

v. 43, 2024

FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

FÉLIX MODEL ROCKET: A TOOL FOR TEACHING SCIENCE AND POPULARIZING ASTRONAUTICS

Rodolfo Sousa Ramos¹, Guilherme Bertoldo², Carlos Henrique Marchi³

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v43p1-19.2024

RESUMO: Apresenta-se um minifoguete didático (foguetemodelo) desenvolvido com o propósito de motivar jovens estudantes ao estudo de ciências e, em particular, estimulá-los a seguir a carreira aeroespacial. O projeto do minifoguete foi elaborado para atender aos seguintes requisitos: facilidade de produção (impressão 3D), possuir sistema de recuperação por paraquedas e compartimento de carga, ser reutilizável, modular e seguro. São fornecidos *links* em que podem ser obtidos os arquivos prontos para impressão desse minifoguete, que utiliza como propulsor um motor-foguete de fogos de artifício do tipo rojão de vara. Foram realizados 36 testes para qualificar o propulsor e o minifoguete, em duas versões com 35 e 40 mm de diâmetro e massa total de decolagem entre 212 e 276 gramas, ambos com 436 mm de comprimento, que atingem entre 36 e 76 metros de altura.

PALAVRAS-CHAVE: foguetemodelo; astronáutica; educação; foguetemodelismo; motor-foguete; minifoguete; foguete.

ABSTRACT: A model rocket, developed to motivate young students to study science and, in particular, to encourage them to pursue an aerospace career, is presented. The model rocket project was designed to meet the following requirements: ease of production (3D printing), to have a recovery system by parachute and cargo compartment, to be reusable, modular, and safe. Links are provided where files for 3D printing can be downloaded. The didactic rocket uses fireworks as rocket motors. The model rocket and its motor were qualified through 36 tests. Two versions were developed, one with 35 and another with 40 mm in diameter and total takeoff mass between 212 and 276 grams, both with 436 mm in length, which reach between 36 and 76 meters in height.

KEYWORDS: model rocket; astronautics; education; rocketry; rocket motor; mini rocket; rocket.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias para o setor aeroespacial, cujo impacto positivo para a vida humana é notório, depende essencialmente da formação de pessoal qualificado (BISCHOFF et al., 2008). Os foguetes, atualmente, são os únicos

¹ Acadêmico de Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). rodolforamos@alunos.utfpr.edu.br

² Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). gbertoldo@utfpr.edu.br

³ Doutor em Eng. Mecânica. Universidade Federal do Paraná (UFPR). chmcfd@gmail.com



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

veículos capazes de transportar carga e seres humanos para o espaço; os satélites permitem o georreferenciamento, as telecomunicações, o monitoramento climático e territorial; os telescópios em órbita permitem as observações astronômicas do espaço profundo, apenas para citar alguns exemplos. O processo de qualificação ocorre em várias etapas, cada qual com um público-alvo e nível de aprofundamento, com início na motivação de jovens estudantes e culminando nas pesquisas de ponta realizadas em indústrias, centros de pesquisa e universidades. Quanto maior o número de estudantes envolvidos no início deste processo educativo, maiores serão as chances de surgimento de profissionais talentosos.

Uma das formas de engajar estudantes para o estudo de ciências e, em particular, para a área aeroespacial, é por meio do desenvolvimento de foquetes em miniatura (minifoguetes). Há numerosos registros na literatura nacional (BEXIGA, 2015; DE SOUZA SANTOS; LEÃO, 2022; FONSECA; RODRIGUES; FONSECA, 2018) e internacional (HUNT et al., 2004; MITTERER et al., 2018; SHEARER; VOGT, 2011) sobre a utilização de foguetes para o ensino de Matemática, Física, Química, Engenharia. De fato, há uma gama abundante e interdisciplinar de tópicos que podem ser estudados para o desenvolvimento de minifoguetes. Em linhas gerais, destacam-se: Dinâmica de Voo, Propulsão, Sistemas de Recuperação, Projeto Estrutural, Eletrônica e Telemetria. Cada tópico apresenta uma vasta lista de subtópicos de estudo. Apenas a título de ilustração, em Dinâmica de Voo, podese estudar as principais forcas atuantes sobre o minifoquete (aravitacional, arrasto, empuxo, sustentação), a previsão de trajetória (movimentos de translação e rotação) com base nas leis de Newton, a determinação do centro de gravidade e de pressão, a análise de estabilidade, os efeitos atmosféricos (variação da temperatura e da pressão com a altitude) entre outros.

É consenso na literatura pesquisada que o desenvolvimento de minifoguetes não é apenas uma aplicação do conhecimento científico, mas tem um forte caráter motivacional, em razão de aguçar o imaginário humano (GILLMAN, 2013; ISHIHARA; NAKAHARA, 2019). Essa ideia é reforçada também no cinema, como, por exemplo, no filme October Sky.

