

# **Otimização Topológica de Estrutura de Foguetes Experimentais Utilizando-se o Software Inventor**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC**

**Bolsista: Tiago Ribeiro dos Santos Neto**

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Araujo da Silva**

Palavras-chave: Otimização Topológica, Método dos Elementos Finitos, Métodos Computacionais, foguetismo

Área de conhecimento: Mecânica dos sólidos, Resistência dos materiais.

## **Resumo**

A otimização topológica é um processo cuja finalidade é reduzir as dimensões e o excesso de material em uma dada peça que realiza uma determinada função, maximizando sua eficiência e minimizando sua massa. O processo de otimização será realizado através do programa Inventor da Autodesk, o qual aplica o Método dos Elementos Finitos junto com alguns métodos computacionais, determinado assim o projeto ótimo da peça. Serão otimizadas peças de um foguete experimental. Após o processo de otimização será construído um protótipo que poderá ser testado fisicamente. Os projetos obtidos, bem como os resultados dos testes, serão comparados com peças de foguetes já existentes. O número de projetos de pesquisa na área de otimização topológica tem experimentado um grande crescimento, é o que se observa em trabalhos publicados e em congressos e revistas de engenharia. Este crescimento deve-se ao fato de ser muito importante para o mercado mundial de manufatura que se tenha peças eficientes com uma mínima massa possível. Pelo fato da otimização reduzir o tamanho e retirar partes de peças de forma que não prejudique o seu funcionamento, é uma área que reduz os custos de produção de diversas peças, diminuindo o consumo matéria prima e consequentemente o custo econômico. As peças a serem otimizadas, componentes estruturais de um foguete experimental, são similares àquelas utilizadas pelo grupo UFABC Rocket Design. Este é uma equipe formada por estudantes da Universidade Federal do ABC com o objetivo de projetar e desenvolver foguetes experimentais. A equipe integra o Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento Aeroespacial (GPDA).

## **Abstract**

The topological optimization is a process whose purpose is to reduce the dimensions and the excess of material in a given part that performs a certain function, maximizing its efficiency and minimizing its mass. The optimization process will be performed through the Autodesk Inventor program, which applies the Finite Element Method (FEA) together with some computational methods, thus determining the optimum part design. Parts of an experimental rocket will be optimized. After the optimization process will be built a prototype that can be physically tested. The designs obtained, as well as the test results, will be compared to existing rocket parts. The number of research projects in the area of topological optimization has experienced great growth, as seen in published papers and in conferences and engineering journals. This growth is due to the fact that it is very important for the world market of manufacturing that has efficient parts with a minimum possible mass. Because the optimization reduces size and removes parts of parts in a way that does not detract from its operation, it is an area that reduces the production costs of several parts, reducing the raw material consumption and consequently the economic cost.

## **Introdução**

O presente trabalho visa a otimização topológica de componentes estruturais de foguetes experimentais. Foguetes experimentais tem sido desenvolvido por grupos de pesquisa em várias Universidades no mundo inteiro, inclusive existem competições para medir o desempenho destes foguetes. Na UFABC existe também um grupo denominado UFABC Rocket Design que é uma equipe formada por estudantes com o objetivo de projetar e desenvolver foguetes experimentais. Os resultados desta pesquisa servirão, dentre outras, para dar subsídio ao projeto experimental de foguetes, principalmente na UFABC.

A otimização topológica consiste em um método de natureza numérica que tem como finalidade definir um domínio ótimo (geometria interna ótima) para uma estrutura, dada as condições as quais essa estrutura será submetida, como por exemplo um conjunto de forças, pressão etc.

A importância do estudo de processos como a otimização se mostra necessário dentro da engenharia e da área de tecnologia, principalmente no que diz a respeito da economia de recursos materiais e também de tempo. A possibilidade de se colocar o estudo de estruturas

dentro de um método numérico ou simulação computacional torna a metodologia de estudo mais automatizada.

A otimização também pode ser aplicada na análise de necessidades e objetivos de um sistema estrutural para gerar o projeto ótimo. Dá-se início ao procedimento criando um layout inicial do sistema em questão, à medida que as restrições são verificadas, a geometria da estrutura vai sendo atualizada. Após algumas interações, tem-se uma otimização das características geométricas, levando em consideração todas as prescrições desejadas impostas pelas referências adotadas, bem como os limites geométricos e mecânicos. Assim, depois dessas etapas tem-se o layout final.

O processo convencional de projeto depende muito mais da experiência do projetista, e após algumas possíveis soluções, que atendam às restrições, adota-se o projeto com menor custo. Vale dizer ainda que o processo convencional leva também em consideração a viabilidade de execução do projeto obtido.

Já o processo de otimização, nas versões utilizadas no presente trabalho, tem como seu principal objetivo a redução máxima possível da massa da estrutura, sem que cause perda de desempenho, utilizando-se métodos de otimização. Por outro lado, o processo de projeto ótimo segue uma lógica mais formal, para isso, alguns passos serão seguidos. Primeiro deve-se identificar as variáveis no projeto que geralmente tem relação com a geometria da estrutura. A função objetivo, aquela que mede o mérito relativo de uma solução, e as funções restrições de projeto, dadas pelas limitações existentes, devem ser definidas em função das variáveis de projeto. Tendo esses dados, pode-se aplicar um método de otimização apropriado para aperfeiçoar um projeto inicialmente estimado (o uso de um software de computador por exemplo). Nesta etapa, a otimização do projeto depende de um algoritmo de otimização. Como resultado, o processo de projeto ótimo pode conduzir a soluções seguras e mais econômicas. Em termos matemáticos, a otimização trata de encontrar valores extremos (máximos ou mínimos) de uma função (a função objetivo).

