

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA



Universidade Federal do ABC
LUCAS AGUIAR BARBOSA

Lucas Aguiar Barbosa

RELATÓRIO FINAL

PDPD - PESQUISANDO DESDE O PRIMEIRO DIA

Prof. Dr. WALLACE GUSMÃO FERREIRA

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA APLICADA AO PROJETO DE ACOPLADOR DE FUSELAGEM DIANTEIRO DE UM FOGUETE EXPERIMENTAL

Área: Engenharia de Estruturas

Sub-área: Métodos de Otimização Estrutural

Setembro de 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 dianteiro 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.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Robert Goddard com o primeiro foguete a propelente líquido.....	5
Figura 2: Foguete V-2.....	6
Figura 3: Fases de voo de um foguete modelo	7
Figura 4: Processo de geração de Efeitos Econômicos.....	8
Figura 5: Exemplo de um Acoplador Óptico	9
Figura 6: Acoplador de fuselagem dianteiro do POLO	9
Figura 7: Projeto de um foguete experimental e localização dos acopladores.....	10
Figura 8: Domínio inicial do projeto de Vendramin, carregamentos e restrições	12
Figura 9: Discretização do modelo original	13
Figura 10: Representação do ponto crítico de tensão máxima da estrutura.....	13
Figura 11: Discretização de uma peça para elementos quadráticos	14
Figura 12: Esquema de otimização estrutural	15
Figura 13: Modelo de barra com os carregamentos e restrições sob ela.....	16
Figura 14: Análise de deslocamento e tensão, respectivamente.....	17
Figura 15: Simetria bilateral.....	18
Figura 16: Simetria Rotacional.....	19
Figura 17: Fases da otimização	21
Figura 18: Domínio inicial e espaço de desenho	22
Figura 19: Acoplador utilizado pela equipe <i>Rocket Design</i>	23
Figura 20: Primeira iteração do acoplador	24
Figura 21: Segunda iteração do acoplador	25
Figura 22: Acoplador Otimizado	25
Figura 23: Comparativo entre a <i>baseline</i> e a peça otimizada.....	26
Figura 24: Comparativo entre a peça otimizada com 1.7 mm de espessura e a baseline	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades Mecânicas do tubo Grau A	12
Tabela 2: Problema, incógnita e condições de contorno das análises	15
Tabela 3: Comparativo entre as massas dos produtos finais	27

SUMÁRIO

RESUMO	2
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. TÉCNICAS E MÉTODOS	11
2.2. OTIMIZAÇÃO DE UM CHASSI	11
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1. BASE DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	14
3.2. ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA, DOFS E SIMETRIA	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1. Estudos.....	20
4.2. Método.....	20
4.3. OBJETIVOS ESPERADOS	21
4.4. ANÁLISES E RESULTADOS	22
4.4.1. DOMÍNIO INICIAL E <i>DESIGN REGION</i> (ESPAÇO DE DESENHO)	22
4.4.2. BASELINE	23
4.4.3. RESULTADOS OBTIDOS	23
5. CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

Fascinado pelas histórias de Jules Verne, romancista francês, Konstantin E. Tsiolkovsky, cientista russo, introduziu a ciência e a tecnologia no conceito ficcional de Verne. Os artigos publicados pelo entusiasta russo contam com colaborações extraordinárias para o foguetemodelismo. Konstantin, em 1903, publicou a equação do foguete que levou o próprio sobrenome, a fórmula de Tsiolkovsky, a qual relacionava a velocidade do foguete, a velocidade do gás na saída e a massa do foguete com seu propelente (NASA, 2010). Ainda no início do século XX, o americano Robert H. Goddard fez o primeiro foguete a propelente líquido voar, alcançando modestos 12,5m de altura e 2 segundos e meio de voo. Em 1944, o foguete V-2 alcançou 100 Km de altitude, sendo o primeiro objeto humano registrado a ultrapassar a linha Kármán (MATOS, 2020).

Figura 1: Robert Goddard com o primeiro foguete a propelente líquido



Fonte: (MATOS, 2020)

Figura 2: Foguete V-2



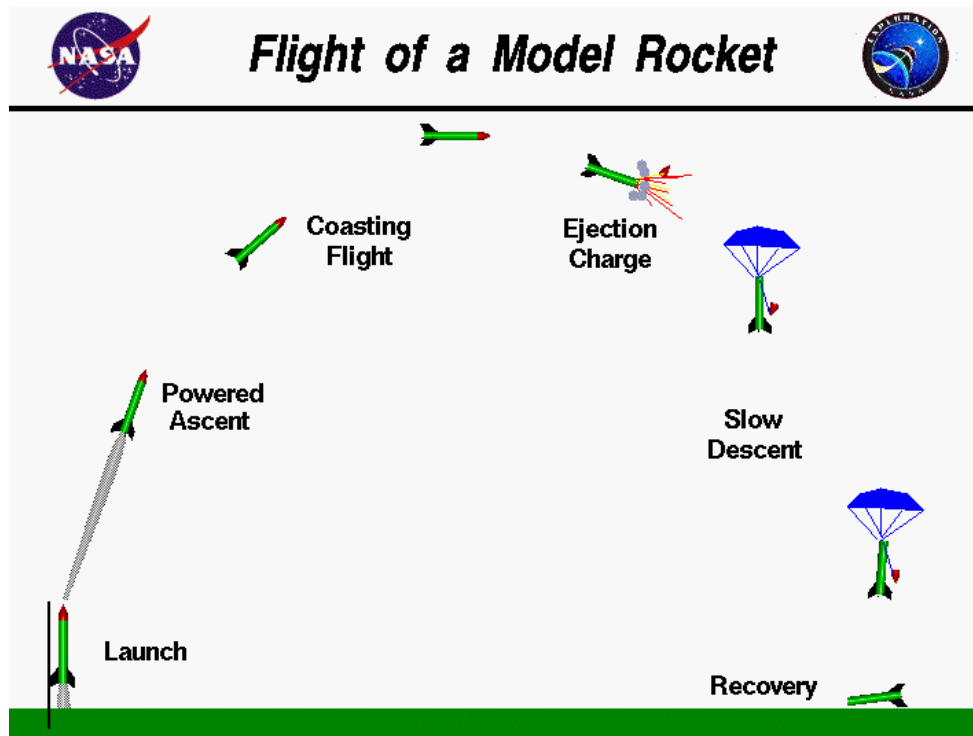
Fonte: (MATOS, 2020)

A evolução do foguetemodelismo trouxe aos campos das universidades a possibilidade de os estudantes criarem seus próprios foguetes utilizando os estudos feitos. Em assistência a ciência, a NASA publicou uma matéria em 13 de maio de 2021 explicando as fases de um mini foguete, figura 3. A imagem americana representa visualmente a etapa de lançamento de um foguete até sua devida recuperação.

Na etapa de *Launch* (lançamento) o motor do foguete é acionado e ele ascende ao céu queimando combustível até a fase de *Powered Ascent* (Subida Motorizada). Após a queima total de propelente, ele entra em estado de inércia, representado pela fase de *Coasting Flight* (Voo de costas). Ao alcançar seu apogeu, máxima altura obtida, o foguete descende por conta da força da gravidade. É então nessa fase que o sistema de recuperação é ativado: a parte da frente do mini foguete é ejetada (*Ejection Charge*), um paraquedas é acionado e o foguete

desce à superfície lentamente (*Slow descent*), até estar totalmente recuperado (*Recovery*) (NASA, 2021).