Além do farto conteúdo e do caráter motivacional do desenvolvimento de foguetes, também há o efeito do desenvolvimento de habilidades comportamentais quando o desenvolvimento é realizado em grupo (BISCHOFF et al., 2008). De fato, este efeito foi observado nas seis edições do Festival Brasileiro de Minifoguetes, um evento anual, coordenado pelo professor Carlos H. Marchi, entre 2014 e 2019, na cidade de Curitiba. As equipes, majoritariamente formadas por



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

estudantes, participavam de competições de minifoguetes projetados para atingir um apogeu especificado ou máximo, em várias categorias, envolvendo minifoguetes que atingiam desde 50 a 1000 metros de altura. Por meio das seis edições do Festival, o foguetemodelismo foi difundido entre mais de 100 equipes de 19 estados e DF, das cinco regiões do Brasil (BAR, 2018).

Todavia, antes que minifoguetes sejam utilizados como ferramentas didáticas, há dois pontos críticos que merecem atenção especial: a propulsão e a recuperação. Falhas catastróficas (explosão do propulsor) e falhas no mecanismo de recuperação podem causar acidentes graves. Nos Estados Unidos, a National Association of Rocketry (NAR) estabelece códigos de segurança (NAR, 2012, [s.d.]) para uso de minifoguetes. No Brasil, o mesmo é feito pela Associação Brasileira de Minifoguetes (BAR) (BAR, 2020a). A observância dos critérios de segurança reduz significativamente o risco de acidentes. Ainda assim, recomenda-se que iniciantes utilizem um tipo especial de minifoguete, o foguetemodelo.

De acordo com a Norma BAR-2/2020 (BAR, 2020b), foguetemodelo é um

minifoguete constituído por motor-foguete comercial até a classe G (160 N.s de impulso total) e que usa apenas materiais de densidade baixa como papel, papelão, madeira leve como balsa, plásticos, borracha, isopor, fibra de vidro, fibra de carbono etc, e pequena quantidade de metal como em altímetros. (BAR, 2020, p. 3)

O conceito de foguetemodelo (model rocket) surgiu nos Estados Unidos durante o período da corrida espacial justamente para reduzir o risco de acidentes com iniciantes (COLBURN, 2012). Nesse país há diversas empresas especializadas na produção de motores-foguete e demais componentes de foguetemodelos.

O histórico do desenvolvimento de foguetemodelos no Brasil remonta à década de 1960. Sabe-se que nessa época já existiam grupos de foguetemodelismo, como o Centro de Estudos de Foguetes Espaciais de Carpina (CEFEC), criado em 1966, pelo professor José Félix de Santana (1948-2020). Durante a década de 1970, o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), de São José dos Campos, promoveu eventos e divulgou informações técnicas aos fogueteiros. Em 1978 surgiu o primeiro kit brasileiro de foguetemodelismo, o Sondinha II (Figura 1) (MARCHI, 2015). Na década de 1980 surgiu a Associação Brasileira de Atividades Educativas Espaciais (ABAEE). Na década de 1990 começaram a surgir algumas empresas que fabricavam kits e motores para minifoguetes. Finalmente, nos anos 2010, surgiram os atuais eventos de foguetemodelismo e as atuais associações BAR e COBRUF, com rápida expansão no número de equipes em quase todos os estados brasileiros. Atualmente existe apenas um fabricante de motores-foguete comerciais para minifoguetes no Brasil. Além da escassez de fornecedores em um



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

país continental, a aquisição desses motores esbarra em dificuldades devido à legislação para transporte de produtos inflamáveis (CORREIOS, [s.d.]). Para contornar as dificuldades de acesso a motores-foguete, alguns entusiastas relatam a utilização de motores de fogos de artifício⁴; um vídeo mostrando diversos tipos e tamanhos desses motores está disponível em Marchi (2022d). Outro aspecto que tem contribuído para o desenvolvimento de minifoguetes é a utilização de manufatura aditiva (impressão 3D). Tal tecnologia está em plena expansão, com redução de custo, ampliação de materiais de produção e aplicações (SHAHRUBUDIN; LEE; RAMLAN, 2019).

Tendo em vista o contexto apresentado e com o intuito de motivar jovens ao estudo de ciências e, em particular, estimulá-los à carreira aeroespacial, apresenta-se neste trabalho o foguetemodelo Félix (homenagem ao professor José Félix de Santana), uma ferramenta didática concebida para contornar algumas dificuldades enfrentadas por iniciantes. A proposta do foguetemodelo Félix combina o uso de motores-foguete de fogos de artifício e a produção da sua estrutura por meio de impressão 3D em módulos que possam ser facilmente acoplados. Embora motores de fogos de artifício e impressão 3D já tenham sido usados em minifoguetes, a contribuição desta proposta está na combinação de ambos em um projeto aberto de um foguetemodelo com capacidade para transporte de carga, sistema de recuperação por paraquedas, reutilizável, de fácil operação e seguro (respeitadas as regras de segurança).

