

PIVOTTO, Leonildo Bernardo; IZOLA, Dawson Tadeu. Proposta de construção de um motor foguete experimental. In: WORKSHOP DE INOVAÇÃO, PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO, 3., 2018, São Carlos, SP. *Anais...* São Carlos, SP: IFSP, 2018. p. 151-154. ISSN 2525-9377.

## PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR FOGUETE EXPERIMENTAL

LEONILDO BERNARDO PIVOTTO; DAWSON TADEU IZOLA

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Carlos, Brasil

**RESUMO:** O desenvolvimento aeroespacial possui um profundo impacto no acesso à tecnologias que a civilização humana desfruta nos dias de hoje. Comunicações por longas distâncias, televisão via satélite, novos materiais, sistemas de defesa de fronteiras e monitoramento das variações climáticas e do desmatamento. Nada disso seria possível se o avanço científico não possibilitasse o lançamento de objetos para o espaço até a órbita necessária. O objetivo desse trabalho foi introduzir o conhecimento físico e tecnológico na área de foguetes, em especial seus elementos propulsivos, para o aluno de graduação. Tomando como ponto de partida um levantamento teórico sobre o tema até a elaboração e fabricação de um sistema que conseguisse simular uma câmara de empuxo de motor foguete. Tal abordagem, contribuiu para uma formação continuada do aluno, tanto em aspectos teóricos quanto práticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Motor foguete. Propulsão. Empuxo. Protótipo. Experimento.

**ABSTRACT:** Aerospace development has a profound impact without access to technologies that human civilization available today. Long distance communications, satellite television, new materials, border defense systems and monitoring of climatic variations and deforestation. None of this is possible scientific advancement not possible or throwing objects into space into orbit. The objective of this work is to introduce the physical and technological knowledge in the area of rockets, especially its propulsive elements, for the undergraduate student. Taking as a starting point a theoretical survey on the subject until an elaboration and fabrication of a system that can simulate a rocket motor thrust chamber to be submitted in a static test. Such an approach, contributions to assist student training, both in theoretical and practical aspects.

**KEYWORDS:** Rocket motor. Propulsion. Thrust. Prototype. Experiment.

### INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias espaciais é uma das áreas de pesquisa da civilização que mais avançou em termos de velocidade de resultados quanto em produtos e materiais, se levarmos em conta que estamos discutindo um campo de pesquisa que existe a menos de um século. É impossível hoje não nos depararmos com algo que seja fruto direto ou indireto de tecnologia espacial: sistemas de telecomunicações, GPS, televisão via satélite, previsão do tempo, computadores cada vez mais modernos, novos e sofisticados materiais, produtos relacionados à defesa, melhorias aplicadas ao transporte aéreo, etc. Seu impacto vai além das possibilidades individuais de consumo e entretenimento.

A elaboração de um foguete, desde a sua concepção até a chegada ao espaço com sua carga, é uma tarefa que exige um conhecimento integrado em várias áreas da engenharia. O sistema propulsivo é um dos componentes de grande importância, pois é o responsável por oferecer a energia que levará o foguete e a carga até a altitude desejada com a precisão necessária (RIBEIRO, 2013). Mesmo sendo apenas um dos subsistemas que compõem o foguete, a propulsão por si só demanda conhecimentos de diferentes áreas da mecânica, exigindo do interessado conhecimentos tanto teóricos (envolvidos na elaboração do projeto) quanto práticos (fabricação das peças, preparação, lançamento e testes).

