



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC**

Edital N° 01/2017

**Bancada de testes estáticos de pequenos propulsores: balança de empuxo e base de suporte.**

*Mariana Conti Tarifa (RA:11030215)*  
*Orientadora: Thaís Maia Araújo (maia.thais@ufabc.edu.br)*  
*Co-orientador: Leonardo Gouvêa (ITA)*

*Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas*

Santo André, 2018

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e projetar uma bancada de testes estáticos para propulsores a jato de pequeno porte. Materiais adequados à construção, dimensões e componentes de fixação foram determinados considerando simplicidade e baixo custo. Idealizou-se uma geometria horizontal e uma base de suporte retrátil expansível para garantir versatilidade ao uso da bancada. Desenhos técnicos detalhados de toda as peças que compuseram o conjunto da bancada foram confeccionados, resultando em uma completa configuração da bancada idealizada. Especificações das características mecânicas da balança de empuxo e da base de suporte, onde motores são fixados, permitiram que as tensões e fatores de segurança da estrutura mecânica fossem determinados por meio de simulações computacionais. Com dados de fatores de segurança obtidos foi possível determinar que a bancada está apta para operar propulsores até 7,5N na configuração retrátil e até 15N na configuração expandida; limites de operação mais do que adequados e seguros, possibilitando a construção e instalação da bancada para uso no laboratório de Combustão e Propulsão da UFABC.

Palavras-chave: bancada de testes; balança de empuxo; propulsores híbridos.

## 1. Introdução

Em um sentido amplo, propulsão é o ato de mudar o movimento de um corpo. Mecanismos de propulsão oferecem a força que movimenta os corpos que estão inicialmente em repouso, mudam a velocidade ou superam forças retardadoras quando o corpo é propelido através de um meio. A propulsão por foguete é uma classe de propulsão que produz empuxo por meio da ejeção exclusivamente de matéria armazenada no próprio sistema, chamado de propelente [1].

A função do sistema de propulsão é combinar energia com a matéria a fim de produzir uma corrente direta de partículas de alta velocidade [1]. Deste modo, os sistemas propulsivos por foguete podem ser classificados de acordo com o tipo de fonte de energia (química, nuclear ou solar). Os sistemas propulsivos normalmente utilizados, no entanto, são os químicos. A propulsão por foguetes enquadra-se neste ramo, pois se utiliza da energia liberada em reações químicas de combustão. Esses, por sua vez, são subdivididos por tipo de propelente utilizado: líquidos, sólidos e híbridos [2],[3].

Em um motor-foguete líquido, o oxidante e o combustível são misturados na vizinhança do injetor para que haja a formação de uma mistura inflamável. No caso do propelente sólido, o oxidante e o combustível estão pré-misturados em uma única fase sólida e a combustão ocorre quando a superfície exposta é ignizada. Em ambos os casos, em todos os lugares da câmara de combustão há uma mistura uniforme do propelente. O sistema propulsivo híbrido contém o oxidante na forma líquida (ou gasosa) e a câmara de combustão contém o propelente sólido que é o combustível. O oxidante líquido (ou gasoso) flui para a câmara de combustão, onde é vaporizado e, em seguida, reage com o propelente sólido. Essa é uma operação distinta, ou seja, queima como uma difusão macroscópica e turbulenta na qual a razão entre o oxidante e o combustível varia de acordo com o comprimento da câmara, acabando em uma composição que determina o desempenho do motor [4].

Entre os três sistemas mencionados o motor-foguete líquido é o que apresenta alta performance eficiência, mais controlável, porém, por outro lado é o que apresenta um sistema muito complexo e custoso devido ao requerimento de encanamento. Com motor de propelente sólido é possível evitar estes problemas cuidando da pré-mistura do combustível e do oxidante de uma maneira compacta, ou seja, é mais simples de ser projetado. Porém, propelentes sólidos

apresentam como maiores desvantagens a falta de controle e o risco de explosão. O terceiro sistema propulsivo, os motores de propelentes híbridos têm se mostrado como alternativa atrativa em relação aos demais, pois apresentam vantagens como maior segurança na fabricação, estocagem e operação, além de ser um sistema relativamente barato [1],[4]. Por estas razões, o híbrido foi o sistema propulsivo escolhido para ser operado na bancada de testes a ser desenvolvida no presente projeto.

Como parte essencial do projeto de veículos espaciais de uma missão espacial real, é necessário que os motores-foguete sejam testados para garantir a integridade e o bom funcionamento de seus componentes [5]. Para tal fim, os motores ficam dispostos em plataformas e nela são ignizados, de modo que não haja movimento. Estas plataformas são chamadas de bancadas de testes estáticos.

As bancadas de testes servem para a análise, investigação e demonstração da evolução temporal de diferentes parâmetros propulsivos, dentre os mais importantes pode-se destacar a pressão, a temperatura e o empuxo gerado na queima do propelente no interior da câmara de combustão [6],[1]. Deste modo, a plenitude da estrutura do motor é garantida para um futuro reuso ou, no caso do motor ter uma estrutura que não resista a um novo funcionamento, servirá de modelo para a construção de um novo motor.

A concepção de um motor-foguete de uma missão espacial real é bastante complexa e envolve custos altíssimos. Entretanto, sabe-se que motores de escala laboratorial são suficientemente complexos para realização de estudos que replicam os fenômenos básicos de propulsão [2].

Face ao exposto, conclui-se que possuir uma bancada de testes estáticos de propulsores a jato e de câmaras de combustão pode auxiliar nas demonstrações práticas de disciplinas voltadas para a área de propulsão aeroespacial e combustão, além de prover meios para se realizar pesquisas acadêmicas na UFABC [7].

Importante ressaltar que foguetes desenvolvidos e construídos para competições entre equipes amadoras não possuem a complexidade de um foguete real, mas têm especificações estabelecidas dentro das categorias que concorrem. Uma equipe de estudantes da Universidade Federal do ABC (UFABC), a UFABC Rocket Design, vem participando de competições de foguetes amadores, desde 2009. Com a construção da bancada e instalação no Laboratório de

Propulsão e Combustão da UFABC a equipe poderá ter modelos testados com consequente aprimoramento de projeto.