Figura 1 – Minifoguete didático Sondinha II (Kit do Sondinha II)



Fonte: acervo do Prof. José Felix de Santana.

Figura 2 – Minifoguete didático Sondinha II (Sondinha II montado)



Fonte: acervo de Carlos Henrique Marchi.

Revista de Ensino de Engenharia, v. 43, p. 1-19, 2024 – ISSN 2236-0158

4

⁴ Informação obtida por comunicação pessoal com Paulo Gontran, entusiasta e fogueteiro veterano do foguetemodelismo no Brasil.



v. 43, 2024

O texto a seguir descreve como o foguetemodelo Félix foi projetado e construído, a qualificação do motor-foguete empregada e os voos testes. O texto foi organizado de tal forma que sirva como um guia para iniciantes na área e que desejam se aventurar no desenvolvimento dos seus próprios minifoguetes

METODOLOGIA

O desenvolvimento de minifoguetes normalmente segue um ciclo iterativo de projeto, simulação, construção, testes e revisão, com o objetivo de alcançar os requisitos de projeto previamente estabelecidos. Devido à extensão do assunto, o texto a seguir apresenta as principais diretrizes do desenvolvimento do foguetemodelo Félix, acompanhadas de referências a partir das quais o leitor pode se aprofundar. Em Marchi (2021b), por exemplo, há um curso completo, on-line e gratuito, sobre foguetemodelismo básico, incluindo aplicativos para projetar minifoguetes.

Os requisitos de projeto do foguetemodelo Félix são:

- facilidade de produção: a produção do minifoguete deve ser simples, pois, para iniciantes, é mais importante dedicar mais tempo na compreensão do funcionamento do minifoguete do que na sua produção;
- recuperável: o minifoguete deve possuir um sistema de recuperação por paraquedas;
- 3. reutilizável: caso não tenha ocorrido danos no último voo, o minifoguete deve ser reutilizável, bastando substituir o seu motor;
- 4. modularidade: o minifoguete deve ser composto por módulos facilmente acopláveis e que possam ser substituídos caso haja alguma avaria no último voo;
- 5. módulo de carga: o minifoguete deve possuir um módulo de carga, para transporte de eletrônica de bordo, como altímetros;
- 6. segurança: o voo do minifoguete deve ser estável e com apogeu inferior a 100m, para tornar adequado o seu uso em ambientes urbanos, que tenham pelo menos a dimensão de um campo de futebol de espaço aberto, sem edificações, fios, árvores etc.;
- 7. motor-foguete comercial: deve utilizar motor-foguete de fogos de artifício que seja fácil de encontrar no mercado;
- 8. projeto aberto: o projeto do minifoguete pode ser modificado para atender necessidades específicas dos usuários à medida que avançam na compreensão dos seus princípios de funcionamento.



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

A manufatura aditiva é uma ótima opção para atender ao primeiro requisito de projeto. Além disso, o custo da impressão 3D tem reduzido, o que torna a sua utilização viável.

Como o motor-foguete deve ser comercial, isso é, não é necessário projetá-lo, basta selecionar o modelo mais adequado entre os disponíveis no mercado e caracterizá-lo.

A caracterização do motor consiste na determinação dos seus parâmetros geométricos, da massa de propelente e da estrutura e da sua curva de empuxo, isto é, o empuxo E(t) como função do tempo t. A partir da curva de empuxo, outras grandezas importantes são obtidas, como o impulso I, o empuxo máximo E_{max} , o tempo de queima da carga propulsora T_p , o tempo de queima da carga temporizadora T_t etc (STINE; STINE, 2004).

A partir da caracterização do motor-foguete é possível criar um projeto preliminar do minifoguete e simular sua estabilidade e a sua trajetória. O projeto preliminar deve garantir que a condição de estabilidade de voo seja satisfeita. Para que o voo seja estável, a margem estática e deve ser maior que zero, preferivelmente entre 1,5 e 2,5. A margem estática é dada por

$$e = \frac{D_p - D_m}{d},\tag{1}$$

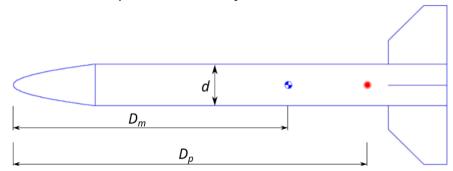
em que D_p e D_m são, respectivamente, a posição do centro de pressão e do centro de massa, medidos a partir da extremidade da ogiva (Figura 2), e d o diâmetro do tubo do foguete (STINE; STINE, 2004).

