

## PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM FOGUETE DE BAIXO EMPUXO

**Carlos Ronyhelton Santana de Oliveira, carlosronyhelton@hotmail.com**

Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, 3801 - Tirirical, São Luís – MA

**Michael Eduardo Campos Serra, michael.eduardo@hotmail.com**

Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, 3801 - Tirirical, São Luís – MA

**Flaviano Samel Alencar, flavianosamel@hotmail.com**

Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, 3801 - Tirirical, São Luís – MA

**Fernando Lima de Oliveira, fernandololiveira@bol.com.br**

Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, 3801 - Tirirical, São Luís – MA

**RESUMO:** Esta pesquisa consistiu no projeto, construção e testes de um foguete experimental de baixo empuxo, movido a propelente sólido, com finalidade de obtenção de conhecimentos no desenvolvimento de sistemas propulsivos. Embora o projeto incorpore elementos aplicáveis a motores foguete de escala laboratorial o projeto proveu conhecimento para o desenvolvimento e operacionalização aplicados em sistemas de grande porte. No presente trabalho, a pesquisa produziu a capacidade de entender conceitos físicos envolvidos, tais como: impulso, quantidade de movimento, leis de Newton, aceleração dos corpos, movimento vertical, leis dos gases, além de familiarizar com os tipos e modelos de foguetes, de propelentes, materiais de fabricação e outros. De maneira geral as atividades aqui realizadas foram: procedimento e determinação de parâmetros de projeto; estudo, definição, manuseio e fabricação dos propelentes; estudos e definição das estruturas para a construção do motor; ensaios de materiais para estruturas; ensaios estáticos do subsistema motor/estrutura; fabricação do foguete; modelagem e desenvolvimento de uma base de lançamento; ensaios de campo do foguete completo e lançamento vertical. O lançamento vertical do foguete como atividade final apresentou bom desempenho durante o seu lançamento, o que significou considerado grau de ajustes e desempenho no desenvolvimento do protótipo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Motor Foguete 1, Propelente 2, Empuxo 3

**ABSTRACT:** *This research consisted of the design, construction and experimental rocket low thrust solid-propellant-powered, with the purpose of obtaining knowledge in the development of propulsive systems tests. Although the design incorporates elements applicable to laboratory scale rocket motor design provided knowledge to the development and operation applied to large systems. In this paper, the research has produced the ability to understand physical concepts, such as impulse, momentum, Newton's laws, throttle bodies, vertical velocity, gas laws, and familiarize yourself with the types and models of rockets, propellants, and other materials of manufacture. Generally the activities here were: procedure and determination of design parameters; study, definition, handling and manufacture of propellants; studies and define the structures for the construction of the engine; testing of materials for structures; static testing of the engine / frame subsystem; manufacturing rocket; modeling and development of a launch; Field trials of the complete and vertical rocket launch. The vertical rocket launch as a final activity showed good performance during launch, which meant regarded degree of adjustment and performance in developing the prototype.*

**KEYWORDS:** *Rocket Engine 1, Propellant 2, 3 Buoyancy*

### INTRODUÇÃO

Semelhante à corrida exploratória dos séculos XV e XVI em que os países colonizadores europeus eram capazes de construir embarcações e realizar navegações através dos oceanos encontra-se hoje a situação da corrida espacial por ser um atrativo estratégico que gera foco significativo de investimentos nacionais entre um número crescente de nações.

Há apenas meio século que o homem lançou o primeiro satélite a atividade espacial ganhou tal dimensão que se tornou presença indispensável no cotidiano das pessoas e, para as relações internacionais é essencial para elevar a influência de um país, em harmonia com as demais atividades industriais, por figurar como agente causador de aumento em poderio militar, promover

desenvolvimento econômico e conferir prestígio político.

Na tentativa de enquadrar-se entre este grupo encontra-se o Brasil por possuir uma base de lançamento estratégica que se coloca como região promissora para concentrar recursos tecnológicos e humanos a fim de absorver e difundir o conhecimento na área aeroespacial.