## **2. Objetivo**

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver e projetar uma bancada de testes estáticos para propulsores a jato, em que as tensões e fatores de segurança da estrutura mecânica foram analisados por meio de simulações computacionais. O projeto foi todo concebido para testar motores que se encontram na faixa de operação média de 5N de empuxo. Também fez parte do trabalho a escolha dos materiais mais adequados à construção, a definição da melhor geometria, dimensões e componentes de fixação.

## **3. Concepção e desenvolvimento da bancada**

A principal premissa para o desenvolvimento da bancada de testes estáticos para propulsores a jato foi estabelecer um valor médio de potência dos propulsores que poderão ser seguramente utilizados e operados em laboratórios didáticos e/ou de pesquisas. Motores com sistemas híbridos foram os escolhidos, pois são os que apresentam a opção de serem desligados em caso de emergência sem causar danos. Embora não tenha sido objetivo do presente trabalho o dimensionamento do propulsor híbrido, o conhecimento de dimensões e potências médias se faz necessário para as simulações que serão realizadas para validação do aparato. Logo, para simular um motor-foguete real acoplado à bancada de teste foi adotado o propulsor usado por Engler et al. [8], que possui empuxo médio de 5 N, utiliza como combustível o PPMA (polipropileno) e a pré e pós câmara de combustão são de alumínio. O desenho esquemático deste motor foi confeccionado e é apresentada na Figura 1.

Importante mencionar, que além do propulsor adotado, todos os elementos que compuseram a estrutura da bancada foram desenhados com auxílio do software livre Fusion 360 (CAD) [9], utilizando todas as reais dimensões, encaixes, furações, parafusos, etc.. Esses desenhos foram utilizados para a simulação de deformação e resistência estruturais, como parte da investigação de tensões e fatores de segurança da estrutura mecânica para averiguação se as

escolhas da geometria, das dimensões, dos materiais, foram adequadas para operar em condições seguras.

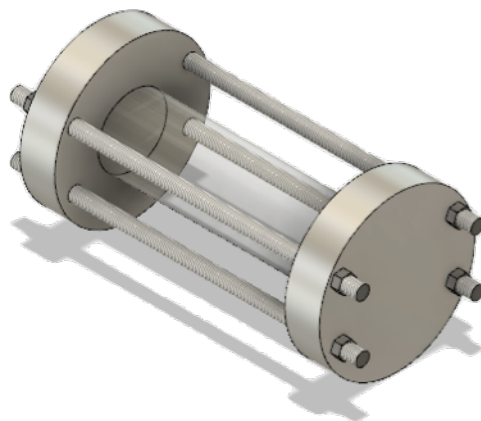


Figura 1: Modelo e dimensões do propulsor híbrido adotado para ser acoplado à bancada.

Definido o empuxo médio de operação dos propulsores, deu-se início às determinações das principais características da bancada, que foram baseadas em um extenso levantamento bibliográfico e pesquisas de mercado. Os materiais da estrutura e os componentes de fixação foram cuidadosamente escolhidos para que pudessem ser facilmente comprados e encontrados no mercado nacional, para facilitar uma futura construção e instalação da bancada. As definições de geometria, das dimensões e de faixa de operação dos motores foram, fortemente, fundamentadas em segurança, pois os principais locais para condução de testes deverão ser laboratórios didáticos ou de pesquisas.

Principalmente levando-se em conta a segurança, a base de suporte da bancada foi definida com uma geometria retangular, para que assim, durante os testes, os motores propulsores, quando adaptados à bancada, tenham os gases de saída na direção horizontal. Para possibilitar que propulsores com variadas dimensões, sejam adaptados à bancada, atendendo critérios de multifuncionalidade, adotou-se um modelo de bancada expansível retrátil, cujas dimensões são mencionadas da forma HxWxL, altura, largura e comprimento, respectivamente. Para que o propulsor adotado seja acoplado na posição retrátil chegou-se nas dimensões de 200x200x400 mm e na posição totalmente expandida as dimensões conseguidas foram consequências de projeto, ou seja, o máximo de material que poderia ser expansível, resultando

em 300x300x600 mm. Na Figura 2 é apresentada a configuração da estrutura mecânica completa na condição expandida da bancada. As letras A, B, C e D foram adicionadas para indicarem a base de suporte, a balança de empuxo (lâminas flexíveis), barras de aumento e sapatas aderentes e antivibrações, respectivamente.

O perfil em L foi o formato escolhido para as barras que constituem a estrutura principal, denominada de base de suporte, pois é facilmente encontrado no mercado nacional na espessura de 3 mm e com dimensões de 25x25 mm. A flexibilidade das dimensões foi obtida adotando barras de aumento (C na Figura 2) aparafusadas na base de suporte que fazem as conexões entre as partes principais da base de suporte permitindo a expansão nas três dimensões. O material da base de suporte expansível retrátil escolhido foi o aço carbono comum conhecido por ser um material de ampla resistência e rigidez, porém, ao mesmo tempo, leve [10]. Simulações nas configurações totalmente retraída e totalmente expandida foram realizadas.