A simulação da trajetória envolve a resolução das equações diferenciais do movimento de translação e rotação obtidas a partir das leis de Newton, das forças atuantes sobre o minifoguete (empuxo, gravitacional, sustentação, arrasto) e das condições iniciais (THORNTON; MARION, 2003). As equações não possuem solução analítica e devem ser resolvidas numericamente. Felizmente há softwares, como OpenRocket (OPENROCKET, [s.d.]), RocketPy (CEOTTO et al., 2021), RockSim (FOSSEY, 2003), que permitem a elaboração do projeto e simulação da estabilidade e da trajetória.



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

Figura 3 – Parâmetros para a determinação da estabilidade de voo do minifoguete



Fonte: acervo dos autores.

Com o projeto preliminar, é possível criar um projeto detalhado do minifoguete em CAD (Computer-Aided Design). Esse tipo de projeto é fundamental para a descrição mais precisa do minifoguete e, também, para a impressão 3D. Há diversas ferramentas que podem ser utilizadas para CAD, como FreeCAD (FREECAD, [s.d.]), OnShape (ONSHAPE, [s.d.]), SolidWorks (SOLIDWORKS, [s.d.]) entre outras. Para realizar a impressão 3D, os desenhos devem ser exportados em um formato apropriado (STL, por exemplo) e importados em softwares conhecidos como fatiadores que geram comandos para impressão – por exemplo, Cura (ULTIMAKER, [s.d.]), PrusaSlicer (PRUSA, [s.d.]), Slic3r (SLIC3R, [s.d.]) entre outros.

O próximo passo consiste na produção do foguetemodelo. Nesse momento, observa-se algumas das vantagens da impressão 3D. Como a produção é automatizada, o usuário pode aproveitar melhor o seu tempo com a criação ao invés de gastá-lo com a construção. Além disso, é possível produzir diversas cópias idênticas do minifoguete sem grandes dificuldades.

A impressão 3D permite a fabricação de peças com preenchimento parcial de material. Preenchimento parcial significa que as linhas de deposição de material não são necessariamente contíguas. Em geral, quanto maior o percentual de preenchimento, maior é a resistência mecânica e a densidade da peça. Como o percentual de preenchimento afeta a massa do minifoguete, é necessário revisar o projeto após a sua impressão.

Por fim, o foguetemodelo deve ser testado em voos reais para avaliar a estabilidade da trajetória e o funcionamento do sistema de recuperação por paraquedas



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme já mencionado, o processo de desenvolvimento de minifoguetes envolve um ciclo de elaborações e correções. Os resultados desta seção são a síntese de várias iterações desse ciclo.

Testes do motor-foguete

Das opções de fogos de artifício com motores-foguete existentes no mercado, os fogos conhecidos popularmente como "rojão de vara" foram a opção mais adequada para atender aos requisitos do presente projeto.

O rojão de vara (Figura 4) é composto basicamente por uma cápsula plástica contendo um motor-foguete, um compartimento para o material explosivo e uma vara estabilizadora.

O motor-foguete do rojão de vara é composto por um invólucro de papel pardo, uma tubeira cerâmica, uma carga propulsora e uma carga temporizadora (Figura 5).

Como se pode perceber, há três tipos de carga no rojão de vara, cuja diferença essencial está na taxa de queima. A queima da carga propulsora gera o empuxo (a força propulsora) que acelera o rojão de vara para cima. Ao fim da queima dessa carga, a componente vertical do vetor velocidade do rojão de vara é relativamente alta e o dispositivo ainda pode se deslocar verticalmente antes que a carga explosiva seja detonada. É justamente para dar tempo do rojão se aproximar do seu apogeu, antes de ativar a carga explosiva, que existe a carga temporizadora. A taxa de queima da carga temporizadora é lenta comparada às demais, gerando uma força propulsora desprezível comparada à de empuxo. Como será visto adiante, a carga temporizadora terá um papel fundamental para a ejeção do paraquedas do foguetemodelo.

Invólucro de plástico Motor-foguete Estopim

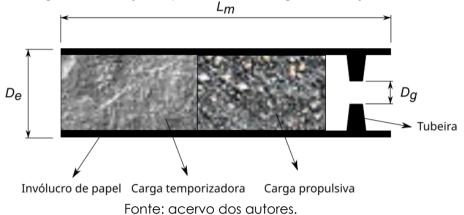
Carga explosiva Vara estabilizadora

Figura 4 – Partes de um rojão de vara



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

Figura 5 – Esboço do perfil do motor-foguete de rojão de vara



Neste projeto, a única parte de interesse no rojão de vara é o seu motorfoguete, que pode ser isolado facilmente, removendo-se o invólucro de plástico que o prende ao restante da estrutura.

