



Universidade Federal do ABC

RELATÓRIO FINAL

PDPD - PESQUISANDO DESDE O PRIMEIRO DIA

LARISSA REPOSSI AMORIM

Prof. Dr. DANIEL JONAS DEZAN

**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA APLICADA AO PROJETO DE
ACOPLADOR DE FUSELAGEM TRASEIRO DE UM FOGUETE
EXPERIMENTAL**

Santo André

2021

LARISSA REPOSSI AMORIM

**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA PDPD -
PESQUISANDO DESDE O PRIMEIRO DIA REFERENTE AO
EDITAL: 04/2020**

Área: Engenharia de Estruturas

Sub-área: Métodos de Otimização Estrutural

Santo André

2021

Resumo

Equipes de foguetemodelismo ao redor do mundo utilizam acopladores de fuselagem para estruturação, acesso a partes internas e construção do foguete, mas esses também podem ser utilizados para a liberação da carga paga e do sistema de recuperação do foguete no apogeu de voo. Tais peças são essenciais para o bom funcionamento em voo e retorno seguro à superfície, precisam resistir às forças mecânicas as quais está suscetível o foguete e moverem-se com segurança quando necessário. Este trabalho visa reformular o projeto de acoplador de fuselagem traseiro utilizado pela equipe UFABC Rocket Design nos foguetes experimentais desenvolvidos para competições nacionais e internacionais, por meio da otimização estrutural topológica utilizando o Método dos Elementos Finitos, com a finalidade de obter a máxima resistência mecânica e mínima massa no projeto do acoplador.

Palavras-chave: foguetemodelismo, acopladores de fuselagem, otimização estrutural, método dos elementos finitos.

1. Introdução e Justificativas

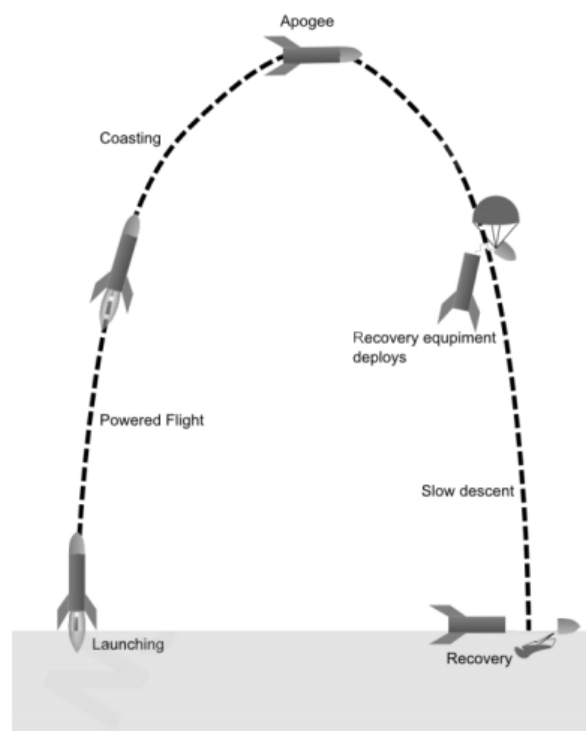
Foguetes experimentais são iguais a foguetes de grande porte, do tipo sondagem, porém menores (MARCHI, 2018), possuem assim uma menor fração de sua massa destinada ao propelente, sendo o voo mais curto do que de foguetes maiores e limitado à atmosfera terrestre. Tais foguetes podem ser utilizados em missões de sondagem com aplicações em medições atmosféricas (ALVES, 2020), mas no Brasil são utilizados principalmente por instituições acadêmicas e grupos de pesquisa que projetam, desenvolvem, criam e testam os foguetes (AMATO et al., 2020) colocando em prática a teoria estudada, além de participarem de competições nacionais e internacionais de foguetemodelismo, compartilhando experiências na área.

Para demonstrar o funcionamento do acoplador que será estudado neste trabalho é preciso definir as etapas de voo do foguete experimental, que podem ser divididas em quatro, são caracterizadas e ilustradas na Figura 1 segundo Abate et al. (2014) e Cristello e Mendes (2017) como:

- **Etapa propulsão:** começa com o acionamento do motor e assim o lançamento e aceleração do foguete, é a fase de voo propulsão, a queima total do propelente determinará sua duração e o apogeu a ser atingido;
- **Etapa balística:** após a utilização de todo o propelente o foguete atingirá seu apogeu e ficará sem a força do motor, suscetível à ação da força gravitacional;
- **Etapa de recuperação:** assim o sistema de recuperação é ativado e os paraquedas abertos, garantindo a diminuição da velocidade para a descida;
- **Etapa de descida lenta:** os sistemas de recuperação desacelerando o foguete, que desce lentamente e se torna visível para a recuperação sem grandes danos à chegada ao solo.

Figura 1: Demonstrativo das etapas de voo de um foguete experimental

Fonte: (Abate et. al, 2014)