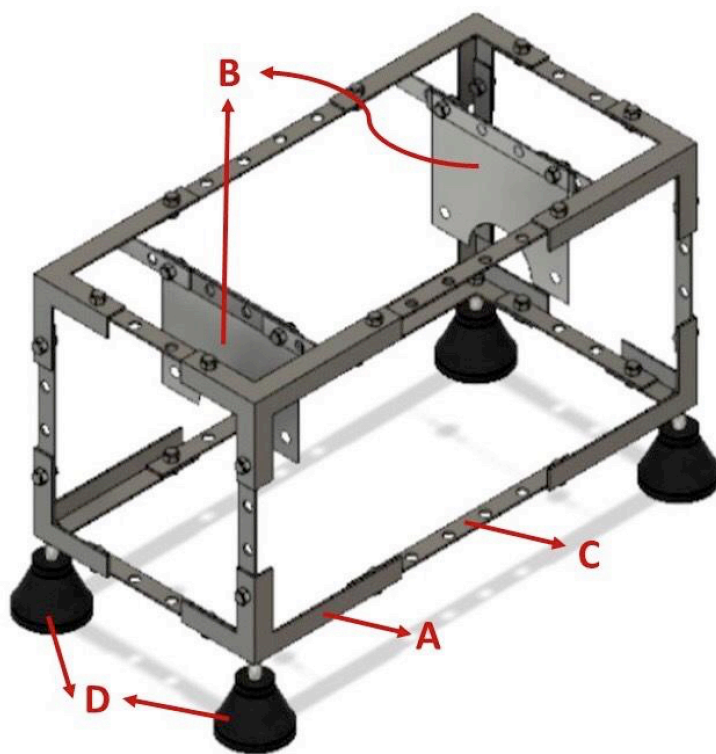


Figura 2: Estrutura mecânica completa expandida da bancada, com a base de suporte, balança de empuxo, barras de aumento e sapatas aderentes e antivibrações identificadas por A, B, C e D, respectivamente.

Foi necessário incluir ao projeto uma balança de empuxo para que motores com diferentes potências pudessem ser testados para delimitar o máximo de empuxo que a estrutura suportaria. Os motores devem ser fixados na parte superior da bancada, de forma que os gases de saídas estejam na horizontal, a materiais que não apresentem resistência às movimentações e vibrações do próprio motor, portanto foram escolhidas lâminas flexíveis de aço tipo mola, que apresentam características de retornar à forma original após sofrer algum tipo de deformação. Na Figura 3 é possível verificar, na configuração retrátil, o modelo de propulsor indicado na Figura 1 está acoplado às laminas flexíveis, que com a força de empuxo, são defletidas e deslocam o motor até a célula de carga, instrumento pelo qual o empuxo é medido. Quando a bancada de testes é usada na condição retrátil as dimensões das lâminas devem ser de 0.2 mm de espessura, 125 mm de altura e largura. Além disso, é interessante destacar que a configuração da bancada permite que diversos tipos de lâminas sejam implantados para melhor se adequarem às especificações do motor. Para testes com motores de maior empuxo pode-se citar o Armalon, que é um material cujas propriedades são mais adequadas.

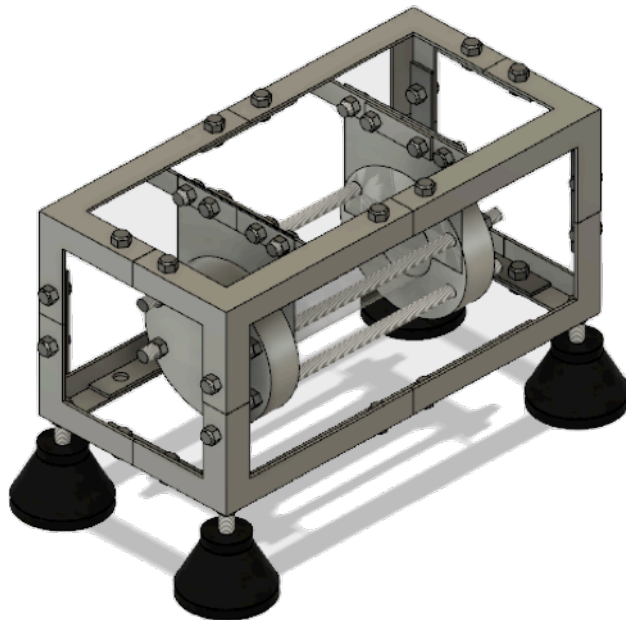


Figura 3: Bancada de testes na configuração retrátil com o motor acoplado.



Outro aspecto inovador do projeto foi a não necessidade de prender a bancada a uma superfície rígida, durante a operação dos motores, o que garantiu uma mobilidade da estrutura, evitando restrições de operação a um só local. Estudos sobre o tipo de acabamento a ser usado na base da estrutura resultaram na escolha por sapatas de borracha, que além de garantirem a não movimentação da bancada, também atenuam as vibrações que ocorrem durante os testes [11]. As sapatas de borracha são facilmente encontradas no mercado e, as de 80 mm de diâmetro, atendem às especificações do projeto tanto na condição retrátil quanto na expandida.

De forma resumida são apresentadas as principais partes que compuseram a estrutura mecânica da bancada de teste estático de motor a jato na Tabela 1, indicando dimensões, materiais utilizados e desenho esquemático.

#### **4. Simulações de deformação e falha**

Após a completa definição da estrutura mecânica da bancada de testes, foram realizadas simulações computacionais de testes à deformação e à falha para verificar se as escolhas da geometria, das dimensões, dos materiais, foram adequadas para operar em condições seguras e também definir o limite da potência máxima dos propulsores na configuração totalmente expandida.

O *software* livre, Fusion 360, foi utilizado para execução dessa etapa por meio da funcionalidade “Simulation”. A simulação escolhida foi do tipo “Static Stress” (Tensão Estática). Este tipo de simulação analisa como o modelo corresponde aos carregamentos e restrições estruturais [12]. Os diferentes parâmetros escolhidos para serem analisados na simulação estrutural foram: o fator de segurança, a distribuição de tensão e o deslocamento dos componentes. Foram realizadas simulações para cada tipo de parâmetro mencionado anteriormente e para ambas as configurações da bancada, retrátil e expandida.

Tabela 1: Descrição das dimensões e materiais utilizados para compor cada parte da estrutura mecânica da bancada.

Parte	Dimensões	Material	Desenho esquemático
Perfil em L	25x25x100 mm 25x25x200 mm	Aço carbono comum	
Sapata	80 mm (diâmetro)	Borracha	
Lâminas flexíveis	125x125x0,2 mm	Aço mola	
Propulsor	Diâmetro: 135 mm Comprimento: 238 mm	Motor em PMMA e demais peças em aço inox	
Estrutura retrátil	200x200x400 mm	Diversos	
Estrutura expandida	300x300x600 mm	Diversos	

O fator de segurança (FS) é expresso como a razão entre a tensão máxima admissível (característica mecânica intrínseca a cada material) e a tensão real. Para que o projeto esteja em uma faixa de segurança aceitável, é recomendado que o FS exceda a margem de 1.0 significativamente. Um FS menor do que 1.0 indica que algum tipo de falha ocorrerá, tanto uma deformação como uma eventual ruptura do material. Este fator apresenta um resultado significativo para avaliar a adequação de um projeto à aplicação pretendida [13].