Para a caracterização do motor, foram utilizados 18 motores fabricados pela empresa Super Fogos com dois tipos de motores: "treme-terra" e "explosão de cores", os quais podem ser vistos na Figura 6. Dos 18 motores, 12 foram submetidos a testes estáticos para determinar a curva de empuxo em setembro e dezembro de 2021. Os resultados das medições estão resumidos na Tabela 1, que apresenta o valor médio de cada grandeza avaliada e o respectivo desvio padrão. A Figura 6 mostra uma das curvas de empuxo obtida dos testes estáticos realizados. Em Marchi (2022e), pode-se ver o vídeo de um desses testes estáticos.

Figura 6 – Os dois tipos de motores de fogos de artifício que foram utilizados







FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

Tabela 1 – Caracterização de motor-foguete de fogos de artifício do tipo rojão de vara

Grandeza	Média ± Desvio padrão
Massa inicial do motor (m_0)	48.2 ± 1.7 g
Massa final do motor (m_f)	25.7 ± 0.6 g
Massa de propelente (m_p)	23.1 ± 2.2 g
Diâmetro da garganta (D_g)	6.6 ± 0.2 m
Diâmetro externo (D_e)	$25,4 \pm 0,4$ m
Comprimento (L_m)	99,8 \pm 0,6 m
Tempo de queima da carga propulsora (t_p)	0.7 ± 0.1 s
Tempo de queima da carga temporizadora (t_t)	3.4 ± 0.4 s
Empuxo médio (E_{med})	13 ± 2 N
Empuxo máximo (E_{max})	32 ± 7 N
Impulso (I)	8.9 ± 0.6 N.s
Classe do motor	С -

Fonte: elaborada pelos autores.

Fabricação do foguetemodelo

O foguetemodelo foi projetado em quatro módulos: nariz, módulo de carga, módulo de paraquedas e módulo de motor (Figura 8) (BERTOLDO, 2022). O nariz possui um perfil externo do tipo parabólico. O módulo de carga é destinado ao transporte de eletrônicos, como altímetros. Os altímetros comerciais são geralmente baseados em barômetro. Por isso, o módulo de carga possui orifícios para equalização da pressão interna à externa. O módulo de paraquedas possui um compartimento para alojar o paraquedas e uma janela lateral por onde o paraquedas é ejetado. No lado oposto à janela do módulo há um tubo guia utilizado para o lançamento do minifoguete. O módulo de motor aloja o motorfoguete e as empenas estabilizadoras de voo. Os módulos são independentes, ou seja, a montagem de um não afeta a montagem dos demais, e podem ser facilmente acoplados por rosca.

Foram desenvolvidos dois modelos: um com diâmetro externo do tubo principal de 40 mm (Félix-40) e outro com diâmetro de 35 mm (Félix-35). Ambos possuem o mesmo comprimento de 436,2 mm, medido da base do módulo de motor à ponta do nariz. A geometria e as dimensões das empenas dos dois modelos são detalhadas na Figura 9; cada modelo tem 4 empenas. O modelo Félix-35 foi criado com o objetivo de reduzir a massa estrutural do Félix-40. Embora a massa do Félix-35 seja cerca de 16% menor que a do Félix-40, este possui um compartimento maior



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

para alojar o paraquedas e a eletrônica. Por este motivo, decidiu-se construir e testar os dois modelos.

30 25 20 20 15 10 5

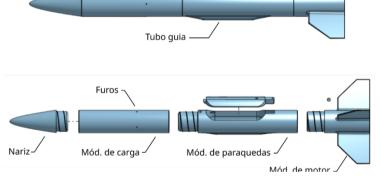
0.5

Figura 7 – Curva de empuxo típica para motores-foguete de fogos do tipo rojão de vara

Fonte: acervo dos autores.

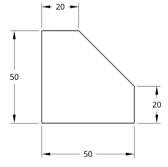
Figura 8 – Vista lateral do foguetemodelo Félix e seus módulos

0.6 t (s)



Fonte: acervo dos autores.

Figura 9 – Dimensões das empenas em milímetros





FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

O mecanismo de ejeção do paraquedas foi elaborado para aproveitar a queima da carga temporizadora do motor-foguete (Figura 10) (BERTOLDO, 2022). Ao final da queima da carga temporizadora, a frente de chama encontra e rompe um fio de náilon de diâmetro 0,3 ou 0,5 mm (fio de pesca) que mantém a janela do compartimento de paraquedas fechada. Com o rompimento do fio, um conjunto de elásticos empurra o paraquedas e a janela do compartimento para fora, como mostrado na Figura 11 e em Bertoldo (2022) e Marchi (2022c).

