



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL SANTOS DE SÁ

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA VÁLVULA DE ADMISSÃO

TERESINA, PIAUÍ
2025

GABRIEL SANTOS DE SÁ

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA VÁLVULA DE ADMISSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Oliveira Ferraz de Paiva

Coorientador: Prof. Dr. Petteson Linninker Carvalho Serra

TERESINA, PIAUÍ
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Sá, Gabriel Santos de
S111e Estudo da otimização topológica de uma válvula de admissão / Gabriel
Santos de Sá. - 2025.
42 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2025.
Orientador : Prof Dr. Guilherme Oliveira Ferraz de Paiva.

1. Válvula de admissão . 2. Otimização topológica. 3. Método dos
Elementos Finitos. I.Título.

CDD - 620

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

GABRIEL SANTOS DE SÁ

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA VÁLVULA DE ADMISSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central.

Aprovada em 15/12/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Guilherme Oliveira Ferraz de Paiva(Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Petteson Linninker Carvalho Serra(Coorientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr^e. Gelson de Sousa Alves (Externo)
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

TERESINA, PIAUÍ
2025

Dedico este trabalho à Deus, familiares, amigos e minha namorada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me sustentado e capacitado durante todo esse período da graduação, me guiou e foi meu refúgio nos momentos bons e ruins. À minha família, pelo suporte, criação e ensinamentos, tudo que faço sempre foi pensando em vocês, para poder devolver tudo que já fizeram por mim.

Aos meus amigos de curso, em especial, Jalles Gabriel, José Ribamar, Lázaro Francisco, Otávio Germano e Paulo Roberto pela companhia, parceria, conversas, estudos, trabalhos e pesquisas, vocês tornaram tudo mais leve. Aos professores Edivaldo Feitosa Filho, Guilherme Oliveira, Ricardo Cardoso, Anderson Felipe, Janiel Fontineles, Antônio Ítalo e Petteson Linniker por todo o aprendizado, todos vocês de alguma conforma contribuíram para a minha formação, através dos problemas propostos, aulas, amizades para além da sala de aula, conversas, conselhos, instigando sempre a estudar e pesquisar.

Por fim, ao meu amigo de infância, Tiago, pela amizade e parceria. E à minha namorada, Alice, Deus me abençoou com sua vinda, você é um dos meus motivos para sempre ir atrás dos meus objetivos e ser uma pessoa melhor.

*Preocupado com uma única folha, você não verá a árvore.
Preocupado com uma única árvore, você perderá toda a floresta”.*
Miyamoto Musashi

RESUMO

A indústria automotiva busca continuamente soluções para aumentar a eficiência energética de motores de combustão interna, sendo a redução de peso dos componentes um fator crucial. Este trabalho tem como objetivo realizar a otimização topológica (OT) de uma válvula de admissão, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para reduzir sua massa sem comprometer a integridade estrutural. A modelagem e as simulações numéricas foram desenvolvidas no software Ansys, utilizando as propriedades do aço 4Cr10Si2Mo. O processo de otimização analisou diferentes níveis de retenção de massa, variando de 80% a 20% do volume original. Os resultados demonstraram que o modelo com retenção de 25% de massa foi o mais eficiente, mantendo as tensões abaixo da tensão admissível de 22 MPa e proporcionando uma redução total de massa de 65.2% na válvula, resultando em uma peça final de 5.971 g. Complementarmente, a análise modal indicou frequências naturais entre 0.174 Hz e 6.501 Hz, afastando o risco de ressonância com a frequência de operação do motor (50 Hz). Por fim, a análise econômica evidenciou que a redução de massa proporciona uma economia financeira direta e proporcional na aquisição de matéria-prima, mostrando um potencial industrial a ser explorado do modelo otimizado.

Palavras-chaves: Válvula de admissão; Otimização topológica; Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

The automotive industry is constantly seeking solutions to increase the energy efficiency of internal combustion engines, with weight reduction of components being a crucial factor. This work aims to perform the topological optimization (TO) of an intake valve using the Finite Element Method (FEM) to reduce its mass without compromising structural integrity. The modeling and numerical simulations were developed in Ansys software, using the properties of 4Cr10Si2Mo steel. The optimization process analyzed different levels of mass retention, ranging from 80% to 20% of the original volume. The results demonstrated that the model with 25% mass retention was the most efficient, keeping stresses below the allowable stress of 22 MPa and providing a total mass reduction of 65.2% in the valve, resulting in a final part weighing 5,971 g. Additionally, modal analysis indicated natural frequencies between 0.174 Hz and 6,501 Hz, eliminating the risk of resonance with the motor's operating frequency (50 Hz). Finally, economic analysis showed that the mass reduction provides a direct and proportional financial saving in the acquisition of raw materials, demonstrating an industrial potential to be explored with the optimized model.

Keywords: Intake valve; Topological optimization; Finite Element Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparativo do estado inicial e final do mecanismo.	14
Figura 2 – Exemplificação dos Métodos de Otimização Estrutural.	17
Figura 3 – Exemplo de aplicação da otimização paramétrica.	18
Figura 4 – Exemplo de aplicação da otimização de forma.	19
Figura 5 – Padrão xadrez.	20
Figura 6 – Resultados da topologia: (a) variáveis de projeto de densidade, d ; (b) medidas de densidade, $\bar{\eta}(d)$, e (c) medidas de densidade penalizadas.	22
Figura 7 – Válvula de admissão.	23
Figura 8 – Distribuição de temperatura na válvula de escape.	24
Figura 9 – Modelo inicial e CC para a chapa do Exemplo 1	26
Figura 10 – Topologias obtidas para o exemplo	27
Figura 11 – Inserção das propriedades no <i>Ansys</i>	28
Figura 12 – Condições de contorno do modelo	29
Figura 13 – Interface do <i>Structural Optimization</i>	30
Figura 14 – Regiões de otimização e exclusão.	31
Figura 15 – Transferência para o <i>Design Validation</i>	31
Figura 16 – Aba do componente <i>Modal</i>	32
Figura 17 – Resultados da simulação do modelo (a) Malha automática; (b) Tensão máxima equivalente de Von-Mises.	33
Figura 18 – Resultado da convergência de malha do modelo.	34
Figura 19 – Resultados da otimização topológica após retenção de massa A) 80% massa; B) 70% massa; C) 60% massa; D) 50% massa; E) 45% massa; F) 40% massa; G) 35% massa; H) 30% massa; I) 25% massa; J) 20% massa.	35
Figura 20 – Gráfico Tensão de Von-mises x Redução de massa dos modelos otimizados.	36
Figura 21 – Gráfico Redução de massa x Economia.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (Acrilonitrila Butadieno Estireno)
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CC	Condições de Contorno
ESO	<i>Evolutionary Structural Optimization</i> (Otimização Estrutural Evolucionária)
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
MEF	Método dos Elementos Finitos
OT	Otimização Topológica
SIMP	<i>Solid Isotropic Material with Penalization</i> (Material Isotrópico Sólido com Penalização)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcentagem
q	Vetor de forças nodais internas
K	Matriz de rigidez global
u	Vetor de deslocamentos nodais
f	Vetor de forças nodais equivalentes
σ_{adm}	Tensão admissível
σ_{ϵ}	Tensão de escoamento
η	Medida de densidade da topologia da estrutura
$\bar{\eta}$	Medida de densidade filtrada
ω	Fator de ponderação
$\hat{e}$	Energia de deformação do material
$\tilde{e}$	Energia de deformação incrementada
$\gamma\hat{e}$	Limite inferior de restrição para singularidades
$\tilde{C}$	Tensor de elasticidade
d	Variável de projeto de densidade
E	Módulo de Elasticidade
P	Carga / Força aplicada
p	Fator de penalização (Método <i>SIMP</i>)
u	Vetor de deslocamentos nodais
v	Volume efetivo
V_0	Volume inicial (domínio de projeto)
$\mathbf{X}$	Vetor de coordenadas espaciais
γ	Fator de rigidez mínima para o "vazio"
$\hat{f}^p(\mathbf{d})$	Função de penalização
$\dot{\eta}(\mathbf{X}, \mathbf{d})$	Função de distribuição de densidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	16
3.2	MODELOS DE OTIMIZAÇÃO	17
3.2.1	Otimização paramétrica	18
3.2.2	Otimização de forma	18
3.2.3	Otimização topológica	19
3.3	VÁLVULA DE ADMISSÃO	22
4	METODOLOGIA	26
4.1	VERIFICAÇÃO	26
4.2	PROPRIEDADES DO MODELO	27
4.3	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS ESTÁTICAS	28
4.4	ANÁLISE DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	29
4.5	ANÁLISE MODAL	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA	33
5.2	RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	34
5.3	RESULTADO DA ANÁLISE MODAL	36
5.4	ANÁLISE ECONÔMICA	37
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	39
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
6.2	TRABALHOS FUTUROS	39
	Referências	41

1 INTRODUÇÃO

A Otimização Topológica (OT) emergiu como um campo promissor na engenharia estrutural a partir da década de 1980, impulsionada pela necessidade de maximizar a eficiência de materiais em projetos complexos. Seu desenvolvimento teórico foi consolidado por pesquisadores como Bendsøe e Kikuchi (1988), que propuseram o método de homogeneização, permitindo a distribuição ótima de material em um domínio de projeto considerando restrições e carregamentos específicos. Essa abordagem inovadora surgiu em resposta às demandas industriais por leveza e resistência, especialmente em setores como o aeroespacial e automotivo, onde a redução de peso sem comprometer a integridade estrutural, é crítica.

Originalmente desenvolvida para resolver problemas de elasticidade linear, a OT rapidamente se expandiu para outras áreas, como aeronáutica, aeroespacial e automotiva, graças à sua capacidade de gerar geometrias orgânicas e altamente eficientes, onde há grande necessidade de uma menor massa e economia de materiais para eficiência e custo, muitas vezes contra-intuitivas para métodos tradicionais (Oktay; Akay; Sehitoglu, 2014). Esse avanço foi impulsionado pela integração com o Método dos Elementos Finitos (MEF), que permite discretizar o domínio de projeto em elementos menores, permitindo avaliar tensões, deformações e outros parâmetros críticos para iterar em direção a uma solução otimizada (Soriano, 2003).

Na otimização de peças mecânicas, a técnica permite identificar regiões de um componente onde o material é redundante, substituindo-o por vazios ou padrões de microestruturas (Batista; Brant; Vimieiro, 2012). Isso resulta em projetos mais leves, energeticamente eficientes e com desempenho superior. Trovato, Perquoti e Cicconi (2023), por exemplo, trabalhando com bielas de motores, reduziram em aproximadamente 21,8% do volume original e em 56,1 % do peso total da biela, ajustando tensões e deslocamentos conforme as exigências do projeto, utilizando OT. Essa abordagem não apenas otimiza o desempenho estrutural, mas também viabiliza a criação de *designs* inovadores. Se a OT for realizada sem levar em consideração as questões de fabricação, estruturas muito atraentes podem ser produzidas, porém, com um alto grau de complexidade para sua confecção (Vanderplaats, 2006).

