapas, a fim de se preservar o contorno da geometria original.

A figura 5.24 apresenta a aba “Objective”, nesta aba é estabelecida a função objetivo e determinada a meta sobre essa função, que no caso deste trabalho é a minimização da compliance.

Enabled	Response Type	Goal	Criterion	Formulation	Environment Name	Weight	Multiple Sets
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	N/A	Program Controlled	Static Structural	N/A	Enabled

Figura 5.25 – Objetivo da OT. (Autor, 2021)

A última aba aplicada no painel de otimização do trabalho foi a de “Response Constraint”, nela é definida o limite de convergência, no caso o volume da estrutura, ele foi definido para que o programa tente uma redução de até 55% do volume original, restando no mínimo 45% do volume original da peça, como mostra a figura 5.25.

Scope	
Scoping Method	Optimization Region
Optimization Region Selection	Optimization Region
Definition	
Type	Response Constraint
Response	Volume
Define By	Constant
<input type="checkbox"/> Percent to Retain	45 %
Suppressed	No

Figura 5.26 – Aba de restrição de resposta. (Autor, 2021)

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variação entre a malha refinada e a malha produzida pelo programa causou uma pequena variação nos resultados das tensões e deformação na estrutura, onde na estrutura com malha refinada obteve-se uma tensão máxima de 119,84 MPa e uma deformação máxima de 0,64097 mm, como apresentado nas figuras 6.1 e 6.2, enquanto que na estrutura com malha básica obteve-se uma tensão máxima de 79,269 MPa e uma deformação máxima de 0,64005 mm, como apresentado nas figuras 6.3 e 6.4.

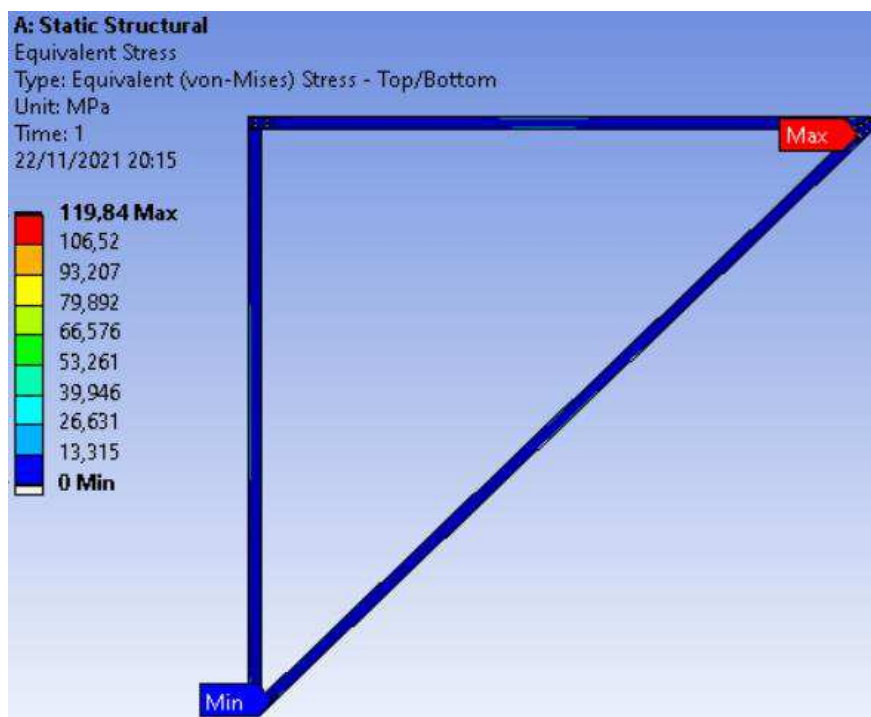


Figura 6.1 – Vista frontal: Tensões na estrutura com malha refinada. (Autor, 2021)

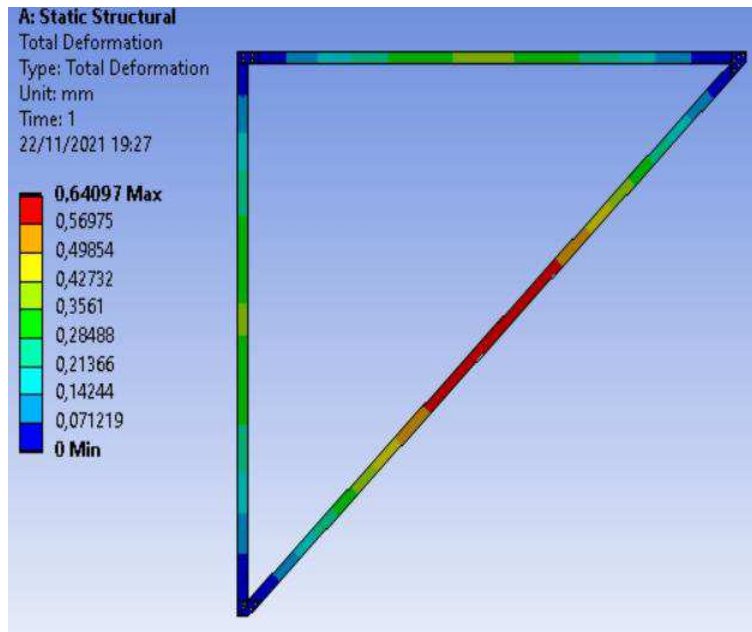


Figura 6.2 – Vista frontal: Deformação na estrutura com malha refinada. (Autor, 2021)