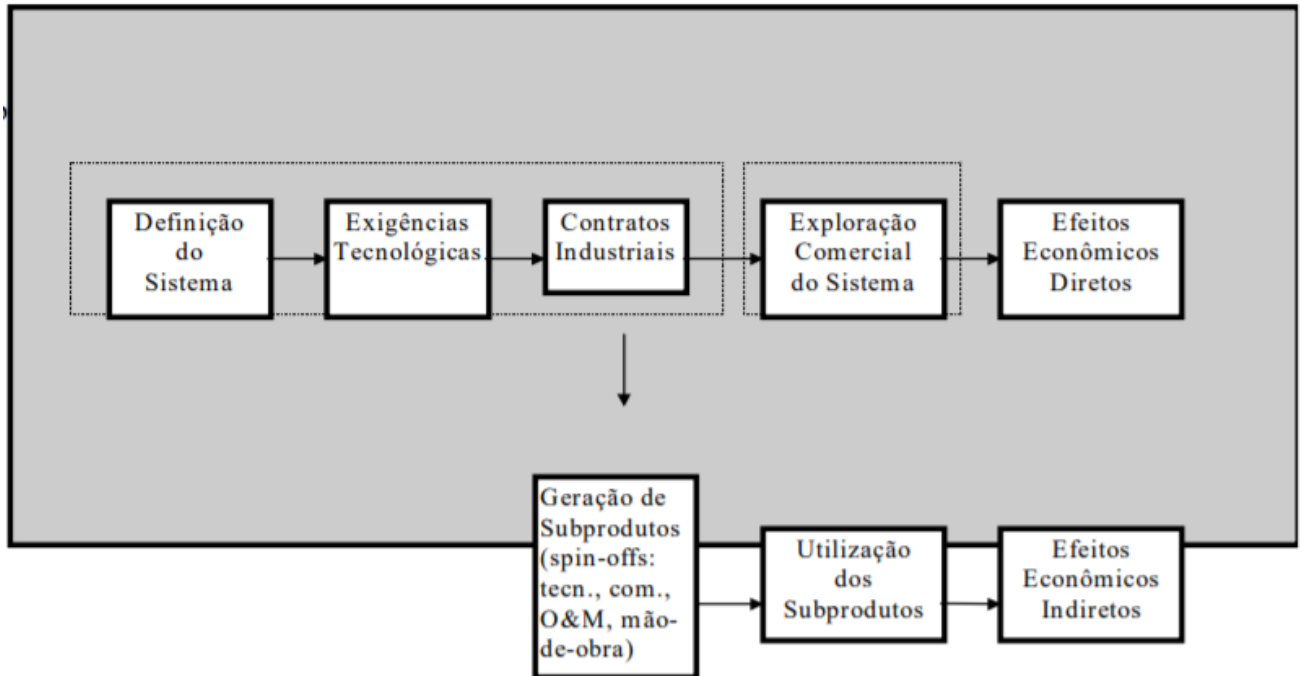
Figura 3: Fases de voo de um foguete modelo



Fonte: (NASA, 2021)

Decerto, é custoso o investimento no setor aeroespacial. Contudo, o estudo realizado por Edson B. Teracine, 1999, argumenta que os benefícios ultrapassam os ônus. Segundo ele, os efeitos econômicos resultantes das explorações espaciais são divididos em dois tipos: os de efeitos diretos e os de efeitos indiretos. Os programas que visam o uso do setor aeroespacial para resultados imediatos, como meteorologia, sensoriamento remoto, comunicação e entre outros são os chamados efeitos diretos. Enquanto isso, os programas que se ocupam de investir na indústria de desenvolvimento de satélites, foguetes e estações de comunicação entre os produtos espaciais são os efeitos indiretos. Decorrente disso, e por se tratar de investimentos de longa duração, os efeitos não são facilmente mensuráveis por conta da dificuldade de definir um procedimento de medida. O esquema abaixo dinamiza o entendimento disso.

Figura 4: Processo de geração de Efeitos Econômicos

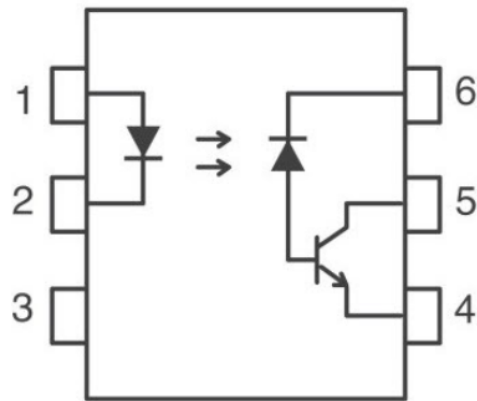


Fonte: (TERACINE, 1999)

Portanto, é visando essas oportunidades do mercado aeroespacial que o presente projeto é escrito. No que tange o tema, é dito que acopladores são peças estruturais e que oferecem proteção ao restante do foguete. Há diferentes tipos de acopladores com diferentes funções em variados projetos. Um exemplo é o acoplador óptico, dispositivo que atua por meio de um feixe de luz num circuito elétrico. Esse aparato serve para isolar dois circuitos, consequentemente, protege-os (SOARES, 2019). No âmbito mecânico, há os acopladores de fuselagem, como os do projeto POLO, arquitetado e construído pela equipe Rocket Design da UFABC.

O acoplador dianteiro, como seu próprio nome mostra, é responsável por acoplar e juntar as partes da fuselagem - que é a parte externa, a estrutura principal que engloba todo o foguete (AMATO et al, 2020) - com o interior que compõem o POLO. 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).

Figura 5: Exemplo de um Acoplador Óptico



Fonte: (SOARES, 2019)

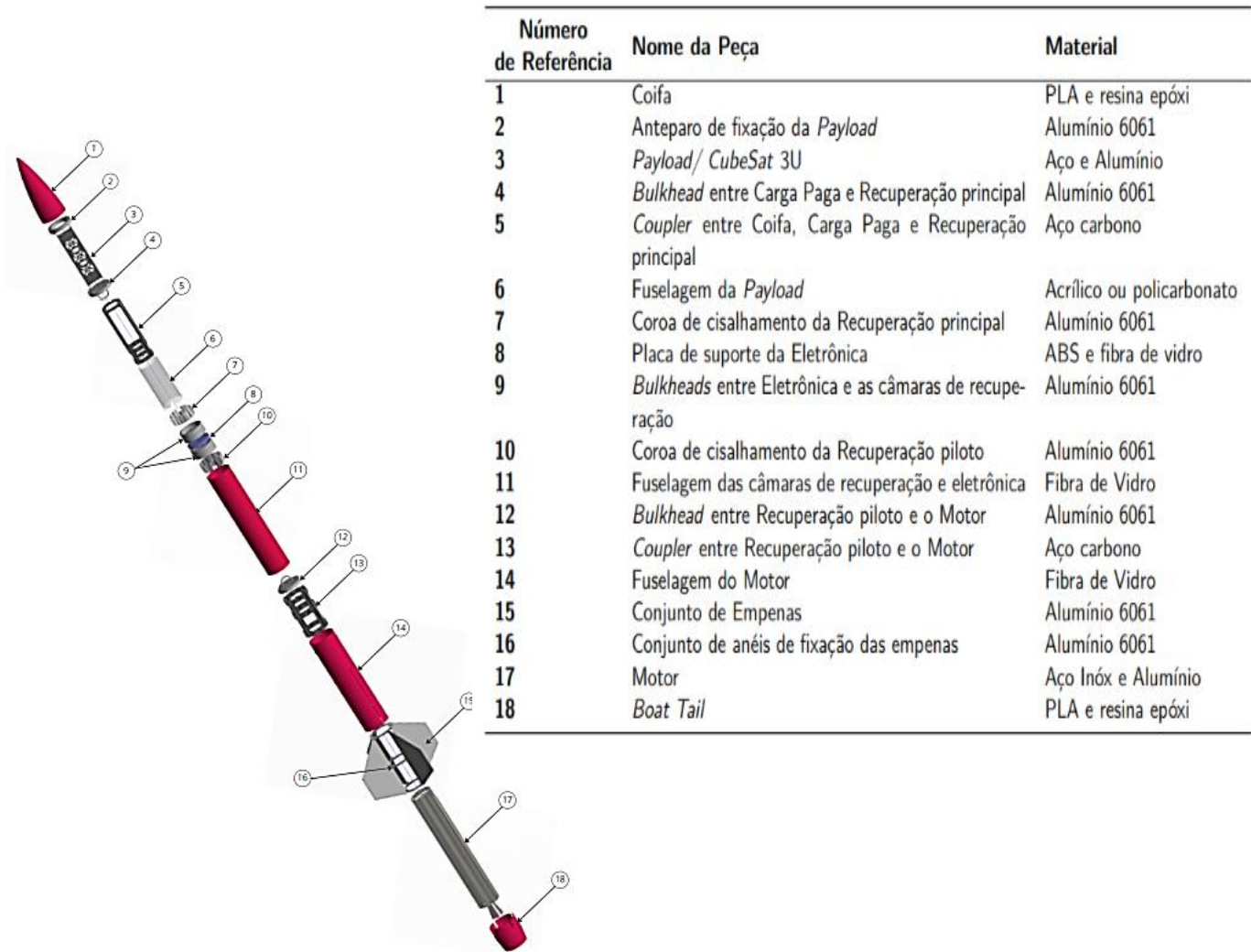
Figura 6: Acoplador de fuselagem dianteiro do POLO



Fonte: (ALBUQUERQUE et al., 2020)

O principal papel do acoplador 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. Por ele ser um invólucro da eletrônica do foguete, o acoplador assume o importante papel estrutural, para que ele ofereça resistência o suficiente para aguentar as forças das quais é submetido e as pequenas explosões controladas para o acionamento dos paraquedas.