1.1. Acopladores de fuselagem

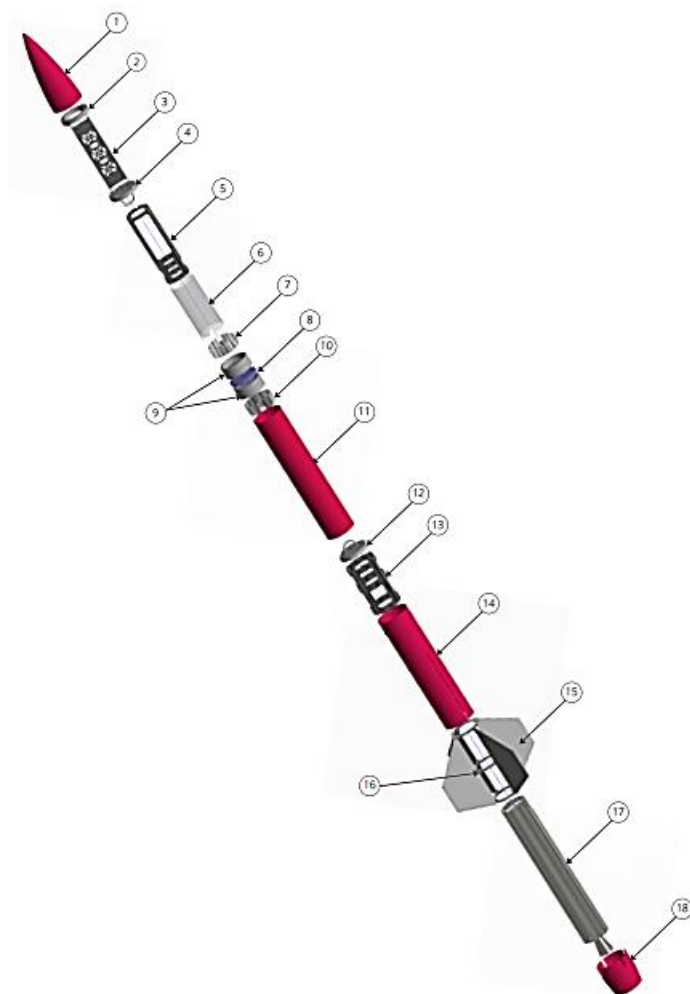
Os acopladores, como seu próprio nome mostra, são responsáveis por acoplar e juntar as partes da fuselagem - que é a parte de fora, a estrutura principal que engloba todo o foguete (AMATO et al, 2020) - com o interior que compõem o foguete, por dividirem as diferentes partes do foguete podem ainda facilitar o acesso aos sistemas localizados dentro do foguete durante a construção e após o retorno ao solo (LOSTOSKI MR, 2016).

O principal papel dos acopladores é manter as divisões da fuselagem conectadas, desde o lançamento até o apogeu do voo, que é quando o altímetro presente no sistema eletrônico do foguete irá acionar o ignitor liberando os paraquedas de recuperação, a localização dos acopladores é entre a parte eletrônica e a recuperação exatamente por essa dependência entre os sistemas.

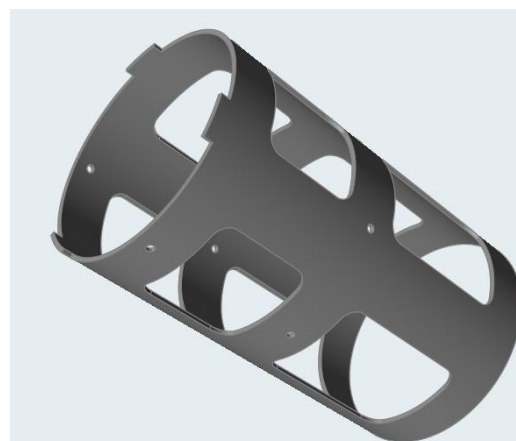
Então possuem função estrutural, mas para além disso precisam ser resistentes o suficiente para aguentar as forças as quais estão submetidas o foguete e as pequenas explosões controladas para o acionamento dos paraquedas.

O acoplador traseiro que é responsável pelo paraquedas piloto está localizado logo acima do motor do foguete como exposto na Figura 2, o que faz com que sofra diretamente a ação do empuxo e da pressão interna durante o funcionamento desse.

Figura 2: projeto de um foguete experimental e localização dos acopladores



Número de Referência	Nome da Peça	Material
1	Coifa	PLA e resina epóxi
2	Anteparo de fixação da Payload	Alumínio 6061
3	Payload / CubeSat 3U	Aço e Alumínio
4	Bulkhead entre Carga Paga e Recuperação principal	Alumínio 6061
5	Coupler entre Coifa, Carga Paga e Recuperação principal	Aço carbono
6	Fuselagem da Payload	Acrílico ou policarbonato
7	Coroa de cisalhamento da Recuperação principal	Alumínio 6061
8	Placa de suporte da Eletrônica	ABS e fibra de vidro
9	Bulkheads entre Eletrônica e as câmaras de recuperação	Alumínio 6061
10	Coroa de cisalhamento da Recuperação piloto	Alumínio 6061
11	Fuselagem das câmaras de recuperação e eletrônica	Fibra de Vidro
12	Bulkhead entre Recuperação piloto e o Motor	Alumínio 6061
13	Coupler entre Recuperação piloto e o Motor	Aço carbono
14	Fuselagem do Motor	Fibra de Vidro
15	Conjunto de Empenas	Alumínio 6061
16	Conjunto de anéis de fixação das empenas	Alumínio 6061
17	Motor	Aço Inóx e Alumínio
18	Boat Tail	PLA e resina epóxi



Fonte: (Albuquerque *et al.*, 2020)

Sendo o acoplador traseiro submetido a todas essas condições, e responsável pelo correto acionamento dos sistemas de recuperação, a otimização estrutural da sua geometria, ainda não realizada pela equipe, mostra-se necessária para um aumento na segurança e confiabilidade em seu uso, de acordo com Coutinho (2006) através dessa ferramenta melhorando a atuação dos sistemas e peças é possível também diminuir os custos de fabricação e operação, que são de grande importância para uma equipe acadêmica de foguetemodelismo. Mais especificamente a otimização topológica, que será utilizada nesta pesquisa, busca obter a maior resistência mecânica com a menor massa possível para a estrutura analisada, aumentando o desempenho do projeto em geral (GIMENES, 2016).

A qual é feita a partir do Método dos Elementos Finitos que, segundo Tavares (1998), tem como objetivo dividir o objeto de estudo em um número finito de elementos mais simples que o objeto em si, obtendo uma aproximação para a geometria, a partir do agrupamento desses vários elementos.