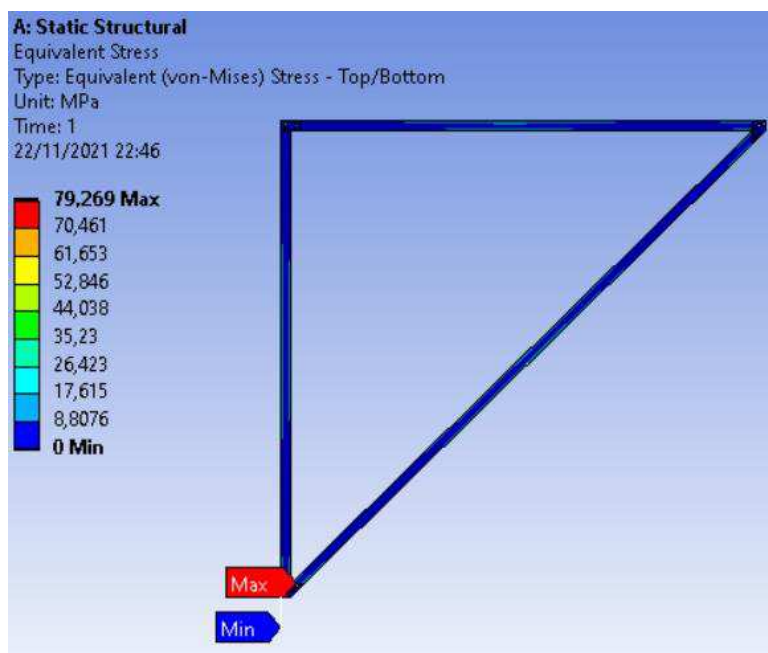


Figura 6.3 – Vista frontal: Tensões na estrutura com malha básica. (Autor, 2021)

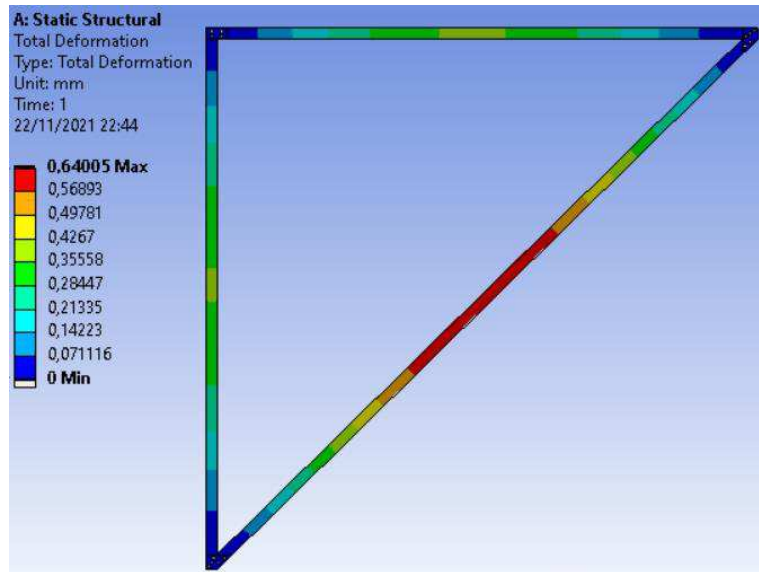


Figura 6.4 – Vista frontal: Deformação na estrutura com malha refinada. (Autor, 2021)

É interessante observar que a localização das tensões máximas e mínimas mudaram devido ao aumento da qualidade da malha, o que pode implicar numa grande diferença na análise quando trabalhada com esforços e dimensões estruturais maiores.

Ambas as estruturas tiveram as mesmas condições de contorno, com as linhas externas das geometrias preservadas, assim como as linhas dos furos, além disso tiveram também o mesmo tratamento no pós-processamento, onde apenas elementos com um valor superior a 0,46 na escala da otimização topológica foram mantidos, que pode ser definido na opção “Retained Threshold”, observe a figura 6.5.