Figura 7: Projeto de um foguete experimental e localização dos acopladores



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

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TÉCNICAS E MÉTODOS

A otimização estrutural é um processo número/matemático que visa a obtenção de uma configuração da estrutura que resulta em uma performance ótima segundo alguma medida de desempenho pré-definida (mínima massa, máxima rigidez, máxima carga de flambagem, etc.) (LOPEZ, MIGUEL, 2013). O excerto escrito pelos professores supracitados denota a característica tecnológica do método utilizado. A necessidade de equações complexas e emaranhado de elementos faz com que seja necessário o uso de *softwares* que pudessem auxiliar essa pesquisa. Então, com esse intento, foi utilizado o *software* Altair HyperWorks.

Por se tratar de uma pesquisa feita por um ingressante na UFABC, em conjunto com o projeto PDPD, Pesquisando Desde o Primeiro Dia, o subproduto dessa pesquisa fora a introdução do autor no universo CAE/CAD. Concomitantemente, o objetivo geral visou estudos que trouxeram respostas satisfatórias ao presente projeto, as quais atendem as propostas e exigências.

A literatura ótima conta com inúmeros trabalhos acerca de análises e otimizações de cascas e outros produtos semelhantes ao acoplador de fuselagem. Contudo, é escassa em manuscritos sobre otimização de acopladores.

Doravante, para chegar ao resultado esperado, foi adotado uma postura de entendimento dos projetos semelhantes e a reprodução dos métodos propostos por eles. Além disso, foi contado com a ajuda dos membros da Rocket Design e do professor orientador, Dr. Wallace G. Ferreira.

2.2. OTIMIZAÇÃO DE UM CHASSI

Introduzido o assunto acerca da metodologia ótima, é apresentado os trabalhos realizados para formulação do projeto e seu entendimento.

Na pesquisa de Vendramin, 2016, o objetivo era a otimização estrutural do modelo de chassi, no projeto “Otimização estrutural de chassi de um veículo guiado automaticamente”. Dessarte, foi feita a otimização com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) no software Tosca Structure. A condição de contorno adotada foi a Análise Linear Estática sob embasamento do engenheiro Bathe (1996), o qual dizia que “a fundamentação teórica que envolve a análise linear de elementos finitos, descreve que os deslocamentos oriundos dos carregamentos a qual a estrutura está submetida, são infinitesimalmente pequenos e as

propriedades mecânicas dos materiais da estrutura em questão apresenta somente as características lineares elásticas” (VENDRAMIN, 2016).

O material escolhido por ele foi o aço-carbono Grau, que, conforme a Norma NBR 8261, apresenta as seguintes propriedades mecânicas.

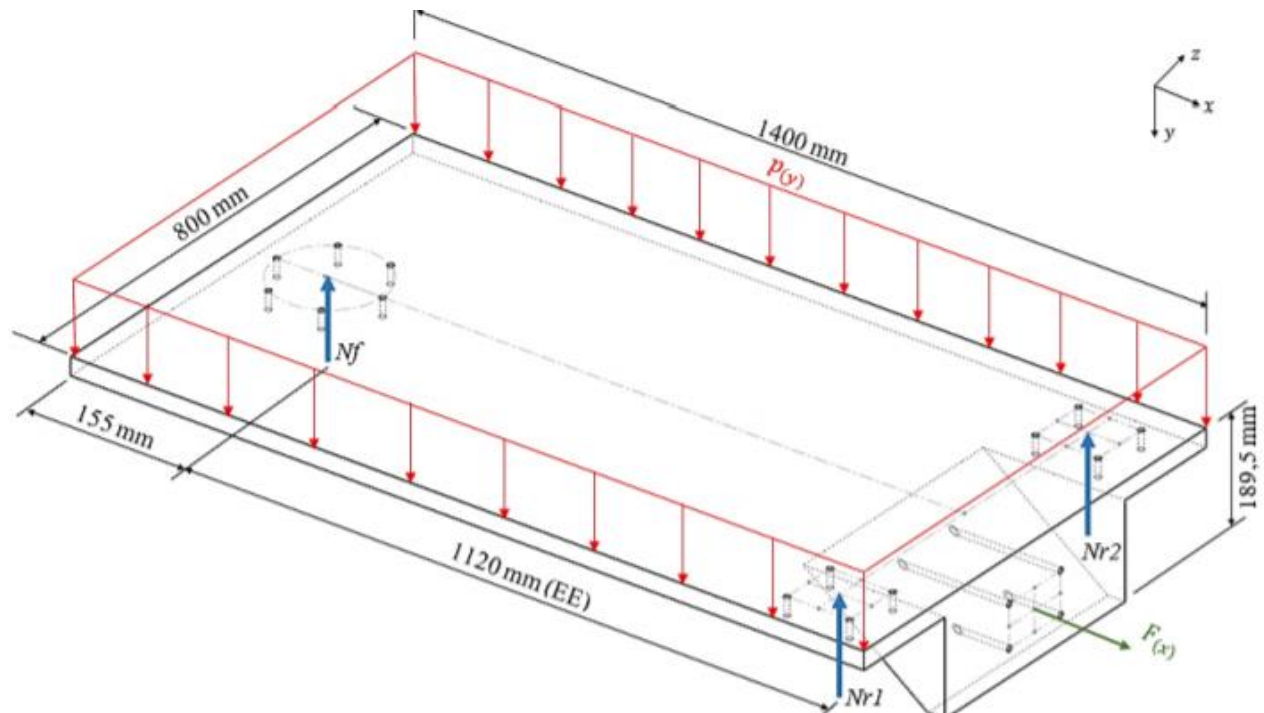
Tabela 1: Propriedades Mecânicas do tubo Grau A

Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Coefficiente de Poisson	Densidade (g/cm ³)
269	310	210	19	0,3	7,85

Fonte: (VENDRAMIN, 2016)

A figura 8 representa o domínio inicial do chassi, bem como suas condições de contorno e seus carregamentos. Os carregamentos estão uniformemente distribuídos em torno das bordas, mostrado pelas setas vermelhas, e três pontos de apoio, simbolizado pelas setas azuis, sendo duas nas rodas traseiras e o terceiro ponto de reação no eixo de giro dianteiro, o N_f .

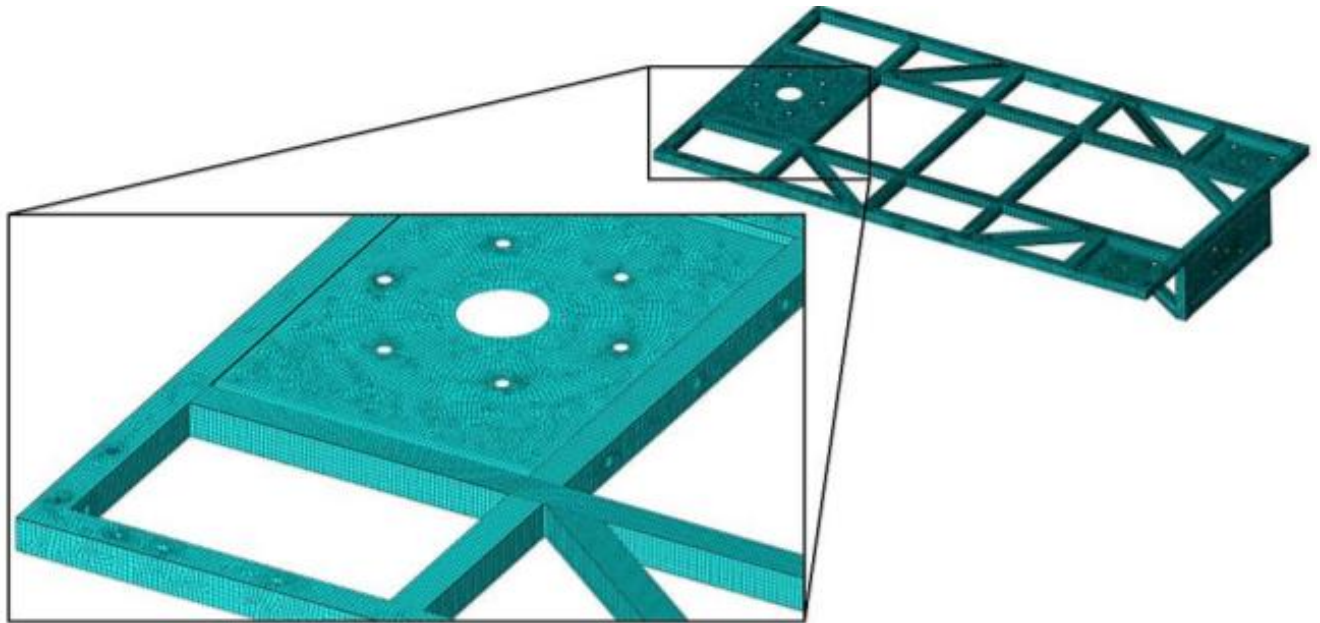
Figura 8: Domínio inicial do projeto de Vendramin, carregamentos e restrições