A tensão é definida como a força atuante por unidade de área. O cálculo é realizado conhecendo-se a deformação, que é o alongamento por unidade de comprimento, e a rigidez do material. São gerados seis componentes individuais e três resultados combinados de tensão, denominados tensores de tensão [14]. Um esquema dos tensores pode ser visualizada na Figura 4 [15]. Uma maneira comum de expressar os componentes é combiná-los em uma magnitude de tensão equivalente, conhecida como tensão de Von Mises ( $\sigma_v$ ). Essa tensão define um critério de falha também conhecido como teoria da máxima energia de distorção, ou seja, na condição de falha, a energia de distorção é igual à energia de distorção da falha de um corpo uniaxialmente carregado em um ensaio de tração. O corpo de prova, então, passa a ter um comportamento plástico [16].

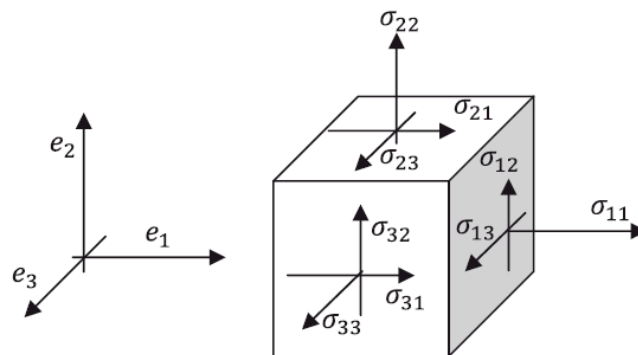


Figura 4: Modelo esquemático dos tensores de tensão.

O deslocamento dos componentes consiste em quanto o modelo se moveu em relação a sua posição inicial, o que apresenta um fator muito importante na análise de segurança do lugar onde será instalada a bancada de testes [14].

O *Fusion 360 Simulation* faz uso do método dos elementos finitos. Este método permite a obtenção de respostas para inúmeros problemas de engenharia. Inicialmente, a estrutura que está submetida aos carregamentos e restrições é subdividida em diversas partes pequenas, denominadas elementos, de modo a simplificar o problema. As variáveis desconhecidas são substituídas por um número limitado de elementos com dimensões finitas e um comportamento bem definido. Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós. Ao conjunto de todos esses itens, dá-se o nome de malha [17]. É importante mencionar que no processo de análise dos elementos finitos as equações matemáticas que regem o comportamento físico não são resolvidas de maneira exata, portanto, são feitas aproximações. A precisão dos resultados dessa análise depende do tamanho e do número de elementos em uma determinada malha, ou seja, quanto menor for o tamanho e maior o número deles em uma determinada malha, maior a exatidão [17]. Em todo caso é essencial que sejam realizados testes reais para a verificação da segurança e integridade do projeto.

Para as simulações foi necessário informar as propriedades de engenharia de cada material, de cada parte da estrutura, que formam os dados de entrada. Os materiais mais comuns já possuíam os dados contidos no banco de dados do *software*, mas para o aço mola utilizado nas laminas flexíveis foi necessário buscar na literatura.

Após informar os dados de entrada fez-se a subdivisão da estrutura em pequenas partes para construir a malha por meio da ferramenta “Generate Mesh”. A primeira configuração da malha é dada pelo software e tem a opção de deixá-la mais fina para aumentar a precisão dos resultados. Para o presente projeto foi escolhida a opção de uma malha 50% mais fina do que a configuração inicial.

Uma configuração da bancada com o propulsor acoplado e já com malhas definidas, pronta para a simulação das tensões, deslocamento e fator de segurança do projeto, é apresentada em vista isométrica na Figura 5. Observa-se que há uma seta indicativa na pós câmara de combustão, indicando que foi feita a aplicação de um carregamento de força para simular o empuxo gerado pelo motor. As simulações foram realizadas na condição retrátil para empuxo

inicial de 2,5 N e aumentando gradativamente esse valor até que o fator de segurança indicasse o limite próximo de 1,0. Esse valor de empuxo máximo na condição retrátil foi adotado como limite de operação. Portanto, para a condição totalmente expandida as simulações obedeceram o intervalo imposto pela condição retrátil.