Neste caso, surge a necessidade em caráter científico da busca de conhecimento dos princípios básicos de atividades relativas a este setor para aquisição, aprimoramento e sistematização deste conhecimento. Neste contexto, é que surge o foco deste trabalho, pois se considera que o projeto de foguetes experimentais seja uma atividade que além de fomentar as vocações para o setor, também seja capaz de gerar os conhecimentos iniciais da engenharia aeroespacial,

uma vez que a natureza do projeto prever atividades multidisciplinares que envolvem diversas áreas do conhecimento, tais como: matemática, física, química, informática, engenharias, ciência dos materiais além de outras num único projeto.

## METODOLOGIA

Na presente pesquisa pretendeu-se alcançar todos os conhecimentos básicos no projeto e desenvolvimento de um foguete de pequeno porte. Embora o projeto incorporasse elementos aplicáveis a motores foguete de escala laboratorial, a absorção de conhecimento para o desenvolvimento e operacionalização do mesmo é aplicável em sistemas de grandes portes.

Para melhor sistematização e absorção de conhecimento o trabalho foi executado em duas etapas. A primeira etapa consistiu do planejamento, das revisões e definições de materiais e componentes básicos do sistema. A segunda etapa consistiu da construção dos componentes estruturais e acessórios, dos testes estáticos do motor foguete e operacionalização do mesmo.

### Primeiro Etapa

#### Pesquisa e Definição de Propelente

A primeira necessidade da pesquisa se evidenciou na obtenção de conhecimento técnico e científico do assunto – foguetes - e por isso inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica dos tipos, modelos, princípios de funcionamento e outros assuntos de foguetes utilizados em vários setores aeroespaciais.

Conforme a proposta da pesquisa o projeto consistiu em desenvolver um **foguete experimental** de baixo custo com **motor** movido a **propelente sólido**. Neste caso, foram estudado e posteriormente definido os tipos de propelentes sólidos utilizáveis nesse tipo de foguete. Dentre as opções de propelentes existentes foi testada a utilização da seguinte mistura: Nitrato de Potássio, Enxofre e Sacarose. Posteriormente foram realizados os testes para definir a porcentagem ideal de mistura dos reagentes para avaliar sua eficácia uma vez que existiam misturas com apenas  $\text{KNO}_3$  (Nitrato de Potássio) +  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  (Sacarose) feitas a quente e outras com  $\text{KNO}_3$ +Sacarose+S (Teleflite) feitas a seco. Como estava-se trabalhando com três tipos de reagentes, foi decidido primeiramente confeccionar o Teleflite. A justificativa está no fato de que além de apresentar um melhor resultado era de fácil preparo.

#### Confeção dos Tubos de Teste

Aqui fez-se a escolha do tipo de tubo para os teste do propelente a ser usado no sistema. No escopo de foguetes experimentais esse tubo que armazena o propelente é denominado de corpo do motor e consiste basicamente de um tubo que além de servir para armazenar propelente também é utilizado como câmara para contenção da combustão do mesmo. Inicialmente utilizou-se tubos de alumínio com 25,4mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. A Figura 1 mostra a

propelente colocado nos tubos para em seguida serem testados.



**Figura 1.** Imagem dos tubos utilizados nos testes iniciais

Após definir o tipo de tubo para os testes foi feito o cálculo de volume de propelente do tubo. Em seguida foi confeccionada uma razão de mistura da composição do combustível sólido. De acordo Sutton (2001) a razão de mistura em termos de porcentagem para a mistura do composto  $\text{KNO}_3$ +Sacarose+S é de 63/27/10 respectivamente.

Após a definição da composição e da porcentagem a mistura foi colocada (compactada) dentro do tubo de ensaio com a parte superior do tubo vedada com um material orgânico: “Serragem de Gato” ou “Pedra Sanitária”. A Figura 2 mostra a imagem dos tubos vedados e cheios de propelentes.



**Figura 2.** Tubo com propelente vedado

#### Testes do Propelente

Para avaliar a qualidade do composto (combustível) e o seu tempo de queima foram realizados testes estáticos dos propelentes. A estrutura do motor foi segura por uma morsa. O resultado deste primeiro teste é exibido na Fig. (3). Neste teste, foi percebido um tempo de queima bastante grande. Também se percebeu que os gases foram expelidos com baixa velocidade o que pode significar pouco empuxo.



**Figura 3.** Imagem do primeiro teste estático

Para o segundo e terceiro teste estático foi utilizado material de vedação em ambas as extremidades. Além disto, foi feito um furo de 5 mm em uma das extremidades para simular a tubeira do motor. Para estes testes o tempo de queima foi em média de 40s. Com isto foi percebido que os gases gerados na combustão foram expelidos em uma velocidade maior. O resultado do terceiro teste é exibido na Fig. (4).



**Figura 4.** Terceiro teste estático

Após realização destes testes chegou-se à conclusão que a “serragem” utilizada como vedação suportou as pressões exercidas durante o processo. Contudo, observou-se que o tubo de alumínio, devido à alta temperatura e pressão gerada na combustão, sofreu deformações na região de escape dos gases. Estima-se que a temperatura no tubo tenha sido de 2000 °C. A Figura 5 mostra o estado dos tubos após os testes.



**Figura 5.** Tubo de alumínio após o teste

Durante este teste foi calculado a Velocidade de Queima e a Vazão Mássica do combustível.

De acordo com a proporção da composição da mistura dos reagentes esperava-se que o tempo de queima fosse de 3 segundos e a vazão mássica é de 0,05 g/s. Neste caso, foi constatado que os resultados dos testes do presente trabalho, se comparados com valores usuais da literatura, foram muito abaixo do esperado. Ou seja, era necessário aumentar a velocidade de queima e a velocidade de saída dos gases de exaustão.

Devido a necessidade de tubos de maior resistência foi proposto a utilização de tubos de papelão. Os tubos de papelão, por fator de segurança, são frequentemente usados para testes estáticos preliminares em motores foguetes experimentais. A Figura 6 apresenta os tubos de papelão confeccionados.

Para melhorar a eficiência dos testes do propelente foi feito um canal (furo) na região central do propelente aumentando a área exposta à queima. O furo é feito ao longo de todo o comprimento do tubo. Isto possibilita que o combustível seja queimado de

maneira uniforme aumentando assim a área e a velocidade de queima.



**Figura 6.** Tubos de papelão

Por questões de segurança, para este teste foi confeccionado e testado um ignitor elétrico para realizar o acendimento do propelente a longa distância. O sistema de ignição funciona pelo aquecimento de uma pequena resistência coberta por material pirotécnico. O material da resistência deve suportar uma determinada temperatura que seja suficiente para se iniciar o processo de combustão em sua volta, sem que entre em fusão. A Figura 7 mostra o ignitor que foi confeccionado.



**Figura 7.** Ignitor

Após os testes dos ignitores fizeram-se os testes com os novos tubos, ou seja, com tubos de papelão. A razão de mistura dos compostos dos propelentes foi a mesma usada anteriormente.

A Figura 8 mostra a imagem do teste com os tubos de papelão. Neste, pôde-se verificar a diferença em relação à situação quando se fez os testes sem o furo na região central do tubo ao longo do combustível.



**Figura 8.** Imagem do teste com tubo de papelão

Foram realizados mais dois testes com os tubos de papelão. Nestes foi comparado o tempo de queima, velocidade de queima, consumo do combustível ejetado e outros.

A Tabela 1 mostra os resultados para os dois testes realizados, ou seja, do propelente com furo e sem furo no centro do tubo.

**Tabela 1.** Estimativa e resultado do teste

NOMECLATURA PARA O PROPELENTE	1º Teste	2º Teste
Tempo de queima sem o Furo (s)	40	40
Tempo de queima com o Furo (s')	2,36	2,36
Velocidade de queima sem o Furo (mm/s)	3,75	3,75
Velocidade de queima com o Furo (mm/s)	63,56	63,56
Combustível Ejetado sem o furo - consumo (N/s)	0,049	0,026
Combustível Ejetado com o furo - consumo (N/s)	0,83	0,44

Primeiramente observou-se que o tempo de queima com os furos foi bem abaixo em relação aos sem o furo, ou seja, passou de 40s para 2,36s. A velocidade de queima do propelente subiu de 3,75 para 63,56 mm/s nos dois casos com os furos. O consumo de combustível passou de 0,049 N/s para 0,83N/s e de 0,026 para 0,44 para o primeiro e segundo teste respectivamente. Percebe-se que a utilização de um furo no tubo favoreceu e melhorou significativamente os resultados dos quais possibilitará uma maior força de empuxo do motor.

#### Segunda Etapa

Conforme mencionado, foram desenvolvidas condições para realização de testes estáticos do motor foguete com finalidade principal de avaliar a qualidade do propelente (combustível) e do seu tempo de queima. Entretanto, visando progredir no desenvolvimento da pesquisa, nessa segunda etapa, avançou-se nas atividades mais específicas sobre as características físicas do motor foguete. Nesta etapa optou-se em projetar e construir os outros componentes propulsivos e estruturais que integram o foguete para posteriormente serem feitos a realização de testes estáticos do sistema completo.

Um motor foguete de propelente sólido é muito simples, geralmente possui apenas duas ou três peças principais e pode ser tratado simplesmente como um vaso de pressão de parede fina. Para fabrica-lo trabalhou-se em várias etapas de construção até que se concluíssem os componentes do motor foguete, ou seja, envelope do motor, tubo do motor, cabeçote e outros acessórios. A seguir será mostrado o procedimento da escolha e processos de fabricação de alguns destes componentes.

#### Fabricação do Motor Foguete

A escolha da configuração utilizada neste motor foguete foi levado em consideração a utilização de materiais simples de manuseio, baixo custo e fator de segurança. O fator de segurança comumente utilizado em motores foguete deste tipo é de  $CS = 1,5$ .

#### Tubo

Conforme comentado, o corpo do motor é basicamente um tubo que além de servir para armazenar propelente

também é utilizado como câmara para contenção da combustão do mesmo. Após realização de testes estáticos verificou-se que o aço 1045 comportou-se eficiente para a fabricação do corpo do motor. A pressão máxima de operação do referido motor é calculado para 7 MPa, o que é muito baixo comparado ao suportado por este tipo de aço.

Foi projetado e fabricado o tubo cilíndrico com 169 mm de comprimento e 32 mm de diâmetro contendo 6 (seis) furos equidistantes em cada extremidade com diâmetro de 5,5 mm e distantes 5 mm da extremidade do tubo. A Figura 9 mostra o tubo usado como corpo do foguete.



**Figura 9.** Tubo do motor

#### Tubeira

A tubeira tem a função de direcionar e acelerar os produtos da combustão, tanto de foguetes quanto de motores a jato, de forma que maximize a velocidade no plano de saída, geralmente para valores hipersônicos. Seu objetivo é acelerar os gases de combustão para a mais alta velocidade de ejeção possível de forma a alcançar o maior empuxo possível. Isso é alcançado projetando-se a geometria da tubeira para ser teoricamente isentrópica. Quando considerado isentrópico o fluxo depende apenas da variação da seção de área da tubeira.

Nessa nova etapa foi construído a tubeira seguindo o modelo usual convergente-divergente, que também é conhecida por Bocal de La Val ou Bocal Supersônico. A referida tubeira mostrada na Fig. (10) possui a entrada de 27 mm e saída de 24,46 mm.



**Figura 10.** Tubeira

#### Cabeçote

O projeto e fabricação do cabeçote também ocorreram de acordo com as características de esforços ao qual ele estará submetido. A geometria do cabeçote dependeu do tipo de vedação escolhido. O cabeçote e tubeira ao corpo do motor são unidos por parafusos com diâmetro especificados para fazer a fixação.

A força exercida pela pressão no cabeçote,  $F_c$ , é o produto da pressão  $P_0$  pela área resultante do diâmetro ( $D_{i,c}$ ) interno do corpo, sendo:

$$F_c = \frac{P_0 * D_{i,c}^2 * \pi}{4} \quad (1)$$

Outro fator importante no dimensionamento do cabeçote é a tensão de cisalhamento,  $T_p$ , definido pela relação do produto da pressão  $P_0$  e diâmetro interno do corpo do cabeçote  $D_{i,c}$  pelo número de parafusos instalados,  $N$ , e o diâmetro destes parafusos,  $D_p$ . Este procedimento de calculado com:

$$T_p = \frac{P_0 * D_{i,c}^2}{N * (D_p)^2} \quad (2)$$

Adicionando o coeficiente de segurança,  $CS$  (geralmente igual 1,5 nos projetos de motores foguete) e a tensão suportada pelo material do parafuso calcula-se a solução de  $N$  (número de parafusos) com:

$$N = \frac{P_0 * D_{i,c}^2 * CS}{(D_p)^2 * T_{ult}} \quad (3)$$

Dessa forma é comum projetar o número de parafusos do cabeçote para que cisalhem antes do rompimento do corpo do motor, evitando assim o lançamento de fragmentos no sentido lateral em caso de falha e funcionando como dispositivo de segurança. Na tubeira os esforços são reduzidos, pois a força de empuxo está em sentido contrário à força exercida pela pressão interna na tubeira. Maiores detalhes do cabeçote são percebidos na Fig. (11).



Figura 11. Cabeçote

O resultado final do motor foguete desenvolvido é apresentado na Fig. (12).



Figura 12. Motor foguete

### Montagem do Foguete

Após a finalização da fabricação dos componentes do motor o passo seguinte foi a construção das demais estruturas do foguete. Sua fuselagem foi construída em PVC com uma geometria tubular com seção uniforme

ao longo de seu comprimento. O perfil da ogiva foi selecionado a partir da velocidade máxima obtida no projeto preliminar e construído em náilon. As aletas foram fabricadas em honeycomb. O perfil das aletas é do tipo plano com bordas chanfrado por possuir características aerodinâmicas e facilidade de fabricação. As aletas foram laminadas externamente com fibra de carbono. As Figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, as partes do foguete separadamente e o produto final da montagem.



Figura 13. Componentes do foguete



Figura 14. Foguete GoRocket

Após o término destas atividades de execução do projeto foi realizado os preparativos para o lançamento vertical do foguete. Antes, porém, foi confeccionada uma base de lançamento. Na Figura 15 é apresentado o lançamento do Foguete GoRocket.



Figura 15. Lançamento do foguete Gorocket

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mencionado anteriormente, a construção do sistema completo deu-se em várias etapas. Antes da fabricação do motor final foi confeccionado outro motor anterior que sofreu danos por não apresentar resistência esperada aos esforços submetidos.

Durante a realização dos testes estáticos foi verificado a falha de projeto quanto a forma de junção dos parafusos aos componentes do motor. A falha ocorreu devido a concentração de tensão nos pontos de fixação

da tubeira e do cabeçote. Devido isto, ocorreu a ruptura do tubo e cabeçote conforme mostra as Fig. (16) e (17).