Definition	
Type	Topology Density
By	Iteration
Iteration	Last
<input type="checkbox"/> Retained Threshold	0,46
Exclusions Participation	Yes
Calculate Time History	Yes
Suppressed	No

Figura 6.5 – Valor mínimo na escala de otimização topológica dos elementos a serem mantidos. (Autor, 2021)

A diferença de volume nas estruturas foi de cerca de 5%, com a estrutura de malha refinada possuindo 52,63% do volume original, figura 6.6, e a estrutura com a malha básica possuindo 57,06 % do volume original, figura 6.7

Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	1,e-003
<input type="checkbox"/> Maximum	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,51496
<input type="checkbox"/> Original Volume	1,6919e+005 mm ³
<input type="checkbox"/> Final Volume	89060 mm ³
<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	52,639
<input type="checkbox"/> Original Mass	1,3282 kg
<input type="checkbox"/> Final Mass	0,69912 kg
<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	52,639

Figura 6.6 – Porcentagem de volume final da estrutura com malha refinada. (Autor, 2021)

Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	1,e-003
<input type="checkbox"/> Maximum	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,6292
<input type="checkbox"/> Original Volume	1,6924e+005 mm ³
<input type="checkbox"/> Final Volume	96567 mm ³
<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	57,06
<input type="checkbox"/> Original Mass	1,3285 kg
<input type="checkbox"/> Final Mass	0,75805 kg
<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	57,06

Figura 6.7 – Porcentagem de volume final da estrutura com malha básica. (Autor, 2021)

Apesar da pequena diferença no volume das estruturas após a otimização topológica, seu arranjo estrutural é bastante diferente, no domínio com malha básica o interior possui maiores espaços sem elementos, e estes espaços acabam formando uma estrutura mais “oca”, como pode ser observado nas figuras 6.8, 6.9 e 6.10.

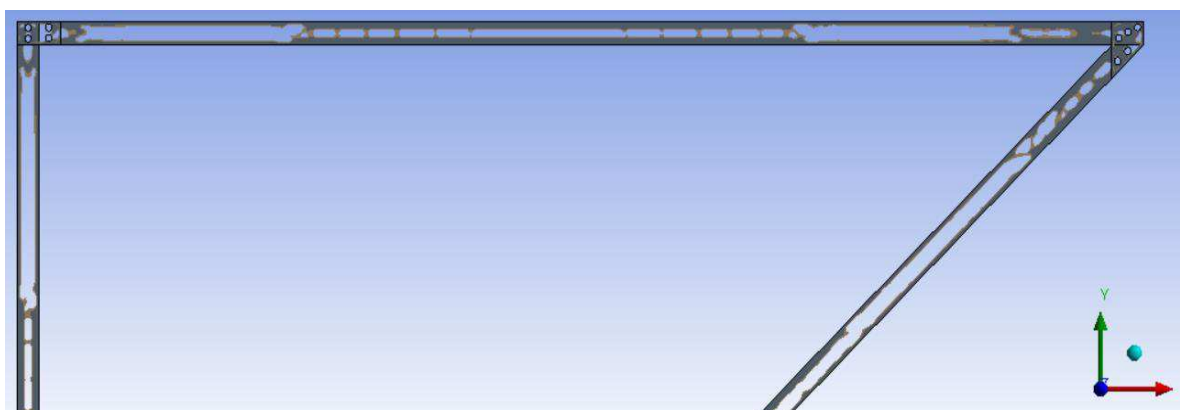


Figura 6.8 – Vista frontal: Zoom na parte superior do domínio com malha básica após otimização. (Autor, 2021)

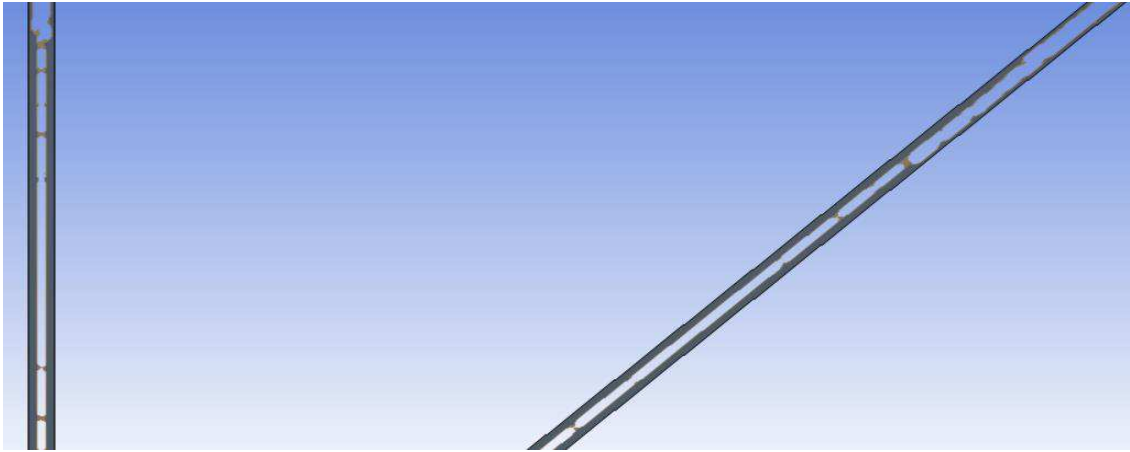


Figura 6.9 – Vista frontal: Zoom na parte intermediária do domínio com a malha básica após otimização. (Autor, 2021)