Força sobre a janela

Elástico

Fio de náilon

Frente de chama

Figura 10 – Vista em corte longitudinal do mecanismo de ejeção de paraquedas

Fonte: acervo dos autores.

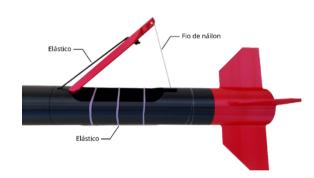


Figura 11 – Montagem do mecanismo de ejeção de paraquedas

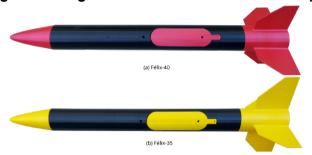
Fonte: acervo dos autores.

Os foguetemodelos Félix-40 e Félix-35 foram impressos em plástico poliácido láctico (PLA) com espessura de camada de 0,2 mm e preenchimento de 30% (Figura 12). O preenchimento resultou em massas de 135,7 g e 117,0 g, respectivamente.



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

Figura 12 – Foguetemodelos Félix-40 e Félix-35 impressos



Fonte: acervo dos autores.

O projeto em CAD foi reproduzido no software OpenRocket 15.03 para simular a estabilidade e apogeu do voo. As posições dos centros de massa dos minifoguetes impressos, medidas a partir da ponta do nariz, foram de 256 mm para o Félix-40 e 255 mm para o Félix-35. Os valores dos centros de massa calculados pelo software diferem em menos de 1,2% do valor medido. A diferença é justificada pela impossibilidade de representar todos os detalhes do projeto em CAD no OpenRocket. As simulações realizadas consideram que o minifoguete transporta um altímetro e um paraquedas, cada qual com 12 g (Figura 13). Para levar em consideração a variância dos motores observada nos testes estáticos, foram realizadas seis simulações, cada uma com uma curva de empuxo experimental. O resumo das simulações é apresentado na Tabela 2. Nessa tabela, a margem estática foi calculada para Mach 0,03. Das simulações, espera-se que o Félix-35 seja mais estável que o Félix-40 e que atinja apogeus, em média, 21% maiores. Note que o apogeu médio dos foguetemodelos está dentro do estabelecido nos requisitos de projeto.

Altímetro -**Paraquedas** Centro de massa Centro de pressão

Figura 13 – Representação do foguetemodelo no software OpenRocket



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

Testes de voo do foguetemodelo

Visando qualificá-los em voo, foram realizados 18 lançamentos dos dois tipos do foguetemodelo Félix, de agosto de 2021 a outubro de 2022. A partir dos primeiros lançamentos identificou-se a necessidade de adaptações no módulo de paraquedas para que a chama da carga temporizadora do motor não chamuscasse o paraquedas. Além disso, identificou-se que o elástico da janela na Figura 10 não era suficiente para garantir que o paraquedas fosse removido do seu alojamento e o abrisse antes que o foguetemodelo atingisse o solo, o que levou à inclusão da "cama de elásticos", também mostrada na Figura 10. Com estas correções, todos os lançamentos seguintes foram bem-sucedidos.

Tabela 2 – Grandezas de interesse dos foguetemodelos obtidas por simulação

Grandeza	Félix-35	Félix-40
Centro de massa (mm)	258	258
Margem estática ($M = 0.03$)	2,23	1,74
Massa na decolagem (g)	191	209
Apogeu mínimo (m)	68	54
Apogeu máximo (m)	102	84
Apogeu médio (m)	90	74

Fonte: elaborada pelos autores

A Tabela 3 resume os resultados de 12 dos 18 lançamentos realizados. Foram utilizados paraquedas do tipo hexagonal de 18 polegadas, feitos de náilon. Resultados da trajetória foram obtidos com altímetros do tipo MicroPeak (ALTUSMETRUM, [s.d.]) e Alt15K/WD (PERFECTFLITE, 2017). A unidade de aceleração é 1 g = 9,80665 m/s 2 . Nas Figuras 13 e 14 são mostradas fotos de um lançamento do foguetemodelo Félix.



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

Tabela 3 – Resultados de 12 lançamentos do foguetemodelo Félix

	· 3 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
	Félix-35	Félix-40	
Número de lançamentos	6	6	
Massa total de decolagem (g)	212 a 230	243 a 276	
Apogeu (m)	56 a 76	36 a 66	
Tempo de voo até o apogeu (s)	3,80 a 4,60	2,88 a 3,84	
Tempo total de voo (s)	15,00 a 22,05	6,34 a 12,50	
Alcance horizontal (m)	18 a 51	14 a 80	
Aceleração máxima (g)	4,8 a 7,3	4,3 a 8,1	
Velocidade máxima (km/h)	84 a 107	80 a 110	

Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 13 – Um foguetemodelo Félix na rampa de lançamento e após o voo





Fonte: acervo dos autores.