Fonte: (VENDRAMIN, 2016)

A figura 9 mostra a discretização da malha utilizando o *software* abaqus 6.14. A malha apresenta uma mistura de objetos com a geometria triangular e quadrática, totalizando 163.267 elementos.

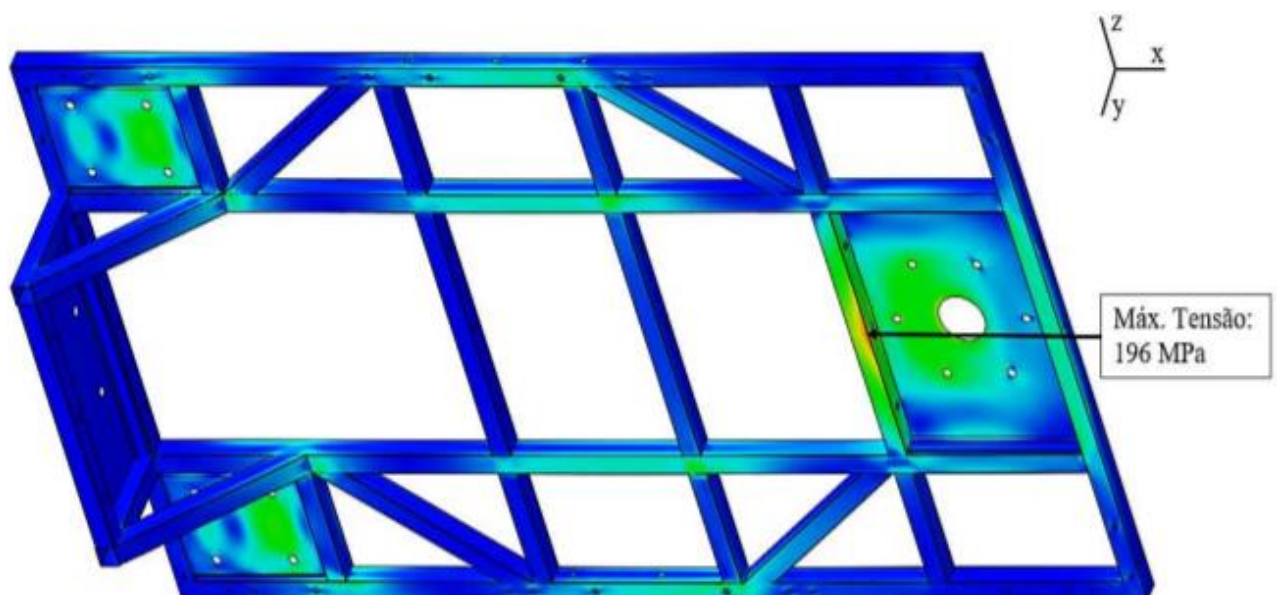
Figura 9: Discretização do modelo original



Fonte: (VENDRAMIN, 2016)

E por fim, o resultado do software é mostrado na figura 10. A tensão máxima atingida pela peça foi de 196 MPa, uma diferença considerável para a resistência de tração de 310 MPa.

Figura 10: Representação do ponto crítico de tensão máxima da estrutura



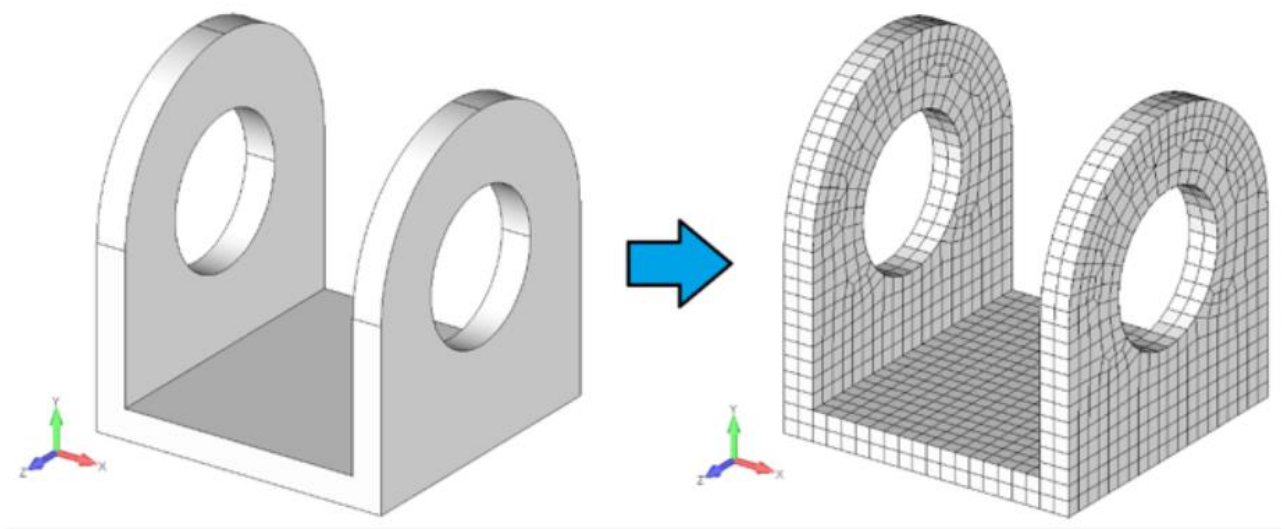
Fonte: (VENDRAMIN, 2016)

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Evidentemente, o auxílio das máquinas encurtam o tempo de desenho, processamento e manufatura de um produto desejado. Isso ocorre por conta de que os cálculos diferenciais são inúmeros para um só projeto. Essas máquinas adotam o método CAE – *Computer Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador), onde o engenheiro tem a função de interpretar os resultados e utilizar deles para o reprocessamento ou construção do manufaturado.

Dentro do *software*, a peça escolhida é “quebrada” e reconstruída em outras geometrias conhecidas e menores, exemplificado pela figura 11. Essa quebra facilita os cálculos do *software* para prever o comportamento do material em determinada condição. Os pontos de encontro entre essas geometrias são chamados nós, e são eles que recebem um carregamento quando definido (BRASIL, 2020).

Figura 11: Discretização de uma peça para elementos quadráticos



Fonte: (BRASIL, 2020)

3.1. BASE DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método monta funções de interpolação para reduzir o comportamento de infinitos elementos do espaço para um número finito. A interconectividade desse número finito é feita por geometrias ligadas ao nó. Esse fato faz com que o MEF possibilite a solução sistemática de problemas com boa aproximação das soluções analíticas. A praticidade da análise disso só

é possível através de *softwares*, os quais analisam o problema proposto, com as incógnitas presentes e nas devidas condições de contorno, conforme a tabela 2 (TSCHIPTSCHIN).