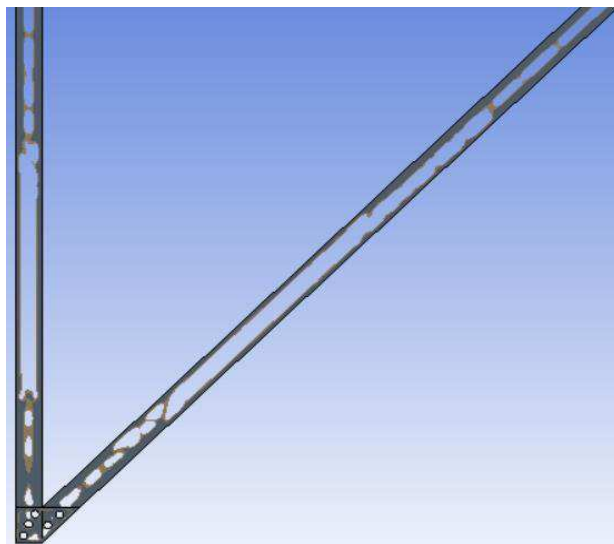


Figura 6.10 – Vista frontal: Zoom na parte inferior do domínio com a malha básica após otimização. (Autor, 2021)

No domínio que teve sua malha refinada, a estrutura, após otimização, apresentou uma disposição de elementos no seu interior mais variada, criando um aspecto treliçado, com várias figuras em formatos triangulares, o que formou design mais intuitivo acerca de sua acuracidade estrutural, como pode ser observado nas figuras 6.11, 6.12 e 6.13.

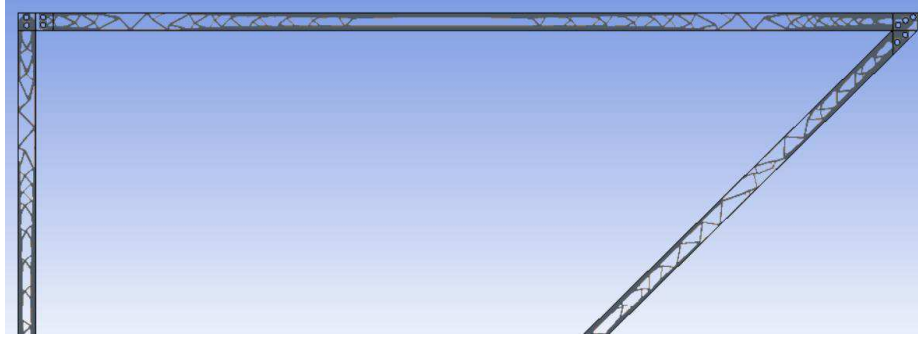


Figura 6.11 -Vista frontal: Zoom na parte superior do domínio com malha refinada após otimização. (Autor, 2021)

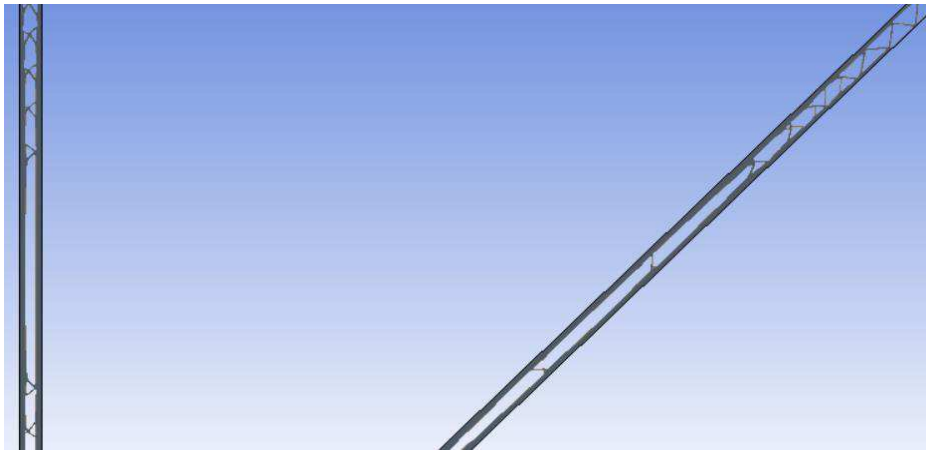


Figura 6.12 – Vista frontal: Zoom na parte intermediaria do domínio com malha refinada após otimização. (Autor, 2021)