Tal generalização facilita o estudo de problemas bidimensionais e tridimensionais constituídos por vários materiais diferentes e com fronteiras irregulares.

2. Objetivo

O objetivo principal é aplicar técnicas de otimização topológica visando obter a máxima resistência mecânica e mínima massa para o desenvolvimento da geometria do acoplador de fuselagem traseiro de um foguete experimental. Mas para tal é necessário primeiramente o levantamento bibliográfico e estudo do funcionamento e estrutura do foguete, também dos métodos de otimização utilizados, juntamente com o aprendizado do manuseio dos softwares de otimização e posteriormente análise dos resultados obtidos.

Realizada a otimização e as análises dos resultados, busca-se um melhor desempenho do Foguete Polo, ainda em desenvolvimento teórico da equipe, pois como testado por Abate et al. (2014) uma redução de massa no foguete entrega maiores apogeus, e conseqüentemente melhores posições em modalidades de competição. Além das possibilidades do aumento da confiabilidade e fator de segurança nas peças, com uma melhor estrutura e funcionamento do acoplador, pois a equipe atualmente utiliza tais peças sem a otimização que será realizada neste trabalho, visa também uma diminuição custo de materiais e combustível, além de permitir a reutilização em várias missões com o mínimo de itens remanufaturados.

Dessa forma, a otimização proposta pode gerar benefícios não só para a atuação do foguete nas competições, mas também para a equipe como um todo, com inovações de estrutura, desenvolvimento de projeto e métodos de produção.

3. Recursos e Infraestrutura

Como o projeto busca aplicar técnicas de otimização estrutural e análise de seus resultados, será necessário o uso de softwares de simulação, otimização e desenho computacional, além de um computador capaz de realizar tais ações. Devido à atual situação de isolamento social não serão utilizados os laboratórios computacionais da UFABC, mas sim o computador de uso pessoal do aluno com licenças de utilização dos softwares disponibilizadas através das empresas desenvolvedoras para a finalidade acadêmica em parceria com a Rocket e a universidade.

Softwares estes CAD - *Computer-Aided Design* (Desenho Assistido por Computador) foi utilizado o Autodesk Inventor e CAE - *Computer-Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador) Altair OptiStruct, Altair HyperView e Altair Inspire.

4. Fundamentação Teórica

Otimizações correspondem, de acordo com Chapra e Canale (2016), a determinação de um valor ou valores de uma variável independente que corresponde ao “melhor” valor de uma função, os quais podem ser calculados a partir de máximos e mínimos de funções, ou seja, pontos onde a derivada da função é igual a zero. O problema de otimização pode ser descrito em: uma função objetivo, variáveis de projeto e restrições. Porém, geralmente as funções objetivo utilizadas em tais análises não possuem o cálculo da derivada disponível analiticamente e podem envolver outros métodos numéricos (CHAPRA e CANALE, 2016).

Com o crescimento das ciências e o desenvolvimento de computadores foram possíveis avanços nas abordagens e métodos numéricos, capazes de lidar com um grande número de equações, não linearidades e geometrias complicadas, expandindo a capacidade de resolução de problemas (CHAPRA e CANALE, 2016).

Atualmente tais métodos foram implementados em softwares CAE utilizados em diversos setores das diferentes engenharias. O método numérico utilizado em conjunto com o software nesta pesquisa foi o Método dos Elementos Finitos, para a Otimização Topológica.

4.1. Conceitos básicos de Método dos Elementos Finitos

Através do Método dos Elementos Finitos (MEF) é possível subdividir o sistema analisado em um número finito de componentes individuais geometricamente mais simples, chamados elementos. Sendo assim, as equações diferenciais, antes resolvidas analiticamente, são substituídas por sistemas de equações lineares que descrevem o comportamento estrutural do sistema discretizado (COUTINHO, 2006).

A discretização da peça de estudo em elementos gera a malha, a qual varia conforme os tipos e a quantidade dos elementos e assim também a partir do número de nós, que são as intersecções entre tais elementos, como exemplificado na figura 3. O objetivo do método é obter uma formulação que possa realizar a análise, de forma automática, de sistemas complexos por intermédio de programas computacionais (TAVARES, 1998).

Avelino (2013) garante que a partir do entendimento do comportamento de cada elemento é possível entender o comportamento do sistema, ou seja, a análise das unidades resulta em analisar todo

o conjunto. O método não garante soluções exatas mas à medida que são utilizados mais elementos no modelo, a solução obtida converge para uma melhor aproximação, afirma Tavares (1998).