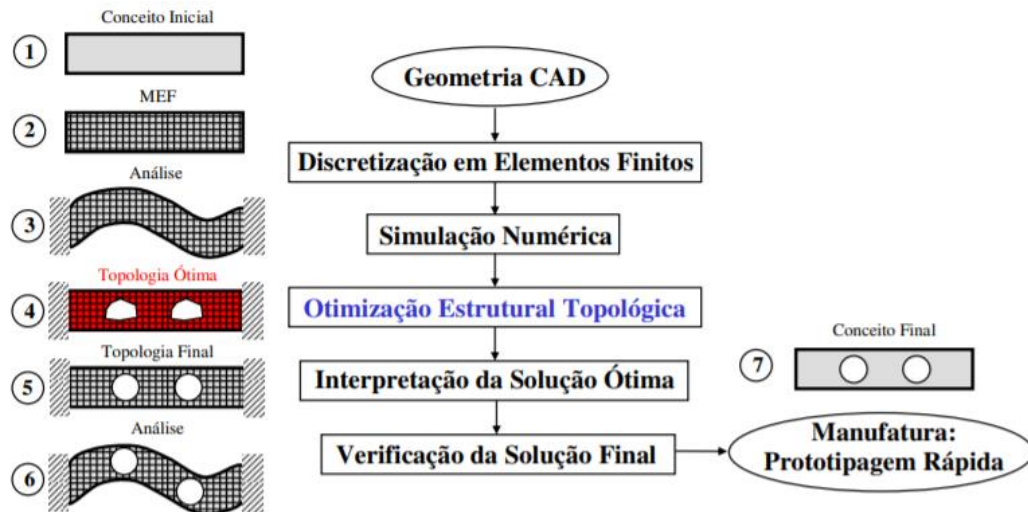
Tabela 2: Problema, incógnita e condições de contorno das análises

PROBLEMA	INCÓGNITA	CONDIÇÕES DE CONTOURNO
Estrutural	Deslocamento	Tensão e deslocamento
Térmico	Temperatura	Fluxo de calor, convecção ou radiação
Elétrico	Voltagem	Fonte de corrente
Magnético	Força eletromotriz	Campo magnético
Escoamento de fluídos	Pressão, velocidade	Velocidade
Difusão	Concentração mássica	Fluxo dos componentes
Corrosão	Taxa de consumo de anodo	Potencial elétrico
Proapgação de trincas	Liberação de energia de deformação	Tensão

Fonte: (TSCHIPTSCHIN)

O esquema da figura 12 representa a otimização estrutural no contexto de CAE nitidamente. Nele, é possível observar um conceito inicial transformado em malha pelo MEF, o qual entrega uma determinada resposta. Dada a topologia ótima, o engenheiro a interpreta, julga se deve ou não refazer o processo baseado em suas variáveis de projeto, e tem sua topologia final, até a sua manufatura.

Figura 12: Esquema de otimização estrutural



Fonte: (PORTO, 2006)

O processo de otimização conta com uma sequência de fatores:

- Geração da Malha: O *software* transforma a peça em um produto formado por finitas geometrias. Além disso, é definido o material a ser utilizado;
- Carregamentos e Restrições: É inserido na peça as forças que atuam sobre ela, bem como os pontos de apoio fixas a ela;
- Identificação do problema: Parte onde o engenheiro define seus objetivos, tendo em vista as incógnitas propostas na tabela e as condições de contorno;
- Análise: Posto que o software, adjunto do engenheiro, cumpriram todas as outras etapas, agora cabe a interpretação da análise;
- Finalização/Reformulação: Feita a interpretação, cabe ao engenheiro decidir se deve refazer o projeto ou industrializa-lo.

Na figura 13, é observado a etapa de carregamentos e restrições, a qual conta com dois pontos, A e B, sendo o primeiro representativo dos pontos de apoio e fixação da barra, enquanto o outro simboliza as forças que atuam naquela parte da barra.

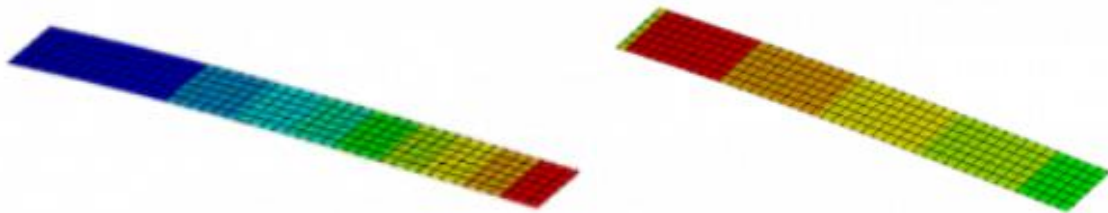
Figura 13: Modelo de barra com os carregamentos e restrições sob ela



Fonte: (GUILHERME, 2016)

Passada a etapa de carregamentos e restrições, segue-se a parte da análise, a qual o computador entregará os melhores resultados que satisfaçam o problema requerido. Na figura 13, é possível identificar duas barras coloridas, a primeira representa o módulo do deslocamento, e a segunda a tensão exercida sob a placa. Nota-se que os pontos de maior intensidade do vermelho são os pontos onde há maiores deslocamentos e tensões, respectivamente.

Figura 14: Análise de deslocamento e tensão, respectivamente



Fonte: (GUILHERME, 2016)

O resultado encontrado será analisado pelo engenheiro e então submetido às variáveis de projeto.

3.2. ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA, DOFS E SIMETRIA

No âmbito computacional, a maior parte dos problemas de elementos finitos podem ser resolvidos pela análise linear estática por conta de que as deformações são pequenas e o comportamento dos materiais é linear estático. Ademais, as soluções em geral são rápidas (TSCHIPTSCHIN, 2011).

O método dos elementos finitos, para problemas lineares, configura um sistema de equações mostradas na forma de:

$$[F] = [K][u]$$

onde: $[F]$ é a coluna que representa as forças

$[u]$ é a coluna que representa os vetores de deslocamento

$[K]$ é uma matriz quadrada

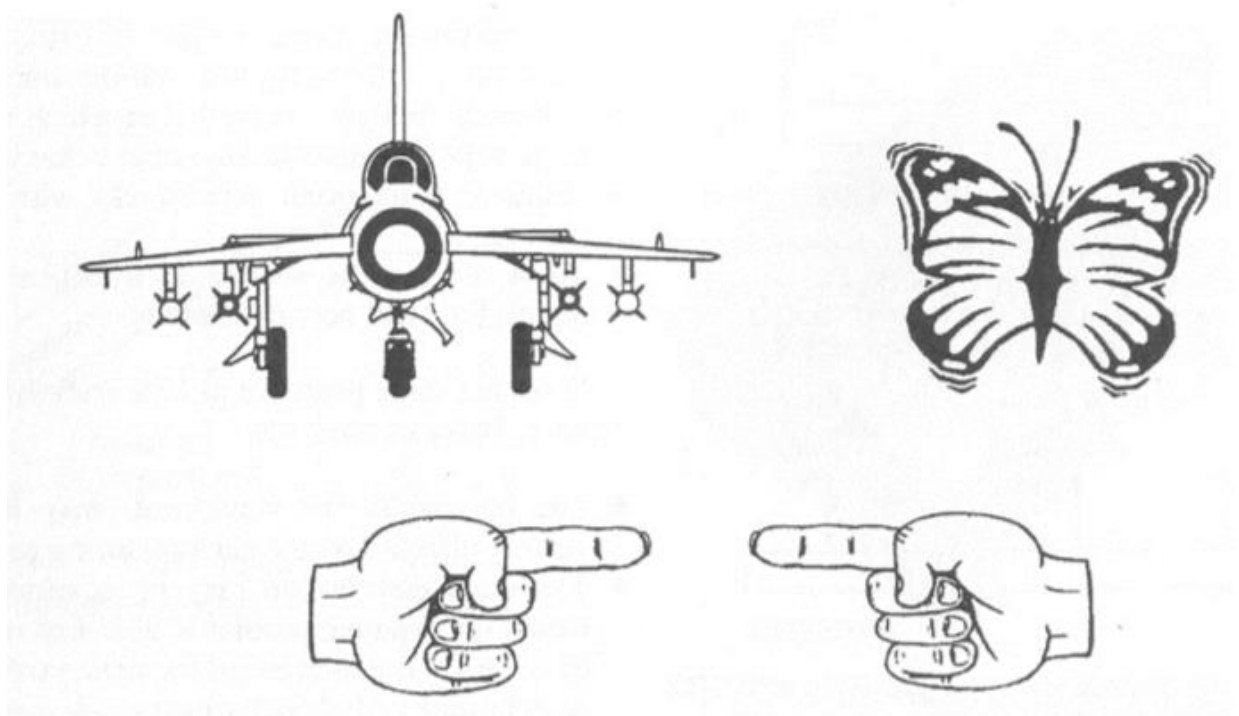
O tamanho da matriz quadrática é o produto do número de nós multiplicado pelos graus de liberdade, assim sendo, quanto maior for o número de nós, mais preciso é o resultado (TCSHIPTSCHIN, 2011).