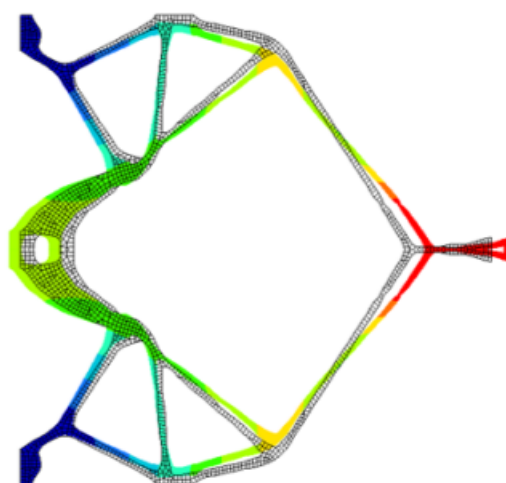
A aplicação prática da OT pode ser feita por meio de *softwares* especializados que integram algoritmos avançados, simulações via MEF e critérios de fabricação. As aplicações utilizando o MEF tem se destacado nos ultimos anos devido à praticidade de modelagem e geração de malha, como pode ser observado no trabalho de Sirio (2022), onde nesse estudo foi conduzido sobre a análise de vida em fadiga e OT de uma ponta de eixo dianteira do jipe *Stark* por meio do MEF. Nas simulações o maior resultado para tensão foi de 165 MPa, o deslocamento foi 0.12407 mm e um fator de

segurança para fadiga de 1.5. Com base nisso, o autor realizou otimizações no eixo e alcançou uma redução de massa de 1291.201 g para 1152.8 g, um percentual de 11% em comparação com a peça original.

Rocha e Trindade Júnior (2023) compararam a resistência mecânica à compressão de peças cilíndricas impressas em ABS, produzidas por otimização topológica com diferentes níveis de refinamento da malha, em relação à corpos não otimizados, porém com preenchimentos variados e reduções de massa semelhantes. Os corpos com paredes externas de três camadas ou menos apresentaram as menores resistências, sugerindo que o número de camadas externas afeta a resistência à compressão.

Por fim, Teixeira (2022) modelou um mecanismo flexível utilizando o *software Altair Hyperworks Student* aplicando a metodologia de OT para análises, otimização e simulação de resultados. O autor conseguiu, ao final do trabalho, atender as restrições impostas, eliminando drasticamente a densidade, volume e espessura do mecanismo. O resultado do seu trabalho pode ser visto na Figura 1, onde os contornos em preto referem-se a estrutura no estado inicial, indeformada.

Figura 1 – Comparativo do estado inicial e final do mecanismo.



Fonte: (Teixeira, 2022)

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo aperfeiçoar uma válvula de admissão utilizando otimização topológica por meio do método dos elementos finitos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificação da OT do *Ansys*;
- Redução da massa da válvula, mantendo sua resistência mecânica;
- Verificação da segurança estática e modal da peça;
- Realizar uma simples análise econômica do potencial da OT;

2.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa está dividida em seis capítulos, sendo o capítulo 1 a introdução ao assunto estudado, o capítulo 2 dedicado aos objetivos geral e específicos da pesquisa. O capítulo 3 apresenta uma fundamentação teórica sobre o Método dos Elementos Finitos, Modelos de Otimização e Válvula de Admissão. O capítulo 4 apresenta a metodologia adotada para a realização do trabalho, passando por uma verificação da otimização topológica do *Ansys*, inserção das propriedades do modelo, análise estática, topológica e modal do problema. O capítulo 5 apresenta os resultados das análises e discussões sobre os dados obtidos. Por fim, o capítulo 6 discorre sobre as considerações finais sobre o trabalho e a sugestão de trabalhos futuros.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nas seções a seguir serão abordados a fundamentação de MEF (3.1), aspectos da OT (3.2) e uma breve descrição sobre válvula de admissão (3.3).

3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O MEF surgiu do trabalho conjunto de engenheiros aeronáuticos como Turner, Argyris e seus colegas no final dos anos 1950. Sua criação foi impulsionada pela análise matricial de estruturas, aliada ao avanço dos primeiros computadores e fundamentada no Princípio dos Deslocamentos Virtuais (Soriano, 2009).

É um método geral de discretização de problemas físicos contínuos, com a finalidade de obter soluções aproximadas do modelo matemático inicial (Zienkiewicz, 2005). A maioria dos modelos matemáticos contínuos apresentam alta complexidade, logo, a resolução analítica costuma oferecer grandes dificuldades, ou até mesmo ser impossível. Isso torna os modelos discretos mais vantajosos. Para obter uma solução completa as condições de compatibilidade de deslocamento e de equilíbrio devem ser satisfeitas. E, uma vez resolvidas, o problema estrutural estará determinado. Após isso, as forças internas nos elementos e deformações podem ser encontradas para cada elemento.

Se as condições de equilíbrio de um nó típico, a , são estabelecidas, a soma das componentes de forças que contribuem para a convergência dos elementos será simplesmente acumulada. Então, considerando todas as componentes de força tem-se que

$$\sum_{e=1}^m q_a^e = q_a^1 + q_a^2 + \dots = 0 \quad (3.1)$$

onde q_a^1 é a força contribuída para o nó a pelo elemento 1, q_a^2 pelo elemento 2, etc. A equação de equilíbrio pode ser escrita da seguinte forma:

$$\mathbf{q}^1 = \mathbf{K}^1 \mathbf{u}^1 + \mathbf{f}^1 \quad (3.2)$$

Substituindo as forças que contribuem para o nó a da equação 3.2 e observando que as variáveis nodais u_a são comuns, obtém-se a equação 3.3:

$$\left(\sum_{e=1}^m \mathbf{K}_{a1}^e \right) \mathbf{u}_1 + \left(\sum_{e=1}^m \mathbf{K}_{a2}^e \right) \mathbf{u}_2 + \dots + \sum_{e=1}^m \mathbf{f}_i^e = 0 \quad (3.3)$$

Compactando a equação 3.3, chega-se:

$$\mathbf{K} \mathbf{u} + \mathbf{f} = 0 \quad (3.4)$$

em que as submatrizes são:

$$\mathbf{K}_a \mathbf{b} = \sum_{e=1}^m \mathbf{K}_a \mathbf{b}^e \text{ e } \mathbf{f}_a = \sum_{e=1}^m \mathbf{f}_a^e \quad (3.5)$$

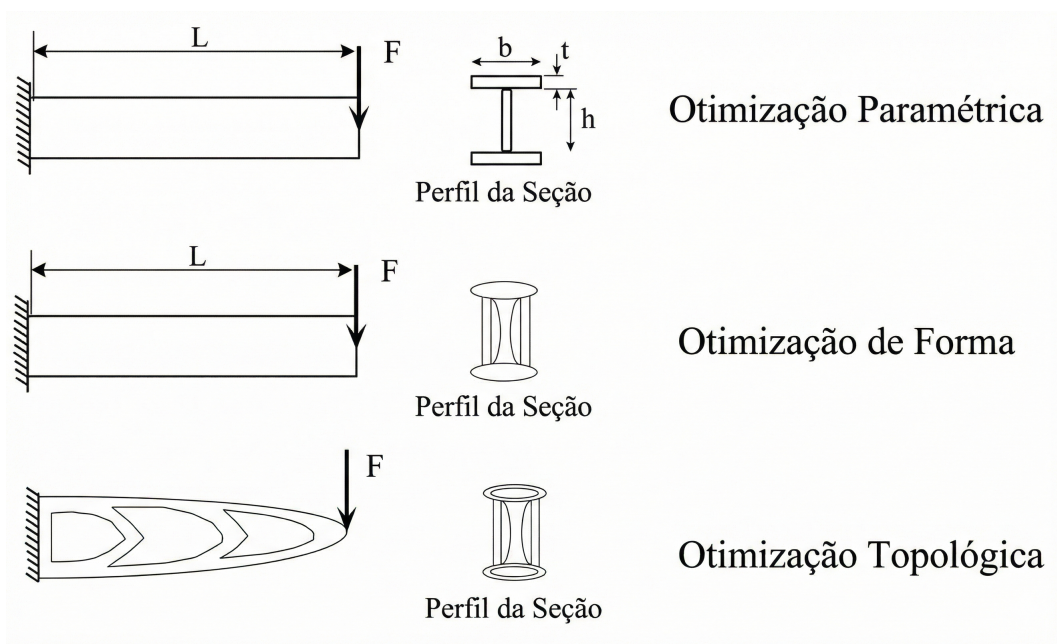
3.2 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

De acordo com Martinez e Santos (1995), a otimização é uma ferramenta matemática de ampla aplicação prática, cujo objetivo é determinar os valores mínimos ou máximos de funções multivariadas dentro de limites definidos em um espaço multidimensional. Os autores destacam que essa metodologia é essencial para processos decisórios em diversos setores, desde a engenharia até a gestão, onde a complexidade das situações exige soluções precisas.

Neste contexto, a modelagem surge como uma etapa crítica, traduzindo fenômenos empíricos em estruturas matemáticas por meio da definição de variáveis, restrições e objetivos – processo que estabelece isomorfismos entre a realidade concreta e abstrações teóricas (Arantes; Rodrigues, 2023), entretanto, os autores ressaltam que simplificações, erros de interpretação e limitações conceituais são inevitáveis.

Com ênfase na otimização estrutural, segundo Saitou *et al.* (2005), são relevantes três metodologias de otimização: a paramétrica, a de forma e a topológica. Os três modos podem ser vistos na Figura 2:

Figura 2 – Exemplificação dos Métodos de Otimização Estrutural.