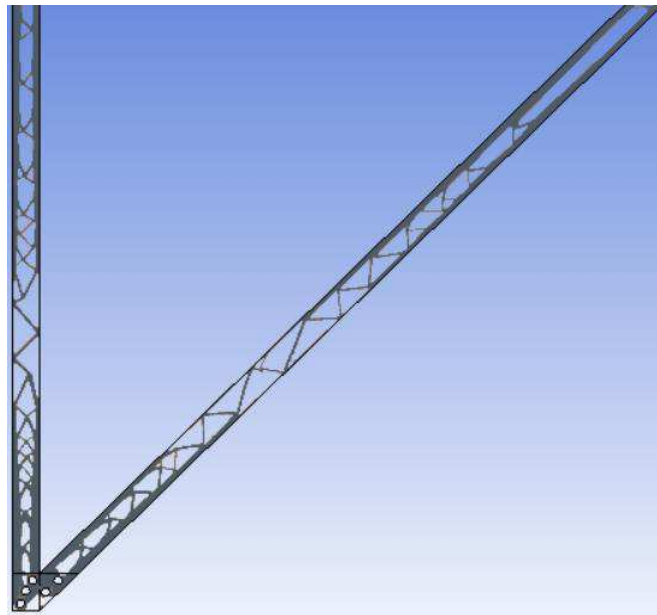


Figura 6.13- Vista frontal: Zoom na parte inferior do domínio com malha refinada após otimização. (Autor, 2021)

A diferença topológica devido a diferença de malhas é grande, isso se deve ao fato de que quanto maior o número de elementos, nós e melhor for a adequação de cada geometria dos elementos para com a análise, mais próximo do domínio real a análise se encontra, assim a discretização é maior, melhor, e por consequência os cálculos são mais aproximados.

As diferenças nas topologias das conexões podem ser observadas melhor nas figuras 6.14, 6.15 e 6.16.

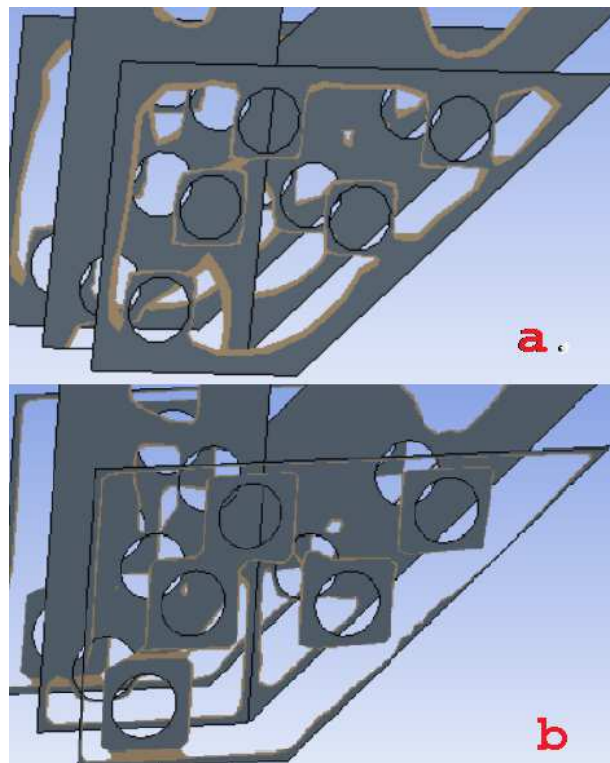


Figura 6.14 - Conexões inferiores pós-otimização. a. Malha básica ; b. Malha refinada . (Autor, 2021)

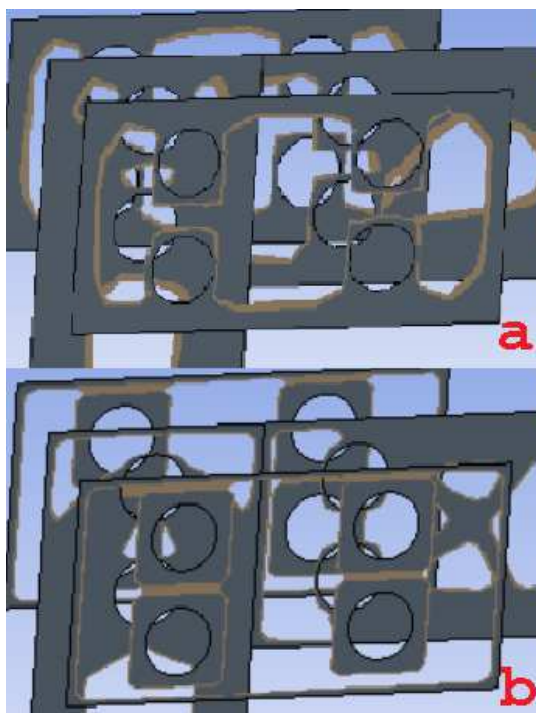


Figura 6.15 - Conexões do angulo reto pós-otimização. a. Malha básica; b. Malha refinada. (Autor, 2021)