Os dofs (*degrees of freedom*/graus de liberdade) são movimentos independentes que especificam a posição deslocada e a orientação do corpo. Existem 6 dofs, sendo 3 para restrição dos eixos de rotação (em torno de seu próprio eixo), e 3 para restrição de translação (em torno de um eixo externo) (TCSHIPTSCHI, 2011).

Quando se diz respeito a simetria, é de se pensar em um corpo segmentado onde há duas ou mais partes passíveis de serem equivalentes. No contexto CAE, a simetria pode ser analisada visando diferentes ângulos.

Uma simetria cortada por uma linha imaginária, ou um plano imaginário e determinado, impõe no corpo um segmento. A equivalência dessas partes é a chamada simetria bilateral. O exemplo dessa simetria é a segunda imagem da figura 15, a qual representa uma borboleta com as asas perfeitamente idênticas. Portanto, o eixo de simetria estabelecido sobre ela é o meio de seu corpo no sentido vertical.

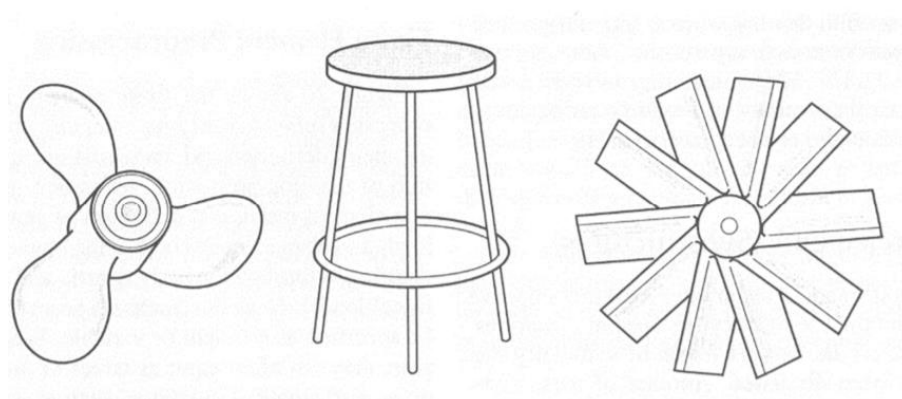
Figura 15: Simetria bilateral



Fonte: (TSCHIPTSCHIN, 2011)

Ademais, há a chamada simetria rotacional, a qual segmenta um organismo a partir de um eixo de rotação, tomando consigo ângulos de simetria. Esse tipo de divisão é bastante utilizado em peças com padrão circular, conforme mostrado na figura 16. É notável a presença de uma um eixo de giro e ângulos perfeitamente alinhados. A primeira imagem (um ventilador) representa um corte de 120 graus, pois há três hélices (TSCHIPTSCHIN, 2011).

Figura 16: Simetria Rotacional



Fonte: (TSCHIPTSCHIN, 2011)

É sob esses conceitos que o presente projeto foi redigido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mostrado todo o estudo realizado por trás desse trabalho, foi-se escolhido três *softwares* eficiente para realizar a otimização do acoplador dianteiro do foguete POLO. São eles:

- Altair HyperWorks: onde foi capaz de fazer grande parte dos procedimentos de otimização da peça. Nele foi possível inserir os problemas, as incógnitas, definir as condições de contorno e outras variáveis de projeto, como a espessura da casa;
- Altair HyperViewer: esse *software* foi utilizado com o único intuito de visualizar as respostas encontradas pelo *software* anterior;
- AutoCAD: por fim, o programa para redesenhar a peça.

Além disso, também foi contado com a ajuda do *software* HyperMesh, o qual foi utilizado pelo professor orientador do presente projeto, Wallace G. Ferreira, para geração da malha e inserção dos carregamentos e restrições

4.1. Estudos

Devido a natureza do projeto, as pesquisas realizadas partiram de sequências de estudo de textos científicos para elaboração do método científico, seguidos de tutoriais de utilização dos softwares escolhidos, e por fim, a busca por referências bibliográficas para embasamento científico.

A atuação da UFABC Rocket Design foi de suma importância para o desenvolvimento desse projeto, uma vez que a otimização se dá no acoplador dianteiro do foguete POLO. Ademais, a equipe realizou, no decorrer do ano de 2021, inúmeras palestras acerca dos *softwares* utilizados. A equipe também contava com membros veteranos da UFABC os quais auxiliaram devidamente e na medida do possível o projeto de PDPD 2020-2021.

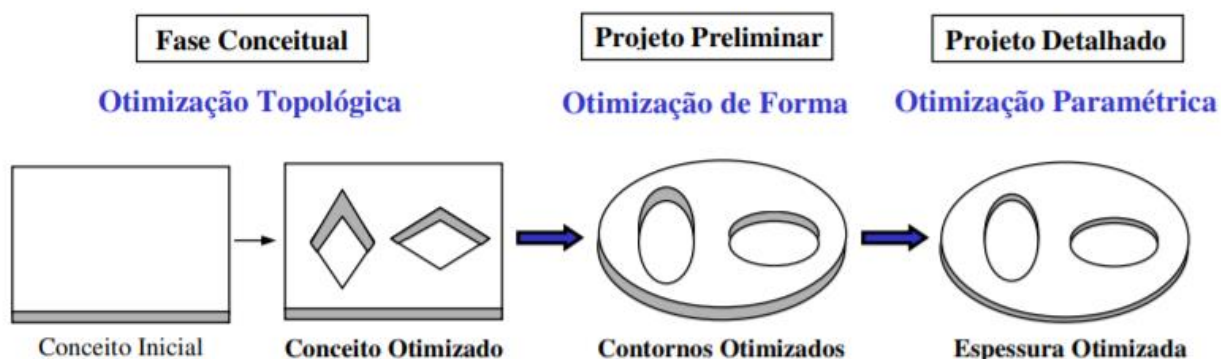
E por fim, a presença do Professor e Orientador Wallace Gusmão Ferreira alavancou toda a pesquisa, pois foi a partir das orientações dele que todo o projeto foi construído, desde o cronograma, a execução.

4.2. Método

Para a realização da otimização da peça escolhida, foi adotado um método simples e eficaz, o qual foi suficiente para chegar aos resultados mostrados na sessão de otimização (capítulo 3.3). A metodologia é fundamentada no esquema da figura 17. Na imagem é possível identificar três tipos de otimização, definidas por Porto, 2006, como sendo:

- Otimização topológica: é a parte do processo que identifica furos para extrusão e visa a determinação ótima do número. Os furos são desconsiderados do corpo e uma nova forma, com uma diferente distribuição do material, é assumida pela peça. Essa fase não conta com auxílio computacional e é altamente dependente do engenheiro;
- Otimização de forma: os furos são otimizados a fim de assumirem uma forma com menor tensão acumulada nos chamados cantos vivos, encontros entre os lados internos, assumindo um caráter arredondado;
- Otimização Paramétrica: encontrada a melhor geometria para o organismo, é então feito a otimização para redução de algum parâmetro geométrico, podendo ser: comprimento, espessura, largura, dentre outros.

Figura 17: Fases da otimização



Fonte: (PORTO, 2006)

4.3. OBJETIVOS ESPERADOS

O objetivo geral do projeto é a otimização do acoplador dianteiro do foguete POLO. Restritivamente, era esperado que no fim do presente projeto houvesse redução da massa da peça estudada. Para isso, era entendido que a redução total da massa só seria possível com a diminuição da tensão superficial. Então, o estudo realizado foi feito para encontrar uma nova geometria, a qual deveria ser capaz de reduzir a tensão de von misses acumulada nos pontos críticos do organismo.

Como subproduto do trabalho, o integrante 2020 da UFABC Lucas Aguiar Barbosa, atuante no projeto de PDPD, acumularia conhecimentos importantes para o decorrer de sua vida acadêmica.