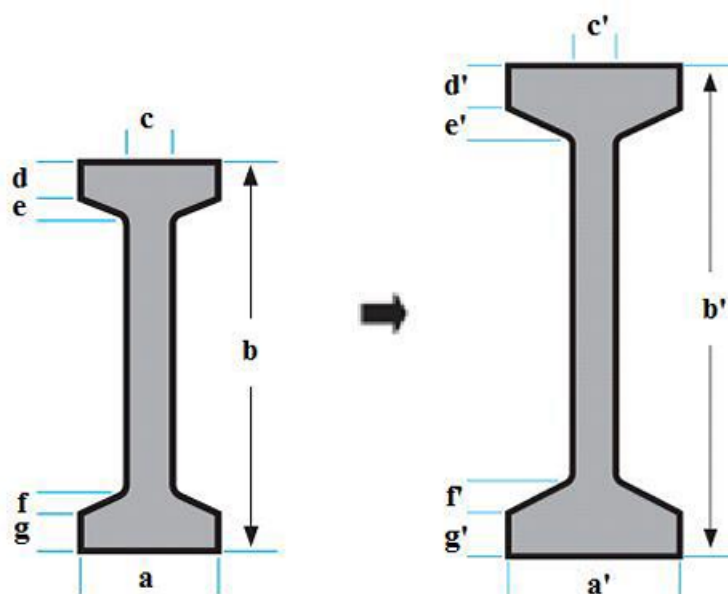


Fonte: (Presente, 2018)

3.2.1 Otimização paramétrica

Assume-se uma forma pré-definida para a estrutura, como uma viga em "I", por exemplo. São escolhidas como variáveis de projeto algumas medidas (ou razão entre as medidas) que caracterizam a geometria dessa estrutura. A otimização paramétrica tem como pressuposto justamente a definição dessas variáveis (dimensões ou proporção das dimensões da estrutura, preservando-se a forma original) para a busca do ótimo. Portanto, o problema é resolvido em função dos parâmetros (Ávila, 2020). Em seguida, determinam-se os valores ótimos das variáveis que fornecem a maior rigidez para a restrição de material. As dimensões são geralmente o comprimento dos elementos da estrutura e/ou as dimensões do perfil da seção transversal, como ilustra a Figura 3:

Figura 3 – Exemplo de aplicação da otimização paramétrica.



Fonte: (Alba; Ávila; Shzu, 2015)

Embora, em geral, produza resultados menos significativos no que diz respeito à redução de material quando comparado a outros métodos de otimização (sejam eles de forma ou topológica), o método de parametrização em compensação oferece uma estrutura mais simples e uma menor demanda computacional (Alba; Ávila; Shzu, 2015).

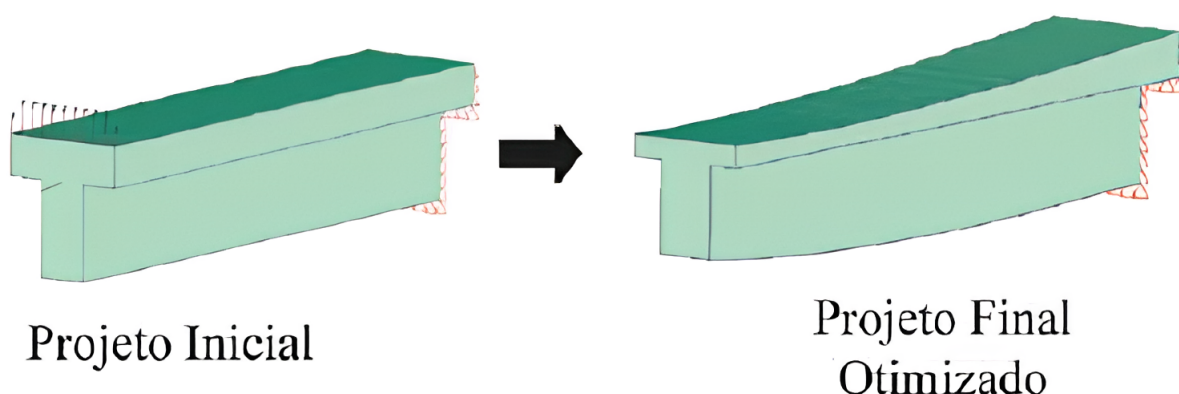
3.2.2 Otimização de forma

Almeja identificar a geometria mais eficiente para um componente ou estrutura, adaptando-a às necessidades técnicas. Os contornos externos da estrutura são parametrizados por curvas *splines*, cujos parâmetros (como coeficientes que definem

essas curvas) constituem as variáveis de projeto. Esses parâmetros ajustáveis podem variar desde pontos específicos no contorno da peça até valores matemáticos capazes de representar sua silhueta com precisão (Silva, 2009). Em seguida, determinam-se os valores ótimos desses parâmetros, gerando a forma que minimiza a flexibilidade estrutural para a restrição de material imposta.

Como resultado da busca por soluções otimizadas, é comum que formas complexas surjam durante o processo. Para analisar essas geometrias com precisão, o MEF torna-se indispensável. Entretanto, um desafio recorrente nesse tipo de otimização é a necessidade de reconstruir a malha de elementos finitos a cada ajuste na forma, o que pode impactar a eficiência e a praticidade do processo. A Figura 4 exemplifica um caso prático dessa abordagem, exibindo a geometria de uma viga em 'T' engastada após ser submetida a esforços em sua extremidade livre.

Figura 4 – Exemplo de aplicação da otimização de forma.



Fonte: (Presente, 2018)

3.2.3 Otimização topológica

A última abordagem que pode ser utilizada neste problema consiste em encontrar a distribuição ótima de aberturas na estrutura que minimize a flexibilidade considerando a restrição de material. As variáveis de projeto podem ser, por exemplo, a distribuição de material em cada ponto do domínio. Abordagem, denominada de otimização topológica, sendo o método de otimização mais genérico aplicado e o que resulta na maior remoção de material da estrutura (Tang *et al.*, 2024).

A OT é suscetível a instabilidades numéricas (Sigmund; Petersson, 1998). Esses fenômenos são observados em padrões xadrez computacionalmente gerados, que surgem quando densidades intermediárias de material são penalizadas (observado na Figura 5), em topologias distintas resultantes de refinamento de malha e na presença

de múltiplos mínimos locais no espaço de projeto. Essas questões são resolvidas pela definição de uma medida de densidade que tende a regularizar o problema de topologia.

Figura 5 – Padrão xadrez.



Fonte: (Bruns; Tortorelli, 2001)

Uma variável de projeto de densidade d_i (componente i do vetor de variáveis de projeto $\mathbf{d}$) variando de material sólido, ou seja, $d_i = 1$, a vazio, em que, $d_i = 0$, é atribuída a cada elemento finito i pelo algoritmo de otimização para satisfazer o objetivo desejado. Uma medida de densidade $\bar{\eta}$ é atribuída a cada elemento finito e é definida como uma função das variáveis de projeto de densidade $\mathbf{d}$, ou seja, $\bar{\eta} = \bar{\eta}(\mathbf{d})$. A variação no campo da medida de densidade η representa a topologia da estrutura. A distribuição de densidade do material é introduzida na otimização da topologia definindo a função de energia de deformação como o produto onde $\hat{e}$ é a função de energia de deformação do material que será usado para construir a estrutura e $\tilde{e}$ é a função de energia de deformação que será usada nos cálculos. Como observado na Eq. 3.6:

$$\tilde{e}(\mathbf{E}(\mathbf{X}, \mathbf{d}), \mathbf{X}, \mathbf{d}) = (\gamma + (1 - \gamma)\bar{\eta}^p(\mathbf{d})) \hat{e}(\mathbf{E}(\mathbf{X}, \mathbf{d}), \mathbf{X}) \quad (3.6)$$

Um limite inferior $\gamma\hat{e}$ em $\tilde{e}$ é usado para os cálculos para eliminar as singularidades que de outra forma surgiriam na análise de elementos finitos quando regiões de material vazio, ou seja, regiões onde $\bar{\eta} = 0$, aparecem conforme a otimização progride. O parâmetro de penalidade $p \geq 1$ penaliza densidades intermediárias de material (os valores de $\bar{\eta}$ entre 0 e 1) taxando progressivamente a capacidade de carga da estrutura devido às densidades intermediárias para um volume efetivo igual v .

Ele é incrementado ao longo da otimização por meio de um método de continuação para evitar a convergência prematura para mínimos locais, um benefício adicional do método de continuação é que a distorção bruta da malha é evitada nos estágios iniciais da otimização quando a estrutura ainda não é ótima e, portanto, não é muito rígida (Oliveira, 2024). Para um material de St. Venant-Kirchhoff, a densidade do material aparece como uma ponderação do tensor de elasticidade $\tilde{\mathbf{C}}$ que é usado nos cálculos, ou seja,

$$\tilde{\mathcal{C}}(\mathbf{X}, \mathbf{d}) = \left\{ \gamma + (1 - \gamma) \hat{f}^p(\mathbf{d}) \right\} \mathcal{C}(\mathbf{X}). \quad (3.7)$$

Para restringir a quantidade de material disponível que pode ser usado na estrutura, define-se o volume efetivo, correspondente ao domínio de projeto V_0 , como:

$$v(\mathbf{d}) = \int_{V_0} \dot{\eta}(\mathbf{X}, \mathbf{d}) \, dv, \quad (3.8)$$

Nota-se, nesse caso, a dependência dos campos em X . Dessa forma, a combinação da ponderação penalizada da função de energia de deformação pela medida de densidade para um volume fixo de material direciona a otimização da topologia para projetos sólidos e vazios.

Para definir a medida de densidade, $\bar{\eta}(d)$, é utilizada uma técnica de filtragem. Dessa forma, $\bar{\eta}(d)$ para o elemento i é definida por uma distribuição ponderada das densidades dos elementos sobre a região circundante. Portanto, as variáveis de projeto de densidade d são determinadas por meio da otimização na qual a composição estrutural é determinada por $\bar{\eta}$ e pelas Eqs. 3.6 ou 3.7. Para cada elemento i , o kernel de filtragem ω_j é baseado na distância dos centroides do elemento j circundante (x, y) dentro de um raio fixo r independente da malha do centroide do elemento i , (x_i, y_i) . Então, utiliza-se uma distribuição ponderada independente da malha que varia linearmente com a distância r , embora outros filtros possam ser implementados.

$$\bar{\eta}(\mathbf{d}) = \sum_j \frac{\omega_j}{\omega} d_j, \quad (3.9)$$

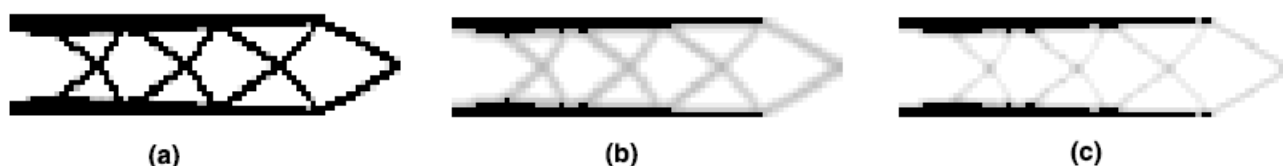
$$\omega_j = \max \left(1 - \frac{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}{r}, 0 \right), \quad (3.10)$$

$$\omega = \sum_j \omega_j, \quad (3.11)$$

A vantagem dessa abordagem é que a "regularização" é acomodada diretamente, sem impor restrições adicionais de declive ou perímetro no problema de otimização. A desvantagem da abordagem é que a composição estrutural é determinada pela medida de densidade e não pelas variáveis de projeto de densidade. Consequentemente, o resultado da otimização não é prontamente interpretado pela variável de densidade d_i , mas deve ser obtido a partir da função $\bar{\eta}$.