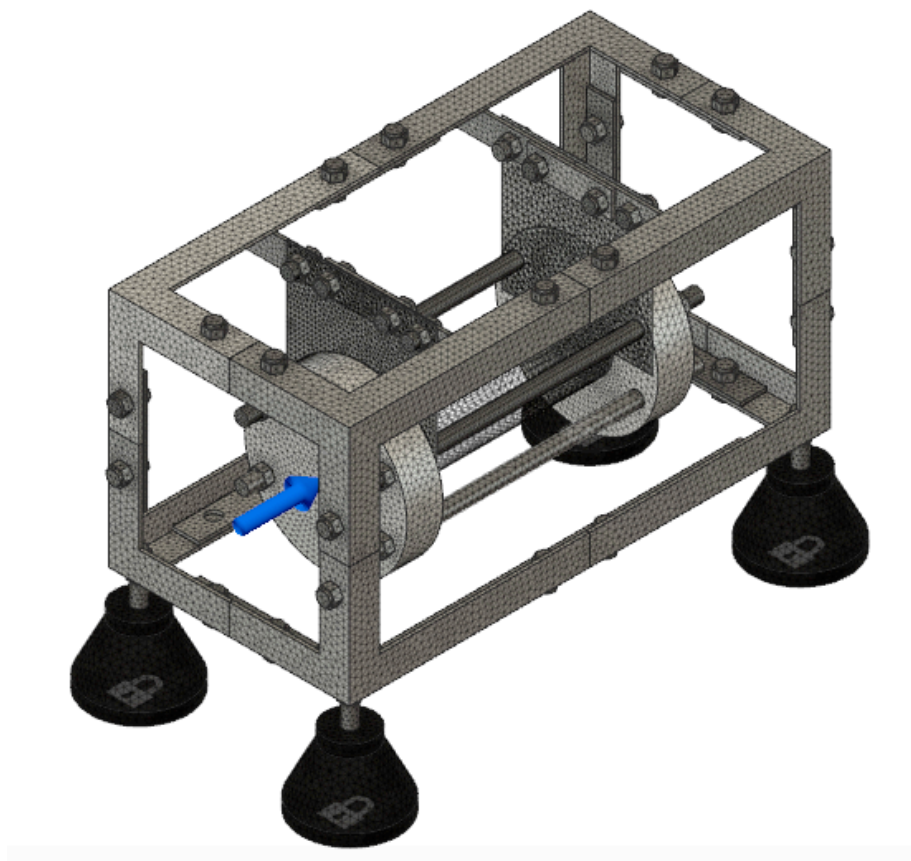


Figura 5: Distribuição da malha na estrutura e indicação do carregamento de força aplicado na pós câmara de combustão indicado pela seta.

## 5. Resultados e comentários das simulações

As primeiras simulações para verificação do fator de segurança em função da variação do empuxo foram realizadas para a condição retrátil. Na Figura 6 é apresentada a curva resultante do fator de segurança em função do empuxo, cujo valor máximo encontrado para a condição retrátil foi de 15 N. Nota-se que os resultados do fator de segurança obtidos apresentam valores acima de 1, ou seja, estão dentro da faixa de segurança para projetos de engenharia. De acordo

com os valores obtidos para a faixa de empuxo de 2,5 a 7,5N, não é esperado que hajam falhas ou deformações significativas na estrutura. No entanto, para os valores de empuxo maiores ou igual a 10N, o fator de segurança não excede consideravelmente a margem de 1. Isto implica em uma faixa de segurança suficiente, porém a influência de fatores externos podem fazer com que hajam falhas na estrutura. Portanto, como o resultado de uma faixa de segurança baixa apresentada para propulsores com empuxo acima de 10N, o intervalo de operação de empuxo ficou definido como de 2,5 a 7,5N para a condição retrátil da bancada.

Para que a simulação estrutural expandida da bancada de testes fosse realizada, fez-se necessário aumentar as dimensões das lâminas flexíveis e do propulsor, representando uma situação em que deseja-se testar um motor maior. No entanto, foi mantida a faixa de empuxo de 2,5 a 15N para os testes. Ao simular a estrutura expandida, foram obtidos valores de fator de segurança acima do limite aceito pelo software, na margem de 15, indicando que a estrutura está superdimensionada e atende às exigências do projeto de uma maneira bem acima do esperado. Esse resultado era esperado, pois o limite de um empuxo de 15N foi imposto para a condição retrátil. Entretanto, é válido destacar que mesmo a estrutura mecânica suportando os testes além das expectativas, não é recomendável exceder a faixa de empuxo estipulada pois os testes serão realizados dentro de um laboratório didático, logo a segurança do local e das pessoas é imprescindível.

Desta forma, a bancada de testes pode ser considerada apta para a realização de testes de forma segura, utilizando propulsores até 7,5 N na configuração retrátil e até 15N na configuração expandida. Para a condição retrátil, no que se diz respeito às tensões na estrutura em função da variação de empuxo, os valores resultantes apresentaram um comportamento linear em relação ao aumento do empuxo, como pode-se observar na curva apresentada na Figura 7. Além disso, é interessante destacar que os valores máximos de tensão obtidos são observados nas lâminas flexíveis que compõem a balança de empuxo, e que pouca variação de tensão foi observada na base de suporte e nos componentes de fixação. Na Figura 8 é apresentado o resultado da simulação para o caso de 10N retrátil e pode-se observar que a tensão máxima é de 179.8MPa e se concentra nas lâminas flexíveis. Isto é, apesar da estrutura suportar o carregamento neste caso, recomenda-se a troca do material das lâminas flexíveis para um material cujas características proporcionam uma maior resistência.

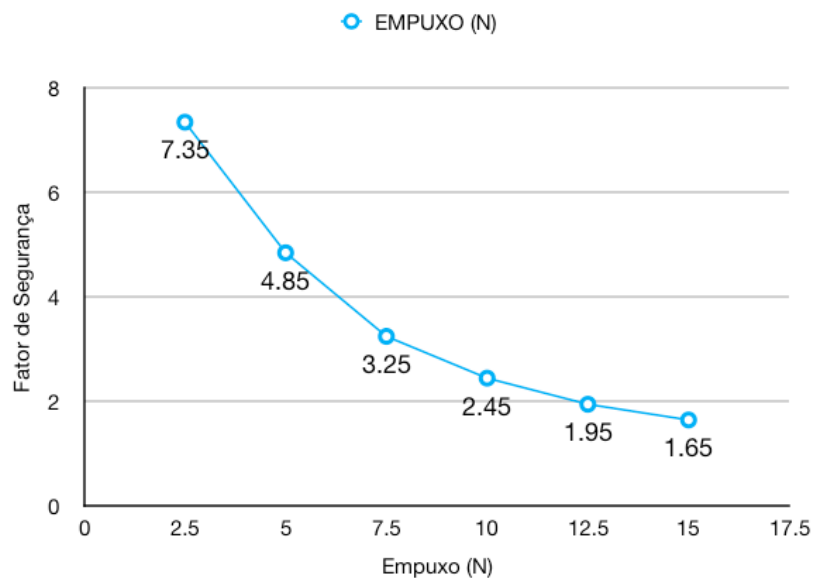


Figura 6: Fator de segurança da estrutura retrátil da bancada em função do empuxo (N).