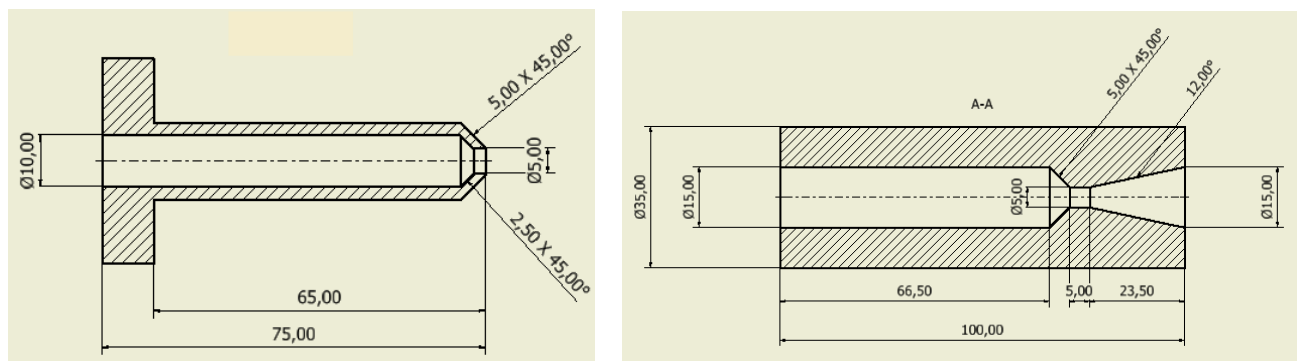
Embora tradicionalmente o contato mais profundo nessa área ocorra em programas de mestrado e doutorado, é de grande valor material e intelectual iniciar uma abordagem, mesmo que superficial, em cursos de graduação, despertando interesse e contribuindo para a formação de mão de obra pra o setor.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho teve como início em uma revisão bibliográfica sobre o assunto, iniciando com uma abordagem geral do tema, através de conceitos físicos básicos, tipos de propulsores e parâmetros gerais de desempenho. Existe já há alguns anos uma bibliografia que explica de uma forma geral os cálculos e parâmetros necessários para o funcionamento do foguete (empuxo, impulso específico, apogeu, velocidade, geometria dos componentes principais, tipos de propelentes) com base tanto na teoria tanto com o avanço prático da área ao longo das décadas (GOTTMANN, 2013; PALMERIO, 2017; SUTTON, 2001). No que se refere ao processo de manufatura, o aluno colocou em prática conhecimentos de desenho técnico, metrologia, elementos de máquinas, ciência dos materiais e processos de fabricação, em particular usinagem. Durante o trabalho, também se utilizou de recursos avançados de engenharia para aperfeiçoamento do projeto, como por exemplo usinagem por CNC, ferramentas CAD/CAM e simulação das condições propulsivas via software baseado em tecnologia CAE (elementos finitos).

A proposta experimental se baseou na construção de um conjunto mecânico que simulasse a câmara de empuxo de um foguete, alimentado com sistema de ar comprimido com pressão de entrada conhecida. Montado em uma estrutura adequada, o conjunto é alimentado com ar em elevada pressão e posteriormente se verificou o empuxo obtido com o auxílio de uma balança eletrônica em um teste estático. O motor foguete é formado por duas peças de bronze. Uma peça fêmea com formato semelhante ao chamado tubo do tipo DeLaval, possuindo uma seção de estrangulamento que possibilita um diferencial de pressão, diminuindo a pressão e elevando a velocidade de escape dos gases. Esse formato é muito útil para o estudo de fenômenos de transporte e possibilita a obtenção de empuxo para foguetes. A outra peça, é uma haste com furo passante com uma flange, que por sua vez será acoplada a outra flange com a conexão pneumática necessária para abastecer o sistema.

**Figura 1: Componentes do motor foguete**

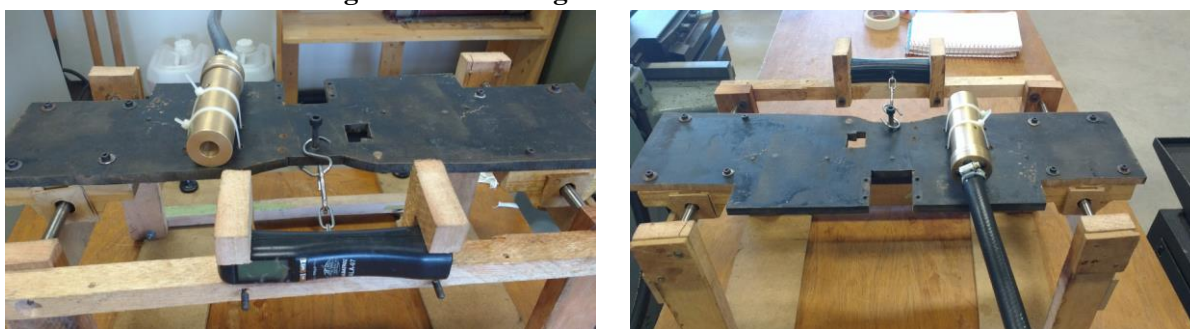


Fonte: Elaboração própria.

A etapa de fabricação do protótipo envolveu basicamente processos de usinagem (torneamento, fresamento e furação). Certas geometrias exigiram um pouco mais de dedicação no momento da usinagem. O bocal de saída da peça fêmea por exemplo, por exigência de rugosidade da superfície e de dimensão do ângulo, foi feita no centro de usinagem CNC, se utilizando de movimentos precisos em elevada velocidade de rotação da ferramenta (por volta de 7000 RPM). Já a usinagem interna das duas peças com o detalhe dos ângulos de 45°, exigiu a fabricação de uma ferramenta adequada para o torneamento, que possuísse dimensões suficientes para atender o perfil desejado ao mesmo tempo que tivesse robustez necessária para evitar vibrações e garantisse uma rugosidade superficial adequada.