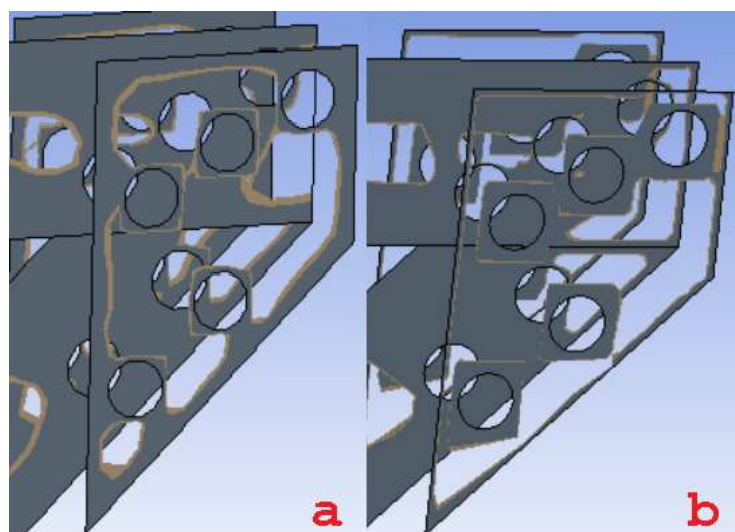


Figura 6.16 - Conexões do angulo agudo superior pós-otimização. a. Malha básica; b. Malha refinada. (Autor, 2021)

As diferenças de deformação não foram tão relevantes, isso se deve ao fato do material permanecer dentro do seu comportamento linear, porém as diferenças de tensões foram significativas, tendo uma diferença de cerca de 40MPa entre uma análise e outra, isto leva a um ponto de atenção onde como esses resultados se comportariam caso se estivesse sendo trabalhado com magnitudes superiores e dimensões superiores, estas diferenças seriam maiores ainda, inclusive no cálculo do volume da otimização final, portanto, sendo ainda maiores as

diferenças na otimização final, as diferenças entre os resultados das análises podem ser observados na tabela 6.1 .

Analise	Deformação Max.(mm)	Tensão Max. (MPa)	Volume Final (Após OT)
Malha Refinada	0,64097	119,84	52,639%
Malha Simples	0,64005	79,269	57,06%

Tabela 6.1 – Resultado das análises nos domínios. (Autor, 2021)

Para a mão francesa aplicou-se condições de contornos diferentes, com uma estrutura diferente e com uma malha refinada. Para uma força de 500N distribuída na superfície da barra horizontal, a mão francesa teve uma deformação máxima de 0,073198mm, como pode ser observado na figura 6.17.

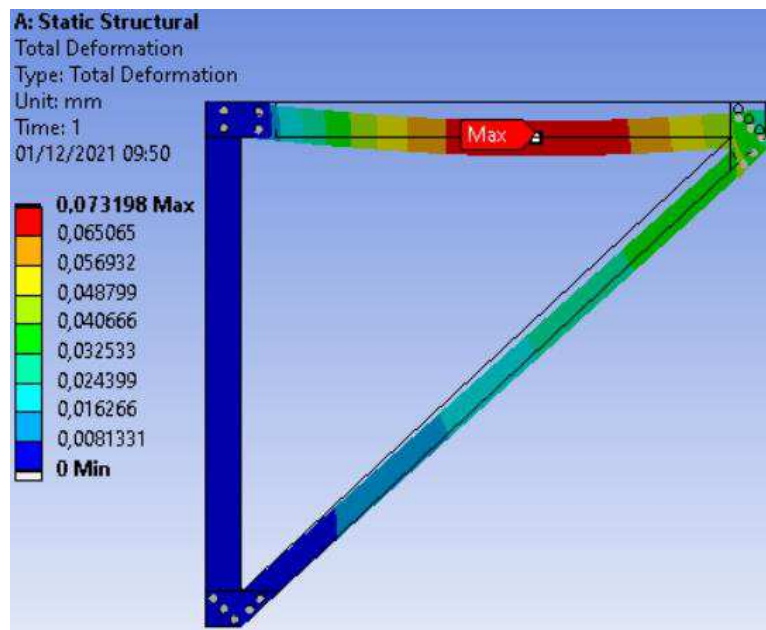


Figura 6.17 – Vista frontal: Deformação estrutural da mão francesa aumentada 1,5x. (Autor, 2021)

A tensão máxima na estrutura da mão francesa foi de 63,305MPa, localizada em um furo na parte superior da estrutura, como demonstra a figura 6.18.

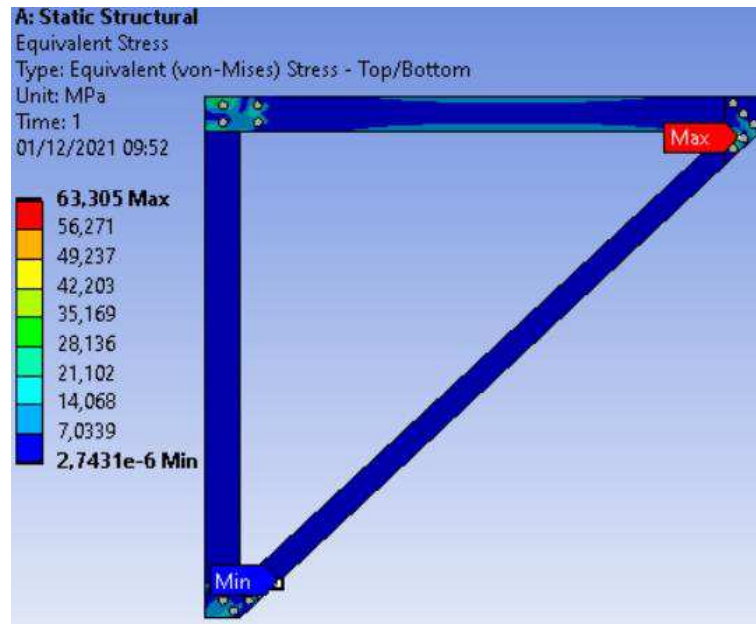


Figura 6.18 – Vista frontal: Tensões na estrutura da mão francesa. (Autor, 2021)

Assim como as estruturas anteriores na otimização topológica, a mão francesa teve suas linhas de contorno das geometrias das barras excluídas da análise de otimização, assim como suas condições de contorno e seus furos.

A mão francesa teve os mesmos tratamentos de pré-processamento que as estruturas anteriores, com uma definição de redução de volume para 45%, e o pós-processamento como definido na figura 6.5.

A estrutura após a OT, teve a barra vertical praticamente removida, visto que ela sofre poucos esforços dentro das condições de contorno estabelecidas, mantendo apenas as linhas externas devido as condições impostas no pré-processamento. A barra inclinada teve uma grande redução no seu volume, e a barra horizontal, apesar de ter um pequeno vazio formado no seu centro, manteve a maior parte do seu volume, pois é nela que ocorrem os maiores esforços, as chapas do ângulo reto tiveram boa parte do seu volume preservado, enquanto que as chapas dos ângulos agudos tiveram boa parte do seu volume retirado, exceto nas regiões próximas aos furos. Tudo isso pode ser observado nas figuras 6.19, 6.20 e 6.21.

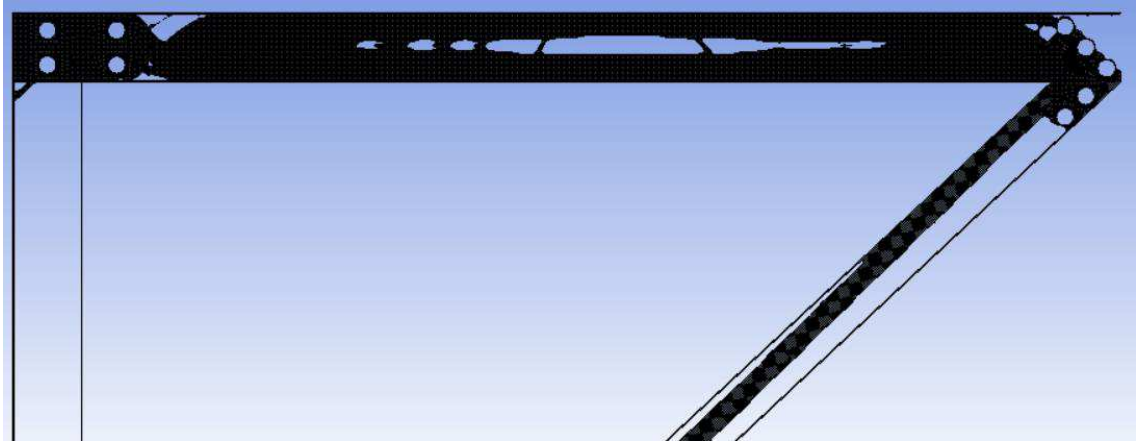


Figura 6.19 – Parte superior da vista frontal: mão francesa após a OT. (Autor, 2021)



Figura 6.20 – Parte intermediária da vista frontal: mão francesa após a OT. (Autor, 2021)