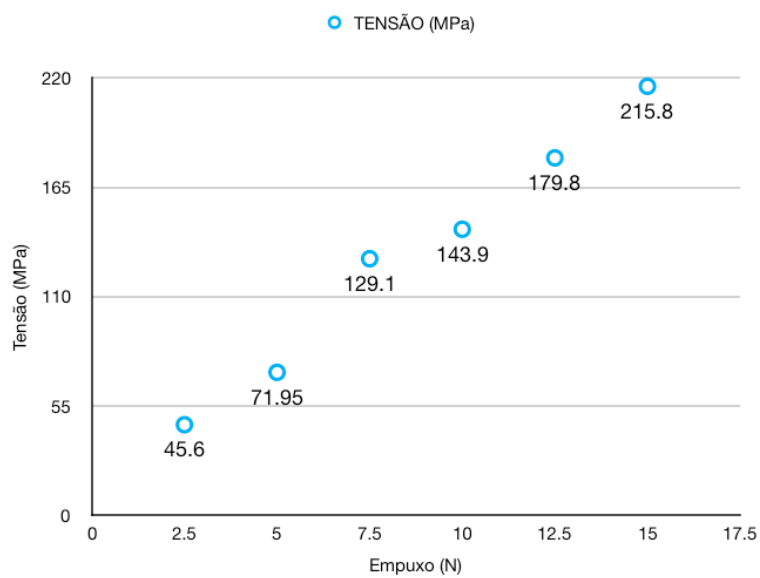


Figura 7: Tensões de deformação (MPa) da estrutura retrátil da bancada em função do empuxo (N).

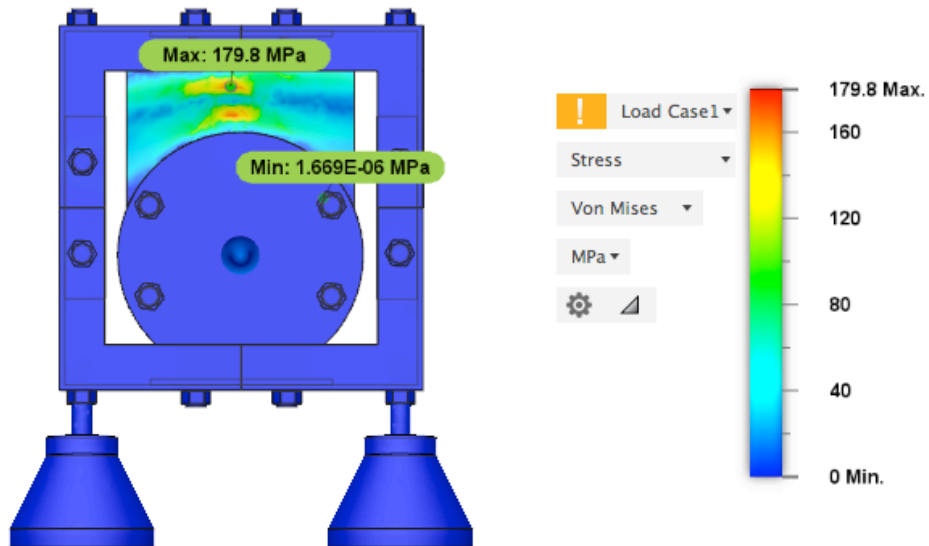


Figura 8: Distribuição de tensão na estrutura mecânica da bancada para empuxo de 10N, condição retrátil.

Para a estrutura expandida o resultado obtido para o teste de tensão em função do empuxo foi de um comportamento linear em relação ao empuxo, porém com valores mais baixos em comparação com os da bancada retrátil, conforme pode-se observar na curva resultante apresentada na Figura 9. Os componentes nos quais observou-se uma maior concentração de tensão foram as lâminas flexíveis e as barras de aumento da base de suporte. Como as barras de aumento não são do tipo L, possuem uma maior concentração de tensão, porém a estrutura permanece segura, conforme mostrado na Figura 10.

O teste de deslocamento mostra o quanto o modelo se moveu em relação a sua posição inicial, portanto, é esperado que o propulsor apresente o maior deslocamento entre todos os componentes da bancada e que as sapatas de borracha não se desloquem.



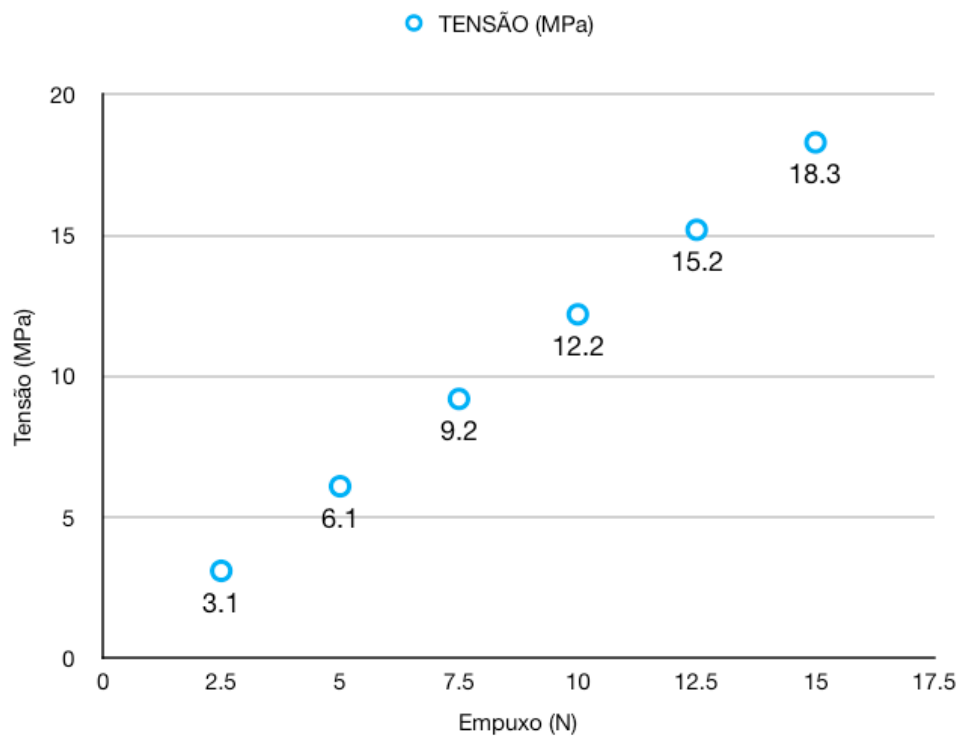


Figura 9: Tensões de deformação (MPa) para a condição expandida da bancada em função do empuxo (N).