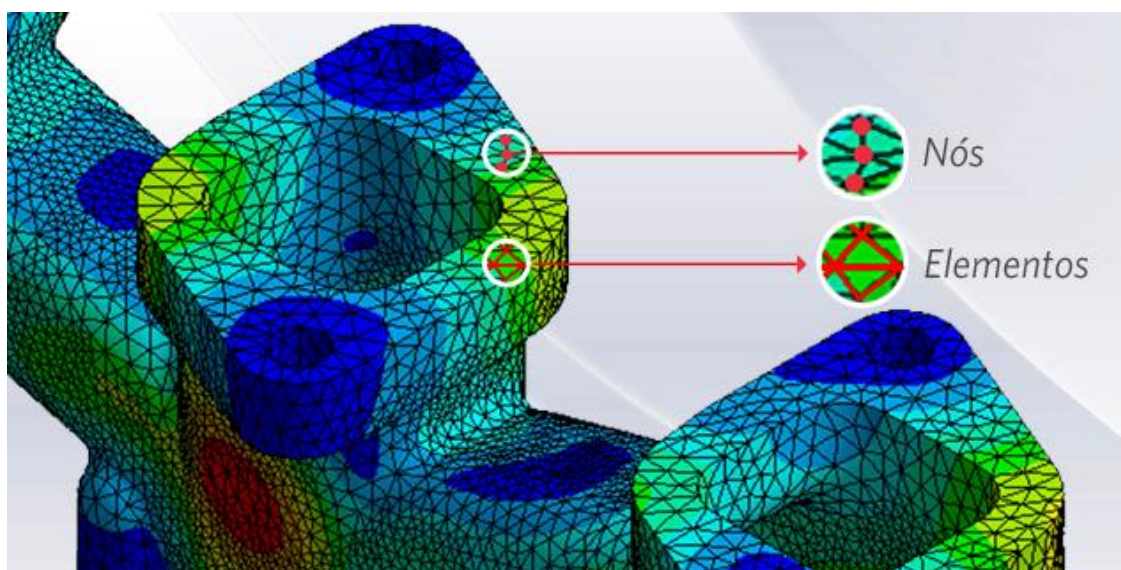


Figura 3: elementos da geometria discretizada com o MEF

Fonte: (<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>)

4.2. Conceitos básicos de otimização topológica

De acordo com Sigmund e Maute (2013) a Otimização Topológica responde uma das fundamentais questões da engenharia: como distribuir o material em um domínio de projeto pré-definido de forma a obter a melhor performance estrutural.

A Otimização Topológica (OT) é um método computacional que combina essencialmente métodos de otimização com um método numérico de análise como o MEF, utilizado neste trabalho, para segundo um determinado critério de custo, projetar a topologia ótima de uma estrutura (KIYONO, 2008).

O critério de custo é também conhecido como função objetivo, ou seja, a variável a qual otimização pretende maximizar ou minimizar. Na otimização topológica, segundo Coutinho (2006) pretende-se analisar a melhor forma de distribuir o material no interior de um sistema de acordo com as condições de contorno, maximizando ou minimizando a função objetivo e respeitando as restrições de projeto.

A partir da discretização de malha realizada através do MEF, a OT irá analisar cada elemento a partir dos critérios de otimização já definidos, determinando a necessidade ou não de material neste. O

material em cada ponto varia de ar (sem presença de material) até sólido (completa presença de material), podendo existir densidades intermediárias (SILVA, 2001). Ao fim do processo iterativo de análise, limitado mediante as restrições impostas, a otimização topológica resultará na ótima distribuição de material no domínio definido e assim uma nova geometria, a ser interpretada, para a estrutura analisada. Como exemplificado a seguir na figura 4.

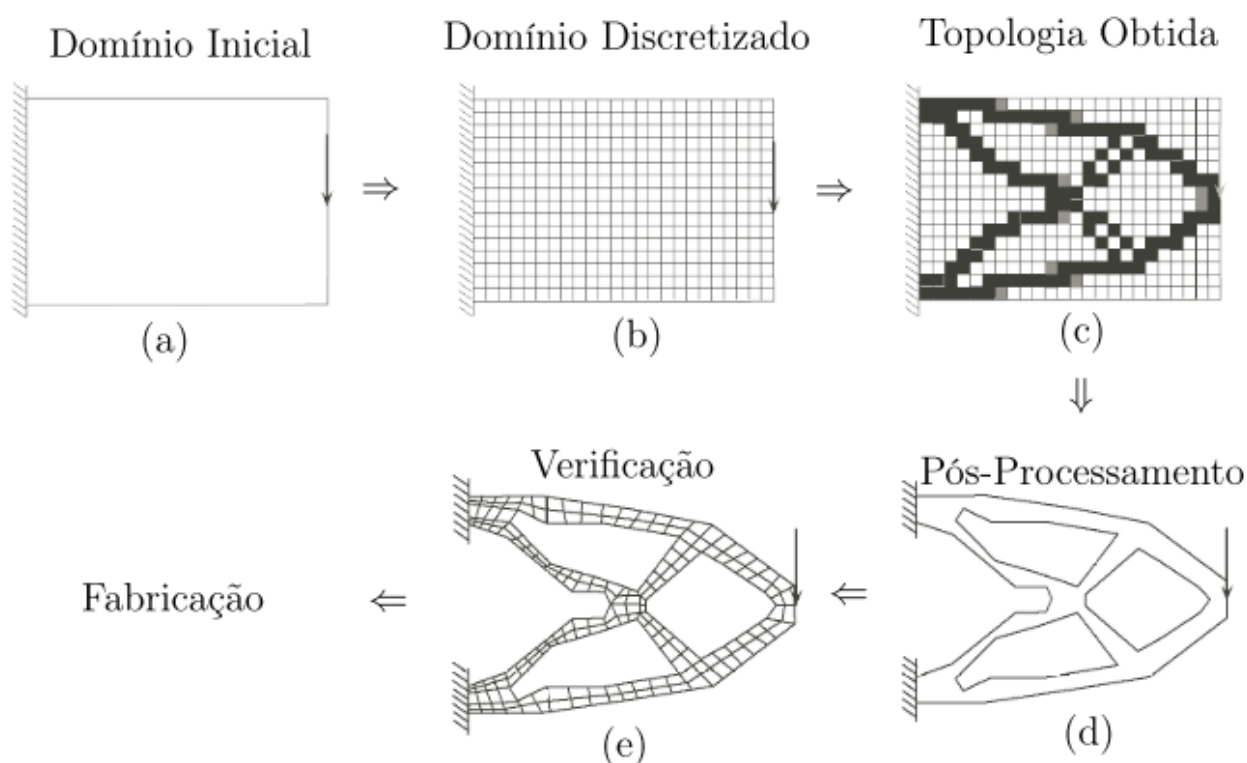


Figura 4: procedimento típico de projeto estrutural por otimização topológica

Fonte: (Silva, 2001)

5. Metodologia Proposta

Por ser parte do programa Pesquisando Desde o Primeiro Dia e pertencer ao núcleo de pesquisas da entidade estudantil UFABC Rocket Design, a pesquisa se iniciou com estudos e palestras a respeito de metodologia científica, reuniões e workshops com os departamentos de projeto da equipe.