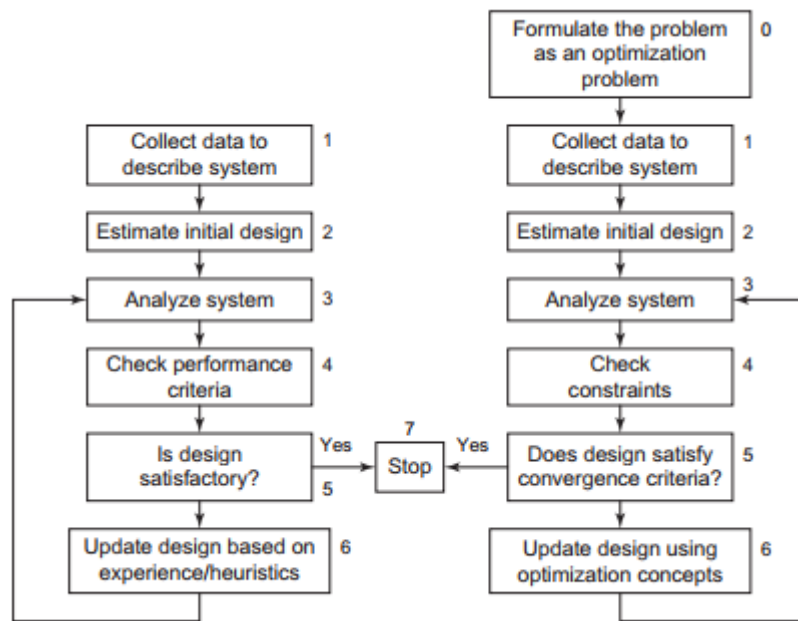


Figura 1 – Comparação entre o método tradicional e o processo de otimização de projetos

## Revisão Bibliográfica

Neste trabalho de pesquisa, serão utilizadas duas ferramentas de base para o projeto:

- Os algoritmos de otimização
- A análise de estruturas através do método dos elementos finitos.

A ferramenta utilizada no que diz respeito à otimização será o Software Inventor da Autodesk®. Esse programa possibilita a criação de modelos 3D, além da aplicação de testes sobre esses modelos com bastante precisão. Através do uso do software pode-se ter uma previsão em situações reais antes mesmo de produzirmos o modelo material de fato. Outra vantagem no uso do Inventor é que ele também conversa com diversos outros sistemas CAD. Dependendo dos resultados dos testes, a partir do projeto obtido poderão ser fabricados os protótipos. Do ponto de vista teórico, tem-se como curso introdutório o descrito por Arora (2012) e mais especificamente em otimização topológica os trabalhos de Bendsoe e Sigmund (2013), Huang e Xie (2010) e Lanes (2013). A revisão teórica, neste caso, tem como objetivo uma pesquisa sobre os principais métodos de otimização topológica, bem como procurar entender o funcionamento do software em questão.

O método dos elementos finitos (Zienkiewicz e Taylor, 1989) consiste em um procedimento numérico para determinar, de forma discreta, problemas contínuos regidos por

equações diferenciais. De maneira resumida, a geometria submetida aos carregamentos e restrições é subdividida em pequenas partes (essas que são chamadas de elementos), os quais passam a representar o domínio contínuo do problema (Burnett, 1987). Esses elementos são conectados por pontos, ou nós, e o conjunto de elementos e nós se chama malha. O método propõe que o número infinito de variáveis desconhecidas (domínio contínuo), sejam substituídas por um número limitado de **elementos** de comportamento bem definido. Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral. Este processo subdivisão do domínio recebe o nome de discretização (Máximo, 2007). De acordo com Burnett (1987) e Kikuchi (1986) a divisão geométrica permite resolver um problema complexo, através da divisão desse em problemas mais simples, o que possibilita ao computador realizar com eficiência os cálculos.

A precisão do MEF (Método dos elementos finitos) está relacionada com a quantidade de nós e elementos, além de seus tamanhos e tipos de malhas. Logo quanto menor o elemento, maior será seu número, portanto mais precisão o modelo computacional terá. Entretanto, a diminuição dos elementos a dimensões extremamente pequenas pode introduzir erros numéricos, pois pode ultrapassar a precisão do computador, além de desbalancear a matriz de rigidez (Martha, 1994).

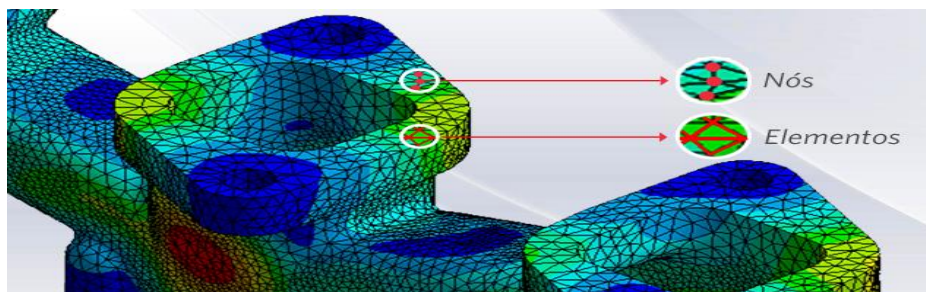


Figura 2 – Exemplo da subdivisão de nós e elementos

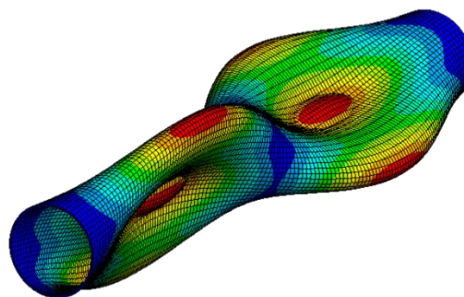


Figura 3 - Análise de uma peça realizada com base em análise de elementos finitos

## Metodologia

Esse trabalho de pesquisa tem como objetivo principal a otimização topológica(já descrita anteriormente) dos componentes do motor de um foguete experimental(também chamado de foguete amador). Para isso faz-se necessário uma análise dos esforços internos da câmara de combustão quando temos o motor-foguete em funcionamento, e também da possibilidade de modelar esse problema no software Autodesk Inventor. A fim da criação de um modelo computacional da situação estudada, usaremos como base os esforços(forças, pressões etc) previstos teoricamente na literatura. Portanto será necessário a criação de um sistema de coordenadas que relacione forças e suas variações de intensidade dentro da câmara de combustão de acordo com qual ponto da câmara está sendo analisado(tanto sua distância até a origem como sua posição), para que assim possamos mapear esses esforços dentro do motor. Esse sistema de coordenadas será representado no software Inventor de forma que seja possível fazer a redução de massa sem que haja a perda de funcionalidade ou de performance. Devemos levar em conta que, se tratando de um foguete de propelente sólido, a geometria do propelente influencia diretamente tanto na performance quanto na força empuxo...