Para a condição retrátil o resultado do teste de deslocamento para forças de empuxo no intervalo de 2,5 a 15 N mostrou que os máximos valores foram para o do propulsor e lâminas flexíveis. Devido à força de empuxo aplicada, este valor variou de 1,5 a 2mm nas simulações realizadas. A estrutura apresentou um deslocamento mínimo dos componentes da base de suporte, com valores abaixo de 0.6mm, o que indica que a bancada pode ser seguramente disposta dentro de laboratórios didáticos. Como exemplo, os resultados de deslocamento obtidos para um empuxo de 10N podem ser vistos na Figura 11.

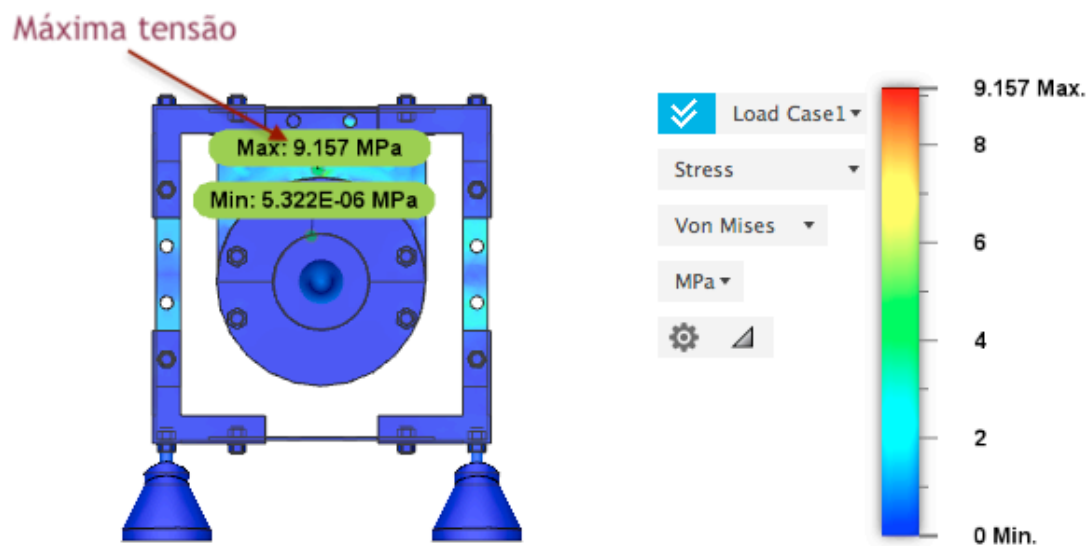


Figura 10: Distribuição de tensão na estrutura mecânica da bancada para um empuxo de 10N, condição expandida.

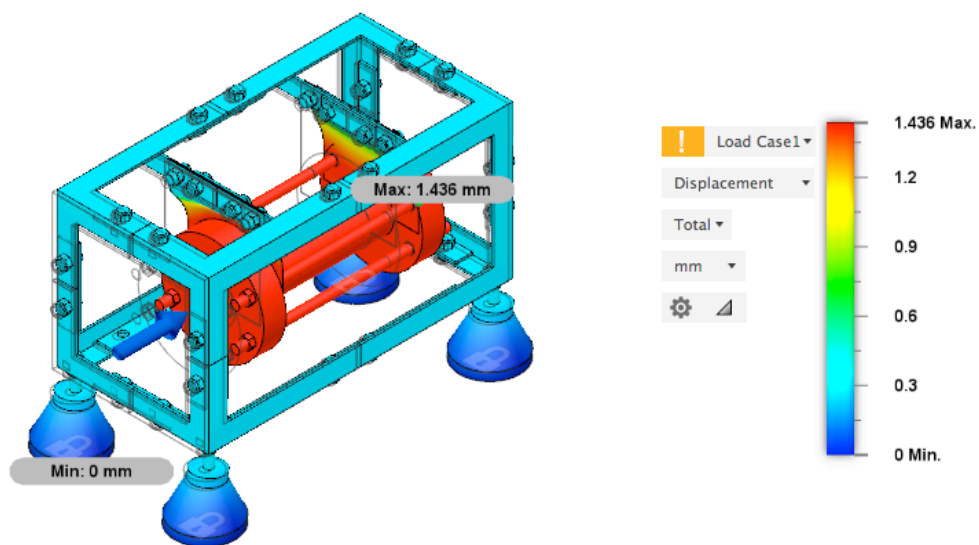


Figura 11: Resultado da simulação do deslocamento dos componentes da estrutura da bancada de testes considerando 10N de empuxo.

Para a condição de estrutura expandida o deslocamento da base de suporte permaneceu com valores até 85% mais baixos. A Figura 12 apresenta os resultados obtidos considerando o motor de 10N de empuxo.