4.4. ANÁLISES E RESULTADOS

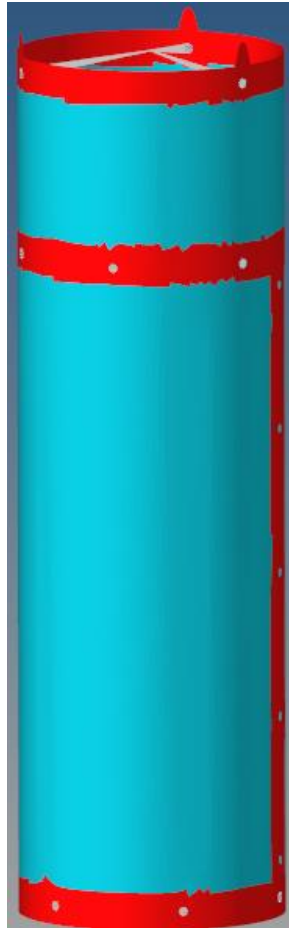
Seguindo a metodologia, é apresentado o trabalho feito.

4.4.1. DOMÍNIO INICIAL E *DESIGN REGION* (ESPAÇO DE DESENHO)

Tendo o conhecimento da estrutura do acoplador, foi feito via *software*, um modelo base, chamado de domínio inicial, o qual será papel para toda a otimização conseguinte. O processo de geração de malha via *software* foi feito pelo orientador da pesquisa utilizando o programa HyperMesh. A figura 18 mostra o modelo base. Nela, é possível identificar um tubo com um material genérico de espessura igual a 2.65mm, diâmetro interno igual a 147,10mm e altura igual 478mm e preenchido pelas cores azul e vermelho. A parte maior e colorida por azul é a região de *design*, espaço onde o *software* identificará como possível o remodelamento. As

linhas em vermelho são os locais de *non-design*, os quais o programa irá ignorar e deixar intacto.

Figura 18: Domínio inicial e espaço de desenho

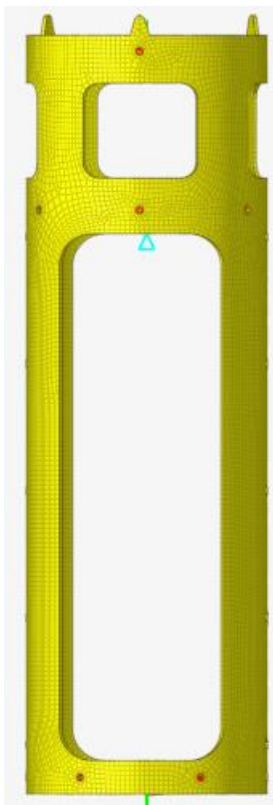


Fonte: (Autor)

4.4.2. BASELINE

A equipe *Rocket Design*, da UFABC, já contava com um acoplador, a chamada *baseline*, que satisfazia as exigências do foguete. Contudo, não foi feito um estudo de otimização por trás dessa peça. A figura 19 mostra a *baseline*, a qual foi fundamental para o corpo otimizada final, uma vez que os números de tensão do produto final foram baseados nesse acoplador.

Figura 19: Acoplador utilizado pela equipe *Rocket Design*



Fonte: (Autor)

4.4.3. RESULTADOS OBTIDOS

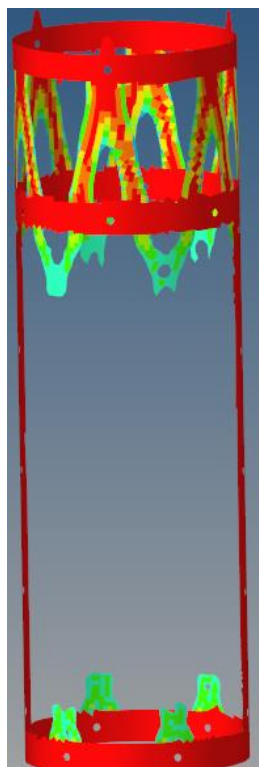
Com o intento de se obter uma redução significativa na massa do objeto, foi feito diversas iterações com o intuito de encontrar o melhor resultado. As figuras 20 e 21 mostram os dois melhores resultados para a otimização. Para um entendimento mais preciso, essa parte foi dividida em duas etapas.

- Primeira etapa:
 - Configurou-se aqui a condição de contorno linear estática, assim como a variável de deslocamento e o objetivo de redução de tensão no *software* Altair HyperWorks;
 - Foi dado à variável de deslocamento uma função máxima, a qual impossibilitava o deslocamento maior que 1mm em todas as direções;
 - Definiu-se em duas iterações o eixo de simetria. Primeiramente três planos cortavam o corpo sólido em relação ao eixo Y, formando assim, seis partes de ângulos iguais a 60 graus no padrão circular (figura 20). E conseguinte, a mesma forma de simetria rotacional, só que dessa vez definindo apenas três partes de ângulos iguais a 120 graus (figura 21);

- Então, rodou-se a otimização no *software* da Altair, e foi encontrado os resultados das figuras 20 e 21;
- E por fim, foi criado no AutoCAD uma peça com a geometria demonstrada pela figura 22.

Nas figuras 20 e 21 é notório a diferença no padrão do topo do acoplador, o qual no primeiro há formas que agradavam mais a geometria, e no segundo, formas distorcidas de simetria. Enquanto isso, a parte inferior da segunda iteração contém uma forma satisfatória ao projeto. Interpretado o resultado, foi feito um corpo onde houvesse a fusão do topo da primeira iteração com a base da segunda iteração, e o resultado está mostrado na figura 22.

Figura 20: Primeira iteração do acoplador



Fonte: (Autor)

Figura 21: Segunda iteração do acoplador



Fonte: (Autor)

Figura 22: Acoplador Otimizado

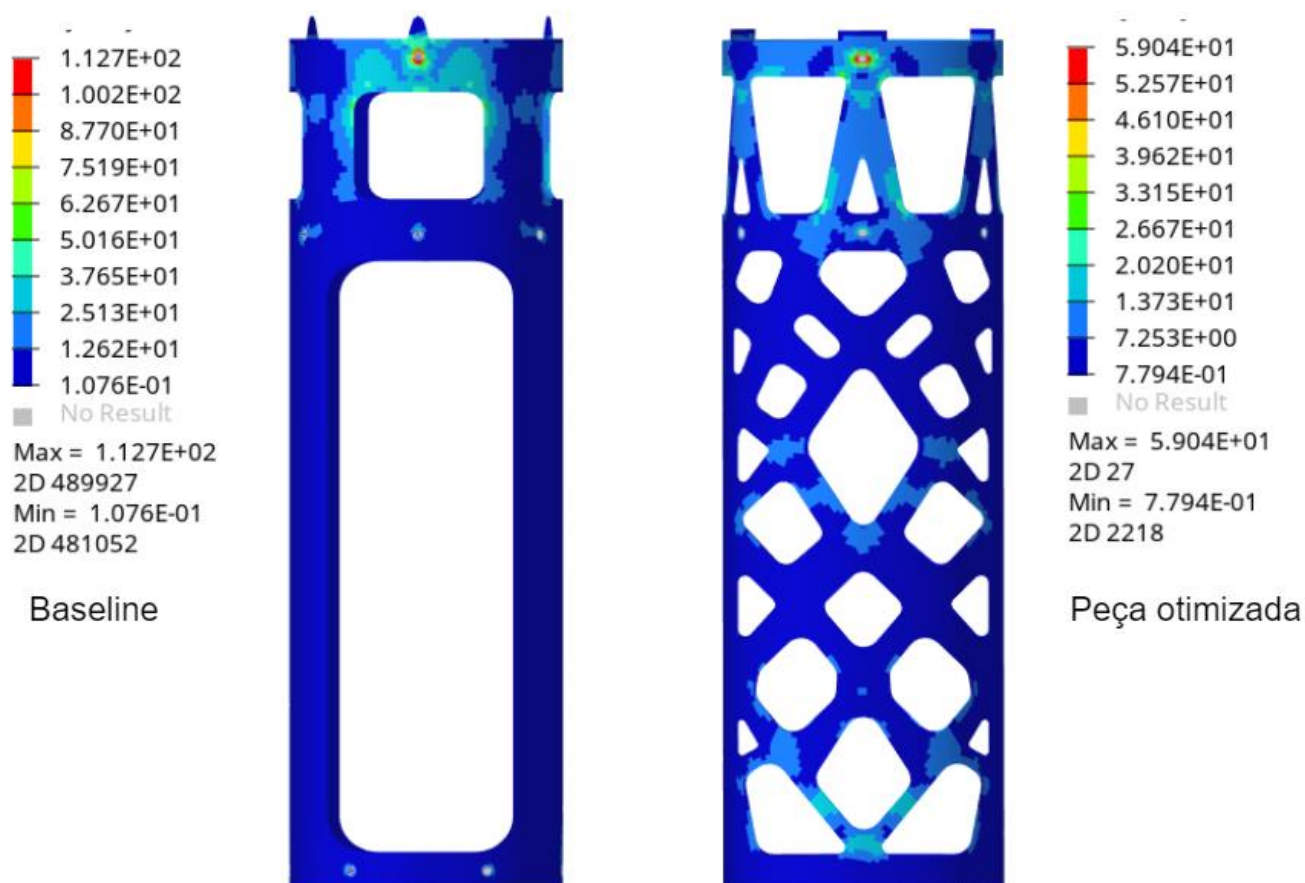


Fonte: (Autor)