“O empuxo depende diretamente da vazão mássica e esta é diretamente proporcional á área de combustão e velocidade de queima. A área de combustão em qualquer ponto regride no sentido perpendicular a sua superfície, fazendo com essa área varie ao longo do tempo dependendo diretamente da geometria inicial e configuração de inibidores” (FERREIRA,2007,p.55)

A área de combustão constante ao longo do tempo é desejável pois assim teremos uma melhor eficiência no que diz respeito ao impulso total, já que a tubeira é projetada para se ter máxima eficiência a uma determinada pressão da câmara de combustão e logo um determinado fluxo de massa(Ferreira, 2007).

O foguete experimental aqui utilizado possui um motor de propelente sólido e é composto de três peças estruturais principais: tubeira, corpo e cabeçote (essas as quais serão otimizadas)

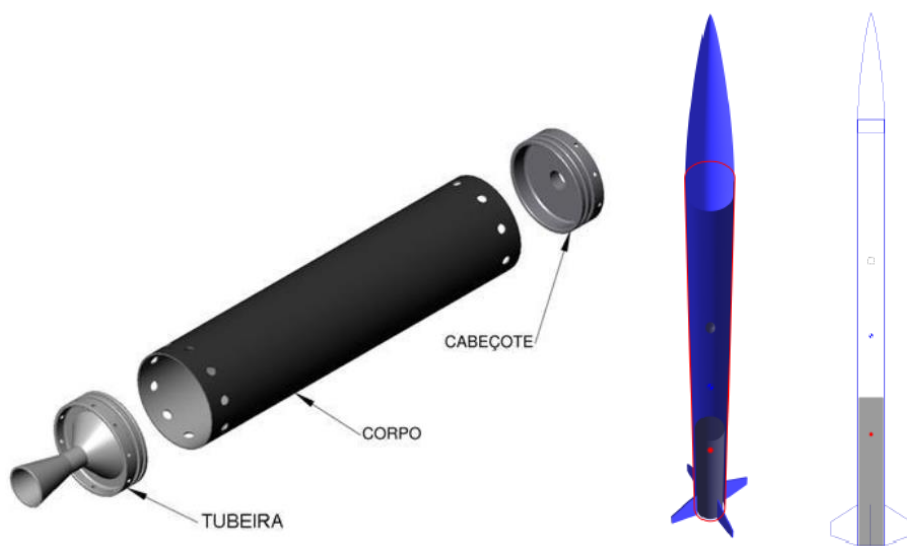
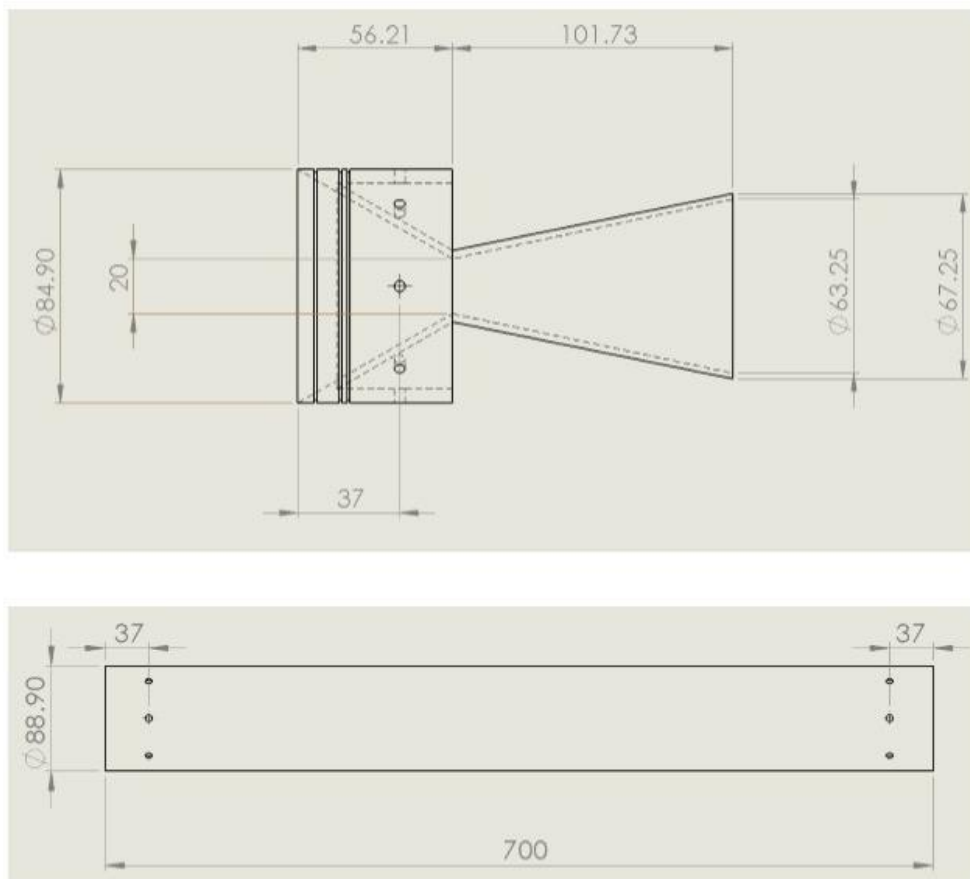


Figura 6. Motor-foguete e sua localização dentro do foguete.

## Resultados



Até o momento as buscas dentro do trabalhos de pesquisa consistiram em reunir o máximo possível de informações para que a simulação fossem o mais próximo da realidade,

para isso informações como geometria, espessura do material, tipos de materiais usados, características mecânicas e térmicas desses materiais, medidas como comprimento e diâmetros, esse último que teve propósito apenas de aproximação, visto que esses valores variam de acordo com o uso e necessidade desses foguetes experimentais(geralmente empregados em competições)

Figura 7. Representação técnica de um motor-foguete.