Figura 14 – Lançamento de um foguetemodelo Félix



Fonte: foto de Marcio Olesko.



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

COMENTÁRIOS FINAIS

Dois tipos de foguetemodelos didáticos foram desenvolvidos e testados. Todos os requisitos de projeto – isto é, facilidade de produção, minifoguete modular, recuperável, reutilizável, com módulo de carga, seguro, com utilização de motorfoguete comercial, projeto aberto e customizável – foram satisfeitos.

Espera-se que esses foguetemodelos possam ser utilizados como ferramenta didática para estimular o estudo de ciências e que desperte vocações para a carreira aeroespacial. Também se espera que eles mantenham viva a lembrança do professor José Félix de Santana, que dedicou grande parte da sua vida ao ensino do foguetemodelismo.

Cabe destacar que em nenhum teste em solo ou voo ocorreu falha ou anomalia no funcionamento dos 36 motores usados, como explosão do motor, ejeção da sua tubeira ou queima anômala do propelente. Portanto, considera-se que esse tipo de motor é confiável e seguro para uso didático.

Diversas ideias de experimentos com minifoguetes, de vários tipos, são apresentadas em Marchi, 2021a.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos membros do Grupo de Foguetemodelismo Carl Sagan (GFCS), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), que colaboraram durante a realização de oito testes em solo e 12 testes de voo no período de novembro de 2021 a outubro de 2022: Alice Serafim Marchi, Arthur Borges Bernardo, Carlos Eduardo Américo, Cecília Serafim Marchi, Claudia Ferrari, Cícero Serafim Marchi, Eduardo Schuerts Schlichta, Erán Martínez Ramos, Filipe Melo de Aguiar, Jerusa Serafim Weiss Marchi e Otávio Augusto Woiciekowski Colares. Também agradecemos a Amauri José da Luz Pereira e Ricardo Meister, ao coordenador do Laboratório de Máquinas Hidráulicas (LMH) e ao Diretor do Centro de Educação Física e Desportos (CED), ambos da UFPR, pela colaboração prestada.

REFERÊNCIAS

ALTUSMETRUM. **Micropeak: Introducing MicroPeak by AltusMetrum**. Disponível em: https://altusmetrum.org/MicroPeak/>. Acesso em: 16 maio. 2023.



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

- BAR. **História dos Festivais de Minifoguete**. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Festival-Historia/>. Acesso em: 16 maio. 2023.
- BAR. Norma BAR-1/2020: código de segurança para foguetemodelo de baixo impulso total (até 20 N.s).

 Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/BAR/Regulamentos/norma-BAR-1-2020_versao_2020-01-26.pdf. Acesso em: 16 maio. 2023a.
- BAR. **Norma BAR-2/2020: nomenclatura básica de foguetemodelismo**. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/apostila/norma-BAR-2-2020_versao_2020-12-03.pdf. Acesso em: 16 maio. 2023b.
- BERTOLDO, G. **Minifoguete didático Félix**. Disponível em: https://youtu.be/dL5kTEAwJe8>. Acesso em: 16 maio. 2023.
- BEXIGA, V. S. Ensinando Física com Foguetes de água e utilizando TIC através de uma proposta multidisciplinar. **Angewandte Chemie International Edition**, 6(11), 951–952, 2015.
- BISCHOFF, P. J. et al. A Science Summer Camp as an Effective way to Re-cruit High School Students to Major in the Physical Sciences and Science Education. July, 2008.
- CEOTTO, G. H. et al. RocketPy: Six Degree-of-Freedom Rocket Trajectory Simulator. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 34, n. 6, 2021.
- COLBURN, W. Where did model rocketry really start? Peak of Flight Newsletter, jul. 2012. Disponível em: https://www.apogeerockets.com/education/downloads/Newsletter314.pdf
- CORREIOS. **Proibições e restrições nos envios nacionais e internacionais**. Disponível em: https://www.correios.com.br/enviar/proibicoes-e-restricoes. Acesso em: 16 maio. 2023.
- DE SOUZA SANTOS, P. H.; LEÃO, M. F. Ensinar Física por meio do lançamento de foguete com materiais alternativos. **Gnosis Carajás**, v. 2, n. 1, 2022.
- FONSECA, M. V. S.; RODRIGUES, I. M. L.; FONSECA, M. B. S. Uma abordagem didática para a pressão interna de foguetes de garrafa PET propulsionados pela reação química entre vinagre e bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 2018.
- FOSSEY, P. L. RockSim Program Guide, 2003.
- FREECAD. **FreeCAD: Your own 3D parametric modeler**. Disponível em: https://www.freecad.org/>. Acesso em: 16 maio. 2023.
- GILLMAN, J. Straw Rockets Are Out of This World. Science and Children, v. 051, n. 02, 2013.
- HUNT, T. S. et al. Rocketry: System development experience and student outreach. **Anais...** ASEE Annual Conference, 2004.
- ISHIHARA, A.; NAKAHARA, M. **Anais...** Utilization of Educational Hybrid Rocket in an Outreach Program. EDULEARN19 Proceedings. 2019.
- MARCHI, C. H. **O primeiro foguetemodelo brasileiro: o Sondinha II.** Disponível em: https://fogueteufpr.blogspot.com/2015/07/o-primeiro-espacomodelo-brasileiro-o.html>. Acesso em: 16 majo, 2023.
- MARCHI, C. H. **Iniciando no FOGUETEMODELISMO: manual básico do FOGUETEIRO**. Disponível em: https://youtu.be/ahKn2dyVGZ4. Acesso em: 16 maio. 2023a.