- Segunda etapa:

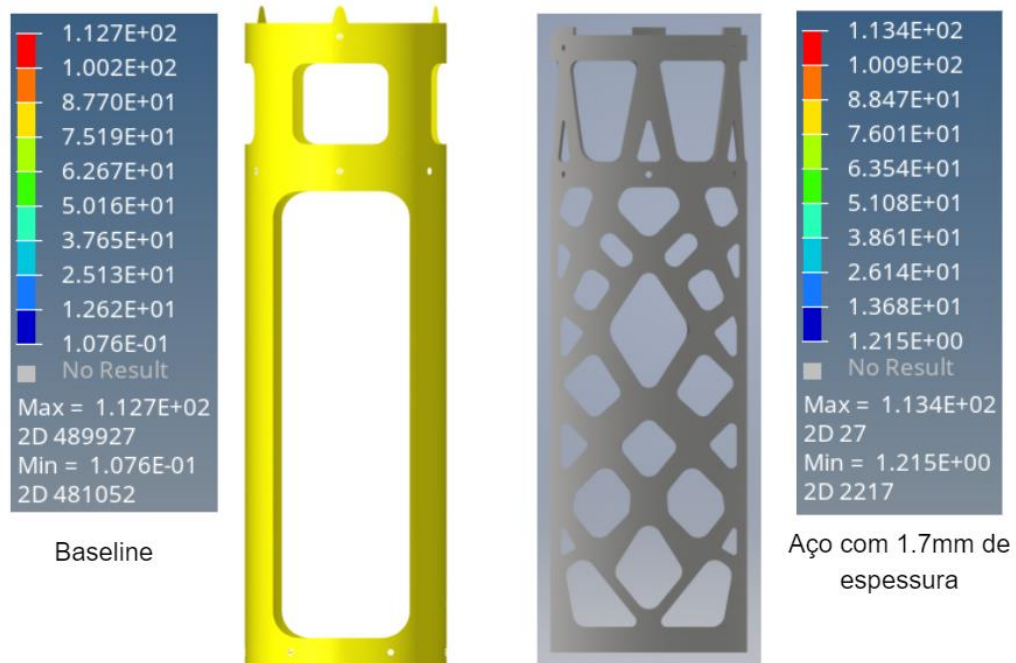
- Após o desenho da peça no CAD que satisfizesse a análise, colocou-se o corpo sob as mesmas condições de carregamento, restrição e contorno do modelo base, a fim de se analisar as tensões máximas obtidas;
- Notou-se a nova tensão obtida e verificou-se que ela estava muito abaixo das tensões da baseline, cerca de 91% (figura 23);
- Fizera então uma otimização paramétrica, reduzindo a espessura a fim de que se possa ter uma redução na massa;
- Chegou-se na espessura de 1.7 mm de aço com as Von Misses mostrados na figura 24, onde se nota uma equivalência entre as tensões;
- Por fim, foi feito uma última análise com outro material, o PLA, alcançando 4,4 mm de espessura, e tensão cinco vezes menor devido à relação de densidade do aço com a do PLA.

Figura 23: Comparativo entre a *baseline* e a peça otimizada



Fonte: (Autor)

Figura 24: Comparativo entre a peça otimizada com 1.7 mm de espessura e a baseline



Fonte: (Autor)

Por fim, foi encontrado os valores demonstrados na tabela 3. Note que a peça otimizada com 2.65 mm de espessura teve um aumento de massa equivalente a 12%, enquanto o aço com 1,7 mm, reduziu 28% e o PLA 64%.

Tabela 3: Comparativo entre as massas dos produtos finais

Baseline	Otimizado	Aço	PLA
2,65mm		1,70mm	4,80mm
2,78kg	3,14kg	2,01kg	1,14kg
-	12%	28%	64%

Fonte: (Autor)

5. CONCLUSÃO

Ao que consta no intento do projeto, foi de suma importância todo o levantamento bibliográfico feito, do qual foi possível extrair uma metodologia eficiente e direta para a otimização do acoplador dianteiro.

No que tange a equipe Rocket Design, o trabalho feito será de grande valia, não só para o foguete POLO e suas competições, como também para futuras pesquisas acerca da otimização estrutural, servindo como base para novos PDPD's.

Ao que diz respeito aos futuros novos ingressantes do PDPD, um trabalho escrito e redigido por um semelhante fundamentará pesquisas mais aprofundadas, oriundos dos métodos matemáticos. Há diversos artigos espalhados acerca de otimização, portanto uma vasta base bibliográfica hei de se formar.

Agora, sobre o presente projeto, é avaliado que os critérios abordados somam positivamente ao produto final. Ao lado disso, ainda se torna necessário trabalhos futuros que avaliem mais criteriosamente o assunto abordado, tendo em destaque:

- Estudo mais aprofundado acerca da aerodinâmica do foguete e todos os casos de influência no corpo;
- Utilização de outros materiais a fim de reduzir ainda mais a massa do objeto;
- Aplicação do método empírico para validação do embasamento teórico do acoplador.

Por fim, conclui-se que os resultados foram satisfatórios, no qual foi visado uma metodologia interdisciplinar para otimização do acoplador dianteiro do foguete POLO. Ademais, os subprodutos abstratos do projeto serão de suma importância no decorrer de toda a carreira acadêmica do autor.

REFERÊNCIAS

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.

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.

GIMENES, R.; MORIGUCHI, S. K. Aplicação De Técnicas De Otimização Topológica Via Software, 2016.

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.

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.

DUNBAR, Brian. Konstantin E. Tsiolkovsky: A Closer Look. [S. l.], 25 fev. 2014. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/audience/foreducators/rocketry/home/konstantin-tsiolkovsky.html>>. Acesso em: 16 set. 2021.

MATOS, Matheus de. Qual foi o primeiro foguete da história?: ESPAÇO. [S. l.], 17 mar. 2020. Disponível em: <<https://dobraespacial.com.br/espaco/qual-foi-o-primeiro-foguete-da-historia/>>. Acesso em: 16/09/2021.

BENSON, Tom. Flight of a model rocket. [S. l.], 13 maio 2021. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/rktflight.html>>. Acesso em: 16/09/2021.

SOARES, Nelson Vicente. Acoplador Óptico – O que é e para que serve?: Diversos. [S. l.], 13 fev. 2019. Disponível em: <<https://blog.render.com.br/diversos/acoplador-optico-o-que-e-e-para-que-serve/>>. Acesso em: 16/09/2021.

LOPEZ, R H; MIGUEL, L F F. Introdução a otimização topológica. 2013. Disponível em: <https://ppgec.posgrad.ufsc.br/files/2013/05/Topicos_Pesquisa_UFSC-otimiza%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 16/09/2021.

VENDRAMIN, R. Otimização estrutural de chassi de um veículo guiado automaticamente. 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/3647/TCC%20Rafael%20Vendramin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 18/09/2021.

TERACINE, E B. Os Benefícios Sócio-Econômicos das Atividades Espaciais no Brasil. 1999. Disponível em: <http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/80/73>. Acesso em: 18/09/2021

BRASIL, Rafael. Para leigos: entenda o Método dos Elementos Finitos. [S. l.], 17 nov. 2020. Disponível em: <<https://kotengenharia.com.br/para-leigos-entenda-o-metodo-dos-elementos-finitos/>>. Acesso em: 18/09/2021.

TSCHIPTSCHIN, A P. Seleção de Materiais e Análise de Falhas. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/pmt2501/Elementos%20finitos.pdf>>. Acesso em: 18/09/2021.

TSCHIPTSCHIN, A P. Método de Elementos Finitos Aplicado à Seleção de Materiais. 09/06/2021. Disponível em: