



**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA  
PRÓTESE DE RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR**

**ISABELLE SANT'ANNA DA SILVA**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA  
PRÓTESE DE RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR**

**ISABELLE SANT'ANNA DA SILVA**

**Orientador: PROF. ALBERTO CARLOS GUIMARÃES CASTRO DINIZ,  
ENM/UNB**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRASÍLIA-DF, 20 DE DEZEMBRO DE 2023.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA  
PRÓTESE DE RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR**

**ISABELLE SANT'ANNA DA SILVA**

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA MECÂNICA.

**APROVADA POR:**

Prof. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz, ENM/UnB  
Orientador

Prof<sup>a</sup>. Laís Bittencourt Visnadi, GDS/UnB  
Examinador interno

Prof. Adriano Todorovic Fabro, ENM/UnB  
Examinador interno

**BRASÍLIA, 20 DE DEZEMBRO DE 2023.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

ISABELLE SANT'ANNA DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA PRÓTESE DE RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR**

**2023xv, 44p., 201x297 mm**

(ENM/FT/UnB, Engenheira Mecânica, Engenharia Mecânica, 2023)

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

ISABELLE SANT'ANNA DA SILVA (2023) OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA PRÓTESE DE RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Publicação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 44p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: ISABELLE SANT'ANNA DA SILVA

TÍTULO: OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA PRÓTESE DE RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR.

GRAU: Engenheira Mecânica ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

ISABELLE SANT'ANNA DA SILVA

*IsabelleSantanna23@hotmail.com*

# Agradecimentos

A Deus, pela minha vida e por me guiar ao longo do caminho, principalmente nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, Viviane e Wanderson, que são meu exemplo. Sou grata por todo amor, incentivo e apoio incondicional para que eu pudesse seguir meus sonhos.

A minha avó Tânia, que não se encontra mais entre nós, mas que sempre esteve presente na minha vida e torceu pelo meu sucesso.

A família Rosty, por ter me acolhido como membro da família, sendo fundamental para que eu pudesse dar os primeiros passos dessa caminhada.

Ao professor Alberto Diniz, pela paciência, incentivo, ensinamento e orientação.

Aos amigos que fiz durante o caminho, que me acompanharam nos bons e nos maus momentos e que tornaram o fardo mais leve.

À empresa CPMH, pela oportunidade de estágio e por contribuir diretamente para o meu desenvolvimento profissional. Agradeço também por todo apoio e contribuição na elaboração deste trabalho.

# Resumo

Este trabalho tem por finalidade realizar a otimização topológica de uma prótese de reconstrução mandibular visando, a redução de peso e, conseqüentemente, do custo de fabricação. O processo de otimização foi realizado utilizando o ANSYS WorkBench®. Foi simulada uma placa de reconstrução mandibular desenvolvida exclusivamente para a elaboração desse trabalho. O modelo foi simulado em titânio Ti-6Al-4V, com propriedades mecânicas estabelecidas pela ABNT NBR 16627-4, a otimização foi realizada para três condições diferentes de retenção de massa inicial: 30%, 50% e 70%. Os resultados obtidos foram apresentados e a discussão ocorreu por meio da comparação entre o *design* da peça inicial e o *design* da peça otimizado obtido para as diferentes condições aplicadas, comparando-se a massa e a resistência mecânica da peça inicial e final.

**Palavras-chave:** otimização estrutural, Método de Elementos Finitos, otimização topológica, modelagem computacional de próteses, ANSYS WorkBench®.

# Abstract

This study seeks to conduct the topological optimization of a mandibular reconstruction prosthesis with the objective of minimizing weight and, consequently, manufacturing costs. The optimization procedures were executed using ANSYS WorkBench<sup>®</sup>. A mandibular reconstruction plate specifically developed for this investigation underwent simulation. The material chosen for simulation was titanium Ti-6Al-4V, with mechanical properties conforming to ABNT NBR 16627-4 standards. Optimization was implemented under three distinct conditions of initial mass retention: 30%, 50%, and 70%. The ensuing results were systematically presented, and the ensuing discourse centred on the comparative analysis between the design of the original component and the design of the optimised component across the diverse conditions evaluated, elucidating disparities in initial and final mass and mechanical resistance parameters.

**Keywords:** structural optimization, Finite Element Method, topological optimization, computational modeling of prostheses, ANSYS WorkBench<sup>®</sup>.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL E RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR.....</b>	<b>4</b>
2.1	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL .....	4
2.1.1	OTIMIZAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO .....	6
2.1.2	OTIMIZAÇÃO DE FORMA.....	6
2.1.3	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	7
2.2	RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR .....	8
2.2.1	PROCESSO DE RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR.....	9
2.2.2	FORÇAS MASTIGATÓRIAS .....	10
<b>3</b>	<b>ELEMENTOS FINITOS E ANSYS®.....</b>	<b>12</b>
3.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	12
3.1.1	PROCEDIMENTO DO MEF.....	13
3.2	ANSYS® .....	14
3.3	ANSYS WORKBENCH® .....	14
<b>4</b>	<b>OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL UTILIZANDO O ANSYS WORKBENCH® .....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>OTIMIZAÇÃO DE UMA PRÓTESE MANDIBULAR.....</b>	<b>25</b>
5.1	METODOLOGIA.....	25
5.2	RESULTADOS .....	27
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>34</b>



# LISTA DE FIGURAS

2.1	Otimização de dimensionamento. ....	6
2.2	Otimização de forma.....	6
2.3	Otimização topológica.....	7
2.4	Etapas da otimização topológica.....	8
2.5	Classificação das lesões mandibulares (COSTA et al. 2010) .....	9
2.6	Modelo de reconstrução mandibular comercializado no mercado (CPMH,2023)	10
2.7	Direção da força de mastigação.....	11
3.1	Interface inicial - ANSYS WorkBench® 2023 .....	15
3.2	Módulo de análise estática .....	15
3.3	Implementação de uma segunda análise no mesmo projeto.....	16
3.4	Módulo de otimização associado às informações da análise estática .....	17
3.5	Validação do resultado obtido pela otimização.....	18
3.6	Indicadores adequados para simulação.....	18
4.1	Análise estática do ANSYS Workbench® .....	19
4.2	Parâmetros de análise estática do ANSYS Workbench® .....	20
4.3	Definição da geometria da peça.....	20
4.4	Condições de contorno do suporte triangular .....	21
4.5	Otimização estrutural no Ansys Workbench.....	21
4.6	Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) no design inicial .....	22
4.7	Design otimizado gerado pelo Ansys.....	23
4.8	Design otimizado corrigido .....	23
4.9	Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) no design otimizado .....	24
4.10	Comparação entre os design inicial e o design otimizado .....	24
5.1	Modelo desenvolvido para simulação .....	25
5.2	Forças atuantes no modelo .....	26
5.3	Malha utilizada para a simulação.....	27
5.4	Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) no design inicial .....	28
5.5	Design otimizado gerado pelo Ansys para 70% da massa inicial mantida .....	28
5.6	Design otimizado gerado pelo Ansys para 50% da massa inicial mantida .....	29
5.7	Design otimizado gerado pelo Ansys para 30% da massa inicial mantida .....	29
5.8	Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) com 70% da massa inicial...	30

5.9	Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) com 50% da massa inicial...	30
5.10	Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) com 30% da massa inicial...	31

# LISTA DE TABELAS

3.1	Ícones indicadores do estado de cada célula e descrição.....	17
4.1	Propriedades mecânicas da estrutura inicial e da estrutura otimizada .....	24
5.1	Propriedades mecânicas do titânio Ti-6Al-4V segundo a NBR 16627-4 .....	26
5.2	Comparativo entre tensões e deformações para as diferentes otimizações .....	31

# Capítulo 1

## Introdução

A otimização estrutural é um campo de estudo fundamental na engenharia que se concentra em projetar estruturas eficientes, econômicas e seguras, e envolve o uso de técnicas para encontrar a melhor configuração estrutural com base em critérios específicos, como a minimização do peso, a maximização da rigidez ou a redução do custo.

Ao otimizar a rigidez de uma estrutura, é possível reduzir a deformação e aumentar a capacidade de suportar cargas sem adicionar material adicional (KIRSCH 1993). Isso é especialmente importante em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas, como pontes e edifícios em áreas sísmicas. Uma estrutura otimizada pode resistir a essas cargas com maior eficácia, reduzindo o risco de falha e aumentando a segurança das pessoas que a utilizam.

A importância do estudo da otimização estrutural é evidente em várias áreas da engenharia. No entanto, apesar de sua importância, este processo apresenta desafios significativos, tendo em vista que a natureza complexa dos problemas de otimização torna necessária a utilização de algoritmos avançados e ferramentas de análise computacional.

Ademais, a seleção de parâmetros adequados e a definição de restrições são etapas cruciais para obtenção de resultados confiáveis. Dessa forma, é essencial que os engenheiros envolvidos no projeto possuam conhecimentos sólidos na área de aplicação, assim como habilidades em modelagem matemática, análise estrutural e programação.

Felizmente, com o avanço tecnológico, a otimização estrutural tornou-se mais acessível e eficiente, sendo possível encontrar diversos softwares disponíveis que permitem a realização de análises estruturais complexas e a aplicação de algoritmos de otimização. Essas ferramentas permitem a exploração de uma ampla gama de possibilidades de projeto e a obtenção de soluções ótimas de maneira mais rápida e precisa.

Cabe citar que, outra a área em que a otimização estrutural desempenha um papel crucial é no design de estruturas leves, como componentes implantáveis (próteses). Para estes casos, a otimização topológica é a mais utilizada e a que tem demonstrado maior potencial, visando principalmente a redução de peso, porém mantendo a estrutura resistente o suficiente para suportar as cargas aplicadas. A redução de peso nesses casos é essencial para melhorar o

desempenho, a confiabilidade e a boa adaptabilidade desses produtos, além de minimizar os custos de fabricação.

Existem diversos tipos de próteses, como as de quadril, de fechamento craniano e de reconstrução, por exemplo, e o estudo da aplicação das técnicas de otimização nessa estrutura vêm crescendo cada vez. (AMORIM 2018), em seu trabalho, analisou os efeitos da otimização topológica em próteses craniofaciais, enquanto (Tavares 2022) concentrou seu estudo nas próteses de quadril.

Além da redução do peso, por meio da combinação de conhecimentos de engenharia e ciências médicas, o processo de otimização permite a criação de dispositivos personalizados que se adequam perfeitamente às necessidades e características individuais de cada paciente, resultando em um ajuste mais preciso, maior conforto e melhor desempenho funcional. Junto a isso, através de análises detalhadas e simulações computacionais, é possível identificar áreas de tensão e estresse nas próteses, reduzindo o risco de fadiga estrutural e aumentando sua vida útil.

Devido à complexidade da geometria das próteses, o método de resolução mais recomendado é o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF consiste na discretização de um domínio em um número finito de elementos para solucionar problemas cujos comportamentos não podem ser previstos (LIU and QUEK 2003; Thompson and Thompson 2017).

De forma geral, o processo de otimização desempenha um papel crucial no projeto de estruturas, incluindo próteses, eficientes, econômicas e seguras. Portanto, o estudo contínuo desse tema é de extrema importância, buscando avanços contínuos no campo das próteses e melhorando a vida de milhões de pessoas em todo o mundo.

Dessa forma, sabendo do impacto que as próteses geram na qualidade de vida das pessoas e da importância dessas estruturas serem leves, resistentes e confortáveis, este trabalho tem como **objetivo** realizar a otimização da estrutura de uma prótese de reconstrução mandibular, modelada por Elementos Finitos, visando a redução de peso da estrutura em questão. A **metodologia** de realização desse trabalho envolveu um estudo das técnicas de otimização topológica e o uso das mesmas por meio de softwares comerciais de elementos finitos. Para a realização das simulações, foi utilizado o software comercial ANSYS Workbench<sup>®</sup> em sua versão Student 2023. De modo a bem entender o procedimento de otimização usando o ANSYS Workbench<sup>®</sup> foi feito um estudo inicial de uma estrutura simples e depois a metodologia desenvolvida foi aplicada na otimização de uma prótese mandibular.