Felizmente, os resultados fornecidos diretamente por d , $\bar{\eta}(d)$ e $\bar{\eta}^p(d)$ são topologicamente equivalentes, como mostrado na Fig.6. A distribuição do material na Fig.6(a) e (b) é consistente com a restrição de volume, e o efeito da densidade de energia de deformação penalizada na distribuição do material é refletido na Fig.6(c).

Figura 6 – Resultados da topologia: (a) variáveis de projeto de densidade, d ; (b) medidas de densidade, $\bar{\eta}(d)$, e (c) medidas de densidade penalizadas.



Fonte: (Bruns; Tortorelli, 2001)

Uma observação geral sobre o objetivo original do projeto se justifica porque o objetivo da maioria das otimizações topológicas é gerar projetos com material sólido distinto, ou seja, $\bar{\eta} = 1$, e regiões vazias, ou seja, $\bar{\eta} = 0$. Na prática, no entanto, o custo de impor restrições à variação do campo de distribuição de densidade de material contínuo é que densidades intermediárias invariavelmente aparecem. Portanto, algum meio de interpretar, ou seja, pós-processar, as topologias resultantes é necessário. Na literatura, existem vários métodos empregados para pós-processar os resultados.

O método empregado neste trabalho é o *SIMP* (*Solid Isotropic Material with Penalization*). O *SIMP* define a densidade de cada ponto do domínio em função da propriedade efetiva do material base, simulando essencialmente uma microestrutura. O domínio do projeto é discretizado em elementos finitos, e a rigidez de cada elemento é determinada a partir de uma variável de densidade artificial (Rezende *et al.*, 2022).

3.3 VÁLVULA DE ADMISSÃO

No motor de combustão interna, há um mecanismo responsável por facilitar a entrada periódica de ar do ambiente e a saída dos gases resultantes da queima, além de garantir que a câmara de combustão esteja vedada de forma eficiente quando necessário. Nos motores de quatro tempos, as válvulas desempenham essa função (Van Basshuysen; Schäfer, 2004).

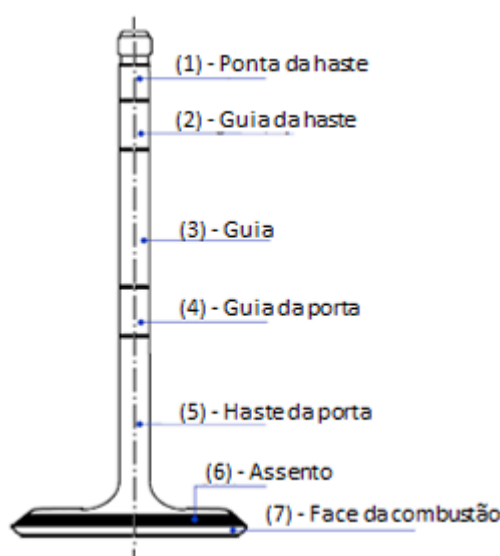
O mecanismo de controle de válvulas é concebido para que cada válvula seja aberta, permaneça assim por um período específico e feche no momento apropriado. Esta dinâmica permite uma adequada entrada da mistura gasosa e a completa eliminação dos gases resultantes da combustão. É crucial enfatizar que esta operação deve ser exata em todos os diferentes regimes de rotação do motor (Taylor, 1988).

Ao passarem pela válvula, os gases sofrem uma limitação do fluxo, que pode ser um dos comportamentos mais relevantes do sistema. Nesta etapa, o fluxo pode ser descrito como turbulento, instável, altamente comprimido, não isotérmico e transônico, dependendo da abertura da válvula (Wang *et al.*, 2013).

As válvulas devem resistir a altas temperaturas e pressões, devido à sua

interação direta com as reações exotérmicas do combustível-ar. A expansão térmica desses elementos se apresenta como um problema intrínseco à sua operação. Isso ocorre pois, após a dilatação, a válvula pode não se encaixar adequadamente no interior do assento da válvula, local onde deve haver uma vedação adequada da câmara de combustão. Ademais, quanto maior for a abertura do assento da válvula, menores serão as perdas de pressão decorrentes da alta velocidade do fluxo dos gases de entrada e saída (Sequenzia *et al.*, 2011). Na Figura 7 a seguir, é possível ver o esquema da representação de uma válvula de admissão.

Figura 7 – Válvula de admissão.



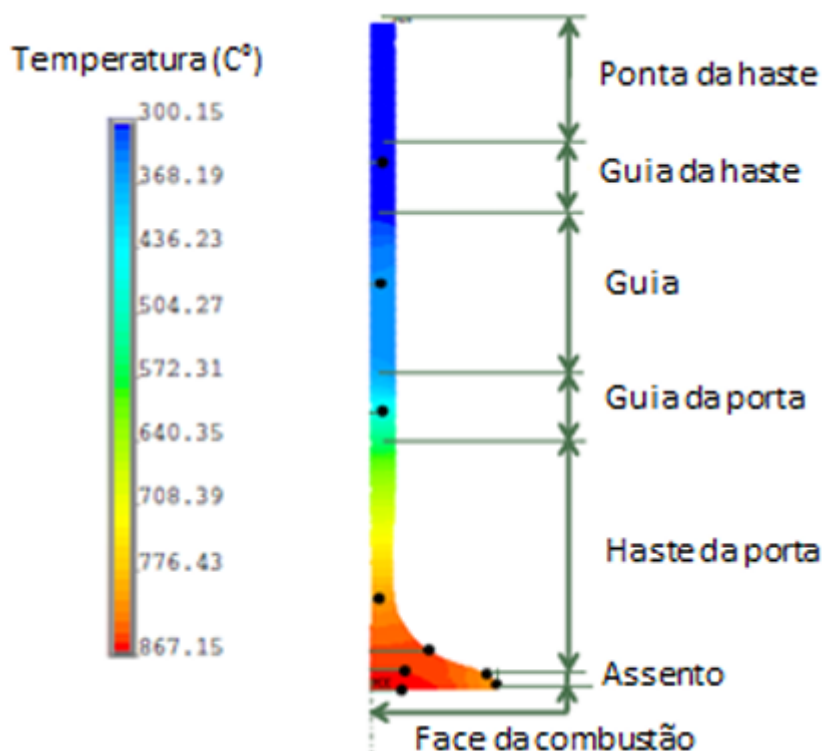
Fonte: (Wang *et al.*, 2013)

As válvulas de entrada suportam uma carga térmica reduzida, já que são constantemente resfriadas pelo ar atmosférico durante o processo de admissão, o que pode justificar um tamanho maior. Isso não se aplica às válvulas de exaustão, que são capazes de atingir 867 °C. Os gases de escapamento as aquecem mais, resultando, assim, numa maior dilatação térmica. Assim, as válvulas de exaustão devem ser menores para atenuar os efeitos da dilatação e reduzir os concentradores de tensões (Barros, 2003).

No entanto, as válvulas de admissão e escape desempenham um papel crucial em motores, uma vez que controlam o fluxo de gases que saem e entram no cilindro. Além disso, elas estão sujeitas a elevadas cargas térmicas e tensões devido às altas pressões e temperaturas no interior do cilindro. A Figura 8 apresenta o diagrama de distribuição de temperatura na válvula de escape, onde o calor gerado pela combustão passa pela superfície da válvula em contato com a combustão e é transferido para o corpo da peça por meio de um fluxo de calor intenso. Isso resulta em uma distribuição de

temperatura irregular na válvula devido à não uniformidade na carga térmica (Cerdoun; Carcasci; Ghenaiet, 2016).

Figura 8 – Distribuição de temperatura na válvula de escape.



Fonte: Adaptado de (Cerdoun; Carcasci; Ghenaiet, 2016)

As demandas constantes por aprimoramentos térmicos no motor de combustão interna levam a condições de trabalho cada vez mais desgastantes para diversos componentes do motor, especialmente para as válvulas de escape e, de forma mais leve, para a válvula de admissão, respectivamente. No entanto, realizar pesquisas com este tipo de peça não é trivial (Mavropoulos; Rakopoulos; Hountalas, 2009).

Quando a válvula está fechada, o assento dela recebe cargas resultantes da força da mola e da pressão interna do cilindro. A válvula é a principal dissipadora de calor, principalmente devido à superfície de contato entre o assento e o cabeçote, onde a temperatura é mais distribuída. Assim, um contato impróprio pode causar deformações na válvula e no assento, resultando em sua destruição.

Em contrapartida, quando a válvula se encontra aberta, devido à alta velocidade e turbulência dos gases, ocorre uma troca térmica entre a válvula e os gases, e destes para o bloco e o cabeçote do motor, resultando no resfriamento da peça (Finol; Robinson, 2006).

Nesta pesquisa será realizada apenas a análise estática da peça, desconsiderando as influências térmicas. (Zade, 2016) adotou procedimento semelhante, também

analisando uma válvula. O autor realizou uma otimização no raio dos chanfros da base da válvula e também variou os materiais. Os raios variaram de 0 a 9 mm, os materiais utilizados foram o *Carbon Steel-70*, *21-2N* e *AISI 1541*. Para a simulação, o autor tornou fixa a ponta da haste e aplicou uma força de 1391.78 N na face da combustão. Os resultados apontaram o valor otimizado do raio de chanfro de 14 mm, o material *AISI 1541* apresentou uma menor tensão (23,74 %) em comparação ao *21-2N* e que a redução total da tensão foi de 40,78%.

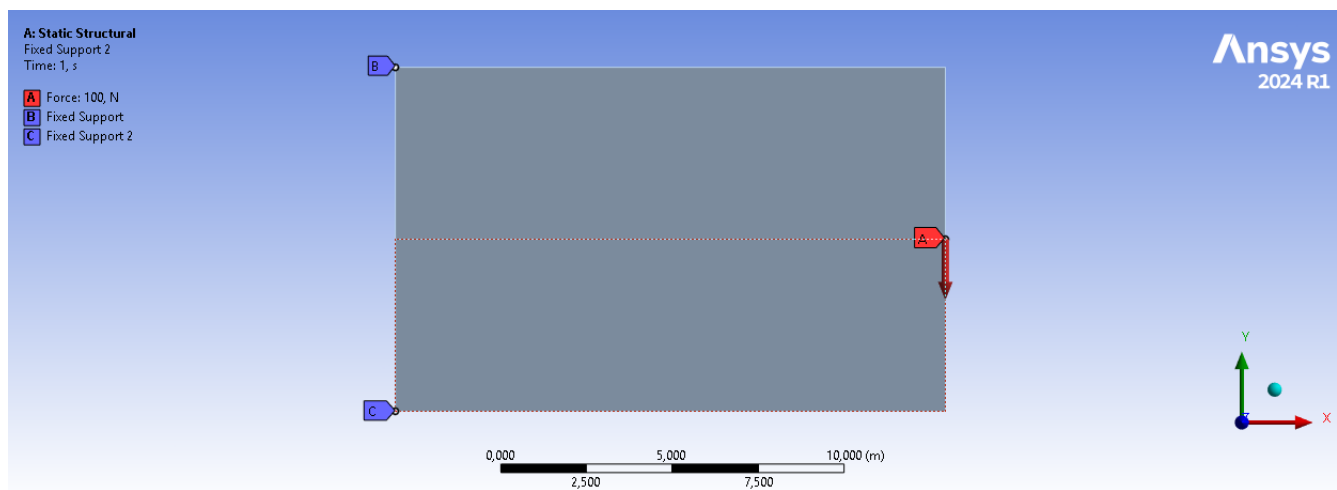
4 METODOLOGIA

Nessa seção serão abordados os procedimentos que nortearam esta pesquisa.

4.1 VERIFICAÇÃO

Buscando verificar a OT gerada pelo *Ansys*, foi analisado o problema analisado por Kim *et al.* (2002). O domínio inicial de projeto é realizado por uma chapa de dimensões 160 mm x 100 mm e espessura de 1 mm, carregada por uma força $P = 100$ N e vinculada conforme a Figura 9. As propriedades do material são módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0.30.

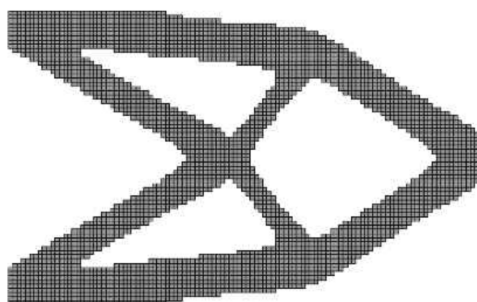
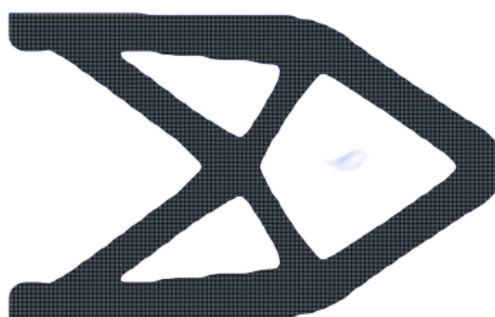
Figura 9 – Modelo inicial e CC para a chapa do Exemplo 1



Fonte: Autor

O autor definiu uma malha com um total de 7840 elementos e otimização para um volume de 40% do volume original. Os resultados da topologia obtida pelo autor e o do presente trabalho estão representados na Figura 10.

Figura 10 – Topologias obtidas para o exemplo

a) Topologia alcançada por Kim *et al.* (2002)

b) Topologia alcançada no presente trabalho

Fonte: Autor

Observa-se que, topologicamente, o resultado convergiu para uma solução geométrica muito semelhante à referência, caracterizada por dois braços principais de sustentação e um contraventamento central em formato de 'X'. As diferenças estruturais devem-se ao fato de que o método utilizado pelo autor é o *ESO* (*Evolutionary Structural Optimization*), que remove elementos inteiros da malha, gerando contornos discretos, enquanto o *Ansys* utiliza o método *SIMP*, que penaliza densidades intermediárias, gerando contornos mais suaves (Van *et al.*, 2022).

Quantitativamente, o autor obteve um volume final de 37.2% e uma tensão de Von-Mises média de 8.26 MPa. Já no presente trabalho, obteve-se um volume de 40.9% e uma tensão média de 8.14 MPa. A proximidade dos valores, especialmente a diferença de apenas 1.45% entre as tensões, confirma que o modelo numérico do *Ansys* reproduz com fidelidade o comportamento físico e mecânico do problema, validando a metodologia a ser aplicada no estudo.

4.2 PROPRIEDADES DO MODELO

É possível dentro do *software* escolher materiais prontos ou criar modelos e adicionar manualmente as propriedades através da *Engineering Data*.

Figura 11 – Inserção das propriedades no Ansys.

	A	B	C	D	E
	Property	Value	Unit		
1	Material Model Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
8	Young's Modulus	200	GPa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
20	S-N Curve	Tabular			
24	Tensile Yield Strength	250	MPa		
25	Compressive Yield Strength	250	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	460	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	MPa		

Fonte: Autor

Para o material da válvula analisada no presente trabalho, 4Cr10Si2Mo, suas propriedades foram colocadas no Ansys e estão presentes na Tabela 1. Como no catálogo do material há poucas informações fornecidas pelo fabricante chinês. Portanto, foi adotado o módulo de elasticidade padrão para os aços de 210 GPa:

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do 4Cr10Si2Mo

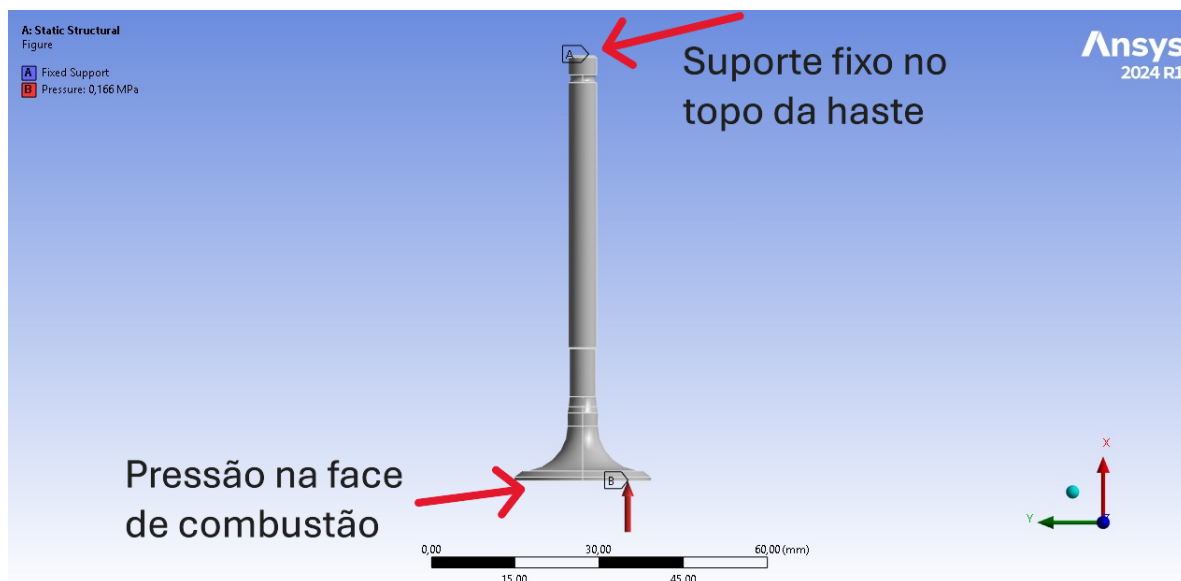
Propriedades	Valores	Unidade
Densidade	6992	kg/m ³
Módulo de Young	210	GPa
Tensão de escoamento	154	MPa
Resistência última à tração	231	MPa

Fonte: (Steel Grades, 2025).

4.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS ESTÁTICAS

Todas as análises estáticas do modelo seguiram as mesmas CC. Simulando o momento em que há total admissão de ar e que o válvula chegou no máximo ponto superior, foram colocados um suporte fixo no topo da válvula (A) e uma pressão agindo na face de combustão (B), como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Condições de contorno do modelo

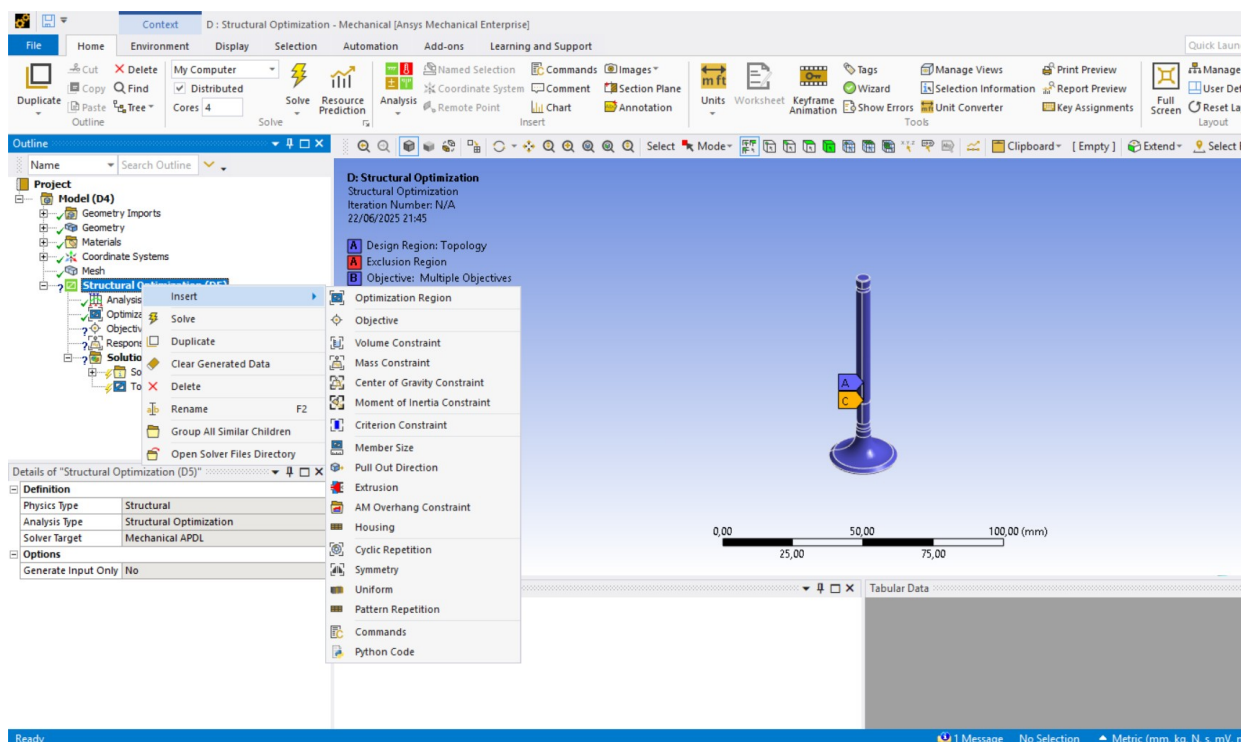


Fonte: Autor

O valor da pressão que atua na face de combustão (B) foi de 0.166 MPa, valor esse retirado do trabalho de Passos (2017). Nele o autor realizou análises de desempenho de um motor de combustão interna de uma motocicleta, onde, para o momento de admissão de ar encontrou por meio de instrumento de coleta de dados o valor da pressão utilizada no trabalho.