Além de revisão bibliográfica sobre foguetemodelismo, funcionamento e estrutura dos foguetes experimentais, e o método de análise e otimização estrutural a ser utilizado. Também foram

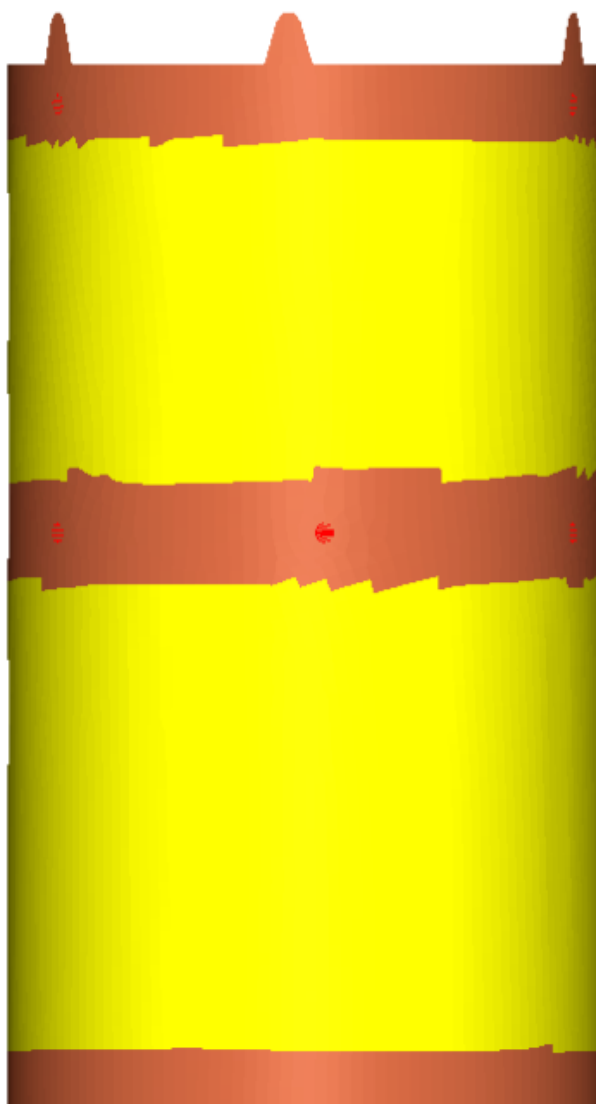
realizados treinamentos, oferecidos pela empresa dos softwares CAE utilizados, sobre o manuseio das ferramentas de modelagem, simulação e otimização de estruturas.

Para a otimização e análise proposta será utilizado o acoplador traseiro que faz parte do foguete em desenvolvimento da equipe, nomeado Polo. O desenho da peça foi inicialmente criado no departamento de estruturas e aerodinâmica da equipe e esta pesquisa irá otimizá-lo topologicamente por meio do Método do Elementos Finitos e através de softwares CAE, visando a máxima rigidez e menor massa possível, seguindo os parâmetros já testados pelo departamento.

5.1. Processo de otimização

Para a formulação da otimização um primeiro modelo do acoplador traseiro totalmente fechado foi analisado no software Altair Optistruct (figura 5), com a malha e as forças as quais é submetido o acoplador já definidas, a otimização começa com a definição das variáveis de projeto e das respostas. O primeiro passo divide a peça em partes otimizáveis ou não otimizáveis e também define a simetria a ser utilizada; posteriormente outras características a serem medidas ao longo da otimização são adicionadas às respostas.

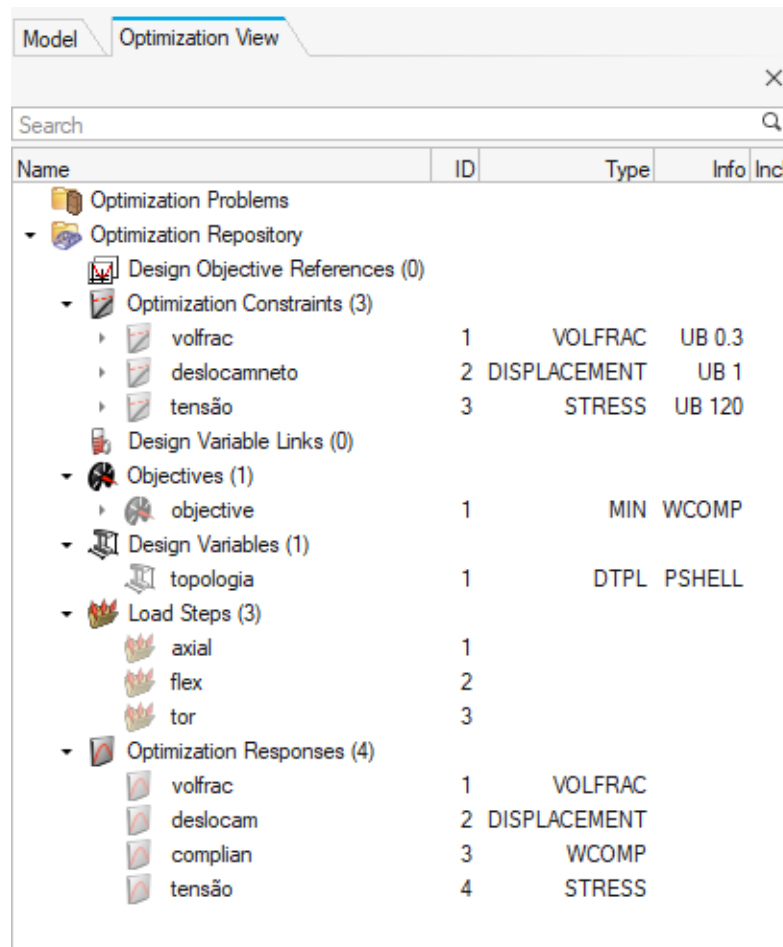
Figura 5: acoplador traseiro em seu formato fechado