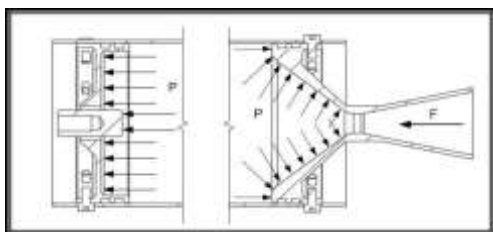


**Figura 16.** Cabeçote destruído



**Figura 17.** Tubo destruído

Como método para limitar o efeito da concentração de tensão foi feito o aumento do diâmetro dos furos no corpo do motor. Devido o corpo possuir tubo de paredes finas, um aumento do furo de fixação no corpo reduz drasticamente o efeito da concentração de tensão. O uso de parafusos com cabeça do tipo panela (parafuso allen com cabeça circular) permite fazer isso com simplicidade, pois o “ombro” do parafuso fica apoiado diretamente na peça em que é atarraxado fazendo com que a transferência dos esforços ocorra entre a cabeça do parafuso e o furo no corpo. A pressão exercida no cabeçote e o equilíbrio entre o empuxo e a força da pressão na tubeira são mostrados na Fig. (18).



**Figura 18.** Distribuição de pressão no cabeçote e tubeira e a força de empuxo (Porto, 2007)

A partir desta análise, com base na resistência mecânica e dimensões dos parafusos, pôde-se determinar o número de parafusos a serem usados em cada uma das peças conforme mostrado anteriormente, e assim, atingir a meta de resistência esperada pelo motor para as operações ao qual foi submetido.

## CONCLUSÃO

A presente pesquisa consistiu em projetar e confeccionar um foguete de escala laboratorial de forma a avaliar o desenvolvimento e a execução das etapas de construção e operação do mesmo. De acordo com o cronograma proposto, inicialmente buscou-se

entender a metodologia de desenvolvimento de construção de um foguete através da literatura existente para fundamentar os critérios de escolha, os testes e fabricação durante a execução do projeto. As linhas de ações foram divididas em duas etapas principais o qual incluíram atividades para a melhor sistematização de execução do projeto.

De maneira geral, pode-se concluir que:

- A realização do projeto foi suficiente para absorver conhecimentos básicos no desenvolvimento e construção do foguete proposto;
- A composição e forma construtiva do propelente sólido usado promoveu melhoria acentuada na avaliação de desempenho do motor foguete;
- Apesar da fabricação do primeiro motor apresentar falhas devido a existência de concentração de tensão na tubeira e no cabeçote, o problema foi solucionado remodelando o projeto e redistribuindo a concentração de tensão;
- Os parâmetros de projeto, construção, manuseio e de segurança foram importantes e consistentes para a operacionalização e lançamento do foguete;
- O desempenho do lançamento vertical do foguete mostrou que o projeto e a metodologia de cálculo foram coerentes e compatíveis os resultados esperados.

Por fim, é certo que o referido projeto pode ainda ser significativamente explorado para se obter melhor entendimento dos fundamentos e fenômenos relacionados com o desenvolvimento de um foguete. Sendo assim, apesar deste referido trabalho não conseguir respostas mais conclusivas de situações mais avançadas, tendo a necessidade de melhor aprofundamento neste ou em outros sistemas experimentais, acredita-se que por meio dos resultados aqui obtidos através da metodologia aplicada, esta pesquisa se torne uma fonte para melhorar a compreensão no desenvolvimento de foguetes experimentais de outros projetos de mesma natureza da comunidade acadêmica desta universidade.

## AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem, primeiramente, a Deus, a Universidade Estadual do Maranhão e a Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (Fapema) por toda colaboração prestada e ao professor Fernando Lima de Oliveira pela orientação.

## REFERÊNCIAS

Nakka, R.A., 2007, “Richard Nakka’s Experimental Rocketry”, Web Site, Disponível em: <<http://www.nakka-rocketry.net>>, Acesso em: 30 ago. 2012.

- Nakka, R.A., 1984, “Solid Propellant Rocket Motor Design and Testing”, Manitob.
- Porto, B.F., 2007, “Teoria, metodologia de projeto e desenvolvimento de motores foguete a propelente sólido e foguetes experimentais”, Curitiba: PUCPR.
- Sutton, G.P., 1963, “Rocket Propulsion Elements”, Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc.

#### **DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis por este artigo.