Casing Material(Corpo)	6063 T5 Aluminium
Nozzle Material(Tubeira)	1020 Steel
Nozzle Retainer Material	6351 T6 Aluminium
Bulkhead Material	6351 T6 Aluminium
Thermal Liner	EPDM(2mm thick)
Inhibitors	Kraft Paper(3mm thick)

Tabela 1 – Medidas aproximadas de um foguete experimental que servirão de base para a modelagem no software Inventor.

Aluminium 6063-T5	
Ultimate Tensile Strenght	186MPa 27,000psi
Tensile Yield Strenght	145MPa 21,000psi
Modulus of Elasticity	68,9GPa 10,000psi
Poisson's Ratio	0,33
Density	2,7g/cc 0,0975lb/in <sup>2</sup>

Tabela 2 Propriedades do material Alumínio 6063-T5

Tendo informações como essas podemos então modelar cada uma das partes do motor-foguete no software Autodesk Inventor.

Fazendo uma análise dos esforços que atuam no motor-foguete, onde autores convergem para um ponto semelhante, veremos abaixo:



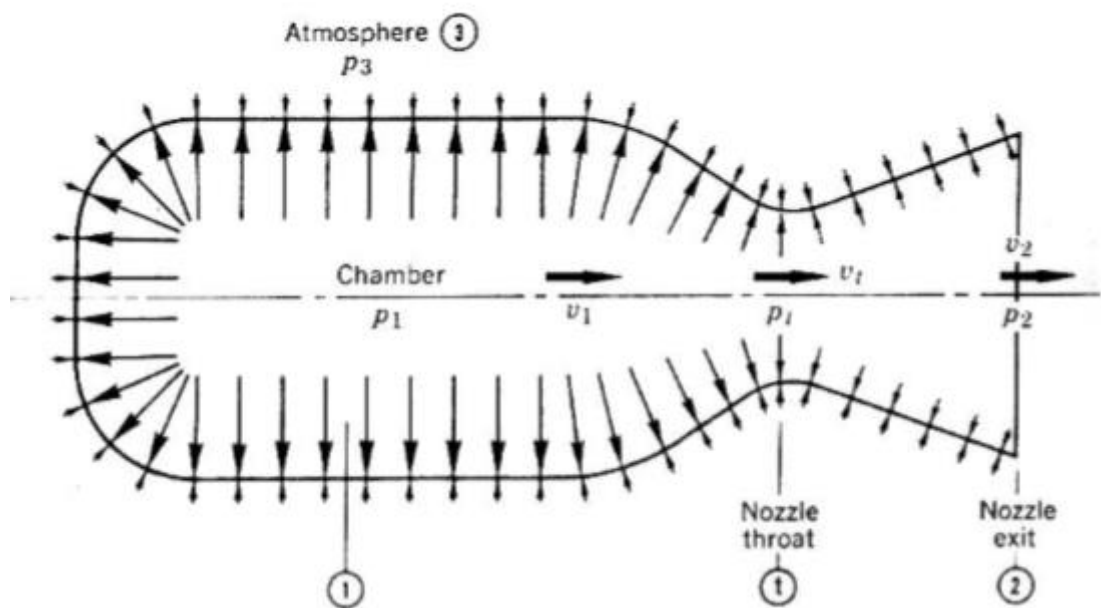


Figura 8 - Balanço de pressão nas paredes da câmara e tubeira e velocidades envolvidas no cálculo do empuxo, Sutton, (8).

Ulrich expressa as forças e esforços exercidos sobre as paredes do motor em função da área, tanto Ferreira(2007) quanto Ulrich(2009) convergem nesse ponto, segundo Ulrich temos:

“Até agora, nossas considerações foram independentes da forma exata da câmara de combustão, desde que seja axialmente simétrica. Então, podemos considerar que o bocal também faz parte da câmara de combustão. Logo, todos os parâmetros considerados até agora na garganta da câmara de combustão são também válidos para a saída da tubeira, ou seja.” (Traduzido - ULRICH, 2009)

Esse tipo de análise se mostra importante(mesmo que a um nível superficial) pois assim podemos saber se a otimização realizada pelo software irá se mostrar coerente com a realidade de modo a continuar cumprindo o que é esperado, já que a geometria(interna) da peça tem uma relação direta com seu desempenho e funcionalidade

A modelagem do foguete dentro do Autodesk Inventor foi baseada em modelos reais de foguetes experimentais(como os já mostrados nas imagens anteriores), suas medidas de comprimento e diâmetro foram mantidas, já a espessura do material foi um pouco maior (7 mm no total, o aumento foi de aproximadamente 2,5 a 3 mm) pois deve-se levar em conta que o programa irá reduzir a massa e consequentemente remover material de sua superfície. Abaixo podemos ver o motor-foguete já modelado em 3 dimensões

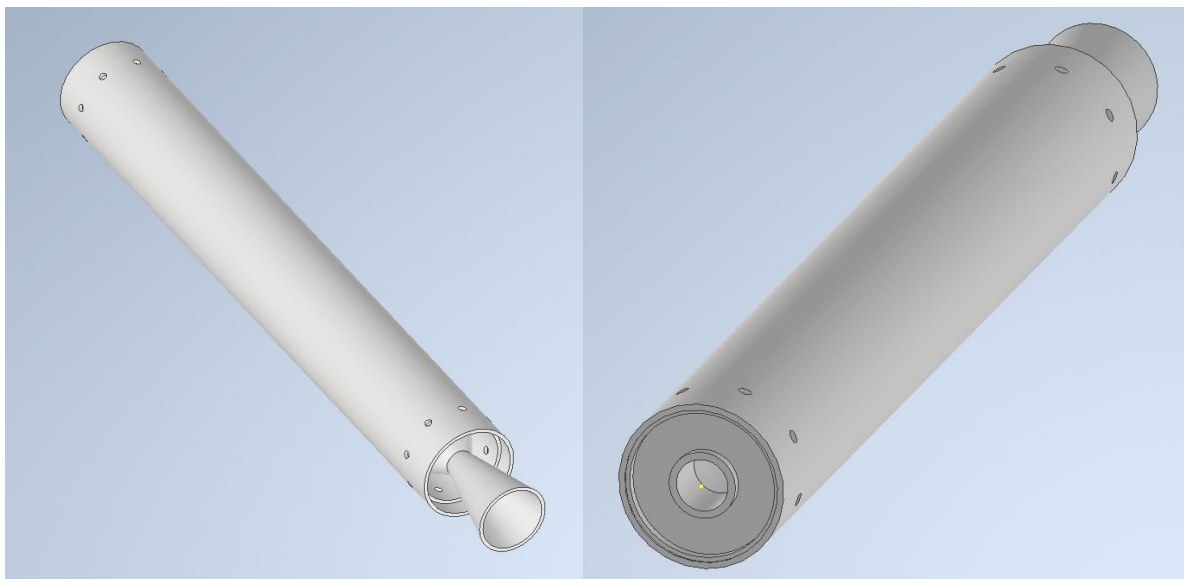


Figura 9 – Motor-Foguete modelado no Autodesk Inventor, na imagem pode-se ver o casing(corpo), nozzle(tubeira) e bulkhead(cabeçote).

É importante dizer que todas as propriedades mecânicas e térmicas do material Alumínio 6063-T5 já foram adicionadas ao software antes da modelagem., esse que foi o material usado em todas as partes do motor-foguete.

Os esforços que atuam no motor foram representados pela pressão máxima dentro da câmara de combustão,  $P_{max} \cong 4,41\text{Mpa}$ (Dado extraído de relatórios anteriores da UFABC Rocket Design), já que o software não nos dá a opção de acrescentar um sistema de coordenadas, para que assim as forças sejam expressas em função da posição. Os pontos de apoio foram posicionados nos 8 furos que existe na extremidade de cada peça(8 furos para a tubeira e o cabeçote e 16 furos para o corpo, sendo 8 em cada lado). Realizando as configurações necessárias para que a área interna permaneça constante(i.e. inalterada pelo processo de otimização) pois como citado anteriormente queremos manter esse aspecto.

Começando pelo corpo, aplicando as condições e parâmetros, inicialmente temos uma massa de 19,1 kilogramas, para essa estrutura conseguimos uma redução de 22%, Sendo o valor da massa final de 15 kilogramas:

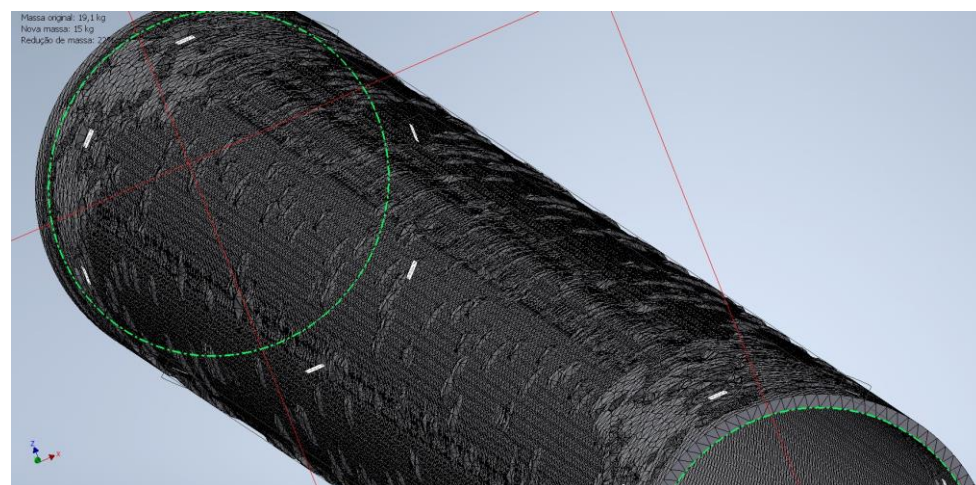
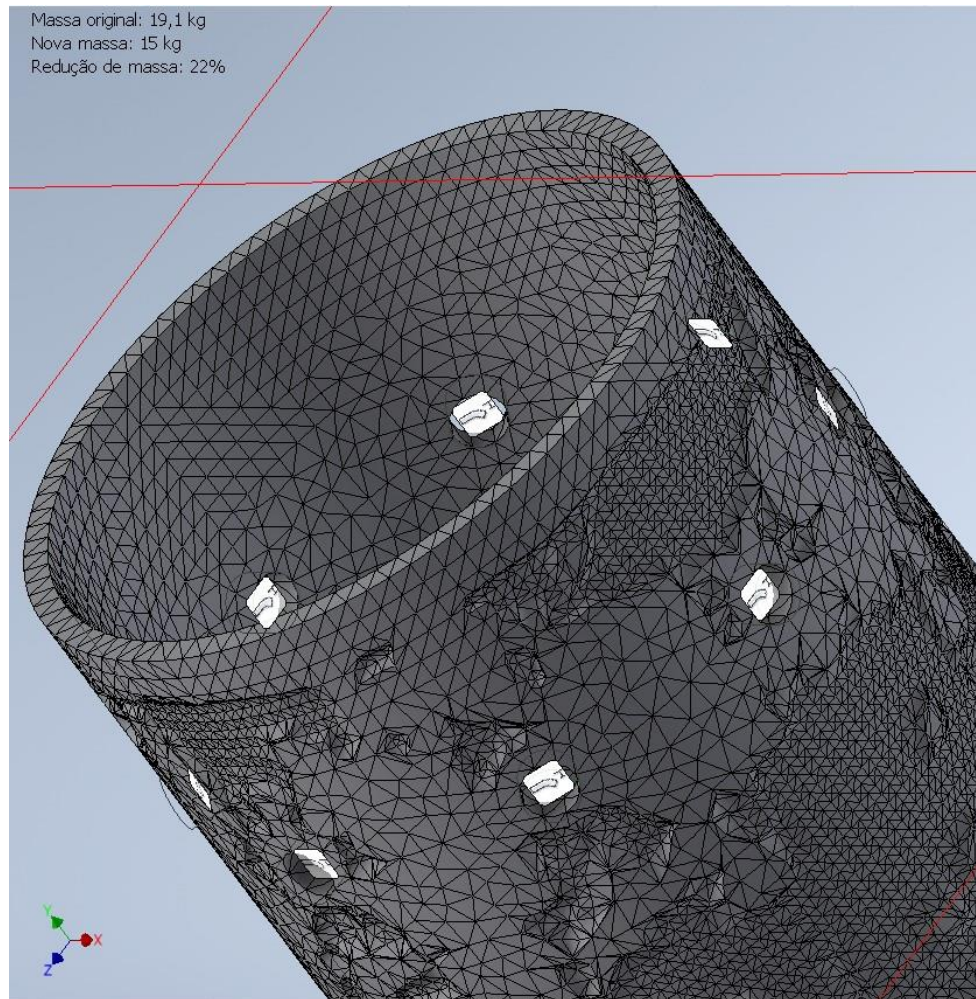
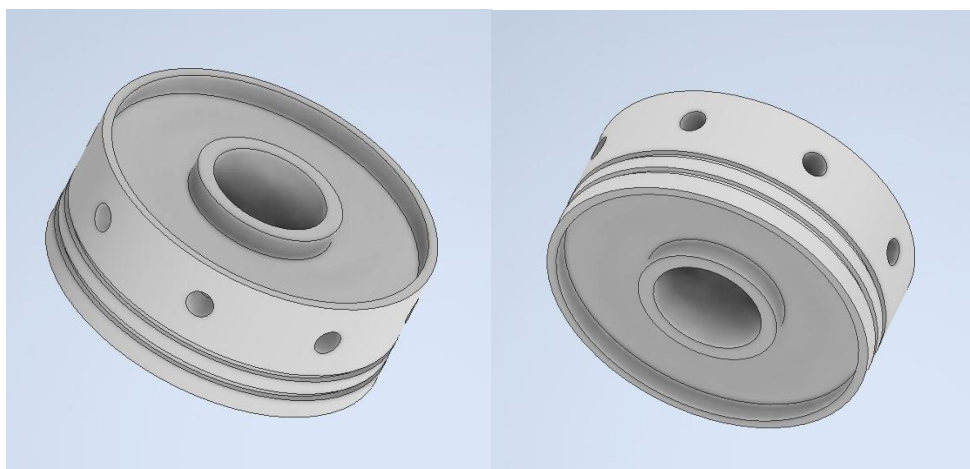


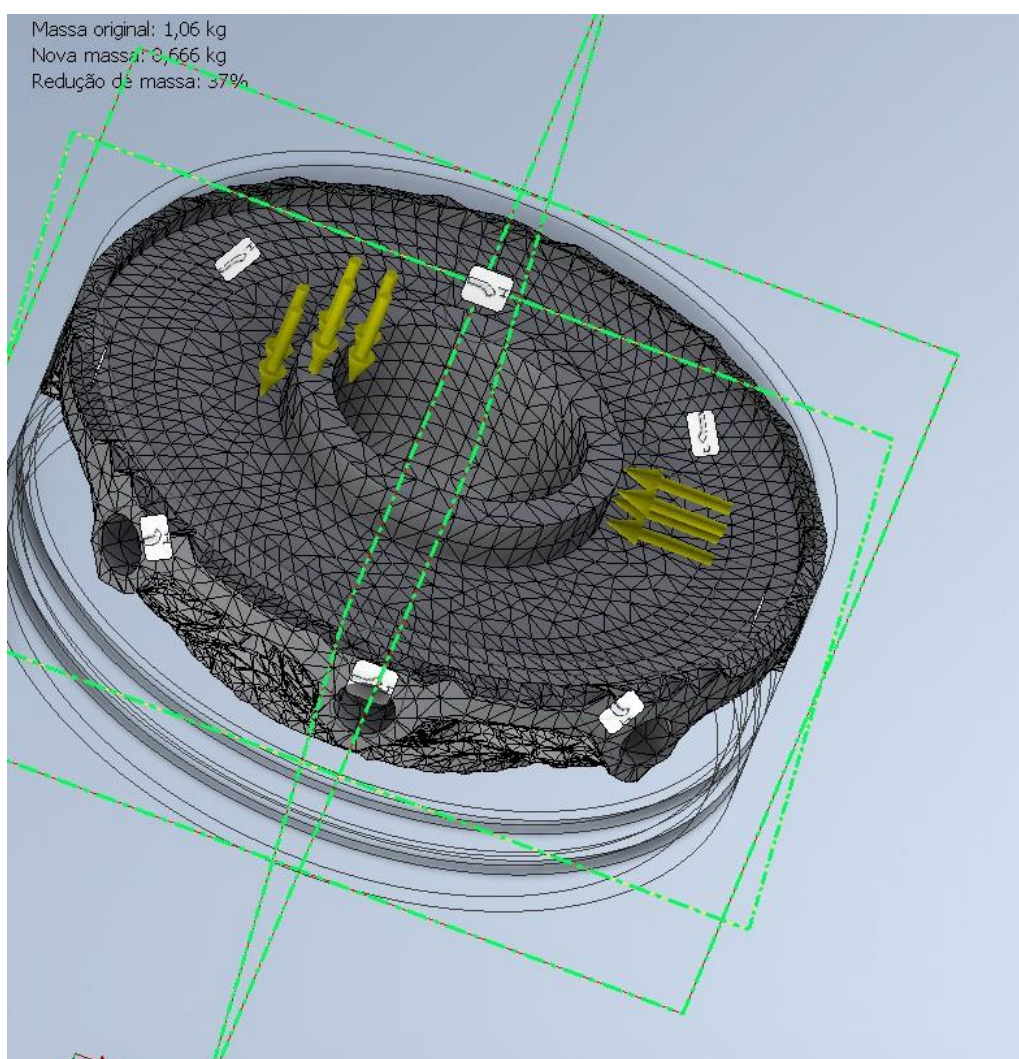
Figura 10 e 11 – Corpo do motor-foguete já otimizado

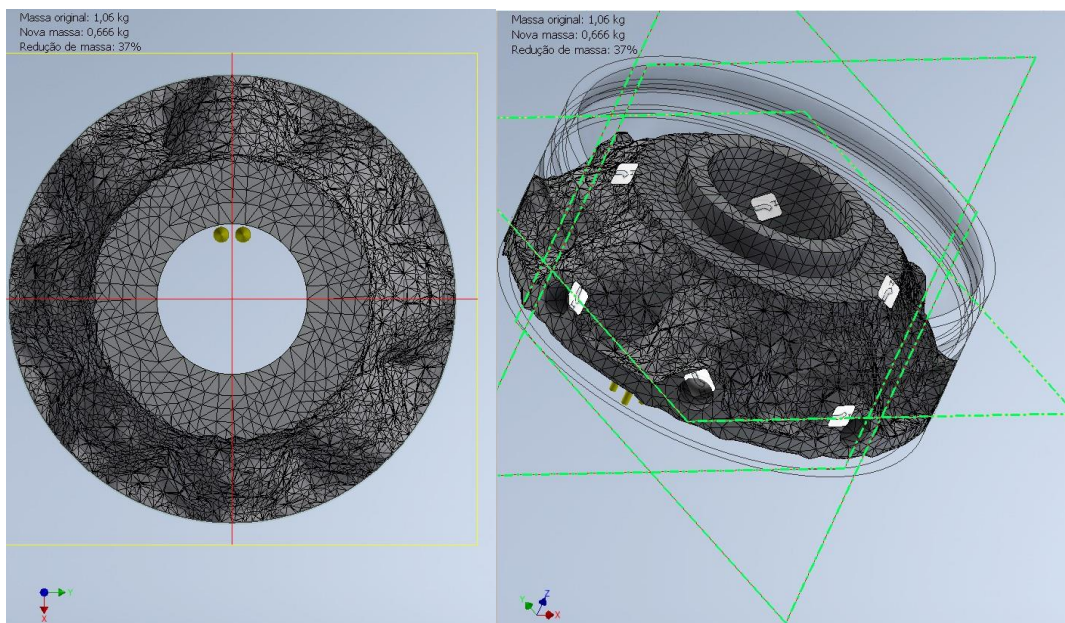


Para o cabeçote a redução de massa foi de aproximadamente 37%, sendo a massa inicial de 1,06 kilogramas e a massa final de 0,666 kilogramas.