4.4 ANÁLISE DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Por fim, ao finalizar as simulações iniciais do modelo e definir as condições de contorno, o próximo passo está presente na ferramenta *Structural Optimization*, nativa e implementada dentro do *Ansys*, utiliza alguns modos de OT, dentre eles, o *SIMP* que foi adotado para o presente trabalho. Através dela realizou-se a OT do modelo. Sua interface pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 – Interface do *Structural Optimization*.

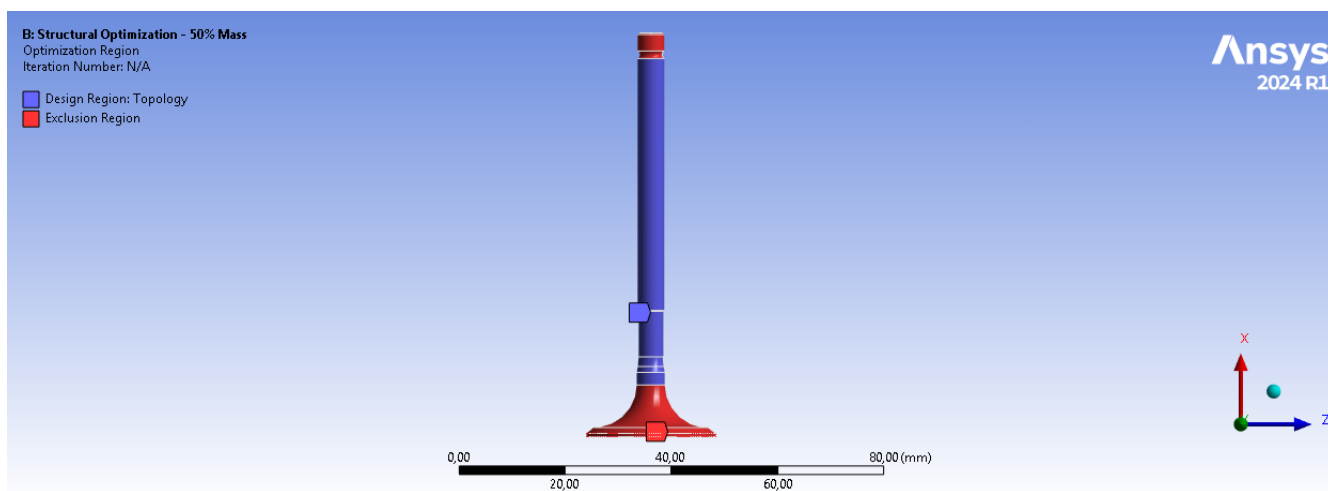
Fonte: Autor

A importância da definição anterior das condições de contorno se dá porque definem quais partes do modelo não farão parte da análise, e quais serão parte da região de design e objetivo.

Definido o *Objective* (áreas do modelo que farão ou não parte da simulação), é inserida a *Response Constraint*, escolhendo se na OT o modelo minimizará o volume ou massa total. Nesse estudo, a restrição utilizada foi-se a de minimização da massa mantendo-se as capacidades mecânicas do modelo.

No presente trabalho, foram selecionadas as áreas da ponta e cabeça da haste, assento e face da combustão para serem excluídos da otimização (área vermelha), já que desempenham um papel fundamental na vedação e fixação da válvula. O resto do corpo da válvula foi selecionado como uma região de otimização (área azul). Essa escolha pode ser vista na Figura 14.

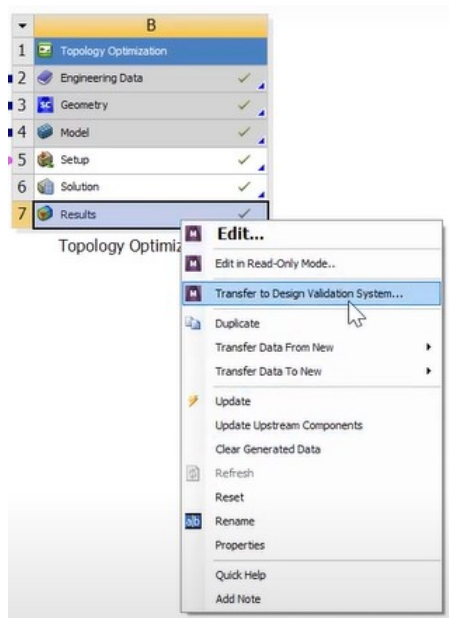
Figura 14 – Regiões de otimização e exclusão.



Fonte: Autor

Finalizando a OT, para realizar alterações geométricas e/ou outras simulações na nova geometria gerada é necessária transferir os resultados da OT para a ferramenta *Design Validation System*. Vista na Figura 15.

Figura 15 – Transferência para o *Design Validation*



Fonte: Autor

Com dito anteriormente, o usuário consegue fazer alterações na nova geometria gerada e refazer as simulações a fim de analisar se esse novo modelo atende às

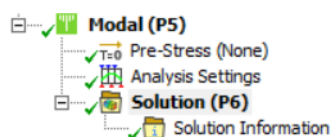
condições de projeto definidas, se deformações e tensões se encaixam em parâmetros adequados.

4.5 ANÁLISE MODAL

Após a OT, o modelo mais otimizado foi submetido a uma análise modal para verificar se suas frequências naturais não coincidiram com o valor de frequência do motor de uma motocicleta, que fica na média de 50 Hz (Galvão; Brito, 2024).

Dentro do *Ansys* há o componente *Modal* como pode ser visto na Figura 16. Com ele, é possível analisar a vibração da peça em cada frequência natural. Esses valores foram comparados com o valor de frequência do motor.

Figura 16 – Aba do componente *Modal*



Fonte: Autor

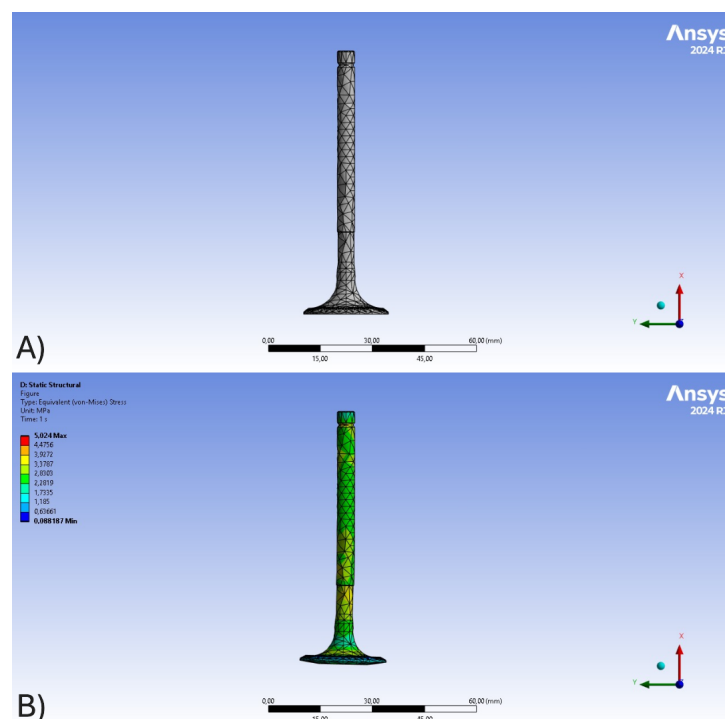
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

Meng, Zhong e Sun (2023) afirmaram que o processo de cálculo de elementos finitos utiliza os nós e elementos da malha do modelo, destacando a relevância da configuração e da densidade da mesma na modelagem por elementos finitos. A precisão dos resultados dos cálculos é diretamente afetada pela configuração correta dos nós e dos seus elementos. A precisão e a convergência das análises numéricas dependem da qualidade do modelo discretizado, uma discretização de alta qualidade é composta por elementos de formas regulares e proporções apropriadas, prevenindo distorções que poderiam comprometer os resultados (More; Bindu, 2015).

A fim de não comprometer os resultados da simulação, realizou-se um estudo de convergência da malha do modelo. As CC foram aplicadas (mesmas da sessão 4.2) e uma malha gerada automaticamente, obtendo-se uma tensão máxima de *Von-Mises* de $\sigma = 5.02$ MPa. A densidade da malha automática inicial gerada ficou em 6.058 números de elementos e 11.093 números de nós, sua discretização e o resultado da simulação estática podem ser vistos abaixo, na Figura 17.

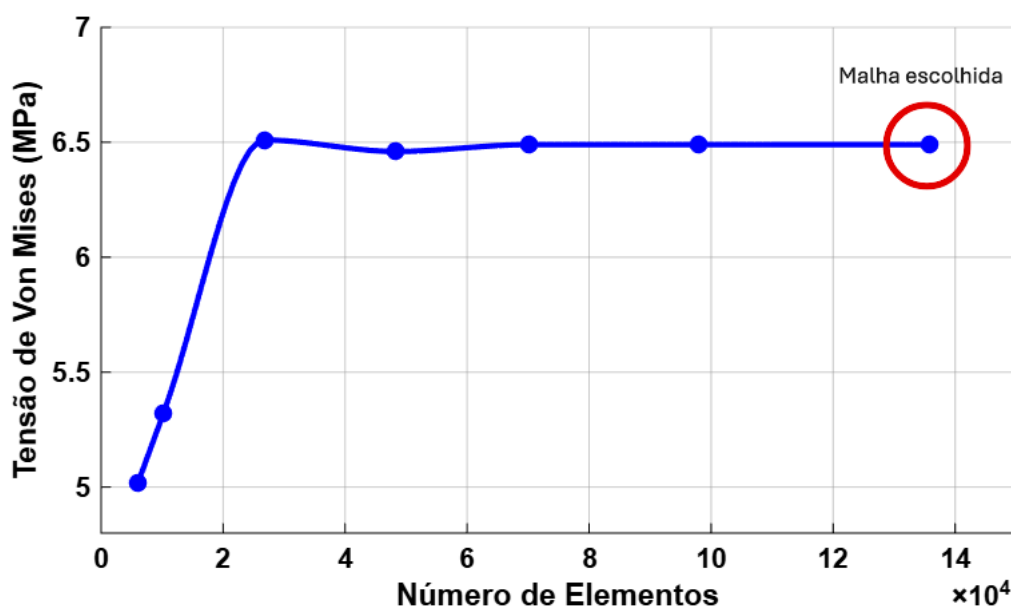
Figura 17 – Resultados da simulação do modelo (a) Malha automática; (b) Tensão máxima equivalente de Von-Mises.



Fonte: Autor

Foram feitas simulações utilizando carregamento estático com diferentes níveis de refinamento. A cada experimento foi avaliado o valor máximo de tensão (Figura 18).

Figura 18 – Resultado da convergência de malha do modelo.



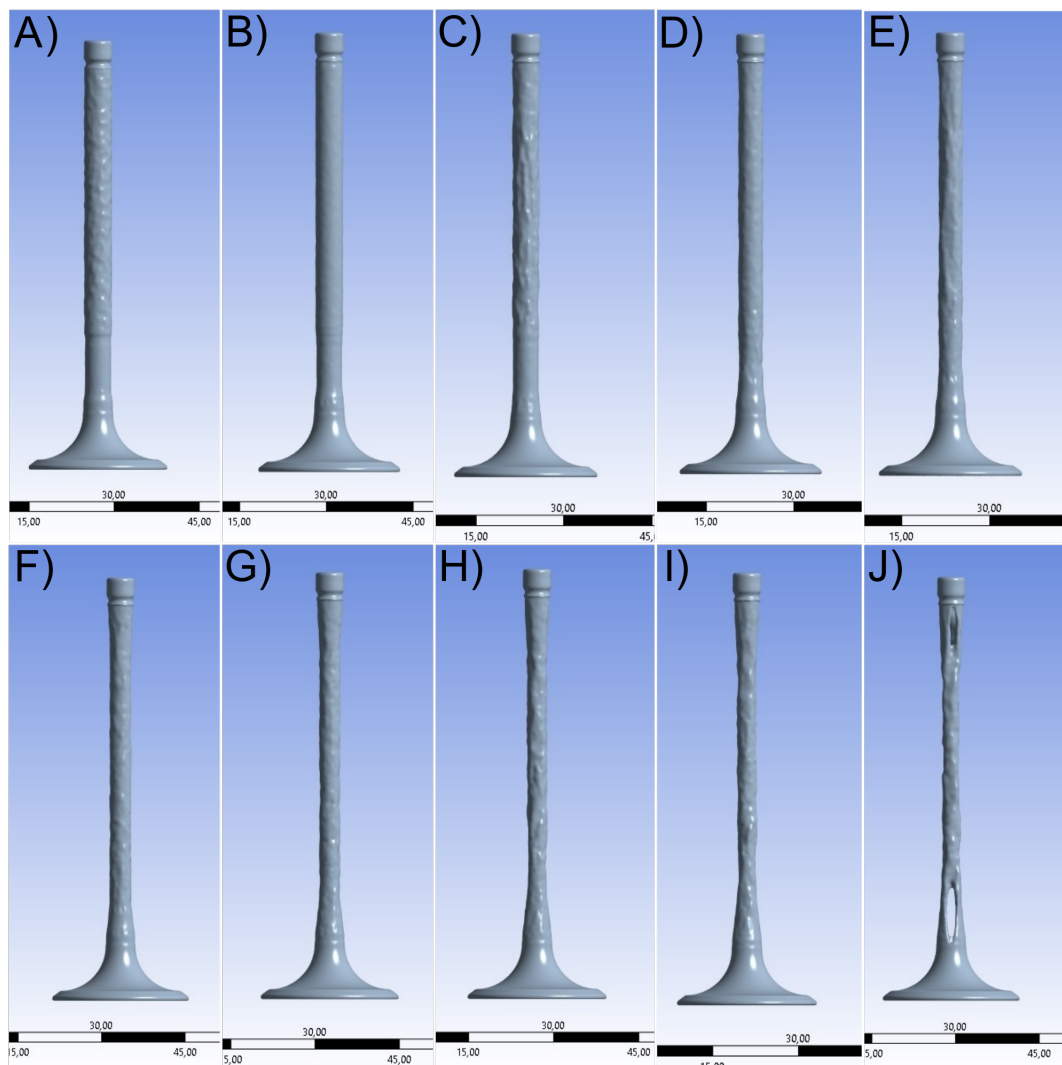
Fonte: Autor

A análise gráfica da Figura 18 demonstra o comportamento assintótico da tensão máxima, característico de uma convergência bem-sucedida. Nota-se que, nos primeiros refinamentos, houve um salto abrupto de tensão (de 5.02 MPa para aproximadamente 6.5 MPa), evidenciando que a malha inicial subestimava os concentradores de tensão. A estabilização em 6.49 MPa nos últimos refinamentos confirma que a discretização atingiu um nível onde o erro de discretização torna-se desprezível em relação à precisão numérica do *solver*, validando o modelo para as etapas subsequentes. A densidade da malha escolhida ficou com 135.888 números de elementos e 197.160 números de nós. Uma malha com menor densidade poderia ter sido escolhida, já que houve a convergência dos resultados, porém, para a qualidade da malha influencia no resultado final da otimização topológica. Posteriores testes das malhas com menor densidade serão realizados. O elemento finito utilizado no *Ansys* é o tetraédrico quadrático, que apresenta 10 nós por elemento e três graus de liberdade por nó.

5.2 RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Depois da análise de convergência da malha, prosseguiu-se para a aplicação da otimização topológica na peça. Variando o valor de retenção da massa, conforme dito na metodologia, os resultados dos modelos com menor massa e retirada de material são observados na Figura 19.

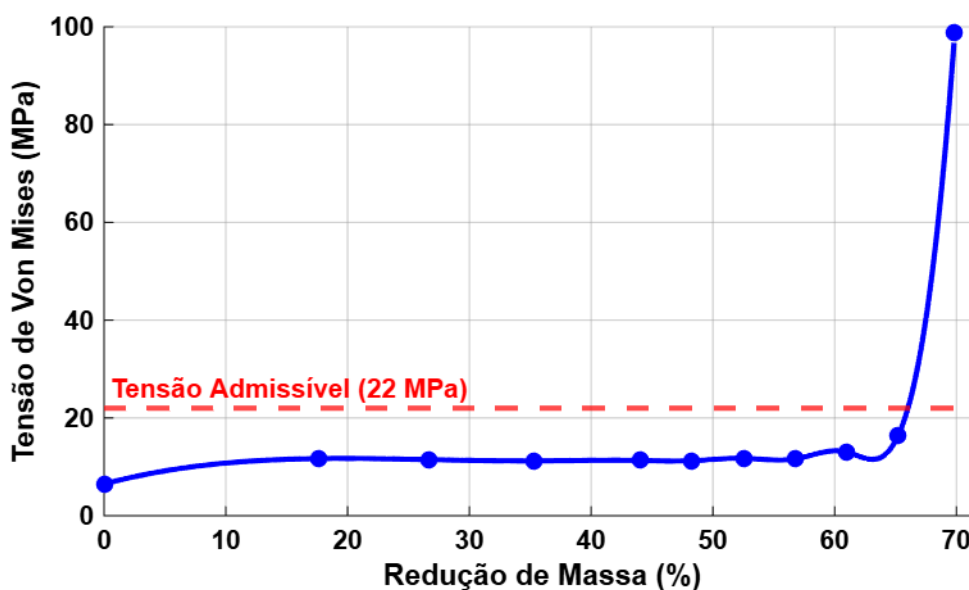
Figura 19 – Resultados da otimização topológica após retenção de massa A) 80% massa; B) 70% massa; C) 60% massa; D) 50% massa; E) 45% massa; F) 40% massa; G) 35% massa; H) 30% massa; I) 25% massa; J) 20% massa.



Fonte: Autor

Como imposição nas condições de remoção de material, o algoritmo priorizou a remoção de material na região central da haste. Todos os modelos otimizados foram submetidos à análise estática para avaliar o valor da máxima tensão gerada. As condições de contorno são as mesmas do modelo inicial. Introduzindo um fator de segurança de 7, com base nos dados de (The Engineering ToolBox, 2010) para componentes de motores e levando em consideração a resistência de escoamento do material ($\sigma_e = 154 \text{ MPa}$), é possível calcular uma tensão admissível para o projeto que resulta no valor de $\sigma_{adm} = 22 \text{ MPa}$. Após as simulações estáticas nos modelos otimizados e levando em consideração a restrição da tensão admissível, resultou-se no gráfico da Figura 20.

Figura 20 – Gráfico Tensão de Von-mises x Redução de massa dos modelos otimizados.



Fonte: Autor

Observa-se um suave aumento da tensão com a redução de massa da válvula até que o modelo em que 70% da massa foi reduzida ultrapassou a tensão admissível do projeto. É possível ver na Figura 19 que esse modelo começou a perder massa interna, o que ocasionou pontos de elevados esforços mecânicos na peça.

O modelo anterior, em que aproximadamente 65% da massa foi reduzida, permaneceu com o valor de tensão abaixo da tensão admissível. Sua massa final ficou com 5.971 g, resultando em uma redução de massa de 65.2%. Modelo esse que resultou no cumprimento do objetivo do trabalho, de diminuir a quantidade de material da peça original e manter a resistência mecânica.

5.3 RESULTADO DA ANÁLISE MODAL

Com base no resultado anterior, foi levado em consideração o modelo com retenção de massa de 25% para a realização da análise modal. Foram obtidas as seguintes frequências naturais na peça, vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos modos de vibração da peça

Modo de vibrar	Frequência (Hz)
Modo 1	0.17459
Modo 2	0.18200
Modo 3	0.94492
Modo 4	2.06430
Modo 5	2.13640
Modo 6	6.50110

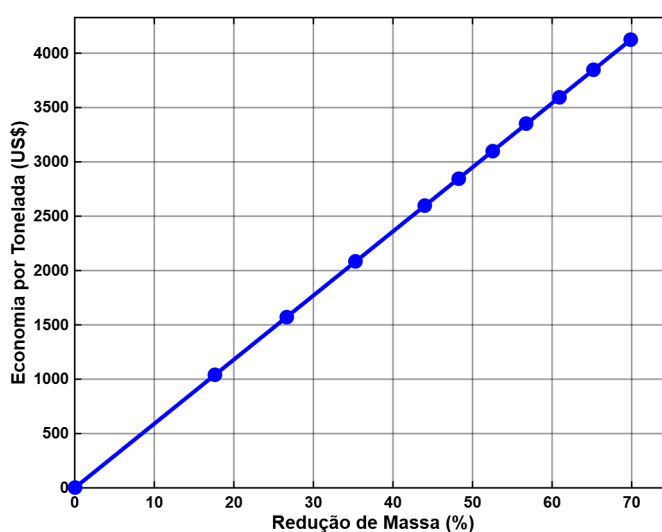
Fonte: Autor.

Percebe-se que a frequência ficou na faixa de 0.17459 a 6.5011 Hz, não coincidindo com o valor médio de frequência dos motores de motocicletas de 50 Hz. Portanto, a peça não apresenta o risco de falhar pelo fenômeno da ressonância quando o motor estiver vibrando.

5.4 ANÁLISE ECONÔMICA

Realizando uma simples análise econômica relacionando o presente estudo com o potencial de redução de custo proporcionado pela OT, uma barra de uma tonelada de 4Cr10Si2Mo custa US\$5.900,00 (Sichuan Liaofu Special Steel Co., Ltd., 2025). Levando em consideração o peso original da válvula de 17.156 g, suas posteriores reduções de massa após as otimizações e a economia ocasionada por cada redução relacionando a uma unidade de barra do material, temos como resultado o gráfico da Figura 21.

Figura 21 – Gráfico Redução de massa x Economia.



Fonte: Autor

Nota-se que a economia financeira é diretamente proporcional à redução de massa percentual. O modelo de 25% de massa retida, proporcionaria uma economia financeira de US\$3.846,49 e também uma economia de material de 0.652 toneladas, comparando à quantidade de material necessária para fazer peças com 17.51 g (original). Fica evidente, o potencial que a OT tem dentro da indústria para além da redução de massa de um material e/ou alteração da sua geometria, como também o impacto financeiro positivo, fator crucial dentro de uma empresa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho alcançou seu objetivo geral de aperfeiçoar uma válvula de admissão utilizando a OT por meio do MEF. A utilização do software *Ansys* mostrou-se eficaz para a modelagem, simulação e otimização da geometria da peça por meio da validação realizada, permitindo avaliar o comportamento estrutural sob condições de carregamento estático.

Inicialmente, a análise de convergência de malha foi fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados numéricos, onde a tensão de Von-Mises convergiu para 6.49 MPa. O processo de OT demonstrou que a redução de massa impactou diretamente nas tensões atuantes. Enquanto o modelo com 20% de retenção apresentou falhas estruturais, o modelo com 25% de retenção apresentou o melhor equilíbrio, mantendo as tensões abaixo do limite admissível de 22 MPa e atingindo uma massa final de 5.971 g (redução de 65.2%).

Além da validação estrutural estática, a análise modal confirmou a segurança dinâmica do componente. As frequências naturais obtidas, variando de 0.17459 Hz a 6.5011 Hz, não coincidiram com a frequência média de 50 Hz dos motores de motocicletas, eliminando o risco de falha por ressonância. Sob a ótica econômica, confirmou-se que a economia financeira é diretamente proporcional à redução de massa percentual, demonstrando que a aplicação da otimização topológica não apenas aprimora a eficiência técnica, mas também reduz significativamente os custos de material.

Este conjunto de resultados valida a aplicação da OT como uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de componentes automotivos mais eficientes, leves e economicamente viáveis.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de aprimorar esse estudo de otimização topológica, ficam como ideias para trabalhos futuros os seguintes itens:

- Ampliar a análise estática para uma análise dinâmica do problema;
- Introduzir dentro da análise dinâmica uma análise térmica do processo;
- Estudar o efeito da flambagem no corpo da haste;
- Realizar um processo de remodelagem das peças otimizadas visando a manufatura;

- Montar um estudo econômico mais complexo do processo;
- Aplicação do Método dos Elementos Finitos Generalizados no trabalho;

REFERÊNCIAS

ALBA, Michel Henrique Machado; ÁVILA, Suzana Moreira; SHZU, Maura Angélica Milfont. Otimização Paramétrica de Chassi Veicular Tipo Escada. **Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília. Brasília–DF**, 2015.

ARANTES, Gabriel Costa Vieira; RODRIGUES, Clóves Gonçalves. Modelagem de fenômenos físicos: movimento harmônico simples, equação de Euler-Lagrange, autofunções e dipolo elétrico. **Peer Review**, v. 5, n. 18, p. 15–35, 2023.

ÁVILA, Sérgio Luciano. Otimização paramétrica com computação evolutiva. **Brasil: IFSC**, 2020.

BARROS, José E Mautone. Estudo de motores de combustão interna aplicando análise orientada a objetos. **Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica, UFMG**, 2003.

BATISTA, Felipe Augusto; BRANT, Lúiz Flávio Vieira; VIMIEIRO, Claysson B. Santos. Uso de técnicas de otimização de componentes mecânicos através de elementos finitos da indústria automotiva. *In*: CONGRESSO Nacional de Engenharia Mecânica. [S. l.: s. n.], 2012.

BENDSØE, Martin Philip; KIKUCHI, Noboru. 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. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782588900862>.

BRUNS, Tyler E.; TORTORELLI, Daniel A. Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 190, n. 26, p. 3443–3459, 2001. ISSN 0045-7825. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00278-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00278-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782500002784>.

CERDOUN, Mahfoudh; CARCASI, Carlo; GHENAIET, Adel. An approach for the thermal analysis of internal combustion engines' exhaust valves. **Applied Thermal Engineering**, v. 102, p. 1095–1108, 2016. ISSN 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.105>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116304094>.

FINOL, CA; ROBINSON, K. Thermal modelling of modern engines: a review of empirical correlations to estimate the in-cylinder heat transfer coefficient. **Proceedings of the institution of mechanical engineers, part D: journal of automobile**

engineering, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 220, n. 12, p. 1765–1781, 2006.

GALVÃO, Caio Vinícius Andrade; BRITO, Halane Maria Braga Fernandes. Estudo da vibração em um veículo Fórmula SAE por simulação. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 9, e11213946955–e11213946955, 2024.

KIM, Hyunsun *et al.* Determination of an optimal topology with a predefined number of cavities. **AIAA journal**, v. 40, n. 4, p. 739–744, 2002.

MARTINEZ, José Mario; SANTOS, Sandra Augusta. Métodos computacionais de otimização. **Colóquio Brasileiro de Matemática, Apostilas**, CiteSeer, v. 20, 1995.

MAVROPOULOS, GC; RAKOPOULOS, CD; HOUNTALAS, DT. **Experimental investigation of instantaneous cyclic heat transfer in the combustion chamber and exhaust manifold of a DI diesel engine under transient operating conditions**. [S. l.], 2009.

MENG, Qiao; ZHONG, Ke; SUN, Mingzhi. Dynamic response analysis of airport pavement under impact loading. **Applied Sciences**, MDPI, v. 13, n. 9, p. 5723, 2023.

MORE, Shashikant T; BINDU, RS. Effect of mesh size on finite element analysis of plate structure. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, v. 4, n. 3, p. 181–185, 2015.

OKTAY, Erdal; AKAY, Hasan U.; SEHITOGLU, Onur T. Three-dimensional structural topology optimization of aerial vehicles under aerodynamic loads. **Computers Fluids**, v. 92, p. 225–232, 2014. ISSN 0045-7930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.11.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004579301300457X>.

OLIVEIRA, Suzana Matos França de. Otimização topológica verdadeiramente sem malha em estruturas multimateriais elastostáticas: o uso do método de Petrov-Galerkin local sem malha direto. **Universidade Federal do Ceará**, 2024.

PASSOS, Ian Eiras Versiani. Análise de desempenho de um motor de combustão interna de uma motocicleta com o uso de mistura combustível-hidrogênio. **Universidade Federal de Ouro Preto**, 2017.

PRESENTE, Eduardo Gabriel. Estudo da otimização topológica em parte da suspensão de um veículo comercial. **Universidade Federal do Paraná**, 2018. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16281>.

REZENDE, Glauco Claus *et al.* Uma discussão sobre a definição da distribuição de densidades relativas em otimização estrutural topológica via SIMP. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 10, especial, p. 52–60, 2022.

ROCHA, Gabriel Rodrigues Gazal; TRINDADE JÚNIOR, Herivelton José Gomes da. **Análise da influência do refinamento da malha de elementos finitos em corpos de prova cilíndricos gerados por otimização topológica na resistência por compressão**. 2023. B.S. thesis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SAITOU, Kazuhiro *et al.* A Survey of Structural Optimization in Mechanical Product Development. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, v. 5, set. 2005. DOI: 10.1115/1.2013290.

SEQUENZIA, Gaetano *et al.* **A new methodology for calculating and modelling non-linear springs in the valve train of internal combustion engines**. [S. l.], 2011.

SICHUAN LIAOFU SPECIAL STEEL CO., LTD. **Martensitic Stainless Steel 1.4731 4cr10si2mo Valve Steels Rod**. [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: <https://lfspecialsteel.en.made-in-china.com/product/MfQpdjVxEsWC/China-Martensitic-Stainless-Steel-1-4731-4cr10si2mo-Valve-Steels-Rod.html>. Acesso em: 28 nov. 2025.

SIGMUND, Ole; PETERSSON, Joakim. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. **Structural optimization**, Springer, v. 16, p. 68–75, 1998.

SILVA, Emilio Carlos Nelli. **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças**. Universidade Federal do Paraná, 2009.

SIRIO, Helmuth Mol Moraes. **Aplicação da otimização topológica e análise de fadiga pelo método dos elementos finitos de uma ponta de eixo para um veículo off-road**. Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.

SORIANO, Humberto Lima. **Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas**. [S. l.]: Ciência Moderna, 2009.

SORIANO, Humberto Lima. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas Vol. 48**. [S. l.]: EdUSP, 2003.

STEEL GRADES. **4Cr10Si2Mo Datasheet: high-temperature or heat-resistant steel and alloy**. [S. l.: s. n.], 2025. Datasheet. Disponível em: <https://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Special-Steel/64/9664/GBT-4Cr10Si2Mo.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TANG, Tianshu *et al.* Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems. **Materials**, v. 17, n. 23, 2024. ISSN 1996-1944. DOI: 10.3390/ma17235970. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/23/5970>.

TAYLOR, Charles Fayette. **Análise dos motores de combustão interna**. [S. l.]: E. Blucher, 1988.

TEIXEIRA, Ildernon Vinicius da Paixão. **Otimização topológica aplicada ao projeto de um mecanismo flexível de inversão de deslocamento**. 2022. B.S. thesis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

THE ENGINEERING TOOLBOX. **Factors of Safety - FOS**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html. Acesso em: 20 nov. 2025.

TROVATO, Michele; PERQUOTI, Federico; CICONI, Paolo. Topological Optimization for the Redesigning of Components in Additive Manufacturing: The Case Study of the Connecting Rod. **Engineering Proceedings**, v. 56, n. 1, 2023. ISSN 2673-4591. DOI: 10.3390/ASEC2023-16638. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4591/56/1/131>.

VAN, Thu Huynh *et al.* Two-phase ESO and comprehensive learning PSO method for structural optimization with discrete steel sections. **Advances in Engineering Software**, Elsevier, v. 167, p. 103102, 2022.

VAN BASSHUYSEN, R; SCHÄFER, F. Internal combustion engine handbook–basics, components. **Werrandale (PA): Systems and Perspectives. SAE International**, 2004.

VANDERPLAATS, Garret N. Structural optimization for statics, dynamics and beyond. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, v. 28, n. 3, p. 316–322, jul. 2006. ISSN 1678-5878. DOI: 10.1590/S1678-58782006000300009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000300009>.

WANG, Yue *et al.* Flow structures and losses in the exhaust port of an internal combustion engine. *In*: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S. l.: s. n.], 2013. v. 56314, v07at08a045.

ZADE, R. Optimization of inlet valve of IC engine using FEA. **Int Res J Eng Technol**, v. 3, p. 20, 2016.

ZIENKIEWICZ, OC. **Taylor RL Zhu JZ The finite element method**. [S. l.]: Elsevier, 2005.