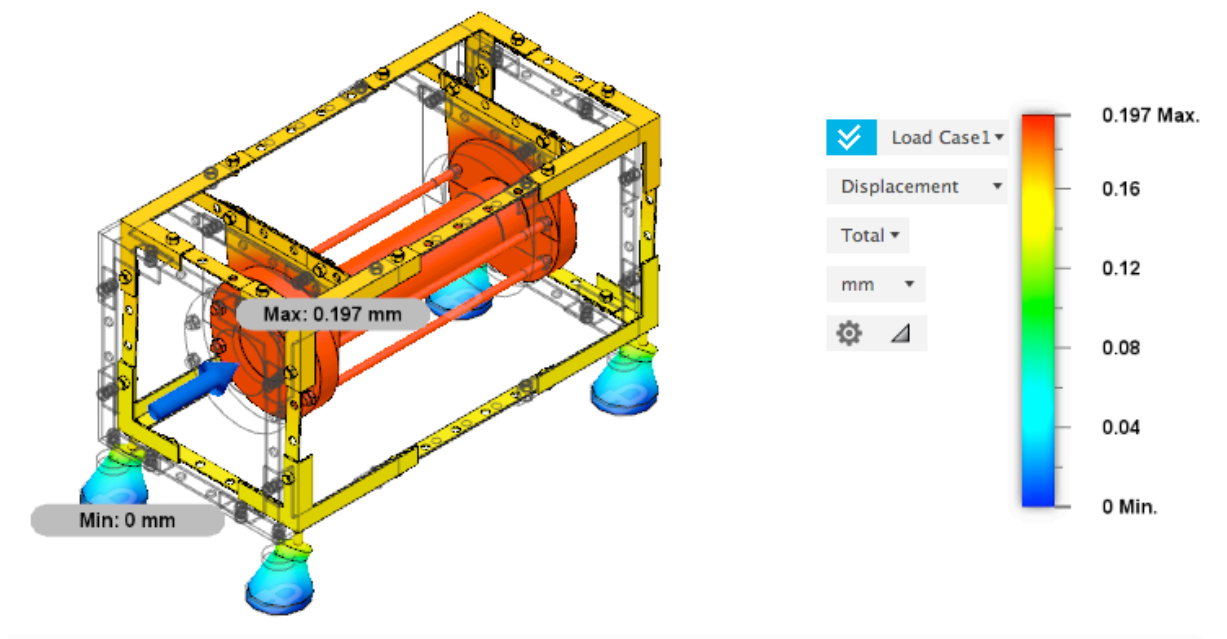


Figura 12: Resultados da simulação do deslocamento dos componentes da estrutura da bancada de testes considerando 10N de empuxo, estrutura expansível.

Convém mencionar que foram gastos em torno de quatro horas para rodar todas as combinações estabelecidas. Para as simulações foram consideradas ambas as configurações da bancada, retrátil e expandida, variando o empuxo em intervalos de 2,5N até o valor máximo de 15N, o que resultou um total de doze combinações. Cada simulação teve duração de aproximadamente vinte minutos.

## **6. Conclusão**

Com base no extenso levantamento bibliográfico e nos resultados obtidos por meio das simulações estruturais, conclui-se que a estrutura mecânica da bancada de testes estáticos para propulsores a jato idealizada neste trabalho, atende às condições de operação de propulsores híbridos de pequeno porte. Critérios de projeto como segurança de operação, simplicidade e baixo custo foram levados em consideração. Também idealizou-se uma geometria horizontal e uma base de suporte retrátil expansível para garantir versatilidade ao uso da bancada, podendo ser utilizada em laboratório didáticos e/ou de pesquisas.

Com os resultados das simulações dos testes de fator de segurança foi possível determinar que a bancada de testes é apta para operar de forma segura, utilizando propulsores até 7,5 N na configuração retrátil e até 15N na configuração expandida.

Sendo assim, o projeto da estrutura mecânica desenvolvido neste trabalho de pesquisa foi validado e se apresenta adequado para que se realize uma futura construção e instalação no laboratório de Combustão e Propulsão da UFABC.

## REFERÊNCIAS

- [1] SUTTON, G. P. Rocket Propulsion Elements, An introduction to the Engineering of rockets. New York: Wiley, 1992. 636.p
- [2] CONTAIFER, R.A. Desenvolvimento de uma bancada de testes de propulsores híbridos de baixo empuxo. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (2009).
- [3] MATTINGLY, Jack D. Elements of propulsion: gas turbines and rockets. Reston,USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. lx, 867 p., il. (AIAA education series). ISBN 9781563477799.
- [4] CHIAVERINI, Martin J; KUO, Kenneth K. Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. 649 p.
- [5] WRIGHT, A. M. et al. A six degree-of-freedom thrust sensor for a lab scale hybrid rocket. *Measurement Science and Technology* **24**. (2013).
- [6] Neff, T. Rehberger, M.; Meroth, A. Thrust test bench for student rocket engines. *11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), Compiègne*. pp. 141-145. (2016).
- [7] FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC. Projeto Pedagógico das Engenharias. Santo André, 2016. Disponível em:  
<[http://prograd.ufabc.edu.br/cg/2016/OD3\\_PPC\\_ENGS\\_2017\\_IVextra.pdf](http://prograd.ufabc.edu.br/cg/2016/OD3_PPC_ENGS_2017_IVextra.pdf)>. Acesso em 22 mar. 2017.
- [8] ENGLER, et al. *Building and testing of a lab scale hybrid rocket motor for acquisition of regression rate equations. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Curitiba*. (2017).

[9] AUTODESK. Fusion 360. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/students-teachers-educators>> Acesso em 26 de fev. 2018.

[10] TURBONASA AÇOS LTDA. Tubos de aço carbono. Disponível em: <<http://www.tubonasa.com.br/produtos/metalon/>>. Acesso em 22 de jan. 2018.

[11] MONFER. Indústria de niveladores. Disponível em: <<http://www.monferniveladores.com.br>>. Acesso em 14 de fev. 2018.

[12] AUTODESK. About Fusion 360 Simulation. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-8CC26683-A6DD-4FDC-80BD-0DC40D7ACAF2>>. Acesso em 25 de maio. 2018.

[13] AUTODESK. Safety Factor. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-8D0B2980-6B54-4006-A89E-53C0C2E202B4>>. Acesso em 25 de maio. 2018.

[14] AUTODESK. Displacement. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-296056DA-ED8C-4EBF-8E3A-2209B1DE9AEE>>.

[15] ADEEB, S. Stress: Cauchy stress tensor. University of Alberta, Canada. Disponível em: <<https://sameradeeb-new.srv.ualberta.ca/stress/cauchy-stress-as-a-linear-map/>>. Acesso em 28 de maio. 2018.

[16] ISAAC, M. D., ORI ISHAI. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2a ed. New York, Oxford University Press, 2006. 411 p.

[17] ESS. *Método dos Elementos Finitos*. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em 28 de maio. 2018.