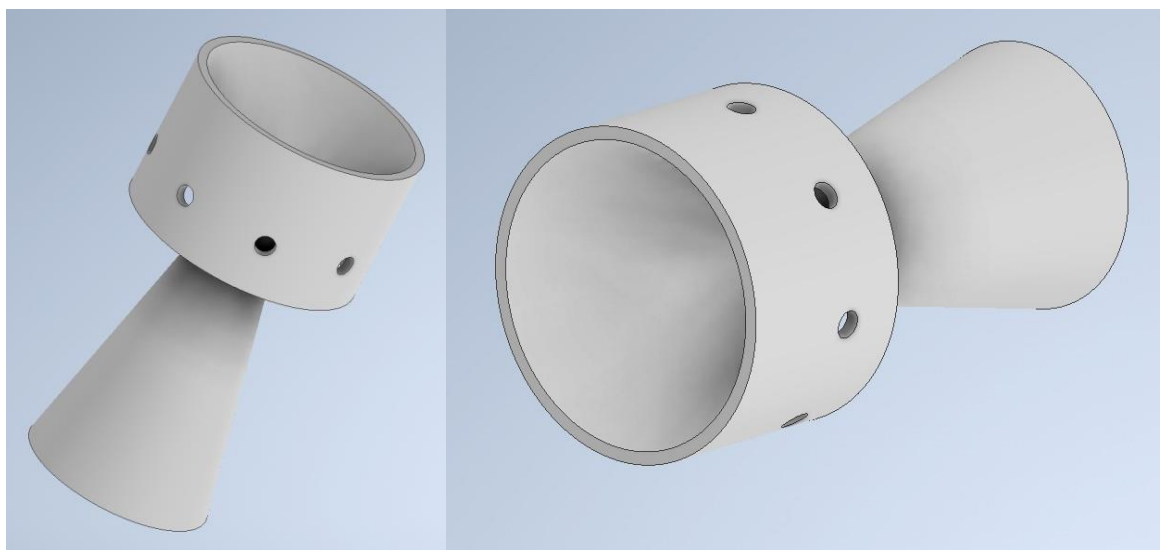


Figuras 12 - Representação do Bulkhead dentro do Software inventor



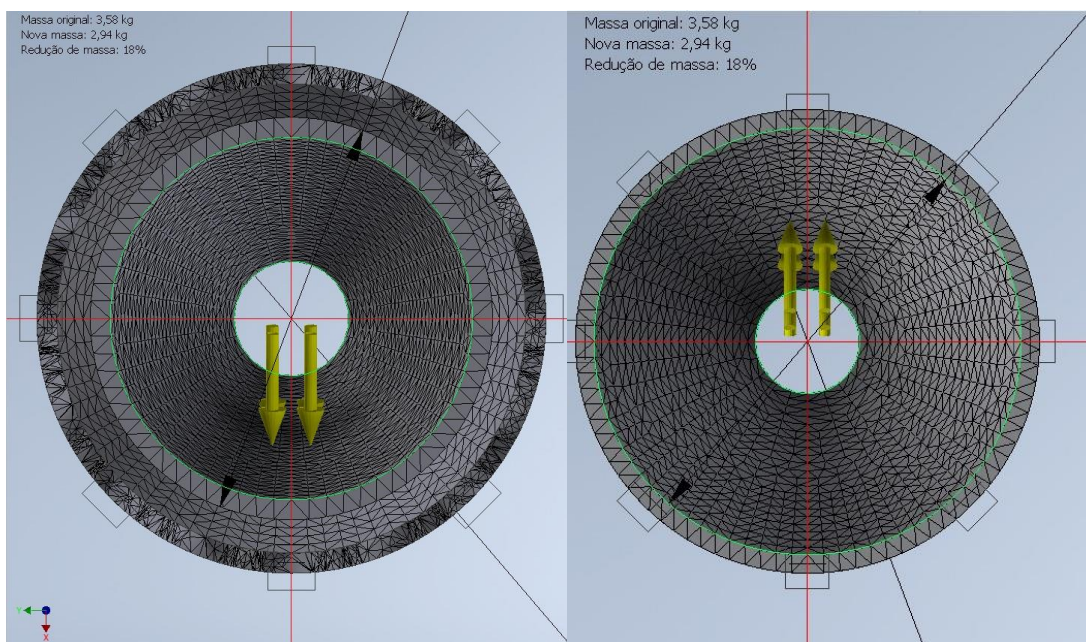
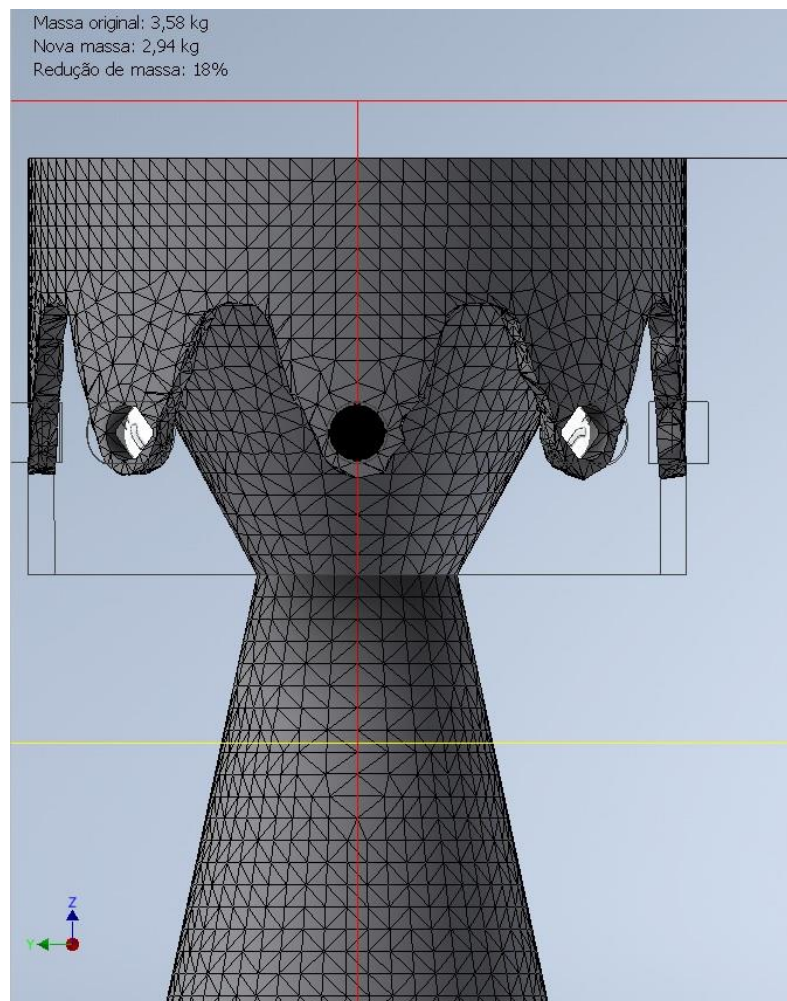


Figuras 13 e 14 - Otimização Topológica aplicada ao cabeçote



Já para a tubeira a redução de massa foi de 18%, sendo a massa inicial de 3,58 kilogramas e a massa final de 2,94 kilogramas. Para uma redução de massa dentro da câmara de combustão seria um novo trabalho de pesquisa com o objetivo de uma análise mais aprofundada.





## **Conclusão**

Conforme apresentado no presente relatório, todas as atividades propostas de pesquisa para serem realizadas até o final estágio da pesquisa foram realizadas. Portanto, o trabalho aqui realizado atingiu com êxito os objetivos inicialmente propostos. Cada um dos componentes do motor-foguete foi otimizado utilizando-se do método dos elementos finitos, além do mais as reduções de massa se mostraram satisfatórias alcançando o objetivo esperado.

## Referências bibliográficas

- Arora, J., (2012), Introduction to Optimum Design. Third Edition. Academic Press.
- Bendsoe, M. P. e Sigmund, O., (2013), Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, Springer.
- Burnett, D. S., (1987), Finite Element Analysis, Addison Wesley, USA.
- Ferreira, Bruno, (2007), Teoria, metodologia de projeto e desenvolvimento de motores foguete a propelente sólidos e foguetes experimentais. Curitiba, PUC-PR.
- Huang, X. e Xie, M., (2010), Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications, Wiley.
- Kikuchi, N., (1986), Finite Element Methods in Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lanes, R. G., (2013), Aplicação de Um Método de Otimização Topológica Evolucionária Desenvolvido em Script Python [Artigo] - Ciência & Engenharia, V. 22, N. 1, P. 01 – 11, Jan. – Jun. 2013.
- Martha, L., (1994), Civ 2118 - Métodos Dos Elementos Finitos. Rio De Janeiro, Notas De Aula.
- Máximo Alves, Lucas., (2007), Método dos elementos finitos, Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia/Setor de ciências exatas – Programa de pós graduação em métodos numéricos em engenharia.
- Zienkiewicz, O. C. e Taylor, R. L., (1989), The Finite Element Method, fourth edition, McGraw-Hill, London.
- Ulrich, Water.,(2008) – Astronautics, Institute of Astronautics, Munich – Germany.
- Sutton, George P. Rocket Propulsion Elements. Estados Unidos : John Wiley & Sons, Inc., 1963.
- Taylor, T. (2009) – Introduction to rocket science and engineering.
- 2016/2017 Project - Tupã II Preliminary Design Review – UFABC Rocket Design