Este relatório apresenta, além dessa introdução, mais cinco capítulos:

- **Capítulo 2** : apresenta uma revisão teórica acerca dos conceitos de otimização, os processos envolvidos e os tipos de otimização estrutural. Nesse capítulo também se introduz o conceito de reconstrução mandibular e define-se as forças mastigatórias,

que serão utilizadas nas condições de contorno da simulação;

- **Capítulo 3:** apresenta o Método dos Elementos Finitos, assim como o procedimento do MEF e a importância de sua utilização na análise de estruturas. Nesse capítulo também se introduz brevemente o software ANSYS®, com foco no pacote ANSYS Workbench® e seu funcionamento;
- **Capítulo 4 :** descreve com detalhes a metodologia de otimização utilizada nesse projeto de graduação. Além dos passos a serem seguidos no processo, apresenta-se como se dá a implementação no ANSYS Workbench®;
- **Capítulo 5:** é feita a otimização topológica de uma prótese mandibular. São apresentados os resultados obtidos por meio das simulações e feito uma análise dos mesmos;
- **Capítulo 6:** apresenta as conclusões desse trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

Por fim são listadas as referências bibliográficas usadas.

# Capítulo 2

## Otimização Estrutural e Reconstrução Mandibular

Nesse capítulo se introduzem os conceitos fundamentais sobre a otimização estrutural e sobre reconstrução mandibular. Apresentam-se os tipos de otimização estrutural, com destaque para a otimização topológica. Definem-se também as forças mastigatórias, que serão usadas na definição dos carregamentos para a simulação.

### 2.1 Otimização Estrutural

A otimização é um processo que consiste em explorar os recursos disponíveis no intuito de maximizar a utilidade ou performance de um objeto, serviço ou sistema/mecanismo, através do aumento ou redução de um parâmetro, de forma a alcançar o melhor projeto viável de acordo com os parâmetros de aceitação pré estabelecidos (KIRSCH 1993).

O processo de otimização pode ser aplicado em diversos setores, desde serviços até estruturas. No caso da otimização estrutural, o aumento da escassez de materiais, assim como o aumento do custo da matéria prima, fez com que a utilização deste processo na indústria crescesse, resultado na necessidade de desenvolver produtos com menor preço e custo de fabricação (KIRSCH 1993).

O principal objetivo da otimização estrutural é fazer com que um conjunto de materiais que sustentam carga sejam projetados da melhor maneira possível. Para isso, deve-se inicialmente definir o que seria o termo “melhor”, através de parâmetros como peso, rigidez, tensões, deslocamentos ou geometria, por exemplo. Definidos os parâmetros, deve-se impor restrições, como por exemplo a quantidade de material utilizado, a fim de obter um problema de otimização com solução bem definida (CHRISTENSEN and KLARBRING 2009).

Cabe destacar que os parâmetros mencionados anteriormente são puramente mecânicos e, segundo (CHRISTENSEN and KLARBRING 2009), para efeito claro de comparação da

otimização estrutural em relação a tais fatores, e levando em consideração aspectos como funcionalidade, estética e/ou economia, é importante seguir os passos de um projeto ideal. (KIRSCH 1993) define quatro passos para o desenvolvimento de um projeto ideal: definir os requisitos de funcionalidade, desenvolvimento do projeto conceitual, otimização e finalização/acerto dos detalhes.

Segundo (KIRSCH 1993), o primeiro passo de um projeto é definir os requisitos de funcionalidade. Durante esta etapa deve ser definida a utilidade do produto, assim como os requisitos iniciais, como tamanho, quanto e que tipo de carga deve suportar, entre outros aspectos. De posse dessas informações, deve-se prosseguir para o desenvolvimento do projeto conceitual, onde serão definidos os materiais, o design inicial, o tipo de estrutura e o método de fabricação do produto (CHRISTENSEN and KLARBRING 2009; KIRSCH 1993).

O próximo passo é a otimização. Ao definir um conceito, deve-se ter em mente que pode haver vários possíveis projetos que irão atender os requisitos de funcionalidade. Sabendo disso, (KIRSCH 1993) defende o procedimento de tentativa e erro para escolher o projeto ideal com base nas restrições implementadas na primeira etapa do projeto. Por último, mas não menos importante, durante a finalização/acerto dos detalhes, o modelo obtido deve ser verificado. Nesta etapa deve-se levar em consideração, também, fatores estéticos e/ou mercadológicos (CHRISTENSEN and KLARBRING 2009; KIRSCH 1993).

O processo de otimização pode ser realizado pela forma iterativo-intuitivo ou pelo método matemático. O método matemático consiste em um modelo em que um problema é formulado de forma que os requisitos definidos no projeto correspondem às restrições e o conceito “ideal” é modelado com base em uma formulação matemática precisa. (CHRISTENSEN and KLARBRING 2009) destaca que neste processo é necessário que os requisitos de projeto sejam matematicamente mensuráveis, tornando o modelo uma boa opção para critérios mecânicos, porém de difícil aplicação para critérios estéticos.

Já o método iterativo-intuitivo é considerado o método tradicional, e o mais utilizado. Neste método, um projeto inicial é sugerido e, a partir daí, os requisitos definidos são analisados. Após a análise, caso o projeto não seja aceitável, um novo projeto é sugerido e tem seus requisitos analisados novamente. Esse processo iterativo se repete gerando uma série de desenhos, e se encerra ao obter um projeto final que seja aceitável (CHRISTENSEN and KLARBRING 2009).

Com o avanço tecnológico, as etapas II e III citadas anteriormente são quase exclusivamente realizadas por métodos computacionais, onde os principais são o Método dos Elementos Finitos (MEF) ou o Método dos Sistemas Multicorpos (ou do inglês Multibody System - MBS). Esses métodos são a base da maioria das softwares de simulação, como o software comercial ANSYS por exemplo, e apresentam resultados com grande precisão, permitindo que cada iteração seja analisada com maior confiança e trazendo maior segurança e eficácia na tomada de decisão.

O processo de otimização estrutural pode ser dividido em três categorias: otimização de



dimensionamento, otimização de forma e otimização topológica.

### 2.1.1 Otimização de Dimensionamento

A otimização de dimensionamento, também conhecida como otimização paramétrica, é aquela em que a geometria da peça é dada por uma dimensão ou razão de dimensão. Neste tipo de otimização, são alterados, por exemplo, os valores de espessura e/ou área de seção transversal, porém sem alterar sua forma (SILVA 2009; CHRISTENSEN and KLARBRING 2009). Um exemplo de otimização de dimensionamento pode ser visualizada na imagem abaixo, onde a viga deve ter seção transversal otimizada para se obter a máxima rigidez possível, sem elevar o custo, ou o menor peso, mantendo ou aumentando a resistência aos esforços aplicados.

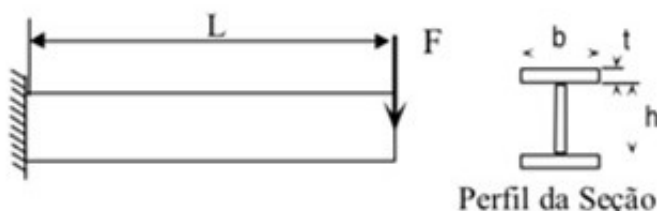


Figura 2.1: Otimização de dimensionamento.  
Adaptado de (SILVA 2009)

### 2.1.2 Otimização de Forma

A otimização de forma é aquela em que o parâmetro de otimização é a forma (o desenho) da estrutura, de modo que este parâmetro é alterado até que seja encontrado o desenho ótimo (SILVA 2009; CHRISTENSEN and KLARBRING 2009). Neste tipo de otimização, as variáveis de projeto podem ser pontos que compõem o contorno da peça ou até mesmo um conjunto de equações diferenciais parciais que definem o estado da peça.

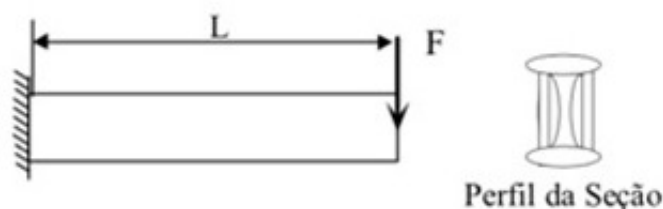


Figura 2.2: Otimização de forma.  
Adaptado de (SILVA 2009)

Cabe destacar que os resultados obtidos pela otimização de forma, em sua grande maioria, apresentam geometrias complexas, fazendo com que o MEF seja comumente utilizado

para a análise das estruturas. No entanto, apesar de permitir a análise de estruturas complexas, a malha de elementos finitos deve ser refeita a cada passo do processo de otimização, resultando na distorção da malha (SILVA 2009). Quando isso ocorre, os cálculos são prejudicados, levando a resultados espúrios. Existem diversos métodos para evitar esse problema, no entanto não serão abordados neste trabalho.

### 2.1.3 Otimização Topológica

A otimização topológica (OT) é considerada a forma geral de otimizar uma estrutura e consiste em um método computacional que distribui o material da região interna de um domínio no intuito de obter a topologia ótima. Este processo ocorre a partir da variação de uma determinada função custo (critério), também chamada função objetivo ou critério de otimização, maximizando ou minimizando parâmetros (máxima rigidez e mínimo peso, por exemplo) até se obter o design ideal (SILVA 2009; CHRISTENSEN and KLARBRING 2009).

Segundo (SILVA 2009), na OT a topologia ótima é encontrada a partir da combinação dos métodos de otimização com o método dos elementos finitos, utilizando a informação dos gradientes da função objetivo em relação à quantidade de material em cada elemento tornando, assim, o processo mais rápido.

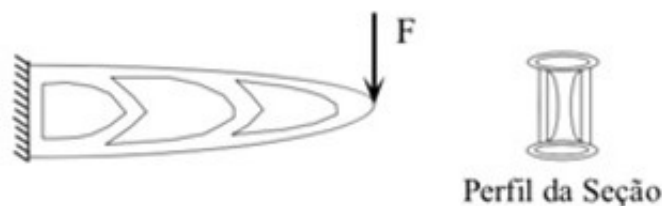


Figura 2.3: Otimização topológica.  
Adaptado de (SILVA 2009)

O processo de otimização topológica ocorre seguindo seis passos (SILVA 2009). O primeiro passo é definir o domínio em que a estrutura pode existir com base nas condições de contorno e pontos de aplicação de carga. A partir daí, este domínio é discretizado em elementos finitos e as condições de contorno são aplicadas para que, em seguida, o material interno seja distribuído no domínio seguindo os dados fornecidos ao software de otimização topológica.

O resultado obtido por meio do processo indica as regiões onde há a presença de material (cor escura) e ausência de material (cor branca), sendo possível observar em alguns pontos escalas de cinza, indicando a presença de materiais intermediários. (SILVA 2009) afirma que esses materiais não podem ser executados na prática, tornando necessária a interpretação da estrutura obtida a fim de obter o projeto ideal.

De forma geral, essa interpretação pode ser realizada por meio de métodos de processamento de imagem ou desenhando uma nova estrutura embasada no resultado gerado pelo

software de otimização (SILVA 2009; CHRISTENSEN and KLARBRING 2009).

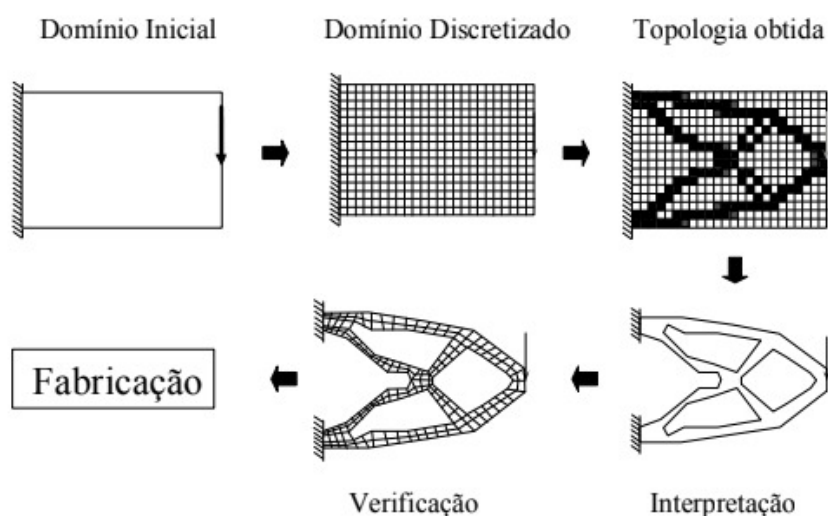


Figura 2.4: Etapas da otimização topológica.  
(SILVA 2009)

Após a interpretação, o modelo final da estrutura deve ser verificado, geralmente utilizando o MEF, de forma a trazer confiança na solução obtida (SILVA 2009; CHRISTENSEN and KLARBRING 2009). A partir daí pode-se dar início a última etapa do processo: a fabricação da estrutura, podendo ser executada por meio de diversas técnicas. Todas as seis etapas podem ser visualizadas na figura 2.4.

## 2.2 Reconstrução Mandibular

Juntamente com a maxila, a mandíbula compõe o segmento do esqueleto craniomaxilofacial, sendo responsável pela respiração, deglutição, fonação, estética facial e, principalmente, a mastigação (COSTA et al. 2010).

A mandíbula é uma estrutura óssea, composta do osso bicortical, com grande responsabilidade estática e funcional (COSTA et al. 2010; Corpas and Bonachela 2005a). Estudos indicam que os maiores causadores de defeitos mandibulares são as cirurgias ablativa, isto é, para remoção de uma parte do tecido nervoso de uma região no intuito de reduzir as dores naquela região e remover tumores, em casos de câncer. Junto à isso, lesões benignas, lesões por arma de fogo e doenças, como osteomielite e osteoradionecrose, também necessitam do procedimento de reconstrução mandibular (COSTA et al. 2010).

Os defeitos mandibulares são classificados de diversas maneiras, em que o mais prático foi desenvolvido por Jewel (COSTA et al. 2010). O autor classifica a lesão em três catego-

rias principais: "C", que corresponde a todo segmento central da mandíbula; "L", que corresponde aos defeitos laterais, sem incluir o côndilo (região arredondada do osso, geralmente em contato com a articulação e comumente chamado de "cabeça"); e, "H", correspondentes aos defeitos laterais, incluindo o côndilo.

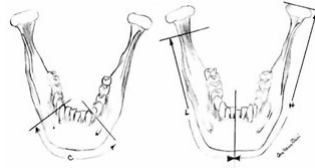


Figura 2.5: Classificação das lesões mandibulares (COSTA et al. 2010)

O tipo de tratamento varia de acordo com cada caso, porém, de forma geral, recomenda-se que todo paciente que possua algum defeito ósseo nessa região, seja genético, provocado por algo externo, como um tumor ou um acidente, e que possua as devidas condições devem se submeter ao procedimento de reconstrução mandibular.

### 2.2.1 Processo de Reconstrução Mandibular

Os primeiros procedimentos de reconstrução mandibular foram datados por volta do final do século XIX, na qual os médicos cirurgiões da época utilizavam materiais como metais, borrachas e até mesmo mármore para reconstruir os as regiões danificadas (COSTA et al. 2010; Nóia et al. 2015). Neste período, o procedimento de reconstrução era limitado à lesões pequenas, tendo em vista que os índices de falha eram muito altos, principalmente por infecção devido à baixa biocompatibilidade dos materiais.

Com o avanço tecnológico, novos materiais foram desenvolvidos, permitindo aplicações em diversos tipos e tamanhos de lesões. Um dos principais materiais utilizados é o titânio comercialmente puro ou o titânio liga Ti-6Al-4V. Estes materiais têm se destacado e vem ganhando espaço no mercado devido à sua elevada resistência mecânica, baixo peso, elevada resistência à corrosão e elevada biocompatibilidade, resultando em uma excelente osseointegração e, conseqüentemente, menores índices de falha e maior conforto aos pacientes (Nóia et al. 2015).

A figura 2.6 ilustra um modelo de reconstrução mandibular, feita sob medida e fabricada em liga de titânio Ti-6Al-4V, por manufatura aditiva. Na figura é possível observar que a prótese foi desenvolvida para corrigir uma lesão do tipo "H", e possui os furos para inserção de implantes dentários diretamente na prótese. Um ponto importante a ser destacado é que, para garantir uma boa osseointegração, é necessário controlar a rugosidade (ilustrada pela região em destaque da figura 2.6 da superfície que estará em contato com o osso).

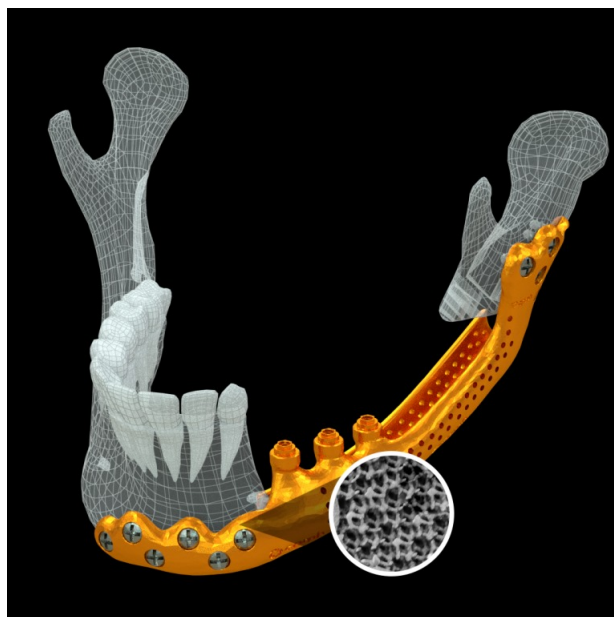


Figura 2.6: Modelo de reconstrução mandibular comercializado no mercado (CPMH,2023)

### 2.2.2 Forças Mastigatórias

O processo de mastigação é um processo na qual o alimento é fragmentado, e transformados em partículas homogeneizadas que formam o bolo alimentar. No entanto, este processo depende de diversos fatores, desde a coordenação dos músculos, morfologia, número de dentes e força aplicada durante a mastigação (Corpas and Bonachela 2005a; Corpas and Bonachela 2005b).

A mastigação mantém a força dos músculos do rosto, modela a forma do osso e a posição do dente, além de ser a primeira fase na digestão dos alimentos. Este processo é diretamente responsável pelo equilíbrio orofacial (Corpas and Bonachela 2005a; Fileni and Navarro 2004).

Sabe-se que a mandíbula humana é capaz de realizar movimentos complexos e empregar forças de diferentes intensidades, de acordo com a necessidade da mastigação, que por sua vez é composta por uma série de eventos sincronizados (Corpas and Bonachela 2005b; Nóia et al. 2015).

A força média que o ser humano adulto saudável imprime na mastigação é de 20 a 40 quilograma força (kgf), principalmente na região dos molares. Em alguns casos, esses dentes podem exercer forças de mastigação entre 110 e 130 kgf. Cabe destacar que, além da condição óssea (se há ou não lesão nos ossos e/ou articulações envolvidas no processo mastigatório), o tipo de alimento pode influenciar na força de mastigação aplicada, de modo que quanto mais rígidos são os alimentos, maiores são a força e a energia empregadas.

Alguns estudos realizados sobre as forças de mastigação mostram que essas forças variam de acordo com a forma que são medidas, porém, segundo a pesquisa de (Corpas and Bonachela 2005b; Nóia et al. 2015), as forças de mastigação em um ser hu-

mano com algum defeito ósseo mandibular é em média de 4,5 kgf, ou aproximadamente 46 N, em cada molar. Outros estudos tomam como base, para fins de análise, uma força de mastigação média de 100 N (Corpas and Bonachela 2005b).

No presente trabalho, será considerada uma força de mastigação média de 100 N, aplicada na região indicada pela seta na figura 2.7. A direção indicada é obtida a partir da decomposição das forças de reação realizadas pela mandíbula durante a mastigação.

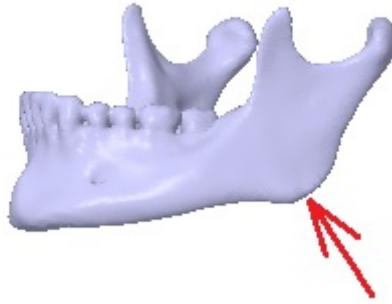


Figura 2.7: Direção da força de mastigação

A metodologia utilizada no trabalho está descrita no capítulo 5.1.

# Capítulo 3

## Elementos Finitos e ANSYS®

Nesse capítulo faz-se uma breve introdução o Método de Elementos Finitos (MEF), seu procedimento e aos softwares comerciais, que usam do MEF, a saber o ANSYS® e o ANSYS Workbench®

### 3.1 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF), segundo (Thompson and Thompson 2017), é uma técnica matemática que utiliza termos de equações diferenciais parciais para configurar e solucionar sistemas cujos comportamentos podem ser previstos. Em outras palavras, o MEF utiliza equações em pequenos pedaços, conhecidos como elementos, em que a solução é conhecida, seja ela exata ou aproximada.

De forma geral, o MEF é utilizado para solucionar problemas de engenharia e física, onde as variáveis de interesse estão distribuídas espacialmente. Os problemas típicos que são resolvidos pelo MEF incluem a análise estrutural, transferência de calor, escoamento de fluidos, transporte de massa e potencial eletromagnético (Chen and Liu 2018).

Para a aplicação do MEF, a geometria do sistema deve ser definida por um número de pontos no espaço, chamados “nós”, sendo que cada nó possui um conjunto de graus de liberdade (Thompson and Thompson 2017). Esses pontos estão conectados uns aos outros conforme a geometria da estrutura formando um conjunto finito de elementos.

O comportamento desses elementos é modelado segundo leis físicas que reproduzem o comportamento do material e obedecem as leis de continuidade e de conservação. Os elementos podem assumir diferentes formas, como triângulos, quadrados, tetraedros e cubos, formando a malha de discretização que aproxima o domínio contínuo do problema.

Considerando como exemplo um problema de análise estrutural, onde deseja-se determinar o campo de distribuição de deformações de uma placa sujeita a um carregamento distribuído, a solução clássica das equações diferenciais parciais envolvidas no problema exige a

solução em todos os pontos da placa e pode ser realizada de forma manual.

No entanto, para estruturas com geometrias mais complexas, como as próteses de reconstrução, esse equacionamento clássico torna-se inviável, sendo necessário realizar a integração numérica para estimar a interação entre os graus de liberdade (Thompson and Thompson 2017). Para estes casos, o método de elementos finitos é o mais recomendado.

É importante destacar que, como não é possível dividir um sistema em um número infinito de elementos, o resultado obtido pelo MEF é uma solução exata para um problema aproximado. Da mesma forma que um polígono regular com número de lados tendendo ao infinito se aproxima de um círculo perfeito, um modelo de elementos finitos se aproxima do modelo real à medida que o número de elementos se aproxima do infinito (Thompson and Thompson 2017). Dessa forma, pode-se dizer que quanto maior o número de elementos, mais próximo do real será o resultado obtido.

Por outro lado, o aumento do número de elementos pode resultar no aumento do número de equações a serem resolvidas e, por consequência, no aumento do número de iterações, dificultando a resolução manual do problema. Dessa forma, o Método dos Elementos Finitos tem sido utilizado nos principais softwares de simulação, tornando o processo mais rápido e mais preciso quando comparado à solução manual.

Dessa forma, os softwares de elementos finitos têm como função calcular os valores das variáveis de campo nos nós e, por meio da aproximação por funções de interpolação, definir valores para os pontos não nodais, garantindo a continuidade da solução e obtendo soluções aproximadas com alta precisão.

### 3.1.1 Procedimento do MEF

O procedimento padrão do MEF envolve as seguintes etapas (LIU and QUEK 2003) e (LEUNG 1993) :

- **Discretização do domínio:** o domínio é dividido em um número finito de subdomínios, chamados elementos, conectados por nós comuns;
- **Especificação da função de aproximação:** a quantidade contínua é aproximada, em cada elemento, por polinômios definidos a partir dos valores nodais;
- **Montagem do sistema de equações:** após a aproximação, utiliza-se a equação de governo para escrever uma equação discreta que governa o problema;
- **Resolução do sistema de equações:** a solução fornece os valores nodais;
- **Avaliação das quantidades de interesse:** usualmente, existem outras quantidades de interesse que estão relacionadas às derivadas da função contínua.



## 3.2 ANSYS®

O ANSYS® é um software de simulação voltado para engenharia e que utiliza o método dos elementos finitos para resolução dos problemas (ANSYS 2023). Este programa é largamente utilizado na indústria e permite a realização de diferentes tipos de análises na Engenharia Mecânica.

Os recursos do ANSYS® incluem a capacidade de realizar análises estruturais estáticas e dinâmicas, bem como resolver problemas de autovetores tanto para determinação dos modos de vibração, como dos modos de flambagem de estruturas. Além disso, o ANSYS® possui módulos de análise e solução de problemas relacionados à transferência de calor ou eletromagnetismo em estado estacionário e transiente (ANSYS 2023; Chen and Liu 2018).

O software contém muitos recursos especiais que permitem incluir efeitos de não linearidades, plasticidade, grandes deformações, hiperelasticidade, fluência, assim como também permite o estudo materiais anisotrópicos ou com propriedades variando com a temperatura. Ao longo do desenvolvimento do ANSYS® outros recursos especiais, como subestruturação, análises de vibrações aleatórias, convecção de fluidos e acústica, por exemplo, foram adicionados ao programa.