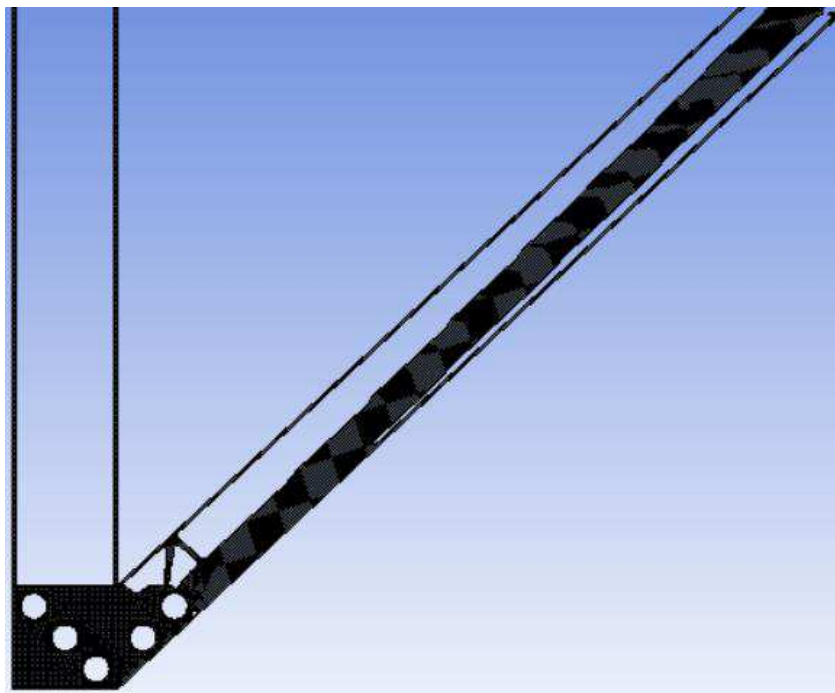


Figura 6.21 – Parte inferior da vista frontal: mão francesa após a OT. (Autor, 2021)

A otimização topológica conseguiu reduzir o volume da estrutura para um valor de 49,787% do volume original, figura 6.22, enquanto respeita a rigidez e condições de contorno estrutura.

Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	1,e-003
<input type="checkbox"/> Maximum	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,56215
<input type="checkbox"/> Original Volume	3,5344e+005 mm ³
<input type="checkbox"/> Final Volume	1,7596e+005 mm ³
<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	49,787
<input type="checkbox"/> Original Mass	2,7745 kg
<input type="checkbox"/> Final Mass	1,3813 kg
<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	49,787

Figura 6.22 – Resultados da OT da mão francesa. (Autor, 2021)

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A otimização topológica possui muitos detalhes acerca de sua usabilidade, sendo necessário muita atenção e um certo grau de familiaridade com os pacotes de softwares empregados para sua execução, além disto é interessante que o engenheiro, ou usuário, entenda os procedimentos que ocorrem por trás dos cálculos que o programa realiza, podendo assim produzir um trabalho de qualidade no pré e no pós-processamento de sua estrutura, gerando, principalmente, um trabalho com segurança, economia e confiabilidade. A partir do trabalho executado, se foi possível observar a importância de uma malha de qualidade e como ela impacta de forma relevante no resultado da otimização, principalmente nos pontos de conexões ou acumuladores de tensão.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, como continuidade deste, que se realizem teste com diferentes materiais para observar a variação de topologia entre as estruturas, ou poderia se simplificar a estrutura, imprimi-la e depois realizar testes reais; Após impressão de uma estrutura otimizada topologicamente, variar a micro geometria da impressão 3D e identificar as diferenças que elas causam nas propriedades mecânicas da estrutura; Analisar a diferença que uma OT causa na variação da frequência natural de uma estrutura, levando em consideração também a qualidade da malha aplicada.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, Antonio. **Otimização topológica aplicado as estruturas cíclicas simétricas**. 2018.

HUANG, Xiaodong; XIE, Mike. **Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications**. John Wiley & Sons, 2010. Cap. 1-4, p.1-47.

HUANG, Xiaodong; XIE, Y. M. **Optimal design of periodic structures using evolutionary topology optimization**. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 36, n. 6, p. 597-606, 2008.

LEUCK FILHO, Ricardo Frederico. **Avaliação dos métodos simp e beso de otimização topológica de estruturas**. 2015.

PRAGER, W.; ROZVANY, G. I. N. **Optimal layout of grillages**. *Journal of Structural Mechanics*, v. 5, n. 1, p. 1-18, 1977.

HAFTKA, Raphael T.; GRANDHI, Ramana V. **Structural shape optimization—a survey**. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, v. 57, n. 1, p. 91-106, 1986.

BATISTA, William Santos. **Fabricação de peças por manufatura aditiva obtidas por meio da otimização topológica**. (2021)

LIANG, Q. Q.; XIE, Y. M.; STEVEN, G. P. **Optimal topology selection of continuum structures with displacement constraints**. *Computers & Structures*, v. 77, n. 6, p. 635 – 644, 2000. ISSN 0045-7949. 23

QUERIN, O. M.; STEVEN, G. P.; XIE, Y. M. **Evolutionary structural optimisation (eso) using a bidirectional algorithm**. *Engineering Computations*, v. 15, n. 8, p. 1031–1048, 1998. 23

XIE, Y. M.; STEVEN, G. P. **Evolutionary Structural Optimization**. [S.l.]: Springer, London,1997. 23, 47, 50

BENDSOE, M. P.; KIKUCHI, N. **Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method.** *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 71, n. 2, p. 197 – 224, 1988. ISSN 0045-7825. 23

GOKHALE, Nitin S.; DESHPANDE, Sanjay S.; BEDEKAR, Sanjeev V. **Practical Finite Element Analysis, Finite to Infinite.** 2008.

REDDY, Junuthula Narasimha. **Introduction to the finite element method.** McGraw-Hill Education, 2019.

MIRLISENNA, Giuseppe. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** Blog ESSS, 2016. Disponível em: [Método dos Elementos Finitos: o que é? \(esss.co\)](http://www.esss.co). Acesso em: 13 de setembro de 2021.