Fonte: (Autor)

As quais são subdivididas em restrições e objetivos. As restrições utilizadas foram: o volume final da peça deve ser no máximo 30% do volume inicial, os deslocamentos finais de no máximo 1 mm e a resultante das tensões superficiais pode atingir até o valor máximo de 120 MPa; enquanto o objetivo é maximizar a rigidez da peça. Definição da otimização disposta na figura 6.

Figura 6: definição da otimização, interface do software Altair Optistruct



Fonte: (Autor)

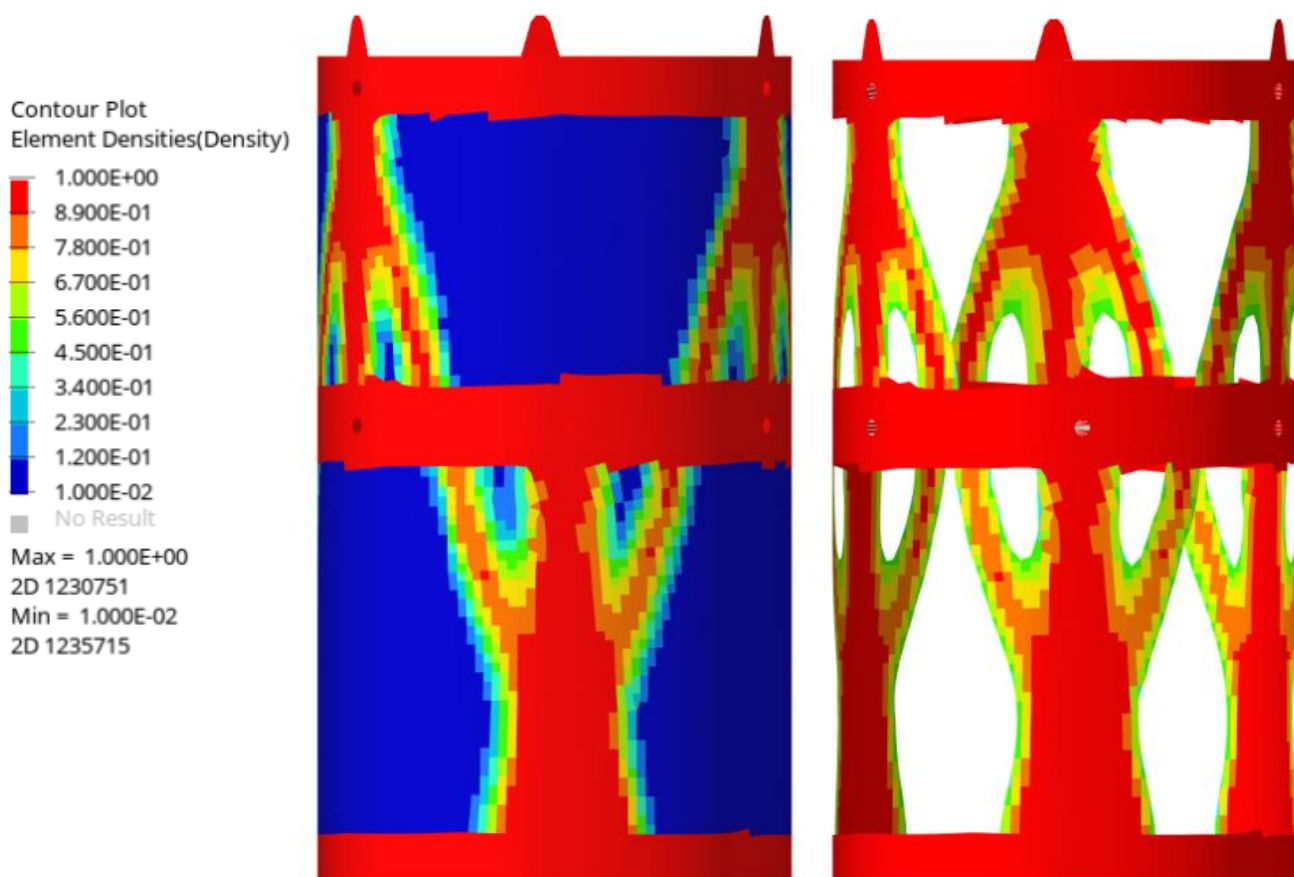
Após definida a otimização, o software realiza um processo iterativo definindo a melhor distribuição de material conforme definidos os critérios de otimização, foram necessárias 52 iterações para chegar ao resultado da otimização. O qual possibilitou a criação de uma nova geometria do acoplador traseiro, no software CAD Autodesk Inventor a peça foi desenhada manualmente a partir de análises desse resultado, assim o novo desenho da peça está otimizado topologicamente.

A partir de então começa a última etapa da pesquisa, na qual foram realizadas novas análises de deslocamentos e tensões superficiais no novo acoplador e no já utilizado pela equipe. Posteriormente foram criadas tabelas para comparação desses resultados, verificando a viabilidade do novo projeto quando comparado com o acoplador já testado e validado pela equipe, também foi possível criar novas possibilidades de fabricação a partir dessa comparação final.

6. Resultados

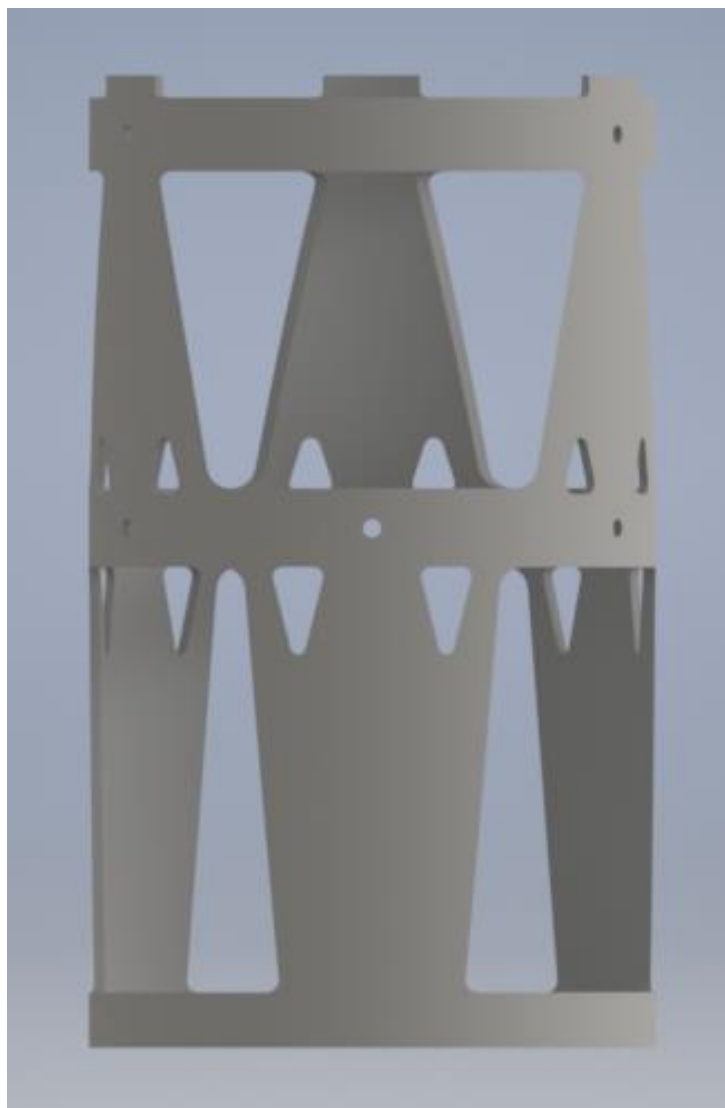
O resultado da otimização, mostrado na figura 7, gerou uma estrutura orgânica de braços triangulares a qual foi transformada no desenho CAD do acoplador traseiro otimizado (figura 8).

Figura 7: resultado da otimização topológica, software Altair HyperView



Fonte: (Autor)

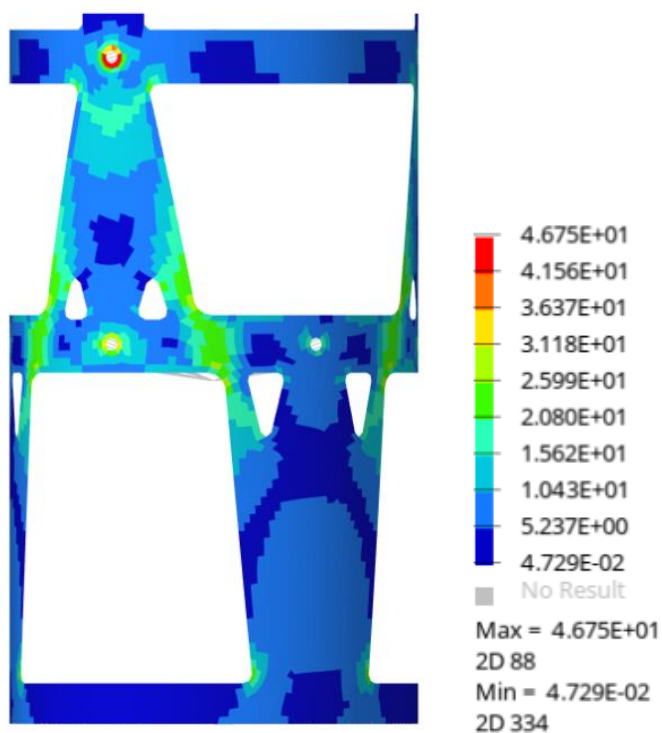
Figura 8: CAD acoplador traseiro otimizado, software Autodesk Inventor



Fonte: (Autor)

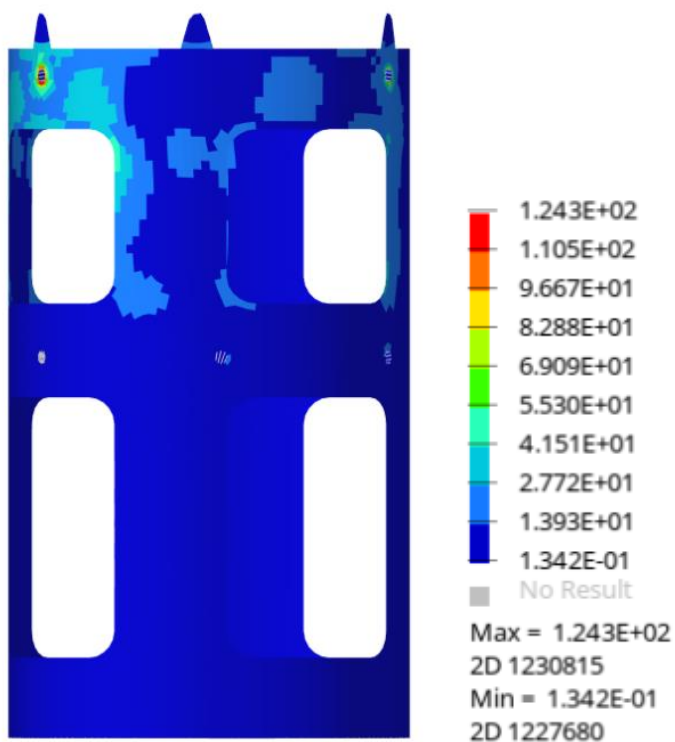
As análises e comparações finais, entre a peça nova e a anterior mostraram que o acoplador otimizado no pior caso de carga possui 46,7 MPa de resultante das tensões superficiais (figura 9) enquanto o anterior possui 124 MPa de tensão superficial (figura 10), a partir desse resultado foi possível uma nova abordagem de otimização.

Figura 9: análise de tensões acoplador traseiro otimizado



Fonte: (Autor)

Figura 10: análise de tensões acoplador traseiro anteriormente utilizado



Fonte: (Autor)

Como o acoplador atualmente em uso pela equipe foi testado e comprovado que a tensão superficial de 124 MPa não causa danos à estrutura e funcionamento da peça; há espaço para mudanças na espessura do acoplador otimizado, aumentando assim a tensão sobre ele, respeitando o limite máximo de 124 MPa imposto pelos testes já realizados. Outra opção analisada foi a mudança do material utilizado para um polímero que possibilitaria a construção da peça por meio de manufatura ativa por extrusão, dessa forma foi necessário analisar espessuras maiores respeitando o limite de tensão do material.

7. Conclusão

A otimização atingiu o objetivo esperado, resultando em um modelo de acoplador traseiro mais rígido e de menor massa quando comparado ao modelo atualmente utilizado pela Rocket.

A geometria desenhada a partir do resultado da otimização possibilitou análises de espessura e de outro material para a construção da peça; com espessura e material original o acoplador utilizado pela equipe possui massa de 1,53 Kg e tensão resultante de 124 MPa, enquanto o otimizado 1,21 Kg e 54,11 MPa, mostrando-se mais leve e rígido.

Após as análises e comparações finais conclui-se que com o material atualmente utilizado na estrutura dos projetos da equipe e respeitando o limite de tensão já validado de 124 MPa com a espessura original de 2,65 mm, o acoplador otimizado pode ser construído com 1,35 mm de espessura resultando em 0,62 kg de massa, uma redução de 60% comparando-se ao acoplador traseiro atual. Enquanto a opção de um material polímero, respeitando o limite de tensão média dessa matéria prima, a peça otimizada pode ser construída com 4,40 mm de espessura, resultando em 0,40 kg de massa, uma redução de 74% do acoplador atual.

A partir desses resultados, dispostos na tabela 1, novas dúvidas surgem: a fabricação do acoplador traseiro com as espessuras resultantes é possível, viável e praticável para a equipe; essa mudança afetaria outros componentes do foguete; os custos dessa fabricação compensaria os ganhos na diminuição de massa e aumento de rigidez; entre outras questões que ainda precisam de mais análises e projetos com outros departamentos da entidade para serem solucionadas.

Assim, testes do foguete completo com o acoplador otimizado ainda não foram realizados, não sendo então possível obter respostas acerca de mudanças no desempenho geral do foguete e do acoplador, dos custos de produção e manutenção ou da reutilização de tal componente.

Tabela 1: resultados com as mudanças na espessura

Acoplador	Baseline	Otimizado	Aço	Polímero
Espessura	2,65 mm		1,35 mm	4,40 mm
Massa	1,53 kg	1,21 kg	0,62 kg	0,40 kg
Redução	-	21%	60%	74%

Fonte: (Autor)

Referências Bibliográficas

- ABATE, M. *et al.* Correlation Between Simulated, Calculated, And Measured Model Rocket Flight, 2014.
- ALBUQUERQUE, C. *et al.* Projeto Polo, Preliminary Design Review, no prelo, 2020.
- ALVES, A. L. *et al.* Minifoguete A Propelente Sólido: Aspectos Teóricos E Propostas Experimentais Para O Ensino De Física. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 42, p. 20200390, 2020.
- AMATO, N. *et al.* Design, Analysis, and Test of a High-Powered Model Rocket, 2020.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. Métodos Numéricos para Engenharia. AMGH, 2016. 9788580555691. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555691/>>. Acesso em: 31/08/2021
- COUTINHO, K. D. Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15665>>. Acesso em: 22/01/2021.
- CRISTELLO, J. B.; MENDES, R. M. F. Otimização de Motores com Combustível Sólido para Minifoguetes, 2017.
- FILHO, A. A. Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE. Editora Saraiva, 2013. 9788536519708. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519708/>>. Acesso em: 05/05/2021
- GIMENES, R.; MORIGUCHI, S. K. Aplicação De Técnicas De Otimização Topológica Via Software, 2016.
- KIYONO, C. Y. Método de otimização topológica aplicado ao projeto de sonotrodos para transdutores piezelétricos, 2008.
- LOSTOSKI MR, M. R.; SZUCS, J.; SCHWENNING, M. Structural Design and Fabrication of a Rocket, 2016. Disponível em: <http://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projectshttp://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/387>. Acesso em: 27/01/2021.
- MARCHI, C. H. Index of /foguete/apostila, 2018. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/apostila/>>. Acesso em: 01/02/2021.
- SIGMUND, O.; MAUTE, K. Topology optimization approaches: A comparative review, 2013.
- SILVA, E. C. N. Técnicas de otimização aplicadas no projeto de peças mecânicas. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP, 2001.
- TAVARES, J. M. R. S. Introdução ao Método dos Elementos Finitos, 1998. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/37649859_Introducao_ao_metodo_dos_elementos_finitos>. Acesso em: 21/01/2021.