O software ANSYS® está em uso comercial desde 1970 (ANSYS 2023) e tem sido amplamente utilizado nas indústrias aeroespacial, automotiva, construção, eletrônica, serviços de energia, manufatura, nuclear, plásticos, petróleo e aço. Além disso, muitas empresas de consultoria e centenas de universidades utilizam o ANSYS® para análise, pesquisa e ensino, já que o programa dispõe de versões voltadas para este público.

A biblioteca de elementos do ANSYS® contém uma ampla gama de elementos para análises estáticas e dinâmicas, Esta variedade de elementos permite ao software analisar estruturas 2D e 3D, sistemas de tubulação, sólidos e cascas axissimétricos, sólidos 3D, placas planas e problemas não lineares, incluindo problemas de contato (interfaces) e cabos. Os programas mais utilizados pela engenharia mecânica são o Ansys Mechanical APDL® e o Ansys WorkBench®, onde este último será utilizado para realização deste trabalho.

## 3.3 ANSYS WorkBench®

O ANSYS WorkBench® é um programa de simulação integrado, que utiliza como base o Método dos Elementos Finitos. Este programa é uma extensão do software ANSYS®, e permite que os usuários configurem seus processos de simulação, definindo a geometria, material, malha e condições de contorno de uma estrutura (ANSYS 2023). Junto a isso, este programa é capaz de realizar análises diferentes dentro de um mesmo projeto, aproveitando as informações fornecidas inicialmente e as novas informações geradas pelas simulações.

O ANSYS WorkBench® possui uma interface de fácil interpretação e intuitiva de forma

que ao iniciar o programa já é possível identificar as ferramentas de análise, o projeto esquemático e a barra de progresso, conforme ilustrados na figura (AMORIM 2018). Para o presente trabalho serão utilizados os módulos de análise estática (Static Structural) e de otimização estrutural (Structural Optimization) do ANSYS WorkBench® 2023 R1 Student.

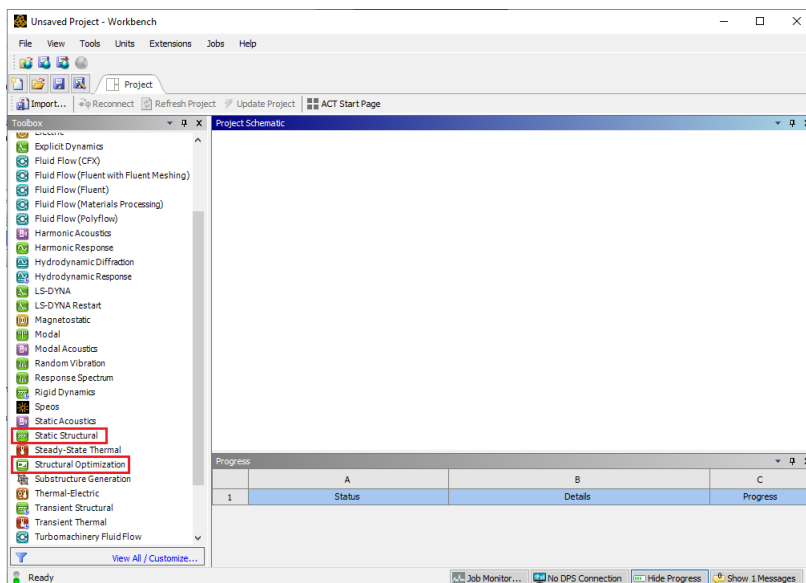


Figura 3.1: Interface inicial - ANSYS WorkBench® 2023

Ao selecionar o módulo de análise estática, uma nova janela é aberta contendo informações a serem preenchidas, conforme indicado abaixo.

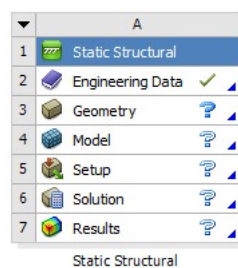


Figura 3.2: Módulo de análise estática

- *Engineering Data*: nesta etapa inicial serão realizadas as configurações do material a ser utilizado nas simulações. (AMORIM 2018) destaca que a maioria dos materiais utilizados comercialmente já se encontram na biblioteca do programa, porém é possível adicionar um novo material conforme a necessidade;
- *Geometry*: é nesta etapa que a geometria da estrutura deverá ser definida, podendo ser desenhada no próprio Ansys ou ser importada de outros softwares de modelagem 3D, como o SolidWorks® ou o Fusion360®;
- *Model*: essa etapa é utilizada para configurar e gerar a malha do modelo, podendo ser definida em termos de tamanho ou quantidade de elementos, por exemplo;

- *Setup*: é aqui que as condições de contorno e as cargas são definidas. Esta etapa permite informar se a estrutura está fixa ou não, os pontos de fixação e a direção e intensidade das cargas aplicadas;
- *Solutions e Results*: por fim, as análises desejadas (deformação e tensão, por exemplo) são selecionadas e, após as simulações, é possível visualizar os resultados obtidos.

Conforme mencionado anteriormente, é possível realizar diversas análises dentro do mesmo projeto. Para isso, basta arrastar o módulo de análise desejado (no caso deste estudo será o módulo de otimização estrutural) até uma das regiões delimitadas pelas caixas verdes, conforme ilustra a figura 3.3.

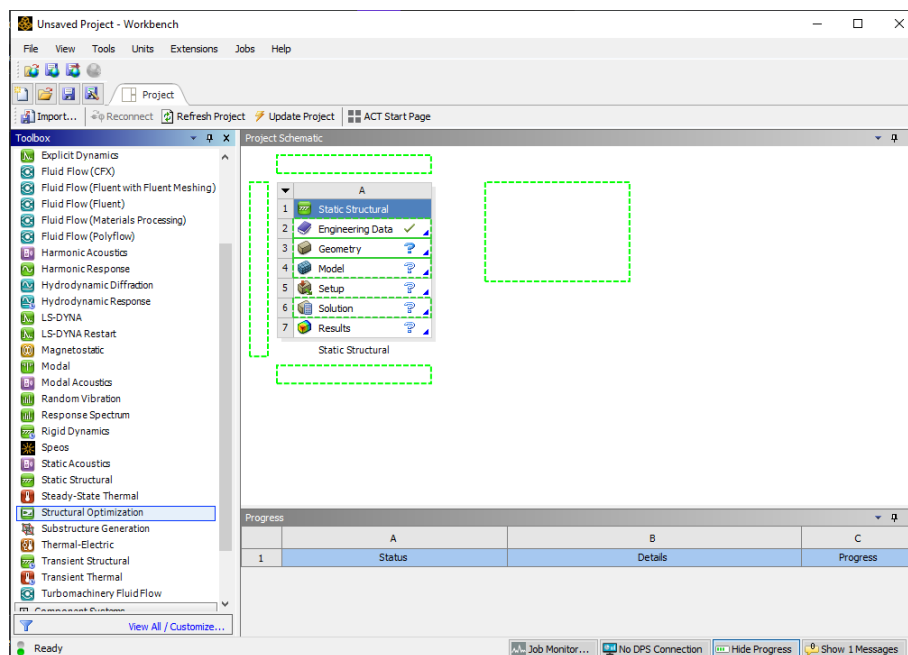


Figura 3.3: Implementação de uma segunda análise no mesmo projeto

O posicionamento do novo módulo de análise definirá os dados que serão reutilizados das outras análises. Por exemplo, caso o módulo de otimização seja posicionado na etapa *Solution*, todas as informações de material, geometria, condições de contorno e cargas, definidas durante a análise estrutural, serão utilizadas. Dessa forma, ficará pendente apenas a realização da análise propriamente dita (ver figura 3.4).

Após concluir o módulo de otimização, será necessária realizar a validação do *design* obtido. Para isso, basta clicar com o botão direito do mouse na etapa *Results* do módulo de otimização. Em seguida, selecionar a opção *Transfer to Design Validation System (Geometry)*, conforme figura 3.5. Ao finalizar essa etapa, um novo módulo de análise estática será aberto.

Como a geometria da estrutura foi alterada, será necessário atualizar esta etapa no novo módulo. Deverão ser atualizados, também, os demais dados do modelo, como material, malha e condições de contorno (se tiverem sido modificadas, o que normalmente não ocorre em uma otimização topológica). Por fim, o modelo estará pronto para ser simulado.

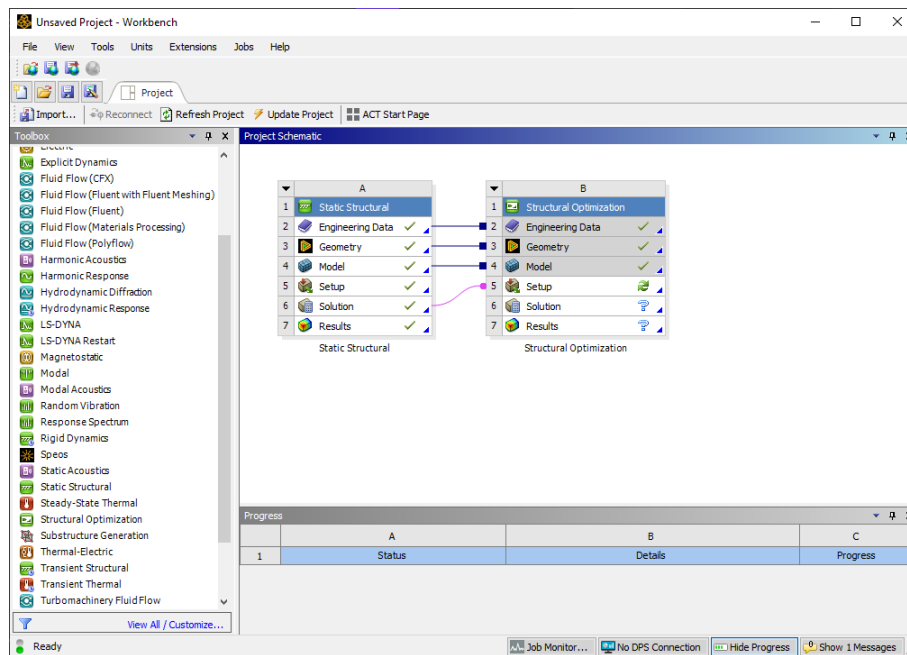


Figura 3.4: Módulo de otimização associado às informações da análise estática

É possível perceber que, ao longo do processo, existem figuras indicando o estado de cada célula do módulo de análise. Para cada indicador há um significado, conforme a tabela abaixo 3.1.

Estado da célula	Indicador	Descrição
Incompleto		Necessário inserir os dados para prosseguir com a simulação
Necessita atenção		Necessária a interação do usuário com a célula para prosseguir com a simulação
Necessita atualizar		Algum dado anterior foi alterado e o projeto precisa ser atualizado
Necessita atualizar		Item ainda não foi configurado e precisa ser atualizado
Pronto		Item configurado e pronto para prosseguir

Tabela 3.1: Ícones indicadores do estado de cada célula e descrição

Adaptado de (Chen and Liu 2018; AMORIM 2018)

Sendo assim, para obtenção de resultados precisos, após preenchimento de cada etapa é necessário que o indicador daquela célula corresponda ao "Pronto", conforme ilustrado pela figura 3.6. Dessa forma, a simulação foi concluída com sucesso e todos os resultados estão prontos para análise.

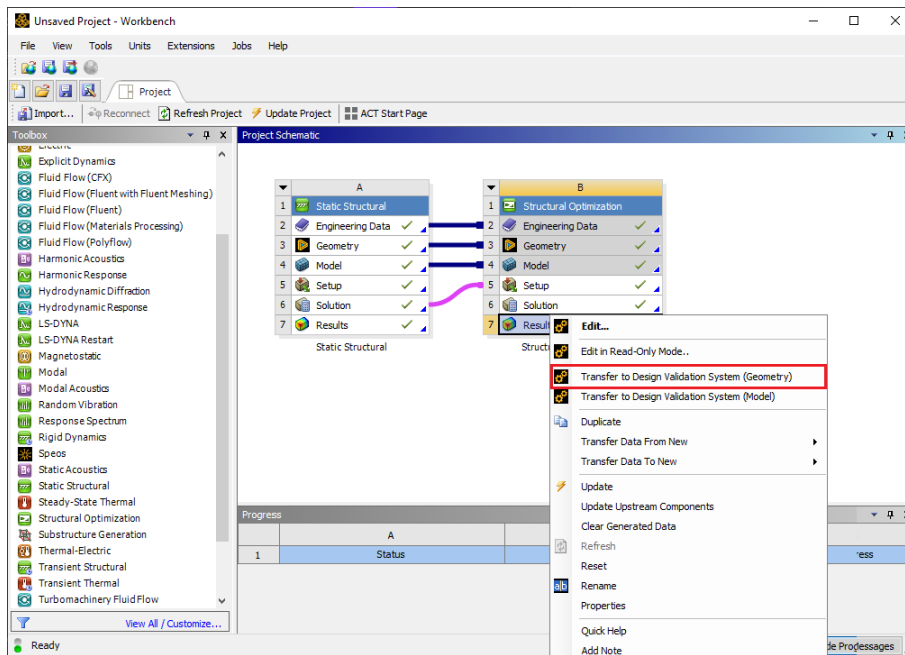


Figura 3.5: Validação do resultado obtido pela otimização

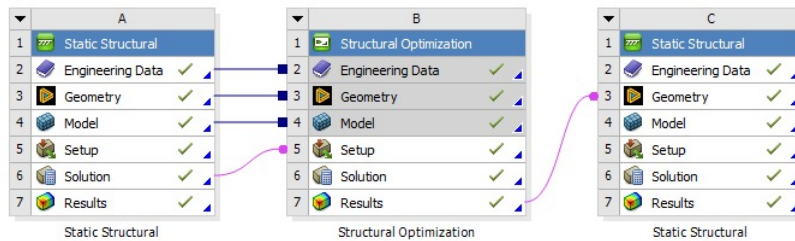


Figura 3.6: Indicadores adequados para simulação

# Capítulo 4

## Otimização Estrutural utilizando o Ansys WorkBench®

Nesse capítulo apresenta-se a metodologia padrão a ser seguida para a realização da otimização topológica usando o o ANSYS Workbench®. Mais do que um tutorial, o procedimento é apresentado chamando atenção para cuidados a serem tomados na aplicação do mesmo. Para facilitar o entendimento é usado uma peça exemplo simples.

O processo de otimização utilizando o ANSYS Workbench® é realizado seguindo três etapas: análise estática, otimização estrutural e verificação do projeto final. A primeira etapa, a análise estática, permite verificar o comportamento da estrutura antes, durante e após a aplicação da carga. Para o presente trabalho, a análise estática será utilizada para obter os valores de deformação e a tensão de Von Mises.

Ao selecionar o módulo de análise estática, uma nova janela é aberta contendo os parâmetros que devem ser definidos para a simulação (ver figura 4.1).

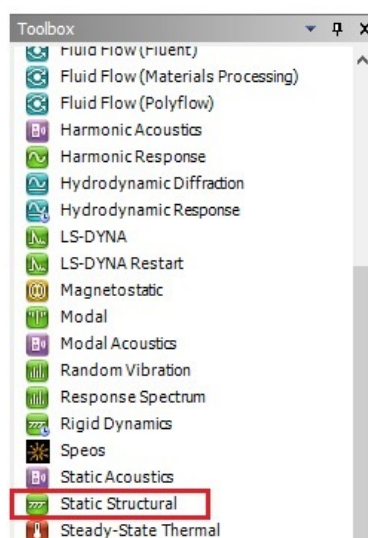


Figura 4.1: Análise estática do ANSYS Workbench®

É possível observar que a opção "Engineering Data" já foi preenchida e verificada auto-

maticamente. De forma geral, esta primeira opção corresponde à seleção dos materiais dos quais se deseja simular a estrutura e pode ser alterada ao longo das simulações.

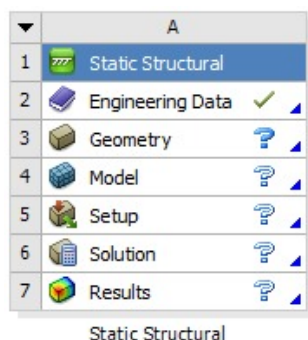


Figura 4.2: Parâmetros de análise estática do ANSYS Workbench®

Inicialmente, foi necessário determinar a geometria da estrutura. Como exemplo foi escolhido um suporte triangular, fabricado em aço estrutural, como objeto de estudo, tendo em vista que não apresenta geometria complexa e os resultados obtidos são de fácil interpretação.

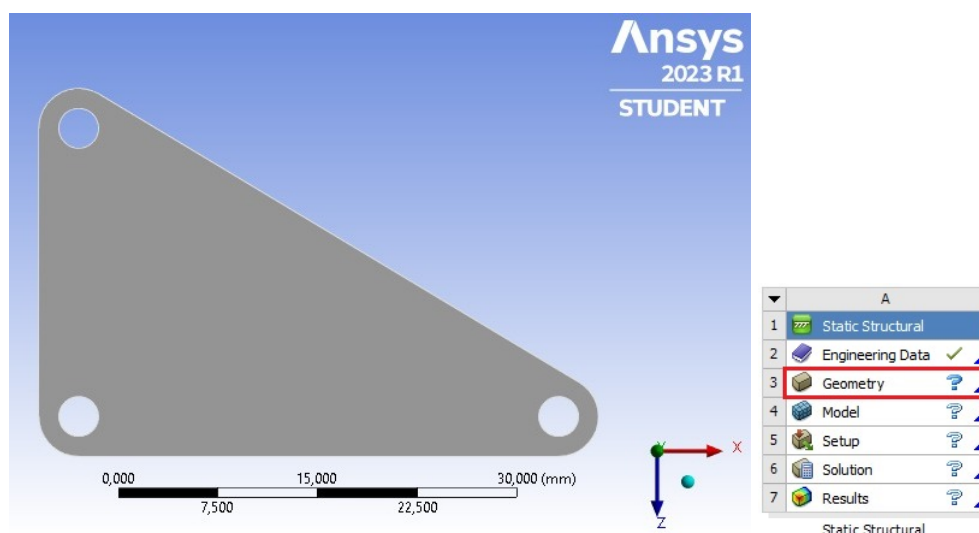


Figura 4.3: Definição da geometria da peça

Com a geometria definida, foi possível gerar a malha de elementos finitos utilizando a opção "Model". A malha utilizada foi do tipo "Curvature", com tamanho e ângulo nas configurações padrão. No intuito de refinar a malha para obtenção de resultados mais precisos, foi utilizado o recurso "Body sizing", do tipo "Element size" e com tamanho de 1,0 mm.

Em seguida foi realizada a aplicação das condições de contorno, utilizando a opção "Setup". Para o problema em questão, foi considerado que o suporte está fixado pelos dois furos próximos à parede e que está sendo aplicada uma força de 100 N tanto na direção vertical, quanto na direção horizontal. Foi considerado, também, que não há atrito entre a parede e o suporte. A figura 4.4 ilustra o posicionamento do suporte e a aplicação da carga.

É importante destacar que para definir os pontos que estão fixos, a parede sem atrito e a aplicação de carga foram utilizados os recursos "Cylindrical support", "Frictionless support"

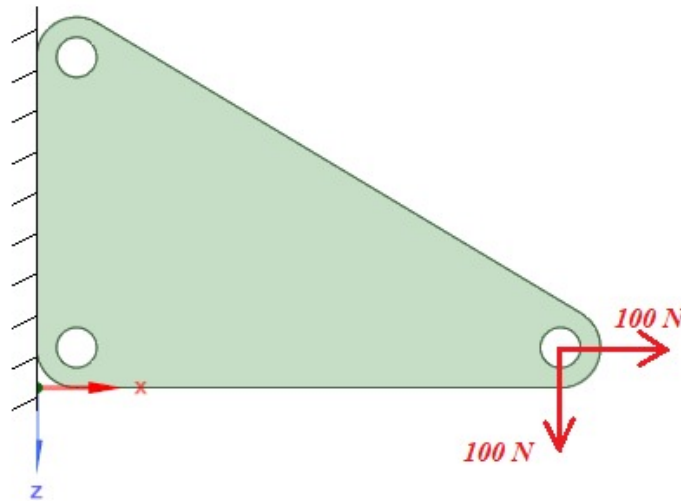


Figura 4.4: Condições de contorno do suporte triangular

e "Bearing load", respectivamente. Após a definição dessas condições, a estrutura pôde ser simulada.

A segunda etapa do processo consistiu na realização da otimização topológica utilizando o módulo de otimização estrutural. Com base nos parâmetros (geometria, material, malha e condições de contorno) previamente definidos e nos resultados obtidos com a análise estática, foi realizada a otimização topológica da estrutura visando a redução do peso, em que ficou definido que a estrutura deveria manter 50% da massa inicial.

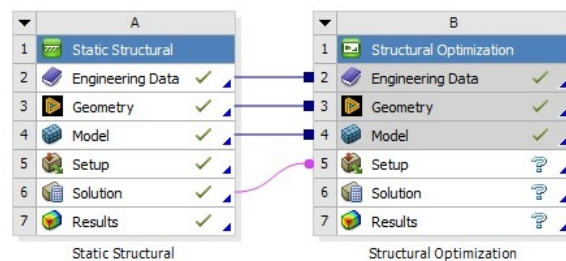


Figura 4.5: Otimização estrutural no Ansys Workbench

Após a obtenção do projeto "ideal" foi necessário realizar a análise da nova estrutura, de modo a verificar se a mesma possui as mesmas propriedades que o design inicial e se atende às condições de contorno sem falhar. No entanto, como a geometria gerada pelo software apresentou contornos irregulares e regiões de grande dificuldade de fabricação, viu-se como necessidade a correção de alguns pontos da estrutura. Dessa forma, foi gerado um novo *design* tomando como base o resultado obtido por meio da simulação.

Por fim, foi realizada a verificação do projeto final da estrutura, novamente por meio da análise estática. Cabe ressaltar que os parâmetros de análise utilizados foram os mesmos da primeira etapa do processo, no intuito de verificar as propriedades da nova estrutura nas mesmas condições de contorno.



Aplicando a metodologia descrita acima, foi realizada, inicialmente, a análise estática no modelo de exemplo, na qual foi possível verificar a deformação da estrutura e a condição de escoamento (tensão de Von Mises) da mesma.

Ao analisar a figura 4.6, observa-se que a região deformada corresponde, em sua maioria, à região de aplicação da carga. Além disso, a simulação de tensão equivalente também indica que as regiões de concentração de tensão estão localizadas próximas ao ponto de aplicação de carga seguindo em direção aos pontos de fixação. As regiões de concentração de tensões estão representadas pela coloração azul celeste.

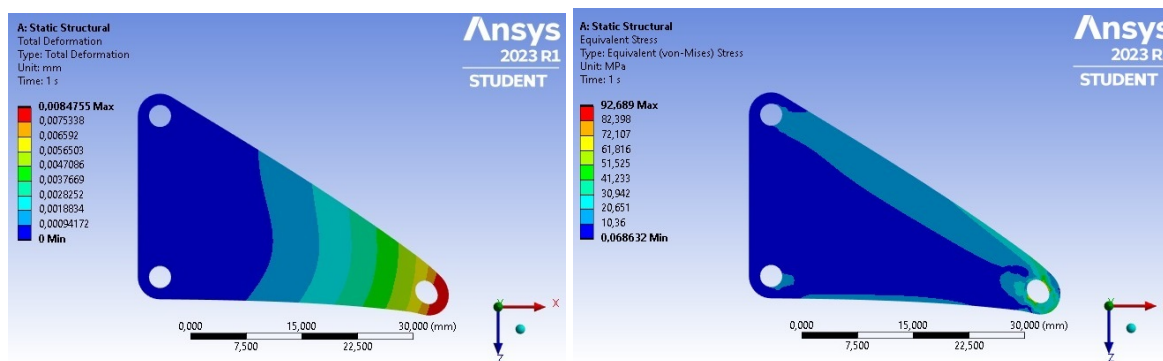


Figura 4.6: Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) no design inicial

Com base nesses resultados, é possível sugerir que haja a remoção de material das regiões de coloração mais escura, tendo em vista que as deformações nessas regiões são quase nulas e não há concentração de tensões.

Após realizar a otimização da estrutura, observou-se que a suposição inicial da remoção de material estava correta. O resultado obtido reduziu significativamente a quantidade de material na região central da estrutura, distribuindo a massa ao redor dos pontos de fixação do suporte.

É possível notar, também, que as regiões com mais material correspondem às regiões que concentram os maiores valores de tensões, verificadas na figura 4.6, fazendo com que a estrutura suporte a carga aplicada sem falhar. O design otimizado gerado pelo ANSYS Workbench® pode ser visualizado na figura 4.7.

A figura 4.10 mostra a comparação direta entre o design inicial e o design otimizado. A região azulada corresponde ao design ótimo gerado pelo Ansys, enquanto a região esverdeada corresponde à geometria inicial da estrutura. Conforme mencionado anteriormente, a maior parte do material removido se concentrava na região central da estrutura, a mesma região em que foi verificado que não havia concentração de tensões nem deformação significativa.

Para validação do modelo obtido, foi realizada novamente a análise estática sob as mesmas condições do modelo inicial. No entanto, o design otimizado apresenta contornos que dificultam a fabricação e, dessa forma, foi necessária a correção de alguns pontos da estru-

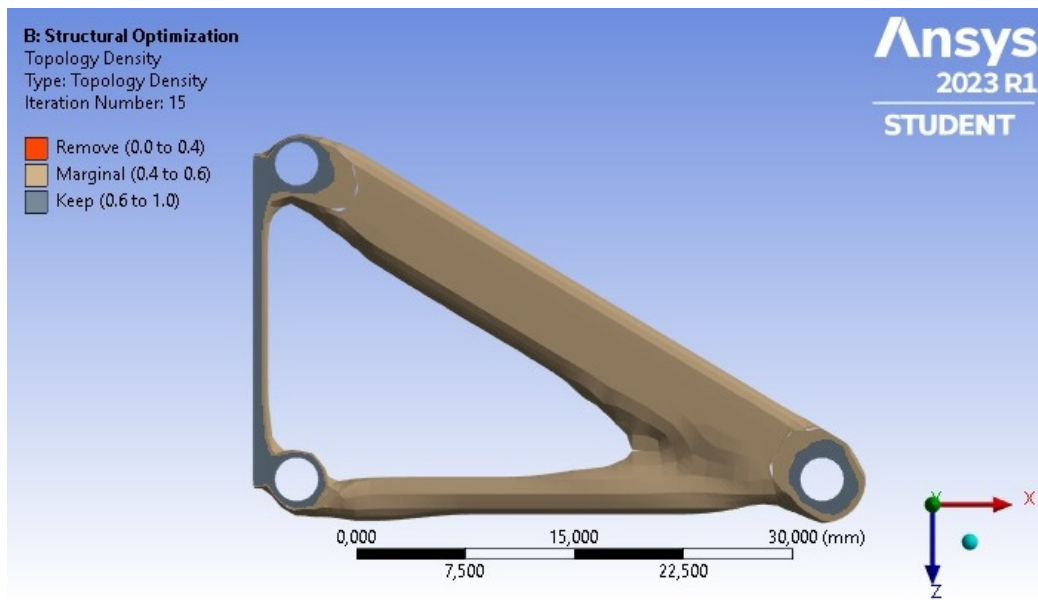


Figura 4.7: Design otimizado gerado pelo Ansys

tura. A estrutura corrigida é ilustrada pela figura 4.8.

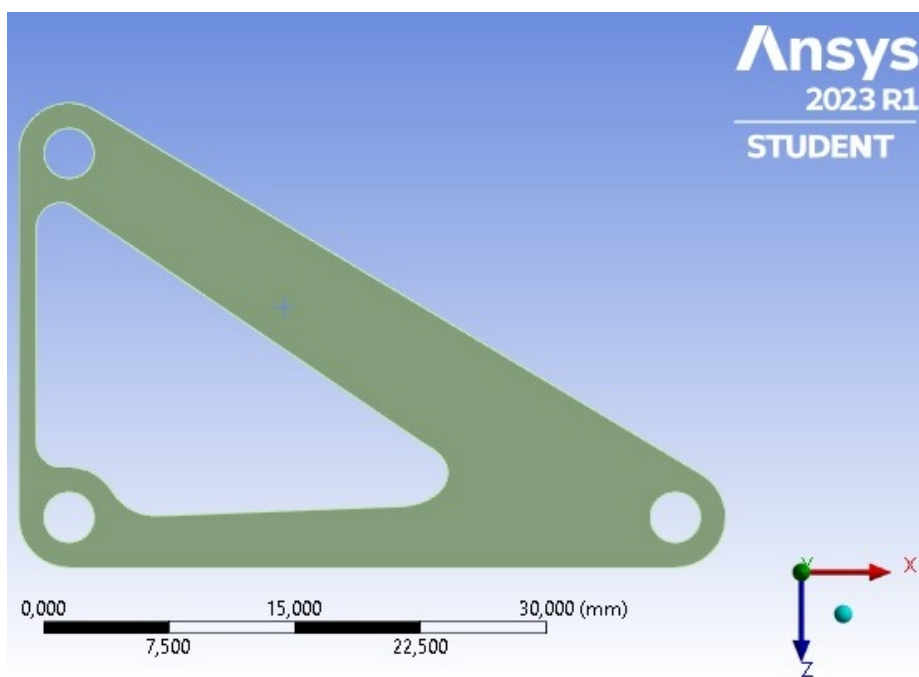


Figura 4.8: Design otimizado corrigido

Os resultados obtidos pela análise estática (ver figura 4.9 indicam um leve aumento na deformação da estrutura, ao mesmo tempo que há um pequeno aumento na tensão equivalente, mostrando que houve a melhoria das propriedades mecânicas mesmo com a remoção de 50% da massa. Além disso, a remoção de material não compromete o processo de fabricação da peça, porém pode resultar na redução do custo de fabricação dependendo do método de manufatura utilizado.

A tabela 4.1 e a figura 4.10 a seguir mostram a comparação direta dos designs inicial e

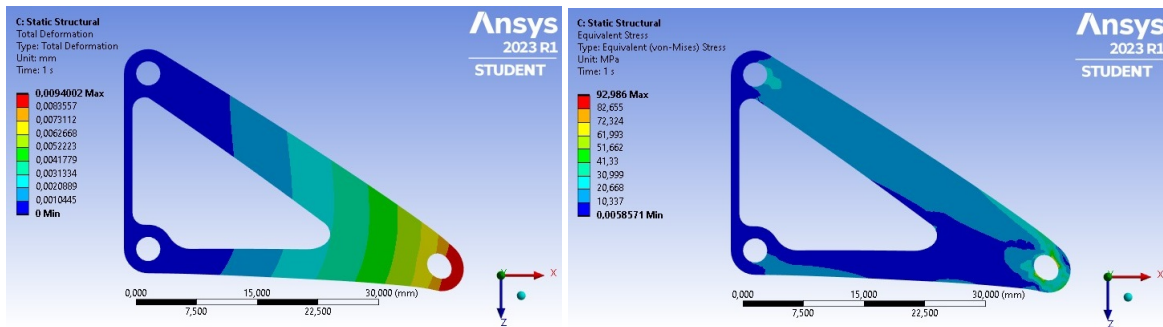


Figura 4.9: Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) no design otimizado

final, assim como as propriedades mecânicas obtidas para o design inicial e para o design otimizado com a redução de 50% da massa inicial.

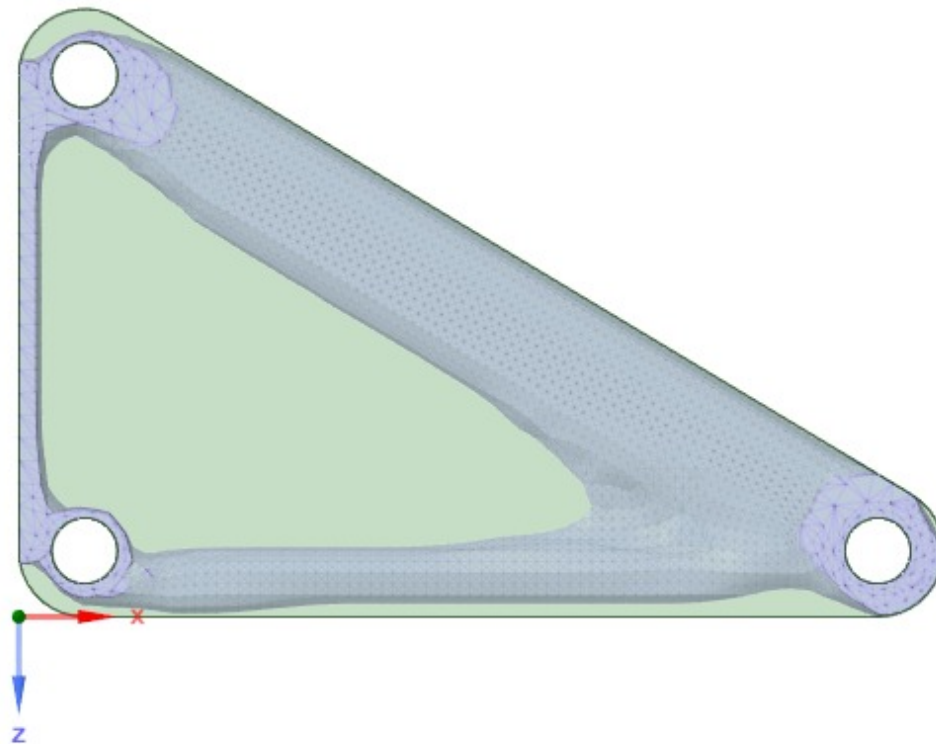


Figura 4.10: Comparação entre os design inicial e o design otimizado

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas da estrutura inicial e da estrutura otimizada

Parâmetro	Design Preliminar	Design Otimizado
Deformação total máx. (mm)	0,0085	0,0094
Tensão equivalente máx. (MPa)	92,689	92,986
Massa (g)	10,985	6,853

# Capítulo 5

## Otimização de uma prótese mandibular

Esse capítulo apresenta as principais contribuições e resultados desse trabalho. Descreve-se a metodologia usada na otimização de um prótese mandibular usando o ANSYS WorkBench® e apresentam-se os resultados obtidos. A metodologia segue os passos detalhados no capítulo 4 e a análise dos resultados foca na redução de massa sem comprometer a resistência mecânica da prótese.

### 5.1 Metodologia

Inicialmente, um protótipo de reconstrução mandibular foi modelado para uma mandíbula genérica, com tamanho semelhante à mandíbula de um adulto do sexo feminino, conforme ilustrado na figura 5.1 abaixo. Esse protótipo foi desenvolvido utilizando a extensão "*Power Surfacing*" do software de CAD SolidWorks®.

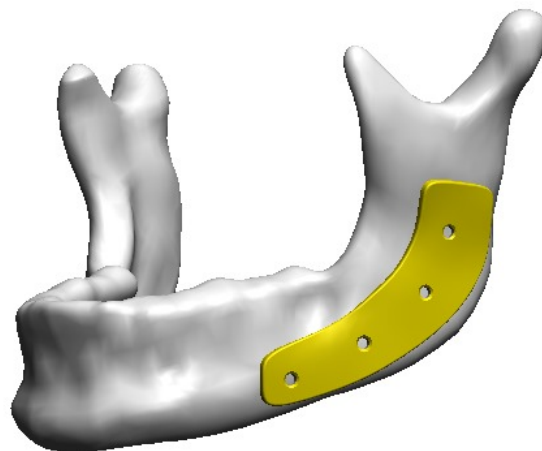


Figura 5.1: Modelo desenvolvido para simulação

Utilizando essa extensão, foi criada uma malha de superfície que, após ser moldada ao redor do modelo de mandíbula, foi extrudada em uma peça de espessura igual a 2,0 mm. Em seguida, foram realizados os furos de fixação da prótese que, em casos reais, é realizado por meio de parafusos próprios para este tipo de uso. Por fim, o modelo no formato STL foi importado para o ANSYS® e, a partir daí, foi dado início às simulações.

A primeira simulação realizada foi a análise estática da estrutura, a fim de obter os valores de deformação e tensão de Von Misses. O material utilizado foi a liga de titânio Ti6Al4V (NBR 16627-4) e foi adotada uma malha quadrangular, de tamanho igual a 1,0 mm. O Ti6Al4V possui as propriedades mecânicas representadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Propriedades mecânicas do titânio Ti-6Al-4V segundo a NBR 16627-4

Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) /	Limite de Escoamento (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
4,43	825	895

Em sequência, foram definidas condições de contorno da simulação, como as regiões de fixação e as forças atuantes. Para o modelo estudado, no intuito de reproduzir as condições reais de funcionamento, considerou-se que a peça está fixa no osso mandibular por meio dos quatro furos distribuídos ao longo do modelo. Além disso, visando a não alteração do contorno da placa, já que em aplicações reais uma pequena alteração no contorno pode refletir na estética do paciente, foi definido que a superfície superior do modelo também estaria fixa.

Para as forças atuantes na estrutura, foi considerado um valor médio com base na literatura (Corpas and Bonachela 2005a). Conforme mencionado ao longo do trabalho, a força média de mastigação de um adulto para alguns estudiosos é de 100 N atuando principalmente nos dentes molares. Dessa forma, para representar a força mastigatória, foi aplicada uma força resultante de 141,42 N ao longo do modelo da prótese nas regiões equivalentes aos músculos e dentes citados, conforme ilustrado na figura 5.2 abaixo.

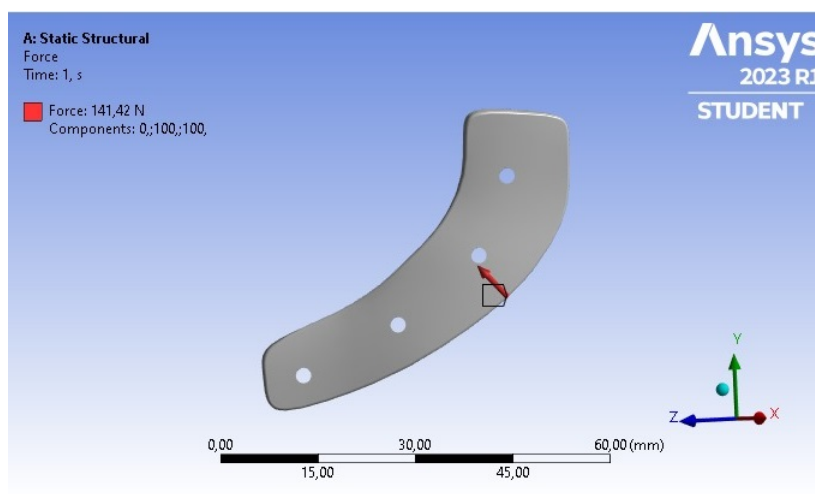


Figura 5.2: Forças atuantes no modelo

A segunda etapa do processo consistiu na realização da otimização topológica utilizando o módulo de otimização estrutural do ANSYS WorkBench®. Com base na geometria, material, malha e condições de contorno previamente definidos e nos resultados obtidos com a análise estática, foi realizada a otimização topológica da estrutura visando a redução do peso. Nesta etapa foram realizadas simulações para retenção de 30%, 50% e 70% da massa inicial, a fim de comparação entre os resultados obtidos.

Após a obtenção dos modelos otimizados, foi necessário realizar a análise da nova estrutura, de modo a verificar se a mesma possui as mesmas propriedades que o *design* da peça inicial e se atende às condições de contorno sem falhar.

Por fim, foi realizada a verificação do projeto final da estrutura, novamente por meio da análise estática. Cabe ressaltar que os parâmetros de análise utilizados foram os mesmos da primeira etapa do processo, no intuito de verificar as propriedades da nova estrutura nas mesmas condições de contorno. Os resultados obtidos são analisados e discutidos na seção seguinte.

## 5.2 Resultados

Com a análise estática foi possível verificar a deformação da estrutura e a condição de escoamento (tensão de Von Mises) da mesma. É importante mencionar que, inicialmente, notou-se que há uma restrição para o número de elementos quando é utilizada a versão estudantil do ANSYS®. Durante a discretização da malha, o tamanho mínimo do elemento suportado por essa versão foi de 1 mm. Como o foco do trabalho é analisar as reduções de massa, a malha gerada foi aceitável. A malha discretizada pode ser visualizada na figura 5.3.

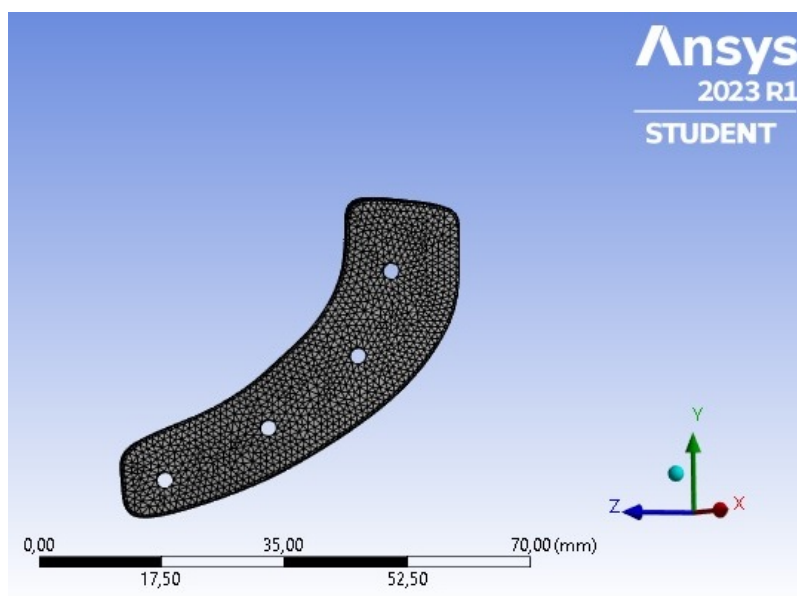


Figura 5.3: Malha utilizada para a simulação

Partindo para os resultados da análise estática, ilustrada pela figura 5.4, observa-se que a região deformada corresponde, em sua maioria, à região de aplicação da carga. Além disso, a simulação de tensão equivalente também indica que as regiões de maiores níveis de tensão estão localizadas próximas ao ponto de aplicação de carga seguindo em direção aos pontos de fixação. As regiões de maiores níveis de tensão estão representadas pelas colorações amarelas e avermelhadas.

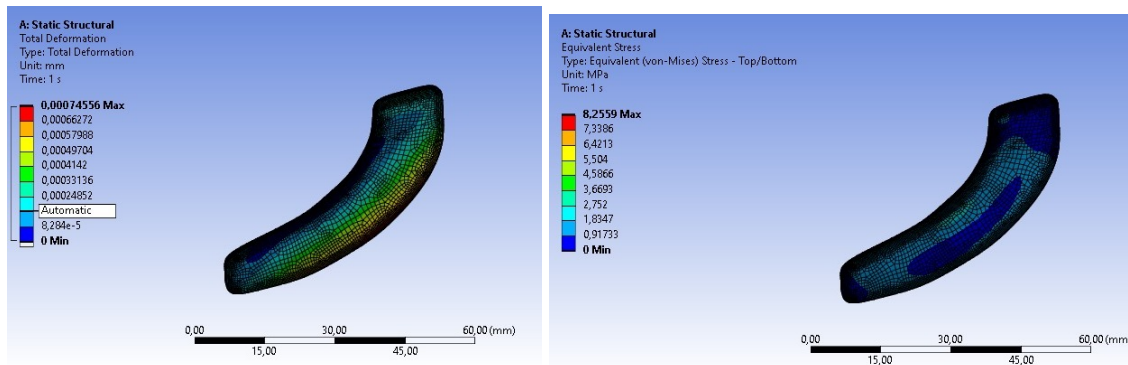


Figura 5.4: Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) no design inicial

Com base nesses resultados, é possível sugerir que haja a remoção de material das regiões de coloração mais escura, tendo em vista que as deformações nessas regiões são quase nulas e não há maiores tensões.

Após realizar a otimização da estrutura para 30%, 50% e 70% da massa inicial, observou-se que visualmente falando não houve alteração significativa na geometria das peças. Os resultados obtidos mostraram que a distribuição de massa ocorreu da região ao redor dos furos, em direção às extremidades.

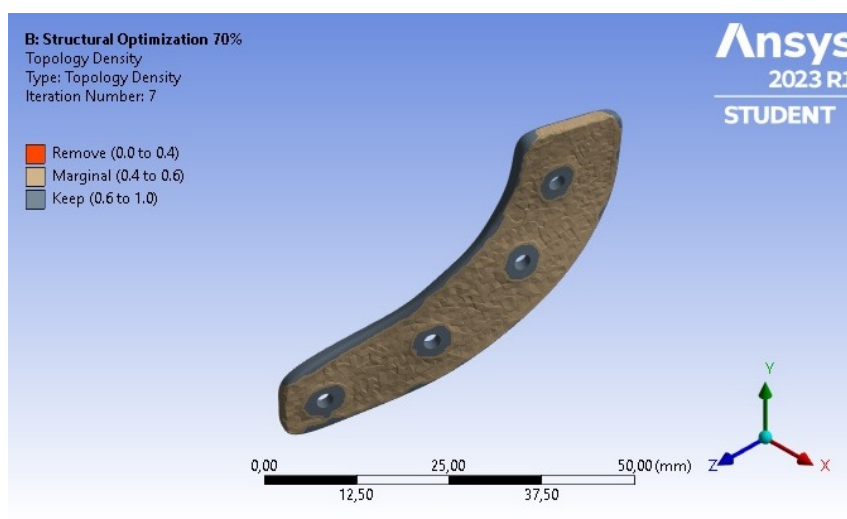


Figura 5.5: Design otimizado gerado pelo Ansys para 70% da massa inicial mantida

A figura 5.5 ilustra o resultado obtido para a estrutura otimizada onde foi mantida 70% da massa inicial. Ao observar a imagem, percebe-se que quase não há alteração visível na estrutura, e a massa redistribuída é relativamente pequena em comparação à massa inicial.

A figura 5.6 mostra o resultado obtido após a redução de 50% da massa inicial, a estrutura obtida mostrou, novamente, pouca alteração visual. No entanto, é possível observar que houve a redução, mesmo que pequena, da área ao redor dos furos de fixação. É possível perceber, também, que não há alteração na parte da prótese que estará em contato com o osso, de modo que, em casos reais, contribui para o encaixe personalizado.

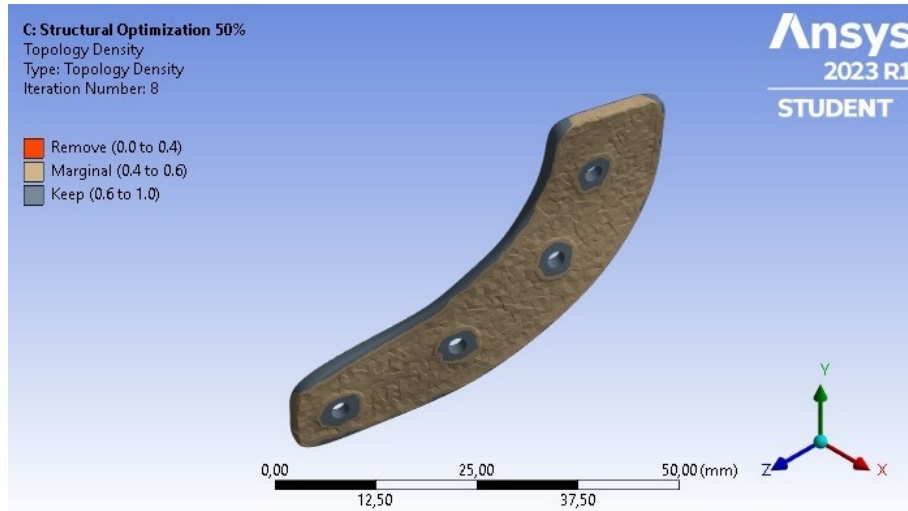


Figura 5.6: Design otimizado gerado pelo Ansys para 50% da massa inicial mantida

Por fim, observando a prótese otimizada para manter apenas 30% da sua massa inicial, o resultado ilustrado pela figura 5.7 tende ao mesmo comportamento verificado na figura 5.6, onde, novamente há pouca alteração visual, e a massa se distribui do centro da prótese para as extremidades, mantendo os furos e o contorno da estrutura os mesmos para que mantenham o design externo e para que possam suportar a carga aplicada. concentra ao redor dos furos e no contorno da estrutura.

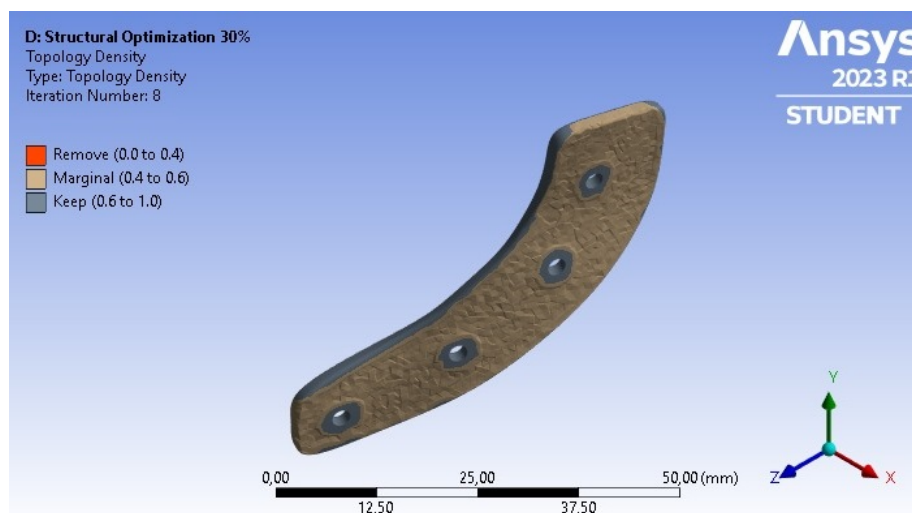


Figura 5.7: Design otimizado gerado pelo Ansys para 30% da massa inicial mantida



Os resultados obtidos pela simulação corresponderam parcialmente aos resultados esperados. Foi possível observar a tendência de distribuição de massa das regiões de menor tensão para as de maior tensão, na qual as regiões ao redor dos furos e o contorno externo foram mantidos.