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

- MARCHI, C. H. **Curso foguetemodelismo básico online**. Disponível em: https://www.youtube.com/playlist?list=PL8sw0GHHQcy03PRHwMzEMJ5dDegiGYCDz. Acesso em: 16 maio. 2023b.
- MARCHI, C. H. **FÉLIX:** minifoguete didático impresso 3D. Disponível em: https://www.youtube.com/playlist?list=PL8sw0GHHQcy04Zss4jhEM0kmulr7vy_ey. Acesso em: 16 maio. 2023a.
- MARCHI, C. H. **Minifoguete didático impresso 3D Félix**. Disponível em: https://youtu.be/WcwNcbtCa9w>. Acesso em: 16 maio. 2023b.
- MARCHI, C. H. "Cama elástica" para ejetar paraquedas no minifoguete Félix. Disponível em: https://youtu.be/vQVj5HD7JDY>. Acesso em: 16 maio. 2023c.
- MARCHI, C. H. **Motores-foguete comerciais brasileiros para minifoguetes**. Disponível em: https://youtu.be/1M_Lwf0FP1A>. Acesso em: 16 maio. 2023d.
- MARCHI, C. H. **Motor-foguete classe C de fogos de artifício: teste estático**. Disponível em: https://youtu.be/SN9LorA8dP8. Acesso em: 16 maio. 2023e.
- MITTERER, T. et al. A Rocket Experiment for Measurement Science Education. Journal of Physics: Conference Series. Anais...2018.
- NAR. **High Power Rocket Safety Code**. Disponível em: https://www.nar.org/safety-information/high-power-rocket-safety-code/. Acesso em: 16 maio. 2023.
- NAR. **Model Rocket Safety Code**. Disponível em: https://www.nar.org/safety-information/model-rocket-safety-code/. Acesso em: 16 maio. 2023.
- ONSHAPE. **onShape: Agile Product Design with Cloud-Native CAD & PDM**. Disponível em: . Acesso em: 16 maio. 2023.
- OPENROCKET. **OpenRocket: Build better rockets**. Disponível em: https://openrocket.info/. Acesso em: 16 maio. 2023.
- PERFECTFLITE. **Alt15k/WD Rev. 2 Altimeter**. Disponível em: http://www.perfectflite.com/a15k.html>. Acesso em: 16 maio. 2023.
- PRUSA. **PrusaSlicer**. Disponível em: https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/>. Acesso em: 16 maio. 2023.
- SHAHRUBUDIN, N.; LEE, T. C.; RAMLAN, R. **An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications**. Procedia Manufacturing. **Anais**...2019.
- SHEARER, D. A.; VOGT, G. L. Rockets Educator Guide. New York, 2011.
- SLIC3R. **Slic3r: Open source 3D printing toolbox**. Disponível em: https://slic3r.org/>. Acesso em: 16 maio. 2023.
- SOLIDWORKS. SolidWorks. Disponível em: https://www.solidworks.com/. Acesso em: 16 maio. 2023.
- STINE, G. H.; STINE, B. Handbook of Model Rocketry . 7th. ed. [s.l.] Wiley, 2004.
- THORNTON, S. T.; MARION, J. B. Classical Dynamics of Particles and Systems. 5th. ed. [s.l.] Cengage Learning, 2003.



FOGUETEMODELO FÉLIX: UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS E POPULARIZAÇÃO DA ASTRONÁUTICA

ULTIMAKER. **UltiMaker Cura**. Disponível em: https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/. Acesso em: 16 maio. 2023.