Para a fixação necessária ao teste, utilizamos uma estrutura de madeira gentilmente cedida pela equipe Dragão Branco, que participa de competições universitárias de aeromodelo no Brasil e no exterior. Essa estrutura possui uma parte fixa com suporte necessário para a fixação da balança eletrônica que realizará a medição do empuxo, e uma parte móvel onde ficará fixado o conjunto do motor foguete. O gancho da balança, encaixado em um parafuso da parte móvel, realiza a medição do empuxo conforme a passagem do ar comprimido pelo bocal de escape produz a força propulsiva responsável pela movimentação do motor. Para que o atrito seja minimizado da melhor forma possível, a parte móvel da estrutura se desloca através de duas hastes retificadas montadas em um conjunto de guias lineares.

**Figura 2: Motor foguete na bancada de testes**

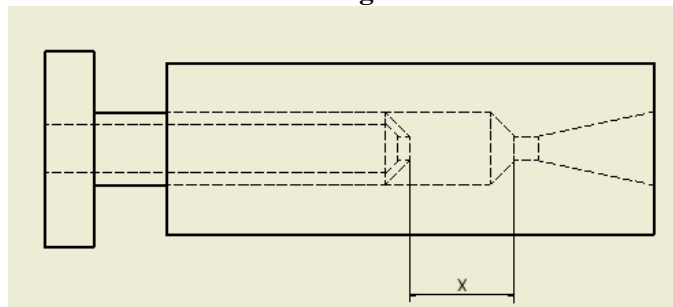


Fonte: Elaboração própria.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para se verificar a variação do empuxo durante os testes, optou-se por manter a pressão de entrada sempre constante (80 psi) sempre por um período de 30 segundos e variar a posição de fixação da peça macho em relação a peça fêmea. O esquema a seguir ilustra como ocorreu a definição dessas posições. Tomando a distância “x” como referência, desde a peça totalmente encaixada ( $x = 0$ ), até as medições nas posições 5, 10, 15 e 20. O objetivo era verificar como o empuxo se comportaria (se iria aumentar ou diminuir).

**Figura 3: Croqui esquemático do conjunto montando indicando a variação na posição de montagem**



Fonte: Elaboração própria.

Após a montagem do motor foguete na estrutura com a balança e determinados os parâmetros para o teste estático, teve início a verificação dos valores de empuxo seguindo os procedimentos de posição da peça macho nas distâncias determinadas. Realizando-se os testes com pressão de entrada de 80 psi com o fluxo de ar comprimido aberto por 30 segundos, foram obtidos os valores de empuxo abaixo na escala kgf.

**Tabela 1: Valores de empuxo obtidos na escala kgf**

Posição (mm)	Força (kgf)				
	1	2	3	4	5
0	0.94	0.96	0.96	0.94	0.94
5	0.90	0.88	0.88	0.88	0.90
10	0.88	0.86	0.86	0.88	0.86
15	0.82	0.82	0.80	0.80	0.80
20	0.78	0.74	0.76	0.76	0.74

Fonte: Elaboração própria.

## CONCLUSÕES

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foi possível projetar, construir e testar o motor foguete de acordo com os parâmetros estipulados, possibilitando a medição do empuxo e sua variação conforme se alterava a posição de montagem entre os bocais macho e fêmea (inicialmente totalmente encaixado e posteriormente com diferentes posições). No geral, mesmo com uma abordagem básica sobre conceitos de engenharia aeroespacial, o projeto ajudou na aproximação inicial com a temática durante o curso de graduação, além de integrar estudos teóricos com atividades práticas de projeto, fabricação, montagem e realização de experimentos.

## REFERÊNCIAS

Gottmann, C. A. **Motor foguete à propulsão líquida**: uma proposta de procedimentos para ensaios. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.

Palmerio, A. F. **Introdução a tecnologia de foguetes**. 2. ed. São José dos Campos: SindCT, 2017.

Ribeiro, M. V. F. **Metodologia de projeto e validação de motores foguete a propelente sólido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

Sutton, G. P. **Rocket propulsion elements**: an introduction to the engineering of rockets. 7. ed. New York: John Wiley, 2001.