Por outro lado, esperava-se a formação de regiões internas triangulares, semelhantes a estruturas treliçadas. Essa divergência no resultado pode-se dar devido às condições de contorno, tendo em vista que desejava-se manter o contorno externo sem alterações, e, principalmente, do custo computacional para executar as simulações.

Realizando a verificação dos modelos obtidos para 70%, 50% e 30% da massa inicial retida, foi possível observar que houve pequena variação na tensão equivalente máxima (Von Mises) e na deformação total máxima. Observou-se, também, que ao realizar a importação dos modelos otimizados, o próprio ANSYS suavizou a superfície dos modelos, não sendo necessário realizar correções da geometria antes da etapa de verificação. Os resultados obtidos podem ser visualizados nas figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

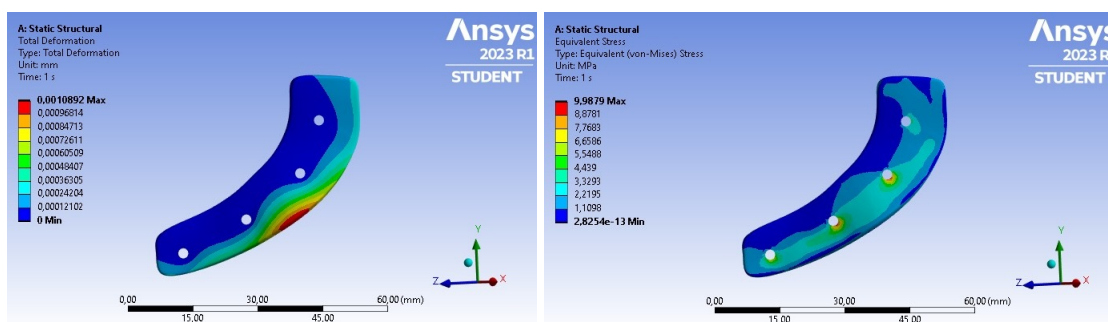


Figura 5.8: Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) com 70% da massa inicial

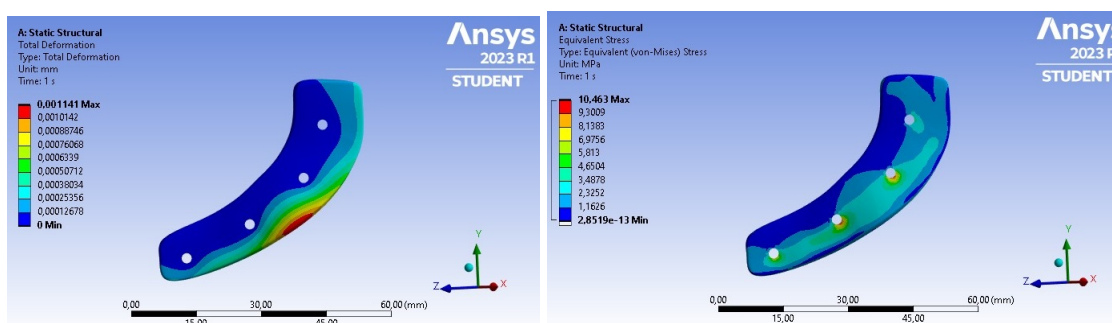


Figura 5.9: Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) com 50% da massa inicial

Conforme já mencionado, os valores de tensão e de deformação não sofreram mudanças significativas. Esse comportamento pode ser justificado pela semelhança entre as geometrias obtidas pelo processo de otimização topológica, e principalmente, pela semelhança na dimensão da área de aplicação de força. A tabela 5.2 mostra a comparação direta das propriedades mecânicas obtidas para o design inicial e para os designs otimizados com as reduções de 30%, 50% e 70% da massa inicial.

Quanto à manufatura dos modelos, com o design obtido pelas simulação, a fabricação

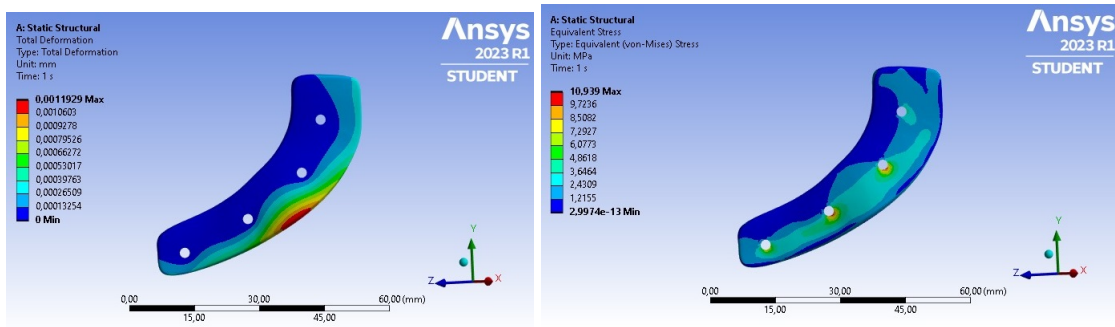


Figura 5.10: Deformação (mm) e Tensão de Von Mises (MPa) com 30% da massa inicial

Tabela 5.2: Comparativo entre tensões e deformações para as diferentes otimizações

Condição	Massa(g)	Deformação total máx. (mm)	Tensão equivalente máx. (MPa)
100% da massa inicial	473,98	0,0010	9,512
70% da massa inicial	331,79	0,0011	9,988
50% da massa inicial	236,99	0,0011	10,463
30% da massa inicial	142,19	0,0012	10,939

por usinagem convencional não é recomendada, principalmente pelos contornos irregulares, demandando um maquinário extremamente preciso e tornando o processo muito mais caro e demorado. Dessa forma, apesar da pouca alteração visual, a redução de massa foi significativa e, dessa forma, favorece a fabricação por meio da manufatura aditiva.

Ao longo do processo de otimização topológica realizado neste trabalho, foram encontradas diversas dificuldades, principalmente em relação ao software utilizado. Foi observado que a versão estudantil do ANSYS limita a discretização da malha, levando à obtenção de resultados não tão precisos. Junto à isso, o ANSYS demanda grande memória computacional, e, se for necessário, o próprio software reduz as iterações no intuito de agilizar o processo, resultando, novamente, em resultados não tão precisos.

Cabe destacar que, devido à baixa alteração visual, neste trabalho não foi realizada alteração dos modelos após o processo de otimização topológica. No entanto, em condições reais de fabricação, visando melhorar principalmente o aspecto de acabamento, para fabricar as peças em questão é necessário reavaliar a peça quanto ao seu formato e, junto a isso, fazer as devidas modificações com base nas espessuras e acabamento, por exemplo.

# Capítulo 6

## Conclusões

De maneira a se atingir o objetivo desse Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, a saber, a otimização estrutural de uma prótese de reconstrução mandibular, foi realizada a otimização topológica de uma prótese genérica, com o objetivo reduzir o peso da mesma.

Ao longo do trabalho foram explorados os conceitos e técnicas de otimização, com foco na otimização topológica. Essa escolha foi realizada com base na característica desse tipo de otimização, permitindo aplicação em diversos tipos de geometria, desde as mais simples, até as mais complexas, de forma a superar as limitações dos métodos tradicionais.

Além disso, o presente trabalho permitiu observar a importância do processo de otimização na obtenção de próteses resistentes, eficientes e econômicas.

Quanto aos resultados obtidos, os mesmos se mostraram promissores, no entanto, conforme observado, a geometria obtida para as porcentagens de massa retida requerem maquinário com extrema precisão e, mesmo assim, não seria viável economicamente usar essas peças. Uma alternativa de fabricação mais viável seria por manufatura aditiva. Ainda assim, seria necessário corrigir alguns aspectos da geometria para tornar o projeto de fato viável, a fim de evitar concentradores de tensão.

Junto a isso, os resultados obtidos a partir da simulação da estrutura exemplo, e principalmente sua interpretação, permitiram aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de graduação, oferecendo uma abordagem sistemática e baseada em dados visando a melhoria do projeto de estruturas.

Conclui-se então, que o estudo da otimização estrutural é importante e relevante na formação do profissional de engenharia. Através da otimização estrutural, é possível obter soluções mais eficientes e sustentáveis, reduzindo o desperdício de materiais e energia, onde a otimização topológica se destaca devido a possibilidade de criar estruturas com geometrias complexas e otimizadas, que seriam difíceis de conceber manualmente.

Somado a isso, o presente estudo mostrou grande importância na indústria de próteses, permitindo o design de próteses personalizadas cada vez mais leves e mais seguras. Sendo

assim, estudo desse tema se torna cada vez mais relevante e promissor para a engenharia e design de produtos.

Cabe ressaltar que, durante a elaboração do trabalho, notou-se uma certa dificuldade para realizar as simulações, principalmente quesito custo operacional. A otimização estrutural utilizando o ANSYS WorkBench<sup>®</sup>, quando aplicada à geometrias complexas, demanda maior memória operacional, tornando necessária a utilização de uma máquina mais robusta e com maior capacidade de processamento.

Junto a isso, verificou-se que a versão *Student* do ANSYS WorkBench<sup>®</sup>, utilizada na elaboração deste trabalho, restringe o refinamento de malha, de modo que para simulações mais precisas, essa versão não é a mais adequada. Ainda, associa-se o fato de que o ANSYS é um software muito caro, não sendo viável para empresas pequenas ou que desejam realizar otimizações de forma esporádica.

Sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros o estudo da otimização estrutural utilizando softwares, preferencialmente, *open sources*, com o objetivo de tornar este processo mais acessível para diversos tipos de empresas e aplicações.

# Referências Bibliográficas

- [AMORIM 2018] AMORIM, B. S. M. (2018). OtimizaÇÃo topolÓgica aplicada a implantes craniofaciais.
- [ANSYS 2023] ANSYS (2023). Ansys workbench. [urlhttps://www.ansys.com/products/ansys-workbench](https://www.ansys.com/products/ansys-workbench).
- [Chen and Liu 2018] Chen, X. and Liu, Y. (2018). *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*. CRC press.
- [CHRISTENSEN and KLARBRING 2009] CHRISTENSEN, P. W. and KLARBRING, A. (2009). *An Introduction to Structural Optimization*. Springer.
- [Corpas and Bonachela 2005a] Corpas, L. d. S. and Bonachela, W. C. (2005a). Avaliação da função mastigatória associada à força de mordida e precepção oral em indivíduos portadores de prótese total.
- [Corpas and Bonachela 2005b] Corpas, L. d. S. and Bonachela, W. C. (2005b). Avaliação da função mastigatória associada à força de mordida e precepção oral em indivíduos portadores de prótese total. Master's thesis, Universidade de São Paulo.
- [COSTA et al. 2010] COSTA, S. M., SOUZA, G. M. C., POLIZZI, R. J., and COSTA, P. R. (2010). Reconstrução da mandíbula. *Rev Bras Cir Craniomaxilofac*, 13:169–174.
- [Fileni and Navarro 2004] Fileni, R. H. and Navarro, H. (2004). Evolução da carga mastigatória em pacientes portadores de próteses parciais sobre implantes osseointegrados: satisfação auto-avaliada por meio de questionário. *RBP Revista Brasileira de Implantodontia Prótese sobre Implantes. Encarte de Excelências Maio em Odontologia: Diagnóstico, Tratamento e Implantodontia*, n. 2, 2004.
- [KIRSCH 1993] KIRSCH, U. (1993). *Structural Optimization - Fundamentals and Applications*. Springer-Verlag.
- [LEUNG 1993] LEUNG, A. (1993). *Dynamic Stiffness and Substructures*. Springer-Verlag.
- [LIU and QUEK 2003] LIU, G. and QUEK, S. (2003). *The Finite Element Method: A practical course*. Elsevier Science.

- [Nóia et al. 2015] Nóia, C. F., Ortega-Lopes, R., Chaves Netto, H. D. d. M., Nascimento, F. F. A., Sá, B. C. M. d., and Moraes, P. H. d. (2015). Desafios na reconstrução mandibular devido a lesões extensas ou traumatismos. *Revista da Associação Paulista de Cirurgias Dentistas*, 69(2):158–163.
- [SILVA 2009] SILVA, E. C. N. (2009). Técnicas de otimização aplicadas no projeto de peças mecânicas.
- [Tavares 2022] Tavares, C. d. S. (2022). Análise computacional da produção de próteses via otimização topológica.
- [Thompson and Thompson 2017] Thompson, M. K. and Thompson, J. M. (2017). *ANSYS mechanical APDL for finite element analysis*. Butterworth-Heinemann.